



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
NA CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM  
DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO-  
FORNO**

**Kátia Maria Brunoro Grilo Bourguignon**  
Vitória, 2004

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.



# **UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

## **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

### **INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NA CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO- FORNO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Kátia Maria Brunoro Grilo Bourguignon**  
**Orientadores: Profª Drª Maristela Gomes da Silva**  
**Prof. MSc. Fernando Lordêllo dos Santos Souza**  
**Profª Drª Eliana Zandonade**

Vitória, 2004

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória, Dezembro de 2004

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

B773i Bourguignon, Kátia Maria Brunoro Grilo, 1955-  
Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos  
com diferentes teores de escória de alto-forno / Kátia Maria Brunoro Grilo  
Bourguignon. – 2004.  
153 f. : il.

Orientador: Maristela Gomes da Silva.

Co-Orientadores: Eliana Zandonade, Fernando Lordêllo dos Santos  
Souza.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,  
Centro Tecnológico.

1. Engenharia civil. 2. Concreto. 3. Altos-fornos. 4. Escória. I. Silva,  
Maristela Gomes da. II. Zandonade, Eliana. III. Souza, Fernando Lordêllo  
dos Santos. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. V. Título.

CDU: 624

---

Aos meus pais João e Abigail.

## AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho, não poderia deixar de registrar nomes que, de alguma forma, foram responsáveis pela sua conclusão.

Meus sinceros e carinhosos agradecimentos:

À minha orientadora, professora Maristela, cuja sabedoria, competência, e seriedade, inspirou-me rumo ao campo da pesquisa. Agradeço também pela paciência, orientação e pela incansável busca no sentido de melhorar sempre.

À amiga Rosane por me incentivar a dar primeiro passo em direção à elaboração deste trabalho. A sua amizade, solidariedade e disposição em sempre ajudar, muito contribuiu para a finalização deste.

À todos os professores do curso de mestrado que muito contribuíram com a minha formação e, em especial ao professor Fernando, que, com seu profundo conhecimento da tecnologia do concreto, com a sua dedicação e sugestões, muito contribuiu para que as análises dos resultados resultassem em análises práticas e com maior fundamento metodológico.

À professora Eliana por sua cooperação, dedicação e disposição fundamentais no tratamento estatístico dos resultados.

À Nader, cuja orientação contribuiu para melhorar este trabalho, e no decorrer deste, tornou-se uma grande amiga.

Aos colegas de mestrado, companheiros das horas difíceis, agradeço a Sayonara, Érica, Tatiana, Janine, Délio e em especial a Antonina, pelo apoio em parte do levantamento bibliográfico.

Ao Mauricio pela amizade e disposição de ouvir as minhas dificuldades.

Ao pessoal técnico e auxiliar do Lemac – Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Tecnológico da UFES, Márcio, Tião, Jorge e em especial ao Carlos pela disposição ao executar os ensaios de caracterização dos materiais e ao Loriato pelo árduo trabalho realizado nos ensaios de carbonatação.

Ao Sérgio pelo apoio e disposição de sempre atender, no aperfeiçoamento da câmara de carbonatação.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos e às empresas Companhia Siderúrgica de Tubarão, Holcim, Mizu, pelo apoio material.

À amiga Dalila, que me acompanhou desde os primeiros instantes, apoiando, incentivando, ajudando, aplaudindo e trazendo para a realidade, quando era preciso. Um abraço especial.

Aos meus irmãos Leila, João Renato, Valéria, Sílvio, Eduardo, Andressa, meus filhos Felipe, Rafael e Bárbara, ao meu marido Dório minhas desculpas pelos momentos que precisaram de mim e não pude estar inteiramente disponível. Muito Obrigada

Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende. (Leonardo da Vinci)

## **SUMÁRIO**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTAS DE QUADROS**

**LISTA DE TABELAS**

**RESUMO**

**ABSTRACT**

## **SUMÁRIO**

### **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO**

<b>1.1</b>	<b>Justificativa do estudo</b>	<b>003</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>005</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>005</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da dissertação</b>	<b>005</b>

### **CAPÍTULO II – A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**

<b>2.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>007</b>
<b>2.2</b>	<b>O mecanismo da carbonatação do concreto</b>	<b>008</b>
2.2.1	A difusão do CO <sub>2</sub> nos poros do concreto	008
2.2.2	Carbonatação dos compostos hidratados do cimento	011
2.2.3	Mudanças no concreto decorrentes das reações de carbonatação	016
2.2.3.1	Aspectos químicos, físicos e mineralógicos das reações de carbonatação	016
2.2.3.2	Mudanças estruturais das matrizes de concreto	018
<b>2.3</b>	<b>Fatores que influenciam a carbonatação</b>	<b>019</b>
2.3.1	Fatores ambientais	019
2.3.1.1	Umidade relativa	019
2.3.1.2	Incidência de chuvas	021
2.3.1.3	Temperatura ambiente	022
2.3.1.4	Concentração de CO <sub>2</sub>	022
2.3.1.5	Outros aspectos ambientais	023
2.3.2	Fatores internos ao concreto	024
2.3.2.1	Idade e grau de hidratação do concreto	024
2.3.2.2	Agregado	025
2.3.2.3	Aglomerante	025
2.3.2.4	Qualidade do concreto	028
<b>2.4</b>	<b>Ensaio de carbonatação</b>	<b>030</b>
2.4.1	Ensaio naturais	031

2.4.2	Ensaio acelerados	032
2.4.3	Métodos utilizados para avaliar a carbonatação	035
<b>2.5</b>	<b>Modelos teóricos utilizados para prever a profundidade de carbonatação</b>	<b>037</b>
2.5.1	Estimativa de durabilidade das estruturas de concreto sob o ponto de vista da carbonatação	040
<b>2.6</b>	<b>Considerações sobre o capítulo</b>	<b>041</b>

### **CÁPITULO III - A ESCÓRIA DE ALTO-FORNO NA PRODUÇÃO DO CONCRETO**

<b>3.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>042</b>
<b>3.2</b>	<b>Geração e características da escória de alto-forno</b>	<b>044</b>
<b>3.3</b>	<b>Reatividade da escória granulada de alto-forno</b>	<b>049</b>
<b>3.4</b>	<b>Ativação e hidratação da escória de alto-forno</b>	<b>053</b>
3.4.1	Ativação da escória de alto-forno	056
3.4.2	Hidratação do cimento de alto-forno	058
<b>3.5</b>	<b>Propriedades do concreto com escória de alto-forno no cimento</b>	<b>059</b>
3.5.1	Consistência e pega	060
3.5.2	Calor de hidratação	061
3.5.3	Resistência à compressão	062
3.5.4	Retração	062
3.5.5	Porosidade e permeabilidade	064
<b>3.6</b>	<b>Influência da escória de alto-forno na resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos</b>	<b>065</b>
3.6.1	Resistência ao ataque de cloretos	065
3.6.2	Carbonatação	067
3.6.3	Resistência ao ataque de sulfatos	069
3.6.4	Reação álcali-sílica	070
<b>3.7</b>	<b>Considerações sobre o capítulo</b>	<b>070</b>

### **CAPÍTULO IV – MATERIAIS, MÉTODOS E PROJETO EXPERIMENTAL**

<b>4.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>072</b>
<b>4.2</b>	<b>Fatores e variáveis considerados</b>	<b>073</b>
4.2.1	Dosagem	073
4.2.2	Avaliação de propriedade do concreto e da profundidade de carbonatação	074
<b>4.3</b>	<b>Materiais utilizados</b>	<b>075</b>

4.3.1	Aglomerantes	075
4.3.1.1	Cimento <i>Portland</i> composto (CP II E-32) e Cimento <i>Portland</i> de alto-forno (CP III 32-RS)	075
4.3.1.3	Escória granulada de alto-forno moída	077
4.3.1.4	Mistura de escória de alto-forno moída e cimento <i>Portland</i> de alto-forno (CPIII – 32 – RS)	080
4.2.1	Agregado miúdo	081
4.2.2	Agregado graúdo	082
<b>4.4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>085</b>
4.4.1	Dosagem	085
4.4.1.1	Determinação do teor adequado de argamassa	085
4.4.3.2	Diagramas de dosagem	086
4.4.1.3	Produção de misturas de concreto	088
4.4.2	Avaliação das propriedades do concreto	091
4.4.2.1	Consistência	091
4.4.2.2	Massa específica do concreto fresco.	092
4.4.2.3	Massa específica, índice de vazios e absorção do concreto endurecido	092
4.4.3.4	Resistência à compressão	092
4.4.3	Carbonatação	093
4.4.3.1	Ensaio de carbonatação natural	094
4.4.3.2	Ensaio de carbonatação acelerado	095
4.4.3.2.1	Câmara de carbonatação	095
<b>4.5</b>	<b>Métodos estatísticos</b>	<b>096</b>
4.5.1	Análise dos resultados	096

## **CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

<b>5.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>098</b>
<b>5.2</b>	<b>Dosagem</b>	<b>098</b>
5.2.1	Determinação do teor adequado de argamassa	098
5.2.2	Curvas dos diagramas	099
5.2.3	Modelos de ajustes das curvas	100
5.2.4	Traços definitivos	100
<b>5.3</b>	<b>Avaliação das propriedades do concreto</b>	<b>103</b>
5.3.1	Massa específica do concreto fresco	103
5.3.2	Massa específica, índice de vazios e absorção do concreto	

	endurecido	104
5.3.3	Resistência à compressão	107
<b>5.4</b>	<b>Carbonatação</b>	<b>111</b>
5.4.1	Ensaio de carbonatação natural	114
5.4.2	Ensaio de carbonatação acelerada	122
5.4.3	Previsão da profundidade de carbonatação	127
5.4.4	Considerações sobre o tamanho da amostra.	133
<b>5.5</b>	<b>Considerações sobre o capítulo</b>	<b>134</b>
 <b>CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES</b>		 <b>136</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		 <b>141</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1-</b>	Representação esquemática do mecanismo da carbonatação.	009
<b>Figura 2.2 -</b>	Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.	020
<b>Figura 3.1 -</b>	Fluxo de produção do ferro gusa.	045
<b>Figura 3.2 -</b>	Resfriamentos aplicados à escória de alto-forno.	047
<b>Figura 3.3-</b>	Representação esquemática: a) estrutura cristalina e b) estrutura vítrea; c) estrutura vítrea da escória de alto-forno.	050
<b>Figura 3.4-</b>	Representação esquemática dos vários estágios de hidratação do cimento <i>Portland</i> .	055
<b>Figura 4.1 -</b>	Fluxograma do trabalho experimental.	072
<b>Figura 4.2 -</b>	Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno moída.	078
<b>Figura 4.3 -</b>	Difratograma de raios-X da escória granulada de alto-forno moída.	079
<b>Figura 4.4</b>	Aspecto geral da escória granulada de alto-forno moída observada ao microscópio eletrônico de varredura.	079
<b>Figura 4.5</b>	a) Aspecto geral da escória de alto-forno observada ao MEV; a análise elementar qualitativa indica predominância de Ca e Si. (b) Detalhe do cristal observado na micrografia A.	080
<b>Figura 4.6 -</b>	Formações cristalinas observadas ao MEV; a análise elementar qualitativa através do EDS indica predominância de Ca e Si.	080
<b>Figura 4.7 -</b>	Curva granulométrica da areia e as curvas dos limites granulométricos da zona 3 da NBR 7211.	082
<b>Figura 4.8 -</b>	Curva granulométrica da pedra britada N° 0.	083
<b>Figura 4.9 -</b>	Curva granulométrica da pedra britada N° 1.	084
<b>Figura 4.10 -</b>	Betoneira de tambor inclinado basculante.	090
<b>Figura 4.11 -</b>	Seqüência de mistura e moldagem dos corpos-de-prova: a) mistura; b) abatimento; descarga e transporte;	091
<b>Figura 4.12 -</b>	Seqüência de mistura e moldagem dos corpos-de-prova: a) moldagem para o ensaio de massa específica; b) verificação da massa do concreto fresco; c) moldagem dos corpos-de-prova.	091
<b>Figura 4.13 -</b>	Seqüência do ensaio de carbonatação: a) marcação do corpo-de-prova; b) retirada da seção transversal; c) seção recém-fraturada.	091
<b>Figura 4.14 -</b>	Seqüência do ensaio de carbonatação: a) ferramentas; b) limpeza da seção; c) aspersão de fenolftaleína; g), medida da profundidade de carbonatação.	094
<b>Figura 4.15 -</b>	Câmara de carbonatação	096
<b>Figura 5.1 -</b>	Diagrama de dosagem na idade de 28 dias para o cimento CPII-E-32.	101
<b>Figura 5.2 -</b>	Diagrama de dosagem na idade de 28 dias o cimento CPIII-32-RS.	101
<b>Figura 5.3 -</b>	Diagrama de dosagem na idade de 28 dias para a mistura de 50% de cimento CPIII-32-RS e 50% de escória de alto-forno.	102
<b>Figura 5.4 -</b>	Gráfico de médias para a variável massa específica.	105
<b>Figura 5.5 -</b>	Gráfico de médias para a variável: a) absorção; b) índice de vazios.	107

<b>Figura 5.6</b> - Resultados de resistência à compressão axial média para os concretos com CII E-32, CIII-32-RS e a mistura de CIII-32-RS e escória de alto-forno moída.	109
<b>Figura 5.7</b> - Curva experimental para cimento CII E.	110
<b>Figura 5.8</b> - Curva experimental para cimento CIII –32 – RS.	110
<b>Figura 5.9</b> - Curva experimental para a mistura de cimento CIII – 32 – RS e escória de alto-forno.	111
<b>Figura 5.10</b> - Detalhe da carbonatação próximo ao agregado; a) vista da seção transversal do corpo-de-prova, b) vista ampliada do mesmo corpo-de-prova.	112
<b>Figura 5.11</b> - Carbonatação natural em função da classe de resistência do concreto: a) aos 63 dias; b) aos 77 dias.	115
<b>Figura 5.12</b> - Carbonatação natural em função da classe de resistência do concreto: a) aos 91 dias; b) aos 365 dias.	116
<b>Figura 5.13</b> - Carbonatação natural do concreto C20: a) aos 63 dias; b) aos 77 dias.	117
<b>Figura 5.14</b> - Carbonatação natural do concreto C20: a) aos 91 dias; b) aos 365 dias.	117
<b>Figura 5.15</b> - Carbonatação natural do concreto C30: a) aos 77 dias; b) aos 91 dias.	117
<b>Figura 5.16</b> - Carbonatação natural do concreto C30 aos 365dias.	117
<b>Figura 5.17</b> - Carbonatação natural do concreto C35 a) aos 63 dias; b) aos 77 dias.	118
<b>Figura 5.18</b> - Carbonatação natural do concreto C35: a) aos 91 dias; b) aos 365 dias.	118
<b>Figura 5.19</b> - Carbonatação natural do concreto C40: a) aos 63 dias; b) aos 77 dias.	118
<b>Figura 5.20</b> - Carbonatação natural do concreto C40: a) aos 91 dias; b) aos 365 dias.	119
<b>Figura 5.21</b> - Carbonatação natural em função da classe de resistência do concreto, aos 365 dias	121
<b>Figura 5.22</b> - Carbonatação acelerada do concreto em função da classe de resistência: a)aos 77 dias; b) aos 91 dias.	123
<b>Figura 5.23</b> - Carbonatação acelerada do concreto C20: a) aos 77 dias; b) aos 91 dias.	124
<b>Figura 5.24</b> - Carbonatação acelerada do concreto C30: a) aos 77 dias; b) aos 91 dias.	124
<b>Figura 5.25</b> - Carbonatação acelerada do concreto C35: a) aos 77 dias; b) aos 91 dias.	125
<b>Figura 5.26</b> - Carbonatação acelerada do concreto C40: a) aos 77 dias; b) aos 91 dias.	125
<b>Figura 5.27</b> - Carbonatação acelerada em função da classe de resistência, aos 91 dias	126
<b>Figura 5.28</b> - Desenvolvimento da profundidade de carbonatação natural aos 365 dias, em função da relação água/material cimentício.	131
<b>Figura 5.29</b> - Desenvolvimento da profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias, em função da relação água/material cimentício.	132

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.1</b> - Pesquisas de carbonatação do concreto com escória de alto-forno no Brasil.	002
<b>Quadro 1.2</b> - Pesquisas de carbonatação do concreto com escória de alto-forno no mundo.	003
<b>Quadro 2.1</b> - Classificação dos ambientes de acordo com diversos autores em função da concentração de CO <sub>2</sub> .	023
<b>Quadro 2.2</b> - Influência do tipo de cimento na carbonatação de matrizes cimentícias.	026
<b>Quadro 2.3</b> - Influência observada na adição de cal hidratada na carbonatação do concreto	027
<b>Quadro 2.4</b> - Recomendações de relações água/cimMicroclimaento do concreto em função da agressividade ambiental segundo a NBR 6118.	029
<b>Quadro 2.5</b> - Classes de agressividade do meio em função das condições de exposição segundo a NBR 6118	029
<b>Quadro 2.6</b> - Recomendações de classe de resistência do concreto em função da agressividade ambiental e do cobrimento nominal segundo a NBR 6118.	030
<b>Quadro 2.7</b> - Condições de ensaios de algumas pesquisas com ensaios de carbonatação natural. Condições algumas pesquisas com ensaios de carbonatação natural	032
<b>Quadro 2.8</b> - Concentrações de CO <sub>2</sub> utilizadas em diversas pesquisas	033
<b>Quadro 2.9</b> - Permanência em câmara de carbonatação de alguns ensaios acelerados	034
<b>Quadro 2.9</b> - Métodos utilizados para medir a carbonatação de algumas pesquisas	037
<b>Quadro 3.1</b> - Percentual empregado para os diferentes tratamentos da escória de alto-forno.	.... .048
<b>Quadro 3.2</b> - Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento <i>Portland</i> .	052
<b>Quadro 3.3</b> - Modelo de hidratação da escória de alto-forno.	056
<b>Quadro 3.4</b> - Pesquisas de carbonatação em misturas com adição de escória de alto-forno.	068
<b>Quadro 4.1</b> - Fatores e variáveis adotados para a seleção do teor adequado de argamassa	073
<b>Quadro 4.2</b> - Fatores e variáveis para a etapa dos Diagramas de dosagem.	074
<b>Quadro 4.3</b> - Fatores e variáveis para a etapa da produção de misturas de concreto.	074
<b>Quadro 4.4</b> - Fatores e variáveis para a etapa de avaliação das propriedades.	074
<b>Quadro 4.5</b> - Características físicas e mecânicas do cimento <i>Portland</i> de alto-forno CII E – 32.	075
<b>Quadro 4.6</b> - Análise Química do Cimento <i>Portland</i> de alto-forno CII E-32, determinada por espectrometria de raios X.	076
<b>Quadro 4.7</b> - Análise Química do Cimento <i>Portland</i> de alto-forno CP III-32-RS, determinada por espectrometria de raios X.	076
<b>Quadro 4.8</b> - Características físicas e mecânicas do cimento <i>Portland</i> de alto-forno CP III-32–RS.	077
<b>Quadro 4.9</b> - Composição química da escória granulada de alto-forno moída.	077
<b>Quadro 4.10</b> - Características físicas da escória granulada de alto-forno moída.	077

<b>Quadro 4.11</b> - Distribuição granulométrica a laser da escória granulada de alto-forno moída.	078
<b>Quadro 4.12</b> - Características físicas e mecânicas da mistura escória de alto-forno e cimento CP III-32-RS.	081
<b>Quadro 4.13</b> - Composição granulométrica da areia	081
<b>Quadro 4.14</b> - Granulometria e caracterização física da Pedra Britada nº 0.	083
<b>Quadro 4.15</b> - Granulometria e caracterização física da Pedra Britada nº 1.	084
<b>Quadro 4.16</b> - Total de corpos-de-prova para os diagramas de dosagem.	086
<b>Quadro 4.17</b> - Relação dos traços usados para cada tipo de aglomerante.	086
<b>Quadro 4.18</b> - Consumo de materiais para os traços de concreto	087
<b>Quadro 4.19</b> - Traços utilizados na moldagem dos corpos-de-prova para avaliação das propriedades	089
<b>Quadro 4.20</b> - Massa dos materiais para a produção dos concretos.	089
<b>Quadro 4.21</b> - Número de corpos-de-prova utilizados em cada ensaio.	090
<b>Quadro 5.1</b> - Traços em massa, testados na escolha do teor de argamassa.	099
<b>Quadro 5.2</b> - Resultados da resistência à compressão axial, relação agregados secos e consumo de cimento.	099
<b>Quadro 5.3</b> - Relação dos traços para as classes 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40MPa.	102
<b>Quadro 5.4</b> - Consumo por metro cúbico de concreto, para os materiais utilizados nos traços.	103
<b>Quadro 5.5</b> - Massa específica do concreto no estado fresco.	104

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 5.1 -</b>	Modelos de ajuste das curvas	100
<b>Tabela 5.2 -</b>	Média e desvio padrão para as variáveis, absorção, índice de vazios e massa específica.	104
<b>Tabela 5.3 -</b>	Resultado de Anova e teste a posteriori de Ducan para a massa específica com fator de variação: material cimentício por concreto e classe de resistência	105
<b>Tabela 5.4 -</b>	Resultado de Anova e teste a posteriori de Ducan para a absorção e índice de vazios aos 28 dias com fator de variação: material cimentício.	106
<b>Tabela 5.5 -</b>	Resultado de Anova e teste a posteriori de Ducan para a absorção e índice de vazios com fator de variação: classe de resistência	106
<b>Tabela 5.6 -</b>	Resultados de resistência à compressão (média e desvio padrão)	107
<b>Tabela 5.7 -</b>	Resultados de Anova e teste a posteriori de Ducan para a variável resistência à compressão com fator de variação: material cimentício.	108
<b>Tabela 5.8 -</b>	Resultados de Anova e teste a posteriori de Ducan para a variável resistência à compressão com fator de variação: classe de resistência.	108
<b>Tabela 5.9 -</b>	Resultados de carbonatação natural e acelerada dos concretos C20 e C30 (média e desvio padrão)	112
<b>Tabela 5.10 -</b>	Resultados de carbonatação natural e acelerada dos concretos C35 e C40 (média e desvio padrão)	113
<b>Tabela 5.11 -</b>	Resultados de Anova e teste a posteriori de Ducan para a variável profundidade de carbonatação natural, com fator de variação: material cimentício.	114
<b>Tabela 5.12 -</b>	Resultados de Anova e teste a posteriori de Ducan para a variável profundidade de carbonatação natural, com fator de variação, classe de resistência.	120
<b>Tabela 5.13 -</b>	Resultado de Anova e teste a posteriori de Ducan para a variável profundidade de carbonatação acelerada, com fator de variação: material cimentício.	122
<b>Tabela 5.14 -</b>	Resultado de Anova e teste a posteriori de Ducan para a variável profundidade de carbonatação acelerada, com fator de variação: classe de resistência.	126
<b>Tabela 5.15 -</b>	Modelo clássico para a carbonatação natural e acelerada	127
<b>Tabela 5.16 -</b>	Modelos de ajustes da profundidade de carbonatação natural e acelerada em função da classe do concreto	129
<b>Tabela 5.17 -</b>	Modelos de ajustes da profundidade de carbonatação natural e acelerada em função da classe do concreto	130
<b>Tabela 5.18 -</b>	Estimativa da profundidade de carbonatação a partir dos modelos.	130
<b>Tabela 5.18 -</b>	Estimativa do número de leituras necessárias ao ensaio de carbonatação.	134

# INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NA CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Kátia Maria Brunoro Grilo Bourguignon<sup>1</sup>

## Resumo

A carbonatação do concreto é um dos mecanismos responsáveis pela menor durabilidade do concreto, sendo tanto maior quanto menor for a resistência do concreto. Entretanto, apesar de não causar danos aparentes ao concreto não armado, estabelece algumas condições necessárias para a corrosão das armaduras do concreto armado.

Neste trabalho, pesquisou-se a influência das classes de resistência à compressão na carbonatação natural e acelerada do concreto produzido com diferentes teores de escória de alto-forno, da ordem de 30%, 66%, 83%, em massa do cimento, para a resistência à compressão aos 28 dias, variando de 20 MPa a 40 MPa.

Dessa forma, foram dosados concretos, cujos traços foram obtidos a partir de diagramas de dosagem, atendendo as resistências propostas, empregando-se como aglomerantes o cimento CP II E-32, cimento CP III-32-RS e a proporção de 50% de cimento CP III-32-RS mais 50% de escória granulada de alto-forno moída, em massa; como agregado miúdo uma areia média e como agregado graúdo a pedra britada N° 0 e N° 1, classificados de acordo com a NBR 7211/1983.

As propriedades analisadas, massa específica, absorção, índice de vazios, resistência à compressão axial, profundidade de carbonatação natural e acelerada, tiveram seus resultados analisados estatisticamente e uma correlação entre o aumento da resistência característica do concreto e a diminuição da profundidade de carbonatação foi estabelecida.

Foram também obtidos os coeficientes de carbonatação, naturais e acelerados, e estimado o tempo necessário para que a frente de carbonatação atinja a armadura, considerando-se os cobrimentos estabelecidos na NBR 6118/2003, para a classe de agressividade da região da Grande Vitória, no estado do Espírito Santo.

Com base nos resultados experimentais, para uma mesma classe de resistência, ficou comprovada a dependência do mecanismo da carbonatação da relação água/materiais cimentícios e a maior carbonatação das misturas com o cimento CP III-32-RS, com e sem a substituição de escória granulada de alto-forno moída, quando comparadas às profundidades de carbonatação de concretos confeccionados com o cimento CP II E-32.

<sup>1</sup>Eng. Civil, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES. E-mail: kátia.bourguignon@terra.com.br.

# INFLUENCE OF THE COMPRESSIVE STRENGTH IN THE CONCRETE CARBONATION WITH DIFFERENT CONTENTS OF BLAST FURNACE SLAG

Kátia Maria Brunoro Grilo Bourguignon<sup>1</sup>

## Abstract

Amongst the responsible mechanisms for the lesser durability of the concrete, the carbonation stands out. The lesser the compressive strength of the concrete, the bigger mechanism will be. However, although it's not harmful for the concrete without reinforcement, it establishes some necessary conditions for the corrosion of the concrete reinforcement bars.

In this work, it was searched the influence of compressive strength classes in the natural and accelerated carbonation of the concrete produced with different blast furnace slag contents, with 30%, 66%, 83% ratios, in cement mix, for the compressive strength at 28 days, varying from 20 MPa to 40 MPa.

Thus, there was dosed concretes, whose traces had been gotten from dosage diagrams, according to the proposed strength, using as binder the CP II E-32 cement, CP III-32-RS cement and the ratio of 50% of CP III-32-RS cement with 50% of ground blast furnace slag; as fine aggregate an average sand and crushed stone as coarse aggregate N° 0 and N° 1 in accordance with NBR 7211/1983.

The analyzed properties, specific gravity, absorption, empty pores ratio, axial compressive strength, depth of usual and accelerated carbonation, had had its results statistically analysed and, a correlation between the increase of the characteristic strength of the concrete and the reduction of the depth of carbonation, was established.

The carbonation coefficients had also been gotten, usual and accelerated methods, and the necessary time had been estimated so that the carbonation front reaches the reinforcement, considering the covering established in NBR 6118/2003, for the aggressiveness class for the Grande Vitória area, in the state of the Espírito Santo.

On the basis of the experimental results, for a same strength class, was proven the dependence of the carbonation mechanism of the water/cementitious materials relation and the biggest carbonation of the mixtures with cement CP III-32-RS, with and without ground granulated blast-furnace slag replacing in concrete, when compared with the concrete carbonation depths made with CP II E-32 cement.

<sup>1</sup>Civil Engineer, MSc student of PPGEC/UFES. E-mail: [katia.bourguignon@terra.com.br](mailto:katia.bourguignon@terra.com.br).

## **CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO**

O concreto, um material utilizado em grande escala no mundo, tem sido cada vez mais produzido com materiais cimentícios suplementares (MARCHAND, 2001), o que contribui para diminuir o impacto provocado pela produção de cimento, que adiciona à atmosfera, segundo ISAIA; GASTALDINI (2004), cerca de uma tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer produzido.

As indústrias de cimento procuram formas de adequar sua produção aos procedimentos de conservação da natureza, seja na utilização de métodos e equipamentos para conter as emissões de material particulado ou de gases, seja na utilização de pneus descartados e outros resíduos como combustíveis nos fornos de clínquer ou, ainda, na utilização de adições minerais ao clínquer de cimento *Portland*. Sabe-se que o processamento da tonelada de escória consome menos de 20% de energia do que o processamento de uma tonelada de cimento *Portland* (ALDASORO, 1985; JOHN, 1995).

Assim, a busca por materiais e formas de energias que produzam menos agressividade ao meio ambiente e sejam economicamente viáveis, tem direcionado as várias pesquisas para o uso de escória de alto-forno, moída, substituindo parte do cimento em elevados teores.

Essa substituição ocasiona um menor teor de hidróxido de cálcio no concreto endurecido, uma vez que a escória granulada de alto-forno possui um menor teor de C<sub>3</sub>S<sup>1</sup>, se comparado com o clínquer do cimento *Portland*; assim sendo, nas misturas com essa adição mineral observa-se uma menor alcalinidade da água dos poros do concreto (OLIVEIRA, 2000).

Essa menor alcalinidade da água dos poros do concreto conduzirá a uma maior carbonatação e condições para a corrosão da armadura (MATALA, 1994). Dessa forma, no Brasil e no mundo, são pesquisadas alternativas para minimizar o mecanismo da carbonatação e evitar a maior velocidade de penetração do CO<sub>2</sub> atmosférico no concreto, principalmente, de misturas com escória granulada de alto-forno.

No Quadro 1.1 estão apresentados alguns centros de pesquisas no Brasil, referências nos estudos de carbonatação de concretos com escória de alto-forno.

---

<sup>1</sup> C<sub>3</sub>S (silicato tricálcico) – composto responsável pelo maior teor de Ca(OH)<sub>2</sub>, produzindo em sua reação de hidratação, cerca de 39%, em massa, de hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

**Quadro 1. 1: Alguns centros referências em pesquisas de carbonatação do concreto com escória de alto-forno no Brasil.**

Centro	Linha de pesquisa	Referência
Universidade Federal do Espírito Santo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Influência de elevados teores de escória de alto-forno na carbonatação e retração de concretos.</li> <li>▪ Influência da resistência na carbonatação de concreto com vários teores de escória de alto-forno.</li> </ul>	COELHO (2002); COELHO; SILVA; SOUZA; ZANDONADE (2003); BOURGUIGNON; SILVA; SOUZA; ZANDONADE (2004).
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Influência da adição de escória de alto-forno no concreto armado no mecanismo de corrosão das armaduras.</li> <li>▪ Influência da relação água/cimento na carbonatação do concreto com diferentes tipos de cimentos e: estimativa da vida útil de projeto.</li> <li>▪ Influência da dosagem na carbonatação dos concretos.</li> </ul>	BAUER; HELENE (1993); HELENE; MITIDIERI FILHO; THOMAZ (1995); BAUER, (1995); NUNES (1998).
Universidade de Brasília	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Influência da ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloreto de cimentos nacionais com e sem adição de escória de alto-forno, em relação à corrosão de armaduras.</li> </ul>	MONTEIRO (1995), MONTEIRO; NEPOMUCENO (1996).
Universidade Federal de Santa Maria	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Influência da finura da escória na carbonatação de concretos com adições minerais.</li> <li>▪ Desempenho do concreto estrutural com altos teores de adições minerais e cal hidratada.</li> <li>▪ Desempenho do concreto estrutural com altos teores de adições minerais e cal hidratada e a influência no aumento da despassivação da armadura.</li> <li>▪ Estudo da sustentabilidade de concretos com teores muito elevados de adições minerais.</li> <li>▪ Influência das adições minerais e dos ativadores químicos na carbonatação e absorção capilar de concretos.</li> </ul>	GASTALDINI; ISAIA; ZANELLA (1999); STUMPP; ISAIA; GASTALDINI (2002); SPERB <i>et al</i> (2003); ISAIA;GASTALDINI, (2003); ISAIA;GASTALDINI (2004)
Universidade Estadual de Campinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Influência da cura térmica na carbonatação do concreto com escória de alto-forno.</li> </ul>	MARTINS (2001); FERREIRA JUNIOR (2003).
Universidade Federal de Goiás	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Influência de diferentes relações água/aglomerante na carbonatação no concreto de cobrimento com adições minerais.</li> <li>▪ Estudos sobre a influência das adições minerais na carbonatação do concreto e ao ataque de cloretos em concretos.</li> </ul>	CASTRO (2003); CASTRO; CASCUDO; CARAZEK; LOPEZ (2003). CASTRO;FERREIRA; LOPEZ; CASCUDO; CARAZEK (2004).
Universidade Federal do Rio de Janeiro	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Carbonatação do concreto com diferentes tipos de cimento e agregados.</li> </ul>	SIERRA; SOUZA (1996)
Universidade Federal de Minas Gerais	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pesquisas sobre o efeito da carbonatação na microestrutura do concreto com adição de escória e cal.</li> </ul>	RIGO DA SILVA <i>et al</i> , (2002).

No Quadro 1.2 estão apresentados alguns centros de pesquisas no mundo, referências nos estudos de carbonatação de concretos com escória de alto-forno.

**Quadro 1.2: Alguns centros referências em pesquisas de carbonatação do concreto com escória de alto-forno no mundo.**

Centro	Linha de pesquisa	Referência
National Research Council of Canada/ Research, Development, HEIDELBERGER Zement AG, Germany	<ul style="list-style-type: none"> <li>Influência da escória de alto-forno na carbonatação do concreto por um longo período de exposição (20 anos).</li> </ul>	LITVAN; MEYER (1986).
Building Research Establishment- UK	<ul style="list-style-type: none"> <li>Influência do cimento <i>Portland</i> comum e da adição de escória de alto-forno moída, na durabilidade de paredes depois de 2,5 anos de exposição.</li> <li>Influência do cimento de alto-forno sobre a durabilidade do concreto em ambientes marinhos.</li> </ul>	THOMAS <i>et al</i> (1990); OSBORNE (1999).
Cement Concrete Association	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análise da estrutura dos poros na carbonatação de pastas de cimento com adição de escória comparadas à pastas com cimento sem escória.</li> </ul>	PARROT (1992).
University of Ghent, Zwijnaarde, Belgium	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carbonatação do concreto produzido com cimento de alto-forno em ambientes naturais e acelerados, com diferentes umidades.</li> </ul>	DE CELEUKAIRE; VAN NIEUWENBURG (1993).
Technical Research Centre of Finland	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microestrutura, permeabilidade e influência da resistência na carbonatação de concretos com escória granulada de alto-forno.</li> </ul>	HÄKKINEN (1993).
Helsinki University of Technology-Finland	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microestrutura e carbonatação do concreto com escória de alto-forno.</li> </ul>	MATALA (1994).
Wakayama National College of Technology-University of Kyoto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistência e carbonatação de concreto com elevados teores e diferentes finuras de escória de alto-forno.</li> </ul>	NAKAMOTO; TOGAWA (1995).
Thechnical University Clausthal-Zellerfel, Germany	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durabilidade do concreto, de edifícios antigos, produzido com cimento de alto-forno.</li> </ul>	GEISELER; KOLLO; LANG (1995).
University of Leeds-UK	<ul style="list-style-type: none"> <li>Influência da estrutura dos poros na carbonatação de pastas.</li> </ul>	NGALA; PAGE (1997).
International Centre for Sustainable Development of Cement and Concrete, CANMET, Ottawa	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carbonatação do concreto produzido com cimento <i>Portland</i> comum e adição de 35% de escória de alto-forno em condições de exposição externas ao ar livre.</li> </ul>	MALHOTRA; <i>et al</i> (2000).
Monash University, Clayton- Australia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carbonatação do concreto produzido com escória de alto-forno ativada com silicato de sódio e hidróxido de sódio.</li> </ul>	BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG (2001).

## 1.1 Justificativa do estudo

A preservação dos recursos naturais é uma expectativa de que a reutilização de produtos siderúrgicos como a escória de alto-forno, em elevados teores, substituindo parte do cimento

na produção de concreto, seja uma das tentativas de minimizar o consumo de energia e a liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera pelas indústrias de cimento.

Sabe-se que a produção de ferro-gusa no Brasil atingiu a ordem de 32,039 milhões de toneladas, no ano de 2003 (IBS, 2004). Se se considerar a geração de escória de alto-forno, da ordem de 200 a 300 kg/t de ferro-gusa produzido, pode-se então, estimar uma geração de escória granulada de alto-forno na faixa de 6 a 9,1 milhões de toneladas nesse ano, (CST, 2004).

A previsão do funcionamento de um terceiro alto-forno, até o ano de 2006, na Companhia Siderúrgica Tubarão, no Estado do Espírito Santo, resultará em um aumento da ordem de 600 mil toneladas anuais na geração de escória de alto-forno somente no Estado do Espírito Santo (CST, 2004).

Se, por outro lado, esse acréscimo na geração de escória granulada de alto forno, neste estado, fosse utilizado na produção de cimento, cerca 600 mil toneladas de clínquer<sup>2</sup> deixariam de ser produzidos e o equivalente em CO<sub>2</sub><sup>3</sup> poderia deixar de ser lançado na atmosfera.

Dessa forma, os visíveis ganhos ambientais, por meio de um menor consumo energético na produção do cimento e na extração das matérias-primas justificam estes tipos de reciclagem. O uso da escória granulada de alto-forno, dá-se sob as diferentes formas, (LONGO; TORRENT, 1986; GLASSER, 1989):

- moída em conjunto com o clínquer e gipsita na produção do cimento de alto-forno;
- moída em separado e adicionada ao clínquer nas fábricas;
- moída em separado e adicionada às misturas, substituindo parte do cimento e no concreto (LONGO; TORRENT, 1986).

O processo da substituição de escória de alto-forno ao clínquer, moída separadamente ou não, é utilizado largamente por diversos países e, de acordo com LONGO; TORRENT (1986), não existem diferenças significativas nas resistências de argamassas e concretos para as diferentes formas de utilização da escória de alto-forno. Além disso, a moagem em separado proporciona uma alta flexibilidade na produção de cimentos com escória de alto-forno em uma ampla variedade de propriedades (LANG; BRODERSEN, 2000).

---

<sup>2</sup> A produção de cimento no Espírito Santo foi de 1.193.424 toneladas no ano de 2003 (SNIC, 2004).

Assim sendo, esta pesquisa pode contribuir para ampliar o uso mais flexível da escória granulada de alto-forno no concreto, além de contribuir com as pesquisas sobre a influência da resistência à compressão na carbonatação dos concretos que utilizam elevados teores de adição de escória de alto-forno, adicionada diretamente à mistura de concreto. O estudo também pode contribuir, no sentido de sanar dúvidas quanto ao uso do cimento com adição de escória granulada de alto-forno no que concerne as recomendações de durabilidade estabelecidas na NBR 6118/2003.

## **1.2 Objetivo geral**

Analisar a influência das classes de resistências na carbonatação natural e acelerada, do concreto produzido com diferentes teores de escória de alto-forno em substituição ao cimento. Para tanto foram consideradas as resistências à compressão na faixa de 20 MPa a 40 MPa, utilizando-se como aglomerante, os cimentos CP II E-32, CP III-32-RS e a mistura de 50% de cimento CP III-32-RS mais a adição de 50% de escória granulada de alto-forno moída, em massa.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Avaliar as propriedades (resistência à compressão, massa específica, absorção e índice de vazios).
- Avaliar a ação da carbonatação natural, em ambiente controlado de laboratório de concretos.
- Avaliar a ação da carbonatação acelerada, em câmara de carbonatação, com concentração de CO<sub>2</sub> de 100%, de concretos, na faixa de 20 MPa a 40 MPa de resistência à compressão aos 28 (vinte e oito) dias.
- Avaliar a influência da resistência à compressão de concretos, aos vinte e oito dias de idade, na profundidade de carbonatação.
- Estabelecer as equações representativas da carbonatação natural e acelerada.

---

<sup>3</sup> Segundo ISAIA (2004), a produção de uma tonelada de clínquer equivale a uma tonelada de CO<sub>2</sub>.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está subdividida em 6 (seis) capítulos. Na introdução desta dissertação, **Capítulo 1**, aborda-se o uso de escória de alto-forno em elevados teores, substituindo parte do cimento, as justificativas e os objetivos deste trabalho, assim como a estrutura desta dissertação.

No **capítulo 2**, está apresentada uma revisão de literatura sobre o mecanismo de carbonatação, os fatores que o influenciam, os ensaios e métodos utilizados para avaliar esse mecanismo e a relação dele com a durabilidade.

No **capítulo 3**, estão discutidas as características da escória de alto-forno, sua hidratação e ativação, a influência da escória de alto-forno nas principais propriedades de concretos, além da sua influência no mecanismo de carbonatação.

No **capítulo 4**, foi desenvolvido um trabalho experimental para avaliar a influência da resistência à compressão no mecanismo da carbonatação do concreto e obter uma correlação entre essas variáveis, em misturas de concreto com diferentes teores de escória de alto-forno, da ordem de 30%, 66%, 83%, em massa, substituindo parte do clínquer. Também foram estabelecidas diferentes resistências à compressão aos 28 dias, da ordem de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa.

No **capítulo 5**, são apresentados e analisados os diagramas de dosagem obtidos, os resultados nos ensaios de resistência à compressão axial, massa específica, absorção e índice de vazios e de profundidade de carbonatação, natural e acelerada. Os resultados do ensaio de carbonatação foram analisados em função da resistência à compressão aos vinte e oito dias, proposta para as misturas de cada tipo de aglomerante utilizado no concreto.

No **capítulo 6**, são apresentadas as principais conclusões e propostas para a continuidade da pesquisa.

## CAPÍTULO II – A CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

---

### 2.1 Introdução

A carbonatação do concreto de cobrimento das armaduras é um mecanismo importante que contribui para uma grave patologia das estruturas de concreto: a corrosão das armaduras.

Para que haja a corrosão da armadura, ou seja, o ferro metálico se transformar em ferrugem, é necessária a existência de um eletrólito e a presença do oxigênio. No caso do concreto, a água atua como eletrólito, quando a sua quantidade é suficiente (HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994; AÏTCIN, 2000).

Dentre os principais agentes responsáveis pela corrosão da armadura, nas estruturas de concreto armado, destacam-se o CO<sub>2</sub> atmosférico e os cloretos. Deve-se considerar que a corrosão se tornará mais crítica se o mecanismo da carbonatação estiver associado com a presença de cloretos (HELENE, 1993, MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Assim sendo, o crescente aumento da poluição ambiental conduz também à aceleração da deterioração das estruturas de concreto armado, principalmente pela diminuição do pH da água dos poros do concreto, decorrente das reações químicas entre o CO<sub>2</sub> atmosférico e os compostos hidratados do cimento, no concreto de recobrimento da armadura (HELENE, 1993).

As concentrações em volume de CO<sub>2</sub> no ambiente, de acordo com HELENE (1993) e CHANG *et al* (2004), variam de 0,02% em ambientes rurais a 1,2% em centros urbanos com tráfego pesado, valores esses que dependem das características ambientais de cada local.

Nas medições efetuadas por SAETTA; VITALINI (2003), as concentrações de CO<sub>2</sub> no ambiente corresponderam a 0,015%; 0,036% e 0,045% em volume; em campo aberto, centro da cidade e zona industrial, nesta ordem.

Assim sendo, neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura sobre o mecanismo da carbonatação no concreto, as reações de carbonatação, as mudanças estruturais decorrentes dessas reações, os fatores que influenciam esse mecanismo e os métodos e ensaios utilizados para avaliá-lo.

## 2.2 O mecanismo da carbonatação do concreto

O concreto é um material heterogêneo, poroso e complexo, usado em grande escala nas obras de engenharia. Quando visto através do microscópio, observam-se três fases: os agregados, a pasta endurecida e uma zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A pasta endurecida é constituída de cimento, vazios e água. Esta, ao entrar em contato com o cimento, forma produtos estáveis em um meio de elevada alcalinidade decorrente dos álcalis dissolvidos, NaOH e KOH, e da precipitação do hidróxido de cálcio<sup>1</sup> (RICHARDSON, 1988; PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991; AL-KADHIMI *et al.*, 1996).

Os produtos hidratados do cimento, originados de uma fase líquida que se saturou de íons, combinam-se e preenchem os espaços ocupados pela água. Os vazios e os poros capilares da pasta são os espaços não preenchidos entre as partículas de cimento, e sua maior ou menor quantidade no concreto vai depender das condições de execução e dos materiais constituintes, onde cada um desses materiais independentes contribui para a permeabilidade do concreto. Esses poros, observados ao microscópio eletrônico de varredura, estão preenchidos pela água capilar e pela água adsorvida<sup>2</sup> (RICHARDSON, 1988; MEHTA; MONTEIRO, 1994; AİTCIN, 2000).

O CO<sub>2</sub> da atmosfera entra nesses poros do concreto, dissolve-se na água existente no interior deles e reage com os compostos do cimento, formando carbonatos e outros compostos. Esse mecanismo é denominado carbonatação.

### 2.2.1 A difusão do CO<sub>2</sub> nos poros do concreto

A penetração do CO<sub>2</sub> nos poros do concreto é lenta e, ao reagir com os compostos hidratados da pasta de cimento formando carbonatos e outros compostos, provoca algumas alterações físico-químicas como o aumento da resistência à compressão, diminuição da permeabilidade, aumento do módulo de deformação e aumento da dureza (RICHARDSON, 1988; HELENE, 1993; STTEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

À medida que o CO<sub>2</sub> vai penetrando no concreto, formam-se zonas com pH diferentes: uma zona com pH  $\leq 9$ , denominada zona carbonatada, próxima à superfície; uma zona com pH no

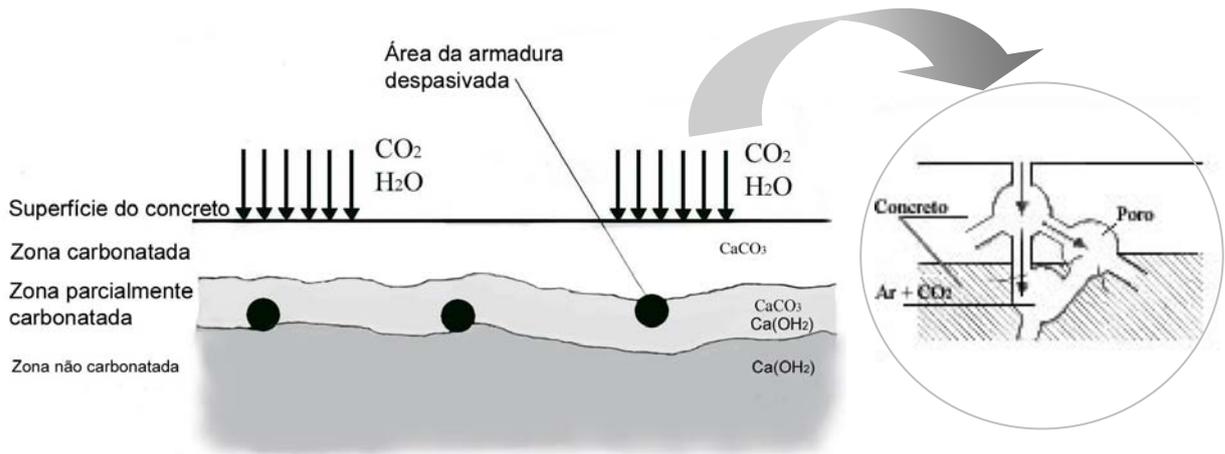
---

<sup>1</sup> Íons K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup> e OH<sup>-</sup>.

<sup>2</sup> Água capilar é a água que está livre de forças de atração exercidas pela superfície; água adsorvida é a água próxima à superfície e que está influenciada pelas forças de atração (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

entorno de 13,5, denominada região não carbonatada; e, entre elas, uma zona de transição, denominada zona parcialmente carbonatada. O avanço das reações do  $\text{CO}_2$  com os compostos do cimento e em particular com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é denominado frente de carbonatação, que avança lentamente para o interior do concreto e, quando o pH próximo à armadura é reduzido abaixo de 9, causa a despassivação da armadura (HELENE; MITIDIERI FILHO; THOMAS, (1995); NUNES, 1998; SATO, 1998).

Na Figura 2.1 observa-se uma representação esquemática do mecanismo da carbonatação.



**Figura 2. 1: Representação esquemática do mecanismo da carbonatação (adaptado de RICHARDSON, 1988; BAKKER *apud* CASCUDO, 1997)**

As diferenças de concentrações de  $\text{CO}_2$  entre o ambiente atmosférico e a estrutura porosa do concreto constituem a principal causa da penetração do  $\text{CO}_2$  no concreto, mecanismo denominado de difusão. A difusão é um mecanismo de transporte de íons que acontece pela colisão das moléculas, que se movem na direção da menor concentração desses íons. Essa difusão ocorre através dos poros capilares, microfissuras e vazios de ar que formam uma rede de interconectividade no concreto (RICHARDSON, 1988; HELENE, 1993).

Os poros capilares, existentes na pasta endurecida, possuem dimensões e quantidades que são responsáveis pela taxa de carbonatação em concretos e argamassas<sup>3</sup> (MEHTA; MONTEIRO, 1994; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999).

Segundo WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN (1999), inicialmente, pensava-se que somente a quantidade de poros era responsável pela taxa de propagação da carbonatação. Ao pesquisar a influência das dimensões e do volume total dos poros na carbonatação, esse autor

<sup>3</sup> Os vazios da pasta, segundo MEHTA; MONTEIRO, (1994), têm aproximadamente as seguintes dimensões: espaços interlamelares- variam de 0,0005  $\mu\text{m}$  a 0,0025  $\mu\text{m}$ , vazios capilares – variam de 3  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  e os vazios de ar aprisionado variam de 50  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ .

observou que os poros com dimensão maior do que 450 Å eram os principais responsáveis pela taxa de carbonatação, não excluindo totalmente a participação dos poros com dimensões menores do que 450 Å.

A difusão é o mecanismo dominante no ingresso de íons através do concreto, porque os gradientes de pressão não justificam os seus ingressos pelo mecanismo da permeabilidade. Entretanto, para alguns pesquisadores, a penetração de CO<sub>2</sub> no concreto pode ocorrer pelo mecanismo de permeabilidade quando são utilizados teores de CO<sub>2</sub> maiores que os encontrados na atmosfera, em testes acelerados (RICHARDSON, 1988; HELENE, 1993).

A difusão do CO<sub>2</sub> para o interior do concreto é descrita pelas Leis de Fick, de acordo com a Equação 2.1, que representa a difusão em um estado estacionário, e pela equação 2.2, correspondente à 2ª Lei de Fick, na forma simplificada, representando a difusão de um gás, em função do tempo, através de um material (RICHARDSON, 1988; PAPADAKIS *et al*, 1992, HELENE, 1993).

$$Q = -D \cdot A \cdot \frac{d_c}{d_x} \quad \text{Equação 2. 1}$$

Onde: Q – taxa de transferência do material;  
 D – coeficiente de difusão, que depende da natureza do material;  
 A – área da seção transversal através da qual ocorre o fluxo;  
 $\frac{d_c}{d_x}$  – gradiente de concentração (c representa a concentração da substância difundida e x a distância entre o plano de referência medido e a seção transversal).

$$x = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 2. 2}$$

Onde: x - profundidade de carbonatação  
 t - tempo de exposição  
 k<sub>(CO<sub>2</sub>)</sub> - coeficiente que depende da difusão do CO<sub>2</sub>, que por sua vez depende do material e das condições do ambiente

O coeficiente de difusão, da equação 2.1, é função da temperatura, da umidade relativa e do grau de carbonatação do concreto; e o sinal negativo se refere ao fluxo de um gás, oposto à direção da diminuição de concentração, ou seja, do exterior para dentro de um material com concentração menor desse gás (RICHARDSON, 1988; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

A medida dos coeficientes de difusão do CO<sub>2</sub> no concreto, pastas ou argamassas, diferente da medida da profundidade de carbonatação, não pode ser realizada experimentalmente porque,

já durante os ensaios, ocorre a carbonatação, originando resultados incoerentes dos coeficientes de difusão (HELENE, 1993; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Essa carbonatação durante os ensaios modifica as condições iniciais, resultando em variação do diâmetro dos poros, alteração dos canais capilares e da composição da água dos poros do concreto, pastas e argamassas, o que ocasionará diferenças no ingresso do CO<sub>2</sub> em relação às condições iniciais do ensaio (RICHARDSON, 1988; HELENE, 1993; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Para avaliar a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> no concreto, pastas ou argamassas, empregam-se gases inertes<sup>4</sup>, tais como o oxigênio e nitrogênio, que têm um menor grau de interferência com a parede dos poros do concreto. O teste de permeabilidade a oxigênio no concreto é um dos mais utilizados pela similaridade com a difusão do CO<sub>2</sub>. (HELENE, 1993; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Uma vez no interior do concreto, o CO<sub>2</sub> reage com os compostos hidratados como discutido no item 2.2.2 (RICHARDSON, 1988; HELENE; MITIDIERI FILHO; THOMAZ, 1995); NUNES, 1998).

Além do CO<sub>2</sub>, outros gases penetram no concreto, como o dióxido de enxofre atmosférico (SO<sub>2</sub>) e o gás sulfídrico H<sub>2</sub>S, os quais reagem com o hidróxido de cálcio, resultando, como no mecanismo da carbonatação, em redução do pH da água dos poros. Entretanto, o SO<sub>2</sub> é encontrado na atmosfera em teores muitas vezes menor do que o CO<sub>2</sub> e se, em elevados teores, pode conduzir à maior formação de etringita no concreto (RICHARDSON, 1988; HELENE, 1993).

### **2.2.2 Carbonatação dos compostos hidratados do cimento**

A carbonatação de materiais cimentícios, sob o ponto de vista químico, envolve a reação dos compostos hidratados do cimento: o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminatos e ferroaluminatos; dos álcalis e outros com o CO<sub>2</sub> atmosférico (RICHARDSON, 1988; JOHNSTONE; GLASSER (1992); HELENE, 1993; HOUST; WITTMANN, 2002; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Essa reação compreende diversos mecanismos físico-químicos, sendo, entretanto, de consenso, a necessidade de dissolução do CO<sub>2</sub>, na solução aquosa, para então iniciar a

---

<sup>4</sup> gases inertes neste caso são gases que não reagem com os produtos hidratados do cimento (HELENE, 1993).

carbonatação dos compostos hidratados segundo as equações 2.3, 2.4 e 2.5 (RICHARDSON, 1988).

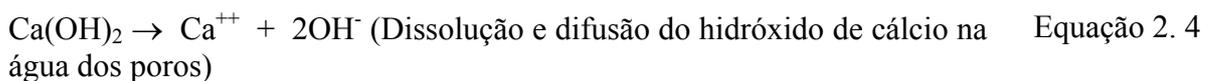


Sabe-se que, desde os primeiros instantes da hidratação, os compostos anidros do cimento solubilizam-se e originam compostos pouco solúveis, íons potássio ( $\text{K}^+$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ) e íons hidroxila. Os hidróxidos alcalinos permanecem livres pela grande solubilidade desses hidróxidos.

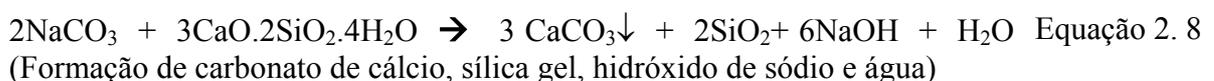
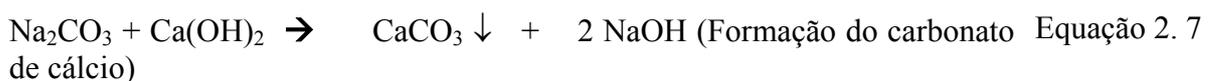
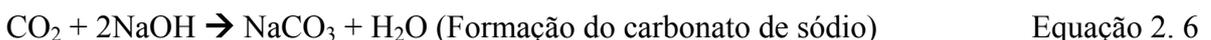
Esses íons dissolvidos na água dos poros dos materiais cimentícios não são incorporados aos compostos hidratados, acumulam-se na água dos poros dos materiais cimentícios e, além dos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  originados da hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ , são os responsáveis pelo elevado pH da água dos poros (HELENE, 1993; OLIVEIRA, 2000; HOUST; WITTMANN, 2002; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002; MITRE; BARBOSA; HELENE (2002).

O hidróxido de cálcio possui menor solubilidade do que os hidróxidos de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e de potássio ( $\text{KOH}$ ), estando presente nos materiais cimentícios na forma de cristais ou em pequenas quantidades de íons dissolvidos e tendo sua solubilidade determinada pela quantidade de íons hidroxila presentes na solução (HELENE, 1993).

A reação de carbonatação envolve a dissolução e difusão do hidróxido de cálcio na água dos poros, e a reação com  $\text{CO}_2$  dissolvido formando carbonato (RICHARDSON, 1988).



Para HOUST; WITTMANN (2002), as reações de carbonatação podem ser descritas como nas equações 2.6, 2.7 e 2.8.



De acordo com HOUST; WITTMANN (2002), as equações acima podem ser também descritas para o hidróxido de potássio, onde a equação 2.3 envolve a diminuição do pH da

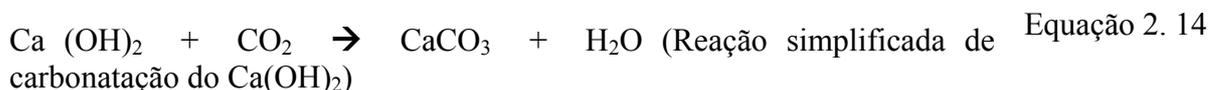
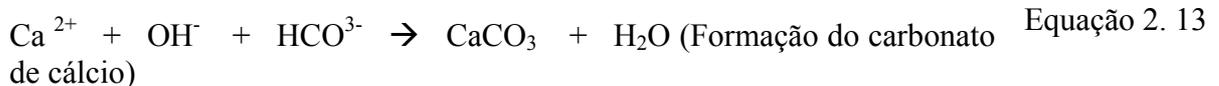
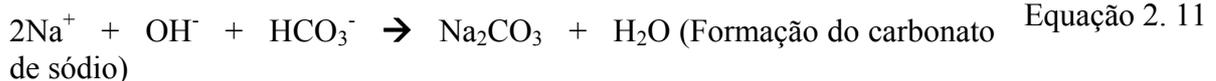
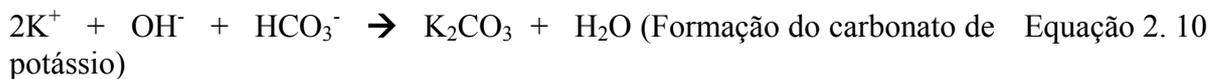
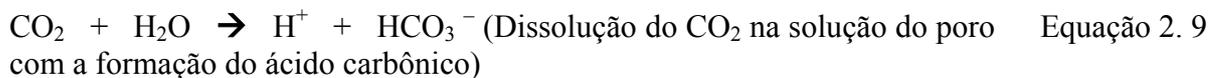
solução dos poros, assim como o hidróxido de cálcio deve estar dissolvido na água dos poros do concreto para depois reagir e precipitar carbonato, conforme as conclusões de JOHNSTONE; GLASSER (1992), que afirmam não haver evidências para proporem que o hidróxido de cálcio é diretamente transformado em carbonato de cálcio, exceto nas condições de umidades relativamente baixas.

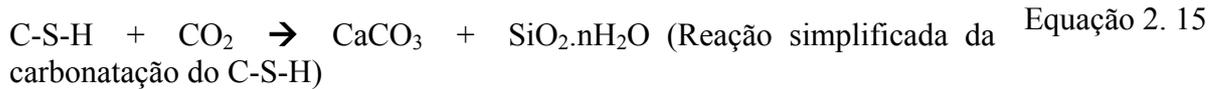
Para STEFFENS; DINKLER; AHRENS (2002) e MITRE; BARBOSA; HELENE (2002), a reação do CO<sub>2</sub> com o Ca(OH)<sub>2</sub> é complexa e se dá, inicialmente, pela dissolução do CO<sub>2</sub> na solução aquosa dos poros dos materiais cimentícios e na formação do ácido carbônico, como descrito nas equações 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10.

O ácido carbônico, que é um ácido fraco, atua primeiro sobre os álcalis do cimento (NaOH e KOH), carbonatando-os e, como resultado das reações, o pH da água dos poros diminui. A redução do pH permite a dissolução do Ca(OH)<sub>2</sub>, instável em meios ácidos, formando o carbonato de cálcio e liberando água.

A reação do CO<sub>2</sub> com o Ca(OH)<sub>2</sub> pode ser então simplificada, conforme a Equação 2.14 (RICHARDSON, 1988; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Com o tempo, os silicatos e aluminatos também podem ser atacados e transformados em carbonatos cálcicos, alumina e sílica hidratada. A reação do CO<sub>2</sub> com o C-S-H, simplificada pela equação 2.15 é de difícil compreensão, porque esse composto hidratado do cimento possui uma grande variedade de fases (HELENE, 1993; HELENE; MITIDIÈRE, 1995; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002):





Vários autores descrevem as reações de carbonatação de diferentes formas, entretanto, RICHARDSON (1988) descreve como principais as reações de transformação do hidróxido de cálcio e do silicato de cálcio hidratado em carbonatos de cálcio, sendo um dos principais efeitos dessas reações de carbonatação a colmatação dos poros do concreto pela precipitação dos carbonatos nas suas fases mineralógicas. Esta precipitação dificulta a difusão posterior do  $\text{CO}_2$  nos poros do concreto (HELENE; MITIDIÉRI FILHO; THOMAZ, 1995).

Na carbonatação do **hidróxido de cálcio**, quando a quantidade de  $\text{C}_3\text{S}$  do cimento é aumentada, uma maior quantidade de hidróxido de cálcio é produzida e menor poderá ser a carbonatação, uma vez que a precipitação desse composto dificulta a difusão do  $\text{CO}_2$  pela maior afinidade do hidróxido de cálcio para reagir com  $\text{CO}_2$  atmosférico, daí porque diz-se que os cimentos produzidos essencialmente de clínquer e, em especial, com maiores teores de  $\text{C}_3\text{S}$  são mais resistentes à ação da carbonatação (JOHNSTONE; GLASSER, 1993; HELENE; MITIDIÉRI FILHO; THOMAZ, (1995), 1995; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999; HOUST; WITTMAN, 2002; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

STEFFENS; DINKLER; AHRENS (2002) ressaltam que o hidróxido de cálcio dissolve-se na água dos poros do concreto para restabelecer o equilíbrio químico depois da neutralização dos álcalis, na formação de carbonatos de potássio e sódio. Os carbonatos de potássio e de sódio são instáveis e se reorganizam com o hidróxido de cálcio dissolvido, a fim de formarem carbonatos de cálcio, que se cristalizam em calcita estável e na aragonita semi-estável (STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

JOHNSTONE; GLASSER (1993), em pesquisas com cristais de hidróxido de cálcio obtidos sinteticamente e com corpos-de-prova de pastas de cimento *Portland* comum, verificaram que, durante a hidratação do cimento, os cristais de hidróxido de cálcio são continuamente formados em paralelo com a dissolução contínua de pequenos cristais. Com isso é possível a formação de gradientes de concentrações de hidróxido de cálcio dentro do sistema de pequenos poros. Esses gradientes podem conduzir à difusão do hidróxido de cálcio dos pequenos poros para os vazios, onde podem também crescer cristais grandes em detrimento dos cristais pequenos. Com isso, pela grande variedade de regularidade e dimensões, podem existir, em relação à carbonatação, zonas mais reativas e menos reativas. Esta difusão pode influir na carbonatação (JOHNSTONE; GLASSER, 1992).

Para JOHNSTONE; GLASSER (1992), a transformação direta do hidróxido de cálcio em carbonato acontece nos estágios iniciais e na carbonatação em ambientes de baixa umidade, progredindo pelo mecanismo da dissolução-precipitação. Na carbonatação dos cristais de hidróxido de cálcio, são formadas camadas superficiais de carbonatos, que ingressam para dentro dos cristais pela fissuração destas camadas, provocadas pelo aumento de volume de sólidos como resultado das reações de carbonatação. Em função desse crescimento de volume, os pesquisadores concluíram que o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) produzido aumentou a densidade das camadas logo abaixo da superfície, restringindo a difusão do  $\text{CO}_2$  e retardando nova carbonatação.

Outro fator que contribui para o retardamento das reações de carbonatação é a diminuição dos gradientes de concentrações de hidróxido de cálcio na solução, decorrente das reações de carbonatação (JOHNSTONE; GLASSER, 1992).

Na carbonatação do *silicato de cálcio hidratado*, de acordo com RICHARDSON *et al* (1992) e STEFFENS; DINKLER; AHRENS (2002), tanto a morfologia interna, relativamente homogênea, e a externa são mantidas na carbonatação, mas a relação Ca/Si é reduzida. Entretanto, devido à grande variedade na composição química do C-S-H, as relações estequiométricas não são completamente conhecidas, e as reações de transformação das fases do C-S-H em carbonatos, sílica gel e água podem ser descritas de acordo com a equação 2.12, cuja reação não afeta a alcalinidade da água dos poros do concreto.

De início, a reação de carbonatação do hidróxido de cálcio se dá com maior rapidez, havendo redução posterior, o que torna dominante a reação do C-S-H (RICHARDSON *et al*, 1992; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Além do hidróxido de cálcio e do silicato de cálcio hidratado, os compostos como os *aluminatos de cálcio hidratados* e os *ferro-aluminatos de cálcio hidratados* também reagem com o  $\text{CO}_2$  atmosférico para produzir carbonato de cálcio, sílica gel, alumínio hidratado e óxidos de ferro. O sulfato, por outro lado, depois de completa a carbonatação, transforma-se em gesso (PARROT, 1987; RICHARDSON, 1988).

Os compostos anidros majoritários do cimento, *silicato tri-cálcico* ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e o *silicato di-cálcico* ( $\text{C}_2\text{S}$ ), entretanto, só reagem com o  $\text{CO}_2$  atmosférico quando ele existe em concentrações altas (PARROT, 1987).

De qualquer maneira, pelo fato de produzirem, na sua hidratação, hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) nas suas várias formas, são considerados os compostos de

maior importância para a carbonatação. O  $C_3S$ , por produzir uma maior quantidade de hidróxido de cálcio<sup>5</sup> na sua hidratação, é o composto anidro do cimento que tem uma importância ainda maior no mecanismo da carbonatação (RICHARDSON, 1988; MEHTA; MONTEIRO, 1994; STEFFENS; DINKLER; AHRENS 2002).

Entre as variedades de fases aluminatos e sulfatos capazes de serem carbonatadas, destacam-se como as mais importantes as fases tri e monossulfatos e as formas cúbicas e hexagonais dos aluminatos hidratados. Os compostos como a etringita e o C-S-H são carbonatados ao mesmo tempo em que o hidróxido de cálcio (GASTAÑAGUA *et al*, 1997; MATALA, 1997).

### **2.2.3 Mudanças no concreto decorrentes das reações de carbonatação**

As reações de carbonatação provocam alterações químicas, como diminuição do pH da água dos poros; físicas, como a variação do volume dos poros; mineralógicas, como a transformação dos compostos de cimento em carbonatos, como descrito nos itens 2.2.3.1, 2.2.3.2.

#### **2.2.3.1 Aspectos químicos, físicos e mineralógicos das reações de carbonatação**

As reações de carbonatação acontecem na fase aquosa das matrizes cimentícias, onde é necessário que o hidróxido de cálcio esteja dissolvido para depois precipitar  $CaCO_3$ . Quando o  $CO_2$  gasoso entra na estrutura dos poros e dissolve-se na água dos poros há um consumo de hidroxila da água e, então, em princípio o pH cai. Entretanto, a reserva de  $Ca(OH)_2$  que, com a queda do pH dissolve-se, liberando mais íons hidroxila no sistema, o que tende a recuperar o pH. Esse processo de queda e recuperação do pH prossegue, ocorrendo simultaneamente o consumo de  $Ca(OH)_2$  e a precipitação de  $CaCO_3$ . (RICHARDSON *et al*, 1992; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999; HOUST; WITTMANN, 2002).

Os íons hidroxila liberados da dissolução do hidróxido de c podem reagir novamente com o  $CO_2$  para formar ácido carbônico, o que aumenta a solubilidade do hidróxido de cálcio. As reações prosseguem, enquanto existem hidróxido de cálcio e C-S-H (HOUST; WITTMANN, 2002).

---

<sup>5</sup>  $C_3S$  produz 61% de C-S-H e 39% de hidróxido de cálcio, em massa (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Devido à irreversibilidade das reações, com o tempo ocorre a diminuição do pH da solução dos poros e a dissolução parcial dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (RICHARDSON, 1988; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999; HOUST; WITTMANN, 2002).

A quantidade de íons hidroxila existentes na água dos poros do concreto controla o pH da água do poro. Quando a massa total de hidróxido de cálcio for convertida para  $\text{CaCO}_3$ , o pH da água dos poros abaixa para valores em torno de 8,3 (PAPADAKIS *et al*, 1992).

A profundidade atingida por essas reações de carbonatação não é um valor constante e são observadas, a partir da superfície, três zonas distintas, citadas no item 2.2.1. Observa-se: uma zona totalmente carbonatada, com teor de carbonatos constante, que vai da superfície até a segunda zona, e mais uma zona parcialmente carbonatada, que tem uma quantidade adicional de hidróxido de cálcio que se difunde, devido às diferenças de concentrações, do interior para o exterior. Sabe-se que para reagir com o  $\text{CO}_2$  atmosférico, o hidróxido de cálcio sólido é dissolvido dentro do filme de água que cobre as paredes dos poros e difunde-se destas regiões de alta alcalinidade para estas de baixa alcalinidade (PAPADAKIS *et al*, 1992).

A zona de transição ou zona parcialmente carbonatada, cuja profundidade é comparável àquela da zona totalmente carbonatada, é observada desde esta até uma zona sem carbonatação, a partir da qual o grau de carbonatação é igual a zero. O avanço da frente de carbonatação não ocorre necessariamente como uma frente bem definida, podendo ocorrer avanços pontuais (RICHARDSON, 1988; RICHARDSON *et al*, 1992, RIGO DA SILVA *et al* 2002; HOUST; WITTMANN, 2002).

A difusão do hidróxido de cálcio na solução da água dos poros, das zonas de elevada alcalinidade e sua dissolução em zonas de menor pH, origina gradientes de concentração de hidróxido de cálcio, acelerando as reações do  $\text{CO}_2$  com esse composto. À medida que o hidróxido de cálcio reage, promove a diminuição dos gradientes de concentrações que, por sua vez, ao aumentar o volume de sólidos nos poros, poderá diminuir a porosidade e a interconectividade dos poros (JOHNSTONE; GLASSER, 1992). Esta diminuição da porosidade dificultará a difusão do  $\text{CO}_2$  nos poros, retardando reações posteriores (RICHARDSON, 1988; HELENE, 1993).

A evolução do mecanismo de carbonatação vai depender de vários parâmetros descritos no item 2.3 e essa reação, que é a transformação dos compostos do cimento em carbonato de cálcio, forma três fases mineralógicas: a calcita, a aragonita e a vaterita. A predominância de

uma forma sobre a outra dependerá de algumas condições, como lugar e o tempo, em que a reação ocorre (RICHARDSON, 1988; MATALA, 1992).

As reações químicas de carbonatação, a princípio, não são prejudiciais às matrizes cimentícias, entretanto, provocam mudanças estruturais na pasta que afetam a resistência, porosidade, retração e fluência, entretanto, em longo prazo, a redução do pH do sistema, desestabiliza o C-S-H, provocando sua dissolução. Além disso, a carbonatação do C-S-H converte este produto nobre em carbonato de cálcio sílica gel e água, que são produtos menos nobres, portanto, podendo trazer prejuízos para o concreto (RICHARDSON, 1988; HELENE, 1993; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

### **2.2.3.2 Mudanças estruturais das matrizes de concreto**

A reação química de transformação do hidróxido de cálcio, ao reagir com o CO<sub>2</sub> atmosférico, para carbonatos, provoca mudanças estruturais, com o aumento do volume de sólidos em relação do volume de sólidos iniciais. Isto não resulta, entretanto, em aumento do volume total do material, pois há uma ocupação dos vazios já existentes, não ocorrendo tensões adicionais sobre a pasta endurecida (DE CEUKELAIRE; NIEUWENBURG, 1993; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

As mudanças na estrutura dos poros das pastas das matrizes de cimento em relação ao volume inicial e às diferenças de volume molar entre os produtos iniciais e os produtos finais, decorrentes da carbonatação da portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>), envolvem uma expansão dentro do concreto da ordem de 11%. Isso diminui a porosidade da pasta e altera a estrutura dos poros (RICHARDSON, 1988; NGALA; PAGE, 1997).

Quando diminuem as concentrações de Ca(OH)<sub>2</sub>, ocorre uma segunda reação, a carbonatação do C-S-H. Esta reação do C-S-H com o CO<sub>2</sub> atmosférico não envolve perda da alcalinidade, mas promove um aumento muito acentuado da microporosidade da pasta de cimento junto à superfície do concreto (DE CEUKELAIRE; NIEUWENBURG, 1993; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Embora haja expansão durante a carbonatação, uma retração resultante é observada durante a ocorrência do fenômeno, que é explicada por três diferentes teorias, duas fundamentadas na evaporação de água e uma terceira na liberação das tensões (RICHARDSON, 1988; MATALA, 1997).

Nas hipóteses que têm por base a evaporação da água, as reações de carbonatação liberam água que pode conduzir à retração, mas os produtos sólidos da reação formam uma camada impermeável ao redor do hidróxido de cálcio e param, temporariamente, as reações. O excesso de água evapora e, durante a secagem, esta camada impermeável fissa, permitindo o início de um novo ciclo de umedecimento e secagem. (SWENSON; SEREDA *apud* RICHARDSON, 1988). A formação dessa camada impermeável foi também observada nas pesquisas de JOHNSTONE; GLASSER (1992).

Por outro lado, a teoria de POWERS *apud* RICHARDSON (1988) para a retração por carbonatação é baseada na decomposição do hidróxido de cálcio que, estando sob tensão de compressão e transformado em carbonato de cálcio, ocupa os poros vazios, livres de tensões.

O preenchimento dos poros do concreto provoca, também, algumas mudanças, tais como a diminuição da permeabilidade, aumento da densidade, resistência e dureza da superfície, além de elevar o módulo de deformação e ruptura, melhorar a resistência ao gelo/degelo e ao ataque a sulfatos. Ademais, também contribuem para a diminuição das taxas de difusão do CO<sub>2</sub> no concreto (RICHARSON, 1988).

## **2.3 Fatores que influenciam a carbonatação**

De acordo com VERBECK (1958), LITVAN; MEYER (1969), RICHARDSON (1988), PARROT (1992), HELENE (1993), STEFFENS; DINKLER; AHRENS, (2002) e HOUST; WITTMANN, (2002), são fatores que influenciam a carbonatação:

-fatores ambientais, como a umidade relativa do ar, incidência de chuvas, temperatura ambiente, concentração de CO<sub>2</sub> do ar, tipo de ambiente, ventos e exposição ao sol, entre outros aspectos ambientais;

-fatores referentes às características do concreto, como sua composição, condições de execução e grau de hidratação das partículas do aglomerante.

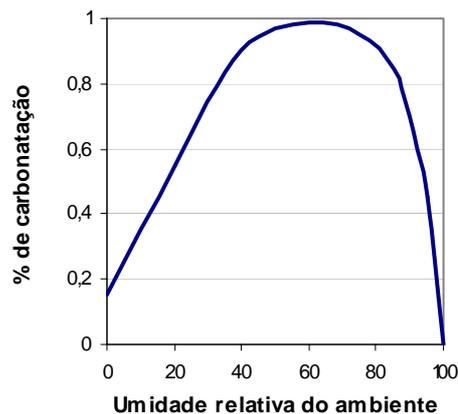
### **2.3.1 Fatores ambientais**

#### **2.3.1.1 Umidade relativa**

Quando o concreto não está saturado, pode conter água livre, responsável pela umidade interna, que tende a entrar em equilíbrio com a umidade relativa externa menor que 100%, perdendo parte dessa água. Considerando que a hidratação do cimento, a porosidade e outras propriedades do concreto são afetadas pelas condições de umidade do ambiente e que as

reações de carbonatação ocorrem na fase aquosa das matrizes cimentícias, onde é necessário o  $\text{CO}_2$  estar dissolvido para depois reagir com os compostos do cimento, também a carbonatação é muito dependente da umidade externa do ambiente (PARROTT, 1989; HOUST; WITTMANN, 2002).

Na Figura 2. 2, observa-se o grau de carbonatação das estruturas de concreto em função da umidade relativa do ambiente.



**Figura 2. 2: Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente (ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989).**

Em ambientes de baixa umidade relativa, a tendência é uma perda maior de água livre e, dessa forma, a quantidade de água livre disponível para reagir com o  $\text{CO}_2$  será menor, acarretando menor profundidade de carbonatação. Isto pode ser observado na Figura 2. 2 (PARROT, 1992; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Observa-se, também, que a carbonatação é máxima na faixa de 55% a 65% de umidade relativa, que corresponde às condições ótimas de umidade. Abaixo de 50% falta água para a reação de carbonatação e, acima de 95%, praticamente não ocorre a carbonatação (ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989; PARROTT, 1992; HELENE, 1993, JOHN, 1995; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN 1999).

É de grande importância também a umidade interna das matrizes cimentícias, que nas pesquisas de AL-KADHIMI *et al* (1986) correspondeu a 70% para a carbonatação máxima. Nestas pesquisas os corpos-de-prova foram acondicionados por seis semanas em ambiente de laboratório, com umidade relativa de 40% e temperatura igual a 25°C, após cura úmida de sete dias.

A umidade relativa interna de um corpo-de-prova pode ser medida fazendo-se um furo no corpo-de-prova, que depois é vedado com um tampão plástico a fim de evitar a perda da umidade; entretanto, o comportamento higrotérmico do concreto não atinge um valor de equilíbrio devido às constantes mudanças de temperatura e umidade relativa, e não pode ser avaliado com base na umidade relativa do ambiente (AL-KADHIMI *et al*, 1986; ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999).

A umidade interna relativa das matrizes cimentícias pode ser medida pela equação modificada de PARROT (1989), conforme a equação 2.14 (AL-KADHIMI *et al*, 1996).

$$UR = UR_A + \frac{(100 - UR_A)}{(1 + t/b)} \quad \text{Equação 2. 16}$$

Onde:

UR - umidade relativa da amostra;

UR<sub>A</sub> - umidade relativa do ambiente;

t - tempo de secagem;

b - constante dada pela equação  $b = d (y - e) (w - z)/W$

- d - profundidade medida;
- w - relação água/cimento;
- e - porcentagem de cimento substituído por adições;
- y, z e W - constantes empíricas.

### 2.3.1.2 Incidência de chuvas

Sob condições de incidência de chuvas, a água livre do concreto muda drasticamente: parte é absorvida pela superfície e parte penetra por capilaridade. Nessas condições, a umidade das estruturas de concreto depende do período e do volume de precipitação higrométrica, permanecendo saturadas por um tempo razoável. Nesta situação, a difusão do CO<sub>2</sub> é dificultada, havendo a possibilidade da carbonatação ser menor (ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Se ocorrer o período de estiagem, parte da água livre é evaporada, podendo atingir um valor a partir do qual a umidade do concreto de cobrimento da armadura proporcione uma máxima carbonatação (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999).

Dessa forma, pode-se concluir que a profundidade de carbonatação resultante seja uma somatória dos efeitos de molhagem e secagem da superfície do concreto. Para alguns autores,

essa profundidade de carbonatação é menor nos locais sujeitos à molhagem e secagem do que naqueles protegidos de chuvas, mesmo em ambientes externos (STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Observa-se, de acordo com ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, (1999), que no concreto protegido de chuvas, com o início do período chuvas ocorre um crescimento gradual da umidade interna desse concreto, atingindo um máximo que depois diminui também gradualmente com o período de fim das chuvas. Já no concreto não protegido de chuvas o aumento na umidade relativa interna é imediato, diminuindo também gradualmente.

### **2.3.1.3 Temperatura ambiente**

No que concerne às reações químicas, a temperatura tem grande influência na velocidade dessas reações. Entretanto, no mecanismo da carbonatação, a velocidade das reações é principalmente, controlada pelo grau de saturação dos poros, que, por sua vez, controla a difusão do CO<sub>2</sub> nos poros capilares do concreto (HOUST; WITTMANN, 2002).

A temperatura tem um comportamento característico na umidade relativa interna do concreto. Em uma temperatura mais alta, acima de 25°C a 30°C, como a evaporação da água livre não se dá rapidamente, no início ela evapora e aumenta a umidade relativa interna próxima à superfície, passando a diminuir depois. Com um volume menor de água, o concreto não terá água suficiente para as reações de carbonatação (ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989; ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

O inverso acontece em temperaturas abaixo de 5°C a 10°C. Inicialmente, a umidade relativa é menor, para depois aumentar, porque um volume maior de água será acumulado no interior do concreto (ANDRADE; SARRÍA; ALONSO, 1999). Assim, com um volume maior de água livre disponível, dependendo da saturação, ou não, dos poros, a velocidade das reações de carbonatação deverá ser maior (ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

### **2.3.1.4 Concentração de CO<sub>2</sub>**

A carbonatação é um fenômeno natural que ocorre quando o concreto é exposto às condições ambientais e, nesses ambientes naturais, as profundidades alcançadas pela carbonatação são baixas, devido às baixas taxas de difusão do CO<sub>2</sub> atmosférico, necessitando de um longo

período de tempo para atingir poucos milímetros (PAPADAKIS *et al.*, 1992; HELENE, 1993).

A difusão é mais lenta do que as reações de carbonatação e diminui muito se a umidade exceder 60%. Quando as concentrações de CO<sub>2</sub> atingirem valores maiores, a carbonatação será determinada pelas características do concreto e da fração de CO<sub>2</sub> disponível para a reação (RICHARDSON, 1988; STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

Em concentrações elevadas de CO<sub>2</sub>, como nas regiões urbanas, o mecanismo de carbonatação poderá ter maior intensidade, ou não, dependendo de outros fatores que também proporcionam condições necessárias à carbonatação (VERBECK, 1958; HELENE, 1993).

RICHARDSON (1988) classifica os ambientes em ambientes urbanos, sub-urbanos, rurais e costeiros, dependendo da concentração de CO<sub>2</sub>, observando uma tendência de maior taxa de carbonatação, na ordem crescente: ambientes costeiros, rurais, sub-urbanos e urbanos.

Entretanto, outros fatores devem ser considerados, por exemplo, o local efetivo onde está inserida a estrutura, os locais urbanos com grande tráfego de veículos, ambientes internos de garagens e ambientes industriais nos quais ocorre a queima de combustíveis fósseis. Nesses locais, as concentrações de CO<sub>2</sub> tendem a ser maiores (RICHARDSON, 1988, HELENE, 1993).

No Quadro 2. 1 observa-se as concentrações de CO<sub>2</sub> de acordo com o ambiente onde está inserida a estrutura de concreto.

**Quadro 2. 1: Classificação dos ambientes de acordo com diversos autores em função da concentração de CO<sub>2</sub>.**

Ambiente	Concentração de CO <sub>2</sub> (% em volume)	
	NEVILLE (1997)	SAETTA; VITALINI (2003)
Ambiente rural	0,03	0,015
Cidade	0,3 a 1	0,036
Ambiente de laboratório não ventilado	> 0,1	-
Ambiente industrial	-	0,045

### 2.3.1.5 Outros aspectos ambientais

Além dos fatores ambientais já citados, as condições de exposição interna ou externa também afetam a taxa de carbonatação. Por exemplo, um mesmo concreto acondicionado em ambiente externo não protegido de chuvas, em ambiente externo protegido de chuva e em ambiente interno tem carbonatação crescente, nesta ordem.

A taxa de carbonatação em ambientes internos, chega a ser cerca de duas vezes (concreto com cimento *Portland* comum) a 1,69 vezes maior (concreto com escória) nas pesquisas de LITVAN; MEYER (1986), de três vezes maior, nas pesquisas de RICHARDSON (1988), e cerca de 1,85 vezes maior nas pesquisas de STEFFENS; DINKLER; AHRENS, (2002), do que as taxas de carbonatação em ambientes externos não protegido de chuvas. Constatase, também, que uma maior incidência de ventos e de insolação pode secar a superfície do concreto e interferir na carbonatação (RICHARDSON, 1988).

### **2.3.2 Fatores internos ao concreto**

As condições ambientais de exposição do concreto exercem um papel importante no mecanismo da carbonatação, entretanto, além destes fatores, as características do concreto, tais como o proporcionamento da mistura; o grau de hidratação; a relação água/cimento que influencia na porosidade, microestrutura e resistência; a redução da quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  nos poros do concreto, que depende do tipo e teor do material cimentante; as condições de execução, destacando-se os procedimentos de cura; e a geometria da peça, também afetam o mecanismo da carbonatação (VERBECK, 1958; LITVAN; MEYER, 1986; RICHARDSON, 1988; HELENE; MITTIDIARI FILHO; THOMAZ, 1995; JOHN, 1995).

#### **2.3.2.1 Idade e grau de hidratação do concreto**

O concreto, nas primeiras idades, encontra-se saturado e, posteriormente, com o desenvolvimento das reações de hidratação e evaporação da água, ocorre a sua secagem. Nessas condições iniciais de umidade relativa alta, a difusão do  $\text{CO}_2$  através do concreto e as reações de carbonatação praticamente não ocorrem (PARROT, 1989; ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989, 1989; PARROT, 1992; HELENE, 1993; WEE; SURYAVANSHI; LOGENDRAN, 1999).

Entretanto, à medida em que os grãos do aglomerante vão se hidratando, os espaços vazios vão sendo ocupados pelos produtos sólidos hidratados e a água livre vai sendo evaporada até atingir um ponto de umidade em equilíbrio com o meio ambiente (PARROT, 1989; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Isto pode ser explicado, porque o grau de hidratação das partículas do aglomerante avança com o tempo, modificando a umidade interna e a estrutura da pasta da zona de transição da matriz cimentícia (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Para PARROT (1992), nas idades mais avançadas, o mecanismo da carbonatação é restringido pela menor permeabilidade do concreto. Assim, as reações de carbonatação, por serem diretamente influenciadas pela umidade interna e pela estrutura interna das matrizes cimentícias, como verificado por PARROT (1992), têm também influência da idade e do grau de hidratação do concreto.

### **2.3.2.2 Agregado**

O agregado tem algumas características como tipo, dimensão e forma, que afetam a trabalhabilidade do concreto fresco, a durabilidade do concreto endurecido e também a resistência à difusão do CO<sub>2</sub> (RICHARDSON, 1988). Portanto, o concreto produzido com agregado de forma mais arredondada será mais fácil de ser lançado e, dependendo das condições de transporte, lançamento, adensamento e cura, poderá ser mais denso e ter maior resistência à penetração de agentes agressivos, como o CO<sub>2</sub> (RICHARDSON, 1988; SCREVENER, 1989; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No caso de agregado leve, que é mais poroso, dependendo da comunicação, ou não, entre os seus poros, poderá ocorrer a formação de caminhos que conduzam à maior difusão do CO<sub>2</sub> (RICHARDSON, 1988).

Deve-se considerar também que, se a forma dos agregados for lamelar ou alongada, estes tendem a se orientar segundo um plano e um acúmulo de água pode ocorrer na parte inferior, fenômeno denominado de exsudação interna. Se esse fenômeno ocorrer muito próximo à superfície, nessas zonas a carbonatação será maior (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Uma outra forma de interferência do agregado na carbonatação acontece quando este reage com os álcalis do cimento e forma produtos expansivos. A reação álcali-agregado que ocorre gera uma rede de fissuras por onde o CO<sub>2</sub> penetra mais facilmente (ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989).

O agregado pode também, devido às movimentações diferenciais que conduzam à formação de microfissuras na zona transição entre o agregado e a pasta, contribuir para o aumento da profundidade de carbonatação. (RICHARDSON, 1988).

### **2.3.2.3 Aglomerante**

Existe no mercado uma grande variedade de cimentos comerciais, produzida com diferentes características químicas, físicas e mecânicas, e, além disso, o clínquer utilizado varia em teor, para cada cimento produzido. Pode também ocorrer, para uma mesma composição química,

que a microestrutura seja diferente e também o seu comportamento hidráulico (AÏTCIN, 2000).

Para uma mesma dosagem e procedimentos de cura, as características do cimento que afetam a carbonatação do concreto são o tipo e teor, a finura e a reserva alcalina do cimento (RICHARDSON, 1988; MITRE; BARBOSA; HELENE, 2002).

Vários pesquisadores têm analisado a influência do cimento na carbonatação do concreto; entre eles pode-se citar: HELENE; MITTIDIARI FILHO; THOMAZ, (1995), MONTEIRO; NEPOMUCENO (1996), NUNES (1998), COELHO (2002), cujas principais conclusões encontram-se no Quadro 2.2.

**Quadro 2. 2: Influência do tipo de cimento na carbonatação de matrizes cimentícias.**

Autor	Tipo de cimento	Conclusões
PARROT (1992)	Cimento <i>Portland</i> comum Cimento <i>Portland</i> comum e 50% em massa de escória de alto-forno Cimento <i>Portland</i> comum e 30% em massa de cinza volante.	Em misturas com relação água/cimento igual a 0,59, após quatro anos, observou-se uma tendência de menor carbonatação de matrizes produzidas com cimento <i>Portland</i> comum em relação às matrizes produzidas com cimento <i>Portland</i> comum e adição de escória de alto-forno e cimento <i>Portland</i> comum e adição de cinza volante; a espessura carbonatada cresceu nesta ordem: cimento <i>Portland</i> comum, cimento <i>Portland</i> comum e adição de escória de alto-forno e cimento <i>Portland</i> comum e adição de cinza volante.
HELENE; MITTIDIARI FILHO; THOMAZ, (1995)	C. Composto c/ escória de alto-forno (CP II E) C. de alto-forno (CP III) C de alta resistência inicial	Para a mesma relação água/cimento não houve diferenças significativas na profundidade de carbonatação entre o cimento CP III e o cimento CP II E. As profundidades de carbonatação das amostras de cimento CP V foram inferiores aos cimentos CP III e CP II E para a mesma relação água/cimento.
NUNES (1998)	CP II E CP III CP IV CP V	Os cimentos empregados em diferentes traços e relações água/cimento, observou-se um melhor desempenho em relação à menor profundidade de carbonatação para o cimento CP V em relação aos demais, nas condições normal e acelerada. Não ocorreram diferenças significativas na carbonatação de misturas produzidas com os cimentos CP II E , CP III e CP IV.
COELHO (2002)	Cimento <i>Portland</i> composto (CP II E-RS) 50% de Cimento <i>Portland</i> de alto-forno e 50% de escória de alto-forno em massa .	Nas misturas de concreto produzidas com cimento de alto-forno, contendo altos teores de escória de alto-forno, da ordem de 86% em massa do total do cimento, foi observada a maior profundidade de carbonatação quando comparadas com misturas produzidas com cimento composto com escória (CP II E), para a resistência à compressão aos vinte e oito dias dessas misturas da ordem de 40 MPa.

Da mesma forma que a composição química, a finura do cimento também interfere na carbonatação das matrizes cimentícias pelo fato do grau de finura do cimento interferir na sua reação com a água, reagindo mais rápido quanto mais finas são as suas partículas (PARROT, 1989; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Devido à finura do cimento, entre outros fatores, influir na profundidade de carbonatação, o seu aumento pode reduzir a carbonatação das matrizes cimentícias até o limite em que o aumento da retração conduzirá à formação de microfissuras nessas matrizes. Assim sendo, o

aumento da finura poderá diminuir a possibilidade de carbonatação, porque esse aumento poderá produzir um concreto mais denso e resistente, dificultando a penetração do CO<sub>2</sub> (RICHARDSON, 1988; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Em geral, as adições ao cimento vão interferir na profundidade de carbonatação, na medida em que consomem o hidróxido de cálcio proveniente das reações de hidratação do C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S do cimento para formar C-S-H secundário. A reação diminui a reserva alcalina<sup>6</sup>, que é, entre outros fatores, responsável pela maior ou menor velocidade de carbonatação das matrizes cimentícias (HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Nas pesquisas com pozolanas, têm-se observado resultados conflitantes, pelo fato da existência de diferentes pozolanas, tais como a cinza volante, sílica ativa, metacaulinita, cinza de casca de arroz e, também, pelos diferentes procedimentos utilizados para medir a profundidade de carbonatação.

A influência da adição da escória de alto-forno ao cimento está descrita no item 3.6.2 do capítulo 3 e no Quadro 2.3 onde se observam as conclusões de algumas pesquisas que utilizaram a adição de cal com o objetivo de verificar sua influência na carbonatação do concreto.

**Quadro 2.3: Influência observada na adição de cal hidratada na carbonatação do concreto.**

Pesquisador	Tipo de cimento	Conclusões
MIRA; PAPADAKIS; TSIMAS, (2002)	Cimento <i>Portland</i> comum e cal hidratada Cimento <i>Portland</i> comum, pozolanas e cal hidratada	A profundidade de carbonatação em misturas de concreto de cimento <i>Portland</i> comum com adição de cal é menor do que sem esta adição. Para as misturas onde se adicionaram pozolanas e cal hidratada, foi observada uma menor profundidade de carbonatação e a melhora da resistência mecânica do concreto. O efeito da adição de cal foi mais pronunciado, para todos os aglomerantes, em percentuais de substituição de até 10%, em massa do cimento.
STUMPP; ISAIA; GASTALDINI, (2002)	Cimento de alta resistência inicial, escória de alto-forno, pozolanas e cal hidratada	A profundidade de carbonatação foi menor nos traços com adição de cal hidratada que nos traços sem a adição. Quando comparadas as misturas que tinham uma mesma relação água/cimento com adições pozolânicas e escória de alto-forno, ambas com adição de cal hidratada, com misturas de referência, contendo apenas cimento de alta resistência inicial, a adição de cal hidratada não apresentou diminuição significativa nas profundidades de carbonatação.
ISAIA <i>et al.</i> (2003)	Cimento de alta resistência inicial, escória de alto-forno/ cinza de casca arroz/ cinza volante e cal hidratada	Nas misturas com cal, com faixa de resistência da ordem de 35 MPa a 55 MPa, foi observada uma maior resistência à compressão, maior reserva de CH, menor carbonatação em relação àquelas sem cal.

<sup>6</sup> Reserva alcalina é a quantidade de hidróxidos disponíveis, nos poros das matrizes cimentícias, para manter a alcalinidade da solução intersticial (MITRE; BARBOSA; HELENE, 2002)

#### 2.3.2.4 Qualidade do concreto

O fato do CO<sub>2</sub> atmosférico penetrar no concreto através da superfície, ressalta a importância da qualidade do concreto. Além da especificação de uma relação água/cimento adequada, que garanta maior resistência e menor permeabilidade, o grau de hidratação do aglomerante, o tipo e o teor do aglomerante e do agregado, as condições de cura e a espessura do concreto de cobrimento merecem atenção especial para evitar o aparecimento de fissuras (ROSEMBERG; HANSSON; ANDRADE, 1989).

Pode-se ressaltar, também, a importância da dosagem, lançamento, transporte e adensamento. Por exemplo, um concreto com elevado abatimento e mesmo com baixa relação água/cimento, quando vibrado excessivamente, pode gerar a exsudação interna e criar uma rede de capilares interconectados que vai desde a superfície até todo volume do concreto. Ademais, uma deficiência de cura ou a falta desta pode também provocar o aparecimento de uma rede de capilares na superfície, facilitando o acesso de agentes agressivos (AÏTCIN, 2000).

O objetivo da cura é evitar a retração, devido à evaporação precoce da água, durante um período suficiente para que este atinja um nível mínimo de resistência mecânica. Quanto maior for o tempo de cura, maior será o grau de hidratação do cimento, maior a resistência e menor a permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994, AÏCTIN, 2000).

Sob o ponto de vista da carbonatação, as condições e o tempo de cura têm um grande efeito nas propriedades e, portanto, na durabilidade do concreto. O aumento do tempo de cura, em ambiente com temperatura e umidade controladas, diminui a profundidade de carbonatação, sendo tal efeito melhor observado nas matrizes cimentícias que contêm cimento com escória de alto-forno (BALAYSSAC; DÉTRICHÉ; GRANDDET, 1995; ALDEA *et al.*, 2000).

A importância da espessura e qualidade do concreto de cobrimento pode ser ressaltada pela sua importante função na resistência à penetração de agentes agressivos como o CO<sub>2</sub> e cloretos. O concreto próximo à superfície não tem a mesma composição e microestrutura da parte interna. Normalmente, as camadas com profundidade de 5 mm a 10 mm da superfície possuem muito mais pasta, devido à tendência à segregação junto às formas. Esta tendência é denominada de efeito parede (AÏTCIN, 2000).

No concreto de alto desempenho, que tem elevados abatimentos<sup>7</sup>, esse efeito torna-se mais crítico porque mesmo sendo plástico, pelo uso de superplastificantes, e sem tendência à segregação, quando o abatimento aumenta, observa-se o aumento do efeito parede. Os concretos usuais, que são lançados com abatimentos baixos<sup>8</sup>, e são muito coesivos, são menos afetados pelo efeito parede (AİTCIN, 2000).

Com relação ao cobrimento do concreto, a NBR 6118/2003 faz referência às classes de concreto<sup>9</sup> para estabelecer os valores da relação água/cimento e cobrimento nominal, de acordo com classes de agressividade do meio, observado no Quadro 2.3 e no Quadro 2.4.

**Quadro 2. 4: Recomendações de relações água/cimento do concreto em função da agressividade ambiental segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003).**

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento (em massa)	Concreto armado	< 0,65	< 0,60	< 0,55	< 0,45
	Concreto protendido	< 0,60	< 0,55	< 0,50	< 0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	Concreto armado	> C20	> C25	> C30	> C40
	Concreto protendido	> C25	> C30	> C35	> C40

**Quadro 2. 5: Classes de agressividade do meio em função das condições de exposição segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003).**

Microclima Macroclima	Ambientes internos		Ambientes externos e obras em geral	
	Seco UR< 65%	Úmido ou ciclos de molhagem/ secagem	Seco UR< 65%	Úmido ou ciclos de molhagem e secagem
Rural	I	I	I	II
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	-	III
Industrial	II	III	II	III
Especial	II	III ou IV	III	III ou IV
Respingos de maré	-	-	-	IV
Submersa > 3m	-	-	-	I
Solo	-	-	Não agressivo I	Úmido e agressivo II, III ou IV

No Quadro 2.5 têm-se as classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição.

<sup>7</sup> da ordem de 150 mm a 200 mm (AİTCIN, 2000).

<sup>8</sup> da ordem de 20 mm a 100 mm (AİTCIN, 2000).

<sup>9</sup> A classe de concreto é estabelecida na NBR 8953/1992.

**Quadro 2. 6: Recomendações de classe de resistência do concreto em função da agressividade ambiental e do cobrimento nominal segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003).**

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade Cobrimento nominal (mm)			
		I	II	III	IV
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Dessa forma, além de obedecidos os cobrimentos especificados por norma, cuidados especiais na mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desmoldagem devem ser tomados, para evitar o aparecimento de fissuras e garantir a menor permeabilidade e maior qualidade do concreto. Esses cuidados são os mais importantes nas propriedades de difusividade, permeabilidade e absorção capilar de água e gases (SCREVENNER, 1989; HELENE, 2001).

## 2.4 Ensaios de carbonatação

Os ensaios de carbonatação têm sido realizados em pastas de cimento, argamassas e concreto. MITRE; BARBOSA, HELENE, (2002), ao compararem os resultados da carbonatação em concretos e argamassas para uma mesma relação água/cimento, ressaltando-se aqui a absorção de parte da água pelo agregado, encontraram diferenças significativas na profundidade de carbonatação. Nas pastas de cimento com mesma relação água/cimento, a profundidade de carbonatação foi maior, provavelmente em decorrência de uma maior retração da pasta. Essa retração induz o aparecimento de fissuras que abrem caminho para a entrada do CO<sub>2</sub> (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Várias pesquisas relacionadas com a carbonatação de pastas hidratadas de cimento têm sido relatadas. Os efeitos da umidade, da dimensão do corpo-de-prova e da concentração de CO<sub>2</sub> na medida da profundidade de carbonatação foram pesquisados por VERBECK (1958), cujos ensaios foram realizados utilizando procedimentos de cura a vapor a altas pressões.

Dentre as principais conclusões de VERBECK (1958), resalta-se o valor máximo de profundidade de carbonatação para a umidade relativa de 50%, a influência da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico e a influência dos vários procedimentos de cura (temperatura e duração) na carbonatação.

LITVAN; MEYER (1986), em suas pesquisas, utilizaram misturas de concreto com adições de escória de alto-forno, em ensaios com diferentes concentrações ambientais de CO<sub>2</sub><sup>10</sup>, medindo a profundidade de carbonatação por um período de vinte anos de exposição. Nessas pesquisas, foi observada a existência de uma correlação entre a profundidade de carbonatação e a relação água/cimento e, por isso, também, a influência da resistência nessa profundidade.

Assim, com base na necessidade de previsão da vida útil de projeto o mais próximo da realidade e em um curto espaço de tempo, diferentes condições são utilizadas para acelerar o mecanismo da carbonatação. Os ensaios utilizados para medir a profundidade de carbonatação podem ser naturais e acelerados (RICHARDSON, 1988; KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996) como destacados a seguir.

#### **2.4.1 Ensaios naturais**

São ensaios executados com a exposição dos corpos-de-prova, em ambiente natural ou seja, sem ajuste ou controle de parâmetros físicos do meio, em concentrações volumétricas de CO<sub>2</sub>, da ordem de 0,015% a 0,045% em volume, protegido de chuvas ou não, ou em ambientes de laboratório nas concentrações de CO<sub>2</sub> do ambiente, com umidade e temperatura controlada, ou não.

Observa-se que a exposição a ambientes de laboratório, com a umidade e temperatura controlada, para os ensaios de carbonatação natural, é o mais utilizado, talvez porque, segundo STEFFENS; DINKLER; AHRENS (2002), os parâmetros envolvidos na exposição ao ar livre são mais difíceis de serem controlados.

Os corpos-de-prova expostos ao ar livre e submetidos a períodos de chuvas, têm uma menor carbonatação nas áreas mais expostas durante esse período. Nesses locais, durante as chuvas, a umidade é maior, por um período maior (STEFFENS; DINKLER; AHRENS, 2002).

No Quadro 2.7, observa-se dados e condições de algumas pesquisas envolvendo o ensaio natural para medir a profundidade de carbonatação do concreto.

---

<sup>10</sup> Valores não medidos.

**Quadro 2.7: Condições algumas pesquisas com ensaios de carbonatação natural.**

Autor	Corpo-de-prova tipo, dim.(cm)	Aglomerante	fck (MPa)	a/c	Cura* (dias)		UR (%)	T (°C)	Idade ensaio
HÄKKINEN (1992)	cilíndrico 10x10)	CP comum/ CP I/escória AF	-	0,30 0,40	U*	7	70	-	3 a 6 meses
					A*	53			
					T*	60			
DE CEKELAIRE; NIEUWENBURG (1993)	cúbico 10x10x10	CP comum/ CP comum +30 a 40% escória alto-forno/CP comum +escória alto-forno e sílica ativa	-	0.60	U	7	90	20	333/392/57 5 dias
					A	14			
					T	21			
HELENE et al (1995)	prismático 10x10x40	CP II E CP III CP V	7 a 73	0.40 0.80 1.2	U	6 (U)	80 a 90	23 a 25	16/22/29/37 /43 dias
					A	1 (c. seca)			
					T	7 (T)			
NUNES (1998)	cilíndrico 10x20	CP II E/CP III CP IV/ CP V			U	7	70	24	28/42/168 dias
					A	21			
					T	28			
VAGHETTI; ISAIA; GASTALDINI (2001)	cilíndrico 10x10	CP V ARI/ CP V ARI + s. ativa, c. volante, cc. arroz (10% a 50% em massa do cimento).	50 60 70	0,35 0,45 0,55	U	7			3/13/17/21 e 18/22/26/29 (semanas)
					A	21e 84			
					T	35e 91			

\* U -cura em câmara úmida, A-cura ao ar e T- cura total o qual corresponde à soma das duas anteriores.

## 2.4.2 Ensaios acelerados

Nestes ensaios, os corpos-de-prova são submetidos a concentrações elevadas de CO<sub>2</sub>, mas, para alguns autores, como MEHTA; MONTEIRO (1994), o concreto submetido a altas concentrações de CO<sub>2</sub> pode sofrer alterações em sua microestrutura, que deve ser investigada, pois a reação do CO<sub>2</sub> com o hidróxido de cálcio, numa carbonatação mais rápida, pode resultar numa instabilidade dos compostos formados. Contudo, nas pesquisas de AL-KADHIMI *et al.* (1996), o concreto carbonatado em altas pressões e altas concentrações de CO<sub>2</sub> proporcionou microestrutura similar a do concreto carbonatado naturalmente. Para esses pesquisadores, os estudos em concretos carbonatados, em altas pressões e altas concentrações de CO<sub>2</sub> e completamente carbonatado, são úteis para estudar os efeitos da carbonatação nas propriedades mecânicas.

Estes ensaios acelerados já foram relatados a partir de 1969 no 5º Simpósio Internacional de Química do Cimento, e apresentam uma boa correlação com ensaios naturais de longa duração (KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996).

Os ensaios acelerados utilizam concentrações de CO<sub>2</sub> que variam de 3% a 100%, conforme se observa no Quadro 2.8.

**Quadro 2.8: Concentrações de CO<sub>2</sub> utilizadas em diversas pesquisas.**

Pesquisador	% de CO <sub>2</sub>
DECEUKELAIRE; NIEUWENBURG (1992), HAKKINEN (1993), NAKAMOTO; TOGAWA (1995), ISAIA (1995) e ISAIA; VAGHETTI; GASTALDINI (2001), NGALA; PAGE (1997), JONES; DHIR; MAGGE (1997), HELENE; MITIDIERI FILHO; THOMAZ (1995), GASTALDINI; ISAIA; ZANELLA (1999), VAGHETTI; ISAIA; GASTALDINI (1999), MARTINS; MONTICELLI; CAMARINI (2001), VAGHETTI; ISAIA; GASTALDINI (2001), CASTRO (2003)	até 10
NUNES (1998)	15
PAPADAKIS <i>et al.</i> (1992)	50
AL-KADHIMI <i>et al.</i> (1996), MONTEIRO <i>et al.</i> (2000), COELHO (2002) e MITRE; BARBOSA; HELENE (2002)	100
FERREIRA JUNIOR (2003)	Fluxos contínuos: 10 litros/ minuto de CO <sub>2</sub> , /2 horas

Deve-se registrar que, principalmente nos ensaios de carbonatação acelerados, para uma mesma matriz cimentícia, quando comparada a influência da cura ao ar e da cura úmida, a profundidade de carbonatação é maior para a cura ao ar, nos resultados encontrados nos dois métodos utilizados a fim de medi-la: aspersão do indicador químico fenolftaleína sobre a superfície recém fraturada e espectroscopia infravermelha (LO; LEE, 2002). De grande importância, também, para o início da carbonatação, é observar a umidade interna da matriz cimentícia, que diminui com o tempo de secagem e pode ser estimada pela equação modificada de PARROT (1989), equação 2.13. Também pode-se medir essa umidade por meio de equipamentos ou por meio da secagem em estufa, calculando a relação entre a diferença de massa da amostra seca e na condição inicial, dividida pela massa da amostra seca, em porcentagem (HELENE, 1993; AL-KADHIMI *et al.*, 1996).

Logo, a cura ao ar, após a cura úmida, é necessária para a matriz cimentícia atingir a umidade interna na faixa de 60% a 70%, considerada ótima para o início da carbonatação. Segundo AL-KADHIMI *et al.* (1996), essa faixa de umidade interna é atingida, em ambiente de umidade relativa ambiente igual a 40%, no tempo de cura ao ar de 6 a 8 semanas. Vale ressaltar que nos ensaios de AL-KADHIMI *et al.* (1996) foi utilizado o cimento de endurecimento rápido.

VAGHETTI; ISAIA; GASTALDINI (2001) também analisaram a influência de uma pré-cura ao ar, dos concretos com pozolanas, antes de serem submetidos à carbonatação acelerada. As suas conclusões foram sobre a necessidade de um período de pré cura ao ar para que as reações pozolânicas aconteçam e não interfiram na carbonatação.

No que concerne à cura em câmara a vácuo, AL-KADHIMI *et al.* (1996) verificaram não ser ela benéfica por não permitir atingir a umidade interna, na faixa de 60% a 70%, ideal para a carbonatação.

Nas pesquisas com cura térmica, MARTINS; MONTICELLI; CAMARINI (2001) foram utilizados nos ensaios, corpos-de-prova produzidos com cimento de alto-forno e com cimento de alta resistência inicial, e submetidos ao regime isotérmico, com temperatura de 60°C. Esta temperatura foi mantida por duas horas, e após, elevada e resfriada gradualmente, num gradiente de 20°C por hora.

Os corpos-de-prova permaneceram em ambiente não controlado de laboratório, até a idade de 28 dias e, posteriormente, eles foram armazenados em câmara de carbonatação com teor de CO<sub>2</sub> próximo de 100%.

MARTINS; MONTICELLI; CAMARINI (2001) verificaram a maior carbonatação do concreto com cimento de alta resistência inicial, submetido à cura a vapor, do que para o concreto produzido com escória de alto-forno, comparada com a cura em imersão por sete dias.

Nestes ensaios acelerados, a importância da cura fica evidenciada nos resultados dos trabalhos de AL-KADHIMI *et al.* (1996) e VAGHETTI; ISAIA; GASTALDINI (2001), que afirmam ser necessário, além da cura úmida por um período mínimo, um tempo de cura ao ar de pelo menos sete semanas, até que o concreto atinja a umidade ótima necessária ao ensaio de carbonatação acelerada. No caso de concretos produzidos com adições, esse tempo deve ser de no mínimo quatorze dias, de acordo com ISAIA (1995).

Outros parâmetros como o teor umidade e a temperatura são otimizados para as condições de carbonatação máxima em um curto espaço de tempo. Dessa forma, nos ensaios de carbonatação acelerada os tempos de permanência em câmara de carbonatação variam nas diversas pesquisas, conforme indicado no Quadro 2. 9.

**Quadro 2. 9: Permanência em câmara de carbonatação de alguns ensaios acelerados.**

Autor	Tempo exposição câmara de carbonatação (semanas)
AL-KADHIMI et al (1996)	2
COELHO (2002),; FERREIRA JR (2003); BOURGUIGNON (2004)	4
ISAIA (1995); VAGHETTI; ISAIA; GASTALDINI (2001)	8 a 16
CASTRO (2003)	Após a idade de 91 dias, ciclos de 7 dias em câmara de carbonatação e sete dias fora da câmara, até a total despassivação da armadura. Total dos ciclos = 98 dias.

### 2.4.3 Métodos utilizados para avaliar a carbonatação

Vários são os métodos utilizados para medir a profundidade de carbonatação em laboratório, entre eles inclui-se: indicadores ácido/base, análise mineralógica, análise térmicas (análise térmica diferencial (ATD) e termogravimetria (TG)), difração de raios X, radiografia de neutron, dióxido de carbono radioativo, microscopia infra-vermelha e análise química (RICHARDSON, 1988).

Os *indicadores de pH* fornecem um método simples e prático para a medida da profundidade de carbonatação. Os indicadores químicos utilizados são a fenolftaleína, o amarelo de alizarina, a timolftaleína e o naftol, sendo a primeira de uso mais comum. Imediatamente, após a fratura da amostra e após a limpeza com pincel ou com ar comprimido, procede-se a aspersão de 1% do indicador químico dissolvido em álcool e água destilada. A fenolftaleína muda da cor incolor para vermelho com pH acima da faixa de 8,2 a 9,8 e dá uma aproximação de 0,5mm, a timolftaleína muda da cor incolor para azul com pH acima da faixa de 9,3 a 10,5, o amarelo de alizarina muda da cor incolor para amarelo com pH acima da faixa de 9 a 10, e o naftol muda da cor incolor para verde com pH acima da faixa de 8-10 (RICHARDSON, 1988; HELENE; MITIDIARI FILHO; THOMAZ, 1995; KAZMIERCZAK; LINDENMEYER 1996).

Nos estudos de vários pesquisadores, o uso do indicador timolftaleína conduz a medidas maiores da profundidade de carbonatação do que com o uso da fenolftaleína. Isto ocorre porque a carbonatação reduz o pH para valores de 8,3 a 9, observando-se com a carbonatação, pH menor e crescente, da superfície para o interior do concreto não carbonatado (12,5 a 13,5) e a mudança de cor da timolftaleína atingirá uma profundidade mais interna do concreto, com pH maior, daí a maior profundidade observada com esse indicador. (MEHTA; MONTEIRO, 1994; HELENE; MITIDIARI FILHO; THOMAZ, 1995; KAZMIERCZAK; LINDENMEYER 1996; CASCUDO, 1997; LO; LEE, 2002; MITRE; BARBOSA; HELENE, 2002).

Este método para medir a profundidade de carbonatação tem sido usado por diversos pesquisadores, entre eles pode-se citar as pesquisas relacionadas no Quadro 2. 10.

A *análise petrográfica* é uma outra forma de medir a profundidade de carbonatação, pela observação direta da zona carbonatada de lâminas delgadas extraídas da amostra em estudo, com o uso do microscópio ótico, sob um feixe de luz polarizada. A interface entre a região carbonatada e a região não carbonatada é observada na microscopia e são estimadas as

quantidades de compostos carbonatados que existem na pasta. (RICHARDSON, 1988; KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996).

No método da *análise térmica*, as amostras são extraídas de profundidades conhecidas, são trituradas e submetidas à elevação de temperatura constante (até 1000 °C). As diferenças de temperaturas (ATD) entre a amostra e um material termicamente inerte são registradas por pares termodiferenciais, e as perdas de massa (TG) registradas por balanças.

As curvas geradas no ensaio são comparadas a curvas conhecidas, onde diversos compostos carbonatados e não carbonatados podem ser identificados (RICHARDSON, 1988; KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996; RIBAS SILVA, 1996).

A *difração de raios X* permite detectar a presença de todas as fases cristalinas do concreto endurecido, onde cada tipo de cristal corresponde a uma série de ângulos de difração característicos. Pode-se verificar se a amostra é um composto puro e avaliar seus teores em baixo, médio ou forte.

As zonas carbonatadas são diferenciadas das zonas não carbonatadas pela identificação da presença da calcita, vaterita e aragonita, além de outros compostos produzidos pelo cimento.

Este método possui a vantagem da simplicidade, rapidez, quantidade reduzida da amostra; é não destrutivo e permite diferenciar as formas alotrópicas do carbonato de cálcio (calcita, aragonita e vaterita). A desvantagem deste método é a dificuldade de interpretação (RICHARDSON, 1988; RIBAS SILVA, 1996).

No método que utiliza a *radiografia de nêutron*, é registrada a transmissão de nêutrons através do concreto, que é influenciada pelo conteúdo de água não evaporável liberada pela carbonatação (RICHARDSON, 1988).

O mecanismo da penetração do *dióxido de carbono radioativo* em amostras de concreto é investigada neste método e só é importante para os estudos iniciais de laboratório (RICHARDSON, 1988).

A *microscopia infravermelha* é um método não destrutivo que depende do grau em que a reação de carbonatação prossegue para o silicato de cálcio hidratado. É uma ferramenta utilizada para determinar a estrutura de grupos de compostos pela frequência de absorção infravermelha do espectro magnético. A intensidade da luz infravermelha diminui com o aumento da absorção (RICHARDSON, 1988; LO; LEE, 2002).

Os resultados da microscopia infravermelha, quando comparados com os resultados da profundidade de carbonatação medida com o indicador fenolftaleína, proporciona uma maior aproximação, podendo ser identificado o avanço da frente de carbonatação (LO; LEE, 2002).

No Quadro 2. 10 têm-se os métodos utilizados em algumas pesquisas para avaliar a carbonatação no concreto.

**Quadro 2. 10: Métodos utilizados para medir a carbonatação de algumas pesquisas.**

Método	Pesquisa
Indicadores ácido/base	THOMAS <i>et al.</i> (1990), PARROT (1992), DE CEUKELAIRE; NIEUWENBURG (1992), HÄKKINEN (1993), PARROT (1994), BALAYSSAC; DÉTRICHÉ; GRANDET, (1995), HELENE; MITIDIERI FILHO; THOMAZ, (1995), ISAIA (1995), KAZMIERCZAK; LINDENMEYER (1996), NAKAMOTO; TOGAWA (1995), MASLEHUDDIN; SHIROKOFF; SIDDIQUI, (1996), JONES; DHIR; MAGGE (1997), NGALA; PAGE (1997), NUNES (1998), CASTEL; FRANÇOIS; ARLIGUIE, (1999), GASTALDINI; VAGHETTI; ISAIA (1999), DIAS (2000), MALHOTRA <i>et al.</i> (2000), MILETIC <i>et al.</i> (2000), BAKAREV; SANJAYAN; CHENG, (2001), MARTINS MONTICELLI; CAMARINI, (2001), SANJUAN; OLMO (2001), VAGHETTI ISAIA; GASTALDINI, (2001), COELHO (2002), CHI; HUANG, (2002), HOUST; WITTMAN (2002), KHAN; LYNSDALE (2002), LO; LEE (2002), MITRE; BARBOSA; HELENE (2002) STUMPP; ISAIA; GASTALDINI (2002), XIAO <i>et al.</i> (2002), ATIS (2003), JUNG; YOON; SOHN, (2003), CASTRO (2003) e FERREIRA JUNIOR (2003); CASTRO; CASCUDO; CARAZEK; LOPEZ (2003); CASTRO; FERREIRA; LOPEZ; CASCUDO; CARAZEK (2004).
Análise mineralógica	AL-KHADIMI <i>et al.</i> (1996), KAZMIERCZAK; LINDENMEYER (1996).
Análise térmica	RICHARDSON <i>et al.</i> (1992), SUGAMA (1996), SURYAVANSHI; SWAMY (1996), GASTAÑAGA <i>et al.</i> (1997).
Difração de raios X	JOHNSTONE; GLASSER (1992), KOBAYASHI; SUZUKI; UNO, (1994), SUGAMA (1996), SURYAVANSHI; SWAMY (1996), GASTAÑAGA <i>et al.</i> (1997), MACIAS; KINDNESS; GLASSER (1997), BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG (2001).
D. carbono radioativo	SHIMIDT <i>et al.</i> (2001).
M. infra-vermelha	CLIMENT; GUTIÉRRES (1995) e LO; LEE (2002).

## 2.5 Modelos teóricos utilizados para prever a profundidade de carbonatação

Várias pesquisas têm demonstrado que a taxa de carbonatação dos materiais cimentícios progride proporcionalmente à raiz quadrada do tempo de exposição, descrita por uma equação empírica proposta pela primeira vez em 1928 (equação 2.2) (RICHARDSON, 1988; PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991; ZHANG; NAKAZAWA; IMAI, 1997).

Outros modelos foram propostos, considerando, por exemplo, a influência da relação água/cimento, da resistência à compressão, do teor de cimento, de outros materiais e também do período necessário para o mecanismo se iniciar, que não estavam contemplados na fórmula inicial. Entretanto, todas as pesquisas se baseavam na proporcionalidade da raiz quadrada do tempo de exposição, segundo a equação 2.2 (RICHARDSON, 1988).

Nas pesquisas de NUNES (1998), a evolução da expressão que estabelece o progresso da carbonatação e diversos modelos propostos para prever a profundidade de carbonatação são citados, desde VERBECK (1958), que estabelece ser a profundidade de carbonatação inversamente proporcional à profundidade carbonatada, ao modelo de ZHANG; NAKAZAWA; IMAI (1997), tendo-se ainda, a partir do modelo proposto por PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS (1991), a estimativa da profundidade de carbonatação por meio de uma ferramenta computacional.

No modelo de ZHANG; NAKAZAWA; IMAI (1997), de estimativa da profundidade de carbonatação, é proposta uma expressão analítica com a introdução de alguns parâmetros da microestrutura do concreto e considerando a carbonatação como um mecanismo de difusão controlado.

Para ZHANG; NAKAZAWA; IMAI (1997), os principais passos que envolvem a carbonatação são a difusão do CO<sub>2</sub>, através da fase gasosa do concreto; a dissolução do CO<sub>2</sub> na água do poro do concreto; a reação do CO<sub>2</sub> dissolvido com o Ca(OH)<sub>2</sub> dissolvido na água do poro e a redução do volume do poro devido à formação dos produtos sólidos da carbonatação.

Com base nestes parâmetros, ZHANG; NAKAZAWA; IMAI (1997) obtiveram a equação 2.17.

$$x = \sqrt{\frac{2DC_s t}{W_{CaO}}}$$

Equação 2.17

Onde:

- x - profundidade de carbonatação;
- D - coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> no concreto medida em m<sup>2</sup>/seg;
- C<sub>s</sub> - concentração de CO<sub>2</sub> medida em mol/m<sup>3</sup>;
- W<sub>CaO</sub> - concentração de CaO no concreto medida em mol/m<sup>3</sup>;
- t - tempo de exposição.

Esta fórmula é similar a formula empírica (equação 2.2) proposta pela maioria dos autores, com base nas leis de Fick.

Outros modelos para a previsão da profundidade de carbonatação fundamentam-se na resistência à compressão, sendo, então, a profundidade de carbonatação expressa pelas equações 2.18, 2.19 e 2.20, entre outras não citadas porque incluem parâmetros não contemplados neste estudo (PARROT, 1987; RICHARDSON, 1988).

$$x = 103,4 e^{-0,123f_c} \quad (t=3 \text{ anos, ambiente externo}) \quad \text{Equação 2.18}$$

$$x = 3,4 e^{-0,123f_c} \quad (t=3 \text{ anos, ambiente interno}) \quad \text{Equação 2.19}$$

$$x = 680(f_c + 25)^{-1,5} - 0,6 \quad (t=2 \text{ anos})^* \quad \text{Equação 2.20}$$

Onde:

x - profundidade de carbonatação (mm);  
 f<sub>c</sub> - resistência média à compressão aos 28 dias (MPa).

As equações 2.18, 2.19 e 2.20 parecem ser válidas somente para os espaços de tempo e resistências especificadas sem a possibilidade de previsão da profundidade de carbonatação num outro tempo.

Uma outra equação, segundo RICHARDSON (1988), foi desenvolvida por Smolczyk, considerando que a resistência a compressão aumenta continuamente. Assim sendo, a profundidade de carbonatação foi definida pela equação 2.21.

$$x = 7 \left( \frac{10}{\sqrt{N_T}} \frac{w/c}{-0,175} \right) \sqrt{t} - 0,50 \quad \text{Equação 2.21}$$

Onde:

x - profundidade de carbonatação (mm);  
 N<sub>T</sub> - resistência à compressão aos T dias (MPa);  
 w/c – relação água/cimento.

Deve-se considerar que, nas equações 2.18, 2.19, 2.20 e 2.21, faz-se necessário conhecer a resistência à compressão do concreto na idade desejada para se prever a profundidade de carbonatação para uma determinada idade e, por isso, RICHARDSON (1988) considera que a equação 2.2, que tem por base a raiz quadrada do tempo, é uma aproximação mais útil.

Com base nessa equação empírica, equação 2.2, HÄKKINEN (1992), considerando ser o coeficiente de carbonatação função de diversos parâmetros, estabeleceu os seguintes modelos para a profundidade de carbonatação em função da resistência do concreto:

$$\text{a partir de: } d = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad \text{Equação 2.22}$$

$$\text{e } k_{CO_2} = a f^b \quad \text{Obtiveram:} \quad \text{Equação 2.23}$$

$$k_{CO_2} = 1930 f^{1,7} \quad (\text{concreto com cimento } \textit{Portland} \text{ comum}) \quad \text{Equação 2.24}$$

$$k_{CO_2} = 3150 f^{-1,8} \quad (\text{concreto com escória de alto-forno}) \quad \text{Equação 2.25}$$

Onde:

d - profundidade de carbonatação (mm);

- $k_{(CO_2)}$  - coeficiente que depende do material ( $mm/\sqrt{ano}$ );  
t – tempo (anos);  
f- resistência à compressão aos 28 dias (MPa);  
a e b – constantes.

As equações 2.24 e 2.25 permitem, conhecendo-se a resistência à compressão do concreto aos vinte e oito dias, estimar a profundidade de carbonatação para uma determinada família de concreto. Deve-se considerar ainda que as equações 2.26 e 2.27 foram estabelecidas para as condições de exposições específicas das pesquisas de HÄKKINEN (1992), mas podem ser estabelecidas para condições normalizadas, sendo úteis na estimativa de durabilidade de uma estrutura de concreto.

### 2.5.1 Estimativa da durabilidade das estruturas de concreto sob o ponto de vista da carbonatação

Sabe-se que, em virtude de sua elevada alcalinidade, o concreto está normalmente protegido contra a corrosão da armadura.

Os dois principais mecanismos responsáveis pela corrosão da armadura são o ataque de cloretos e a carbonatação. Segundo LEVY; HELENE (2000), em 96% das 27 (vinte e sete) edificações de escolas públicas no estado de São Paulo, a corrosão estava relacionada à despassivação da armadura pelo mecanismo da carbonatação, e por isso responsável, também, pela diminuição da vida útil<sup>11</sup> das estruturas (HELENE, 1995; AHMAD, 2003).

Na norma brasileira NBR 6118/2003 estabeleceu-se condições mínimas de cobrimento de acordo com as condições do ambiente, sem definir um período para que a edificação atinja a sua vida útil. A norma inglesa, BS 7543/1993 estabelece um período igual ou superior a 10 anos para as obras temporárias e igual ou superior a 120 anos para as obras de arte e edifícios públicos novos; e na norma européia CEN/EN 206/1994 previu-se um período de 01 (um) a 05 (cinco) anos para as obras temporárias e maior ou igual a 100 anos para as obras de artes novas (HELENE, 2001).

Assim sendo, ao se projetar uma estrutura com uma vida útil mínima de 50 anos, a espessura alcançada pelo CO<sub>2</sub> no interior do concreto pode ser estimada utilizando-se a equação 2.2, obtendo-se os coeficientes de carbonatação por meio de ensaios naturais e ensaios acelerados.

---

<sup>11</sup> Vida útil é o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar adequadamente as funções para as quais foi projetada (HELENE, 2001).

É estabelecida uma relação entre o ensaio acelerado e o natural, para uma determinada idade, estimando-se a partir dos ensaios acelerados realizados em um curto espaço de tempo, uma estimativa do tempo em que a frente de carbonatação atingirá a armadura.

## **2.6 Considerações sobre o capítulo**

Dentre os muitos fatores que influenciam o mecanismo da carbonatação, destacam-se as condições ambientais como por exemplo a umidade relativa, a temperatura e o local efetivo no qual está inserido o concreto, que interferem diretamente na concentração de CO<sub>2</sub> e as condições inerentes à qualidade do concreto de cobrimento tais como: a relação água/cimento, condições de cura, a idade e o grau de hidratação do concreto, tipo e forma do agregado, e o tipo e o teor do aglomerante).

As mudanças estruturais nas pastas das matrizes cimentícias em decorrência da expansão dentro do concreto, da ordem de 11%, diminuindo a porosidade da pasta e alterando as dimensões dos poros, influenciam também na carbonatação. Nessas mudanças estruturais destacam-se os poros com raios maiores do que 450<sup>o</sup>A, com maior influência na carbonatação.

Os métodos empregados para se medir a carbonatação também são relevantes e a grande maioria dos pesquisadores utiliza a aspersão de fenolftaleína para medir a profundidade de penetração do CO<sub>2</sub> em ensaios em concentrações atmosféricas e em ensaios acelerados com elevados teores de CO<sub>2</sub>, cujos resultados, de um modo geral, não são comparáveis, pelas diferentes condições estabelecidas nos ensaios.

No cômputo geral, nesta revisão bibliográfica observa-se que muitos fatores influenciam o mecanismo da carbonatação e que os projetos devem sempre ser conduzidos sob a perspectiva de que as condições ambientais agressivas e a qualidade do concreto produzido para as estruturas garantam o tempo de vida útil esperado.

Dessa forma, com o objetivo principal de observar a influência da adição de diferentes e elevados teores de escória de alto-forno substituindo o cimento, no capítulo 3 faz-se uma revisão bibliográfica da escória de alto-forno e sua influência no mecanismo da carbonatação. No capítulo 4, descreve-se a metodologia utilizada neste estudo e no capítulo 5 são fornecidos e analisados os resultados obtidos.

## **CAPÍTULO III - A ESCÓRIA DE ALTO-FORNO NA PRODUÇÃO DO CONCRETO**

### **3.1 Introdução**

O consumo cada vez maior de matérias-primas que causam o aumento de energia na manufatura e, por conseqüência, o aumento das emissões gasosas na atmosfera, principalmente, na produção de cimento<sup>1</sup>, fazem com que as organizações ambientais, nacionais e internacionais alertem sobre a necessidade da redução destas emissões, nas diversas conferências que têm acontecido por todo o mundo (EHRENBERG; GEISELER, 1999).

Desde a **1ª World Climate Conference**, em 1979, à **Agenda 21**, no Rio de Janeiro, em 1992, a preocupação com o meio ambiente tem se intensificado e, com “*The First Conference of the Parties of the climate change convection* (COP-1)”, o chamado “Mandato de Berlim”, iniciou-se a discussão sobre as obrigações a serem cumpridas pelas indústrias de concreto e cimento. Anteriormente, as indústrias cimenteiras já tinham assumido o compromisso de reduzir o consumo de energia em até 20% do total consumido, até 2005. Posteriormente, na Alemanha, esse percentual foi aumentado para 25%, até 2005 (EHRENBERG; GEISELER, 1999).

Por outro lado, as indústrias se preocupam também em atender às novas legislações ambientais que as responsabilizam pelo impacto ambiental provocado pelos seus resíduos, buscando soluções para o aproveitamento dos mesmos, com eficácia e eficiência.

As indústrias de cimento já tinham, de alguma forma, contribuído, quando passaram a utilizar a escória de alto-forno, moída, como substituição do clínquer de cimento *Portland* e, também, ao usar combustíveis alternativos, como resíduos de pneus e de óleos, na queima para a produção do clínquer (BIJEN, 1996; PRISCIANDARO; MAZZIOTTI; VEGLIÓ, 2003).

O uso de resíduos na produção de cimentos iniciou-se com a granulação da escória de alto-forno, em 1853, na Alemanha, para facilitar o transporte desta, e com a posterior descoberta de sua hidraulicidade latente, em 1862, foi incrementado o uso como constituinte do cimento (BIJEN, 1996).

---

<sup>1</sup> A produção de cimento é responsável por cerca de 5% a 7,9% das emissões de CO<sub>2</sub>, do total em todo o mundo (EHRENBERG; GEISELER, 1999, GENET, 2000).

Nos anos seguintes, o cimento de escória passou a ser comercializado. Em 1865, ativou-se a escória com a cal e, mais tarde, com o cimento *Portland*. Em 1888, o clínquer, a escória e o sulfato de cálcio foram moídos em conjunto, e os primeiros usos do cimento de alto-forno se deram para condições severas de exposição. Esses cimentos utilizavam em torno de 65% a 75% em massa de escória de alto-forno moída e, por mais de 60 (sessenta) anos, na Holanda, as estruturas marinhas têm sido somente construídas com cimento de alto-forno (BIJEN, 1996).

O uso do cimento de escória ativada com a cal hidratada ou hidráulica foi normalizado no século XX, na Suíça, e recomendado para uso em obras submersas, em presença de umidade, quando não era necessária elevada resistência, pois as baixas resistências iniciais observadas, a pega mais lenta e a necessidade de um maior tempo de cura, a fim de evitar fissuras, risco de danos por congelamento e por ataque pela água do mar que quase inviabilizaram o seu uso.

Um outro fator importante observado foi o aumento da finura, que contribuía para a resistência ser equiparada à do cimento *Portland*; perdurando, entretanto, seu uso recomendado para obras hidráulicas (JOHN, 1995).

Posteriormente, ativadores como carbonato de sódio, cloreto de sódio, sulfato de sódio ou sulfato de cálcio, foram usados, mas a mistura de escória de alto-forno com clínquer *Portland* apresentou resultados de resistências química e mecânica superiores, e o uso do cimento de escória foi diminuindo em detrimento das misturas de clínquer com escória. Além disso, no cimento de escória ativado com cal, que já apresentava baixa velocidade de crescimento da resistência, a carbonatação durante a sua armazenagem reduzia ainda mais essa resistência (JOHN, 1995).

Assim, com o crescimento do consumo das misturas clínquer/escória granulada de alto-forno, o uso da escória foi normalizado na Europa, e a Alemanha, em 1907, substituiu o clínquer por cerca de 30% de escória granulada de alto-forno, aumentando este teor para até 85%, em 1917 (JOHN, 1995; EHRENBERG; GEISELER, 1999).

Vários países, como a Bélgica, Inglaterra, França e Estados Unidos, já tinham normalização em 1952, que permitia a adição de escória de alto-forno ao clínquer no teor de até 65%. A norma russa, editada em 1952, permitia a adição de teores entre 5% e 95% de escória de alto-forno (JOHN, 1995).

Hoje, a norma européia EN 197-1 de fevereiro/2000 permite a substituição do clínquer do cimento *Portland* por escória de alto-forno no teor de até 95% e, na Alemanha o percentual de substituição já é da ordem de 95% (LANG; BRODERSEN, 2000).

No Brasil, o uso da escória de alto-forno em substituição ao clínquer do cimento *Portland* iniciou-se em 1952. Foram, em princípio, produzidas 71.765 toneladas de cimento *Portland* de alto-forno, em Volta Redonda, Rio de Janeiro, com teor igual a 30% de escória de alto-forno em relação ao clínquer do cimento, teor aumentado em 1954, para 50% (BATTAGIN; ESPER, 1988, SILVA, 1998).

Hoje, estabeleceu-se na NBR 11 578/1991 o percentual de até 35% no cimento composto e na NBR 5735/1991, de até 70%, no cimento de alto-forno, de substituição do clínquer por escória de alto-forno.

### 3.2 Geração e características da escória de alto-forno

As escórias caracterizam-se como subprodutos da produção do aço, a qual compreende operações complexas, iniciadas com a aglomeração e redução do minério de ferro nas usinas integradas ou na refusão e refino de sucata metálica e do ferro gusa nas usinas semi-integradas (LITTLE; SETEPLA, 1999).

As matérias-primas<sup>2</sup> usadas na produção do aço são encontradas na natureza com impurezas, denominadas gangas. A transformação do minério de ferro em ferro gusa se dá no alto-forno, cujo objetivo é a redução<sup>3</sup> de seus óxidos, através de um redutor, o coque metalúrgico ou o carvão vegetal, em presença de um fundente, geralmente, a pedra calcária e a dolomita (WAEKENS; CARMINE, 1985; GLASSER, 1989; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; DIAS, 1998).

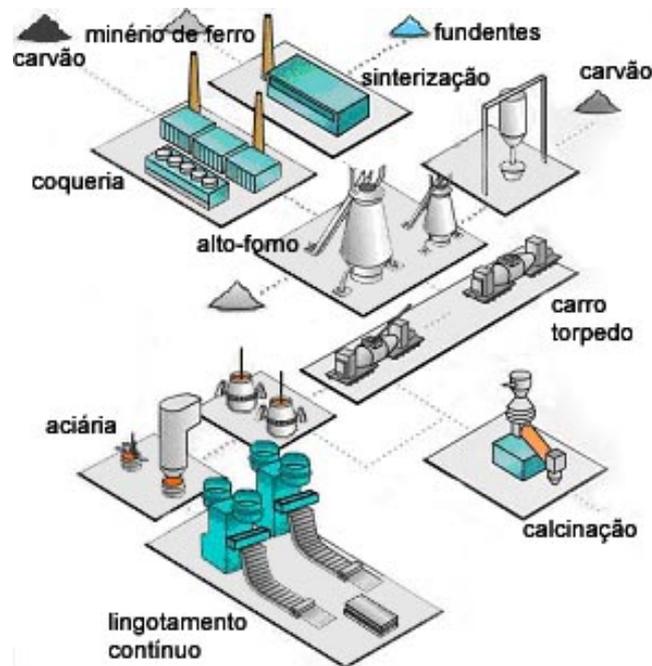
Os fundentes têm a função de reduzir a temperatura de fusão, retirar a ganga e obter uma escória fluída, para facilitar as reações entre a escória e o metal e para controlar a sua qualidade. Os mais usados são CaO, MgO, CaF<sub>2</sub> e, em alguns casos, é empregado um fundente ácido como SiO<sub>2</sub> (WAEKENS; CARMINE, 1985; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; DIAS, 1998).

---

<sup>2</sup> minério de ferro

<sup>3</sup> redução é a retirada do oxigênio do minério (DIAS, 1998).

A combinação do carbono do coque metalúrgico ou do carvão vegetal com o oxigênio do minério de ferro gera calor, fornecendo o necessário para fundir o metal. O coque quando entra em combustão, gerando calor, reduz o minério de ferro, dando origem ao ferro gusa e à escória de alto-forno, cujo fluxo de produção, observa-se na Figura 3. 1.



**Figura 3. 1: Fluxo de produção do ferro-gusa (CST, 2004).**

Dessa forma, dois líquidos imiscíveis são formados na parte inferior do forno, e a escória de alto-forno, menos densa do que o metal, situa-se na parte superior, onde os elementos mais eletropositivos, cálcio, magnésio e alumínio, em altas temperaturas, cerca de 1550°C, tendem a permanecer combinados com o oxigênio, formando um óxido fundido (GLASSER, 1989).

WAEKENS; CARMINE (1985), GEYER; DAL MOLIN; VILELA (1995) e DIAS (1998) afirmam que, em virtude das diferenças de viscosidade, a escória de alto-forno é obtida com elevada fluidez, devido ao processo de difusão banho-metálico-escória ocorrer em alta velocidade, sendo difícil uma boa separação dos líquidos, escória-metal.

Essas diferenças de viscosidade proporcionam uma resistência à perfeita separação da escória do metal, ficando pequenas gotas entranhadas que dificilmente se separam, sendo ainda mais complexa essa separação quanto menor o diâmetro das gotas.

A escória é separada da fase metálica como resultado da sua menor massa e pela sua insolubilidade no metal e resfriada por diferentes processos, depois de vazada por um orifício acima do banho metálico.

O ferro-gusa, que é vazado em vagonetes, passa por uma dessulfuração e desfosforação até teores aceitáveis de enxofre e segue para a aciaria (WAELEKENS; CARMINE, 1985; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; DIAS, 1998).

A função da escória, nesse processo, é dissolver as impurezas do minério e do coque tanto quanto possível. A quantidade de escória gerada no alto-forno é, em média, de 266 kg/t de ferro-gusa produzido no Brasil e 294 kg/t a média em outros países<sup>4</sup>, o que justifica economicamente a classificação e o tratamento das escórias para uma aplicação mais nobre, em vez da disposição em grandes áreas de descarte (GLASSER, 1989; LITTLE; SETEPLA, 1999).

Após sua separação da parte metálica, a escória líquida encontra-se em uma temperatura entre 1350°C e 1550°C. Nesta temperatura, a escória de alto-forno contém uma energia de 1700kJ/kg que, sem um tratamento adequado, pode ser perdida e, por isto, depois de vazada, ela segue por canais que a conduzem ao local onde será resfriada.

O tipo de resfriamento a que será submetida e suas diferentes características, como densidade, granulometria e propriedades estruturais, definirão a sua aplicação (ALDASORO, 1985; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995).

Se o resfriamento da escória de alto-forno for lento, os seus compostos vão se cristalizando também lentamente, perdendo sua energia latente e o seu poder de aglomerante hidráulico. Constitui-se, então, em um material inerte que, depois de britado, pode ser utilizado como agregado graúdo para concreto (ALDASORO, 1985; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995).

Por outro lado, se a escória de alto-forno é resfriada muito rapidamente, os grãos formados apresentam-se vítreos como resultado de uma solidificação muito rápida, não permitindo a formação de estruturas cristalinas. Dessa forma, a escória de alto-forno congela a sua energia latente e mantém uma característica de hidraulicidade<sup>5</sup>.

Quando é empregado o resfriamento rápido, na saída do alto-forno, a escória, previamente fragmentada por jatos d'água, originará um produto granular e vítreo. Sua granulometria é

---

<sup>4</sup> Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coreia do Sul (LITTLE; SETEPLA, 1999).

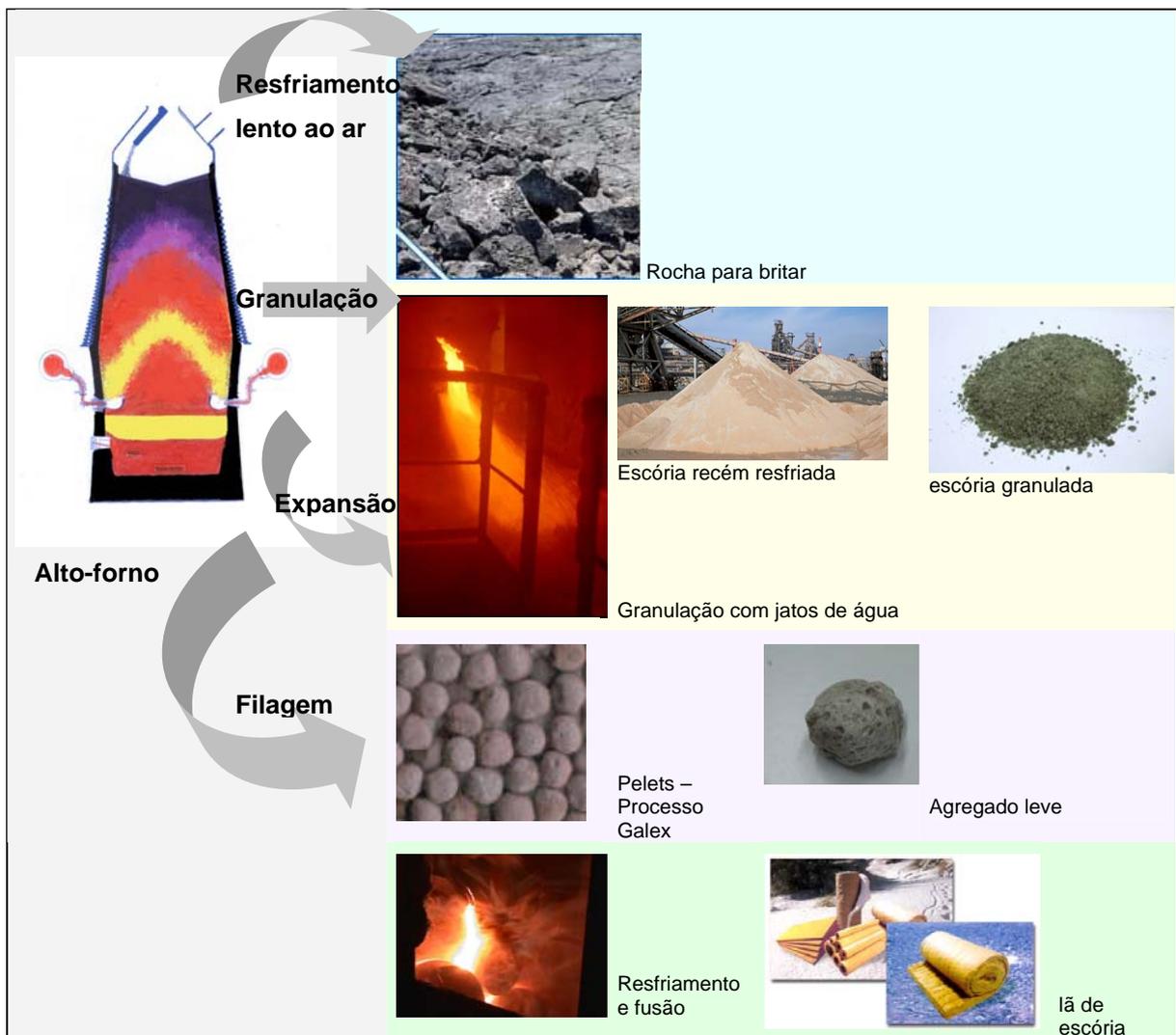
<sup>5</sup> Hidraulicidade é o poder de adquirir propriedades cimentantes quando a estrutura vítrea é dissolvida quimicamente por ativadores e em presença de água (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

semelhante à da areia de rio, tem estrutura porosa, textura áspera e massa unitária em torno de 1000 kg/m<sup>3</sup> (ALDOSORO, 1985; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995).

Para esse tipo de resfriamento, com jatos de água, à pressão de 0,6 MPa, são necessários 8 t de água para resfriar instantaneamente uma tonelada de escória de alto-forno, cuja temperatura, inicialmente de 1500 °C é reduzida para menos de 100°C. Nesse processo, a água, após sua utilização, circula e passa por filtros, para ser, então, reaproveitada (MEUSEL; ROSE, 1983; ALDOSORO, 1985; JOHN *et al.*, 1994).

A escória de alto-forno resfriada por jatos de água, ao ser finamente moída, tem uma excelente propriedade hidráulica (SCANDIUZZI; BATTAGIN, 1992; SILVA, 1998).

Na Figura 3.2 vê-se uma representação esquemática com os diversos tratamentos empregados na escória de alto-forno líquida: o resfriamento ao ar, a granulação, a expansão e a filagem.



**Figura 3.2:** Resfriamentos aplicados à escória de alto-forno (a partir de ALEXANDRE; SIBILEAU, 1988, COELHO, 2002; KOBELCO, 2003; SLOSS INDUSTRIES, 2004, CST, 2004).

O resfriamento da escória de alto-forno lento ao ar é pouco utilizado no Brasil, onde se granula cerca de 95% (SCANDIUZZI; BATTAGIN, 1992; SILVA, 1998; LITTLE; SETEPLA, 1999).

Um outro tipo de resfriamento, que dá origem à escória expandida ou peletizada, é o processo denominado *Galex*, que permite a obtenção de propriedades físico-químicas particulares. Esse processo é puramente físico, combinando expansão e formação de poros na escória de alto-forno pela injeção de água, por dispersão mecânica obtida através de um tambor giratório. As partículas tomam uma forma mais ou menos esférica, por efeito de tensão superficial, e ao se deslocarem através das gotas de água, formam glóbulos os quais se resfriam rapidamente e adquirem uma estrutura vítrea na superfície; mas na parte interna, que tem um resfriamento mais lento, apresentam estruturas cristalinas. Sua granulometria tem dimensão máxima característica que varia entre 9,5 mm e 32,0 mm, típica de agregado graúdo, e esta escória é empregada em concreto leve, concreto estrutural e no enchimento de pisos (ALDASORO, 1985; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; LITTLE; SETEPLA, 1999).

A lã de escória é obtida por meio do reaquecimento e fusão da escória de depósitos com longo período de armazenagem, em um cadinho e depois vazada na forma de um jato fino, resfriado rapidamente sob pressão, por meio de um jato de ar ou ar e vapor. Os finos fios vítreos são moldados na forma de feltro, possuem baixa massa específica e excelentes propriedades térmicas e acústicas (LEA, 1998; LITTLE; SETEPLA, 1999).

No Brasil, não são produzidas as escórias expandidas e a lã de escória (LITTLE; SETEPLA, 1999).

Observa-se no Quadro 3.1, que, do total gerado, a maior parte da escória de alto-forno é granulada nos principais países exportadores e no Brasil (LITTLE; SETEPLA, 1999).

**Quadro 3.1: Percentual empregado para os diferentes tratamentos da escória de alto-forno (LITTLE; SETEPLA, 1999)**

Tratamento	Principais países produtores (%)	Brasil (%)
granulação	47	94.6
Resfriamento ao ar	46	5.4
Expansão/pelotização	7	-

### 3.3 Reatividade da escória granulada de alto-forno

O grau de vitrificação (teor de vidro), composição química, composição mineralógica e finura da escória de alto-forno são as principais características que influenciam a sua reatividade e, de um modo geral, segundo alguns autores, é tanto maior quanto maior for o seu teor de vidro (SMOLCZYK, 1980; REGOURD, 1980; HOOTON, 1987; GLASSER, 1989; JOHN, 1995).

A estrutura vítrea da escória de alto-forno, obtida no resfriamento brusco que impede formação de cristais, se caracteriza por uma estrutura sólida, amorfa, com regularidade apenas nas proximidades de uma cadeia de polimerização<sup>6</sup> tetraédrica. A estrutura tetraédrica é formada por átomos, com coordenação 4<sup>7</sup>, denominados, elementos formadores de cadeia, ligados por pontes covalentes de oxigênios, com os tetraedros distribuídos randomicamente numa estrutura espacial não cristalina. Com a ausência da ordem cristalina, a estrutura não tem formas geométricas definidas e está limitada, apenas, ao balanceamento elétrico das cargas (ZACHARIESEN, 1932; VAN VLACK, 1973; SMOLCZYK, 1980).

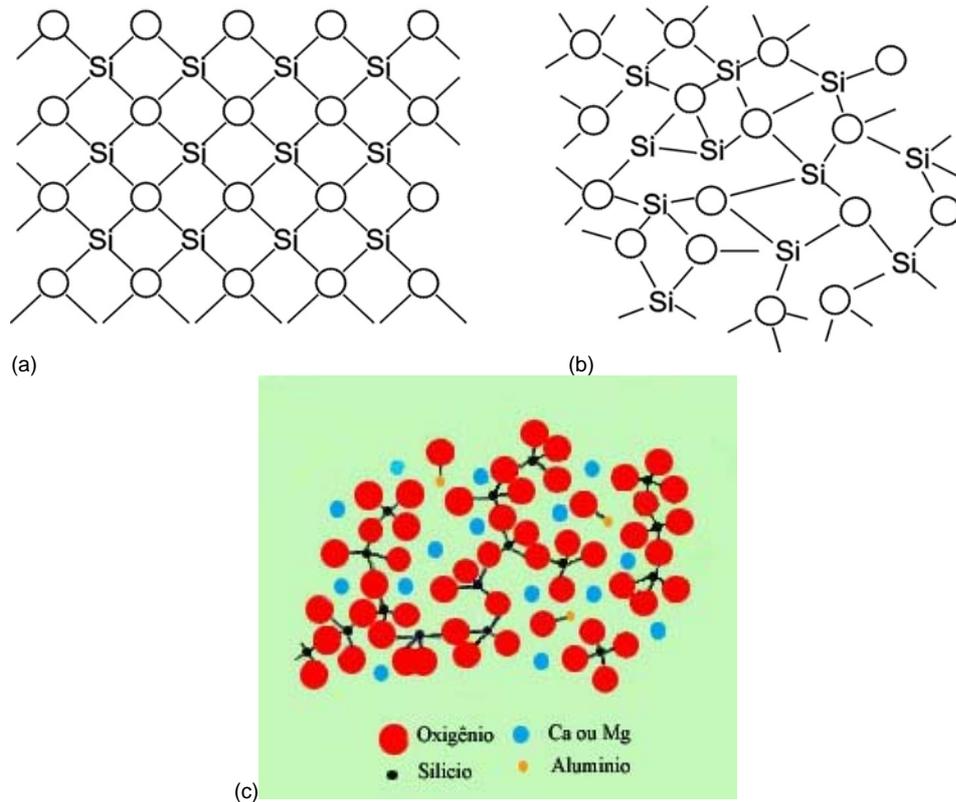
Quando o tetraedro atua como um íon, cada átomo de oxigênio pode receber um elétron extra e compartilhar com outro tetraedro. Os cátions, que são os elementos denominados modificadores de rede, neutralizam a valência negativa desses íons, quebram a estrutura vítrea, ocupam normalmente as cavidades por terem alto raio iônico e alto número de coordenação e, por isso, gera a sua pequena estabilidade e alta reatividade (VAN VLACK, 1973; GLASSER, 1989).

A estrutura da escória é similar à estrutura do vidro sílica, conforme a representação esquemática da Figura 3.3, onde as ligações Si-O-Si são quebradas e neutralizadas por cátions chamados modificadores de cadeia (LEA, 1998).

---

<sup>6</sup> A polimerização é o crescimento de moléculas ou estruturas a partir de pequenas moléculas ou átomos (VAN VLACK, 1973).

<sup>7</sup> Numero de coordenação é o número de grupos ou íons que cercam e estão ligados a um grupo, íon ou molécula (VAN VALACK, 1973).



**Figura 3. 3: Representação esquemática a) estrutura cristalina e (b) estrutura vítrea (GLASSER, 1989); (c) estrutura vítrea da escória granulada de alto-forno (SILVA, 1998).**

A escória de alto-forno, diferente do vidro, que é um material fabricado para ser relativamente homogêneo, possui outros íons, os íons magnésio e alumínio, além dos íons silício, que formam coordenação tetraédrica típica da estrutura vítrea, sendo, então, denominados elementos formadores de cadeia. Entretanto, de um modo geral, os íons magnésio e alumínio, além dos íons cálcio, são típicos modificadores de cadeia na estrutura da escória (SMOLCZYK, 1980; GLASSER, 1989).

Além da estrutura vítrea da escória de alto-forno, a sua composição química é também muito importante para a sua reatividade<sup>8</sup>. A composição química, por sua vez, influencia a solubilidade da escória de alto-forno em meio alcalino e, também, a capacidade de precipitação de compostos hidratados e, em conjunto com os ativadores, a composição química dos produtos hidratados (JOHN, 1995).

Normalmente, a composição química da escória de alto-forno é proporcionada pelas matérias primas de fabricação do aço e, dependendo das especificações requeridas para ele, pequenas

<sup>8</sup> A escória de alto-forno tem hidraulicidade latente e sua energia interna é usada para formar produtos hidratados semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento *Portland*, após a sua ativação (SMOLCZYK, 1980).

alterações podem ocorrer no teor do cálcio. Por exemplo, se este teor aumenta, a relação CaO/SiO também aumenta, o que dificulta a formação do vidro (FREARSON; UREN, 1986; GLASSER, 1989; LEA, 1998).

Quando existe alto teor de cálcio, pode acontecer, dentro da estrutura vítrea, a cristalização da merwinita<sup>9</sup>. Esta remove a cal, o magnésio e a sílica da fusão e não contém, alumínio, que permanece na estrutura vítrea, alterando a composição química da escória (FREARSON; UREN, 1986).

O alumínio, por ser menos covalente do que o silício, é o ponto fraco da estrutura vítrea e, quando em grande quantidade, aumenta a solubilidade do vidro, independente de ser modificador de cadeia ou formador de cadeia (FREARSON; UREN, 1986; JOHN, 1995). Por isso, autores como LEA (1998) consideram que a vitrificação total da escória não é um critério de ótima reatividade e um percentual cristalino de até 25% parece favorecer a moagem dessa escória.

Esse aumento de reatividade não foi observado nos resultados das pesquisas experimentais de GLASSER (1989), que não conseguiu repetir, em seus resultados, um aumento da reatividade da escória com o aumento do percentual cristalino e afirma ser desejável o maior teor de vidro, tanto quanto possível para manter a reatividade da escória.

Além das características das matérias-primas empregadas no processo de produção do aço, as propriedades e composição da escória de alto-forno podem variar também com as proporções dos constituintes nos minerais, com os fundentes, com o coque e com outras matérias-primas, e ainda, com a pureza do material a fabricar e com as diferenças nos processos de fabricação, mas sempre dentro de limites relativamente estreitos que definem a qualidade do metal (WAEKENS; CARMINE, 1985).

Os óxidos constituintes da escória de alto-forno mais importantes são CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> que representam 95% a 96% do total de óxidos, e outros elementos de menor importância, que são o enxofre e os óxidos de magnésio e de ferro.

No que diz respeito às suas características, as escórias produzidas no alto-forno se classificam em ácidas e básicas (WAEKENS; CARMINE, 1985; JOHN, 1995; LITTLE; SETEPLA, 1999).

---

<sup>9</sup> Merwinita é a fração cristalina cuja composição é 3 CaO. MgO. 2SiO<sub>2</sub> (SMOLCZYK, 1980).

A escória de alto-forno é ácida, quando se originou no alto forno à carvão vegetal e tem relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  inferior a 1, e básica, quando originou-se no alto forno a coque e tem relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  maior do que 1 (JOHN, 1995; LITTLE; SETEPLA, 1999).

No Quadro 3.2, observa-se a composição química média das escórias de alto-forno básicas e ácidas produzidas no Brasil, comparadas à do cimento *Portland* (WAELEKENS; CARMINE, 1985; LITTLE; SETEPLA, 1999).

**Quadro 3.2: Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento *Portland* (JOHN, 1995)**

	Escória básica (BATTAGIN; ESPER,1988)	Escória ácida (adaptado de SOARES,1982)	Cimento Portland (TAYLOR, 1992)
CaO	40-45	24-39	66
SiO <sub>2</sub>	30-35	38-55	22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11-18	8-19	5
MgO	2,5-9	1,5-9	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-2	0,4-2,5	3
FeO	0-2	0,2-1,5	-
S	0,5-1,5	0,03-0,2	-
CaO/SiO <sub>2</sub> média	1,31	0,68	3

Como a estrutura vítrea e a composição química, a composição mineralógica influencia nas propriedades hidráulicas da escória de alto-forno na medida em que ocorre a completa cristalização ou não. Deve-se considerar que os compostos principais da fase cristalina da escória de alto-forno, a melilita<sup>10</sup> e a merwinita, oriundos do resfriamento ao ar, têm pouca atividade hidráulica (SMOLCYK, 1980; JOHN, 1995).

A finura da escória, como os fatores citados anteriormente, também afeta a reatividade da escória na razão de que partículas com menores dimensões hidratam-se mais rapidamente, produzindo estruturas mais compactas. Entretanto, a lenta ou nenhuma hidratação da escória por si só, dependendo do tipo de resfriamento empregado na saída do alto-forno, conduz à necessidade de acelerar a velocidade dessas reações, como está descrito no item 3.4 e subitem 3.4.1 (REGOURD, 1980).

A reatividade da escória de alto-forno é avaliada, segundo MARQUES (1994), com base na composição química, utilizando módulos químicos; na microestrutura, determinando-se o grau de vitrificação, por difração de Raios X ou pela própria hidratação da escória, com

<sup>10</sup> Melilita é uma solução sólida de geelenita e akematita cujas composições químicas são respectivamente:  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  e  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (SMOLCYK, 1980).

utilização do método acelerado para medir a sua solubilidade, em uma solução de soda com pH de 12,6.

Embora uma correlação geral e aplicável entre a hidraulicidade e a composição química das escórias, ainda não tenha sido determinada, algumas características, tais como a maior relação  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$ , parece ter um efeito negativo. O aumento de MgO parece ter um efeito favorável, se limitado em até 18%, do contrário, torna-se indesejável, porque reage, expansivamente, para formar a brucita, assim como um alto teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  parece ter efeito favorável no desenvolvimento das resistências iniciais (GLASSER, 1989; BIJEN, 1996).

Para prever os resultados de resistências do cimento de alto-forno alguns autores estabeleceram alguns módulos hidráulicos<sup>11</sup> que servem como simples referência e classificam a escória de alto-forno, de uma mesma procedência, em diferentes grupos. Entretanto, não servem, satisfatoriamente, para prever a evolução da hidratação do cimento de alto-forno (SMOLCZYK, 1980).

Além da difração de Raios X, algumas das técnicas mais recentes usadas para avaliar a estrutura vítrea das escórias são a ressonância magnética e espectroscopia ultravioleta.

A ressonância magnética pode ser usada para determinar o grau de polimerização e a resistência de ligação entre os principais componentes do vidro, o Al e Si, correlacionando o estado estrutural com a reatividade da escória. A espectroscopia ultravioleta é muito usada na indústria metalúrgica para medir a basicidade da escória (GLASSER, 1989).

### **3.4 Ativação e hidratação da escória de alto-forno**

A escória de alto-forno resfriada lentamente ao ar e que apresenta natureza completamente cristalina não reage ao entrar em contato com a água; a que foi resfriada rapidamente, tem uma energia latente, originada da solidificação instantânea da escória líquida, não permitindo a organização em núcleos cristalinos, e por isso, mantém uma característica hidráulica que permite a sua reação de hidratação. Essa reação está limitada pela velocidade de dissolução da escória (DRON, 1982; MEUSEL ROSE, 1983; JOHN, 1995).

Embora os compostos hidratados da escória sejam os mesmos que os do cimento, na escória de alto-forno, a velocidade de precipitação está limitada à velocidade de dissolução,

---

<sup>11</sup> São índices e módulos químicos utilizados para uma avaliação rápida da atividade hidráulica das escórias (SMOLCZYK, (1980).

hidratando-se, também, pelos mesmos mecanismos que o cimento: dissolução- precipitação. Depois, quando os grãos de escória estão cobertos por uma camada de produtos hidratados, a hidratação prossegue por difusão iônica (DRON, 1982; SHI; DAY, 1995b; CAMARINI, 1995; JOHN, 1995; SILVA, 1998).

Em presença de água, diferente do clínquer *Portland*, a escória de alto-forno dissolve muito lentamente. Inicialmente, as ligações Si-O, Al-O, Ca-O e Mg-O são quebradas na superfície do vidro sob o efeito dos íons  $\text{OH}^-$ . Como as ligações Ca-O e Mg-O são iônicas e, por isso mais fracas do que as ligações Si-O e Al-O, que são covalentes, os íons  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$  são liberados na solução, sem a dissolução das ligações Si-O e Al-O da estrutura da escória, os quais permanecem ao redor do grão, formando uma membrana rica em alumina e sílica, com baixa permeabilidade. Essa membrana dificulta a contínua dissolução da escória (DRON, 1982; AOKI; ARAI, 1992; JOHN, 1995; SHI; DAY, 1995b).

A membrana rica em alumina e sílica pode adsorver algum íon  $\text{H}^+$  da água, resultando na elevação da concentração de íons  $\text{OH}^-$  ou o pH da solução. Entretanto, as concentrações de  $\text{OH}^-$  da solução não são suficientes para permitir a quebra das ligações Si-O e Al-O e precipitar C-S-H. A precipitação do C-S-H, resultado da hidratação da escória, é muito pequena mesmo depois de alguns meses (SHI; DAY, 1995b).

A dissolução da escória ocorre por ataque hidroxílico<sup>12</sup>, diferentemente do clínquer que ocorre por ataque hidrolítico<sup>13</sup> (DRON, 1982; AOKI; ARAI, 1992; JOHN, 1995; SHI; DAY, 1995b).

A dissolução e a precipitação dos produtos hidratados, além da solubilidade da escória, são também dependentes da concentração de íons dissolvidos, a qual tende a um equilíbrio e, para a continuidade dessa dissolução, é necessário manter elevado o pH da solução, utilizando-se os ativadores (DRON, 1982; JOHN, 1995; LEA, 1998).

A ativação da escória de alto-forno pode ser feita por meios mecânicos, pelo aumento da finura da escória de alto-forno; térmicos, pelo aumento da temperatura de cura; e, químicos, pela elevação do pH (REGOURD, 1980; CAMARINI, 1995; JOHN, 1995; SILVA, 1998).

A ativação química descrita no item 3.4.1 tem melhores resultados e é, normalmente, combinada com as ativações anteriores: térmica e mecânica (JOHN, 1995; SILVA, 1998).

---

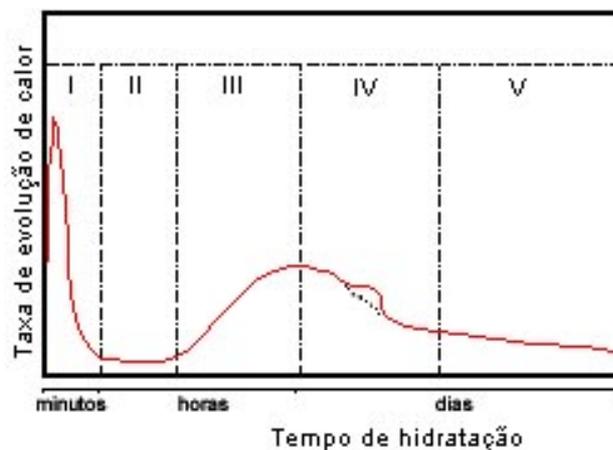
<sup>12</sup> Dissolução por ataque dos íons hidroxila (DRON, 1982; JOHN, 1995).

<sup>13</sup> Dissolução por ataque direto das moléculas de água (DRON, 1982; JOHN, 1995).

Na dissolução da escória, após a ativação química, a liberação dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  faz aumentar a concentração desses íons na solução e, assim, o pH da solução é aumentado, o que permite a dissolução da membrana de alumina, o prosseguimento das reações de hidratação por difusão e a precipitação dos produtos hidratados formados (CAMARINI, 1995; JOHN, 1995; SILVA, 1998).

Os produtos hidratados iniciais, que se precipitam ao redor dos grãos da escória, são denominados produtos hidratados externos (*outer shell products*) e os produtos formados após a dissolução da membrana de alumina, no interior do grão de escória, são denominados produtos hidratados internos (*inner shell products*) (JOHN, 1995, LEA, 1998).

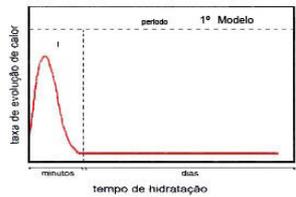
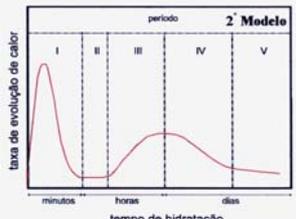
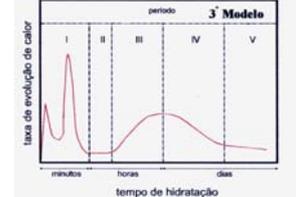
Nos estudos de hidratação da escória por calorimetria, observa-se que os mesmos estágios de hidratação do cimento *Portland*, como na Figura 3.4: estágio I – período inicial, estágio II – indução, estágio III – aceleração, estágio IV – desaceleração e estágio V – difusão são também aceitos para a escória de alto-forno (SHI; DAY, 1995a; SILVA, 1998).



**Figura 3. 4: Representação esquemática dos vários estágios de hidratação do cimento *Portland* (SHI; DAY, 1995a).**

Para a escória, SHI; DAY (1995a) propuseram três modelos de hidratação com base nas taxas de evolução de calor, discriminados no Quadro 3.3.

**Quadro 3.3: Modelo de hidratação da escória de alto-forno (SHI; DAY, 1995a).**

Tipo e características do modelo	Modelo	Exemplos
<p><b>I</b></p> <p>Caracterizado por um pico somente nos primeiros minutos e nenhum outro depois. Neste modelo, a pega e o endurecimento não ocorrem.</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hidratação da escória em água a 25°C e 50°C;</li> <li>▪ ativação da escória com Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>.</li> </ul>
<p><b>II</b></p> <p>Caracterizado por um pico que aparece antes do período de indução e um outro, correspondente à aceleração da hidratação, que aparece depois.</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ativação com NaOH à 25°C e 50°C;</li> <li>▪ ativação com clínquer <i>Portland</i>.</li> </ul>
<p><b>III</b></p> <p>Caracterizado por dois picos iniciais antes do período de indução e um pico de aceleração depois:</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ativação com Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> à 25°C;</li> <li>▪ ativação Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> à 50°C;</li> <li>▪ ativação com NaF e com silicato de sódio (Na<sub>2</sub>O.xSiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O) a 25°C e 50°C.</li> </ul>

Como se vê no Quadro 3.3 e Figura 3.4 apenas a hidratação da escória conforme o Modelo II é similar ao modelo de hidratação do cimento *Portland* comum e o cimento.

### 3.4.1 Ativação da escória de alto-forno

Na ativação da escória de alto-forno, o ativador mais usado é o clínquer do cimento *Portland*. Neste tipo de ativação, estão presentes os hidróxidos de sódio (NaOH) e de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) liberados durante a hidratação dos silicatos do clínquer e os sulfatos. Os sulfatos auxiliam na dissolução dos grãos de escória. Os produtos hidratados são C-S-H, etringita monossulfato, hidrotalcita e hidrogranada, conforme descrito no item 3.4.2.

Embora possam ser usados diversos ativadores como: hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, hidróxidos dos metais alcalinos como sódio (NaOH) e potássio (KOH), silicatos de sódio (Na<sub>2</sub>O. xSiO<sub>2</sub>. nH<sub>2</sub>O) e sulfatos, e descritos a seguir, neste trabalho, apenas o clínquer do cimento *Portland* será usado como ativador (DAIMON, 1980; GLASSER, 1989; CAMARINI, 1995; JOHN, 1995; SILVA, 1998).

Na ativação da escória de alto-forno com **hidróxido de cálcio**, o pH da solução é no máximo igual a 12,5, o que permite a dissolução dos íons alumínio, silício e cálcio da escória. Essa

dissolução é rápida e impede a formação do gel pouco permeável ao redor dos grãos anidros da escória de alto-forno (CAMARINI, 1995, JOHN, 1995, SILVA, 1998). O teor desse ativador, acima de 5%, em massa do cimento, não influi no aumento da hidratação cujos produtos finais são o C-S-H e o aluminato tetracálcico (DAIMON, 1980; JOHN, 1995).

Na ativação com os *hidróxidos de sódio e potássio, NaOH e KOH*, a solução tem o seu pH aumentado, o que contribui para a aceleração da dissolução dos grãos de escória de alto-forno e para a diminuição da solubilidade do CaO. Os produtos hidratados formados são C-S-H, aluminato de cálcio hidratado ( $C_4AH_{13}$ ), gehelenita hidratada ( $C_2ASH_8$ ) e, também, a brucita (MgOH) (DAIMON, 1980; REGOURD, 1980; CAMARINI, 1995).

Nos estudos de hidratação por calorimetria, SHI; DAY (1996) observaram que as curvas de evolução de calor, para as misturas de escória ativada com NaOH, são similares às daquelas do cimento *Portland*, porém com um pico inicial de hidratação menor que o pico de hidratação no período de aceleração, principalmente, a 50°C. Esta reação não tem um grande período de indução.

Na ativação com *silicatos alcalinos de sódio ou potássio* ( $Na_2O.xSiO_2.nH_2O$  ou  $K_2O.xSiO_2.nH_2O$ ), as argamassas resultantes têm uma menor porosidade e estrutura de poros com menores dimensões, quando comparadas com as argamassas com escória ativadas com hidróxido de cálcio (SHI, 1996). O elevado pH cria condições para a dissolução da estrutura vítrea, e a presença de  $Na_2O$  na solução e íons  $SiO_4^{-4}$  aceleram a precipitação dos produtos hidratados, C-S-H e  $C_4AH_{13}$  (JOHN, 1995; SHI; DAY, 1995b).

Os *sulfatos*, na forma de sulfato de cálcio e fosfogênio, não alteram o pH da solução e não são considerados ativadores, embora sejam importantes compostos que, na forma de íons  $SO_4^{-2}$ , reagem com o alumínio para formar a etringita (DAIMON, 1980; CAMARINI, 1995; JOHN, 1995).

Assim, diminui a camada do gel de alumina ao redor dos grãos de escória, aumentando a permeabilidade do grão e permitindo o prosseguimento das reações de hidratação. A hidratação nesse caso é lenta uma vez que o pH da solução não aumenta, e há a necessidade de um ativador químico para elevá-lo (REGOURD, 1980; CAMARINI, 1995; JOHN, 1995).

Outros ativadores foram também pesquisados, como  $Na_2CO_3$ , NaF,  $Na_3PO_4$ , além da combinação de dois ou mais ativadores. Nas pesquisas de SHI; QUIAN (2000), observou-se que o ativador  $Na_2CO_3$  deve ser usado para escórias ricas em  $C_2MS$ , e os produtos hidratados formados são  $C_3A.CaCO_3.12H_2O$  e  $C_4AH_{13}$ .

Por outro lado, a combinação dos ativadores  $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  produziu resistência com um dia de idade equivalente à de misturas similares com cimento *Portland* comum, sendo, entretanto, menores para a idade de 28 dias (COLLINS; SANJAYAN, 1998).

A combinação dos ativadores cimento *Portland* comum com silicato de sódio foi utilizada nas pesquisas em pastas e argamassas por BAKAREV; SANJAYAN; CHENG (1999). Nesta pesquisa, pastas e argamassas foram produzidas com o aglomerante: 70% de escória de alto-forno, 30% de cimento *Portland* comum e 4% de silicato de sódio, em massa; relação água/aglomerante igual a 0,50, e alcançaram resultados de resistência à compressão muito baixos aos 28 dias de idade, em torno de 18 MPa e, por isso, o uso dessa combinação de ativadores foi abandonada nessa pesquisa.

### 3.4.2 Hidratação do cimento de alto-forno

A hidratação dos cimentos com adições de escória de alto-forno é complexa, pois envolve a hidratação de ambos: a escória e o clínquer no qual estão presentes os ativadores da escória (CAMARINI, 1995; LEA, 1998).

O clínquer hidrata-se primeiro, por ser solúvel em água e, ao se hidratar, cria condições de elevado pH, além de ser uma reação exotérmica (REGOURD, 1980; GLASSER, 1989). A hidratação da escória é mais lenta e é muito sensível ao aumento da temperatura, aumento este proporcionado pela reação de hidratação do clínquer, que resulta em aceleração adicional à hidratação da escória, além do aumento do pH da solução (GLASSER, 1989).

O cimento anidro, ao entrar em contato com a água, dissolve-se rapidamente em diferentes íons:  $(\text{H}_2\text{SiO}_4^-)$ , íons hidroxila  $(\text{OH}^-)$  e íons cálcio  $(\text{Ca}^{++})$ , originados da fase silicato; íons  $(\text{AlO}_2^-)$ , íons cálcio  $(\text{Ca}^{++})$ , íons sulfatos  $(\text{SO}_4^-)$  e íons hidroxila  $(\text{OH}^-)$ , originados da fase intersticial; e as diferentes formas de sulfatos presentes no cimento, que se combinam e precipitam os principais produtos hidratados do cimento: hidróxido de cálcio  $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ , silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado ou etringita (AFt) (AÏTCIN, 2000).

Em paralelo à hidratação do clínquer, processa-se, embora lentamente, a dissolução da escória, com a liberação de íons  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$  na solução, em quantidade que não é suficiente para a continuação da hidratação da escória (MARQUES, 1994). Inicialmente, a escória de alto-forno precipita os produtos hidratados externos, o C-S-H com baixa relação C/S,

diferente do clínquer, cujo principal produto hidratado, o C-S-H, tem alta relação C/S (MARQUES, 1994, LEA, 1998).

Em princípio, ocorrem pequenas interações entre a escória e o clínquer, porque ambos se hidratam de forma semi-independente e, posteriormente, no contato com o clínquer, a superfície da escória é coberta pelos produtos hidratados do clínquer. Então, os grãos da escória são atacados pelos íons  $\text{Ca}^{++}$  da solução supersaturada, formando os produtos hidratados internos da escória (GLASSER, 1989; LEA, 1998).

Os produtos hidratados internos são mais densos que o C-S-H produzido na hidratação do clínquer. Entretanto, com o tempo, a composição e microestrutura daqueles são alteradas, conforme descrito no item 3.5.4 (GLASSER, 1989).

A escória de alto-forno e o clínquer têm uma mútua influência nas suas velocidades de hidratação. A escória, ao reagir com os íons cálcio liberados na hidratação do clínquer, aumenta a velocidade de dissolução da alita e, depois de ser coberta pelos produtos hidratados do clínquer é atacada pelos íons  $\text{Ca}^{++}$  da solução supersaturada (DRON, 1980; REGOURD, 1980, SMOLCZYK, 1980; LEA, 1998).

Após trinta dias de hidratação, são observadas camadas ao redor da escória denominadas, por GLASSER (1989), anéis de Liesegang. Essas camadas são constituídas do interior para o exterior do grão, nessa ordem, de estrutura vítrea original, lâminas da estrutura vítrea residual, planos laminares como hidrotalcita e uma camada silicosa (LEA, 1998).

Os diversos estágios de hidratação do cimento de alto-forno podem também ser observados por calorimetria. Nos estudos de CAMARINI (1995) foi observado que independente do teor de escória de alto-forno<sup>14</sup>, presente nesse cimento, uma grande quantidade de escória hidratou-se nas primeiras 24 horas nas condições de temperatura, igual o superior a 27°C. Assim, no item 3.5, descreve-se algumas propriedades dos concretos produzidos com o cimento de alto-forno.

### **3.5 Propriedades do concreto com escória de alto-forno no cimento**

Várias características da escória de alto-forno influenciam nas propriedades das misturas de concreto que a utilizam, substituindo o clínquer no cimento. No item 3.51, 3.52, 3.53, é descrita a influência da escória de alto-forno em algumas dessas propriedades. Entre as

---

<sup>14</sup> da ordem de 0% a 65% em substituição à massa do cimento.

características que influenciam nas propriedades das pastas, argamassas e concretos, pode-se destacar o *teor* e a *finura da escória de alto-forno*.

O **teor de escória de alto-forno** influencia no calor de hidratação, na trabalhabilidade, na resistência do concreto e na resistência ao ataque de agentes agressivos (SIVASUNDARAM; MALHOTRA, 1992; NAGATAKI, 1994).

Em relação à *finura da escória de alto-forno*, observa-se que, quando se usa escória de alto-forno moída nas misturas, com finura maior do que  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , expressa pela relação entre a superfície específica dos sólidos e a massa de água, a exsudação do concreto, diminui (MALHOTRA, 1987; NAGATAKI, 1994).

Por outro lado, o aumento da finura da escória contribui para o desenvolvimento das resistências iniciais. Misturas de concreto produzidas com escória de alto-forno nas finuras iguais a  $1160 \text{ m}^2/\text{kg}$  e  $786 \text{ m}^2/\text{kg}$ , se equivalem em resistência, aos três e sete dias de idade, com misturas similares produzidas com cimento *Portland* comum (NAKAMURA; SAKAI; SWAMY, 1992).

### 3.5.1 Consistência e pega

As pastas de escória sem ativador necessitam de uma menor quantidade de água para ser obtida uma mesma consistência padrão quando comparadas com as pastas de cimento Portland comum. Para as pastas de escória ativadas com cal, a quantidade de água aumenta com o teor deste ativador (CINCOTTO; BATTAGIN; AGOPYAN, 1992; WANG *et al*, 1995).

Embora alguns autores considerem que as partículas finas de escória complementam o efeito dos grãos de cimento em reduzir os vazios entre as partículas do agregado e, por isso o consumo de água para uma mesma consistência é menor, WEI; HANDONG; BINGGEN (2003) afirma que a escória de alto-forno, substituindo parte do cimento, não tem a habilidade de reduzir o consumo de água sem o uso de superplastificantes, pelo fato de possuírem partículas mais angulares e por isso é difícil preencher os espaços vazios na pasta de cimento.

Por outro lado, a coesão das argamassas é aumentada, porque a presença de partículas muito finas<sup>15</sup> diminui a exsudação, havendo, também, menor tendência à segregação. Outro fator que

---

<sup>15</sup> Finuras maiores do que  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  (MALHOTRA, 1987).

contribui para a maior coesão deve-se à escória que, ao substituir parte da massa do cimento, pela sua menor densidade, proporciona um volume maior de pasta no concreto fresco (TORRENT; ELOLA; SZTEINBERG, 1985; MALHOTRA, 1987; WEI; HANDONG; BINGGEN, 2003).

Para WEI; HANDONG; BINGGEN (2003), essa fluidificação é explicada pela formação de um filme de água na superfície das partículas, que é tanto maior quanto mais espesso for o filme de água. De acordo com MALHOTRA (1987), a quantidade de água em relação ao teor de escória é tão maior quanto o teor de escória.

Quanto ao tempo de pega em temperaturas normais, a escória de alto-forno o tem prolongado e é tanto maior quanto maior o teor de escória, devendo-se levar em conta que a maior finura da escória de alto-forno não conduz a diferenças significantes. O início e o fim de pega variam, respectivamente, de 30 minutos a uma hora e de até várias horas, de acordo com a temperatura do ambiente e do concreto (MALHOTRA, 1987; SAKAI *et al.*, 1992).

O efeito da substituição do cimento pela escória de alto-forno, em proporções equivalentes à 40% ou mais, causa o retardamento do tempo de pega, inicial e final, no concreto de alto desempenho, da ordem de 11 horas e 17 horas, respectivamente (BROOKS; MEGAT JOHARI; MAZLOOM, 2000).

### 3.5.2 Calor de hidratação

Quanto ao calor liberado na hidratação do cimento com adição de escória, pelo fato de a escória de alto-forno se hidratar muito mais lentamente que o cimento *Portland* comum, as taxas de liberação de calor da escória são muito menores do que as deste cimento. Embora o calor de hidratação liberado total do cimento com adição de escória seja maior, esse cimento é considerado de baixo calor de hidratação (NAGATAKI, 1994; CAMARINI, 1995).

Também, NAKAMURA; SAKAI; SWAMY (1992) analisaram a influência da adição de escória ao cimento *Portland* comum e observaram que essa adição reduziu a taxa de evolução de calor para 60% daquela do cimento. Nas pesquisas de DIAS *et al* (1990), nas quais o cimento *Portland* comum teve a adição de 80% de escória de alto-forno, observou-se, também, uma menor velocidade de liberação de calor de hidratação, provocando diminuição das tensões térmicas.

Além dos fatores já citados, o calor de hidratação é também afetado pela finura da escória, teor de gipsita, basicidade e teor de vidro da escória (NAGATAKI, 1994).

### 3.5.3 Resistência à compressão

Nas misturas que usam adição de escória de alto-forno devem-se considerar, além das proporções dos materiais, as características do elemento estrutural, as condições de execução, destacando-se a relação água/aglomerante e a necessidade de um maior tempo de cura úmida; e os parâmetros do ensaio, tais como a finura, a reatividade e o teor de escória de alto-forno em substituição ao cimento ou adição ao clínquer, terão um importante papel na resistência à compressão (MALHOTRA, 1987, MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O desenvolvimento lento da resistência faz com que o endurecimento se prolongue até idades mais avançadas por vários anos, e para se conseguir um desenvolvimento mais rápido da resistência aumenta-se a finura da escória (NAKAMURA; SAKAI; SWAMY, 1992; GEISELER *et al.*, 1995).

Nas pesquisas de BROOKS; WAINWRIGHT; BOUKENDAKJI (1992), a influência do teor de escória na resistência à compressão, nas idades iniciais, aumentou com o teor de escória. A elevação do teor de escória conduziu a resistências similares às das misturas de cimento *Portland* comum nas idades finais. Esses resultados são confirmados por SIVASUNDARAM; MALHOTRA (1992) ao obterem resultados semelhantes de resistência à compressão aos 91 dias, em misturas produzidas com elevados teores de escória de alto-forno, substituindo parte do cimento, em torno de 65%, em relação às misturas de referência produzidas com cimento *Portland* comum.

Nos resultados ALDEA *et al.* (2000), para a resistência à compressão do concreto com escória de alto-forno moída, substituindo parte do cimento *Portland* comum, num teor de até 75%, se for analisada as condições de cura, observam-se em curas normais<sup>16</sup>, altas resistências quando comparadas com uma cura a vapor e com a cura em autoclave. Para todas as condições de cura citadas, a resistência à compressão aos vinte e oito dias diminuiu com o aumento do teor de escória de alto-forno em substituição à parte do cimento.

### 3.5.4 Retração

A exposição do concreto saturado a umidades do ambiente abaixo de 100% conduz à perda de água por evaporação e dá origem ao fenômeno da retração, cuja consequência é a diminuição do seu volume aparente, ao longo do tempo, sem a ação de nenhuma carga externa.

---

<sup>16</sup> Desmoldagem após 24 horas e ambiente de cura ( $t = \pm 20^{\circ}\text{C}$  e 100% de umidade, até 28 dias)

A retração também pode ocorrer por reação química sob as diversas formas: **retração autógena** (ou retração química), que ocorre pela reação de hidratação do cimento à temperatura constante, e sem que haja troca de umidade entre o concreto e o meio ambiente; **retração plástica**, como resultado da perda de água superficial e assentamento do concreto ainda em estado fresco; **retração hidráulica** (ou por secagem), resultante da perda de água por evaporação no concreto endurecido, devido à diferença de umidade relativa do ar ambiente e dos capilares do concreto; **retração térmica**, devido à diminuição da temperatura do concreto; e a **retração por carbonatação**, que ocorre devido às reações de carbonatação (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 1994; AÏTCIN, 2000).

A retração autógena, pesquisada por UCHIKAWA; HANEHARA; HIRAO (1997) em pastas de cimento *Portland* comum e de cimento *Portland* com adição de escória de alto-forno, para uma mesma relação água/materiais cimentícios, da ordem de 0,25; foram identificados para o período de 8 horas a 4 dias, resultados da ordem de 970  $\mu$  para o cimento *Portland* comum e 1810  $\mu$  para o cimento *Portland* com adição de escória de alto-forno.

Depois disso, um acréscimo muito pequeno foi observado que se deve, segundo esse autor, ao fato da retração autógena ser dependente da redução de umidade, atribuída à auto-secagem da água dos poros, além da supressão de migração da água livre, provocada pela densificação da estrutura da pasta de cimento endurecida com continuidade das reações de hidratação.

Além disso, a água que sai dos poros, cujos diâmetros são inferiores a 20 $\eta$ m, é responsável pela retração autógena que pode ser aumentada por meio de uma baixa relação água/materiais cimentícios e pelo refinamento dos poros em um concreto com cimento com escória de alto-forno (MEHTA; MONTEIRO, 1994; TAZAWA; MIYAZAWA, 1997; LIM; WEE, 2000).

SIVASUNDARAM; MALHOTRA (1992) concluíram em suas pesquisas que a retração por secagem na pasta do concreto, em corpos-de-prova curados ao ar, foi sempre maior, quando comparada à retração da pasta de concreto, de corpos-de-prova curados em água e, de um modo geral, a retração por secagem é menor quanto menor for a quantidade de materiais cimentícios.

Nos corpos-de-prova de concreto com altos percentuais de escória, da ordem de 65% em massa do total dos materiais cimentícios, a retração por secagem é da mesma ordem que corpos-de-prova de concreto que usaram o cimento *Portland* comum como aglomerante (SIVASUNDARAM; MALHOTRA, 1992).

Esses resultados não diferem de BROOKS; WAINWRIGHT; BOUKENDAKJI (1992), que afirmam que a substituição parcial do cimento por escória de alto-forno, em geral, aumenta a retração, porém a retração é similar ou pode ser até menor, comparada à do concreto de referência, principalmente, se o concreto com escória de alto-forno tiver uma relação água/aglomerante baixa.

Nos resultados de COELHO (2002) a substituição de até 86% de cimento por escória de alto-forno em concretos com relação água/materiais cimentícios na faixa de 0,33 a 0,44, observou-se que as amostras não apresentaram retração, até vinte e oito dias, período em que elas ficaram submersas. A partir dessa idade, os concretos com o cimento CP II E-32, a retração foi mais significativa do que aos oitenta e quatro dias também. Essa menor retração dos concretos com elevado dos teores de escória é atribuída por LIM; WEE (2000) à hidratação mais lenta da escória, além das partículas possuírem textura mais áspera e forma angulosa. Essa textura aumenta a água adsorvida na superfície, conduzindo a uma diminuição da quantidade de água disponível para as reações de hidratação.

### 3.5.5 Porosidade e permeabilidade

A porosidade capilar do concreto produzido com cimento *Portland* comum e escória, em geral, é menor do que o concreto no qual se utilizou em sua produção apenas cimento *Portland* comum como aglomerante (LANG; GEISELER, 1997). Isso acontece porque os produtos de hidratação das pastas de cimento com adição de escória de alto-forno se precipitam nos poros e canais existentes na pasta, aumentando a densidade da pasta por meio do refinamento dos poros.

Por outro lado, o ataque dos cristais grandes e orientados de hidróxido de cálcio sobre o grão de escória tem o efeito de reduzir o tamanho desses cristais, efeito este denominado de refinamento do grão (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os produtos hidratados são transportados para fora do grão de escória, deixando espaços vazios anteriormente ocupados pelas partículas da escória não hidratada e, por isso uma porosidade residual é acumulada no grão, resultando em uma redistribuição da porosidade, dispersando os poros, por toda a matriz densificada (GLASSER, 1989, MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O refinamento dos poros e de cristais grandes de hidróxido de cálcio torna as pastas de cimento menos permeáveis e, no concreto, aumenta a resistência da zona de transição, o que reduz a microfissuração e permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Várias pesquisas têm constatado essa diminuição da porosidade capilar. SMOLCZYK (1980) utilizando diferentes condições de cura, obteve diminuição da quantidade de poros, com diâmetros maiores que 300 Å, de 30,5% para 22,5%, utilizando cura em água e de 37,0% para 25%, utilizando a cura ao ar. A variação do teor de escória de 0 para 76%, conduziu à uma redução na porosidade capilar da ordem de 25 a 30%.

Sabe-se que as pastas com adição de escória têm uma quantidade menor de poros capilares com diâmetros maiores que 300 Å, quando comparada às pastas de cimento *Portland* comum (SMOLCZYK, 1980).

Nos resultados de ALDEA *et al.* (2000), observa-se a influência de diferentes teores de escória, no concreto com diferentes curas, nos quais o maior teor de escória produziu um maior refinamento dos poros, também observado por LANG; GEISELER (1997), que afirmam ser o aumento do teor da escória de alto-forno condutor de uma menor porosidade capilar, sendo tanto maior este efeito quanto maior for o seu teor (LANG; GEISELER, 1997).

GASTALDINI; TEZUKA (1991) também concordam com essa afirmação, concluindo que a porosidade total, a área total dos poros e o diâmetro médio dos poros, nas misturas com adição de 50% de escória de alto-forno ao clínquer de cimento *Portland*, variam com o teor de escória e com a sua finura: quanto maior a finura e o teor de adição de escória, maior a área dos poros e menor o diâmetro médio dos poros (LANG; GEISELER, 1997).

### **3.6 Influência da escória de alto-forno na resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos**

#### **3.6.1 Resistência ao ataque de cloretos**

A presença de cloretos no concreto resulta de diferentes formas: por meio da penetração através da rede de poros ou por meio da adição na constituição dos materiais, como água, agregados e aditivos (ANDRADE, 1992).

Para o primeiro caso, que muito depende das condições ambientais e ocorre lentamente, para a avaliação da penetração desses íons cloreto, através do concreto, é utilizado o ensaio de

migração de íons<sup>17</sup>, com o objetivo de se ter uma estimativa da difusão de cloretos através do concreto (MEDEIROS; HELENE, 2003).

Por outro lado, a difusão de íons através do concreto tem influência direta do consumo de cimento para uma mesma relação água/materiais cimentícios. Quando a relação água/aglomerante varia, mantendo-se a consistência do concreto, a menor relação água/materiais cimentícios conduz à uma maior resistência à penetração de cloreto no concreto (MEDEIROS; HELENE, 2003), explicada pelo refinamento dos poros, pois os íons se difundem através de uma rede de poros mais tortuosa e descontínua (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O segundo caso é controlado por meio das normas, que limitam esses teores a um valor máximo. No Brasil, esse limite está estabelecido na NBR 6118/2004 em 0,05% para a água de amassamento do concreto armado e 0,05% do cimento no concreto pretendido.

Dentro do concreto, os cloretos encontram-se sob três formas: quimicamente combinados, adsorvidos na parede do silicato de cálcio hidratado ou livres na solução dos poros (HELENE, 1993; FERREIRA JUNIOR, 2003). Adsorvido à superfície do C-S-H, resultam em uma morfologia desse composto, de fibrosa à densa, e livres, dependendo da sua quantidade, podem conduzir à diminuição na durabilidade da estrutura de concreto armado pela corrosão das armaduras (HELENE, 1993).

Na contaminação do concreto por cloretos quimicamente combinados, os íons cloretos reagem com as fases  $C_3A$  e  $C_4AF$  para formar o cloroaluminato de cálcio hidratado ou sal de Friedel e o cloroferroaluminato de cálcio, diminuindo, assim, a quantidade de cloretos livres (DHIR; EL-MOHR; DYER, 1996, GASTALDINI; ISAIA, 2000, LUO; CAI; HUANG, 2000).

No concreto com escória de alto-forno, por um lado, a resistência a cloretos aumenta, porque essa adição modifica a estrutura e composição dos poros os quais contêm menor quantidade de cloreto livre responsável pela corrosão da armadura ou ocorre a retenção dos cloretos livres, principalmente, quando aumenta o teor de  $C_3A$ , pela formação do cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel.

Além disso, várias pesquisas têm confirmado a diminuição da durabilidade do concreto com escória de alto-forno, na presença de íons cloreto, uma vez que, esses íons permanecem

---

<sup>17</sup> Movimentação de íons provocada por uma diferença de potencial elétrico (ANDRADE, 1992).

quimicamente combinados, em meios de elevada alcalinidade e, no concreto carbonatado, o pH é menor quando comparado com o concreto não carbonatado, aumentando solubilidade do cloroaluminato. Apesar da maior capacidade de fixação desses íons, a estabilidade do cloroaluminato no concreto é dependente do pH e, nas misturas adição de escória de alto-forno, com pH ainda menor, essa solubilidade aumenta ainda mais (HÄKKINEN, 1993; BAUER, 1995, SURYAVANSHI; SWAMY; NARAYAN, 1996; COELHO, 2002).

Nas pesquisas com elevados teores de escória de alto-forno, a diminuição de cloretos livres é confirmada com o aumento significativo da carga elétrica expressa em Coulomb (SIVASUNDARAM; MALHOTRA, 1992; BAUER; HELENE, 1993; LUO, WANG, HUANG, 2000).

### 3.6.2 Carbonatação

Apesar da carbonatação de concretos com escória de alto-forno ser maior sob as mesmas condições de execução e proporcionamento das matérias-primas, a sua microestrutura mais densa e com poros de tamanhos menores do que em concretos de cimento *Portland* comum podem servir de barreira contra a penetração do CO<sub>2</sub> (ISAIA; VAGHETTI, GASTALDINI, 2001). Entretanto, ISAIA *et al.* (2003) ressaltam que, nas misturas com escória de alto-forno, o fator preponderante é a menor alcalinidade dessas misturas.

Para MATALA (1994), a carbonatação do concreto com escória de alto-forno, inicialmente, é muito similar àquela do cimento *Portland* comum, diferindo na quantidade de carbonatos que se precipitam da reação com o Ca(OH)<sub>2</sub>. Para esse autor, porém, a diferença de composição do C-S-H e do teor de Ca(OH)<sub>2</sub> afetam o mecanismo de carbonatação.

Assim, a carbonatação das misturas com escória de alto-forno, quando comparadas à carbonatação das misturas com cimento *Portland* comum é mais dependente da carbonatação do C-S-H, em decorrência da menor quantidade de hidróxido de cálcio, além da menor relação Ca/Si do C-S-H dessas misturas. O nível de carbonatação do C-S-H depende do grau de carbonatação da pasta, da quantidade inicial de Ca(OH)<sub>2</sub>, do teor de umidade da pasta e da estrutura dos poros (MATALA, 1994).

No Quadro 3.4, apresentam-se algumas pesquisas que utilizaram a adição de escória com o objetivo de observar sua influência na carbonatação do concreto.

Quadro 3.4: Pesquisas de carbonatação em misturas com adição de escória de alto-forno

Pesquisador	Tipo de aglomerante	Conclusões
THOMAS <i>et al</i> (1990)	Cimento <i>Portland</i> comum; Cimento <i>Portland</i> comum e adição de 49,21% de escória alto-forno moída*	Misturas com escória de alto-forno, relação água/cimento de 0,55, consumo de aglomerante (CPC+escória) igual a 315 kg/m <sup>3</sup> de concreto tiveram uma tendência de maior profundidade de carbonatação ao serem comparadas com o concreto de cimento <i>Portland</i> Comum, com o mesmo consumo de aglomerante e relação água/cimento. As misturas contendo escória de alto-forno, depois de carbonatadas, tiveram maior porosidade, menor densidade, menor absorção de água e menor teor de Ca(OH) <sub>2</sub> .
HÄKKINEN (1993)	Cimento <i>Portland</i> comum e adição de 70% do total do aglomerante, de escória de alto-forno moída*	Nas misturas de concreto com escória de alto-forno foram observadas profundidades de carbonatação, da ordem de 1 mm a 3 mm e, nas misturas contendo somente cimento <i>Portland</i> comum, profundidades variando de 0,5 a 2mm, com mesma resistência à compressão aos 28 dias (na faixa de 40 a 70MPa), após seis meses de exposição natural.  Nessas misturas, desde os primeiros dias de hidratação, apareceram microfissuras, devido à retração por secagem, que afetaram a permeabilidade do concreto. A carbonatação foi mais rápida e mais profunda do que nos concretos de cimento <i>Portland</i> comum e a profundidade de carbonatação decresceu com o aumento da resistência à compressão.
NAKAMOTO; TOGAWA (1995)	Cimento <i>Portland</i> comum e adição de escória de alto-forno moída (50% a 95% em massa) e Cimento <i>Portland</i> de alta resistência inicial mais escória de alto-forno moída variando de 50% a 95%*	A profundidade de carbonatação aumentou com o teor de escória de alto-forno com taxas de carbonatação mais rápidas para os teores de escória de alto-forno maiores que 70% e diminuiu com o aumento da finura da escória.  O tipo de cimento afetou as taxas de carbonatação, sendo maior para aqueles com adições de escória de alto-forno.
NGALA; PAGE (1997)	Cimento <i>Portland</i> comum  Cimento <i>Portland</i> comum + 65% de escória de alto-forno moída em massa do total de materiais cimentícios	Existe uma redução da porosidade total das misturas contendo cimento <i>Portland</i> comum, sendo maior para as misturas com adição de escória de alto-forno, como resultado da carbonatação.  Observou-se uma diminuição da porosidade total e um aumento significativo da proporção de poros com diâmetro > 30nm nas misturas contendo escória de alto-forno em relação às misturas contendo somente cimento <i>Portland</i> comum.
GASTALDINI; ISAIA; ZANELLA (1999)	CP alta resistência inicial, CP alta resistência inicial e adição de 50% de escória de alto forno, CP alta resistência inicial e adição de 30% escória de alto forno+20% de cinza de casca de arroz; e CP alta resistência inicial e adição de 30% escória de alto forno+20% de cinza volante *	As misturas ternárias, de cimento/escória de alto-forno e pozolanas conduziram à uma maior taxa de carbonatação, quando comparadas com misturas binárias de cimento/escória de alto-forno.  Para uma mesma relação água/cimento, as misturas binárias e ternárias tiveram maior carbonatação do que misturas contendo somente cimento de alta resistência inicial.
COELHO (2002)	CP composto (CPII –E- 32); Cimento <i>Portland</i> de alto-forno e adição de 50% de escória de alto-forno*	Nas misturas de concreto produzidas com cimento de alto-forno contendo altos teores de escória de alto-forno, foram observadas profundidades de carbonatação similares àquelas, misturas produzidas com cimento composto com escória (CPII E-32), para resistência à compressão aos 28 dias na ordem de 40 MPa.

Deve-se considerar, também, na análise dos resultados das pesquisas do Quadro 3.4, as condições dos ensaios como, por exemplo, o tempo de cura, uma vez que as misturas contendo escória granulada de alto-forno moída proporcionam uma estrutura mais porosa para curto período de cura (MATALLA, 1994).

Assim, pode-se concluir que as misturas que contêm escória granulada de alto-forno como aglomerante necessitam, para ter um bom desempenho com relação a carbonatação, de um tempo maior de cura úmida, no mínimo 28 dias (MATALLA, 1994) e, esse menor desempenho dos cimentos com adições de escória pode ser compensado com uma diminuição da relação água/material cimentício, que proporciona uma menor profundidade de carbonatação.

### 3.6.3 Resistência ao ataque de sulfatos

Os sulfatos atacam o concreto por meio da expansão ou pela perda progressiva de resistência e massa. Os íons sulfato, o  $\text{Ca(OH)}_2$  e o aluminato de cálcio produzidos na hidratação do cimento reagem com o monosulfoaluminato hidratado, produzindo etringita. A causa da expansão pode ser a adsorção de água em meio alcalino pela etringita, pouco cristalina e, também, pode ser causada pelo acréscimo na quantidade dos cristais de etringita (DOUGLAS, 1987; MEHTA; MONTEIRO, 1994, BINJEN, 1996).

Sabe-se que a etringita origina-se da reação dos sulfatos dissolvidos na água com o  $\text{C}_3\text{A}$ , e, por possuírem baixo teor de  $\text{C}_3\text{A}$  e pequena liberação de  $\text{Ca(OH)}_2$ , na hidratação, as misturas de cimento *Portland* com escória de alto-forno têm boa resistência a sulfatos (BATTAGIN; ESPER, 1988).

Essa influência da escória de alto-forno na resistência ao ataque de sulfatos pode ser explicada por meio da estrutura mais densa e também pela menor espessura da interface agregado-pasta, resultando em menor espaço para cristalização da etringita além da redução de  $\text{Ca(OH)}_2$  ou de  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . A resistência das misturas com escória de alto-forno ao ataque de sulfatos é maior quando comparada com misturas de cimento *Portland* comum (FREARSON, 1986; DOUGLAS, 1987; BINJEN, 1996).

Assim, a escória de alto-forno adicionada ao cimento é usada em estruturas de concreto nas construções em contato com água do mar, onde existe a presença de cloretos e sulfatos, com bons resultados (GEISELER *et al.* 1995; BINJEN, 1996). Entretanto, segundo BROWN; HOOTON; CLARK, 2003, a presença de etringita e taumasita, nas regiões próximas à superfície, indicam que a redução da permeabilidade do concreto é o mecanismo mais eficaz

para alcançar a resistência a sulfatos. Sabe-se que para a formação da taumasita são necessárias fontes de cálcio e sílica, de sulfato de cálcio, de carbonato de cálcio e disponibilidade de água (BENSTED, 1999).

#### **3.6.4 Reação álcali-sílica**

Além da boa resistência a sulfatos e cloretos, as misturas com escória de alto forno minimizam a reação álcali-sílica (BATTAGIN; ESPER, 1988).

Segundo REGOURD (1980), SMOLCZYK (1980), BIJEN (1996) e OSBORNE (1999), são fatores que contribuem para esse melhor desempenho: a menor alcalinidade da água do poro dessas misturas; a menor mobilidade dos íons, devido ao refinamento dos poros; a existência de menos hidróxido de cálcio livre, essencial para reação álcali-sílica e a menor espessura da zona de interface entre agregado-pasta de cimento.

Diversas pesquisas comprovaram que a adição de escória é uma ótima solução para a prevenção de expansões oriundas da reação álcali-sílica (DIAS *et al.*, 1990; BATTAGIN; ESPER, 1988).

### **3.7 Considerações sobre o capítulo**

Os benefícios da utilização da escória de alto-forno na produção de cimento, que é responsável por cerca de 7,9 % das emissões de CO<sub>2</sub>, do total em todo o mundo, justificam essa reciclagem.

Além do mais, a menor fissuração térmica, por meio da liberação de calor mais lenta na hidratação; as resistências finais maiores; a redução da permeabilidade por refinamento dos poros, como resultado da redução da alcalinidade, o excelente desempenho em relação ao ataque de águas sulfatadas e à reação álcali-sílica dessas misturas são incentivos às pesquisas com o objetivo de minimizar a reação de carbonatação.

Assim, altos teores de escória são recomendados para minimizar as reações expansivas, desde que sejam dadas atenções especiais às condições de cura e ao concreto de cobrimento da armadura, principalmente, nos locais onde as condições para a carbonatação se apresentam ótimas como, por exemplo, temperaturas altas, umidades na faixa de 60 a 70% e pouca incidência das chuvas.

Com base na literatura, observa-se, também, para as misturas com escória de alto-forno, principalmente nas condições de exposição a ambientes sujeitos à presença de cloretos e ao

dióxido de carbono, a necessidade de diminuir a relação água/aglomerante para minimizar a difusão desses agentes agressivos.

Dessa forma, no capítulo 4, foi desenvolvido um trabalho experimental para avaliar a influência da resistência à compressão, no mecanismo da carbonatação do concreto.

## CAPÍTULO IV – MATERIAIS, MÉTODOS E PROJETO EXPERIMENTAL

### 4.1 Introdução

Com o objetivo de avaliar a influência da resistência à compressão no mecanismo da carbonatação do concreto e obter uma correlação entre essas variáveis, produziu-se, neste trabalho, misturas de concreto com diferentes teores de escória granulada de alto-forno, da ordem de 30%, 66%, 83%, em massa, substituindo parte do clínquer, assim como com diferentes resistências à compressão aos 28 dias, da ordem de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa. Os aglomerantes utilizados foram: o cimento CP II E-32; cimento CP III-32-RS; e a mistura com 50% de cimento CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno moída, em relação à massa do total do aglomerante.

Assim sendo, as etapas deste programa experimental estão descritas no fluxograma constante da Figura 4. 1. No item 4.2 são caracterizados os materiais utilizados; no item 4.3 são descritos os métodos de ensaios, o planejamento experimental e os métodos estatísticos empregados estão descritos no item 4.4.

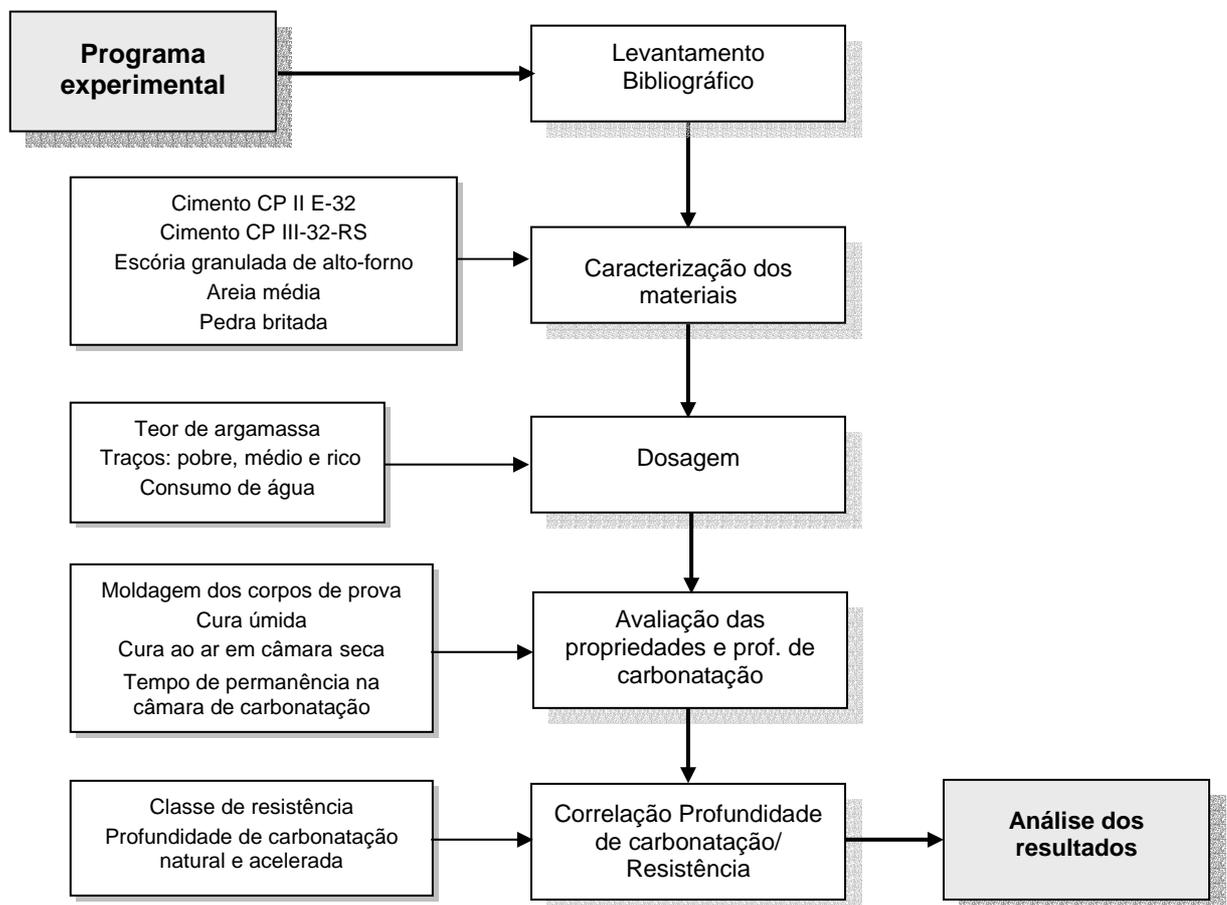


Figura 4. 1: Fluxograma do trabalho experimental.

Dessa forma, na etapa **Dosagem** selecionou-se, para cada material cimentício, os traços que atenderam às curvas de dosagem com a resistência à compressão desejada aos 28 dias, da ordem de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, tendo sido produzidos concretos com os 12 traços obtidos e moldados os corpos-de-prova.

A etapa **Avaliação das propriedades e da profundidade de carbonatação** compreendeu a avaliação da resistência à compressão, da massa específica, da absorção, do índice de vazios, e da profundidade de carbonatação, dos concretos dosados na etapa anterior.

Por fim, obteve-se na etapa **Correlação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão** uma expressão matemática, definindo assim a variação da profundidade de carbonatação para as várias resistências pesquisadas e para cada material cimentício utilizado. Nesta etapa, também, foi verificado se o tamanho da amostra foi adequado para os resultados pretendidos.

## 4.2 Fatores e variáveis considerados

Nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 estão descritos os fatores e variáveis para cada etapa deste programa experimental.

### 4.2.1 Dosagem

A escolha do teor adequado de argamassa foi feita com base na metodologia descrita no item 4.3.1.1. Os fatores e variáveis adotados encontram-se no Quadro 4. 1, e os resultados do teor adequado de argamassa estão indicados no item 5.2.1 do capítulo 5.

**Quadro 4. 1: Fatores e variáveis adotados para a seleção do teor adequado de argamassa.**

Fatores	Variáveis de controle
Teor de argamassa Consumo de água	Consistência

Na seleção do teor de argamassa utilizou-se apenas, como material cimentício, a mistura de 50% de cimento CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno em massa, não variando, portanto, o tipo de material cimentício.

Os fatores e variáveis para os diagramas de dosagem têm-se no Quadro 4. 2, os resultados do consumo do consumo de água para atender à consistência de  $(70 \pm 10)$  mm e da resistência à compressão axial estão indicados no item 5.2.2 do capítulo 5.

**Quadro 4. 2: Fatores e variáveis para a etapa dos Diagramas de dosagem.**

Fatores	Variáveis de controle
Traço	Consistência
Tipo de aglomerante	Resistência à compressão aos 28 dias de idade
Classe de resistência do concreto	

Os concretos foram dosados para atender aos seguintes valores de resistência à compressão aos 28 dias: 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, concretos esses classificados de acordo com a NBR 8953 no grupo I e considerados concretos normais usados na maioria das estruturas de concreto armado.

Os fatores e variáveis para a produção de misturas de concreto vêm-se no Quadro 4. 3.

**Quadro 4. 3: Fatores e variáveis para a etapa da produção de misturas de concreto.**

Fatores	Variáveis de controle
Traço	Consistência pelo abatimento do tronco de cone;
Material cimentício	Resistência 28 e 63 dias.
Classe de resistência do concreto	

#### 4.2.2 Avaliação de propriedades do concreto e da profundidade de carbonatação

As propriedades avaliadas do concreto no estado fresco foram a consistência e a massa específica e, no estado endurecido, a resistência à compressão axial nas idades 28 e 63 dias; massa específica, absorção e índice de vazios na idade de 28 dias; a profundidade de carbonatação natural em ambiente controlado de laboratório nas idades de 63, 77, 91 e 365 dias; e a profundidade de carbonatação em câmara de carbonatação acelerada nas idades de 77 e 91 dias ( $t = 2$  e 4 semanas, respectivamente).

No Quadro 4.4 têm-se os fatores e variáveis para a etapa de avaliação das propriedades.

**Quadro 4.4: Fatores e variáveis para a etapa de avaliação das propriedades.**

Fatores	Variáveis de controle
Traço	Massa específica no estado fresco;
Material cimentício	Massa específica, absorção e índice de vazios aos 28 dias;
Classe de resistência do concreto	Resistência à compressão aos 28 e 63 dias de idade;
	Carbonatação natural aos 63, 77, 91 e 365 dias;
	Carbonatação acelerada aos 77 e 91 dias.

A avaliação das propriedades além de auxiliar na análise do desenvolvimento da carbonatação com o tempo auxiliou, também, na correlação entre a profundidade de carbonatação e a classe de resistência do concreto. Essa correlação justifica-se, pois a resistência de projeto é

normalmente uma das propriedades especificadas para caracterizar uma determinada estrutura, e uma estimativa da profundidade de carbonatação é necessária no sentido de se atender a vida útil especificada na NBR 6118/2003.

### 4.3 Materiais utilizados

Os materiais empregados foram: os aglomerantes, cimento *Portland* CP II E-32, cimento *Portland* CP III-32-RS, escória granulada de alto-forno moída; agregado miúdo e agregado graúdo. A seguir tem-se a descrição desses materiais.

#### 4.3.1 Aglomerantes

Os aglomerantes utilizados, cimento *Portland* CP II E-32, cimento *Portland* CP III-32-RS e escória granulada de alto-forno moída foram utilizados com o objetivo de serem obtidos concretos com teores crescentes de escória de alto-forno em substituição parcial ao cimento.

##### 4.3.1.1 Cimento *Portland* composto (CP II E-32) e Cimento *Portland* de alto-forno (CP III 32-RS)

Esses cimentos foram adquiridos na região da Grande Vitória e determinadas as seguintes características e propriedades: composição química por espectrometria de Raios X, ensaio executado na ABCP<sup>1</sup>; finura (NBR 11579/1991) - resíduo na peneira de 0,075 mm, a quantidade de água necessária para obter a pasta de consistência normal (NBR 11580/1991), os tempos de início e fim de pega (NBR 11581/1992), expansibilidade a quente (NBR 11582/1991), massa específica (NBR 6474/1998), superfície específica Blaine (NBR NM 76/1998) e resistência à compressão axial (NBR 7215/1996), executados no Lemac<sup>2</sup>. Os resultados para o cimento CP II E-32 encontram-se nos Quadros 4.5 e 4.6 e para o CP III-RS-32, nos Quadros 4.7 e 4.8.

**Quadro 4.5: Características físicas e mecânicas do cimento *Portland* composto CP II E-32.**

Finura peneira #200 (%)	A. pasta consist. normal (g)	pega (h.min.)		Exp. a quente (mm)	Resistência à Compressão (média e desvio padrão em MPa)			Sup. Esp. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	M. esp. (kg/m <sup>3</sup> )
		Início	Fim		3 dias	7 dias	28 dias		
0,2	149	2h,50min	4h,20min	1	20,06(2,21)	26,39(1,03)	36,51(2,16)	4140	2989

Estes dados estão de acordo com os limites estabelecidos pelas Especificações da ABNT – NBR 11578/1991.

<sup>1</sup> ABCP – Associação Brasileira de Cimento *Portland*.

<sup>2</sup> Lemac – Laboratório de Materiais do Centro Tecnológico da Ufes.

O teor de escória determinado por dissolução seletiva por EDTA na ABCP, foi de 30% em relação à massa do cimento.

**Quadro 4.6: Análise Química do Cimento *Portland* composto CP II E-32, determinada por espectrometria de raios X.**

Composição química		Normas	% em massa	Limites da NBR 11 578/91
Perda ao fogo	PF	NBR 5743/89	5,4	≤ 6,5%
Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	NBR 9203/85	22,11	***
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203/85	6,09	***
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203/85	3,52	***
Óxido de cálcio total	CaO	NBR9203/85	54,16	***
Óxido de magnésio	MgO	NBR 9203/85	5,95	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico	SO <sub>3</sub>	NBR 5745/89	1,58	≤ 4,0%
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	NBR 5745/89	0,27	***
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	NBR 5745/89	0,32	***
Enxofre	S	NBR 5746/91	0,31	***
Anidrido Carbônico	CO <sub>2</sub>	NBR 11583/90	3,76	≤ 5,0%
Resíduo insolúvel	RI	NBR 5744/89	1,39	≤ 2,5%
Óxido de Cálcio livre	CaO	NBR 5745/89	3,61	***
Óxido de titânio	TiO <sub>2</sub>	PO-GT-6021	0,31	***
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	(0,68xK <sub>2</sub> O%+Na <sub>2</sub> O%)	-	0,48	***

**Quadro 4.7: Análise Química do Cimento *Portland* de alto-forno CP III-RS-32, determinada por espectrometria de raios X.**

Composição química		Normas	% em massa	Limites da NBR 11 578/91
Perda ao fogo	PF	NBR 5743/89	0,32	≤ 4,5%
Dióxido de silício total	SiO <sub>2</sub>	NBR 9203/85	29,88	***
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203/85	9,92	***
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203/85	1,43	***
Óxido de cálcio total	CaO	NBR9203/85	50,95	***
Óxido de magnésio	MgO	NBR 9203/85	5,78	***
Anidrido sulfúrico	SO <sub>3</sub>	NBR 5745/89	0,69	≤ 4,0%
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	NBR 5747/89	0,09	***
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	NBR 5747/89	0,32	***
Enxofre	S	NBR 5746/91	0,62	≤ 1,0%
Anidrido Carbônico	CO <sub>2</sub>	NBR 11583/90	0,15	≤ 3,0%
Resíduo insolúvel	RI	NBR 5744/89	0,35	≤ 1,5%
Óxido de Cálcio livre	CaO	NBR 5745/89	2,30	***
Óxido de titânio	TiO <sub>2</sub>	PO-GT-6021	0,38	***
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	(0,68xK <sub>2</sub> O% +Na <sub>2</sub> O%)	-	0,33	***

**Quadro 4.8: Características físicas e mecânicas do cimento *Portland* de alto-forno CP III-RS-32.**

Finura pen. #200 (%)	A. pasta consist. normal (g)	pega (h.min.)		Exp. a quente (mm)	Resistência à Compressão (média e desvio padrão em MPa)			Sup. Esp. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Massa Esp. (kg/m <sup>3</sup> )
		Início	Fim		3 dias	7 dias	28 dias		
0,6	152	2h,50min	4h,20min	0	16,92(2,76)	31,73(4,58)	49,52(5,51)	4220	2986

Estes dados estão de acordo com os limites estabelecidos pelas Especificações da ABNT – NBR 5735/1991.

O teor de escória determinado por dissolução seletiva por EDTA na ABCP, foi de 66% em relação à massa do cimento.

#### 4.3.1.2 Escória granulada de alto-forno moída

A escória de alto-forno moída foi doada por uma empresa da região da Grande Vitória e determinada sua composição química, seu grau de vitrificação, índice de refração, índice de basicidade, superfície específica Blaine (NBR NM 76/1991) e massa específica (NBR NM 23/2001), cujos resultados, executados no Lemac, podem ser vistos nos Quadro 4.9 e Quadro 4.10.

**Quadro 4.9: Composição química da escória granulada de alto-forno moída.**

Composição Química	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Teor (% em massa)	33,02	12,64	0,68	42,83	7,71	1,06	0,17	0,31	0,6

**Quadro 4.10: Características físicas da escória granulada de alto-forno moída.**

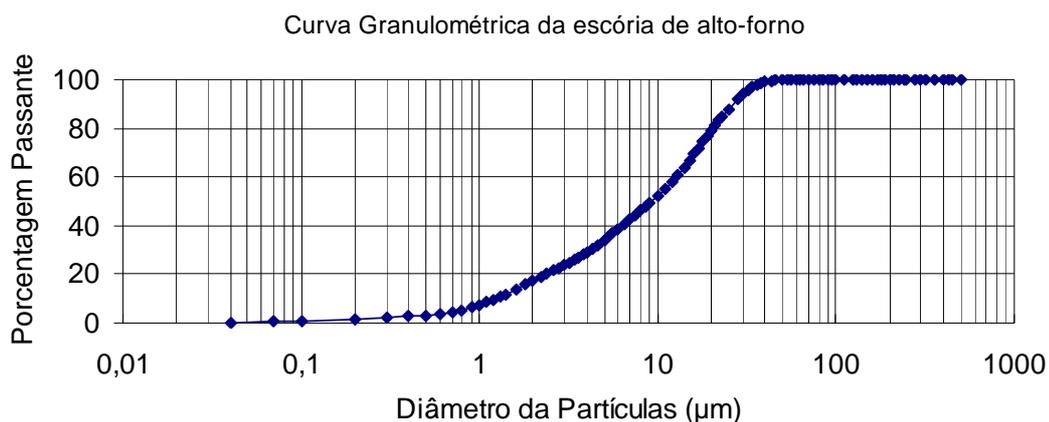
Grau de vitrificação (%) por microscopia de luz transmitida	96
Índice de refração por microscopia de luz transmitida	1,65
Natureza	básica
Superfície específica Blaine (NBR NM 76) (cm <sup>2</sup> /g)	4100
Massa específica (NBRNM23) (kg/m <sup>3</sup> )	2.906

De acordo com JOHN (1995) somente a fração vítrea da escória de alto-forno é capaz, em condições normais de temperatura e pressão, de hidratar-se e o grau de vitrificação de 96% da escória de alto-forno em estudo, classifica-a como de boa qualidade quanto ao teor de vidros, apresentando solubilidade suficiente para sua atividade hidráulica.

Os resultados do ensaio de distribuição granulométrica a laser da escória granulada de alto-forno, executado pela ABCP, os parâmetros de ensaio e a curva granulométrica, encontram-se no Quadro 4. 11 e na Figura 4. 2, nesta ordem.

**Quadro 4. 11: Distribuição granulométrica a laser da escória granulada de alto-forno moída (Ensaio realizado na ABCP).**

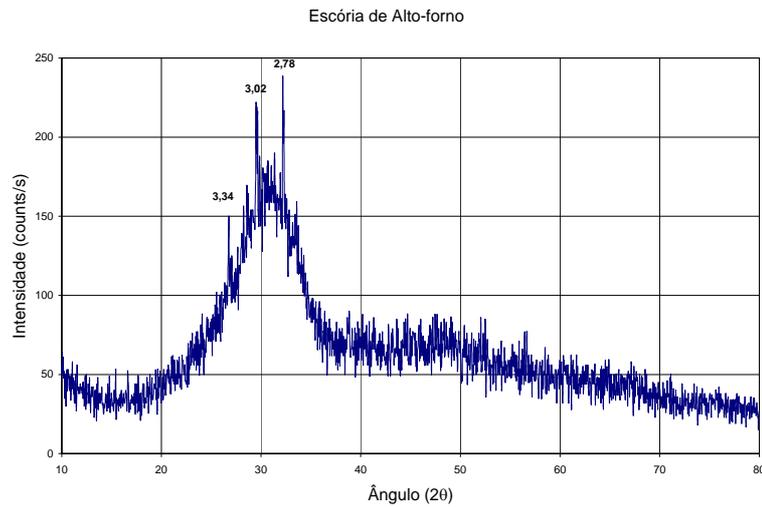
Porcentagem passante										
D (µm)	0,04	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
P (%)	0,16	0,46	0,63	1,31	2,18	2,18	3,26	3,81	4,50	5,42
D (µm)	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
P (%)	6,44	7,52	8,64	9,76	10,86	11,91	13,87	15,64	17,26	18,75
D (µm)	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3
P (%)	20,13	21,43	22,66	23,83	24,96	26,04	27,10	28,14	29,16	30,66
D (µm)	4,6	5,0	5,3	5,6	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
P (%)	32,13	34,05	35,44	36,80	38,55	40,61	42,56	42,56	46,13	47,77
D (µm)	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
P (%)	49,36	52,41	55,37	58,28	61,14	63,94	66,67	69,33	71,89	74,35
D (µm)	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	25,0	28,0	30,0	32,0	34,0
P (%)	76,70	78,93	81,02	82,98	84,80	88,03	91,94	93,98	95,63	96,93
D (µm)	36,0	38,0	40,0	43,0	45,0	50,0	53,0	56,0	60,0	63,0
P (%)	97,92	98,62	99,13	99,60	99,79	99,97	99,99	100,0	100,0	100,0
D (µm)	66,0	71,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0	112,0	125,0
P (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
D (µm)	130,0	140,0	150,0	160,0	170,0	180,0	190,0	200,0	212,0	224,0
P (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
D (µm)	240,0	250,0	280,0	300,0	315,0	355,0	400,0	425,0	450,0	500,0
P (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Diâmetro correspondente a 63% de partículas passantes (µm)										12,38
Coeficiente angular da reta N										0,9843
Dimensão média (µm)										9,2
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)										1,22
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)										26,47



**Figura 4. 2: Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno moída (Ensaio realizado na ABCP).**

Na caracterização da microestrutura da escória granulada de alto-forno moída utilizaram-se as técnicas de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS (espectrometria a energia dispersiva).

Uma amostra com alto índice de componentes amorfos foi observada na difração de raios X, apresentando três picos que acusam a presença de Quartzo- $\text{SiO}_2$  (3,34), Calcita- $\text{CaCO}_3$  (2,78) e Silicato de Cálcio- $\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{O}_z$  (3,02), como se vê no difratograma de raios X da escória granulada de alto-forno moída, na Figura 4. 3. O resultado encontrado é reforçado pelo difratograma de raios X da escória de granulada de alto-forno estudada por COELHO (2002).

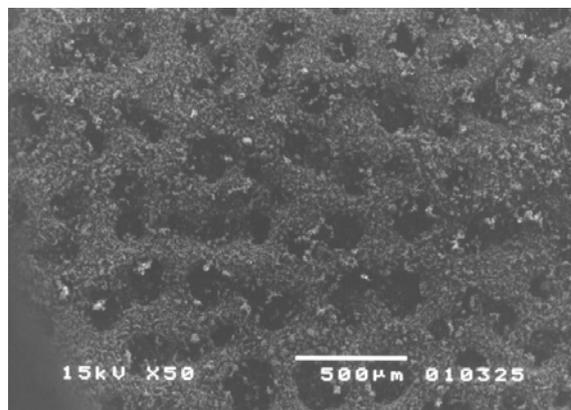


Fonte: ensaio realizado no Departamento de Engenharia de Minas da UFMG

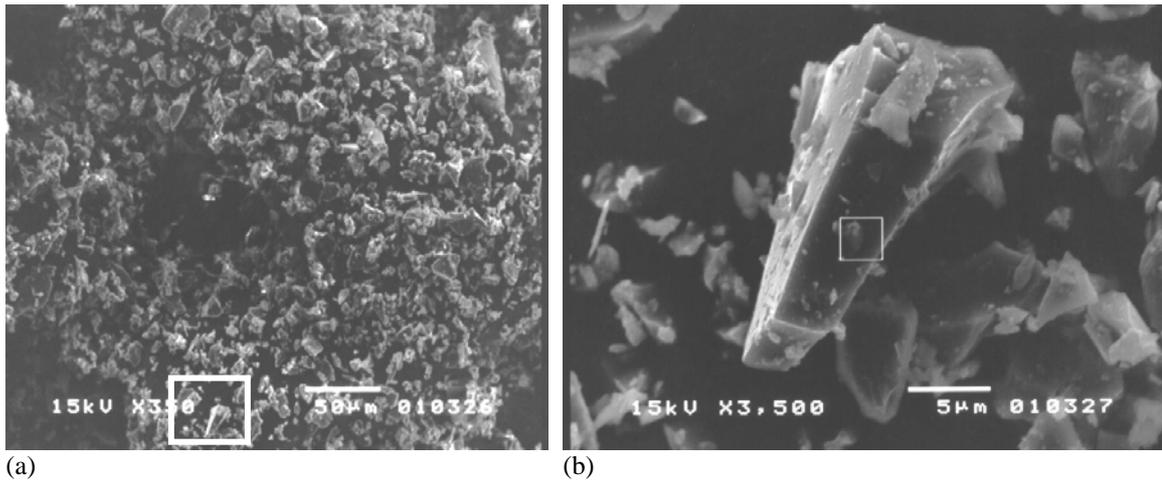
**Figura 4. 3: Difratograma de raios-X da escória granulada de alto-forno moída.**

A microscopia eletrônica de varredura foi executada em amostra única de escória de alto-forno moída, depositada sobre uma fita adesiva e metalizada com uma fina camada de ouro.

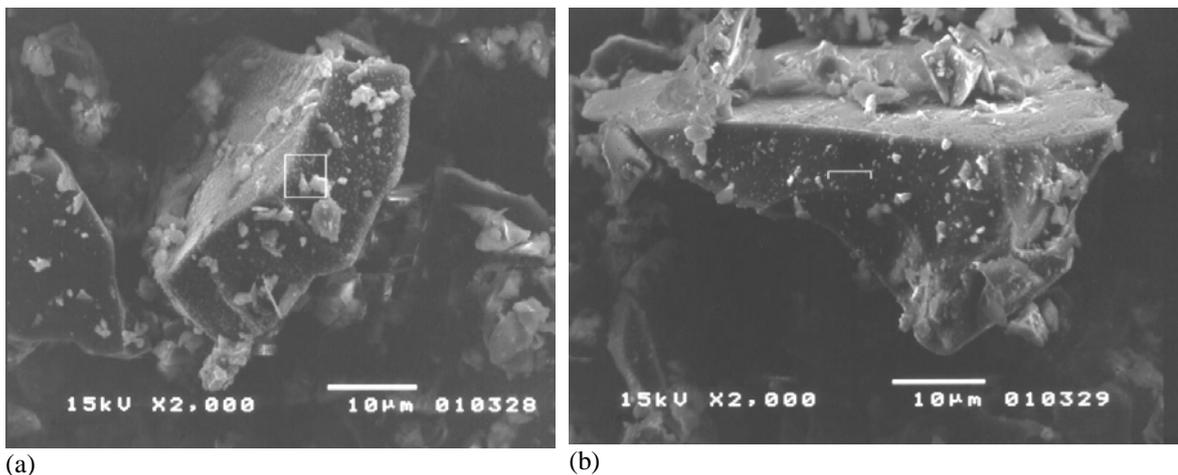
As imagens apresentadas foram obtidas através da emissão de elétrons secundários e a análise química elementar por meio de um microanalisador EDS, permitindo-se observar a predominância de elementos como o cálcio e o silício nos cristais. Nas Figura 4. 4, Figura 4.5 e Figura 4.6 observam-se as imagens obtidas e a respectiva análise elementar qualitativa da área visualizada.



**Figura 4. 4: Aspecto geral da escória granulada de alto-forno moída observada ao microscópio eletrônico de varredura.**



**Figura 4.5: (A) Aspecto geral da escória de alto-forno observada ao MEV; a análise elementar qualitativa indica predominância de Ca e Si. (B) Detalhe do cristal observado na micrografia A; a análise elementar qualitativa indica predominância de Ca e Si.**



**Figura 4.6: Formações cristalinas observadas ao MEV; a análise elementar qualitativa através do EDS indica predominância de Ca e Si.**

#### 4.3.1.3 Mistura escória granulada de alto-forno moída e cimento *Portland* de alto-forno (CP III-32-RS)

Para a mistura de escória granulada de alto-forno e cimento CP III-32-RS foi utilizada a proporção de 1:1, em massa, e determinada a finura (NBR 11579/1991) - resíduo na peneira de 0,075 mm; a quantidade de água necessária para obter a pasta de consistência normal (NBR 11580/1991), os tempos de início e fim de pega (NBR 11581/1992); a expansibilidade a quente (NBR 11582/1991); a massa específica (NBR 6474/1998); a superfície específica Blaine (NBR NM 76/1998 e a a resistência à compressão axial (NBR 7215/1996), determinados no Lemac. Os resultados estão apresentados no Quadro 4.12.

**Quadro 4.12: Características físicas e mecânicas da mistura escória de alto-forno e cimento CP III-32-RS.**

Finura peneira #200 (%)	Água p. consist. normal (g)	pega (h.min.)		Exp. a quente (mm)	Resistência à Compressão (média e desvio padrão, em MPa)			S. Esp. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Massa Esp. (kg/m <sup>3</sup> )
		Início	Fim		3 dias	7 dias	28 dias		
0,4	159	2h,25min	4h,25min	1	14,17(1,9)	23,34(3,4)	42,82(3,5)	4150	2941

O teor de escória da mistura, determinado matematicamente, foi de 83% em relação à massa do cimento.

### 4.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no trabalho experimental foi uma areia média, de natureza quartzosa, adquirida de depósitos naturais em região da Grande Vitória.

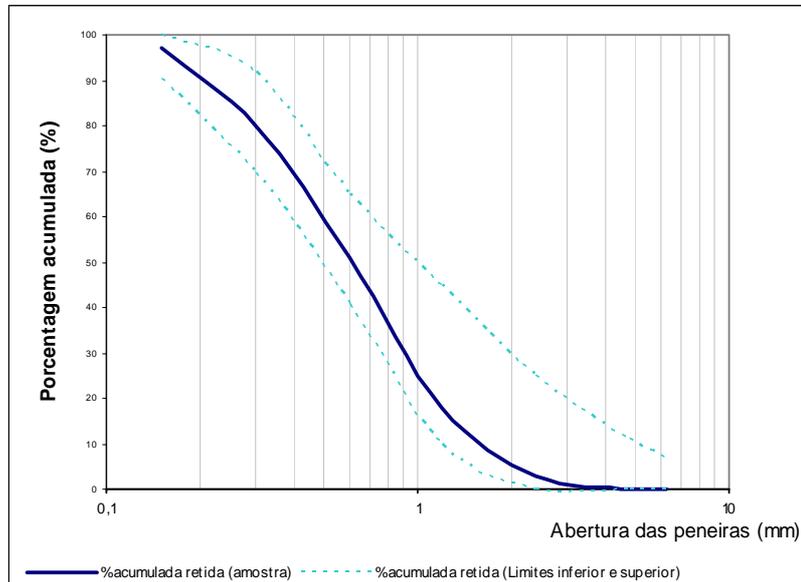
Os ensaios realizados para caracterização da areia: composição granulométrica (NBR 7217/1987); massa específica (Frasco de Chapman – NBR 9776/1987), massa unitária no estado solto (NBR 7251/1982); teor de materiais pulverulentos (NBR 7219/1987); impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo (NBR NM 49/2001) e o teor de argila em torrões e partículas friáveis (NBR 7218/1987), foram determinados no Lemac. No Quadro 4.13 são apresentados estes resultados de caracterização.

**Quadro 4.13: Composição granulométrica da areia.**

Peneiras	Médias	
Abertura de Malha (mm)	% Retida	% R. Acumulada
4,8	0	0
2,4	3	3
1,2	15	18
0,6	33	51
0,3	29	80
0,15	17	97
Fundo	3	-
Total	100	-

Dimensão máxima característica (NBR 7217/1987): 2,4 mm  
Módulo de Finura (NBR 7217/1987): 2,49  
Massa específica (Frasco de Chapman – NBR 9776/1987): 2,649 kg/dm<sup>3</sup>  
Massa unitária no estado solto (NBR 7251/1982): 1,588 kg/dm<sup>3</sup>  
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7219/1987): 0,5%  
I. orgânicas húmicas em agregado miúdo (NBR NM 49/2001): cor clara  
Teor de argila e partículas friáveis (NBR 7218/1987): 0%

Na Figura 4.7, observam-se os limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211/1983. Vê-se que a granulometria da areia encontra-se de acordo com essa norma, dentro dos limites da zona 3, classificando, dessa forma, essa areia como areia média.



**Figura 4.7: Curva granulométrica da areia e as curvas dos limites granulométricos da zona 3 da NBR 7211/1983.**

### 4.3.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no trabalho experimental foi uma pedra britada N° 0 e pedra britada N° 1, de acordo com a NBR 7211/1983, de natureza granítica, adquirida na região da grande Vitória.

Os ensaios realizados para caracterização da pedra britada N° 0 e N° 1 foram os seguintes: composição granulométrica (NBR 7217/1987), massa específica (NBR 9937/1987), massa unitária no estado solto (NBR 7251/1982), teor de materiais pulverulentos (NBR 7219/1987), teor de argila e partículas friáveis (NBR 7218/1987) e abrasão Los Angeles (NBR NM 51/2001), todos determinados no Lemac. Os resultados encontram-se no Quadro 4.14 para a pedra britada N° 0, no Quadro 4. 15 para a pedra britada N° 1 e as curvas granulométricas nas Figura 4.8 e Figura 4.9 para a pedra britada N° 0 para a pedra britada N° 1, respectivamente.

Quadro 4.14: Granulometria e caracterização física da Pedra Britada nº 0 (NBR 7217/1987).

Peneiras	Médias	
	Abertura de Malha (mm)	% Retida
12,5	-	-
9,5	30	30
6,3	55	85
4,8	12	97
2,4	-	97
1,2	-	97
0,6	-	97
0,3	-	97
0,15	-	97
Fundo	3	-
<b>Totais</b>	100	-

Dimensão máxima característica (NBR 7217/1987): 12,5 mm  
Módulo de Finura (NBR 7217/1987): 6,12  
Massa específica (NBR 9937/1987): 2,752 kg/ dm<sup>3</sup>  
Massa unitária no estado solto (NBR 7251/1982): 1,432 kg/ dm<sup>3</sup>  
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7219/1987): 1,42%  
Teor de argila e partículas friáveis (NBR 7218/1987): 0,31%  
Abrasão Los Angeles (NBR NM 51/2001): 49,2%

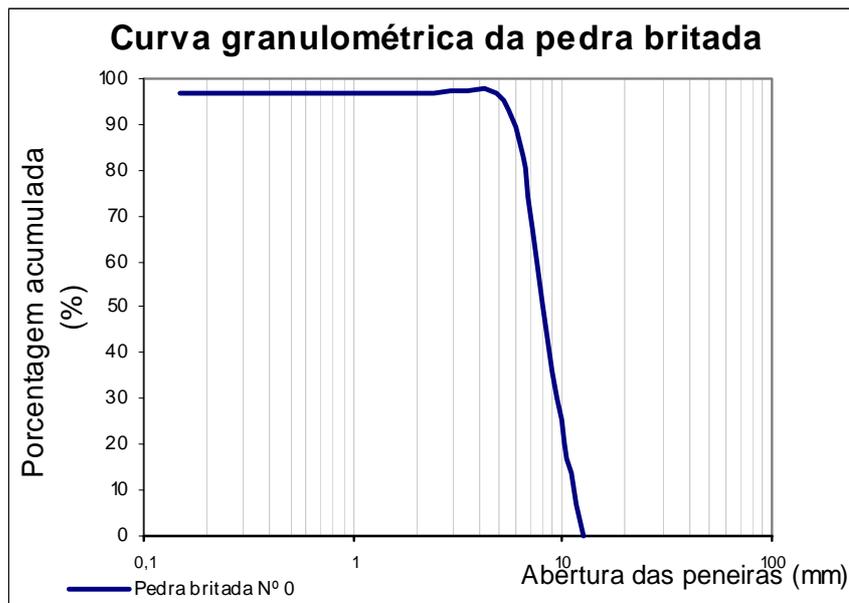


Figura 4.8: Curva granulométrica da pedra britada Nº 0.

Quadro 4. 15: Granulometria e caracterização física da Pedra Britada nº 1 (NBR 7217/1987).

Peneiras	Médias	
	Abertura de Malha (mm)	% Retida
19	-	-
12,5	52	52
9,5	41	93
6,3	6	99
4,8	1	100
2,4	-	100
1,2	-	100
0,6	-	100
0,3	-	100
0,15	-	100
Fundo	-	-
<b>Totais</b>	100	-

Dimensão máxima característica (NBR 7217/1987): 19,00 mm  
Módulo de Finura (NBR 7217/1987): 6,93  
Massa específica (NBR 9937/1987): 2,767 kg/ dm<sup>3</sup>  
Massa unitária no estado solto (NBR 72511982): 1,467 kg/ dm<sup>3</sup>  
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7219/1987): 1,42%  
Teor de argila e partículas friáveis (NBR 7218/1987): 0,31%  
Abrasão Los Angeles (NBR NM51 /2001): 49,2%

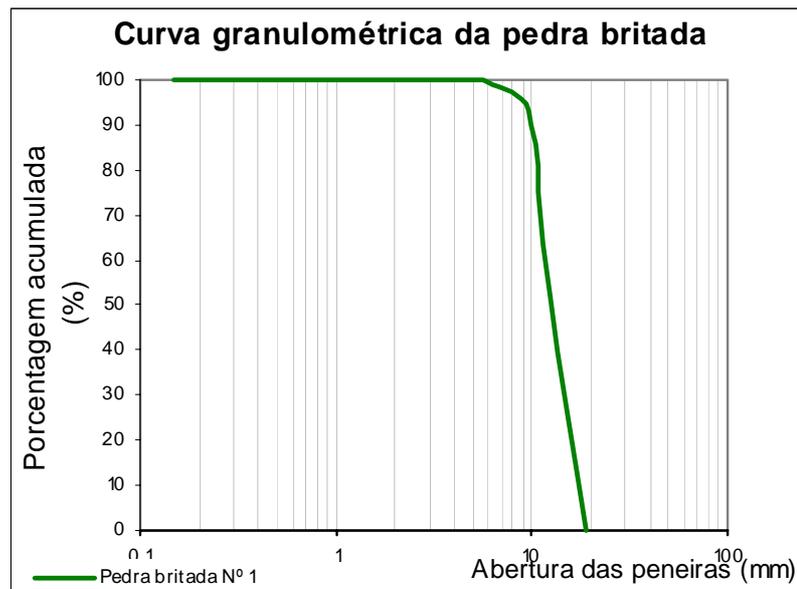


Figura 4.9: Curva granulométrica da pedra britada Nº 1.

## 4.4 Metodologia

A metodologia utilizada nas etapas deste projeto experimental e os métodos de ensaios são detalhados nos itens 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 e 4.4.4.

### 4.4.1 Dosagem

A metodologia utilizada nesta etapa consistiu em obter o teor adequado de argamassa para o menor consumo de água e as respectivas equações das curvas de dosagens para os aglomerantes CP II E-32, CP III-32-RS e a proporção de 50% de CP III-32-RS + 50% de escória granulada de alto-forno moída, segundo HELENE; TERZIAN (1993).

#### 4.4.1.1 Determinação do teor adequado de argamassa

O estudo foi desenvolvido com base nos materiais descritos no item 4.2 e para uma consistência de  $(70 \pm 10)$  mm, para um traço 1:5 (material cimentício: agregados), com o aglomerante constituído de 50% de cimento CP III-32-RS mais 50% escória granulada de alto forno moída, em massa.

Pesquisou-se vários teores de argamassa, na faixa de 51,5% a 59%, verificando-se o menor consumo de água para a consistência desejada.

O material cimentício utilizado, na escolha do teor de argamassa, foi escolhido com base no ensaio para determinação da quantidade de água necessária para a consistência normal, NBR 11580/1991. Na mistura de 50% de cimento CP III-32-RS mais 50% de escória granulada de alto-forno moída, em massa, foi observado o maior consumo de água para a pasta de consistência normal e, desta forma, face ao menor consumo de água dos outros dois aglomerantes utilizados, cimentos CP II E-32 e CP III-32-RS, o teor de argamassa dessa mistura, que apresentasse um menor consumo de água, poderia também atender às misturas com os outros aglomerantes.

A seqüência dos trabalhos compreendeu:

- imprimação da betoneira, utilizando-se o traço 1:2:3:0,50 (material cimentício: areia média: 50% de pedra britada 0 e 50% de pedra britada 1: relação água/material cimentício);
- após a imprimação, procedeu-se a colocação dos materiais na betoneira, iniciando-se por parte da água, agregados graúdos, o total do aglomerante, o agregado miúdo e pequenas

quantidades de água, com o uso da proveta graduada, até ser obtida a consistência desejada;

- o teor de argamassa foi aumentado gradativamente, acrescentando-se cimento e areia à mistura, permanecendo fixo o traço teor de aglomerante: agregados e mantida fixa a massa da pedra britada.

O teor adequado de argamassa foi escolhido, com base no menor consumo de água para a mesma consistência, sendo, em seguida, aumentado de 2%, correspondente à estimativa de perdas de argamassa no transporte e lançamento (HELENE; TERZIAN, 1993).

#### 4.4.1.2 Diagramas de dosagem

O objetivo desta etapa foi obter traços adequados à resistência à compressão da ordem de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa. Para isso, foi seguida a metodologia de HELENE; TERZIAN (1993), sendo a quantidade total dos corpos-de-prova, desta etapa (dosagem), apresentada no Quadro 4.16 e no Quadro 4.17, os traços adequados à cada aglomerante.

**Quadro 4. 16: Total de corpos de prova para os diagramas de dosagem.**

Ensaio	Quantidade de CPs		Método
	Idades x traços x aglomerantes x CPs	total	
Diagrama de dosagem	2 x 3 x 3 x 4	72	HELENE; TERZIAN (1993)

**Quadro 4. 17: Relação dos traços usados para cada tipo de aglomerante.**

Materiais	Traço (mat. cimentício:agregados)
Cimento CP II E-32	1: 3; 1:5 e 1:7
Cimento CP III-32-RS	1:4; 1:6 e 1:8
Cimento CP III-32-RS mais escória moída (proporção de 1:1 em massa)	1:3; 1:5 e 1: 7

No Quadro 4. 20 observa-se que os traços auxiliares escolhidos foram um pouco diferentes das proporções recomendadas por HELENE; TERZIAN (1993)<sup>3</sup>, porque num estudo anterior essa faixa de variação nos consumos de materiais cimentícios era mais adequada para serem obtidos concretos com as classes de resistência na faixa de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa.

<sup>3</sup> Traço rico 1:3,5, traço médio 1:5 e traço pobre 1:6,5 (HELENE; TERZIAN, 1993).

Estabelecidos os traços, rico, médio e pobre, para cada material cimentício, foram dosados concretos, para os traços estabelecidos no Quadro 4.13, cujos consumos de materiais encontram-se no Quadro 4.18.

**Quadro 4. 18: Consumos de materiais dos traços de concreto.**

Traço (materiais cimentícios: areia média: brita 0: brita 1: relação água/ materiais cimentícios)	Material cimentício (kg)		A. miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)		Teor argamassa (%)
	Cimento	Esc. moída	Areia	Brita 0	Brita 1	
Diagrama 1A (cimento CP II E-32)						
T1/CPII (1: 3,4: 1,8: 1,8: 0,705)	10,000	-	34,000	18,000	18,000	55
T2/CPII (1:2,3:1,35:1,35:0,506)	13,000	-	29,900	17,550	17,550	55
T3/CPII (1: 1,2: 0,90: 0,90: 0,37)	20,000	-	24,000	18,000	18,000	55
Diagrama 2A (cimento CP III-32-RS)						
T1/CPIII (1:3,95:2,03:2,03:0,83)	9,000	-	35,550	18,225	18,225	55
T2/CPIII (1:2,85:1,575:1,575:0,594)	11,000	-	31,350	17,325	17,325	55
T3/CPIII (1: 1,75: 1,13: 1,13: 0,420)	16,000	-	28,000	18,000	18,000	55
Diagrama 3A (cimento CP III-32-RS + escória granulada de alto-forno moída)						
T1/CPIIIIE (0,50+0,50:0,40: 1,80:1,80: 0,6825)	5,000	5,000	34,000	18,000	18,000	55
T2/CPIIIIE (0,50+0,50: 2,3: 1,35: 1,35: 0,513)	7,000	7,000	32,200	18,900	18,900	55
T3/CPIIIIE (0,50+0,50: 1,2: 0,90: 0,90: 0,340)	10,000	10,000	24,000	18,000	18,000	55

Após a seleção do teor adequado de argamassa para o abatimento desejado e a confecção dos diagramas de dosagem para os aglomerantes CP III-32-RS mais escória granulada de alto-forno, CP III-32-RS e CP II E-32, foram obtidos os gráficos e equações das curvas, com base nas correlações assumidas como leis de comportamento (Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinare) e por meio de métodos estatísticos descritos no item 4.5.

Estabelecidos os traços, rico, médio e pobre, para cada material cimentício, as misturas foram preparadas e moldados 04 (quatro) corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão axial, para a idade de vinte e oito dias, conforme descrito no item 4.4.2.4, e cujos resultados encontram-se no item 5.2.2.

Os resultados do consumo do consumo de água para atender à consistência de  $(70 \pm 10)$  mm e da resistência à compressão axial estão indicados no item 5.2.2 do capítulo 5.

A correlação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a relação água/materiais cimentícios ( $\mathbf{x}$ ); a correlação entre a relação água/materiais cimentícios ( $\mathbf{x}$ ) e a relação agregados secos/ material cimentício, em massa ( $\mathbf{m}$ ); e a correlação entre a relação de agregados secos/material cimentício, em massa ( $\mathbf{m}$ ) e o consumo de cimento ( $\mathbf{C}$ ), com base

nas leis de comportamento, a saber: Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinare, estando descritas a seguir.

#### - Lei de Abrams

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/\text{mat.cim.}}}$$

Onde:  $f_{cj}$  = resistência à compressão axial, à idade  $j$ , em MPa;  
 $k_1$  e  $k_2$  = constantes que dependem dos materiais;  
 $a/\text{mat.cim.}$  = relação água/material cimentício.

#### - Lei de Lyse

$$m = k_3 + k_4 \times a/\text{mat.cim.}$$

Onde:  $m$  = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;  
 $k_3$  e  $k_4$  = constantes que dependem dos materiais;  
 $a/\text{mat.cim.}$  = relação água/material cimentício.

#### - Lei de Molinare

$$C = 1000 / (k_5 + k_6 \times m)$$

Onde:  $C$  = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;  
 $k_5$  e  $k_6$  = constantes que dependem dos materiais;  
 $m$  = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg.

Os resultados de ajustes das curvas de dosagem e dos traços definitivos encontram-se nos itens 5.2.3 e 5.2.4.

#### 4.4.1.3 Produção de misturas de concreto

A dosagem do concreto teve por base as curvas estabelecidas nos diagramas de dosagem, com adequação da consistência do concreto fresco para o nível de resistência pretendido.

Depois de obtidas as equações das curvas, correspondentes a cada diagrama, foram calculados os traços para as resistências à compressão do concreto aos 28 dias, de forma a atender aos  $f_{ck}$  de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, adotado o desvio padrão igual a 4 MPa, uma vez que o trabalho foi realizado em laboratório, com controle rigoroso, de acordo com a NBR 12655/1996.

Assim sendo, os traços estabelecidos na etapa anterior (diagramas de dosagem), indicados no Quadro 4.19, foram dosados e moldados os corpos-de-prova para avaliação das propriedades e no Quadro 4.20 têm-se a massa dos materiais utilizados nestes traços de concreto.

**Quadro 4. 19: Traços utilizados na moldagem dos corpos-de-prova para avaliação das propriedades.**

Concreto	Material cimentante	Traço
C20CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 2,99: 1,63: 1,63: 0,6328
C20CPIII	Cimento CPIII –32 – RS	1: 3,57: 1,87: 1,87: 0,7504
C20CPIII+e	Cimento CPIII –32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 3,07: 1,66: 1,66: 0,6307
C30CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 2,10: 1,27: 1,27: 0,4961
C30CPIII	Cimento CPIII –32 – RS	1: 2,88: 1,59: 1,59: 0,6196
C30CPIII+e	Cimento CPIII –32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 2,14: 1,28: 1,28: 0,4951
C35CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 1,74: 1,12: 1,12: 0,4412
C35CPIII	Cimento CPIII –32 – RS	1: 2,6: 1,47: 1,47: 0,5671
C35CPIII+e	Cimento CPIII –32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 1,76: 1,13: 1,13: 0,4407
C40CPIIE	Cimento CPII E – 32	1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,3926
C40CPIII	Cimento CPIII –32 – RS	1: 2,35: 1,37: 1,37: 0,5205
C40CPIII+e	Cimento CPIII –32 – RS e escória moída	(0,50+0,50): 1,43: 0,99: 0,99: 0,3925

Os concretos foram denominados de C20, C30, C35 e C40 de acordo com a classificação por grupos de resistência da NBR 8953/1992, acrescido da sigla do material cimentício utilizado na mistura.

**Quadro 4. 20: Massa dos materiais para a produção dos concretos.**

Traço	Material cimentício (g)		Agregado miúdo (g)	Agregado graúdo (g)		Água (g)	Relação a/mat.cim.
	Cimento	Esc. moída		P.britada Nº 0	P.britada Nº 1		
C20CPIIE	26 000	-	77 740	42 380	42 380	16 453	0,6328
C20CPIII	23 000	-	82 110	43 010	43 010	17 259	0,7504
C20CPIII+e	13 000	13 000	79 820	43 160	43 160	16 398	0,6307
C30CPIIE	34 000	-	71 400	43 180	43 180	16 867	0,4961
C30CPIII	27 000	-	77 760	42 930	42 930	16 729	0,6196
C30CPIII+e	17 000	17 000	72 760	43 520	43 520	16 833	0,4951
C35CPIIE	38 000	-	66 120	42 560	42 560	16 766	0,4412
C35CPIII	29 000	-	75 400	42 630	42 630	16 445	0,5671
C35CPIII+e	19 000	19 000	66 880	42 940	42 940	16 747	0,4407
C40CPIIE	43 000	-	61 490	42 570	42 570	16 881	0,3926
C40CPIII	31 000	-	72 850	42 470	42 470	16 135	0,5205
C40CPIII+e	21 750	21 750	65 520	45 045	45 045	17 858	0,3925

Concluída a moldagem, foram então moldados corpos-de-prova de concreto para as determinações da resistência à compressão (NBR 5738/1987), da massa específica, absorção e índice de vazios (NBR 9778/1987) e da profundidade de carbonatação.

O número de corpos-de-prova e o número de determinações utilizados no trabalho experimental encontram-se no Quadro 4.21.

**Quadro 4. 21: Número de corpos-de-prova utilizados em cada ensaio.**

Ensaio	Número de corpos-de-prova		Nº de determinações
	100x200 (mm)	150x300 (mm)	
Resistência à compressão axial	96	72	168
Consistência	-	-	21
Massa específica no estado fresco	-	-	12
Massa específica, índice de vazios e absorção	36	-	108
Profundidade de carbonatação natural	136	-	3 264
Profundidade de carbonatação acelerada	108	-	1 728

As misturas foram executadas utilizando-se uma betoneira de tambor inclinado, vista na Figura 4. 10, com capacidade de mistura de 320 litros.



**Figura 4. 10: Betoneira de tambor inclinado basculante.**

A seqüência de colocação dos materiais foi:

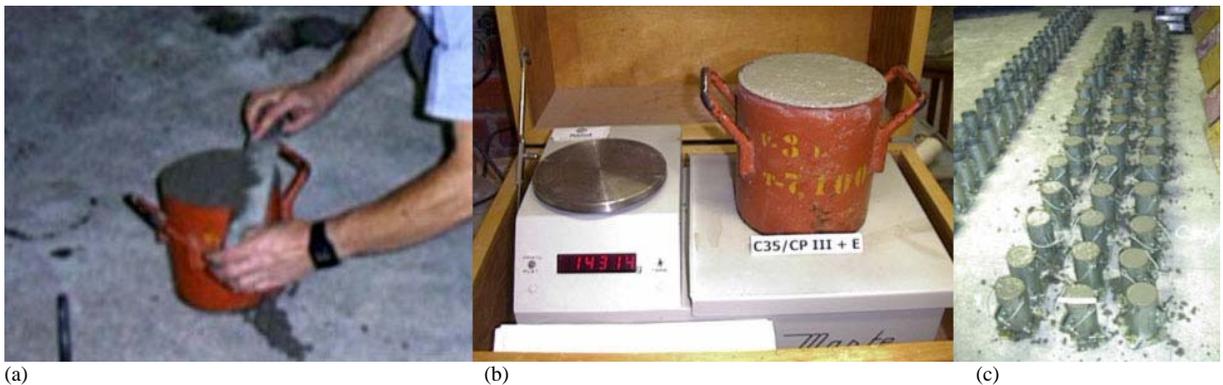
- metade da água mais os agregados graúdos misturados em tempo aproximado de 30 segundos;
- o aglomerante mais a areia e o restante da água, misturados por 3 minutos;
- Após esses procedimentos, paralisou-se a betoneira para retirada dos materiais aderidos à superfície, procedendo-se à mistura por mais 2 minutos, totalizando 6 minutos de mistura.

A consistência pelo abatimento do tronco de cone, fixada em  $(70 \pm 10)$ mm, foi medida e, em seguida, foram moldados os corpos-de-prova necessários para os ensaios de avaliação de propriedades do concreto e ensaios de carbonatação.

Na Figura 4. 12 observa-se seqüencialmente a mistura, o ensaio de abatimento, a descarga da betoneira, o ensaio de massa específica do concreto no estado fresco e a moldagem dos corpos-de-prova.



**Figura 4.11: Seqüência de mistura e moldagem dos corpos-de-prova: a) mistura; b) abatimento; c) descarga e transporte.**



**Figura 4. 12: Seqüência de mistura e moldagem dos corpos-de-prova: a) moldagem para o ensaio de massa específica; b) verificação da massa do concreto fresco e c) moldagem dos corpos-de-prova.**

## 4.4.2 Avaliação das propriedades do concreto

### 4.4.2.1 Consistência

A consistência foi obtida pelo método do abatimento do tronco de cone para cada mistura, conforme estabelecido na NBR NM 67/1996. A escolha do abatimento tomou por referência as recomendações de HELENE; TERZIAN (1993), em função do tipo de elemento estrutural, sendo, então, escolhido um valor intermediário para os concretos usuais:  $(70 \pm 10)$  mm.

Imediatamente após a mistura dos materiais constituintes, procedeu-se a execução do ensaio, compreendendo o preenchimento do tronco de cone, com três camadas de concreto compactadas manualmente, utilizando-se um soquete e aplicados 25 golpes em cada camada. Após a compactação o cone foi retirado e medido o abatimento em relação ao topo do cone.

#### **4.4.2.2 Massa específica do concreto fresco**

Os ensaios de massa específica no estado fresco foram realizados em um recipiente cilíndrico nas condições estabelecidas na NBR 9833/1987, cujos resultados encontram-se no item 5.3.1 do capítulo 5.

#### **4.4.2.3 Massa específica, índice de vazios e absorção do concreto endurecido**

Os ensaios para determinação da massa específica, absorção e índice de vazios foram realizados em 3 corpos-de-prova, na idade de 28 dias, nas condições estabelecidas pela NBR 9778/1987.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados conforme a NBR 5738/1987, nas dimensões de 100 mm x 200 mm, desmoldados após vinte e quatro horas, permanecendo em câmara úmida com umidade relativa de 99% até a idade do ensaio.

Os resultados encontram-se no item 5.3.2 do capítulo 5.

#### **4.4.2.4 Resistência à compressão**

Para o ensaio de resistência à compressão axial, para a etapa de elaboração dos diagramas de dosagem, os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados nas dimensões de 150 mm x 300 mm, uma vez que o volume da mistura foi adequado à capacidade de mistura da betoneira, proporcionando volume de concreto suficiente para se trabalhar com os corpos-de-prova nessas dimensões.

Nos estudos de resistência à compressão axial, depois de obtidos os traços experimentais na etapa de elaboração dos diagramas de dosagem, cada mistura de concreto teve volume suficiente, adequado à capacidade de mistura da betoneira, que permitiu também a utilização de corpos-de-prova 100 mm x 200 mm (a dimensão máxima característica do agregado graúdo, 19 mm, atendeu a esta dimensão de fôrma).

Após moldados e depois de vinte e quatro horas, os corpos-de-prova cilíndricos 100 mm x 200mm foram desmoldados e submetidos à cura em câmara úmida, com umidade relativa de 99%, até a idade do ensaio (28 e 63 dias), para avaliação da resistência à compressão axial nas condições estabelecidas na NBR 5739/1995.

Considerando a idade de 28 dias como padrão para comparações com a literatura e para atender a critérios estatísticos, foram moldados cinco corpos-de-prova para as idades 28 e três

corpos-de-prova para as idades 63 dias, atendendo a NBR 12.655/1996 que recomenda dois corpos-de-prova para cada idade. Dessa forma foram moldados oito corpos-de-prova para cada traço de concreto.

#### 4.4.3 Carbonatação

A metodologia utilizada nos ensaios de carbonatação está de acordo as pesquisas de AL-KADHIMI (1996), ISAIA; VAGHETTI, GASTALDINI (2001) e COELHO (2002) quanto ao tempo de cura, ambiente de espera e tempo de permanência em câmara de carbonatação.

Os corpos-de-prova cilíndricos utilizados foram moldados de acordo com a NBR 5738/1996, nas dimensões de 100 mm x 200 mm e na quantidade de 09 (nove) corpos de prova para cada idade. Esta quantidade foi escolhida de acordo com as pesquisas de NUNES (1998) e COELHO (2002).

O ensaio de carbonatação foi executado em corpos-de-prova submetidos às seguintes condições:

- cura em câmara úmida, por quinze dias com umidade relativa de 99% e temperatura de  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ;

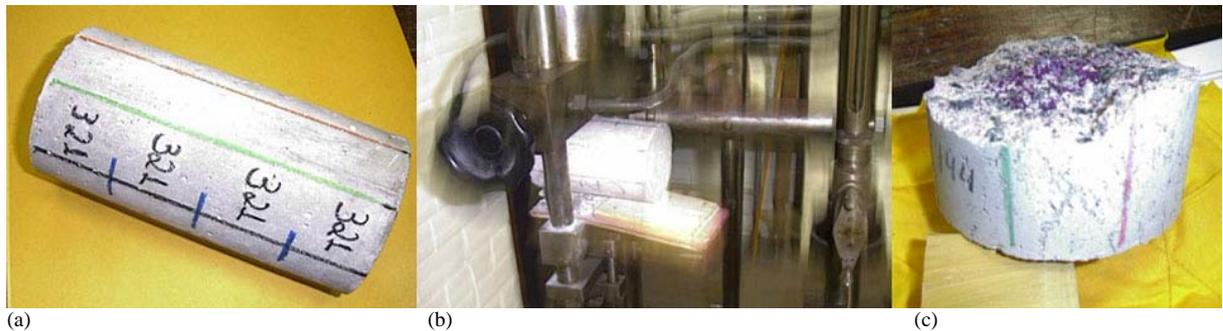
- cura ao ar em câmara seca, com umidade controlada de 50% e temperatura variando na faixa de  $21^{\circ}\text{C}$  a  $27^{\circ}\text{C}$ , até a data do ensaio para o ensaio de carbonatação natural e por sete semanas antes de serem colocados em câmara de carbonatação, para a o ensaio de carbonatação acelerada.

Antes do ensaio, os corpos-de-prova foram marcados nas posições nas quais eles seriam seccionados transversalmente (em azul). As marcações longitudinais (em preto, vermelho e verde) foram feitas para localizar a posição das leituras de carbonatação, em cada face rompida. O número de marcações longitudinais correspondeu a oito medidas da profundidade de carbonatação na seção transversal.

Essa marcação prévia teve como objetivo não haver interferência, por parte do observador, na escolha dos pontos analisados e, para manter constantes as linhas para cada uma das 8 determinações, em cada idade, de acordo com as pesquisas de NUNES (1998).

Na data do ensaio, cada corpo-de-prova foi seccionado transversalmente e retirada uma seção de aproximadamente 5 cm de espessura, que foi posteriormente limpa com um pincel,

submetida à aspersão de fenolftaleína e, após dez minutos, medida a profundidade de carbonatação, como se vê na Figura 4.14 e Figura 4.14.



**Figura 4.13: Seqüência do ensaio de carbonatação: a) marcação do corpo-de-prova; b) retirada da seção transversal; c) seção recém-fraturada**



**Figura 4.14: Seqüência do ensaio de carbonatação; (a) ferramentas; (b) limpeza da seção; (c) aspersão de fenolftaleína e (d) medida da profundidade de carbonatação.**

Os corpos-de-prova foram seccionados em quatro partes, sendo cada parte correspondente a uma idade. Na seção recém-fraturada foi aspergida a solução de 1% de fenolftaleína em 100 ml de etanol, e medida a profundidade de carbonatação, nos pontos previamente marcados. A solução de fenolftaleína foi preparada de acordo com os ensaios de HELENE (1993), NUNES (1998) e COELHO (2002).

#### 4.4.3.1 Ensaio de carbonatação natural

Os corpos-de-prova submetidos à carbonatação natural foram armazenados em câmara seca, com umidade relativa igual a 50% e temperatura variando na faixa de 21°C a 27°C, medindo-se a profundidade de carbonatação da superfície recém fraturada nas idades de 63, 77, 91 e 365 dias, como descrito no item 4.4.3 e cuja seqüência é observada na Figura 4.13 e Figura 4.14.

Na data do ensaio era retirada uma seção transversal de cada corpo-de-prova e efetuado o ensaio nessa seção. A parte restante do corpo-de-prova retornava à câmara seca para ser ensaiada nas idades posteriores.

Os resultados encontram-se no item 5.3.4 do capítulo 5.

#### **4.4.3.2 Ensaio de carbonatação acelerada**

Os ensaios de carbonatação acelerada foram executados de acordo com a metodologia utilizada por ISAIA (1995), quanto ao tempo de cura úmida, e por AL-KADHIMI (1996), ISAIA; VAGHETTI; GASTALDINI (2001) e COELHO (2002) quanto ao tempo de cura ao ar e teor de CO<sub>2</sub>.

Os corpos-de-prova após a desmoldagem foram submetidos à cura úmida, em câmara com umidade relativa igual a 99% e temperatura de (23±2)°C, por 15 dias. Depois, foram armazenados em câmara seca, nas mesmas condições que os corpos-de-prova submetidos à carbonatação natural, onde ficaram por sete semanas, sendo, então, introduzidos em uma câmara de carbonatação, descrita no item 4.4.3.3.

Completadas duas semanas de permanência na câmara de carbonatação, com teor de CO<sub>2</sub> igual a (95±5)%, umidade de (65±5)%, temperatura igual a (26±2)°C e pressão máxima de (1±0,1) atm os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio para medida da profundidade de carbonatação. Esses corpos-de-prova, após retirada de uma seção de aproximadamente 5 cm de espessura, foram reintroduzidos na câmara de carbonatação, permanecendo por mais duas semanas.

As idades dos ensaios acelerados foram 77 dias e 91 dias, correspondentes a 2 e 4 semanas de exposição em câmara de carbonatação, respectivamente, realizados conforme a seqüência estabelecida na Figura 4.14. Os resultados vêm-se no item 5.3.4 do capítulo 5.

#### **4.4.3.3 Câmara de carbonatação**

A câmara foi projetada para se ter controlada a temperatura, umidade, teor de CO<sub>2</sub> e pressão, utilizando-se sensores com sinais elétricos muito baixos associados a controle de motores.

Os controles de temperatura e umidade são integrados, pois a passagem da atmosfera pelo evaporador retira umidade, além de resfriar. Com isso, um nebulizador por ultra-som pode ser acionado para elevar a umidade.

Por outro lado, se a temperatura estiver correta e for necessário abaixar a umidade, um aquecedor por efeito joule é ligado, enquanto o evaporador retira umidade.

A temperatura é medida através de termistores, tanto na área de ensaios como na de refrigeração e a medida da umidade é feita por um sensor que varia sua capacitância com a mudança de umidade do dielétrico.

No fornecimento de CO<sub>2</sub>, são utilizadas garrafas acopladas à câmara por uma válvula solenóide que libera, ou não, a entrada do gás, conforme a necessidade. Há também uma outra válvula solenóide que libera o CO<sub>2</sub> do interior da câmara se se desejar menor teor do gás.

A pressão é medida por um sensor piezoelétrico e uma válvula solenóide abre para alívio sempre que a pressão interna fica superior a 10% da atmosférica (LEITE, 2004).



Figura 4. 15: Câmara de carbonatação.

## 4.5 Métodos estatísticos

O objetivo do projeto de experimentos, para os estudos em concreto, foi comparar as médias das seguintes variáveis: resistências à compressão axial (05 corpos de prova para a idade de 28 dias e 03 corpos de prova para a idade de 63 dias), medidas de absorção, índice de vazios e massa específica, com 04 (quatro) corpos-de-prova para cada traço de concreto, medidas de profundidade de carbonatação natural com 09 (nove) corpos-de-prova, e medidas de profundidade de carbonatação acelerada com 09 (nove) corpos-de-prova.

### 4.5.1 Análise dos resultados

Na análise estatística dos resultados foi utilizado o software “SPSS for Windows”, versão 11.5. As técnicas de estatística descritiva (cálculo de média, desvio padrão e gráficos de média) foram utilizadas para a análise estatística na caracterização das variáveis- resistência à compressão, absorção, índice de vazios e massa específica, e carbonatação, segundo os fatores estudados.

O nível de significância adotado neste trabalho, igual a 5%, nos testes de hipóteses paramétricos (Anova e Duncan), foi utilizado para determinar diferenças estatisticamente significantes entre as médias de resistência à compressão, absorção, índice de vazios e massa específica, e profundidade de carbonatação (MONTGOMERY, 1991).

Na determinação das curvas de dosagem, o modelo exponencial foi o melhor delineador dos dados em estudo, para a correlação entre as variáveis resistência à compressão aos 28 dias (MPa) e a relação água/materiais cimentícios (Lei de Abrams), observadas nos gráficos de correlação (Scatter plot) e nos coeficientes de ajuste do modelo.

O modelo linear foi o melhor ajuste para a correlação entre a variável relação água/materiais cimentícios e a relação agregados/materiais cimentícios (Lei de Lyse) e, entre o consumo de materiais cimentícios e a relação agregados secos/material cimentício (Lei de Molinare), o modelo foi ajustado por regressão não linear.

Para os coeficientes de carbonatação, natural e acelerado, verificou-se que o modelo de regressão exponencial proporcionava um melhor ajuste, assim como a consideração do tempo de exposição inicial igual a zero correspondente à idade igual a 63 dias, na carbonatação natural e acelerada.

Na correlação entre a profundidade de carbonatação, natural e acelerada, e a resistência à compressão aos 28 dias, adotou-se dois modelos: a regressão não linear e o modelo de regressão exponencial, adequados aos modelos pesquisados na revisão bibliográfica.

Por último, verificou-se se o tamanho da amostra atendeu aos objetivos propostos, utilizando-se a equação 4.1 (COCHRAN; 1977).

$$n = \frac{z_{1-\alpha/2}^2 s^2}{d^2} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

n- tamanho da amostra;

$z_{1-\alpha/2}$ - abscissa padrão da curva normal e igual a 1,96 para  $\alpha=0,05$ ;

s – desvio padrão;

d - erro admitido.

Os erros admitidos para a profundidade de carbonatação foram iguais a 0,5 mm, que é o grau de precisão da leitura no ensaio com aspensão de fenolftaleína. Quando o desvio padrão foi menor do que o erro admitido, adotou-se o valor do erro igual ao desvio padrão.

## **CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1 Introdução**

Neste capítulo são discutidos e analisados os resultados obtidos no programa experimental.

Com estes resultados, avalia-se a influência da resistência à compressão no mecanismo da carbonatação do concreto e a possibilidade de utilização de elevados teores de escória, adicionada diretamente às misturas de concretos, sem que haja grande influência na carbonatação. Para isso, utilizou-se uma dosagem adequada e uma cura eficiente.

Inicialmente, no item 5.2, são analisados os resultados dos diagramas de dosagem e definidos os traços adequados a cada resistência à compressão, para cada aglomerante utilizado.

No item 5.3, os resultados das propriedades do concreto e, no item 5.4, da profundidade de carbonatação, natural e acelerada, e obtidos os coeficientes de carbonatação, naturais e acelerados.

Após, são elaboradas as correlações entre as classes de resistência e a profundidade de carbonatação, natural e acelerada.

### **5.2 Dosagem**

Nos itens 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4, com os resultados obtidos no estudo experimental, obtêm-se as equações que tiveram por base as leis de comportamento: Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinare; e, a partir dessas equações, os nomogramas e os traços correspondentes a classe do concreto desejada: 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa.

#### **5.2.1 Determinação do teor adequado de argamassa**

A seleção do teor adequado de argamassa foi importante porque a falta dessa conduz à maior porosidade no concreto ou a falhas de concretagem, e o excesso, apesar da melhor aparência do concreto, aumenta o risco de fissuração por diferenciais térmicos ou por retração na secagem (HELENE; TERZIAN, 1993). Assim, os resultados das misturas para a escolha do teor adequado de argamassa, mínimo possível, encontram-se no Quadro 5.1.

Esse resultado auxiliou na etapa seguinte de definição dos traços auxiliares.

Quadro 5. 1: Traços em massa, testados na escolha do teor de argamassa.

Teor de argamassa. (%)	Traço (1:a:p) (mat. cim.: areia: 50% de cada brita)	Areia (kg)	Cimento e escória (kg)	água (l)	água/mat. cimentício	H (%)	Abatimento (mm)
51,5	1:2,003:2,82	24,036	12,000	6,000	0,50	8,58	75
53	1:2,086:2,737	24,791	12,364	6,000	0,485	8,33	65
				6,100	0,493	8,47	65
55	1:2,203:2,62	28,454	12,916	6,300	0,487	8,37	50
				6,460	0,500	8,58	65
57	1:2,319:2,504	31,339	13,514	6,610	0,489	8,39	45
				6,820	0,505	8,66	45
59	1:2,435:2,388	34,504	14,170	7,150	0,504	8,65	40
				7,45	0,526	9,03	55

No Quadro 5.1, o menor consumo de água para o abatimento igual a (70±10) mm foi observado pela menor relação água/ materiais secos, igual a 8,33%, correspondente ao teor de argamassa igual a 53%. Acrescentando-se 2% a esse valor, correspondente à estimativa de perdas de argamassa no transporte e lançamento, o teor adequado de argamassa foi igual a 55%.

## 5.2.2 Curvas dos diagramas

Para elaboração das curvas de dosagem e equações correspondentes a cada curva, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial para os traços escolhidos, de acordo com a metodologia de HELENE; TERZIAN (1993), cujos resultados encontram-se no Quadro 5. 2.

Quadro 5. 2: Resultados da resistência à compressão axial, relação agregados secos e consumo de cimento.

Material cimentante	Traço	Traço em massa (mat. cimentício: areia: brita 0: brita 1: água/ material cimentício)	Resistência aos 28 dias (MPa)	x	m	C (kg/m <sup>3</sup> )
CP II E-32 (Diagrama 1)	T1CPIIE	1: 3,4: 1,8: 1,8: 0,705	21,97 (0,16)*	0,705	7	270,15
	T2CPIIE	1: 2,3: 1,35: 1,35: 0,506	37,81 (0,83)	0,506	5	364,72
	T3CPIIE	1: 1,2: 0,9: 0,9: 0,37	47,54 (1,26)	0,37	3	541,52
CP III-32-RS (Diagrama 2)	T1CPIII	1:3,95: 2,025: 2,025: 0,83	21,34 (0,47)	0,83	8	237,66
	T2CPIII	1:2,85: 1,575: 1,575: 0,594	41,47 (0,89)	0,594	6	311,49
	T3CPIII	1: 1,75: 1,125:1,125: 0,420	57,49 (2,33)	0,420	4	439,34
CP III-32-RS + escória granulada de alto-forno moída (Diagrama 3)	T1CPIII+e	(0,50+0,50): 3,4: 1,8: 1,8: 0,6825	22,82 (0,70)	0,682	7	271,47
	T2CPIII+e	(0,50+0,50): 2,3: 1,35: 1,35:0,513	37,67 (3,47)	0,513	5	363,08
	T3CPIII+e	(0,50+0,50): 1,20: 0,90:0,90: 0,34	48,32 (1,32)	0,340	3	542,45

\* valores do desvio padrão entre parênteses.

Nesse mesmo quadro, observam-se também a relação água/materiais cimentícios (**x**), a proporção de agregados (**m**) e o consumo de cimento (**C**).

O desvio padrão obtido nos resultados de resistência à compressão axial atende ao valor adotado para as condições do ensaio, estabelecido de acordo com a NBR 12655/1996.

### 5.2.3 Modelos de ajustes das curvas

Com os resultados indicados no Quadro 5.2 e com base nas leis de comportamento, Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinare, os modelos foram ajustados para cada material cimentício utilizado, conforme se vê na Tabela 5.1.

**Tabela 5. 1: Modelos de ajuste das curvas.**

y	x	Modelo	Coeficiente 1	Coeficiente 2	Teste de significância do modelo		
					F	p-valor	R <sup>2</sup>
Diagrama 1 (CP II E-32)							
fc28	a/mat.cim	$Ln y = Ln k_1 - x \cdot Ln k_2 + \epsilon$	Ln k <sub>1</sub> =116,488	Ln k <sub>2</sub> = -2,3336	548,33	0,000	0,982
m	x	$y = k_3 + k_4x$	k <sub>3</sub> = -1,2192	k <sub>4</sub> =11,8012	848,26	0,000	0,988
C	m	$y=1000/(k_5+k_6.m)$	k <sub>5</sub> =0,4732365	k <sub>6</sub> =0,4572186			0,99974
Diagrama 2 (CP III-32 - RS)							
fc28	a/mat.cim	$Ln y = Ln k_1 - x \cdot Ln k_2 + \epsilon$	Ln k <sub>1</sub> =165,910	Ln k <sub>2</sub> = -2,4393	646,57	0,000	0,985
m	x	$y = k_3 + k_4x$	k <sub>3</sub> = 0,0486	k <sub>4</sub> =9,6823	1.311,91	0,000	0,992
C	m	$y=1000/(k_5+k_6.m)$	k <sub>5</sub> =0,3655175	k <sub>6</sub> =0,4771054			0,99975
Diagrama 3 (50%CP III-32RS + 50% de escória de alto-forno moída)							
fc28	a/mat.cim	$Ln y = Ln k_1 - x \cdot Ln k_2 + \epsilon$	Ln k <sub>1</sub> =117,367	Ln k <sub>2</sub> = -2,3532	196,10	0,000	0,951
m	x	$y = k_3 + k_4x$	k <sub>3</sub> = -1,4723	k <sub>4</sub> =12,4667	9.003,97	0,000	0,999
C	m	$y=1000/(k_5+k_6.m)$	k <sub>5</sub> =0,468506717	k <sub>6</sub> =0,458158089			0,99998

Assim, obtidas as equações para cada material cimentício, foram traçados os diagramas como se vêem na Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3.

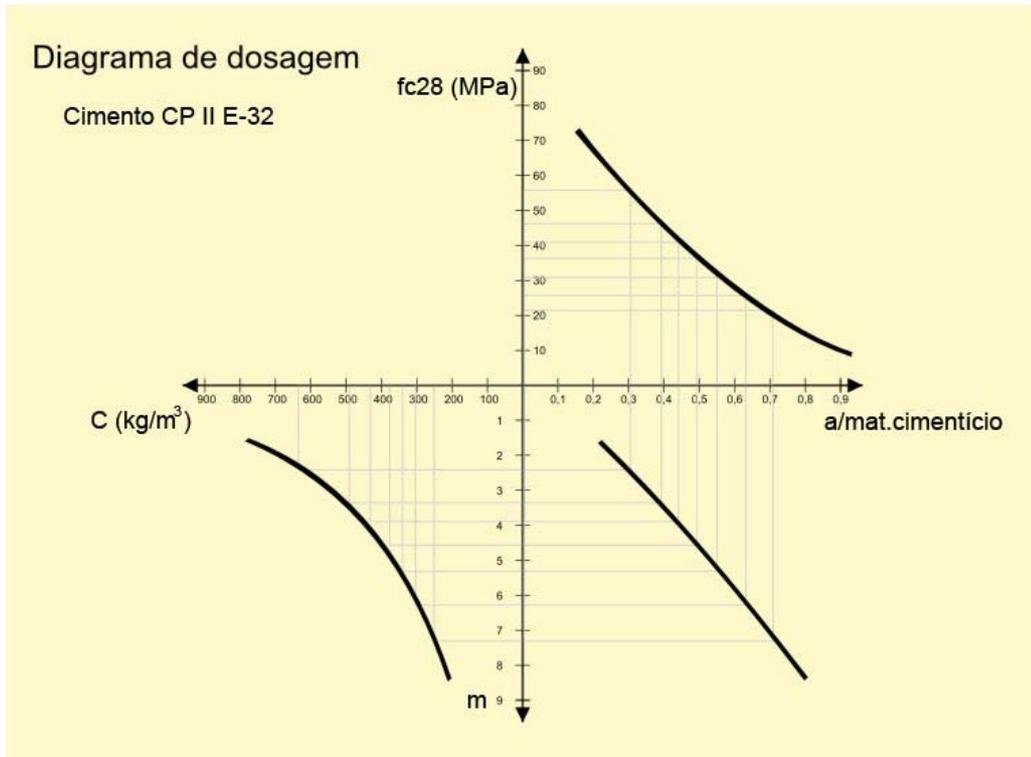


Figura 5. 1: Diagrama de dosagem na idade de 28 dias para o cimento CP II E-32.

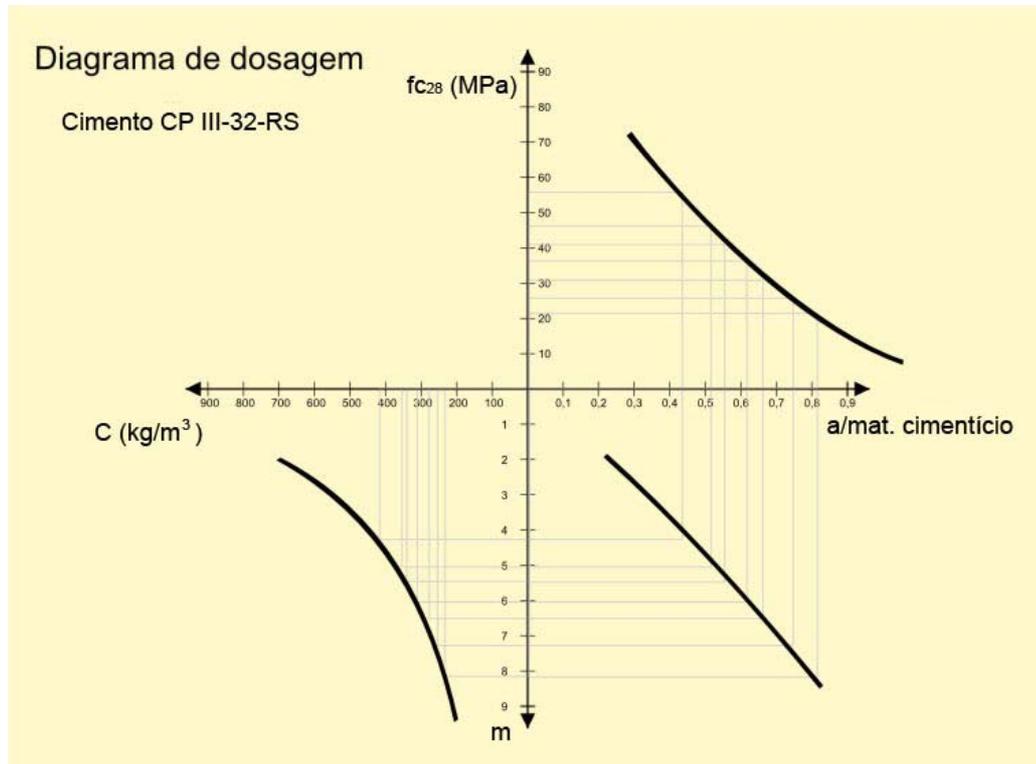


Figura 5. 2: Diagrama de dosagem na idade de 28 dias para o cimento CP III-32-RS.

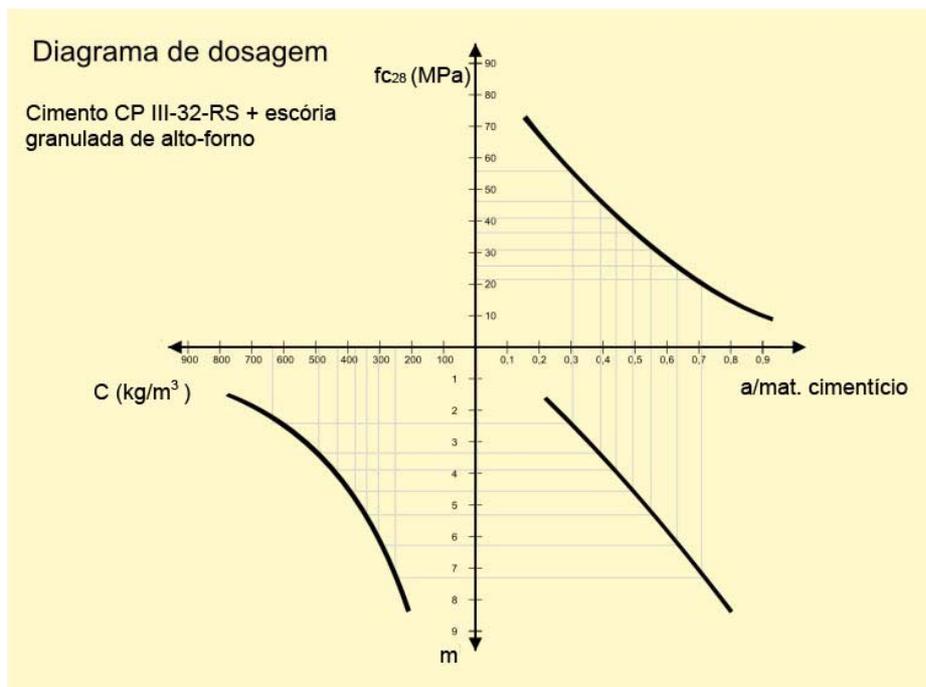


Figura 5. 3: Diagrama de dosagem na idade de 28 dias para mistura de 50% de cimento CP III-32-RS + 50% de escória granulada de alto-forno.

#### 5.2.4 Traços definitivos

Com as equações da Tabela 5. 1, foram obtidos os traços adequados a cada resistência à compressão desejada: 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, indicados no Quadro 5.3.

Quadro 5. 3: Relação dos traços para as classes 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa.

Concreto	Classe (MPa)	Água/mat. cimentício	m	C (kg)	Traços em massa (mat. Cimentício: areia: brita 0: brita 1: a/mat. cim.)
Diagrama 1 (CPII E-32)					
C20CPIIE	20	0,6328	6,2494	300,244	1: 2,99: 1,63: 1,63: 0,6328
C30CPIIE	30	0,4961	4,6355	385,696	1: 2,10: 1,27: 1,27: 0,4961
C35CPIIE	35	0,4412	3,9880	435,420	1: 1,74: 1,12: 1,12: 0,4412
C40CPIIE	40	0,3926	3,4140	491,594	1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,3926
Diagrama 2 (CP III-32-RS)					
C20CPIII	20	0,7504	7,3145	259,381	1: 3,57: 1,87: 1,87: 0,7504
C30CPIII	30	0,6196	6,0477	307,602	1: 2,88: 1,59: 1,59: 0,6196
C35CPIII	35	0,5671	5,5395	332,397	1:2,60: 1,47: 1,47: 0,5671
C40CPIII	40	0,5205	5,0889	357,973	1: 2,35: 1,37: 1,37: 0,5205
Diagrama 3 (CP III-32-RS + escória)					
C20CPIII + e	20	0,6307	6,3916	294,385	1: 3,07: 1,66: 1,66: 0,6307
C30CPIII + e	30	0,4951	4,7009	381,346	1: 2,14: 1,28: 1,28: 0,4951
C35CPIII + e	35	0,4407	4,0225	432,623	1: 1,76:1,13: 1,13: 0,4407
C40CPIII + e	40	0,3925	3,4212	491,161	1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,3925

No Quadro 5.4, tem-se o consumo de materiais para os volumes de concreto utilizados na moldagem dos corpos-de-prova para avaliação das propriedades.

**Quadro 5. 4: Consumo por metro cúbico de concreto para os materiais utilizados nos traços.**

Concreto	Material cimentício (g)		Agregad o miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)		Água (kg)	a/mat. cim.
	Cimento (kg)	Escória (kg)		P.britada Nº 0	P.britada Nº 1		
Diagrama 1 (CP II E-32)							
C20CPIIE	300,24	-	897,71	489,39	489,39	189,15	0,63
C30CPIIE	385,69	-	809,95	489,82	489,82	185,13	0,49
C35CPIIE	435,42	-	757,63	487,67	487,67	191,58	0,44
C40CPIIE	491,59	-	702,97	486,67	486,67	191,72	0,39
Diagrama 2 (CP III-32-RS)							
C20CPIII	259,38	-	925,98	485,04	485,04	194,53	0,75
C30CPIII	307,60	-	885,88	489,08	489,08	190,71	0,62
C35CPIII	332,39	-	864,21	488,61	488,61	189,46	0,57
C40CPIII	357,97	-	841,16	490,41	490,41	186,14	0,52
Diagrama 3 (CP III-32-RS + escória)							
C20CPIII+e	147,19	147,19	903,74	488,67	488,67	185,45	0,63
C30CPIII+e	190,67	190,67	816,08	488,12	488,12	186,85	0,49
C35CPIII+e	216,31	216,31	761,41	488,86	488,86	190,35	0,44
C40CPIII+e	245,58	245,58	702,35	486,24	486,24	191,55	0,39

No Quadro 5.3 e Quadro 5.4, observa-se que a substituição de parte do cimento CP III-32-RS por escória granulada de alto-forno moída, proporcionou consumos muito similares, para uma mesma classe de resistência, em relação às misturas com o cimento CP II E-32. A escória granulada de alto-forno proporcionou também um menor consumo de aglomerante total em comparação às misturas que utilizaram somente o cimento CP III-32-RS, caracterizando a sua contribuição no desenvolvimento da resistência do concreto conforme já estabelecido nas pesquisas de NAKAMURA; SAKAI; SWAMY (1992).

### 5.3 Avaliação de propriedades do concreto

Nos itens 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3 analisa-se os resultados dos ensaios de massa específica do concreto fresco; massa específica, absorção e índice de vazios; e resistência à compressão.

#### 5.3.1 Massa específica do concreto no estado fresco

Os resultados dos ensaios de massa específica no estado fresco dos concretos C20CPIIE, C30CPIIE, C35CPIIE, C40CPIIE, C20CPIII, C30CPIII, C35CPIII, C40CPIII, C20CPIII + e, C30CPIII + e, C35CPIII + e, C40CPIII + e realizados em um recipiente cilíndrico nas condições estabelecidas na NBR 9833/1987, encontram-se no Quadro 5.5.

**Quadro 5. 5: Massa específica do concreto no estado fresco.**

Concreto	Massa específica no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )		
	CP II E-32-RS	CP II E-32-RS	CP II E-32-RS + escória
C20	2 286	2 264	2 285
C30	2 299	2 275	2 284
C35	2 299	2 288	2 295
C40	2 321	2 301	2 295

Com os resultados do Quadro 5.5, observa-se que as massas específicas estão compatíveis com os tipos e os consumos de cimentos, crescendo, na maioria dos concretos, com a resistência à compressão e com o consumo de cimento. Nesses resultados e também no Quadro 5.4, observa-se que ao ser fixado o teor de argamassa, a massa total dos materiais utilizados por metro cúbico de concreto, praticamente não variou.

### 5.3.2 Massa específica, índice de vazios e absorção

Na observam-se os resultados de absorção, índice de vazios e massa específica saturada dos concretos C20CPIIE, C30CPIIE, C35CPIIE, C40CPIIE, C20CPIII, C30CPIII, C35CPIII, C40CPIII, C20CPIII + e, C30CPIII + e, C35CPIII + e, C40CPIII + e realizados em 3 corpos-de-prova, na idade de 28 dias, nas condições estabelecidas pela NBR 9778/1987.

Os resultados da análise de variância Anova para as classes de resistência e o material cimentício, e do teste *a posteriori* de Ducan das variáveis massa específica, absorção e índice de vazios encontram-se na Tabela 5. 2 e Tabela 5.3, para os concretos C20, C30, C35 e C40.

**Tabela 5. 2: Média e desvio padrão para as variáveis massa específica, absorção e índice de vazios dos concretos (n( número de leituras)= 3).**

Concreto	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
C20CPIIE	2 620(0,01)	6,26(0,12)	14,12(0,29)
C30CPIIE	2 620(0,01)	5,46(0,35)	12,51(0,76)
C35CPIIE	2 560(0,00)	3,62(0,17)	8,49(0,36)
C40CPIIE	2 550(0,01)	3,10(0,35)	7,33(0,82)
C20CPIII	2 600(0,02)	6,08(0,18)	13,66(0,38)
C30CPIII	2 600(0,00)	5,70(0,24)	12,95(0,51)
C35CPIII	2 540(0,00)	3,71(0,06)	8,63(0,13)
C40CPIII	2 530(0,00)	2,91(0,31)	6,87(0,69)
C20CPIII+e	2 600(0,01)	5,94(0,38)	13,39(0,82)
C30CPIII+e	2 600(0,01)	5,45(0,48)	12,42(1,05)
C35CPIII+e	2 530(0,00)	2,86(0,60)	6,75(1,34)
C40CPIII+e	2 540(0,1)	3,04(0,20)	7,19(0,47)

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

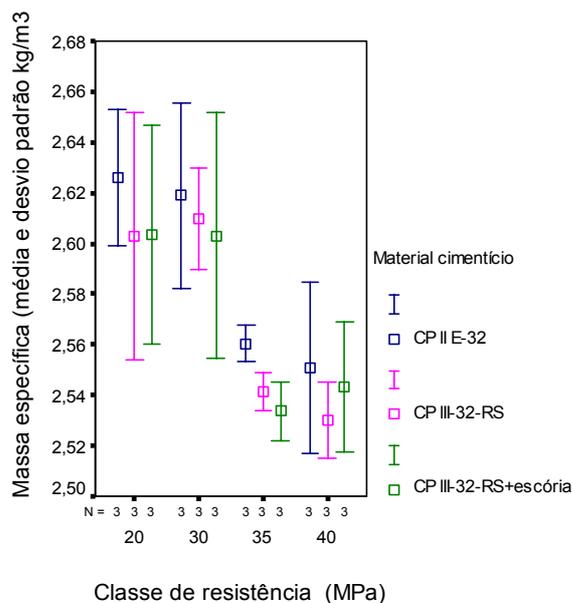
Os resultados da Tabela 5.2 foram analisados estatisticamente, variando-se o material cimentício para cada classe de resistência e, posteriormente, a classe de resistência, para cada material cimentício cujos resultados encontram-se na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3: Resultados da Anova e teste a posteriori de Duncan para a massa específica aos 28 (vinte e oito) dias, com fator de variação - material cimentício por concreto e classe de resistência (n=3).**

Classe concreto/ Mat. cimentício	F	p-valor	Diferenças estatísticas
Fator de variação – material cimentício			
Concreto C20	2,085	0,225	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
Concreto C30	0,909	0,452	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
Concreto C35	26,356	0,001	C35CPIII+e > C35CPIIE > C35CPIII (diferenças estatísticas ).
Concreto C40	3,015	0,124	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
Fator de variação – classe de resistência			
CP II E-32	34,430	0,000	As massas específicas dos concretos C40 e C35 foram similares e com diferenças estatísticas das massas dos concretos C30 e C20 também foram similares, aumentando nesta ordem: C40 e C35; C30 e C20.
CP III-32-RS	40,588	0,000	
CP III-32-RS+escória	20,805	0,000	

Quanto aos resultados da Tabela 5.3, pode-se dizer que as massas específicas desses concretos estão compatíveis com os materiais cimentícios e agregados empregados. A diminuição da massa específica do concreto, com o aumento da resistência à compressão, ocorreu, provavelmente, pela maior incorporação de ar desses concretos.

Observa-se na Figura 5.4, o gráfico de médias e desvio padrão para a massa específica.



**Figura 5. 4: Gráfico de médias para a variável massa específica.**

Com relação à **absorção**, foram utilizados corpos-de-prova de concreto que foram mantidos saturados até a idade do ensaio, o que dificultou qualquer carbonatação da superfície; e este

fato pode explicar não ter havido diferenças significativas entre a maioria das misturas com os três diferentes materiais cimentícios, cujos resultados, segundo a classificação do CEB-192 para os traços C35 e C40, com absorção menor do que 5%, foram considerados adequados e os resultados da absorção, para os traços C20 e C30, maior do que 5%, classificam esses concretos como pobres.. Na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5, tem-se os resultados da análise de variância Anova e teste *a posteriori* de Ducan para as da variáveis absorção e índice de vazios.

**Tabela 5.4: Resultados de Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a absorção e o índice de vazios aos 28 dias, com fator de variação: material cimentício (n=3).**

Classe de resistência	F	p-valor	Diferenças estatísticas
Variável – absorção para o fator de variação: material cimentício			
Concreto C20	1,172	0,372	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
Concreto C30	0,431	0,668	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
Concreto C35	4,860	0,056	As absorções dos concretos C35CPIII+e, C35CPIIE e C35CPIII tiveram diferenças estatísticas e cresceram nessa ordem.
Concreto C40	0,299	0,752	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
Variável - índice de vazios para o fator de variação: material cimentício			
Concreto C20	1,325	0,334	Não ocorreram, variando-se o material cimentício
Concreto C30	0,373	0,704	Não ocorreram, variando-se o material cimentício
Concreto C35	5,035	0,052	O índice de vazios do C35CPIII+e foi diferente do C35CPIIE e C35CPIII, crescendo nesta ordem: C35CPIII+e, (C35CPIIE, C35CPIII)*
Concreto C40	0,299	0,752	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.

\* Valores estatisticamente similares

**Tabela 5.5: Resultados de Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a absorção e o índice de vazios aos 28 dias, com fator de variação: classe de resistência (n=3).**

Mat. cimentício	F	p-valor	Diferenças estatísticas
Variável – absorção para o fator de variação: classe de resistência			
CPII	89,602	0,000	Os resultados da absorção tiveram diferenças estatísticas para todos os concretos, sendo crescente nesta ordem: C40, C35, C30 e C20.
CPIII	143,409	0,000	Somente a absorção dos concretos C20 e C30 foram similares crescendo nesta ordem: C40, C35 e (C30, C20).
CPIIE	38,472	0,000	A absorção foi similar nos conjuntos: (C40, C35) e (C30, C20), crescendo os resultados dos conjuntos, nessa ordem.
Variável - índice de vazios para o fator de variação: classe de resistência			
CPII	84,433	0,000	Os índices de vazios foram estatisticamente diferentes e cresceram nesta ordem: C40, C35, C30 e C20.
CPIII	142,337	0,000	O índice de vazios foi similar para os concretos C20 e C30 e com diferenças estatísticas se comparados com os concretos C35 e C40, também estatisticamente diferentes, crescendo nesta ordem: C40, C35 e (C30, C20).
CPIIE	37,673	0,000	Os resultados do índice de vazios para os conjuntos de concreto, (C35, C40) e (C30, C20) foram estatisticamente diferentes, crescendo nesta ordem.

Na Figura 5.5 tem-se o gráfico de médias para as variáveis absorção e índice de vazios.

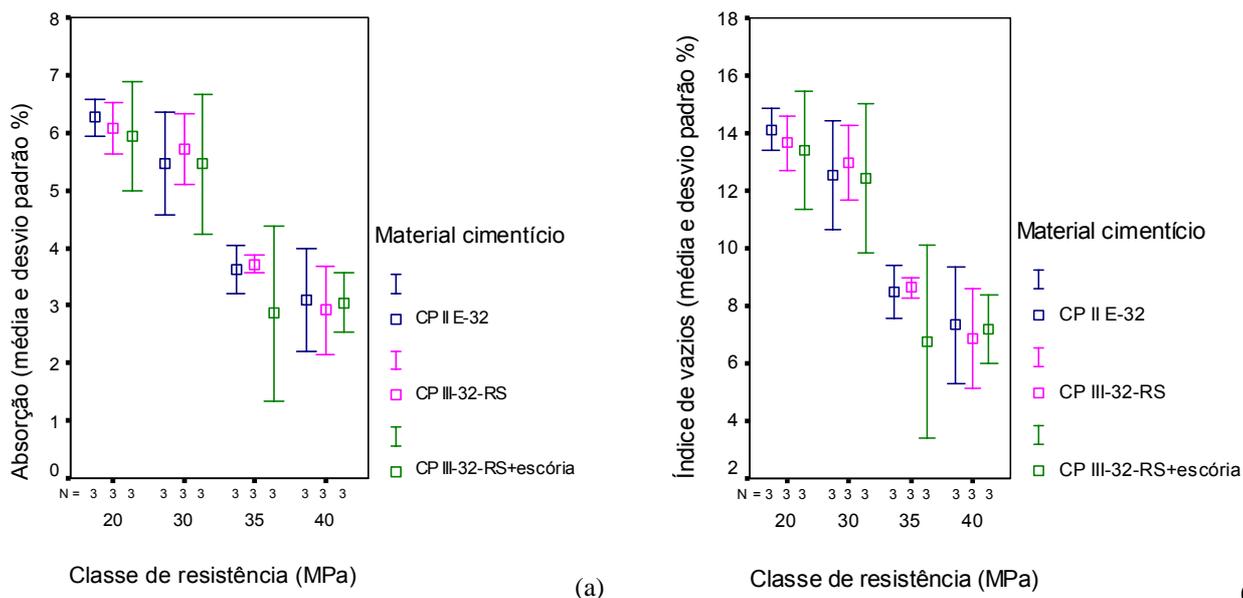


Figura 5. 5: Gráfico de médias para a variável: (a) absorção; (b) índice de vazios.

### 5.3.3 Resistência à compressão

Os resultados de média e desvio padrão dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos C20CPIIE, C30CPIIE, C35CPIIE, C40CPIIE, C20CPIII, C30CPIII, C35CPIII, C40CPIII, C20CPIII + escória, C30CPIII + escória, C35CPIII + escória, C40CPIII + escória, realizados em corpos-de-prova cilíndricos 10 cm x 20 cm, nas condições estabelecidas pela NBR 5739/1995, encontram-se na Tabela 5.6, e, na Tabela 5.7 e Tabela 5.8, encontram-se os resultados de variância Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a variável resistência à compressão axial.

Tabela 5. 6: Resultados de resistência à compressão: média e desvio padrão.

Concreto	Resistência à compressão (média e desvio padrão em MPa)	
	28 dias	63 dias
C20CPIIE	26,15(0,74)	29,70(0,48)
C30CPIIE	39,50(0,62)	43,13(1,38)
C35CPIIE	41,88(4,52)	50,12(0,74)
C40CPIIE	44,74(1,81)	53,36(1,97)
C20CPIII	26,41(1,68)	32,01(2,18)
C30CPIII	36,84(1,27)	48,89(2,76)
C35CPIII	40,01(1,46)	50,07(1,92)
C40CPIII	43,38(1,31)	51,04(2,25)
C20CPIII + e*	25,16(1,12)	25,96(0,92)
C30CPIII + e*	38,08(1,04)	44,47(5,03)
C35CPIII + e*	40,77(2,06)	53,84(4,1)
C40CPIII + e*	43,16 (2,07)	54,73(2,7)

**Tabela 5. 7: Resultados de Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a variável resistência à compressão com fator de variação: material cimentício (n=5 (28 dias), n=3(63 dias)).**

Classe de resistência	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas para o fator-material cimentício
Concreto C20	28	1,39	0,286	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
	63	14,348	0,005	As resistências tiveram diferenças estatísticas, crescendo nesta ordem: (C20CPIII+e) e (C20CPIIE, C20CPIII).
Concreto C30	28	8,508	0,005	As resistências dos concretos C30CPIII e C30CPIII+e foram similares e com diferenças estatísticas para o concreto C30CPIIE, crescendo nesta ordem: C30CPIIE e (C30CPIII+e, C30CPIII).
	63	2,343	0,177	Não ocorreram, variando-se o material cimentício.
Concreto C35	28	0,498	0,62	
	63	1,989	0,217	
Concreto C40	28	1,172	0,343	
	63	1,921	0,227	

**Tabela 5. 8: Resultados de Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a variável resistência à compressão com fator de variação: classe do concreto.**

Material cimentício	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas
CP II E-32	28	54,875	0,000	A resistência cresceu nesta ordem: C20, C30, C35 e C40.
	63	199,22	0,000	
CP III-32-RS	28	129,124	0,000	
	63	46,265	0,000	
CP III-32-RS + e	28	117,837	0,000	A resistência cresceu nesta ordem: C20, C30 e (C35, C40).
	63	42,523	0,000	

Nos resultados da Tabela 5.6, Tabela 5.7 e Tabela 5.8, observa-se as menores resistências oriundas de altas relações água/materiais cimentícios explicadas, de acordo com MEHTA; MONTEIRO (1994) como uma consequência natural do progressivo enfraquecimento da matriz cimentícia, devido ao aumento da porosidade com o aumento da relação água/materiais cimentícios.

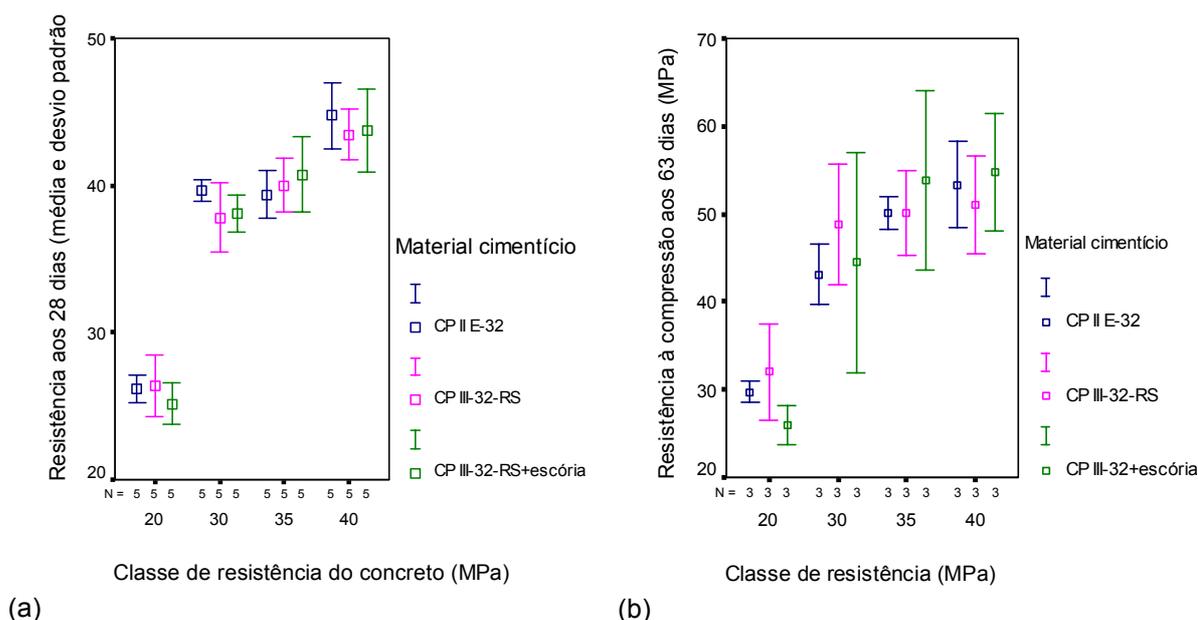
Na idade de 63 dias, os concretos com teores mais altos de escória granulada de alto-forno moída, proporcionaram resistências à compressão axial média aos 63 dias similares aos demais concretos. Estes resultados são similares às pesquisas de BROOKS; WAINWRIGHT; BOUKENDAKJI (1992); SIVASUNDARAM; MALHOTRA (1992).

Entretanto, a resistência à compressão do concreto C20CIII+e, aos 63 dias, foi menor e estatisticamente diferente dos concretos C20CPIIE e C20CPIII. Estes resultados podem ser explicados, segundo BROOKS; WAINWRIGHT; BOUKENDAKJI (1992);

SINVASUNDARAM; MALHOTRA (1992), GEISELER *et al.*, (1995), pelo desenvolvimento mais lento das resistências do concreto com maiores teores de escória de alto-forno. Além disso, sabe-se que o cimento CP II E-32.

Deve-se considerar também, segundo LIM; WEE (2000), que a quantidade de hidróxido de cálcio produzida pela hidratação do clínquer é insuficiente para a completa hidratação da escória de alto-forno, ficando parte da escória moída atuando como fíler.

Na Figura 5. 6 e nos resultados da Tabela 5. 6, observa-se que nas idades de 28 dias, para a maior parte das misturas, há uma tendência de menor resistência das misturas com maiores teores de escória para todas as classes de resistências. Contudo, na idade de 63 dias para as classes de resistências menores, observa-se que o cimento CP III-32-RS proporcionou um desenvolvimento mais rápido da resistência. Nas misturas com esse cimento e escória de alto-forno, parece que o maior teor de escória de alto-forno foi de maior influência nessas classes de resistência.

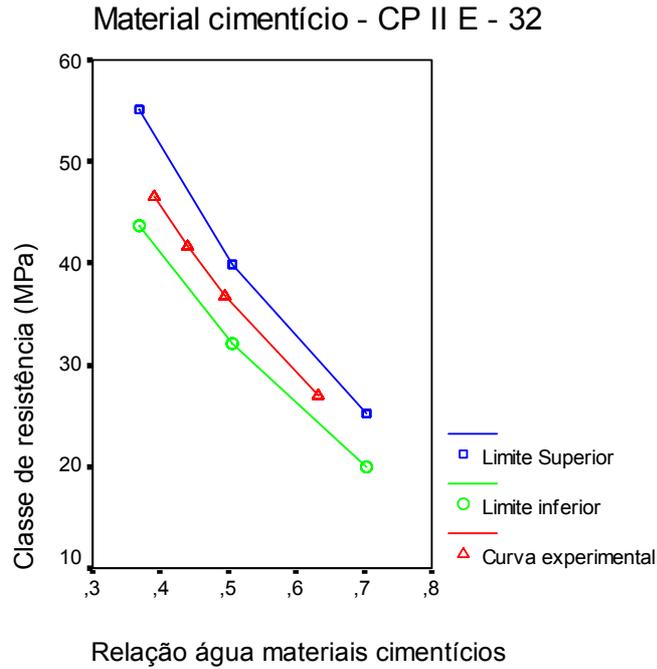


**Figura 5. 6: Resultados de resistência à compressão axial, média e desvio padrão, para os concretos com CP II E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS mais escória de alto-forno: (a) aos 28 dias; (b) aos 63 dias.**

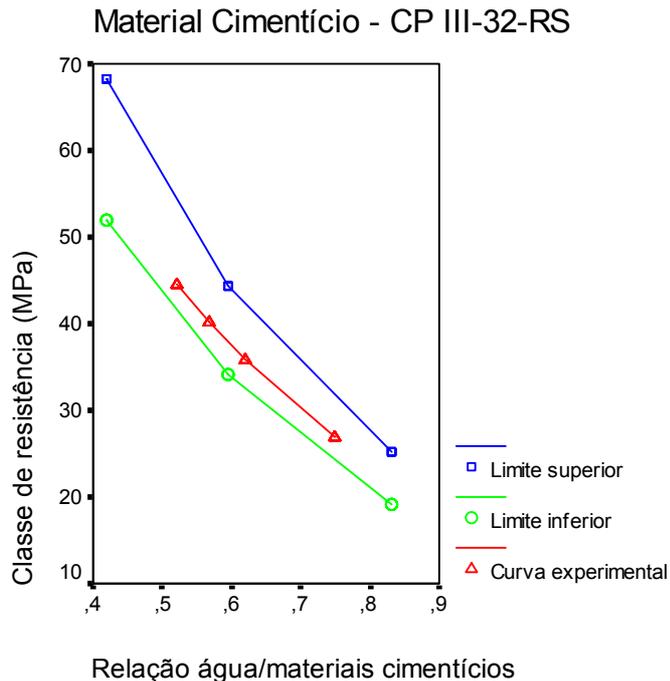
Nos concretos C35CPIII+e e C40CPIII+e, que tinham menor relação água/materiais cimentícios e maior teor de escória granulada de alto-forno, parece que o hidróxido de cálcio gerado nas reações de hidratação do clínquer de cimento *Portland* contribuiu com maior eficácia na hidratação da escória granulada de alto-forno e por isso, a hidratação mais rápida dessas misturas. Assim sendo, aos 63 dias, os concretos com maior teor de escória granulada de alto-forno proporcionaram maior resistência à compressão. Estes resultados estão de

acordo com as pesquisas de MALHOTRA (1983); SAKAI *et al.* (1992), NAKAMURA; SAKAI; SWAMY (1992).

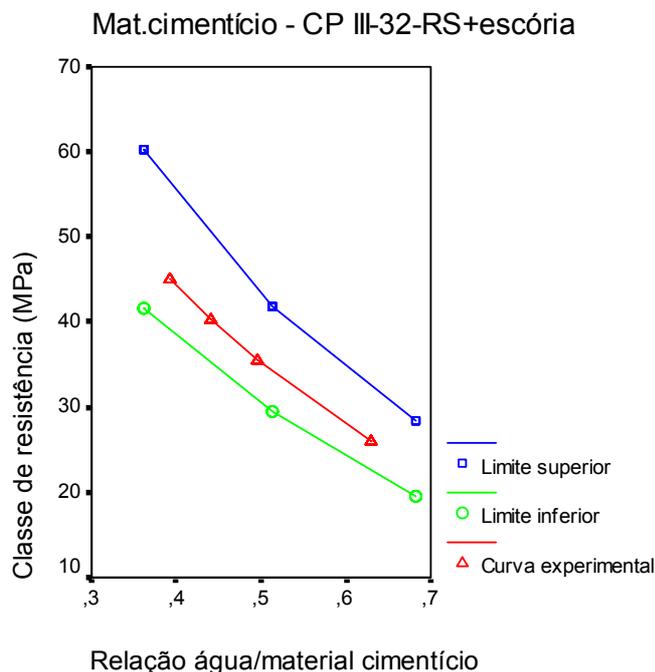
Na Figura 5. 7, Figura 5.8 e Figura 5. 9, são vistas as curvas típicas, lei de Abrams, que relacionam a resistência à compressão com a relação água/materiais cimentícios.



**Figura 5. 7: Curva experimental para o cimento CP II E–32.**



**Figura 5. 8: Curva experimental para o cimento CP III–32–RS.**



**Figura 5. 9: Curva experimental para a mistura de cimento CP III-32-RS e escória de alto-forno.**

Como se vê na Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9, foram delimitados os limites superior e inferior, estabelecidos a partir da curva obtida experimentalmente, para cada diagrama de dosagem e correspondentes a  $\pm 5\%$  dessa curva. Assim, observa-se que a curva experimental inserida nesses intervalos inferiores e superiores da curva padrão, correspondente a cada material cimentício, encaixam-se perfeitamente dentro desses intervalos. Esses resultados estão de acordo com o esperado na metodologia de HELENE; TERZIAN (1993). Com isso, as pesquisas prosseguiram, visando a avaliação da profundidade de carbonatação natural e acelerada.

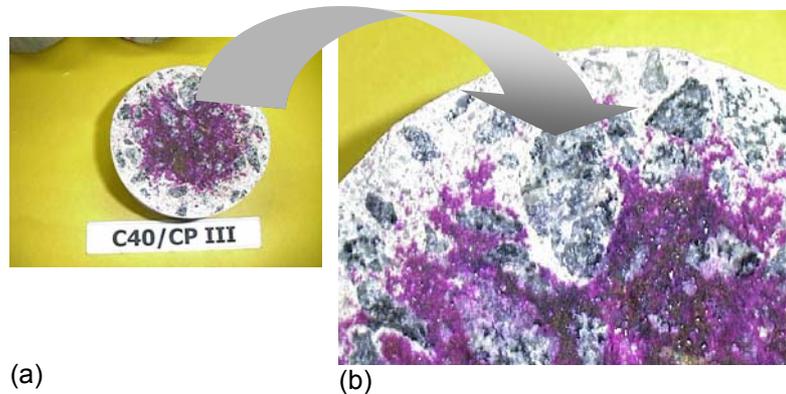
#### 5.4 Carbonatação

Nos ensaios de carbonatação, verificou-se a dificuldade de medir a profundidade de carbonatação, conforme já relatado por HELENE (1993), em função de, aos 28 dias de idade e mesmo aos 63 dias, a profundidade de carbonatação, em concentrações ambientais, constituir valores muito pequenos, cerca de décimos de milímetros.

Optou-se, então, medir a profundidade da carbonatação aos 63 dias de idade, considerando essa medida como medida inicial da profundidade de carbonatação acelerada.

Um outro aspecto observado, visualmente, foi a existência de avanços pontuais na profundidade de carbonatação, pela grande heterogeneidade do concreto e conforme já

indicado nas pesquisas de PARROT, (1994); NUNES (1998) e RIGO DA SILVA *et al* (2002), conforme vê-se na Figura 5. 10.



**Figura 5. 10: Detalhe da carbonatação próximo ao agregado; a) vista da seção transversal do corpo-de-prova, b) vista ampliada do mesmo corpo-de-prova.**

Na Figura 5. 10 vê-se que, na zona de transição ao redor do agregado, a frente de carbonatação avançou mais, em direção ao interior do concreto, caracterizando uma tendência, segundo NUNES (1998), de uma zona mais fraca com maior relação água/materiais cimentícios e, por isso, uma maior profundidade de carbonatação.

Os resultados da profundidade de carbonatação natural e acelerada (média e desvio padrão) para os concretos C20 encontram-se na Tabela 5.9; na Tabela 5.10 encontram-se os resultados da profundidade de carbonatação, natural e acelerada (média e desvio padrão), para os concretos C30, C35 e C40.

**Tabela 5. 9: Resultados de carbonatação natural e acelerada, média e desvio padrão, dos concreto C20 (n=72).**

Concreto	Relação a/mat cim.	fc <sub>28</sub> (MPa)	Idade (dias)	Carbonatação natural (mm)	Carbonatação acelerada (mm)	Permanência câmara (dias)
C20CPIIE	0,63	26,15	63	0,1(0)	0,1(0)	0
			77	0,3(0,17)	20,6(2,46)	14
			91	1,2(0,82)	31,6(4,9)	28
			365	7,9(1,20)	-	-
C20CPIII	0,75	26,41	63	0,1(0,1)	0,1(0,1)	0
			77	4,5(1,32)	33,0(6,92)	14
			91	4,9(1,01)	50,0(0)	28
			365	12,2(1,50)	-	-
C20CPIII+e	0,63	25,16	63	0,2(0,24)	0,2(0,24)	0
			77	4,9(1,16)	37,6(4,41)	14
			91	4,7(0,95)	50(0)	28
			365	11,6(1,38)	-	-

Tabela 5. 10: Resultados de carbonatação natural acelerada, média e desvio padrão, dos concretos C30, C35 e C40 (n=72)

Concreto	Relação a/mat cim.	fc <sub>28</sub> (MPa)	Idade (dias)	Carbonatação natural (mm)	Carbonatação acelerada (mm)	Permanência câmara (dias)
C30CPIIE	0,49	39,68	63	0,03(0,06)	0,03(0,06)	0
			77	0,4(0,58)	15,1(2,79)	14
			91	1,6(0,99)	17,5(3,16)	28
			365	6,5(0,95)	-	-
C30CPIII	0,61	36,84	63	0,1(0,09)	0,1(0,09)	0
			77	3,7(1,63)	21,9(3,59)	14
			91	4,3(0,84)	27,9(4,62)	28
			365	10,1(1,82)	-	-
C30CPIII+e	0,49	38,08	63	0,4(0,42)	0,4(0,42)	0
			77	4,2(1,65)	27,1(3,78)	14
			91	4,3(1,31)	42,3(6,22)	28
			365	9,2(1,45)	-	-
C35CPIIE	0,44	41,88	63	0,1(0,13)	0,1(0,13)	0
			77	0,4(0,30)	12,6(2,47)	14
			91	1,54(0,84)	13,6(2,17)	28
			365	6,0(0,68)	-	-
C35CPIII	0,56	40,01	63	0,5(0,56)	0,5(0,56)	0
			77	1,2(1,18)	15,6(1,69)	14
			91	3,9(1,02)	19,9(2,09)	28
			365	9,0(0,84)	-	-
C35CPIII+e	0,44	40,77	63	0,8(0,68)	0,8(0,68)	0
			77	0,7(0,59)	16,1(2,11)	14
			91	2,8(0,69)	18,1(2,14)	28
			365	8,8(0,84)	-	-
C40CPIIE	0,39	44,74	63	0,1(0,1)	0,1(0,1)	0
			77	0,3(0,70)	8,9(2,53)	14
			91	1,16(0,75)	11,4(2,59)	28
			365	4,8(1,37)	-	-
C40CPIII	0,52	43,38	63	0,4(0,37)	0,4(0,37)	0
			77	0,6(0,49)	13,5(2,71)	14
			91	2,5(0,85)	17,0(3,14)	28
			365	8,4(1,08)	-	-
C40CPIII+e	0,39	43,16	63	0,6(0,82)	0,6(0,82)	0
			77	1,3(0,84)	12,4(2,09)	14
			91	2,0(0,90)4	15,0(2,26)	28
			365	7,8(1,54)	-	-

### 5.4.1 Ensaios de carbonatação natural

Os resultados dos ensaios de carbonatação natural, nas condições controladas de laboratório e descritas nos itens 4.4.5 e 4.4.5.1 para cada classe de resistência, 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, estão descritos a seguir.

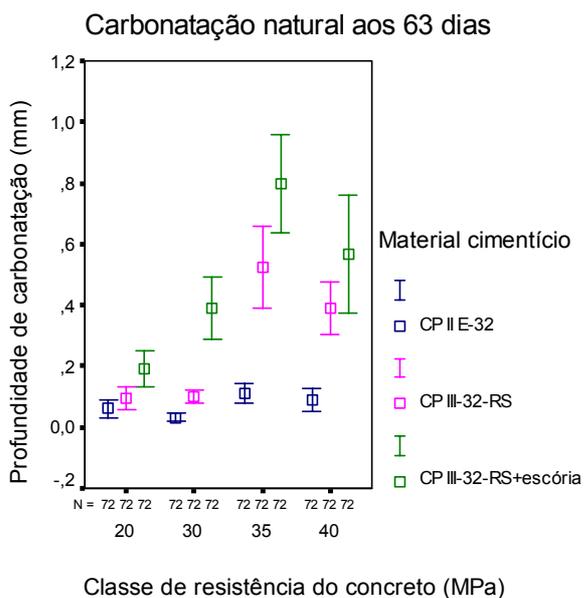
Os resultados da análise de variância Anova e teste a posteriori de Ducan para os fatores Idade e Materiais cimentícios dos concretos C20, C30, C35 e C40, encontram-se na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11: Resultados de Anova e teste a posteriori de Ducan para a variável profundidade de carbonatação natural, com fator de variação: material cimentício(n=72)**

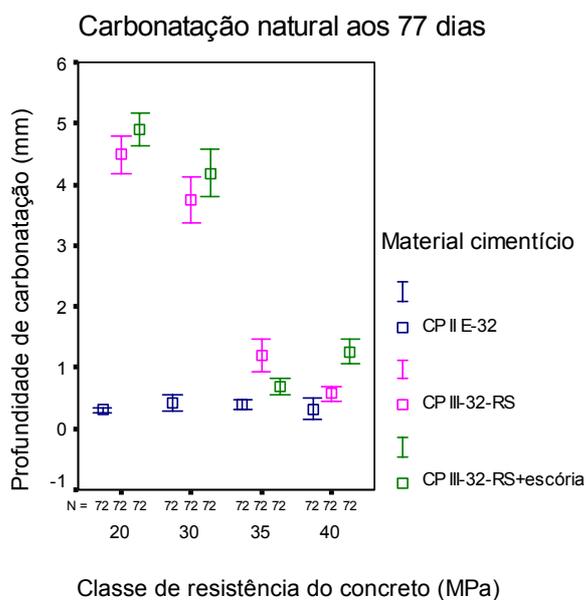
Classe do concreto	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas na profundidade de carbonatação para fator de variação-material cimentício
Concreto C20	63	10,406	0,000	Cresceu na ordem: C20CPIIE e (C20CPIII, C20CPIII+e).
	77	444,938	0,000	Cresceu nesta ordem : C20CPIIE, C20CPIII, C20CPIII+e
	91	362,515	0,000	Cresceu na ordem: C20CPIIE e (C20CPIII+e, C20CPIII).
	365	200,675	0,000	Cresceu nesta ordem: CPIIE, C20CPIII+e, C20CPIII.
Concreto C30	63	40,556	0,000	Cresceu nesta ordem (C30CPIIE, C30CPIII), C30CPIII+e.
	77	158,333	0,000	Cresceu na ordem: C30CPIIE, (C30CPIII, C30CPIII+e).
	91	162,189	0,000	
	365	117,676	0,000	Cresceu na ordem: C30CPIIE, C30CPIII+e, C30CPIII.
Concreto C35	63	31,715	0,000	Cresceu na ordem: C35CPIIE, C35CPIII, C35CPIII+e.
	77	19,459	0,000	Cresceu na ordem: C35CPIIE, C35CPIII+e, C35CPIII.
	91	136,745	0,000	
	365	124,297	0,000	Cresceu na ordem: C35CPIIE, (C35CPIII, C35CPIII+e).
Concreto C40	63	14,634	0,000	Cresceu na ordem: C40CPIIE, C40CPIII+e, C40CPIII.
	77	34,472	0,000	
	91	50,756	0,000	Cresceu na ordem: C40CPIIE, C40CPIII+e, C40CPIII.
	365	47,560	0,000	Cresceu na ordem: C40CPIIE, (C40CPIII, C40CPIII+e).

Os resultados são confirmados pelas pesquisas de THOMAS *et al* (1990); HÄKKINEN (1993); NAKAMOTO; TOGAWA (1995); NGALA; PAGE (1997), confirmando, de acordo com (MATALA, 1994), a tendência de diminuição das diferenças nas profundidades de carbonatação para menores relações água/materiais cimentícios e maiores resistências.

Na Figura 5.11 e na Figura 5.12, tem-se o desenvolvimento das profundidades de carbonatação, em todas as idades, para cada tipo de material cimentício empregado nas misturas de concreto.



(a)



(b)

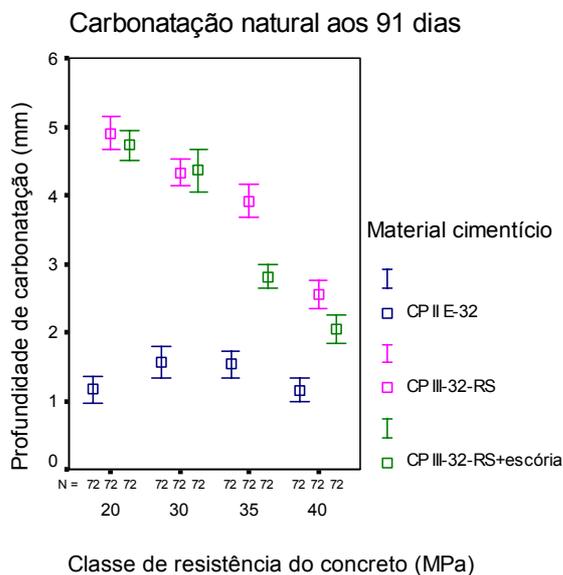
**Figura 5. 11: Carbonatação natural em função da classe de resistência do concreto: (a) aos 63 dias e (b) aos 77 dias.**

Constata-se, na Figura 5.11, que os resultados da carbonatação natural foram muito irregulares, com valores menores do que o nível de precisão para ensaios que utilizam a aspersão de fenolftaleína<sup>1</sup>. Assim, as variações podem ser consideradas como não-representativas.

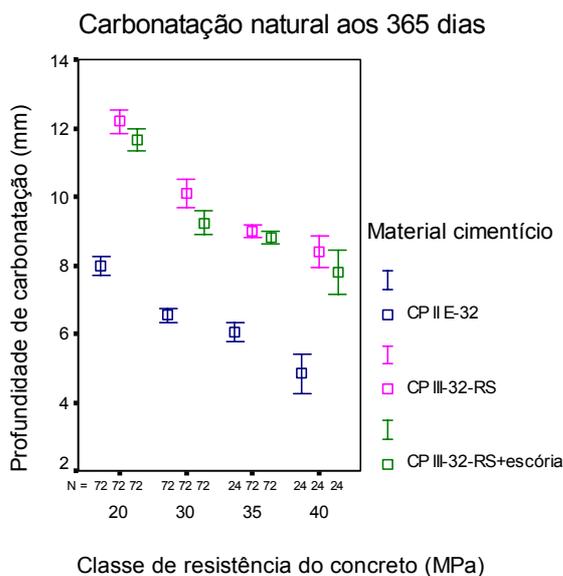
Além disso, deve-se considerar que os concretos das classes C20 e C30 foram submetidos a condições mais instáveis, atingindo a uma situação de equilíbrio do ambiente, somente a partir

<sup>1</sup> De acordo com KAZMIERCZAK; LINDENMEYER (1996), na ordem de 0,5 mm.

da terceira semana. Essa condição de instabilidade do ambiente pode ter contribuído para as profundidades de carbonatação muito baixas em relação às idades posteriores.



(a)



(b)

**Figura 5. 12: Carbonatação natural função da classe de resistência do concreto aos 91 dias; b) aos 365 dias.**

Na Figura 5.12, observa-se o crescimento da profundidade de carbonatação natural em função da idade de moldagem dos corpos-de-prova aos 91 dias e aos 365 dias de idade; na Figura 5.13 e na Figura 5.14, vêem-se os corpos-de-prova do concreto C20, carbonatados.

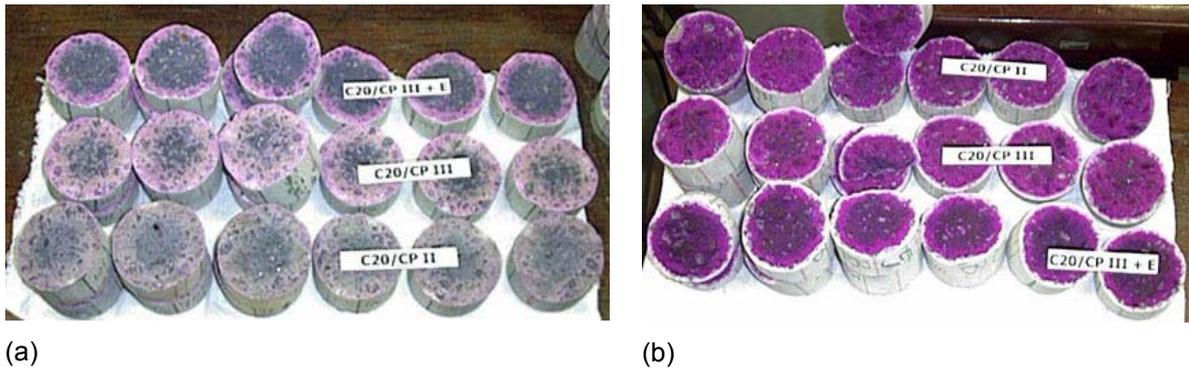


Figura 5. 13: Carbonatação natural C20: a) aos 63 dias; b) aos 77 dias.

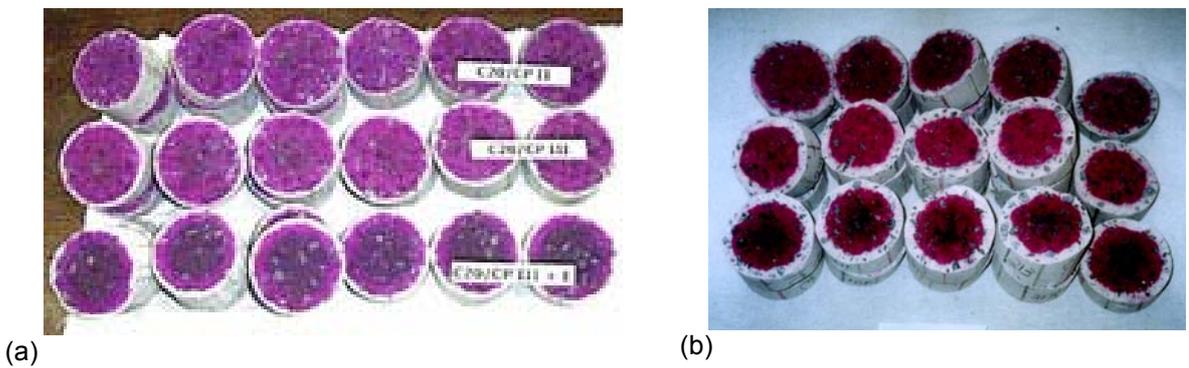


Figura 5. 14: Carbonatação do concreto C20 natural: a) aos 91 dias; b) aos 365 dias.

Na Figura 5.15 e Figura 5.16, observa-se o crescimento da profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição para o concreto C30.

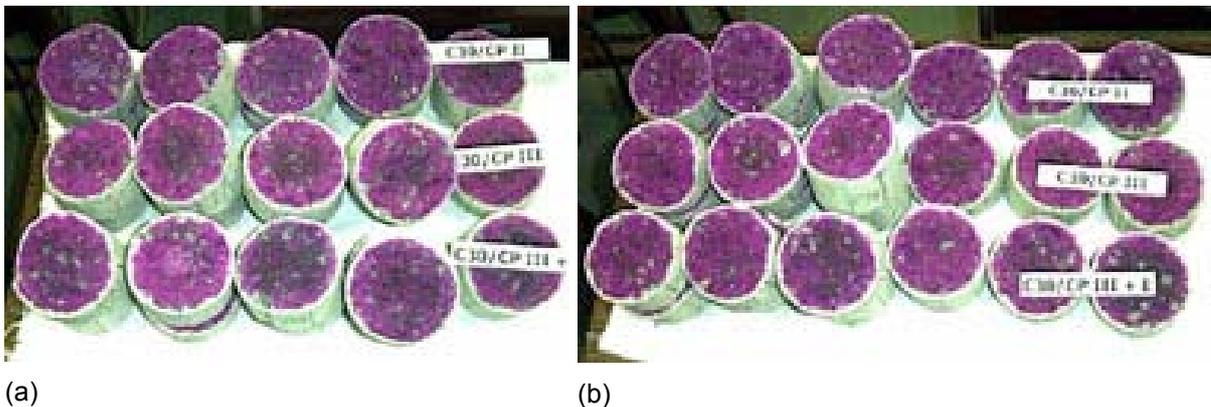


Figura 5. 15: Carbonatação natural C30: a) aos 77 dias; b) aos 91 dias.



Figura 5. 16: Carbonatação natural C30: aos 365 dias.

Na Figura 5.17 e Figura 5.18, observa-se o crescimento da profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição para os concretos C35.

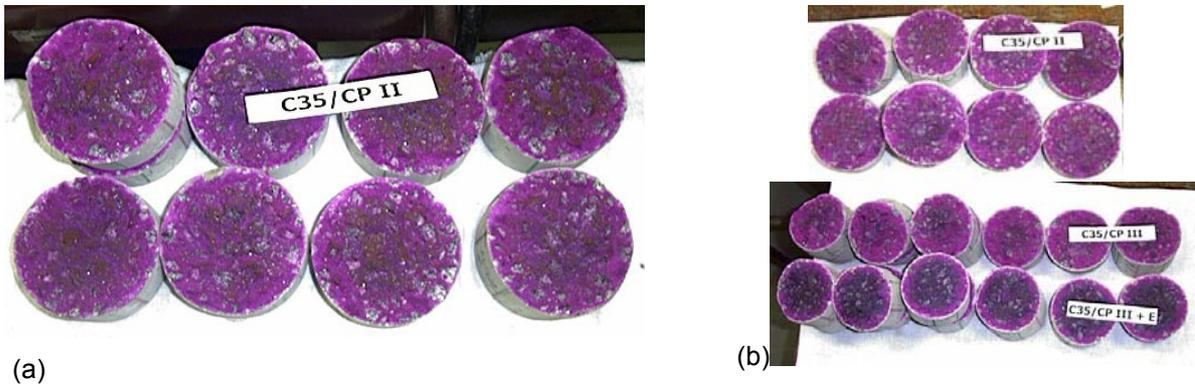


Figura 5. 17: Carbonatação natural C35: a) aos 63 dias; b) aos 77 dias.

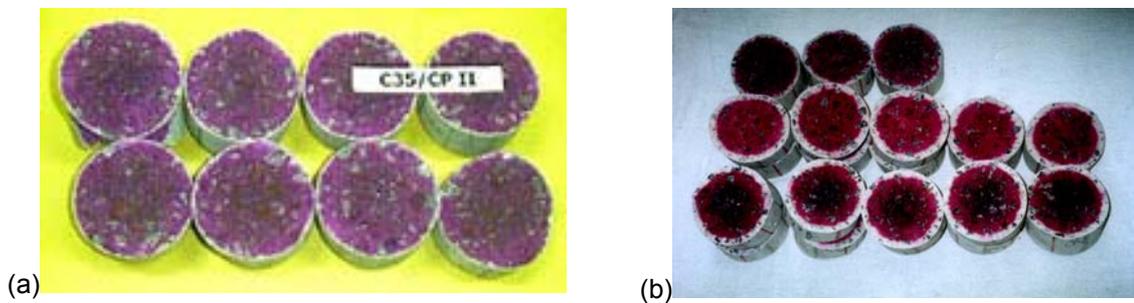


Figura 5. 18: Carbonatação do concreto C35 natural: a) aos 91 dias; b) aos 365 dias.

Na Figura 5.19 e Figura 5.20, observa-se o crescimento da profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição para os concretos C40.

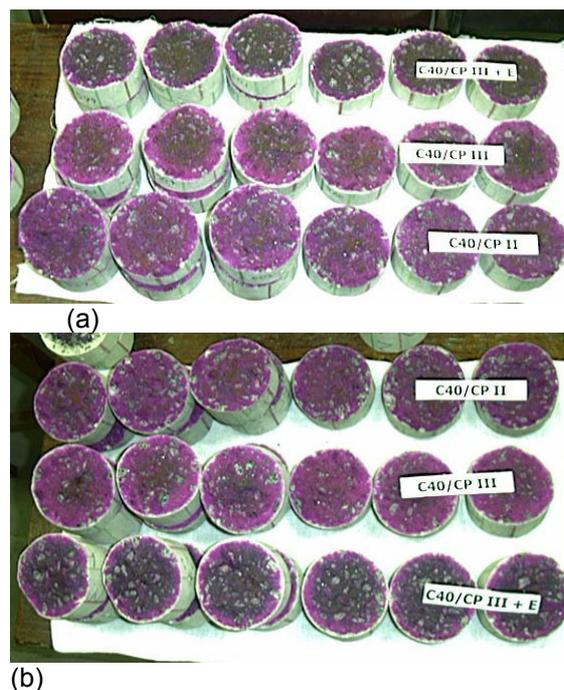
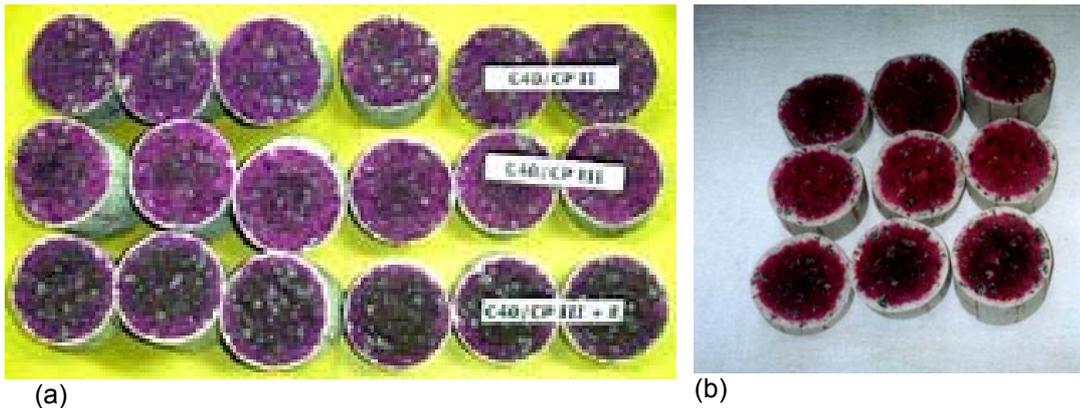


Figura 5. 19: Carbonatação natural C40: a) aos 63 dias; b) aos 77 dias.



**Figura 5. 20: Carbonatação do concreto C40 natural: (a) aos 91 dias; (b) aos 365 dias.**

Nos resultados de carbonatação natural, foi observado que nas idades de 63 dias e 77 dias, as medidas da profundidade de carbonatação foram valores muito pequenos, na ordem de décimos de milímetros, o que dificultou o ensaio. Na idade de 77 dias foram obtidas medidas algumas vezes superiores àquelas efetuadas aos 63 dias. Deve-se considerar, neste caso, o avanço lento da profundidade de carbonatação e, às vezes, pontuais, observados nas pesquisas de RIGO DA SILVA et al. (2002), além da heterogeneidade do concreto.

Para as misturas que utilizaram o cimento CP II E-32 como aglomerante, as medidas das profundidades de carbonatação foram menores, exceto para os concretos C20 e C30 cujas profundidades de carbonatação, aos 63 dias, não foram estatisticamente diferentes das misturas que utilizaram o cimento CP III -32- RS.

Observa-se ainda que, aos 91 dias, as profundidades de carbonatação dos concretos C20CP III e C30CP III foram estatisticamente similares às dos concretos C20CP III + escória e C30CP III + escória, respectivamente e, aos 365 dias, nas misturas C20/CP III + escória e C30CP III + escória, as medidas da profundidade de carbonatação foram menores do que as medidas dos concretos C20 e C30 utilizaram, como aglomerante, o cimento CP III-32-RS, C20CP III e C30CP III, nesta ordem.

A tendência de menor carbonatação das misturas com escória de alto-forno, substituindo parte do cimento, em 83%, também foi observada nos concretos C35 e C40 aos 365 dias de idade.

Quando se comparam as misturas com cimento CP II E-32 e a mistura de 50% de cimento CP III-32-RS e 50% de escória de alto-forno, em massa, verifica-se que os consumos de aglomerantes dessas misturas foram similares para uma mesma classe de resistência e também foram similares a relação água/material cimentício, tendo, entretanto, em relação ao mecanismo da carbonatação, pior desempenho. O mesmo não acontece nas misturas que

utilizaram o cimento CP III-32-RS como aglomerante, cujo consumo para uma mesma resistência foi menor, para uma a relação água/material cimentício maior.

Um outro aspecto da carbonatação natural foram os valores se situarem em patamares mais elevados, quando comparados às pesquisas de NUNES (1998) e COELHO (2002). Nestes casos, as condições de exposição foram em ambientes de laboratório, sem controle de umidade e temperatura. Atribui-se essa maior profundidade de carbonatação, nos resultados desta pesquisa, ao fato de terem sido estabelecidas condições em câmara seca, que em princípio favoreceram o mecanismo da carbonatação.

Assim sendo, com base nas pesquisas de AL-KHADIMI *et al.* (1996) e de VAGHETTI; ISAIA; GASTALDINI (2001), as condições iniciais do concreto contribuíram para que os resultados de carbonatação natural resultassem em patamares mais elevados, quando comparados com os resultados de NUNES (1998), comparando-se pela relação água/materiais cimentícios; e de COELHO (2002), comparando-se pelas resistências à compressão similares.

Por outro lado, os resultados da análise de variância Anova e teste *a posteriori* de Ducan para os fatores classe de resistência dos concretos produzidos com os materiais cimentícios CP II E-32, CP III-32-RS e a mistura de CP III-32-RS e escória granulada de alto-forno, encontram-se na Tabela 5.12.

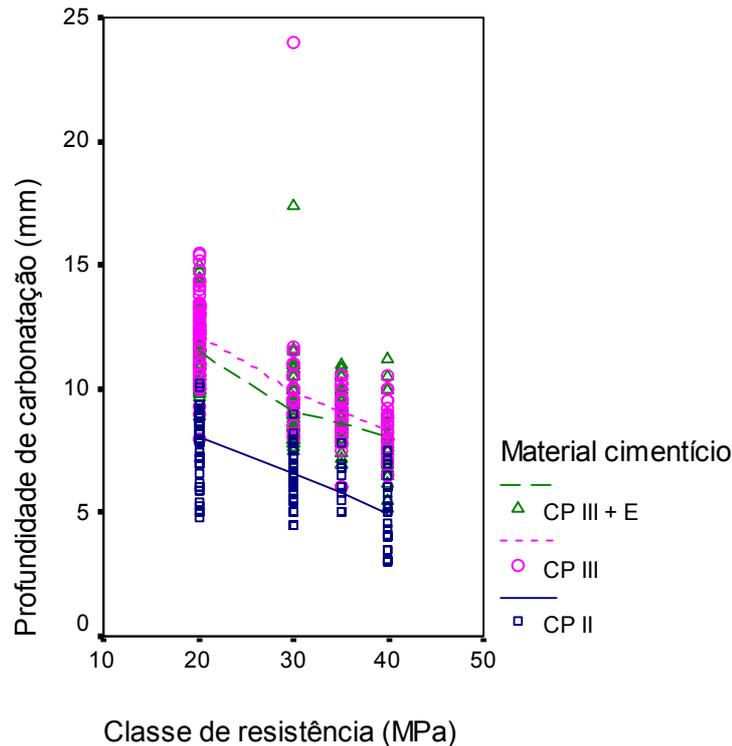
**Tabela 5.12: Resultados de Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a variável profundidade de carbonatação natural, com fator de variação: classe de resistência (n=72).**

Material cimentício	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas na profundidade de carbonatação para o fator de variação - a classe de resistência.
CP II E-32	63	5,652	0,010	Cresceu na ordem: (C30,C20)e (C40,C35).
	77	1,034	0,378	Não ocorreram
	91	4,810	0,030	Cresceu na ordem: (C40,C20)e (C35,C30).
	365	59,434	0,000	Cresceu nesta ordem: C40, C35, C30 e C20.
CP III-32-RS	63	236,777	0,000	Cresceu nesta ordem (C20,C30), C40, C35.
	77	172,605	0,000	Cresceu na ordem: C40, C35, C30 e C20.
	91	81,846	0,000	
	365	77,801	0,000	Cresceu na ordem: C40, (C35,C30), C20.
CP III-32-RS + escória	63	13,609	0,000	Cresceu na ordem: C20, (C30,C40),
	77	245,717	0,000	Cresceu na ordem: C35, C40, C30, C20.
	91	116,690	0,000	Cresceu na ordem: C40, (C35,C30), C20.
	365	86,989	0,000	Cresceu na ordem: C40, (C35,C30), C20.

Observa-se na Tabela 5.12, de acordo com as diversas pesquisas, PARROT (1992), NUNES (1998), HOUST; WITTMANN (2002), as maiores resistências proporcionaram menor

carbonatação, para cada um dos materiais cimentícios utilizados, independente de qual. Este resultado é devido, provavelmente, às menores relações água/cimento desses concretos e por isso uma menor porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Vale ressaltar, que essa tendência, foi observada para os maiores tempos de exposição.

Na Figura 5.21 observa-se no gráfico a tendência de carbonatação natural aos 365 dias de idade para todos os concretos dosados



**Figura 5. 21: Carbonatação natural em função da classe de resistência do concreto aos 365 dias.**

A tendência de comportamento dos concretos constantes dos resultados estatísticos da Tabela 5.11 e Tabela 5.12; uma diminuição das diferenças profundidades de carbonatação com o aumento da classe de resistência do concreto e a similaridade entre as profundidades de carbonatação das misturas com somente CP III-32-RS e com CP III-32-RS mais escória, também se observa na Figura 5.21.

Observa-se ainda na Figura 5.21, que as profundidades de carbonatação das misturas com CP II E-32 são sempre menores do que as misturas com CP III-32-RS.

### 5.4.2 Ensaios de carbonatação acelerada

Os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada, nas condições estabelecidas nos itens 4.4.3 e 4.4.3.2 e para cada concreto C20, C30, C35 e C40, estão descritos a seguir na Tabela 5.13.

**Tabela 5.13: Resultados de Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a variável profundidade de carbonatação acelerada com fator de variação: material cimentício(n=72).**

Classe de resistência	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas na profundidade de carbonatação para o fator de variação, o material cimentício.
Concreto C20	77	227,022	0,000	Cresceu nesta ordem : C20CPIIE, C20CPIII, C20CPIII+e.
	91	777,740	0,000	Cresceu nesta ordem: C20CPIIE, (C20CPIII, C20CPIII+e).
Concreto C30	77	221,148	0,000	Cresceu nesta ordem : C30CPIIE, C30CPIII, C30CPIII+e.
	91	476,565	0,000	
Concreto C35	77	56,646	0,000	Cresceu na ordem: C35CPIIE, (C35CPIII, C35CPIII+e).
	91	162,244	0,000	Cresceu na ordem: C35CPIIE, C35CPIII+e, C35CPIII.
Concreto C40	77	68,132	0,000	Cresceu na ordem: C40CPIIE, C40CPIII+e, C40CPIII.
	91	79,256	0,000	Cresceu na ordem: C40CPIIE, C40CPIII+e, C40CPIII.

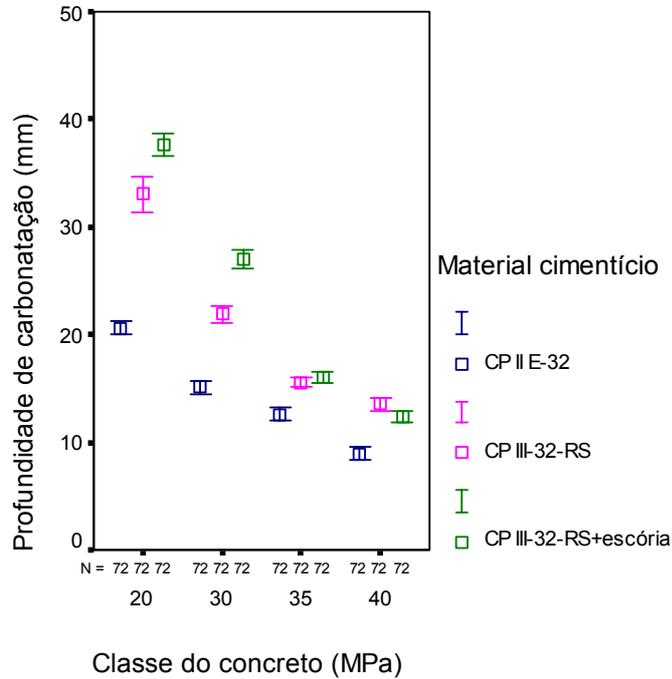
Com base ns resultados da análise de variância (Anova) e teste *a posteriori* de Ducan, constantes na Tabela 5.13, verifica-se que as profundidades de carbonatação de acordo com o **material cimentício** empregado foram estatisticamente diferentes, sendo crescente com o teor de escória da mistura, o que é visível principalmente para os concretos C20 e C30.

Observa-se, também, a diminuição das diferenças entre a carbonatação dos concretos com o cimento CP II E-32 e CP III-32-RS. Nos concretos C35 e C40, a substituição de parte do cimento CP III-32-RS por escória granulada de alto-forno, em 50% em massa do total do material cimentício, proporcionou menor carbonatação se comparada àquelas misturas com somente CP III-32-RS.

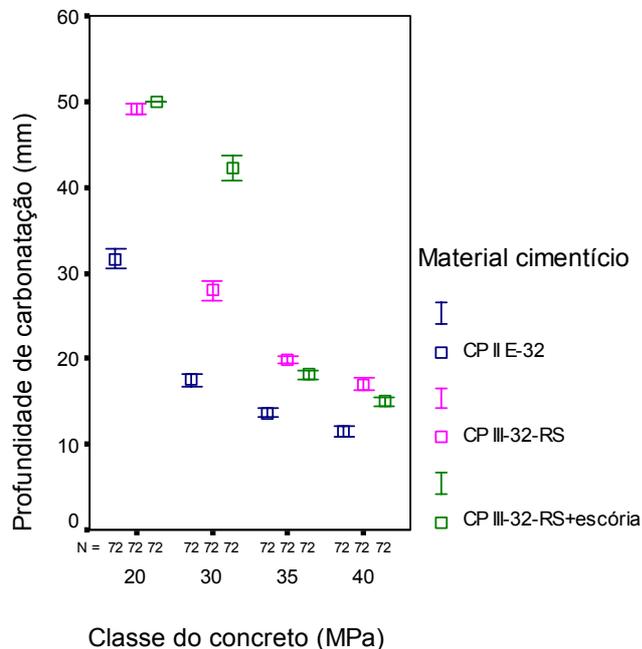
Estes resultados confirmam as mesmas tendências de diminuição das diferenças nas profundidades de carbonatação para menores relações água/materiais cimentícios e maiores resistências, de acordo com as pesquisas de MATALA (1994).

Na Figura 5.22 tem-se o desenvolvimento das profundidades de carbonatação acelerada, nas duas idades, para cada tipo de material cimentício empregado nas misturas de concreto. Observa-se então que, para as idades de 77 e 91 dias, correspondentes ao tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> igual a 2 e 4 semanas, as profundidades de carbonatação dos concretos com adição de escória se apresentaram superiores às dos concretos com cimento CP II E-32, quando se

comparam os concretos com resistências semelhantes. Estes resultados estão de acordo com as pesquisas de HÄKKINEN (1993) e MATALA (1994).



(a)



(b)

**Figura 5. 22: Carbonatação acelerada em função da classe de resistência do concreto: (a) aos 77 dias; (b) , aos 91 dias.**

Verifica-se, nos resultados da carbonatação do **concreto C20**, submetido às mesmas condições de ensaio acelerado, que houve diferenças estatísticas significativas em função do

material cimentício empregado, sendo crescente com o teor de escória de alto-forno e com o tempo de exposição.

Na Figura 5.23, observa-se o crescimento da profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>, em câmara de carbonatação.

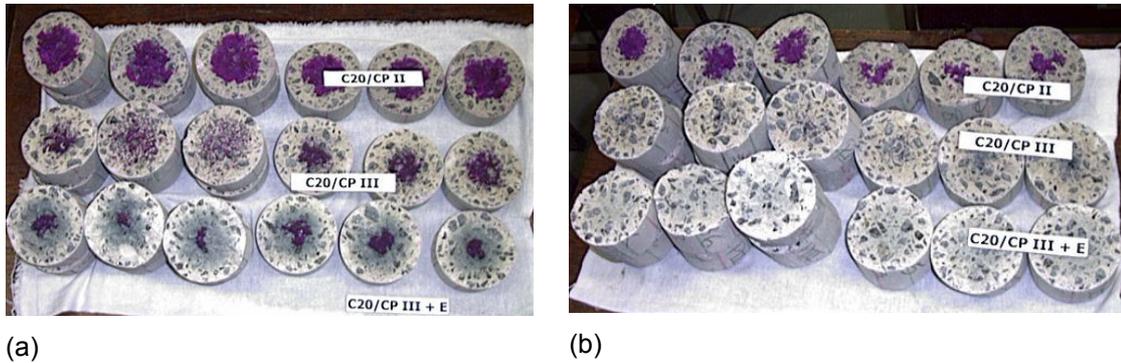


Figura 5. 23: Carbonatação acelerada C20: (a) aos 77 dias; (b) aos 91 dias.

A profundidade de carbonatação do **concreto C30**, como se observa na Figura 5.24, teve diferenças estatísticas significativas quando submetido às mesmas condições de ensaio para os diferentes materiais cimentícios empregados, crescendo em função do maior teor de escória de alto-forno e com o tempo.

Na Figura 5.24, observa-se o crescimento da profundidade de carbonatação em função da idade de moldagem dos corpos-de-prova e do tempo de exposição em câmara de carbonatação.

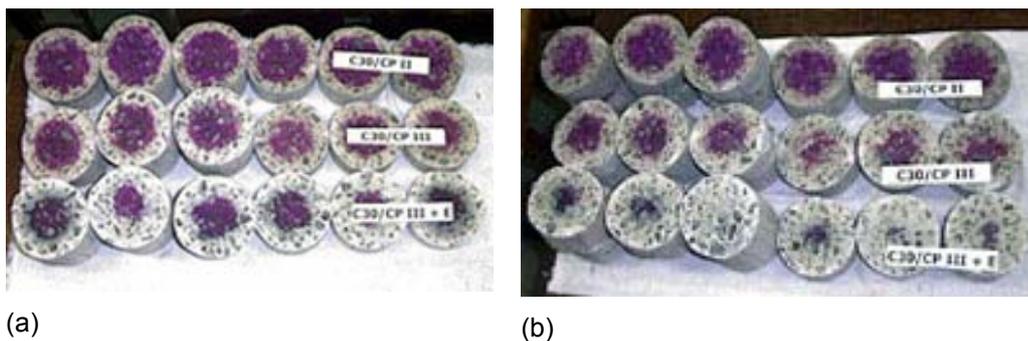
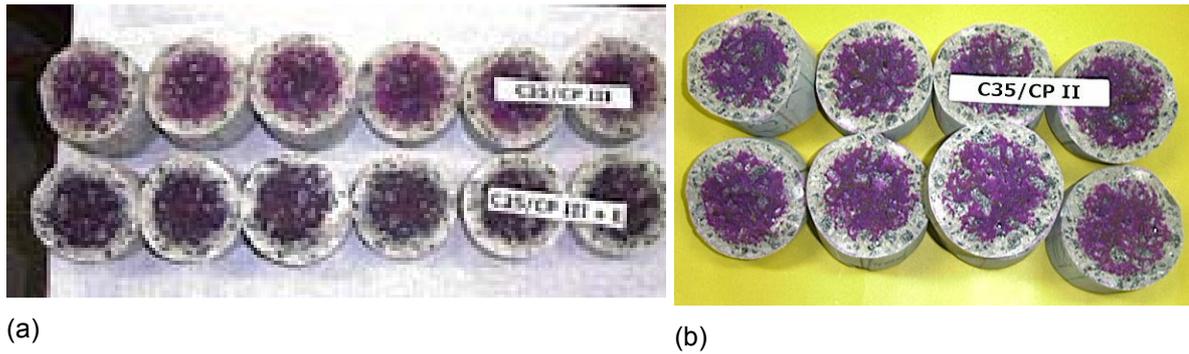


Figura 5. 24: Carbonatação acelerada C30: (a) aos 77 dias; (b) aos 91 dias.

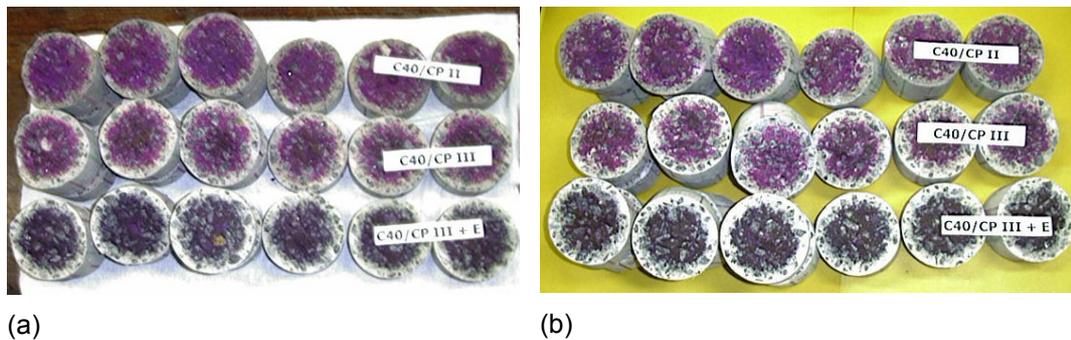
A profundidade de carbonatação do **concreto C35**, como se observa na Figura 5.25, tiveram diferenças estatísticas significativas, quando submetido às mesmas condições de ensaio para os diferentes materiais cimentícios empregados, crescendo com o tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>.

Na Figura 5.25, observa-se o crescimento da profundidade de carbonatação em função da idade de moldagem dos corpos-de-prova e do tempo de exposição em câmara de carbonatação.



**Figura 5. 25: Carbonatação acelerada C35: a) aos 77 dias; b) aos 91 dias.**

A profundidade de carbonatação do **concreto C40**, como se observa na Figura 5.26, teve diferenças estatísticas significativas quando submetido às mesmas condições de ensaio para os diferentes materiais cimentícios empregados, crescendo em função do maior teor de escória de alto-forno e com a idade.



**Figura 5. 26: Carbonatação acelerada C40: (a) aos 77 dias; (b) aos 91 dias.**

Os resultados de carbonatação acelerada foram crescentes com o teor de escória de alto-forno para os concretos C20 e C30; para os concretos C35 e C40 foi observada a mesma tendência de menor carbonatação para as misturas com cimento CP II E-32.

Nos resultados das profundidades de carbonatação acelerada, similares à carbonatação natural, observou-se que estes foram menores para as misturas C35CP III + escória e C40CP III + escória, quando comparadas às misturas com cimento, C35CP III e C40CP III, respectivamente.

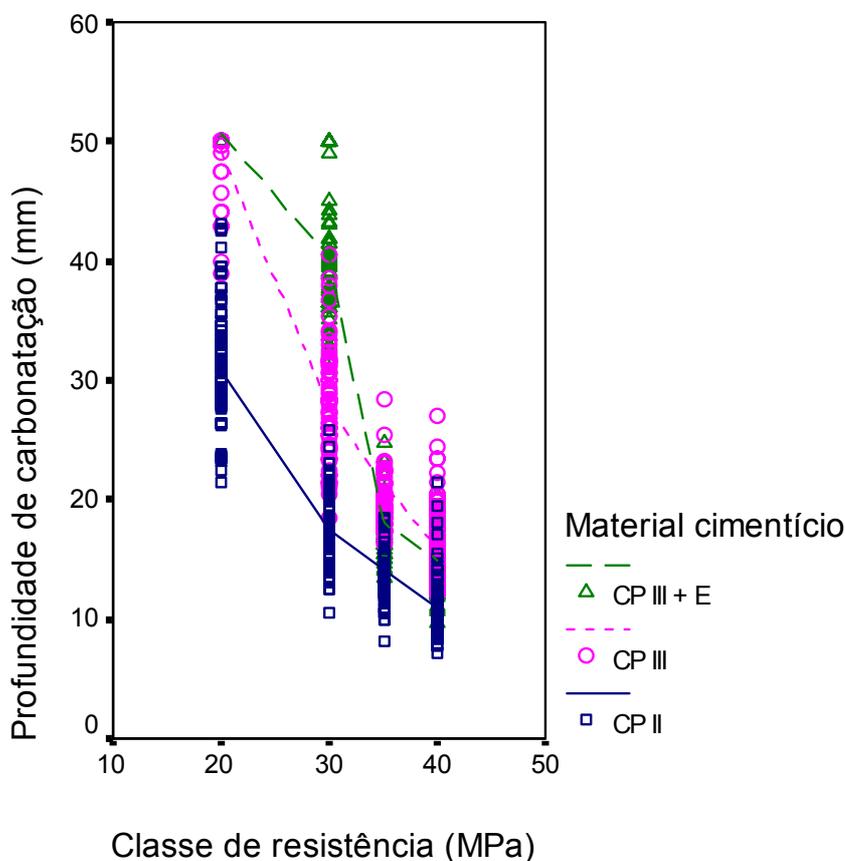
Uma outra observação, nos resultados da carbonatação acelerada, foi a similaridade com os resultados de AL-KADHIMI (1996), carbonatando completamente para os concretos C20CP III, C30CP III, C20CP III + escória e C30CP III + escória. Atribui-se às diferenças de resultados para os outros concretos, C35 e C40, à necessidade de um tempo maior de permanência em ambiente acelerado, além do não utilização de pressão no interior da câmara de carbonatação, pressão essa que contribui para aumentar a velocidade de penetração do CO<sub>2</sub> no concreto.

Por outro lado, os resultados da análise de variância (Anova) e teste *a posteriori* de Ducan para os fatores tempo e classe de resistência dos concretos encontram-se na Tabela 5.14.

**Tabela 5.14: Resultados de Anova e teste *a posteriori* de Ducan para a variável profundidade de carbonatação acelerada, concreto com fator de variação: classe de resistência (n=72).**

Material cimentício	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas na profundidade de carbonatação para o fator de variação a classe de resistência
CP II E-32	77	1,034	0,378	Cresceu na ordem: C40, C35, C30, C20.
	91	4,810	0,030	
CP III-32-RS	77	172,605	0,000	Cresceu na ordem: C40, C35, C30, C20.
	91	81,846	0,000	
CP III-32-RS + escória	77	245,717	0,000	Cresceu na ordem: C40, C35, C30, C20.
	91	116,690	0,000	

Observa-se nos resultados da Tabela 5.14 a mesma tendência observada na carbonatação natural, para as medidas das profundidades de carbonatação aos 365 dias, sendo menores, para as maiores resistências, para cada um dos materiais cimentícios utilizados, independente de qual; e similar aos resultados acelerados obtidos por COELHO (2002).



**Figura 5. 27: Carbonatação acelerada em função da classe de resistência do concreto aos 91 dias.**

A tendência de comportamento dos concretos constantes dos resultados estatísticos da Tabela 5.13 e Tabela 5.14; da mesma forma que na carbonatação natural, uma diminuição das diferenças profundidades de carbonatação com o aumento da classe de resistência do concreto e a similaridade entre as profundidades de carbonatação das misturas com somente CP III-32-RS e com CP III-32-RS mais escória, também se observa na Figura 5.27.

Observa-se ainda na Figura 5.27, que as profundidades de carbonatação das misturas com CP II E-32 são sempre menores do que as misturas com CP III-32-RS, embora neste caso, com diferenças de profundidade menos acentuada.

### 5.4.3 Previsão da profundidade de carbonatação

Para a previsão da profundidade de carbonatação, com base no modelo clássico que estabelece ser a profundidade de carbonatação proporcional a raiz quadrada do tempo, tem-se na Tabela 5.15, os modelos para o desenvolvimento da carbonatação dos concretos em estudo.

**Tabela 5. 15: Modelo clássico para a carbonatação natural e acelerada.**

Material cimentício	Classe de resistência (MPa)	Água/mat. Cim.	Modelo teórico $x = k_{CO_2} \sqrt{t}$ *					
			natural			acelerado		
			Modelo	R <sup>2</sup>	Erro padrão	Modelo	R <sup>2</sup>	Erro padrão
CPII	20	0,63	$x=1,0391 \sqrt{t}$	0,8974	0,0165	$x=15,4119 \sqrt{t}$	0,9414	0,157
	30	0,48	$x=0,8762 \sqrt{t}$	0,8991	0,0133	$x=9,4056 \sqrt{t}$	0,8866	0,131
	35	0,44	$x=0,7778 \sqrt{t}$	0,8564	0,0166	$x=7,5173 \sqrt{t}$	0,8669	0,113
	40	0,39	$x=0,6173 \sqrt{t}$	0,7408	0,0191	$x=5,9208 \sqrt{t}$	0,8397	0,102
CPIII	20	0,75	$x=1,7933 \sqrt{t}$	0,8614	0,0258	$x=24,1588 \sqrt{t}$	0,9579	0,206
	30	0,62	$x=1,4957 \sqrt{t}$	0,8005	0,0263	$x=14,4602 \sqrt{t}$	0,9199	0,169
	35	0,57	$x=1,2819 \sqrt{t}$	0,8751	0,0189	$x=10,2932 \sqrt{t}$	0,9565	0,084
	40	0,52	$x=1,1156 \sqrt{t}$	0,8610	0,0222	$x=8,8624 \sqrt{t}$	0,8901	0,1206
CPIIIIE	20	0,63	$x=1,7309 \sqrt{t}$	0,8228	0,0275	$x=25,5369 \sqrt{t}$	0,9833	0,132
	30	0,49	$x=1,3996 \sqrt{t}$	0,6780	0,0298	$x=20,4859 \sqrt{t}$	0,9390	0,212
	35	0,44	$x=1,2087 \sqrt{t}$	0,9155	0,0152	$x=9,8249 \sqrt{t}$	0,9091	0,1151
	40	0,39	$x=1,0550 \sqrt{t}$	0,8003	0,0244	$x=7,9315 \sqrt{t}$	0,9030	0,098

\* x- profundidade de carbonatação (mm),  $K_{CO_2}$  – coeficiente de carbonatação (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ ), e t – tempo de exposição (semanas).

Nos modelos estabelecidos na Tabela 5.15, observa-se que, nas condições deste estudo, somente o concreto C40CPIIE atenderia às condições de durabilidade de uma vida útil mínima de 50 anos porque, nos demais concretos, a frente de carbonatação alcançaria a armadura em um período de tempo menor do esse de 50 anos.

Inicialmente, na análise destes resultados, deve-se considerar que em ambientes internos e protegidos dos ciclos de molhagem e secagem, de acordo com as diversas pesquisas consultadas: LITVAN; MEYER (1986), RICHARDSON (1988), e STEFFENS; DINKLER, AHRENS (2002), a profundidade de carbonatação do concreto é cerca de 1,69 a 3 (três) vezes maior do que em ambientes externos. Por outro lado, AL-KADHIMI *et al* (1986), ISAIA; VAGHETTI; GASTALDINI (2001) ressaltam a importância da umidade interna, que não pode ser avaliada com base na umidade relativa do ambiente, devido à sua constante variação (AL-KADHIMI *et al*, 1986; ANDRADE; SARRIA; ALONSO, 1999).

Assim sendo, nos ensaios de carbonatação natural no ambiente controlado de laboratório deste projeto experimental, com cerca de 50% para a umidade relativa e temperatura variando na faixa de 21°C a 27°C, foram estabelecidas condições que favoreceram o mecanismo da carbonatação.

Nesse sentido, esperavam-se medidas das profundidades de carbonatação que superassem àquelas em condições reais de serviço do concreto. Como exemplo, podem-se citar as pesquisas de LITVAN; MEYER (1986), nas quais as medidas das profundidades de carbonatação em ambientes internos protegidos de chuvas e sem controle de temperatura e pressão, para um concreto com escória de alto-forno de resistência à compressão aos 28 (vinte e oito) dias igual 32 MPa, resultaram em 22 (vinte e dois) mm, depois de 20 anos de exposição. Esses pesquisadores relatam uma carbonatação quase linear ao longo do período pesquisado, além do aumento da porosidade do concreto com escória de alto-forno após a carbonatação.

Dois outros modelos, diferente do anterior, que representassem a profundidade de carbonatação em função da classe de resistência do concreto, um de acordo com a equação 2.22, equação 2.23 e o outro de acordo com as equações 2.18 e 2.19, também foram estabelecidos e encontram-se respectivamente, na Tabela 5.16 e Tabela 5.17, para o desenvolvimento da carbonatação, nas condições natural e acelerada.

**Tabela 5. 16: Modelos de ajustes da profundidade de carbonatação natural em função da classe do concreto.**

Material cimentício	Modelo ( $y = k_1 x^{k_2} \sqrt{t}$ ) <sup>*</sup>	R <sup>2</sup>	Erro padrão p/ os coeficientes k1 e k2	Classe de resistência (MPa)	Água/mat. cimentício	Modelo
Carbonatação natural						
CPII	$y = 5,992x^{-0,58} \sqrt{t} *$	0,8831	K <sub>1</sub> = 0,6923 K <sub>2</sub> = 0,0355	20	0,63	$1,05397 \sqrt{t}$
				30	0,48	$0,833 \sqrt{t}$
				35	0,44	$0,7562 \sqrt{t}$
				40	0,39	$0,705 \sqrt{t}$
CPIII	$y = 10,8179x^{-0,596} \sqrt{t} *$	0,8615	K <sub>1</sub> = 1,1027 K <sub>2</sub> = 0,0396	20	0,75	$1,814 \sqrt{t}$
				30	0,62	$1,4248 \sqrt{t}$
				35	0,57	$1,2998 \sqrt{t}$
				40	0,52	$1,2003 \sqrt{t}$
CPIIIIE	$y = 11,8713x^{-0,639} \sqrt{t} *$	0,8290	K <sub>1</sub> = 1,3289 K <sub>2</sub> = 0,03406	20	0,63	$1,7504 \sqrt{t}$
				30	0,49	$1,3508 \sqrt{t}$
				35	0,44	$1,2241 \sqrt{t}$
				40	0,39	$1,1240 \sqrt{t}$
Carbonatação acelerada						
CPII	$y = 784,5220x^{-1,31} \sqrt{t}$	0,9251	K <sub>1</sub> = 59,797 K <sub>2</sub> = 0,0236	20	0,63	$15,497 \sqrt{t}$
				30	0,48	$9,111 \sqrt{t}$
				35	0,44	$7,445 \sqrt{t}$
				40	0,39	$6,250 \sqrt{t}$
CPIII	$y = 1.768,0702x^{-1,431} \sqrt{t}$	0,9527	K <sub>1</sub> = 108,843 K <sub>2</sub> = 0,0191	20	0,75	$24,3066 \sqrt{t}$
				30	0,62	$13,6062 \sqrt{t}$
				35	0,57	$10,9128 \sqrt{t}$
				40	0,52	$9,0147 \sqrt{t}$
CPIIIIE	$y = 1.672,8944x^{-1,382} \sqrt{t}$	0,8975	K <sub>1</sub> = 154,612 K <sub>2</sub> = 0,0287	20	0,63	$26,6345 \sqrt{t}$
				30	0,49	$15,2085 \sqrt{t}$
				35	0,44	$12,2904 \sqrt{t}$
				40	0,39	$10,2193 \sqrt{t}$

y = profundidade de Carbonatação (mm); x = resistência aos 28 dias (MPa) e t = tempo de exposição (semanas)

**Tabela 5.17: Modelos ajustes da prof. carbonatação em função da classe do concreto.**

Idade	Material cimentício	Modelo ( $y = k_1 e^{k_2 \cdot x}$ )*	R <sup>2</sup>	F	p-valor
Carbonatação natural 365 dias	CP II E-32	$Lny = 12,714 - 0,0232x$ *	0,457	159,59	0
	CP III-32-RS	$Lny = 17,8419 - 0,0195x$ *	0,553	29461	0
	CP III-32-RS+e	$Lny = 16,9711 - 0,0196x$ *	0,521	258,73	0
Carbonatação acelerada 91 dias	CP II E-32	$Lny = 86,098 - 0,0521x$ *	0,82	1.304,73	0
	CP III-32-RS	$Lny = 145,42 - 0,0553x$ *	0,895	2.425,64	0
	CP III-32-RS+e	$Lny = 208,827 - 0,065x$ *	0,804	1.174,12	0

\*y = profundidade de Carbonatação (mm); x = resistência aos 28 dias (MPa)

O modelo da Tabela 5.17, que representa a profundidade de carbonatação em função da resistência, é válido para uma determinada classe de resistência e um tempo específico, equivalente neste estudo a um ano. É necessário conhecer-se a resistência à compressão nessa idade ou ambos, a profundidade de carbonatação e a classe de resistência, e não tem muita utilidade prática.

Verifica-se, nos dois modelos apresentados na Tabela 5. 15 e

Tabela 5. 16, que todos os modelos acelerados sempre resultaram em uma maior significância, porém, quando comparados entre si, o modelo que considera a profundidade de carbonatação, além da resistência, como função do tempo, na Tabela 5. 15, tem sua variação dos dados melhor explicada.

As profundidades de carbonatação segundo os modelos apresentados na Tabela 5.15 e Tabela 5.16, para um ano de moldagem dos corpos-de-prova na carbonatação natural e 04 (quatro) semanas de exposição na carbonatação acelerada, encontram-se na Tabela 5.18.

**Tabela 5. 18: Estimativa da profundidade de carbonatação a partir dos modelos.**

Material cimentício	Classe de resistência (MPa)	Água/mat. cimentício	Modelo clássico(tabela 5.15)		Modelo (tabela 5.16)	
			Profundidade de carbonatação estimada pelo modelo (mm)			
			natural	acelerado	natural	acelerado
CP II E-32	20	0,63	6,82	30,82	6,92	30,99
	30	0,48	5,75	18,8	5,47	18,22
	35	0,44	5,10	15,03	4,96	14,89
	40	0,39	4,05	11,84	4,63	12,5
CP III-32-RS	20	0,75	11,77	48,31	11,91	48,6
	30	0,62	9,82	28,92	9,35	27,2
	35	0,57	8,41	20,58	8,53	21,82
	40	0,52	7,33	17,72	7,88	18,02
CP III-32-RS + escória	20	0,63	11,63	51,06	11,91	53,26
	30	0,49	9,19	40,96	11,49	30,4
	35	0,44	7,93	19,64	8,04	24,58
	40	0,39	6,92	15,86	7,38	20,42

Verifica-se que para as classes de resistência estudadas, 20 MPa a 40 MPa, apesar de ter havido uma tendência de aproximação das medidas da profundidade de carbonatação natural nas idades maiores, e na carbonatação acelerada depois de quatro semanas em ambiente acelerado, essas medidas permaneceram estatisticamente diferentes, sempre menor quando se utilizou como aglomerante o cimento CP II E-32, porém, similares, nas classes de resistência C35 e C40, sem diferenças estatísticas significativas, para os concretos com o cimento CP III-32-RS, e com a mistura CP III-32-RS mais escória granulada de alto-forno.

Isto poderia caracterizar, também, de acordo com as diversas pesquisas de LITVAN; MEYER (1986), MATALA (1994), SIEDLER; DAL MOLIN (2002) e ISAIA *et al.* (2003), ser a profundidade de carbonatação dependente da microestrutura do concreto.

Além disso, observa-se no Quadro 5.4 e Figura 5.28, que o menor consumo de cimento do concreto com CP III-32-RS mais escória granulada de alto-forno e a maior relação água/materiais cimentícios das misturas com cimento CP III-32-RS proporcionaram profundidades de carbonatação similares.

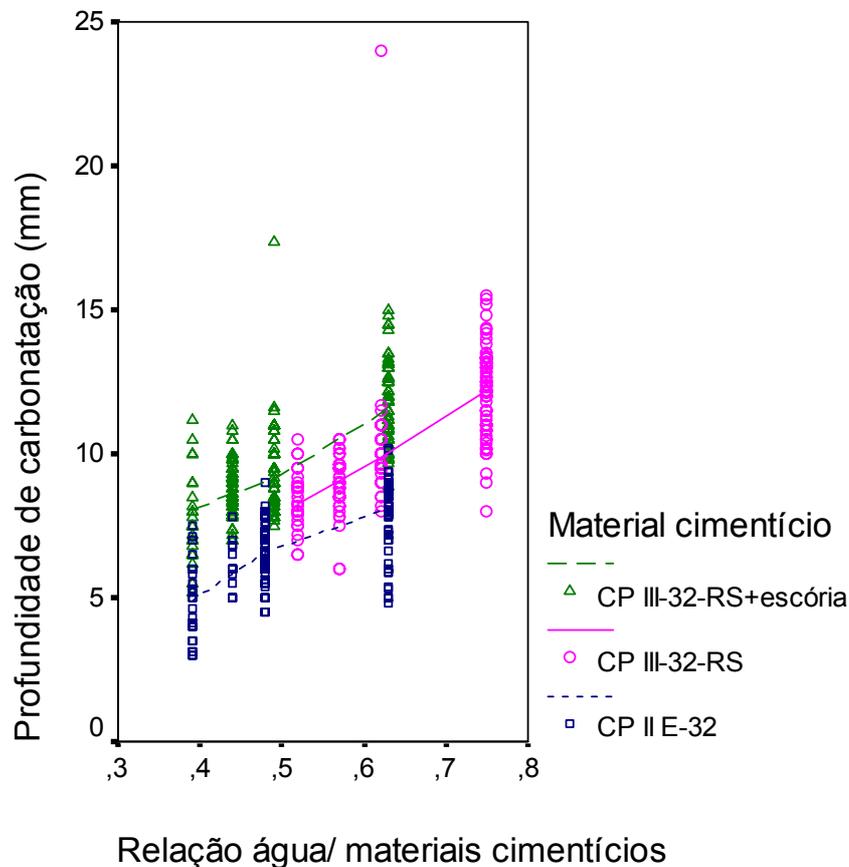
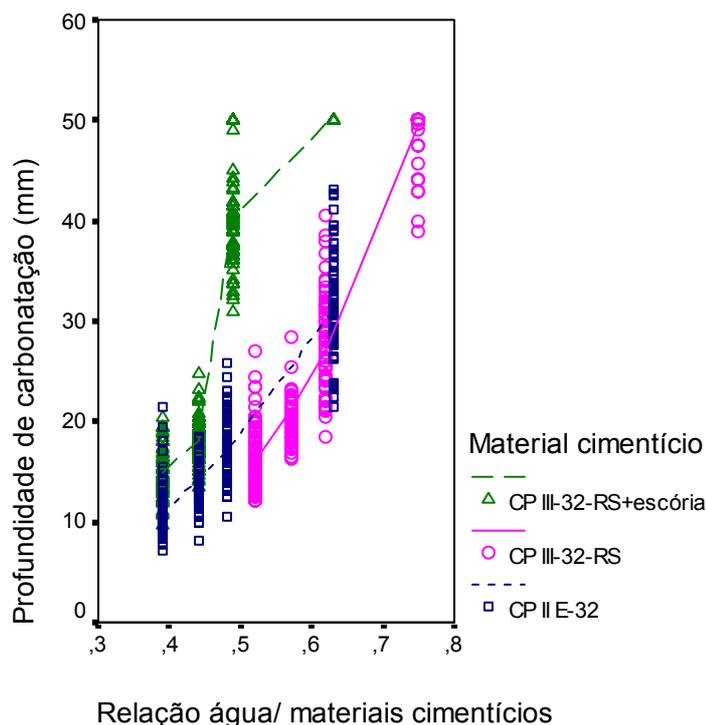


Figura 5. 28: Desenvolvimento da profundidade de carbonatação natural aos 365 dias, em função da relação água/material cimentício.



**Figura 5. 29: Desenvolvimento da profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias, em função da relação água/material cimentício.**

Na Figura 5.28 e na Figura 5.29, observa-se que, para um concreto com uma mesma relação água materiais cimentícios, as propriedades do cimento CP III-32- RS como a maior finura e a maior resistência à compressão, aos 28 dias de idade, quando comparadas com as do cimento CP II E-32 e à mistura de 50% de cimento CP III-32- RS e 50% de escória de alto-forno em massa, influíram nos resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto e de profundidade de carbonatação.

As misturas com o cimento CP II E-32 necessitaram um consumo de cimento mais elevado, para ser atingida a mesma resistência das misturas que utilizaram o cimento CP III-32-RS, podendo ser aumentada a relação água/material cimentício para uma dada resistência.

Assim, houve uma maior tendência de profundidade de carbonatação do concreto com escória, para uma mesma relação água material cimentício e mesma resistência, quando comparado com as misturas com o cimento CP II E-32. Neste caso, pode ter prevalecido a maior alcalinidade proporcionada por esse cimento, conforme resultados da análise química nos quadros 4.1 e 4.3. Essa maior alcalinidade do cimento CP II E-32, também pode ter prevalecido, quando se compara uma mesma relação água/materiais cimentícios e uma maior resistência do concreto com cimento CP III-32-RS, na maior carbonatação do concreto com esse cimento.

Por outro lado, observa-se na Figura 5.29 que as misturas com cimento CP II E-32 proporcionaram, no ensaio acelerado, maior carbonatação para uma mesma relação água/materiais cimentícios em relação àquelas com cimento CP III-32-RS, caracterizando que o desenvolvimento mais rápido das reações de hidratação e a maior resistência das misturas com o cimento CP III-32-RS, tiveram maior influência do que a maior relação água/material cimentício.

Assim sendo, os diferentes comportamentos entre os ensaios naturais e acelerados, dificulta a comparação entre eles porque, segundo ISAIA; VAGHETTI; GASTALDINI (2001), nos ensaios naturais, existe um grande número de fatores que interferem nos resultados e uma análise confiável, nem sempre é simples. Porém, em algumas pesquisas, observa-se uma comparação, por meio da equivalência de um ano da profundidade de carbonatação natural, com uma semana de carbonatação acelerada.

Assim, faz-se necessário estabelecerem-se critérios normalizados para que os coeficientes obtidos nas diversas pesquisas, possam ser comparados e classificados de acordo com a durabilidade.

Um outro aspecto a ser observado é que a diferença entre a carbonatação do concreto com cimento *Portland* comum e a carbonatação das misturas com escória de alto-forno, segundo HÄKKINEN (1992), diminui com o crescimento da resistência e uma correlação entre a profundidade de carbonatação e a resistência, principalmente em classes de resistência mais altas, não é muito significativa, porque um número irregular de fissuras na superfície cria variações nos resultados de carbonatação. Neste trabalho, também foi observada a tendência de diminuição das diferenças na profundidade de carbonatação, com o aumento da resistência das misturas com diferentes teores de escória de alto-forno.

Assim sendo, com base nas tendências observadas, neste estudo e nas pesquisas de LITVAN; MEYER (1986), STEFFENS; DINKLER; AHRENS (2002) no que diz respeito a relação entre os ensaios em ambientes artificiais de laboratório, ambientes internos e externos, deve-se especificar concretos com escória, com resistência à compressão aos 28 (vinte e oito dias, acima de 35 MPa.

#### **5.4.4 Considerações sobre o tamanho da amostra**

Com base na equação 4.1 e neste trabalho experimental, na Tabela 5. 19, tem-se a estimativa do número de leituras necessárias para os ensaios de carbonatação, natural e acelerado.

**Tabela 5. 19: Estimativa do número de leituras necessárias ao ensaio de carbonatação**

Concreto	C. natural		Carbonatação acelerada					
	Leituras (d=0,5 mm)		Leituras (d=0,5 mm)		Leituras (d=1 mm)		Leituras (d=2 mm)	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
C20CPIIE	4	23	93	369	24	93	6	24
C20CPIII	4	35	4	739	4	184	4	46
C20CPIII+e	4	30	4	299	4	75	4	19
C30CPIIE	4	16	120	154	30	39	8	10
C30CPIII	4	51	199	328	50	82	13	21
C30CPIII+e	4	42	220	595	55	149	14	38
C35CPIIE	4	11	73	94	19	24	5	6
C35CPIII	5	22	44	68	11	17	3	5
C35CPIII+e	6	11	69	71	18	18	5	5
C40CPIIE	4	29	99	104	25	26	7	7
C40CPIII	4	18	113	152	29	38	8	10
C40CPIII+e	11	37	68	79	17	20	5	5

Nos resultados da Tabela 5. 19, observam-se que nos ensaios de carbonatação natural, nos quais foram efetuadas 72 leituras, a estimativa do número máximo de leituras, para todos os concretos, foi sempre inferior. Dessa forma, nas condições deste trabalho, o número de corpos-de-prova necessários aos ensaios de carbonatação natural, poderiam ser reduzidos de 09 (nove), para 06 (seis) corpos-de-prova.

Na carbonatação acelerada, se for admitido o mesmo erro, igual a 0,5 mm, na maioria dos concretos, o número de leituras efetuadas não foram suficientes para a variabilidade do ensaio.

## 5.5 Considerações sobre o capítulo

A metodologia empregada na dosagem do concreto para a faixa de resistência adotada foi adequada para o trabalho experimental proposto, cujos resultados se situaram dentro de limites aceitáveis.

A profundidade de carbonatação, natural e acelerada, resultou em medições, crescendo, de acordo com a literatura, com o tempo de exposição dos corpos-de-prova e diminuindo com a classe de resistência do concreto.

Com relação ao teor de escória no concreto, verificou-se que a substituição de parte do cimento por escória, diretamente às misturas com cimento CP III-32-RS, produziu profundidades de carbonatação, natural e acelerada, similares para concretos com as classes de resistências mais altas, nas misturas que utilizaram esse cimento, contudo, sempre maiores àquelas profundidades de carbonatação das misturas com CP II E-32.

A profundidade de carbonatação, das misturas nas quais substituiu-se o cimento CP III-32-RS por escória de alto-forno, para uma mesma relação água/materiais cimentícios foi maior do que nas misturas com somente cimento CP III-32-RS.

No ensaio natural, o cimento CP II E-32 proporcionou misturas com menores profundidades de carbonatação, se comparadas com aquelas com cimento CP III-32-RS, para uma mesma relação água/materiais cimentícios e maior resistência. No ensaio acelerado, as maiores resistências proporcionadas pelo cimento CP III-32-RS, para uma mesma relação água/materiais cimentícios, resultaram em menor carbonatação, se comparadas com as profundidades de carbonatação, proporcionadas pelo cimento CP II E-32.

A estimativa da quantidade de leituras necessárias para os ensaios de carbonatação, resultou na possibilidade de diminuição do número de corpos-de-prova de 09 (nove) para 06 (seis) no ensaio natural, porém, nos ensaios de carbonatação acelerada, admitindo-se o mesmo erro, 0,5mm, o número de leituras efetuadas não foram suficientes.

Os modelos matemáticos consultados nas diversas pesquisas para expressar as características da carbonatação, em função das classes de resistência do concreto e em função do tempo de exposição, resultaram em correlações mais significativas. A menor significância do modelo matemático, em função apenas da classe de resistência do concreto, caracteriza a necessidade de leituras, da profundidade de carbonatação por um período mais longo, para melhor expressar o modelo, caracterizando-o, também, como dependente do tempo de exposição.

## **6 - CONCLUSÕES**

---

Neste trabalho, reuniram-se informações que ajudaram a visualizar o potencial para utilização da escória de alto-forno, em elevados teores, como material cimentício, substituindo parte do cimento, adicionada diretamente à mistura, com vantagens ambientais, podendo-se dizer que a utilização de elevados teores de escória de alto-forno é viável.

A redução no consumo de energia e da liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera, além dos ganhos de resistência com a idade do concreto, em torno de 50% em um período de dez anos (MALHOTRA *et al*, 2000) para teores de escória no cimento da ordem de 30%, e dos ganhos financeiros que a incorporação desse subproduto siderúrgico proporciona, cerca de 5% de economia no concreto, se comparado com o concreto com cimento *Portland* comum, segundo as pesquisas de ISAIA (2004) são pontos a ser considerados.

Devido ao baixo calor de hidratação, diminuindo o risco de fissuras e, ainda, a boa resistência a sulfatos, cloretos e reação álcali-agregado, esses concretos, minimizando-se a carbonatação por meio de uma menor relação água/materiais cimentícios, podem ser usados na confecção do concreto massa em blocos de fundação.

Se, nas investigações de carbonatação em concretos de edifícios antigos de GEISELER *et al* (1995), não se observaram diferenças significantes na profundidade de carbonatação do concreto com escória, quando comparado com o concreto sem escória, por outro lado, nos resultados de LITVAN; MEYER (1986), as profundidades de carbonatação do concreto com escória, analisadas por um período de vinte anos, revelaram um crescimento linear ao longo do tempo, diferente das profundidades dos concretos que usaram somente como aglomerante o cimento *Portland* comum. E pode-se dizer que em outras pesquisas também advirão resultados diferentes.

Essas controvérsias existem pela total dependência do mecanismo de carbonatação das condições ambientais, e os resultados de pesquisas de profundidade de carbonatação em ambientes naturais ou acelerados refletirão o ambiente no qual está inserido o concreto pesquisado.

Assim sendo, dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, originaram-se algumas conclusões.

- No método de dosagem dos concretos, a resistência à compressão aos 28 (vinte e oito) dias, na faixa de 20 MPa a 40 MPa, observou-se como adequada. As misturas que utilizaram, como aglomerante, o cimento CII E-32, CIII – 32-RS e a mistura de 50% de cimento CIII – 32-RS mais a adição de 50% de escória de alto-forno, moída, em massa, conduziram a traços de concreto similares, devido às características do cimento CIII – 32-RS, o seu desenvolvimento de resistência, além da composição química e da relação cálcio/sílica da escória, sendo de menor influência o teor de escória desse cimento.
- O desenvolvimento da resistência à compressão, dos concretos C20, utilizando como aglomerante a mistura de 50% de cimento CP III-32-RS e a adição de 50% de escória de alto-forno, moída, em massa, foi menor do que para os outros dois aglomerantes, CP II E-32 e CP III-32-RS, provavelmente pelo menor teor de ativador dessa mistura, ou seja, o cimento CIII-32-RS não proporcionou liberação de íons  $Ca^{++}$  e  $OH^-$  na solução, em quantidade suficiente para a completa hidratação da escória de alto-forno.
- Nos concretos C30, as características do cimento CP III- 32-RS tiveram maior influência no desenvolvimento da resistência, proporcionando maior resistência aos 63(sessenta e três) dias, para o concreto produzido com esse aglomerante. Nos concretos C35 e C40, o desenvolvimento da resistência foi estatisticamente similar para todas as misturas
- Quanto aos materiais cimentícios utilizados nas misturas, analisando-se o consumo por metro cúbico de concreto, ficou claro que o melhor desempenho no desenvolvimento da resistência do cimento CP III-32-RS proporcionou às misturas uma maior relação água/materiais cimentícios e menor consumo de aglomerante, se comparado às misturas que utilizaram o cimento CP II E-32 e a proporção de 50% de cimento CP III-32-RS + 50% de escória de alto-forno moída, em massa, para uma mesma classe de concreto. Essa maior relação água/materiais cimentícios provocou maior porosidade, verificada na absorção e no volume de vazios que influencia a carbonatação.

Assim, as misturas que utilizaram o cimento CP III-32-RS, com 66% de escória de alto-forno, tiveram maior profundidade de carbonatação natural na idade de 91 dias e similares aos 365 dias, se comparadas às misturas que utilizaram a proporção de 50% de cimento CP III-32-RS + 50% de escória de alto-forno moída, com 83% de escória, em massa, para as classes de resistência de 35 MPa e 40 MPa. Nas classes 20 MPa e 30 MPa, as profundidades

de carbonatação foram similares aos 91 dias e menores, aos 365 dias, para os concretos com maior teor de escória.

- Nos ensaios naturais desta pesquisa, as condições estabelecidas para o ambiente foram artificiais, controlando-se a temperatura e umidade da câmara, onde os corpos-de-prova foram armazenados. As profundidades de carbonatação medidas, de um modo geral, quando comparadas a outras pesquisas, foram superiores. Isso se deve ao estabelecimento de condições que proporcionaram maior carbonatação.
- Com relação às idades de ensaio natural, verificou-se que, nas idades iniciais, 63 dias, as profundidades de carbonatação, muito dependentes da umidade interna do concreto, foram muito reduzidas, na casa de décimos de milímetros, podendo ser consideradas nulas. O primeiro espaço de tempo entre a determinação inicial, 63 dias, e a segunda medição, correspondente a duas semanas e a idade de 77 dias, foi muito pequeno, medindo-se valores algumas vezes, menores em idades superiores. Sugere-se que esta data de ensaio poderia ser eliminada no ensaio natural e que, o período de quatro semanas e a idade de ensaio de 91 dias, seria mais adequado porque também coincidiria com a uma data de ensaio acelerado. Dessa forma, poderiam ser efetuadas comparações.

Com relação ao período correspondente à quarta data de medição, no ensaio de carbonatação natural, observou-se ser muito longo, sem uma medição intermediária que refletisse melhor o desenvolvimento da carbonatação, no período estudado.

- As profundidades de carbonatação das misturas com cimento CP II E-32 foram sempre menores, para uma mesma classe de resistência, comparadas com as misturas com o cimento CP III-32-RS, no qual o consumo de cimento foi menor e maior a relação água/material cimentício, e àquelas com cimento CP III-32-RS e escória de alto-forno. A adição de escória, diretamente às misturas com cimento CP III-32-RS, produziu profundidades de carbonatação, natural e acelerada, similares para concretos com as classes de resistências mais altas, se comparadas com àquelas com cimento CP III-32-RS e sempre maiores, se comparadas para uma mesma relação água/materiais cimentícios.
- Nos ensaios acelerados, as profundidades de carbonatação para as classes de concreto C35 e C40 foram sempre maiores nesta ordem C35CPIII, C35CPIII + escória, C35CPIIE e C40CPIII, e C40CPIII + escória, C40CPIIE, sugerindo que a maior relação água/material

cimentício das misturas com maiores profundidades de carbonatação, proporcionou maior porosidade. Nas classes C20 e C30, as profundidades de carbonatação das misturas com cimento CP II E-32 foram sempre menores e similares para as outras duas misturas que carbonataram totalmente depois de quatro semanas de permanência em câmara acelerada. Sugere-se a continuidade do ensaio acelerado, para os concretos sem carbonatação total, até a completa carbonatação, verificando-se o tempo de exposição necessário para essa carbonatação, útil, segundo AL-KADHIMI *et al.* (1996), na análise das propriedades do concreto carbonatado.

- Quanto aos coeficientes de carbonatação natural e acelerado, verificou-se que os modelos com base na proporcionalidade da raiz quadrada do tempo de exposição, na carbonatação acelerada, resultaram em correlações mais precisas do que na carbonatação natural, devido à necessidade de um período maior de ensaio, que representasse melhor o desenvolvimento lento da difusão do CO<sub>2</sub> em condições de exposição natural.
- No ensaio natural, a maior alcalinidade do cimento CII E-32, verificada na análise química desse cimento, proporcionou menor carbonatação das misturas, enquanto que, no ensaio acelerado, observou-se uma tendência de que a maior resistência das misturas, para uma mesma relação água/material cimentício, prevaleceu nas medidas das profundidades de carbonatação nas misturas com cimento CIII-32-RS.
- Com relação à quantidade de leituras necessárias para o ensaio de carbonatação, natural e acelerado, ela pode ser menor, dependendo do erro admitido para as leituras.

Assim, com base nas conclusões deste trabalho, como perspectivas para a continuidade dele citam-se as seguintes linhas de pesquisas:

- Desenvolver modelos que melhor representem o mecanismo da carbonatação e também da vida útil do concreto com escória de alto-forno, em diversos teores, analisando as propriedades e a microestrutura do concreto carbonatado;
- análise da umidade interna das diferentes misturas no sentido de se analisar o tempo necessário para se atingir a umidade ótima para a carbonatação, comparadas às condições reais de umidade, em ambientes externos, ambientes internos e em ambientes controlados de laboratório;

- avaliação, por um período mais longo, do modelo de desenvolvimento da carbonatação, nas misturas com diferentes teores de escória de alto-forno, em ambientes naturais comparados com ambientes de carbonatação acelerada;
- ampliar a faixa de resistência deste estudo, iniciando na faixa de 40 MPa até 80 MPa, comparando vários teores de escória substituindo parte do cimento CP II E-32 e avaliando-se a influência da resistência na profundidade de carbonatação;
- estudos, no sentido de se estabelecer alguns padrões e critérios para o desenvolvimento de pesquisas para avaliação da carbonatação para comparação de resultados.

## **Referências Bibliográficas**

---

- AÏCTIN, Pierre-Claude. **Concreto de Alto desempenho**. 1.ed. São Paulo: Pini, 2000. 667p.
- ALDASORO, Juan C. *Extracción y procesamiento de escórias*. In: *Memória Técnica de las primeras Jornadas Técnicas de Escórias Siderúrgicas*. SOMISA - Sociedad Mixta Siderurgia Argentina. **Anais**. Buenos Aires, p.33-37, 1985.
- ALDEA, Corina-Maria. *et al. Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement*, **Cement and Concrete Research**, v. 30, p 465-472, 2000.
- ALEXANDRE, Jacques; SEBILEAU, Jean-Louis. **Le latier de haut fourneau. Elaboration, traitements, propriétés, emplois**. Edite por C. T. P. L. Centre Technique et de Promotion les Laitiers, Paris, France, 1988.
- AL-KADHIMI, T. K. H. *et al. An accelerated carbonation procedure for studies on concrete*. **Advances in Cement Research**, v.8, n.30, p.47-59, 1995.
- AHMAD, Shamsad. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review, **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p 459-471, 2003
- AOKI, S.; ARAI, Y. Ion exchange of granulated blast furnace slag in acid solution. 9<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. **Proceedings**. India. 1992.
- ANDRADE, Carmen. *Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements*. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 725-742, 1992.
- ANDRADE, C.; SARRÍA, J.; ALONSO, C. *Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering*, **Cement and Concrete Research**, v.29, 1249–1259, 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Developing Accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials. 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária**: NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas**: NBR NM 49. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto**: BR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados - Determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**: NBR 7218. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles"**: NBR NM51 Rio de Janeiro, 1991/2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos**: NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland composto**: NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**: NBR NM 76. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland de alto-forno**: NBR 5735. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica**: NBR NM 23. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland e outros materiais em pó**: NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland. Determinação da expansibilidade de Le Chatelier**: NBR 11.582. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland. Determinação dos tempos de pega**: NBR 11.581. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland. Determinação da água da pasta de consistência normal**: NBR 11.580. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Cimento Portland. Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200)**: NBR 11.579. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**: NM67. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Concreto - Preparo, controle e recebimento**: NBR 12655. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico**: NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência**: NBR 8953. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Projeto e execução de obras de concreto armado**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto**: NBR 11.578. Rio de Janeiro, 1991.

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

ATIS, Cengiz Duran. *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*. **Construction and Building Materials**, v.17, p.147–152, 2003.

BAKHAREV A, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y.B. *Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation*. **Cement and Concrete Research**, v.31, p.1277–1283, 2001.

BALAYSSAC, J. P.; DÉTRICHÉ, Ch. H.; GRANDET, J. *Effects of curing upon carbonation of concrete*. **Construction and Building Materials**, v.9, N.2, p.105-113, 1995.

BATTAGIN, A. F.; ESPER, M.W. Influência do uso de cimento *Portland* de alto-forno na durabilidade de concretos. In: 30º Reibrac. **Anais**. p.271-301, 1988.

BATTAGIN, Arnaldo F.; SCANDIUZZI, Luércio. Considerações sobre durabilidade de argamassas contendo escória granulada de alto-forno como agregado miúdo. In: 34º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais**. Blumenau, p. 392-399, 1990.

BAUER, Elton. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BAUER, Elton; HELENE, Paulo R. do Lago. Influência da adição de escória nos processos e mecanismos de corrosão das armaduras em concreto armado. In: 3º Congresso Brasileiro do cimento. **Anais**. São Paulo, 1993.

BINJEN, Jan. **Blast furnace slag cement**. Den Haag: CIP Royal Library, 1996.

BOURGUIGNON *et al.* Influência da resistência na profundidade de carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno. In: 10º Entac. **Anais**. São Paulo, 2004.

BROOKS, J. J.; MEGAT JOHARI, M.A.; MAZLOOM, M. *Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete*. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p. 293-301, 2000.

BROOKS, J. J.; WAINWRIGHT, P. J.; BOUKENDAKJI, M. *Influence of type and replacement level on strength, elasticity, shrinkage and creep of concrete*. In: Fly Ash, Silica Fume, slag, and Natural Pozzolans in concrete. Fourth International Conference. **Proceedings**. Istanbul, Turkey, v. II, p. 1325-1342. 1992.

BROWN, P.W.; HOOTON, R.D.; CLARCK, B.A. *The co-existence of thaumasite and ettringite in concrete exposed to magnesium sulfate at room temperature and the influence of*

*blast-furnace slag substitution on sulfate resistance. Cement and Concrete Composites*, v. 25, p. 939-945, 1999.

BENSTED, John *Thaumasite- background and nature in deterioration of cements, mortar and concrete. Cement and Concrete Composites*, v. 21, p. 117-121, 2003.

CAMARINI, Gladis. **Desempenho de misturas cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

CASCUDO, Oswaldo. O controle da corrosão de armaduras em concreto. 1 ed. São Paulo: Editora Pini Ltda. 1997. 237p.

CASTEL, A.; FRANÇOIS, R.; ARLIGUIE, G. *Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements. Cement and Concrete Research*, v.29 1999. p.561-565.

CASTRO, Alexandre de; CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena; LOPES, Anne Neiry M. Avaliação da carbonatação no concreto de cobertura com adições minerais e diferentes relações água/aglomerante. In: 45º Ibracon. **Anais**. Vitória, 2003

CASTRO, Alexandre de; FERREIRA, Ricardo; LOPES, Anne Neiry M.; CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena. Durabilidade de concretos com adições minerais frente a carbonatação e ao ataque por cloretos. In: 46º Ibracon. **Anais**. Florianópolis, 2004.

CASTRO, Alexandre de. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. Goiânia, 2003.

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. Boletim 65, IPT. São Paulo, 1992.

CLIMENT, Miguel A.; GUTIERREZ, Claudio, *Proof by UV- visible modulated reflectance spectroscopy of the breakdown by carbonation of the passivating layer on iron in alkaline solution. Surface Science*, v.330, P651-656, 1995.

COCHRAN, W. *Sampling techniques*. Wiley, 3ed., New York, 1997.

COELHO, Maria Antonina Magalhães *et al*. Estudo da carbonatação e retração em concretos de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno. In: 44º Ibracon. **Anais**. Vitória, 2003.

COELHO, Maria Antonina Magalhães. **Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevados teores de escória de alto forno**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Vitória, 2002.

COLLINS, F. G.; SANJAYAN, J. G. *Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>*. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p.655-664, 1998.

CST-COMPANHIA SIDERÚRGICA TUBARÃO. Disponível em: <<http://www.cst.com.br>>. Acesso em: 27abr. 2004.

DAIMON, M. *Mecanism and kinetics of slag cement hydration*. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7<sup>th</sup>, v.1. **Proceedings**. Paris, 1980.

DE CEUKELAIRE, L.; VAN NIEUWENBURG, D. *Accelerated carbonation of blast-furnace cement concrete. Cement and Concrete Research*, v. 23, p. 442-452, 1993.

DHIR, R. K.; EL-MOHR, M.A.K.; DYER, T. D.; *Chloride binding in GGBS concrete. Cement Concrete Research*, v.26. p.1767-1773,1996.

DIAS, Luiz Andrade de Mattos. **Estruturas de aço Conceitos, técnicas e linguagem**, 2ed. São Paulo: Ziguarte Editora, 1998.

DIAS, Eduardo G. *et al.* Estudo da influência do cimento *Portland* de alto-forno e cimento Portland comum com adição de escória de alto-forno moída nas propriedades do concreto. In: 32ª REIBRAC. **Anais**. Fortaleza, p. 525-539, 1990.

DIAS, W. P. S. *Reduction of concrete sorptivity with age though carbonation. Cement and Concrete Research*, v.30, p.1255-1261, 2000.

DOUGLAS, E. *Blast furnace slag cement mortar and concrete: durability aspects. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete.* ed. V. M. Malhotra. **Proceedings**, Ottawa, p. 291-333, 1987.

DRON, R. *Facteurs chimiques et structuraux de la réactivité des laitiers. Silicates Industriels*, n. 6, p.143-147, 1982.

EHRENBERG, A.; GEISELER, J. *Carbon Dioxide emissions with cement production. In: International Symposium on utilization of metallurgical slag. Iron and Steel Slags-Reports from 1974-2000.* Beijing-China, 1999.

FERREIRA JÚNIOR, Epaminondas. Luiz. **Avaliação de propriedades de concreto de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2003.

FREARSON, John P.H. *Sulfate Resistance of combinations of Portland cement and ground granulated blast furnace slag.* In: Second International Conference of the Use of Fly ash, Silica Fume, and Slag & Other By-products in Concrete. V. M. Malhotra Editor. **Proceedings** Madri, Espanha, 1986. p 1495-1523.

FREARSON, John P.H.; UREN, J.M. *Investigations of ground granulated blast furnace slag containing merwinitic crystallization.* In: Second International Conference of the Use of Fly ash, Silica Fume, and Slag & Other By-products in Concrete. V. M. Malhotra Editor. **Proceedings**. Madri, Espanha, p.1401-1421, 1986.

GASTALDINI, Antonio; G; ISAIA, Geraldo; ZANELLA, Renato. Influência da finura da escória na carbonatação de concretos com adições minerais. In: 5º Congresso Brasileiro do Cimento. **Anais**. 1999.

GASTALDINI, Antonio G.; ISAIA, Geraldo C. Efeito de misturas compostas de pozolanas e escória na permeabilidade a cloreto. In: VIII Encontro Nacional do Ambiente construído. **Anais**. Salvador, 2000.

GASTALDINI, Antonio G.; TEZUCA, Yasuco. Efeitos da adição de escórias no comportamento das pastas e argamassas de cimento Port, N.land de alto-forno. In: 34º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). **Anais**. Curitiba, 1992.

GAZTAÑAGA, M.T.; et al. *Carbonation of hydrated calcium aluminate cement and ordinary Portland Cements of varying alkali content.* In: 10<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. **Proceedings**, v.4, Sweden, 1997.

- GEISELER, J; KOLLO, H.; LANG, E. *Influence of blast-furnace cements on durability of concrete structures*. **ACI Materials Journal**, v.92, N.3, p.252-257, 1995.
- GEISELER, J.; LANG, E. *Long-Term durability of non-air-entrained concrete structures exposed to marine environments and freezing and thawing cycles*. In: 3<sup>rd</sup> CANMRT/ACI International Conference on Durability of Concrete, **Iron and Steel Slags-Reports from 1974-2000**. Nice, França, 1994.
- GENET, M. *Slag usage around the world- Opportunities and challenges*. In: 2<sup>nd</sup> European Slag Conference. Euroslag. **Proceedings**. Düsseldorf, Alemanha, 2000.
- GEYER, Rejane M. T.; DAL MOLIN, Denise C. C.; VILELA, Antonio C. F. Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na indústria da construção civil. In: V Encontro Regional Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica. **Anais**. Vitória, 1995. p. ST V-1/1-1/2.
- GLASSER, F. P. *Chemical, Mineralogical, and Microstructural Changes Occurring in Hydrated Slag-Cement Blends*. In: Materials science of concrete. Ed. Skalny, **American Ceramic Society**. 1989. v. II, p.41-81
- HÄKKINEN, Tarja. *The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete*. Part 2.. **Cement and Concrete Research**, 1993, v. 23, p. 518-530.
- HELENE, Paulo R. do L., MITIDIÉRI FILHO, Cláudio V; THOMAS, Ercio. Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto. Reunião Anual do Ibracon. **Anais**. São Paulo. 1995.
- HELENE, P R. L.. **NBR-1/2001: Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. Reunião Anual do Ibracon – Curso de Durabilidade.. Foz do Iguaçu.. 2001.
- HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1993.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993.
- HOOTON, R. D. *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. In: The reactivity and hydration products of blast-furnace slag. V. M. Malhotra. **Proceedings**. Ottawa, 1987, p. 247-288.
- HOUST, Yves F., WITTMANN, Folker H. *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. **Cement and Concrete Research**, v.2151, p.1 –8, 2002.
- IBS-Instituto Brasileiro de Siderurgia. **A Siderurgia em números**. Rio de Janeiro, 2004.
- ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A. GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: 43 Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.
- ISAIA, G. C.; GASTALDINI Concreto “Verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade. In: 10<sup>o</sup> Entac. **Anais**. São Paulo, 2004.
- ISAIA, Geraldo Cechella *et al.* Como diminuir a despassivação da armadura e aumentar o desempenho estrutural com altos teores de adições minerais e cal hidratada. In Simpósio Epusp sobre estruturas de concreto. **Anais**. USP. São Paulo. 2003.

- ISAIA, Geraldo Cechella. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995
- JOHN *et al.* Cimentos de escória de alto-forno sem clínquer. In: Resíduos industriais para redução de custos na construção habitacional. IPT/UFES. **Anais**. Vitória, 1994, p. 52-59.
- JOHN, Vanderley M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- JOHNSTONE, J.R.; GLASSER, F.P. *Carbonation of portlandite single crystals and portlandite in cement paste*. In: 9<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. **Proceedings**. India, 1992.
- JONES, M. R., DHIR, R.K.; MAGGE, B.J. *Concrete containing ternary blended binders: Resistance to Chloride ingress and carbonation*. **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 825-831, 1997.
- JUNG, Woo-Yong, YOON, Young-Soo; SOHN, Young-Moo. *Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion*. **Cement and Concrete Research**, v.33, p.663-677, 2003.
- KAZMIERCZAK, Cláudio de Souza; LINDENMEYER, Zara. Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas. In: International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. **Anais**. Florianópolis, p.402-413, 1996.
- KHAN, M.I.; LYNSDALE, C.J. *Strength, permeability, and carbonation of high-performance concret*. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.123-131, 2002.
- KOBAYASHI, K, SUZUKI, K.; UNO, Y. . *Carbonation of concrete structures and decomposition of C-S-H*. **Cement and Concrete Composite**, v24, p.55-61, 1994.
- KOBELCO. KOBE STEEL LTD. Disponível em: <[www.kobelco.co.jp/enviro/report\\_e/haiki.htm](http://www.kobelco.co.jp/enviro/report_e/haiki.htm)> Acesso em: 28 abr.2004.
- LANG, E.; BRODERSEN, H.A. *The performance of blast-furnace slag cement*. In: Euroslag. **Proceedings**. Düsseldorf, Alemanha, 2000.
- LANG, E.; GEISELER, J. *Utilization of high slag blast furnace cement for high-performance concrete- Influence of pore structure and permeability*. In: 10<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). **Iron and Steel Slags-Reports from 1974-2000**. Gothenburg, 1997.
- LEA, Frederick Measham. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 4<sup>th</sup> ed. Londres: Peter C Hewlett, 1998, 1053p.
- LEITE, S. **Manual de operação/Manutenção da Câmara de Carbonatação**. Ufes, Vitória, 2004.
- LEVY, S.; HELENE. P.. Restauração e recuperação de estruturas de concreto armado de escolas estaduais no estado de São Paulo. **Revista Thécne**. Ed. Pini, N 47, jul/ago-2000.
- LIM, S. N.; WEE, T. H. *Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete*. **ACI Materials Journal**, p. 587-593, 2000.

LITTLE Ltd., Arthur D & SETEPLA, Tecnometal Engenharia Ltda. **Estudo sobre aplicações de escória siderúrgicas no Brasil e em outros oito países.** Sumário Executivo preparado para Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas, 1999.

LITVAN, G.G., MEYER, A. *Carbonation of granulated blast-furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure.* . In: Second International Conference of the Use of Fly ash, Silica Fume, and Slag & Other By-products in Concrete. V. M. Malhotra Editor. **Proceedings.** Madri, Espanha, p 1445-1462, 1986.

LO, Y.; LEE, H. M. *Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy.* **Building and Environment**, v.37, p.507-514, 2002.

LONGO, A.; TORRENT, R.J. *Methods of blast furnace slag: Their effect on the compressive strength of mortars and concretes.* In: Second International Conference of the Use of Fly ash, Silica Fume, and Slag & Other By-products in Concrete. V. M. Malhotra Editor. **Proceedings** Madri, Espanha, p 1381-1400.1986.

LUO, R.; CAI, Y.; WANG, C.; HUANG, X. A study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. *Cement and concrete Research*, v. 32, p. 1-7,2002.

MACIAS, A.; KINDNESS, A.; GLASSER, F. P.. Impact of carbon dioxide on the immobilization potential of cemented wastes: chromium. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.2, p.215-225, 1997.

MALHOTRA, V. M. Strength durability characteristics of concrete incorporating a pelletized blast furnace slag. In: First International Conference on The use of Fly ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. SP-79. American Concrete Institute. Proceedings. Detroit, 1983. p. 891-919.

MALHOTRA, M.; *et al.*. *Long-term mechanical properties and durability. Characteristics of high-strength/high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions.* **ACI Materials Journal**, v.97, n.5, 2000.

MALHOTRA, V. M. *Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated blast-furnace slag.* In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. **Proceedings.** Ottawa, p. 291-333, 1987.

MARCHAND, J. Fall 2000 *Materials Research Society Symposium on the Materials Science of High-Performance Concrete.* **Cement and concrete Research**, v. 31, p.1783, 2001,.

MARQUES, João Carlos. **Escória de alto-forno: estudo visando seu emprego no preparo de argamassas e concreto.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

MARTINS, Aline R; MONTICELLI, Isadora; CAMARINI, Gladis. Carbonatação em concretos submetidos a diferentes procedimentos de cura. In: 43<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais.** Foz de Iguaçu, 2001.

MASLEHUDDIN, M.; SHIROKOFF, J.; SIDDIQUI, M. A. B. *Changes in phase composition in OPC and blended cement mortars due to carbonation.* **Advances in Cement Research**, v8. N 32, p. 167-173, 1996.

MATALA, Seppo. *Carbonation mechanism in the granulated blast furnace slag concrete.* In: International Congress on the Chemistry of Cement, 10<sup>th</sup>. **Proceedings.** Detroit, p.1-30, 1994.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Migração de íons cloretos no concreto- Influência da consistência, relação água/cimento e consumo de cimento. In: **Revista Ibracon**. Nº 32, Rio de Janeiro, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ed. São Paulo: Pini, 1994.

MEUSEL, J. W. ROSE, J. H. *Production of granulated blast furnace slag at Sparrows Point, and the workability and strength potential of concrete incorporating the slag*. In: First International Conference on The use of Fly ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete. SP-79. American Concrete Institute. **Proceedings**. Detroit, p. 867-890, 1983.

MILETIC, S. *et al. Carbonation and leaching of Portland cement with various blending materials*. **Waste Materials in Construction**. Ed. GR Woolley, JM Goumans and PJ Wainwright. Iugoslavia, p.75-86, 2000.

MIRA, P. PAPADAKIS, V.G., TSIMAS, S. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.32, p683-689, 2002.

MITRE, Marcos; BARBOSA, Paulo, HELENE, Paulo. Influência do traço na carbonatação de concretos, argamassas e pastas. In: **Revista Ibracon**. Nº 31. Rio de Janeiro. 2002.

MONTEIRO, E. B. *et al.* Estudo da estrutura interna do concreto em relação à corrosão das armaduras. In 42º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Fortaleza-Ceará, 2000.

MONTEIRO, E. C. B. e NEPOMUCENO, A. A. Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras, sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloreto. In: International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and quality of concrete structures. **Proceedings**. Florianópolis, 1996.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

NAGATAKI, S. *Mineral admixtures in concrete: state of the art and trends*. In: V Mohan Malhotra Symposium. American Concrete Institute. SP-144. **Proceedings**. Detroit, p 447-482, 1994.

NAKAMOTO, J.; TOGAWA, K. Q. *A study of strength development and carbonation of concrete incorporating high volume blast furnace slag*. In: Fifth International Conference. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. **Proceedings**. Milwaukee, p. 1121-1139, 1995.

NAKAMURA, N.; SAKAI, M.; SWAMY, R.N. *Effect of slag fineness on the development of concrete strength and microstructure*. In: Fifth International Conference. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. **Proceedings**. Istanbul, VII, p.1343-1365, 1992.

NEVILLE, Adam Mathew. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L. *Effects of carbonation on pore structure and diffusion properties of hydrated cements pastes*. **Cement and concrete Research**, v. 27, n. 67, p.995-1007, 1997.

- NUNES, Fabíola L. **Influência da dosagem na carbonatação dos concretos**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- OLIVEIRA; C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- OSBORNE, G. J. *Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete*. **Cement and concrete Composites**, n. 21, p. 11-21, 1999.
- PAPADAKIS, V.G. *et al.* *Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation*. **Materials and Structures**, v.25, p. 293-304, 1992.
- PAPADAKIS, Vagelis G.; VAYENAS, Costas G.; FARDIS, Michael N. *Physical and Chemical Characteristics affecting the durability*. **ACI Materials Journal**, v8, n.2, 1991.
- PARROT, L.J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Wexham Springs, Cement Concrete Association.1987.
- PARROTT, 1989. *Modeling of Hydration reactions and concrete properties*. In: **Materials Science of Concrete**. Ed. Skalny, J. P., American Ceramic Society, 1989. v. 1.
- PARROTT, L.J. *A study of carbonation-induced corrosion*. **Cement and Concrete Research**. v46. n166. 1994. p23-28.
- PARROTT, L.J. *Variations of water absorption rate and porosity with depth from an exposed concrete surface: effects of exposure conditions and cement type*. **Cement and Concrete Research**, v.22, p. 1077-1088, 1992.
- PRISCIANDARO, M.; MAZZIOTTI, G.; VEGLIÓ, F. *Effect of burning supplementary waste fuels on the pollutant emissions by cements plants: a statistical analysis of process data*. **Resources Conservation&Recycling**, p 1-24, 2003.
- REGOURD, M. *Structure and behavior of slag Portland cement hydrates*. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7<sup>th</sup>. **Proceedings**. Paris, 1980.
- RIBAS SILVA, Moema. **Técnicas de Observação e Análise**. Tradução: Paulo César Ribas Silva. Brasília: Departamento de Engenharia Civil, Mestrado de Estruturas da UnB.1996. 21p.
- RICHARDSON, M G *et al.* *Structural changes due to carbonation in hardened cement pastes*. In: *International Congress on the Chemistry of Cement*, 19th. **Proceedings**. India, p.298-303, 1992.
- RICHARDSON, Mark G. *.Carbonation on Reinforced Concrete*, CITTIS LTD, Dublin, 1988.
- RIGO DA SILVA, Cláudio *et al.* *Carbonation-related microstructural changes in long-term durability concrete*. In: **Materials Research**, v.5, n. 3, 2002.
- ROSEMBERG, Arnold; HANSON, Carolyn M.; ANDRADE, Carmen. *Mechanisms of corrosion of steel in concrete*. In: **Materials Science of Concrete**. Ed. Skalny, J. P., American Ceramic Society, v. I, 1989.
- SAETTA, Anna V.; VITALINI, Renato V. *Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part I: theoretical formulation*. **Cement and concrete Research**, 2003.

- SAKAI, K.; *et al.* *Properties of granulated blast-furnace slag cement concrete.* In: *Fly Ash, Silica Fume, slag, and Natural Pozzolans in concrete.* Fourth International Conference. **Proceedings.** Istambul, v. II, p.1367-1383, 1992.
- SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos.** Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- SCANDIUZZI, L.; BATTAGIN, Arnaldo F. **A Utilização da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo.** Estudo Técnico nº 95. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1990.
- SCREVENER, Karen L. *The microstructure of concrete.* In: **Materials Science of Concrete.** Ed. Skalny, J. P., American Ceramic Society, v. I, 1989.
- SEIDLER, N.; DAL MOLIN, D. C. C. Influência das adições minerais e da resistência à compressão na carbonatação dos concretos. In: 44º Ibracon. **Anais.** Vitória, 2003.
- SHI, C.; QUIAN, J. *High performance cementing materials from industrial slag - a review.* **Resources, Conservation and Recycling,** v. 29, p195-207, 2000.
- SHI, Caijun. *Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars.* **Cement and concrete Research,** v. 26, n.12, p.1789-1799, 1996.
- SHI, Caijun; DAY, Robert L. *A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements.* **Cement and concrete Research,** v.25, n.6, p.1333-1346, 1995a.
- SHI, Caijun; DAY, Robert L. *Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements.* **Cement and concrete Research,** v.26, n.3, p.439-447, 1995b.
- SNIC - SINDICATO DO CIMENTO Disponível em: <[http://www.sindicatodo.cimento.org.br/f\\_numeros.asp](http://www.sindicatodo.cimento.org.br/f_numeros.asp)> Acesso em: 17 set. 2004.
- SILVA, Maristela G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- SANJUÁN, Miguel Angel; DEL OLMO, César. Carbonation resistance of industrial mortar used as a concrete coating. *Building and Environment,* v.376, p.949-953, 2001.
- SINVASUNDARAM, V.; MALHOTRA, V. M. *Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag.* **ACI Materials Journal,** 1992, Nov-Dez., p. 554-563.
- SLOSS INDUSTRIES Disponível em <[www.sloss.com/fiber/products.asp](http://www.sloss.com/fiber/products.asp)> Acesso em 28-04-2004.
- SMOLCZYK, H. G. *Slag structure and identification of slags.* In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7<sup>th</sup>. **Iron and Steel Slags-Reports from 1974-2000.** Paris, 1980.
- SHIMIDT, M.J.J.; LI, L.; SPENCER, J.T. *Removal of chlorinated rubber coatings from concrete surface using an RF excited CO<sub>2</sub> laser.* *Journal of Materials Processing Technology,* v.114, p.139-144, 2001.
- SIERRA, Arjuna. O processo da carbonatação no concreto em função dos tipos de cimento e agregados. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, 1996.

SPERB, J. E. *et al.* Resistência à compressão, carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos; In: 45° Ibracon. **Anais**. Vitória, 2003.

STEFFENS, Alexander, DINKLER, Dieter; AHRENS, Hermann. *Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures*. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 935-941, 2002.

STUMPP, M. J.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Efeito da adição de cal hidratada sobre a carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais: Abordagem preliminar. In: 44° Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Belo Horizonte, 2002.

SUGAMA, T. Hot alkali carbonation of sodium metaphosphate modified fly ash/calcium aluminate hydrothermal cements. **Cement and concrete Research**, v.26, n.11, p.1661-1672, 1996.

SURYAVANSHI, A. K.; SWAMY, R. NARAYAN. *Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements*. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.5, p.729-741, 1996.

SURYAVANSHI, A. N.; SWAMY. Na Evaluation of controlled permeability of structural concrete elements. **Cement and Concrete Research**, v.27, n. 7, p.1047-1060, 1997.

TAZAWA, E. ; MIYAZAWA, S. *Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials*. **Cement and Concrete Research**, v.49, n.178, p.15-28, 1997.

THOMAS, M.D.A. *et al.* A compararison of the properties of OPC, PFA and GGBS concretes in reinforced concrete tank walls of slender section. **Magazine of Concrete Research**, v.42. n.152, p.127-134, 1990.

TORRENT, Roberto; ELOLA, Alecica; SZTEINBERG, Silvia. *Propriedades de los hormigones com adiccion de escoria granulada de alto-forno y aplicaciones especiales*. Jornadas Técnicas de Escórias Siderúrgicas. SOMISA - Sociedad Mixta Siderurgia Argentina. **Anais**. Buenos Aires, p.68-78, 1985.

UCHIKAWA. Hiroshi; HANEHARA, Shunsuke; HIRAO, Hiroshi. *Influence of structural and humidity changes at the inner part of hardened cement paste on autogenous shrinkage*. In: Fourth CANMET/SCI International Conference. **Proceedings**. Sydney, p 949-964, 1997.

VAGHETTI, Marcos Alberto. Oss; ISAIA, Geraldo Cechella; GASTALDINI, A. L. G.. Influência da pré-cura ao ar dos concretos com pozolanas na carbonatação acelerada. . In: 43° Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.

VAGHETTI, Marcos Alberto Oss; ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto de alto desempenho com misturas pozolânicas: um estudo sobre a influência na carbonatação. In: 5° Congresso Brasileiro do Cimento. **Anais**., 1999.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. 318p.

VERBECK, G. *Carbonation of hydrated Portland Cement*. **American Society Testing Material. Special Technical Publication**, 1958.

WAEKENS, Gerardo S., CARMINE, Cláudio O. del. *La elaboración del arrabio y del acero. Las escórias siderúrgicas, su generación y propiedades. Niveles de producción*. In: Memória Técnica de las primeras Jornadas Técnicas de Escórias Siderúrgicas. SOMISA - Sociedad Mixta Siderurgia Argentina. **Anais**. Buenos Aires, p. 1-31, 1985.

WANG, Shao-Dong et al. *Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems*. **Advances in Cement Research**, v7. n.27, p.93-102, 1995.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A.K.; LOGENDRAN, D. *Pore structure controlling the carbonation of a hardened cement matrix blended with mineral admixture*. **Advances in Cement Research**, v. 11, n. 2, p. 81-95, 1999.

WEI, Sun; HANDONG, Yan; BINGGEN, Zhan. *Analysis of mechanism on water-reducing effect of fine ground slag, high-calcium fly ash and low-calcium fly ash*. **Cement and Concrete Research**, v33. p-1119-1125, 2003.

XIAO, J et al. *Experimental study on strength and ductility of carbonated concrete elements* **Construction and Building Materials**, v.16, p.187-192, 2002.

ZACHARIASSEN, W. H. *The atomic arrangement in glass*. **The Journal of American Chemical Society**, v.54, n.10, p.3841-3851, 1932.

ZHANG, R.H.; NAKAZAWA, T., IMAI, F. *Estimation of depth of concrete carbonation*. In: *Durability of Concrete. Fourth CANMET/ACI International Conference*. **Proceedings**. Australia, v.1, p.633-648, 1997.

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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