

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE ESPECIFICAÇÕES POR  
DESEMPENHO PARA CONCRETOS COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

*Tese apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil na área de Concentração de Arquitetura e Construção*

**Jussara Tanesi Ramadan, Msc**

**Vanessa Gomes da Silva, Profa. Dra.**

*Orientadora*

**Maristela Gomes da Silva, Profa. Dra.**

*Co-orientadora*

**Campinas**

**2010**

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

R14c            Ramadan, Jussara Tanesi  
                  Contribuição ao desenvolvimento de especificações  
                  por desempenho para concretos com escória de alto-  
                  forno / Jussara Tanesi Ramadan. --Campinas, SP: [s.n.],  
                  2010.

                  Orientadores: Vanessa Gomes da Silva, Maristela  
                  Gomes da Silva.

                  Tese de Doutorado - Universidade Estadual de  
                  Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
                  Urbanismo.

                  1. Escória. 2. Concreto. 3. Durabilidade  
                  (Engenharia). 4. Materiais de construção - Durabilidade.  
                  I. Silva, Vanessa Gomes da. II. Silva, Maristela Gomes  
                  da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade  
                  de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV.  
                  Título.

Título em Inglês: Contribution to the development of performance specifications for  
concretes containing blast furnace slag

Palavras-chave em Inglês: Slag, Concrete, Durability engineering, Durability of  
buildings materials

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Gladis Camarini, Ricardo de Lima Isaac, Oswaldo Cascudo  
Matos, Neide Matiko Nakata Sato

Data da defesa: 10/02/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE  
ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO PARA CONCRETOS COM  
ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

**Jussara Tanesi Ramadan**

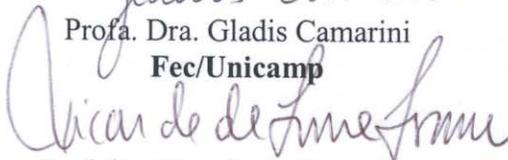
**Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



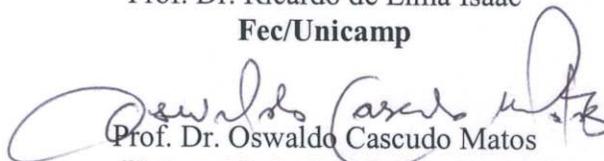
Prof. Dra. Vanessa Gomes da Silva  
**Presidente e Orientador(a)/Fec/Unicamp**



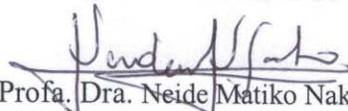
Prof. Dra. Gladis Camarini  
**Fec/Unicamp**



Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac  
**Fec/Unicamp**



Prof. Dr. Oswaldo Cascudo Matos  
**Universidade Federal de Goiás**



Prof. Dra. Neide Matiko Nakata Sato  
**UNINOVE**

Campinas, 10 de fevereiro de 2010

## ***Dedicatória***

*Ao meu marido Wael, à minha filha Rebecca e à minha  
mãe Ivani por todo apoio e incentivo.*

## ***Agradecimentos***

Nos últimos anos, vários desafios se apresentaram na minha vida, os quais tornaram a conclusão desta tese praticamente impossível. No entanto, aprendi que tudo posso Naquele que me fortalece. O Senhor me abençoou com pessoas fantásticas, verdadeiros anjos, que serviram como Seu instrumento. Sem estas pessoas, esta tese jamais teria sido concluída. Nenhuma palavra de agradecimento seria suficiente e capaz de expressar a minha profunda gratidão. Estas são as pessoas que estão nas minhas orações para Deus derrame as Suas bênçãos sobre as suas vidas:

Primeiramente as minhas amigas e orientadoras Profa. Dra. Vanessa Gomes da Silva e Profa. Dra. Maristela Gomes da Silva, as quais foram muito além da orientação. Presentearam-me com a oportunidade de participar desse projeto e me guiaram a cada passo do caminho com incontáveis horas de atendimento e revisão. Foram as orientadoras mais dedicadas e envolvidas que eu jamais conheci.

A banca que tão prontamente se dispôs a modificar a data da defesa e a ler a tese durante as férias de Janeiro.

Ao meu marido Wael que sempre me apoiou, motivou, orou por mim, cuidou de mim e nunca me deixou desanimar.

A minha filha Rebecca à qual eu gostaria de servir de inspiração e motivo de orgulho com este doutorado.

A minha mãe Ivani que sempre acreditou em mim e na conclusão desta tese, cuja dedicação vai além de qualquer palavra. Por todo investimento emocional e financeiro ao longo de todos esses anos.

Os meus avôs, Antonietta e Francisco, sempre presentes e orgulhosos.

O meu padrasto Edson por tanta paciência comigo e com a minha mãe.

Os meus professores de Materiais de Construção, Dr. Vladimir Paulon, Dra. Gladis Camarini e Dr. Paulo Helene, que fomentaram a minha paixão por concreto.

A minha amiga Dra. Rubiane Antunes pelo incentivo, apoio e orações, que mesmo longe esteve sempre presente.

A arquiteta Marcia Barreto Ibiapina por toda a ajuda na impressão e preparação dos volumes.

O “exército” de oração em Recife, encabeçado pela Aliane, que continuamente ora por toda a minha família.

Os meus colegas da *Federal Highway Administration*, em especial Richard Meininger por financiar a minha participação no ACI, ASTM e TRB e incentivar a minha atuação como *chair* e secretária de vários comitês destas instituições.

Além disso, os meus agradecimentos especiais a àquele que tudo tornou possível, Jesus, o meu Senhor e Salvador.

*“Insanity: doing the same thing over  
and over again and expecting different  
results.”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

RAMADAN, JUSSARA TANESI. **Contribuição para o Desenvolvimento de Especificações por Desempenho para Concretos com Escória de Alto-Forno.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2010. 319p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2010.

A produção anual de aço em 2008 foi de cerca de 31 milhões de toneladas. O processo siderúrgico gera em média 500 kg de resíduos e co-produtos por tonelada de aço produzido. Desse total, 70% correspondem à geração das escórias.

Investigar a possibilidade de moagem da escória de alto-forno para atender às usinas de concreto e indústrias afins é de vital importância como estratégia de sustentabilidade sócio-ambiental para a cadeia produtiva do aço e do concreto. No entanto, as atuais normas e especificações brasileiras de concreto se apresentam como um obstáculo para isso.

Atualmente, a maioria das especificações de concreto é predominantemente prescritiva com alguns aspectos de desempenho. As especificações prescritivas impedem o uso de soluções mais inovadoras que potencialmente podem resultar em produtos com desempenho comparável ou até melhor do que aqueles que são produzidos de acordo com as especificações prescritivas. A solução para o avanço tecnológico é o uso de especificações por desempenho.

As especificações por desempenho tratam do que se requer do produto e não prescreve como esse produto deve ser produzido. Em outras palavras, ao invés de partirem dos materiais que compõem o concreto, partem do desempenho desejado, deixando a seleção dos materiais, a

dosagem e os métodos construtivos a cargo daqueles que contratualmente devem atender às especificações. Há uma necessidade crescente da inclusão de requisitos de desempenho nas especificações e normas, referentes à durabilidade do concreto, especialmente no que concerne a capacidade de proteção do concreto contra a corrosão da armadura. Isso requer que o desempenho da estrutura, ao longo da sua vida útil, possa ser estimado. Para isso, são necessários modelos de previsão de vida útil que correlacionem os requisitos e subrequisitos de durabilidade, medidos em laboratório por meio de ensaios acelerados, e o desempenho em serviço, obtido por meio de dados nas condições reais.

Este trabalho apresenta um estudo laboratorial em concretos com escória de alto-forno, avalia suas principais propriedades, principalmente as relativas à deterioração referente à armadura. Foram avaliados: a retração, a absorção capilar, a resistência à compressão axial, o módulo de deformação, a carbonatação tanto natural quanto acelerada, a carga passante, a resistividade elétrica e o efeito sinérgico da carbonatação e da penetração de cloretos sobre a corrosão da armadura. Este efeito sinérgico foi avaliado por meio de ensaios cíclicos e a medida da profundidade de penetração de cloretos, da profundidade de carbonatação, da resistividade elétrica e do potencial de circuito aberto.

Com os resultados obtidos neste estudo, verificou-se que a utilização de elevados teores de escória de alto forno, de maneira geral, ou não teve nenhuma influência ou exerceu uma influência positiva sobre as propriedades estudadas, com exceção da retração e da carbonatação acelerada.

Os ensaios cíclicos apresentaram uma maneira de avaliar-se o efeito sinérgico da carbonatação e dos cloretos. Quando todos os resultados de ensaios acelerados cíclicos são comparados observa-se que, de maneira geral, as misturas com CP III-32-RS apresentaram o melhor desempenho no que concerne à corrosão das armaduras. Já os ensaios naturais não foram conclusivos.

Além disso, este trabalho avalia a vida útil potencial desses concretos por meio da aplicação de modelos de previsão de vida útil. Independentemente do modelo utilizado para a previsão da despassivação por cloretos, a vida útil prevista aumentou com o aumento do teor de escória de alto-forno. De maneira geral, vida útil das misturas cresceu na ordem CPE-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória e com o aumento da classe de resistência. No entanto, observou-se que as recomendações da NBR 6118/2003 nem sempre garantem que a durabilidade da estrutura seja necessariamente atingida e não diferenciam misturas cujos desempenhos mostraram-se bem diferentes. As recomendações da NBR 6118/2003 mostraram-se inadequadas para a que uma vida útil mínima aceitável seja atingida.

A partir desta avaliação de desempenho, apresentam-se sugestões para a modificação das especificações e normas brasileiras a fim de que sigam a tendência mundial e passem de prescrição ao desempenho. Diretrizes para a criação de especificações por desempenho de concretos com escória de alto-forno, incluindo sugestões para os requisitos e subrequisitos de desempenho, bem como os aspectos estratégicos, táticos e operacionais de sua implementação no Brasil também são apresentados.

## **ABSTRACT**

**RAMADAN, JUSSARA TANESI. Contribution to the development of performance specifications for concretes containing blast furnace slag.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2010. 319p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2010.

In 2008 alone, the annual steel production in Brazil was around 31 million tons. The steel production process generates an average of 500 kg of residues and co-products per ton of steel. From this total, 70% corresponds to the slags.

Although investigating the increase of blast furnace slag use is of extreme importance for the concrete and steel industries' socio-environmental sustainable strategy, the current Brazilian standards and specifications represent a barrier.

Currently, most concrete specifications are predominantly prescriptive with some performance requirements. Prescriptive specifications prevent the use of innovative solutions that can potentially result in products with comparable or even better performance than those produced according to prescriptive specifications. The solution for the technology progress is the use of performance specifications.

Performance specifications stipulate what is required from the product and do not prescribe how the product should be produced. In other words, they focus on the desired performance rather than on the concrete ingredients, materials selection, proportioning or construction methods.

These are the responsibility of those individuals who contractually have to comply with the specifications.

There is an increasing need to include performance requirements related to durability in specifications and standards, especially those related to reinforcement deterioration. It requires the performance of the structure to be estimated during its service life. It also requires service life prediction models which can correlate the durability requirements, measured through laboratory testing, and the performance in service, obtained from real exposure condition data.

The present thesis presents a laboratory study on concretes containing blast furnace-slag, evaluates their main properties, especially those related to reinforcement deterioration. The following properties were evaluated: shrinkage, capillary absorption, compressive strength, modulus of elasticity, natural and accelerated carbonation, charge passed, electrical resistivity and the synergic effect of carbonation and chloride penetration on the reinforcement corrosion. This synergic effect was evaluated through cyclic testing and the measurement of chloride penetration, carbonation depth, electrical resistivity and open circuit potential.

The results of this study showed that the use of high blast furnace slag contents generally either did not have an impact or had a beneficial impact on the properties studied, with exception of shrinkage and accelerated carbonation.

The cyclic testing presented a way to evaluate the synergic effect of carbonation and chlorides. When all the accelerated cyclic test results are compared, it can be observed that in general the mixtures containing CP III-32-RS presented a better performance regarding reinforcement corrosion. On the other hand, the natural tests did not present any conclusive results.

In addition, this thesis evaluated the potential service life of these concretes through mathematical models. No matter which model was used to predict corrosion initiation due to chloride ingress, the predicted service life increased with the increase of the blast furnace slag content. Generally, the service life of the mixtures increased in the order CPE-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + slag and with the increase of the compressive strength. Nevertheless, it was observed that NBR 6118/2003 recommendations do not always guarantee the structure durability and do not differentiate mixtures that performed considerably differently. NBR 6118/2003 recommendations were identified as inadequate to assure an acceptable service life.

Based on the performance evaluation of the mixtures, changes to the Brazilian specifications and standards were suggested in order to follow the international trend and to move from prescription to performance. Guidelines to develop performance specifications for concretes containing blast furnace slag were presented, including suggestions for the performance requirements and sub-requirements. The strategic, tactic and operational aspects for their implementation in Brazil were presented, as well.

<b>SUMÁRIO</b>	<i>xii</i>
LISTA DE QUADROS	<i>xxii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xxvi</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>xxx</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>xxxviii</i>

## **SUMÁRIO**

<b><u>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>1.1 JUSTIFICATIVA E CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1.1 A IMPORTÂNCIA DO USO DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	2
1.1.2 O CONCEITO DE ESPECIFICAÇÃO POR DESEMPENHO	7
1.1.3 MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL	11
1.1.3.1 Abordagem determinística	13
1.1.3.2 Abordagem probabilística ou estocástica	14
<b><u>1.2 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE DO TRABALHO</u></b>	<b><u>15</u></b>
<b><u>1.3 OBJETIVOS</u></b>	<b><u>16</u></b>
1.3.1 OBJETIVO GERAL	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
<b><u>1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</u></b>	<b><u>16</u></b>
<b><u>CAPÍTULO 2 – ESPECIFICAÇÕES PARA CONCRETO: DA PRESCRIÇÃO TRADICIONAL PARA A ABORDAGEM POR DESEMPENHO</u></b>	<b><u>19</u></b>
<b><u>2.1 PRINCIPAIS CÓDIGOS, NORMAS E ESPECIFICAÇÕES</u></b>	<b><u>19</u></b>

2.1.1	EUA	19
2.1.2	CANADÁ	22
2.1.3	EUROPA	25
2.1.3.1	EN 206-1	25
2.1.3.2	Guia CEB para projeto de estruturas duráveis de concreto (CEB, 1989)	28
2.1.3.3	França	30
2.1.3.4	Itália e Noruega	30
2.1.3.5	Reino Unido	31
2.1.4	BRASIL	33
2.1.4.1	NBR 15.575/2008	33
2.1.4.2	NBR 6118/2003	34
<b>2.2</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO</b>	<b>36</b>
2.2.1	OPORTUNIDADES E DESAFIOS	39
2.2.2	ALGUMAS INICIATIVAS E TENDÊNCIAS	41
<b>CAPÍTULO 3 – MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL</b>		<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>MODELOS DE PREVISÃO DA DESPASSIVAÇÃO POR CLORETOS</b>	<b>46</b>
3.2.1	MODELOS COM BASE NA SEGUNDA LEI DE FICK	48
3.2.1.1	Função de erro de Gauss (ERFC)	48
3.2.1.2	Soluções analíticas $D_{F_2}(t)$ e $C_{sa}(t)$	51
3.2.1.3	Soluções numéricas $D_{F_2}(t)$ e $C_{sa}(t)$	51
3.2.2	MODELOS COM BASE EM EQUAÇÕES DE FLUXO DE ÍONS	52
3.2.2.1	Modelos com base na primeira lei de difusão de Fick, sem convecção	52
3.2.2.2	Modelos com base na primeira lei de difusão de Fick, com convecção	53
3.2.2.3	Modelos físicos com base na equação de fluxo de Nernst-Planck	54
3.2.3	MODELO ANDRADE	55
3.2.4	MODELO BAWEJA <i>ET AL.</i> (1999)	56
<b>3.3</b>	<b>MODELOS DE PREVISÃO DE CARBONATAÇÃO</b>	<b>57</b>

3.3.1	MODELO DA RAIZ QUADRADA DO TEMPO (MODELO USHIDA-HAMADA, 1928)	58
3.3.2	MODELO HÄKKINEN (1993)	59
3.3.3	MODELO ZHANG ET AL. (1997)	60
3.3.4	MODELO PAPADAKIS ET AL. (1991) E PAPADAKIS (2000)	60
3.3.5	MODELO DO CEB (1997)	62
3.3.6	MODELO PROBABILÍSTICO	64
<b><u>CAPÍTULO 4 – MATERIAIS, PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E MÉTODOS</u></b>		<b>67</b>
<b><u>4.1 INTRODUÇÃO</u></b>		<b>67</b>
<b><u>4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS – APÊNDICE A</u></b>		<b>67</b>
4.2.1	MATERIAIS CIMENTÍCIOS	69
4.2.2	AGREGADO MIÚDO	69
4.2.3	AGREGADO GRAÚDO	69
<b><u>4.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL DOS CONCRETOS</u></b>		<b>70</b>
<b><u>4.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS</u></b>		<b>74</b>
4.4.1	CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE	77
4.4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	77
4.4.3	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	78
4.4.4	RETRAÇÃO POR SECAGEM	79
4.4.5	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	80
<b><u>4.5 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DO CONCRETO CONTRA A CORROSÃO DA ARMADURA</u></b>		<b>82</b>
4.5.1	CARBONATAÇÃO ACELERADA	84
4.5.1.1	Condições da câmara de carbonatação	84
4.5.1.2	Idade e procedimento de leitura para determinar a profundidade de carbonatação	85
4.5.2	CARBONATAÇÃO NATURAL	86
4.5.3	CARGA PASSANTE	86
4.5.3.1	Procedimento de ensaio e preparação da amostra	87
4.5.3.2	Célula de voltagem	90

4.5.3.3	Equipamento para aplicação da voltagem e leitura da corrente	90
<b>4.6</b>	<b><u>AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS CÍCLICOS E DE CORROSÃO</u></b>	<b>91</b>
4.6.1	PREPARO DOS CORPOS-DE-PROVA	93
4.6.2	PREPARO DAS BARRAS DE AÇO	94
4.6.3	ENSAIOS NA CONDIÇÃO NATURAL	95
4.6.4	ENSAIOS NA CONDIÇÃO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	96
4.6.5	MONITORAMENTO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS	97
4.6.6	MONITORAMENTO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	98
4.6.7	MEDIDAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO	98
<b>4.7</b>	<b><u>ANÁLISE DOS RESULTADOS</u></b>	<b>99</b>
<b>4.8</b>	<b><u>MODELOS PARA FUTURA DOSAGEM</u></b>	<b>99</b>
<b>4.9</b>	<b><u>MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL</u></b>	<b>99</b>
<b>4.10</b>	<b><u>DIRETRIZES PARA A ESPECIFICAÇÃO POR DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO</u></b>	<b>100</b>
<b><u>CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS –</u></b>		
	<b><u>AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO</u></b>	<b>101</b>
<b>5.1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>101</b>
<b>5.2</b>	<b><u>AVALIAÇÃO DAS SIMILARIDADES DAS MISTURAS EMPREGADAS NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS (ENSAIOS DE CONTROLE)</u></b>	<b>101</b>
<b>5.3</b>	<b><u>AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS</u></b>	<b>106</b>
5.3.1	RETRAÇÃO POR SECAGEM	106
5.3.2	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	118
<b>5.4</b>	<b><u>AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS</u></b>	<b>125</b>
5.4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	125
5.4.2	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	136

<b>5.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</b>	<b>142</b>
------------	---------------------------------------	------------

<b>CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DO CONCRETO CONTRA A CORROSÃO DA ARMADURA</b>		<b>143</b>
--	--	------------

<b>6.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>143</b>
------------	-------------------	------------

<b>6.2</b>	<b>CARBONATAÇÃO</b>	<b>144</b>
------------	---------------------	------------

6.2.1	CARBONATAÇÃO ACELERADA COM 10% DE CO <sub>2</sub>	145
-------	---	-----

6.2.2	CARBONATAÇÃO NATURAL	150
-------	----------------------	-----

<b>6.3</b>	<b>CARGA PASSANTE</b>	<b>155</b>
------------	-----------------------	------------

<b>6.4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</b>	<b>159</b>
------------	---------------------------------------	------------

<b>CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – ENSAIOS CÍCLICOS E DE CORROSÃO</b>		<b>161</b>
---	--	------------

<b>7.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>161</b>
------------	-------------------	------------

<b>7.2</b>	<b>PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS</b>	<b>162</b>
------------	---	------------

7.2.1	ENSAIOS NA CONDIÇÃO NATURAL	162
-------	-----------------------------	-----

7.2.2	ENSAIOS NA CONDIÇÃO ACELERADA	165
-------	-------------------------------	-----

7.2.3	EFEITO SINÉRGICO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS E DA CARBONATAÇÃO	166
-------	--	-----

<b>7.3</b>	<b>PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO</b>	<b>174</b>
------------	-------------------------------------	------------

7.3.1	ENSAIO NA CONDIÇÃO NATURAL	174
-------	----------------------------	-----

7.3.2	ENSAIO NA CONDIÇÃO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	176
-------	--	-----

<b>7.4</b>	<b>RESISTIVIDADE ELÉTRICA</b>	<b>183</b>
------------	-------------------------------	------------

7.4.1	ENSAIO NA CONDIÇÃO NATURAL	184
-------	----------------------------	-----

7.4.2	ENSAIO NA CONDIÇÃO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	188
-------	--	-----

<b>7.5</b>	<b>RESISTIVIDADE POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO OU DE ELETRODO</b>	<b>194</b>
------------	--	------------

7.5.1	ENSAIO NA CONDIÇÃO NATURAL	195
-------	----------------------------	-----

7.5.2	ENSAIO NA CONDIÇÃO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	198
<b>7.6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</b>	<b>207</b>
<b><u>CAPÍTULO 8 – MODELOS EMPÍRICOS PARA DOSAGEM E MODELOS PARA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL</u></b>		<b><u>213</u></b>
<b>8.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>213</b>
<b>8.2</b>	<b>MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS PARA DOSAGEM DE CONCRETOS COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO</b>	<b>214</b>
8.2.1	MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA	214
8.2.2	MODELO EMPÍRICO DE PREVISÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA	216
8.2.3	MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA	217
8.2.4	MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA	218
8.2.5	MODELOS EMPÍRICOS DE PREVISÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA	219
8.2.5.1	A partir da composição da mistura	219
8.2.5.2	A partir da composição da resistência média à compressão e da composição da mistura	220
8.2.6	MODELO EMPÍRICO DE PREVISÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NATURAL A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA	222
8.2.7	MODELO EMPÍRICO DE PREVISÃO DA CARGA PASSANTE AOS 63 DIAS A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA	223
<b>8.3</b>	<b>APLICAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL</b>	<b>224</b>
8.3.1	APLICAÇÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE DESPASSIVAÇÃO POR CARBONATAÇÃO	224
8.3.1.1	Aplicação do modelo da raiz quadrada do tempo (modelo Ushida-Hamada) à carbonatação acelerada	225
8.3.1.2	Aplicação do modelo da raiz quadrada do tempo (modelo Ushida-Hamada) à carbonatação natural	226
8.3.1.3	Aplicação do modelo da raiz quadrada do tempo (modelo Ushida-Hamada) à carbonatação por meio de ensaios cíclicos	229
8.3.2	APLICAÇÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE DESPASSIVAÇÃO POR CLORETOS	231

8.3.2.1	Estimativa do coeficiente de difusão de cloretos	232
8.3.2.1.1	Modelo Luciano e Miltenberger (1999)	232
8.3.2.1.2	Modelo Olek et al. (2002)	235
8.3.2.1.3	Modelo Life-365	236
8.3.2.2	Estimativa da vida útil das misturas por meio da aplicação do Life 365	239
8.3.2.3	Aplicação do modelo de Baweja et al.	242
<b>8.4</b>	<b><u>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</u></b>	<b>244</b>
<b><u>CAPÍTULO 9 – ANÁLISE CRÍTICA DA NBR 6118/2003 E DIRETRIZES PARA O DESENVOLVIMENTO DE ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO</u></b>		<b>247</b>
<b>9.1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>247</b>
<b>9.2</b>	<b><u>UMA ANÁLISE CRÍTICA SOBRE O ENFOQUE PRESCRITIVO DA NBR 6118/2003</u></b>	<b>248</b>
9.2.1	ESTUDO DE CASOS - VIDA ÚTIL ESTIMADA	250
<b>9.3</b>	<b><u>PLANO DE AÇÕES ESTRUTURANTES PARA A CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO</u></b>	<b>253</b>
9.3.1	AÇÕES ESTRUTURANTES EM NÍVEL ESTRATÉGICO	254
9.3.2	AÇÕES ESTRUTURANTES EM NÍVEL TÁTICO	255
9.3.2.1	Mudança das normas vigentes	255
9.3.2.2	Escolha de requisitos e subrequisitos de desempenho	259
9.3.2.2.1	Subrequisitos relacionados com a construtibilidade (propriedades no estado fresco), com a segurança estrutural e com a rigidez estrutural de misturas contendo escória de alto-forno	260
9.3.2.2.2	Subrequisitos relacionados com a durabilidade de misturas contendo escória de alto-forno	260
9.3.2.2.3	Subrequisitos relativos à despassivação da armadura por cloretos	265
9.3.2.2.4	Subrequisitos relativos à despassivação da armadura por carbonatação	268
9.3.2.2.5	Subrequisitos gerais relacionados com a durabilidade	270
9.3.2.2.6	Subrequisitos especiais	272
9.3.3	ESPECIFICAÇÕES HÍBRIDAS	274

9.3.4	AÇÕES ESTRUTURANTES EM NÍVEL OPERACIONAL	276
<b>9.4</b>	<b><u>EXEMPLO DA APLICAÇÃO DE ESPECIFICAÇÃO POR DESEMPENHO</u></b>	<b>277</b>
9.4.1	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	277
9.4.2	ENFOQUE DE ESPECIFICAÇÃO POR DESEMPENHO	277
<b>9.5</b>	<b><u>CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO</u></b>	<b>283</b>
<b><u>CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES</u></b>		<b>285</b>
<b>10.1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>285</b>
<b>10.2</b>	<b><u>AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO</u></b>	<b>285</b>
10.2.1	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	286
10.2.2	PROPRIEDADES RELACIONADAS COM MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DA ARMADURA	287
10.2.2.1	Ensaio naturais e acelerados de carbonatação	287
10.2.2.2	Ensaio cíclicos acelerados em câmara de carbonatação e de névoa salina	288
<b>10.3</b>	<b><u>ESPECIFICAÇÃO POR DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO</u></b>	<b>291</b>
<b>10.4</b>	<b><u>PESQUISAS FUTURAS</u></b>	<b>296</b>
10.4.1	MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL	296
10.4.2	MÉTODOS DE ENSAIOS	297
10.4.3	CRITÉRIOS	298
<b><u>REFERÊNCIAS</u></b>		<b>301</b>
<b><u>APÊNDICES E ANEXO (CR-Rom)</u></b>		
<b><u>APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</u></b>		
<b>A.1</b>	<b><u>MATERIAIS CIMENTÍCIOS</u></b>	
<b>A.2</b>	<b><u>AGREGADO MIÚDO – AREIA</u></b>	

### **A.3 AGREGADO GRAÚDO – BRITA Nº 0 E BRITA Nº1**

## **APÊNDICE B – MODELOS EMPÍRICOS PARA A PREVISÃO DE PROPRIEDADES: REGRESSÕES MATEMÁTICAS**

### **B.1 INTRODUÇÃO**

### **B.2 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

- B.2.1 RETRAÇÃO AOS 42 DIAS
- B.2.2 RETRAÇÃO AOS 140 DIAS
- B.2.3 RETRAÇÃO AOS 365 DIAS

### **B.3 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

### **B.4 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 63 DIAS A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

### **B.5 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO AOS 28 DIAS A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

### **B.6 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA AOS 91 DIAS A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

### **B.7 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA A PARTIR DA RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO E DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

### **B.8 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NATURAL A UM ANO, A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

### **B.9 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DO COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

### **B.10 MODELO EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA CARGA PASSANTE AOS 63 DIAS A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA**

**ANEXO A – ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE APARENTE DE DIFUSÃO DE  
CLORETOS (ASTM C 1556-04)**

**1. INTRODUÇÃO**

**2. CORPOS-DE-PROVA**

**3. PROCEDIMENTO**

**4. CÁLCULO**

## **LISTA DE QUADROS**

### **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

QUADRO 1. 1 - TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO ADMITIDOS POR NORMAS DE CIMENTO NO BRASIL.	5
QUADRO 1. 2 - REFERÊNCIA DE NORMAS BRASILEIRAS EM RELAÇÃO AO EMPREGO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO EM CONCRETO.	6
QUADRO 1. 3 - NORMAS DE CIMENTO DE DIFERENTES PAÍSES E OS RESPECTIVOS TEORES MÁXIMOS DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO PERMITIDOS.	6

### **CAPÍTULO 2 – ESPECIFICAÇÕES PARA CONCRETO: DA PRESCRIÇÃO TRADICIONAL PARA A ABORDAGEM POR DESEMPENHO**

QUADRO 2. 1 - RECOMENDAÇÕES DO ACI 318 PARA CONCRETOS EM CONDIÇÕES ESPECIAIS DE EXPOSIÇÃO (ACI, 2008B).	21
QUADRO 2. 2 - COBRIMENTOS MÍNIMOS PARA CONCRETO ARMADO (ACI, 2008B).	21
QUADRO 2. 3 - MÉTODOS ALTERNATIVOS DE ESPECIFICAÇÃO DE CONCRETO DA CSA A 23.1 (CSA, 2004A).	23
QUADRO 2. 4 - CLASSES DE EXPOSIÇÃO DA CSA A 23.1 (CSA, 2004A).	24
QUADRO 2. 5 - REQUISITOS DE DESEMPENHO DAS ESPECIFICAÇÕES DAS PROVÍNCIAS NO CANADÁ PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (BICKLEY ET AL., 2006).	25
QUADRO 2. 6 - CLASSES DE EXPOSIÇÃO DA EN 206-1 (EUROCODE, 2000).	26

QUADRO 2. 7 - CLASSE DE EXPOSIÇÃO XC: CORROSÃO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO (EUROCODE, 2000).	27
QUADRO 2. 8 - CLASSE DE EXPOSIÇÃO XS: CORROSÃO DA ARMADURA DEVIDO AO ATAQUE DE CLORETOS PROVENIENTES DA ÁGUA DO MAR (EUROCODE, 2000).	27
QUADRO 2. 9 - CLASSES DE EXPOSIÇÃO DO CONCRETO, SEGUNDO O GUIA DE PROJETO DE CEB (1989).	29
QUADRO 2. 10 - RECOMENDAÇÕES DE DURABILIDADE SEGUNDO O GUIA DE PROJETO DO CEB (1989).	29
QUADRO 2. 11 - COBRIMENTO DE ARMADURA MÍNIMO (CMIN), SEGUNDO O CEB/FIP MODEL CODE (CEB, 1990).	30
QUADRO 2. 12 - CLASSES DE DURABILIDADE POTENCIAL COM RESPEITO À CORROSÃO DAS ARMADURAS E AOS LIMITES ASSOCIADOS AO REQUISITO DE DURABILIDADE, PARA CONCRETOS CURADOS EM ÁGUA POR 90 DIAS OU MENOS (BOROGHEL-BOUNY, 2004).	31
QUADRO 2. 13 - CINCO ABORDAGENS PARA A ESPECIFICAÇÃO DE CONCRETO DE ACORDO COM A BS 8500-2006 (BICKLEY ET AL. 2006).	32
QUADRO 2. 14 – VIDA ÚTIL MÍNIMA PARA SISTEMAS E SUBSISTEMAS DE EDIFICAÇÕES, SEGUNDO A NBR 15.575 (ABNT, 2008).	34
QUADRO 2. 15 - CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL DA NBR 6118/2003 (ABNT, 2003B).	34
QUADRO 2. 16 - CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DA NBR 6118/2003 (ABNT, 2003B).	35
QUADRO 2. 17 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E QUALIDADE DO CONCRETO DA NBR 6118/2003 (ABNT, 2003B).	36
QUADRO 2. 18 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE NÍVEL DE AGRESSIVIDADE E COBRIMENTO NOMINAL DA NBR 6118/2003 (ABNT, 2003B).	36
QUADRO 2. 19 – DEFINIÇÕES DE ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO, SEGUNDO DIFERENTES NORMAS E DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA.	38

### **CAPÍTULO 3 – MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL**

QUADRO 3. 1- USO DE MODELOS PARA A PREVISÃO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS (NILSSON, 2005).	47
QUADRO 3. 2 – VALORES DE K1 EM FUNÇÃO DO TIPO DE CIMENTO (ANDRADE, 2001).	55
QUADRO 3. 3 – VALORES DE K2 EM FUNÇÃO DO TIPO DE ADIÇÃO (ANDRADE, 2001).	56
QUADRO 3. 4 – PARÂMETROS DO MODELO DE CARBONATAÇÃO DO CEB (CEB, 1997).	64

## **CAPÍTULO 4 – MATERIAIS, PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E MÉTODOS**

QUADRO 4. 1 - MODELO DE AJUSTES PARA AS EQUAÇÕES DAS CURVAS PARA OS DIAGRAMAS DE DOSAGEM.	73
QUADRO 4. 2 - TRAÇOS, EM MASSA, UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS EM ESTUDO.	74
QUADRO 4. 3 - DOSAGEM DO CONCRETO: FATORES E VARIÁVEIS.	75
QUADRO 4. 4 - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS: FATORES E VARIÁVEIS.	75
QUADRO 4. 5 - NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA (CPS) E/OU LEITURA EXECUTADA NOS ENSAIOS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS (RETRAÇÃO POR SECAGEM E ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE).	76
QUADRO 4. 6 - NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA (CPS) E/OU LEITURA EXECUTADA NOS ENSAIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE DEFORMAÇÃO).	77
QUADRO 4. 7 - CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DO CONCRETO CONTRA A CORROSÃO DA ARMADURA - FATORES E VARIÁVEIS.	82
QUADRO 4. 8 - NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA E/OU LEITURAS EXECUTADAS NOS ENSAIOS DE DURABILIDADE (PENETRAÇÃO DE CLORETOS, CARBONATAÇÃO ACELERADA 10%).	83
QUADRO 4. 9 - NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA (CPS) E/OU LEITURAS EXECUTADAS NOS ENSAIOS DE DURABILIDADE (CORROSÃO DE ARMADURAS).	89
QUADRO 4. 10 - AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO CONCRETO SEGUNDO A ASTM 1202 (ASTM, 2005D).	91
QUADRO 4. 11 – ENSAIOS CÍCLICOS E DE CORROSÃO DA ARMADURA: FATORES E VARIÁVEIS.	92

## **CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO**

QUADRO 5. 1– ETAPAS DE PRODUÇÃO DE CONCRETO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.	102
---	-----

## **CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DO CONCRETO CONTRA A CORROSÃO**

QUADRO 6. 1 – CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> EM CÂMARA DE CARBONATAÇÃO DE ALGUMAS PESQUISAS.	155
---	-----

## **CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – ENSAIOS CÍCLICOS E DE CORROSÃO**

QUADRO 7. 1 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO DE ACORDO COM OS CRITÉRIOS DO CEB 192 (CEB, 1989). 184

QUADRO 7. 2 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS ( ASTM C 876/1999). 194

**CAPÍTULO 9 – ANÁLISE CRÍTICA DA NBR 6118/2003 E DIRETRIZES PARA O DESENVOLVIMENTO DE ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

QUADRO 9. 1- MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA A ESPECIFICAÇÃO DE CONCRETO, COM BASE NA CSA A23.1-04 (CSA, 2004A). 257

QUADRO 9. 2– CLASSES DE EXPOSIÇÃO PROPOSTAS. 258

QUADRO 9. 3 – SUBREQUISITOS DE DESEMPENHO RELACIONADOS COM A DURABILIDADE QUE POSSUEM MODELOS MATEMÁTICOS PARA A PREVISÃO DA VIDA ÚTIL. 274

## LISTA DE TABELAS

### **CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO**

TABELA 5. 1–	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 28 DIAS DOS CONCRETOS EM CADA ETAPA DE PRODUÇÃO.	103
TABELA 5. 2 –	RESULTADO MÉDIO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS IDADES DE 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DIAS DE IDADE PARA CLASSE DE RESISTÊNCIA C20.	106
TABELA 5. 3 –	RESULTADO MÉDIO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS IDADES DE 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DIAS DE IDADE PARA CLASSE DE RESISTÊNCIA C30.	107
TABELA 5. 4 –	RESULTADO MÉDIO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS IDADES DE 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DIAS DE IDADE PARA CLASSE DE RESISTÊNCIA C35.	107
TABELA 5. 5 –	RESULTADO MÉDIO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS IDADES DE 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DIAS DE IDADE PARA CLASSE DE RESISTÊNCIA C40.	108
TABELA 5. 6 -	RESULTADOS DE ANOVA E TESTE DE DUNCAN PARA A VARIÁVEL RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DE IDADE PARA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO C20, COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO (N=3).	109
TABELA 5. 7 -	RESULTADOS DE ANOVA E TESTE DE DUNCAN PARA A VARIÁVEL RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DE IDADE PARA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO C30, COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO (N=3).	110
TABELA 5. 8 -	RESULTADOS DE ANOVA E TESTE DE DUNCAN PARA A VARIÁVEL RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DE IDADE PARA	

	CLASSE DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO C35, COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO (N=3).	111
TABELA 5. 9 -	RESULTADOS DE ANOVA E TESTE DE DUNCAN PARA A VARIÁVEL RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 E 365 DE IDADE PARA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO C40, COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO (N=3).	112
TABELA 5. 10 –	RESULTADO MÉDIO DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE E ALTURA DE ASCENSÃO CAPILAR AOS 63 DIAS DE IDADE PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO.	119
TABELA 5. 11–	RESULTADO MÉDIO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL NAS IDADES DE 7, 28 E 63 DIAS DE IDADE PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO.	126
TABELA 5. 12-	RESULTADOS DE ANOVA E TESTE A POSTERIORI DE DUNCAN PARA A VARIÁVEL RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO (N=4).	127
TABELA 5. 13 –	RESULTADO MÉDIO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO.	137
TABELA 5. 14 -	RESULTADOS DE ANOVA E TESTE A POSTERIORI DE DUNCAN PARA A VARIÁVEL MÓDULO DE DEFORMAÇÃO AOS 28 DIAS DE IDADE, COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO (N=3).	138
TABELA 5. 15 -	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTIMADO PELA NBR 6118/2003 (ABNT, 2003B), PELO ACI 318-08 (ACI, 2008B), PELO CEB MODEL FIP-90 (CEB, 1993) (E PELA CSA A 23.3 (CSA, 2004B).	140

## **CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DO CONCRETO CONTRA A CORROSÃO DA ARMADURA**

TABELA 6. 1 -	RESULTADOS EXPERIMENTAIS MÉDIOS DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA (10% DE CO <sub>2</sub> ) PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO.	146
TABELA 6. 2 -	RESULTADOS DE ANOVA PARA A VARIÁVEL CARBONATAÇÃO ACELERADA COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO.	147
TABELA 6. 3 –	RESULTADO DA CARBONATAÇÃO NATURAL (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO (BOURGUIGNON, 2004).	151
TABELA 6. 4 -	RESULTADOS DE ANOVA PARA A CARBONATAÇÃO COM FATOR DE VARIAÇÃO - MATERIAL CIMENTÍCIO.	152
TABELA 6. 5 –	RESULTADO MÉDIO DA CARGA PASSANTE PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO.	156

## **CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – ENSAIOS CÍCLICOS E DE CORROSÃO**

TABELA 7. 1 – PROFUNDIDADE (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) DE PENETRAÇÃO NATURAL DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS) (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO NA ETAPA DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS.	163
TABELA 7. 2 – RESULTADO DA PENETRAÇÃO DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS) (MÉDIA E DESVIO PADRÃO), APÓS OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO.	163
TABELA 7. 3 – RESULTADOS DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NATURAL (MÉDIA E DESVIO PADRÃO) PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO.	174
TABELA 7. 4 – RESULTADO DA CARBONATAÇÃO ACELERADA (MÉDIA E DESVIO PADRÃO), PARA OS CONCRETOS EM ESTUDO, APÓS OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	177
TABELA 7. 5 – RESULTADO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONCRETOS DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	188
TABELA 7. 6 – RESULTADO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CONCRETOS DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO E ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 20 MM.	198
TABELA 7. 7 – RESULTADO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CONCRETOS DURANTE OS CICLOS DE EXPOSIÇÃO E ESPESSURA DE COBRIMENTO DE 30 MM.	199

## **CAPÍTULO 8 – MODELOS EMPÍRICOS PARA DOSAGEM E MODELOS PARA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL**

TABELA 8. 1 – ÍNDICES DA REGRESSÃO QUADRÁTICA PARA A PREVISÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM A PARTIR DA COMPOSIÇÃO DA MISTURA.	215
TABELA 8. 2 – ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA A 10% DE CO <sub>2</sub> PARA AS CLASSES DE CONCRETO EM ESTUDO.	221
TABELA 8. 3 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO ACELERADO.	226
TABELA 8. 4 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL.	227
TABELA 8. 5 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA POR MEIO DE CICLOS DE ENVELHECIMENTO (ENSAIOS CÍCLICOS).	230
TABELA 8. 6 - FAIXA DA PROPORÇÃO DAS MISTURAS UTILIZADAS NO MODELO LUCIANO E MILTENBERGER (1999).	233
TABELA 8. 7 – COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETO PREVISTO AOS 63 DIAS POR LUCIANO E MILTENBERGER (1999).	234
TABELA 8. 8– COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETO AOS 63 DIAS PREVISTO POR OLEK ET AL. (2002).	236

TABELA 8. 9 –	COEFICIENTE DE DIFUSÃO AOS 28 DIAS ESTIMADO POR LIFE 365 , LUCIANO E MILTENBERGER (1999) E OLEK ET AL. (2002).	238
TABELA 8. 10 –	VIDA ÚTIL ESTIMADA POR MEIO DA APLICAÇÃO DO MODELO LIFE 365 PARA OS TRÊS ESTUDOS DE CASO.	241
TABELA 8. 11 –	VIDA ÚTIL ESTIMADA PELO LIFE 365 USANDO O COEFICIENTE DE DIFUSÃO AOS 28 DIAS ESTIMADO POR LUCIANO E MILTENBERGER (1999) E OLEK ET AL. (2002) PARA O ESTUDO DE CASO 3.	242
TABELA 8. 12 –	COBRIMENTO MÍNIMO PARA VIDA ÚTIL DE 50 ANOS EM AMBIENTE MARINHO.	243

**CAPÍTULO 9 – ANÁLISE CRÍTICA DA NBR 6118/2003 E DIRETRIZES PARA O DESENVOLVIMENTO DE ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

TABELA 9. 1 –	VIDA ÚTIL PREVISTA COM BASE NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.	252
TABELA 9. 2 –	COEFICIENTE DE DIFUSÃO MÁXIMO AOS 28 DIAS PREVISTO PELO LIFE-365 PARA COBRIMENTO MÍNIMO DA NBR 6118/2003 (ABNT, 2003B).	280
TABELA 9. 3 –	COEFICIENTE DE DIFUSÃO MÁXIMO AOS 28 DIAS PREVISTO PELO LIFE-365 PARA COBRIMENTO MÍNIMO DE 40 MM PARA VIGAS E PILARES.	281
TABELA 9. 4 –	SUMÁRIO DOS SUBREQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO PARA O EXEMPLO APRESENTADO.	282

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

FIGURA 1.1 -	RELAÇÃO ENTRE DURABILIDADE E DESEMPENHO (CEB, 1992)	13
--------------	---	----

### CAPÍTULO 4 – MATERIAIS, PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E MÉTODOS

FIGURA 4. 1 –	ETAPAS DA PESQUISA.	68
FIGURA 4. 2 –	DIAGRAMA DE DOSAGEM AOS 28 DIAS PARA O CIMENTO CP II-E-32 (BOURGUIGNON, 2004).	71
FIGURA 4. 3 –	DIAGRAMA DE DOSAGEM AOS 28 DIAS PARA O CIMENTO CP III-32-RS (BOURGUIGNON, 2004).	72
FIGURA 4. 4 –	DIAGRAMA DE DOSAGEM AOS 28 DIAS PARA A MISTURA, EM MASSA, DE 50% DE CIMENTO CP III-32-RS + 50% DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO MOÍDA (BOURGUIGNON, 2004).	72
FIGURA 4. 5 –	CORPO-DE-PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	78
FIGURA 4. 6 –	CORPO-DE-PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.	79
FIGURA 4. 7 –	ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE: A) CORPOS-DE-PROVA DISPOSTOS SOBRE UMA LÂMINA D'ÁGUA; B) PESAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA PARA VERIFICAÇÃO DA CONSTÂNCIA DE MASSA.	81
FIGURA 4. 8 –	ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE: A) ROMPIMENTO PARA LEITURA DA ALTURA DE ASCENSÃO CAPILAR; B) ALTURA ASCENSÃO CAPILAR DOS CORPOS-DE-PROVA.	81
FIGURA 4. 9 –	CÂMARA DE CARBONATAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS.	85

FIGURA 4. 10 – DETALHE DO CORPO-DE-PROVA MARCADO NAS POSIÇÕES A SEREM SECCIONADAS TRANSVERSALMENTE PARA POSTERIOR MEDIDA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (COELHO, 2002).	86
FIGURA 4. 11 – (A) AMOSTRAS DE CONCRETO REVESTIDAS COM SELANTE PARA SEREM SUBMETIDAS À SATURAÇÃO A VÁCUO. (B) AMOSTRAS DE CONCRETO SENDO SUBMETIDAS À SATURAÇÃO A VÁCUO.	88
FIGURA 4. 12 – (A) MONTAGEM DAS CÉLULAS DE DIFUSÃO. (B) APLICAÇÃO DA DIFERENÇA DE POTENCIAL AO SISTEMA DE CÉLULAS.	89
FIGURA 4. 13 - (A) CÉLULA PARA ENSAIO DE CARGA PASSANTE EM ACRÍLICO 150 MM X 150 MM X 50 MM; (B) CONTATO ELÉTRICO.	90
FIGURA 4. 14 – FONTE E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS – DATALOGGER.	91
FIGURA 4. 15 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CORPOS-DE-PROVA DE CORROSÃO UTILIZADOS NO ENSAIO DE CORROSÃO DAS ARMADURAS: CORPO-DE-PROVA (A) 70 MM X 150 MM X 150MM E (B) 90 MM X 150 MM X 150MM.	94
FIGURA 4. 16 - ESQUEMA DE ENVELHECIMENTO ACELERADO PROPOSTO.	97

## **CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO**

FIGURA 5. 1 – CURVA DE AJUSTE CORRESPONDENTE AO INTERVALO DE CONFIANÇA EXPERIMENTAL DAS QUATRO ETAPAS DE PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA O MATERIAL CIMENTÍCIO CP II-E-32.	104
FIGURA 5. 2 – CURVA DE AJUSTE DE RESULTADOS CORRESPONDENTE AO INTERVALO DE CONFIANÇA EXPERIMENTAL DAS QUATRO ETAPAS DE PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA O MATERIAL CIMENTÍCIO CP III-32-RS.	104
FIGURA 5. 3 – CURVA DE AJUSTE DE RESULTADOS OBTIDOS EM RELAÇÃO AO INTERVALO DE CONFIANÇA EXPERIMENTAL DAS QUATRO ETAPAS DE PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA O MATERIAL CIMENTÍCIO CP III-32-RS +ESCÓRIA.	105
FIGURA 5. 4 – RETRAÇÃO DAS MISTURAS DE CLASSE C20 EM FUNÇÃO DA IDADE.	113
FIGURA 5. 5 - RETRAÇÃO DAS MISTURAS DE CLASSE C30 EM FUNÇÃO DA IDADE.	113
FIGURA 5. 6 - RETRAÇÃO DAS MISTURAS DE CLASSE C35 EM FUNÇÃO DA IDADE.	114
FIGURA 5. 7 - RETRAÇÃO DAS MISTURAS DE CLASSE C40 EM FUNÇÃO DA IDADE.	114
FIGURA 5. 8 - RETRAÇÃO DAS MISTURAS AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE PASTA.	116
FIGURA 5. 9 - RETRAÇÃO DAS MISTURAS AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DA ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	117

FIGURA 5. 10 – CURVAS DE TENDÊNCIA DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE MÉDIA AOS 63 DIAS EM FUNÇÃO DAS CLASSES DOS CONCRETOS ESTUDADAS, PARA OS TRÊS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	120
FIGURA 5. 11 - CURVAS DE TENDÊNCIA DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE MÉDIA AOS 63 DIAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE PASTA, PARA OS TRÊS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	121
FIGURA 5. 12 - CURVAS DE TENDÊNCIA DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE MÉDIA AOS 63 DIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS, PARA OS TRÊS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	122
FIGURA 5. 13 - CURVAS DE TENDÊNCIA DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE MÉDIA AOS 63 DIAS EM FUNÇÃO DO TEOR DE ESCÓRIA NA MISTURA, PARA CADA CLASSE DE RESISTÊNCIA.	123
FIGURA 5. 14 – CURVAS DE TENDÊNCIA DA ALTURA DE ASCENSÃO CAPILAR MÉDIA AOS 63 DIAS EM FUNÇÃO DAS CLASSES DOS CONCRETOS ESTUDADAS, PARA OS TRÊS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	124
FIGURA 5. 15 – CURVAS DE TENDÊNCIA DA ALTURA DE ASCENSÃO MÉDIA AOS 63 DIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS, PARA OS TRÊS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	124
FIGURA 5. 16 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA OS MATERIAIS CIMENTÍCIOS CP II-E-32, CP III-32-RS E CP III-32-RS + ESCÓRIA, PARA A CLASSE C20.	128
FIGURA 5. 17 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA OS MATERIAIS CIMENTÍCIOS CP II-E-32, CP III-32-RS E CP III-32-RS + ESCÓRIA, PARA A CLASSE C30.	130
FIGURA 5. 18 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA OS MATERIAIS CIMENTÍCIOS CP II-E-32, CP III-32-RS E CP III-32-RS + ESCÓRIA, PARA A CLASSE C35.	131
FIGURA 5. 19 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA OS MATERIAIS CIMENTÍCIOS CP II-E-32, CP III-32-RS E CP III-32-RS + ESCÓRIA, PARA A CLASSE C40.	132
FIGURA 5. 20 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA AS CLASSES C20, C30, C35 E C40, PARA O MATERIAL CIMENTÍCIO CP II-E-32.	133
FIGURA 5. 21 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA AS CLASSES C20, C30, C35 E C40, PARA O MATERIAL CIMENTÍCIO CP III-32-RS.	133
FIGURA 5. 22 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA AS CLASSES C20, C30, C35 E C40, PARA O MATERIAL CIMENTÍCIO CP III-32-RS+ESCÓRIA.	134
FIGURA 5. 23 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS AOS 7 DIAS DE IDADE, PARA OS TRÊS TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS, EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/ MATERIAL CIMENTÍCIO.	135
FIGURA 5. 24 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS AOS 28 DIAS DE IDADE, PARA OS TRÊS TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS, EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/ MATERIAL CIMENTÍCIO.	135

FIGURA 5. 25 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS AOS 63 DIAS DE IDADE, PARA OS TRÊS TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS, EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/ MATERIAL CIMENTÍCIO.	136
FIGURA 5. 26 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO PARA OS CONCRETOS DAS CLASSES 20, 30, 35 E 40 PARA OS TRÊS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	140
FIGURA 5. 27 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTIMADO E MEDIDO EXPERIMENTALMENTE.	141

## **CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DO CONCRETO CONTRA A CORROSÃO DA ARMADURA**

FIGURA 6. 1 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA AOS 91 DIAS, EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS.	148
FIGURA 6. 2 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA AOS 91 DIAS, EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA-MATERIAL CIMENTÍCIO.	149
FIGURA 6. 3 – CARBONATAÇÃO ACELERADA DOS TRAÇOS: (A) C20CPIIE, C20CPIII E C20CPIII+ESCÓRIA E (B) C30CPIIE, C30CPIII E C30CPIII+ESCÓRIA.	149
FIGURA 6. 4 – CARBONATAÇÃO ACELERADA DOS TRAÇOS: (A) C35CPIIE, C35CPIII E C35CPIII+ESCÓRIA E (B) C40CPIIE, C40CPIII E T12 C40CPIII+ESCÓRIA.	150
FIGURA 6. 5 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NATURAL AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA.	153
FIGURA 6. 6 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NATURAL AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	153
FIGURA 6. 7 – CARGA PASSANTE AOS 28 DIAS DE IDADE, PARA AS CLASSES DE CONCRETOS ESTUDADAS, PARA OS TRÊS TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	157
FIGURA 6. 8 – CARGA PASSANTE AOS 63 DIAS DE IDADE, PARA AS CLASSES DE CONCRETOS ESTUDADAS, PARA OS TRÊS TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	158

## **CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – ENSAIOS CÍCLICOS E DE CORROSÃO**

FIGURA 7. 1 – PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO NATURAL DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS) AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DA CLASSE REAL DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO.	164
FIGURA 7. 2 – PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO NATURAL DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS) AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO.	164
FIGURA 7. 3 – PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (CP- ARGAMASSA DE REFERÊNCIA, EAF50 – ARGAMASSA COM	

	50% DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO, EAF50 – ARGAMASSA COM 70% DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO) (SAEKI, 2002).	167
FIGURA 7. 4 –	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA OS CONCRETOS DE CLASSE C20.	169
FIGURA 7. 5 –	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA OS CONCRETOS DE CLASSE C30.	169
FIGURA 7. 6 –	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS) EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA OS CONCRETOS DE CLASSE C40.	170
FIGURA 7. 7 –	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO, APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO, DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS), EM FUNÇÃO DA CLASSE REAL DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO.	171
FIGURA 7. 8 –	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO, APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO, DE PRECIPITADOS BRANCOS (CLORETOS OU CARBONATOS), EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO.	172
FIGURA 7. 9 –	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NATURAL AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA REAL.	175
FIGURA 7. 10 –	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NATURAL AOS 365 DIAS EM FUNÇÃO DA CLASSE DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO.	176
FIGURA 7. 11–	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA OS TRAÇOS C20CPIIE, C20CPIII E C20CPIII+E EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	178
FIGURA 7. 12 –	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA OS TRAÇOS C30CPIIE, C30CPIII E C30CPIII+E EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	178
FIGURA 7. 13 –	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA OS TRAÇOS C40CPIIE, C40CPIII E C40CPIII+E EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	179
FIGURA 7. 14 –	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO, APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO, EM FUNÇÃO DA CLASSE REAL DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO.	180
FIGURA 7. 15 –	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO, APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO, EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAL CIMENTÍCIO.	180

FIGURA 7. 16 – CARBONATAÇÃO E ATAQUE DE CLORETOS DO CONCRETO C20: (A) AOS 365 DIAS, ANTES DOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO; (B) APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	182
FIGURA 7. 17 – CARBONATAÇÃO E ATAQUE DE CLORETOS DO CONCRETO C30: (A) AOS 365 DIAS, ANTES DOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO; (B) APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	182
FIGURA 7. 18 – CARBONATAÇÃO E ATAQUE DE CLORETOS DO CONCRETO C40: (A) AOS 365 DIAS, ANTES DOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO; (B) APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.	183
FIGURA 7. 19 – RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA A CLASSE C20 COM DIFERENTES MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	185
FIGURA 7. 20 - RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA A CLASSE C30 COM DIFERENTES MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	185
FIGURA 7. 21 - RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA A CLASSE C40 COM DIFERENTES MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	186
FIGURA 7. 22 – RELAÇÃO ENTRE CARGA PASSANTE AOS 63 DIAS E A RESISTIVIDADE ELÉTRICA AOS 63 DIAS.	187
FIGURA 7. 23 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DURANTE A EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS TRAÇOS T1 (C20CPIIE), T2 (C20CPIII) E T3 (C20CPIII+ESCÓRIA).	189
FIGURA 7. 24 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DURANTE A EXPOSIÇÃO DOS TRAÇOS T3 (C30CPIIE), T4 (C30CPIII) E T5 (C30CPIII+ESCÓRIA) AOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO.	189
FIGURA 7. 25 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DURANTE A EXPOSIÇÃO DOS TRAÇOS T10 (C40CPIIE), T11 (C40CPIII) E T12 (C40CPIII+ESCÓRIA) AOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO.	190
FIGURA 7. 26 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO EM FUNÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	193
FIGURA 7. 27 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	193
FIGURA 7. 28 – POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO (ECS) E PROBABILIDADE DE CORROSÃO PARA OS TRAÇOS T1 (C20CPIIE), T2 (C20CPIII) E T3 (C20CPIII+ESCÓRIA) ENTRE 63 E 365 DIAS DE IDADE.	196
FIGURA 7. 29 – RESULTADOS DO POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO (ECS) E PROBABILIDADE DE CORROSÃO PARA OS TRAÇOS T4 (C30CPIIE), T5 (C30CPIII) E T6 (C30CPIII+ESCÓRIA) NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 63 DIAS E 365 DIAS DE IDADE.	197
FIGURA 7. 30 – POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO (ECS) E PROBABILIDADE DE CORROSÃO PARA OS TRAÇOS T10 (C40CPIIE), T11 (C40CPIII) E T12 (C40CPIII+ESCÓRIA) ENTRE 63 E 365 DIAS DE IDADE.	197

FIGURA 7. 31 – POTENCIAL DE CORROSÃO DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS TRAÇOS T1 (C20CPIIE); T2 (C20CPIII) E T3 (C20CPIII+ESCÓRIA) E COBRIMENTO 20 MM.	200
FIGURA 7. 32 – POTENCIAL DE CORROSÃO DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS TRAÇOS T4 (C20CPIIE); T5 (C20CPIII) E T6 (C20CPIII+ESCÓRIA) E COBRIMENTO 20 MM.	200
FIGURA 7. 33 – POTENCIAL DE CORROSÃO DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS TRAÇOS T10 (C40CPIIE); T11 (C40CPIII) E T12 (C40CPIII+ESCÓRIA) E COBRIMENTO 20 MM.	201
FIGURA 7. 34 – POTENCIAL DE CORROSÃO DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS TRAÇOS T1 (C20CPIIE); T2 (C20CPIII) E T3 (C20CPIII+ESCÓRIA) E COBRIMENTO 30 MM.	202
FIGURA 7. 35 – POTENCIAL DE CORROSÃO DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS TRAÇOS T4 (C20CPIIE); T5 (C20CPIII) E T6 (C20CPIII+ESCÓRIA) E COBRIMENTO 30 MM.	202
FIGURA 7. 36 – POTENCIAL DE CORROSÃO DURANTE OS CICLOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS TRAÇOS T10 (C40CPIIE); T11 (C40CPIII) E T12 (C40CPIII+ESCÓRIA) E COBRIMENTO 30 MM.	203
FIGURA 7. 37 – POTENCIAL DE CORROSÃO PARA O COBRIMENTO DE 20 MM APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO EM FUNÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA REAL DO CONCRETO.	205
FIGURA 7. 38 – POTENCIAL DE CORROSÃO PARA O COBRIMENTO DE 30 MM APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO EM FUNÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA REAL DO CONCRETO.	205
FIGURA 7. 39 – POTENCIAL DE CORROSÃO PARA O COBRIMENTO DE 20 MM APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	206
FIGURA 7. 40 – POTENCIAL DE CORROSÃO PARA O COBRIMENTO DE 30 MM APÓS O QUINTO CICLO DE ENVELHECIMENTO EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	207

## **CAPÍTULO 8 – MODELOS EMPÍRICOS PARA DOSAGEM E MODELOS PARA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL**

FIGURA 8. 1 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ACELERADA A 10% AOS 91 DIAS, PARA OS CONCRETOS DAS CLASSES 20, 30, 35 E 40 DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	222
FIGURA 8. 2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO ACELERADA A 10% CO <sub>2</sub> (KACELERADO) E COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO NATURAL (KNATURAL).	228

- FIGURA 8. 3 – RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO OBTIDO POR MEIO DO ENVELHECIMENTO ACELERADO (ENSAIOS CÍCLICOS DESCRITOS NO CAPÍTULO 7) E DO ENSAIO ACELERADO DE CARBONATAÇÃO (CAPÍTULO 6). 230
- FIGURA 8. 4 – CDC AOS 63 DIAS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO ÁGUA/MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA CADA MATERIAL CIMENTÍCIO. LIMITES DE DURABILIDADE SEGUNDO (BOROGHEL-BOUNY, 2004) 235

**CAPÍTULO 9 – ANÁLISE CRÍTICA DA NBR 6118/2003 E DIRETRIZES PARA O DESENVOLVIMENTO DE ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

- FIGURA 9. 1 – PLANO DE AÇÕES ESTRUTURANTES EM NÍVEL ESTRATÉGICO, TÁTICO E OPERACIONAL PARA CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES POR DESEMPENHO PARA O CONCRETO. 253
- FIGURA 9. 2– DIAGRAMA PARA A SELEÇÃO DE SUBREQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO RELACIONADOS COM A DURABILIDADE. 262
- FIGURA 9. 3– DIAGRAMA PARA A OBTENÇÃO DOS SUBREQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO RELACIONADOS COM A DURABILIDADE PARA O EXEMPLO 279

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$  = retração por secagem

$\Phi$  = campo elétrico

$\Delta$  = distância estatística

$\Psi$  = parâmetro para as condições do micro-clima, que descreve a molhagem e secagem

$\delta\Phi/\delta x$  = gradiente de potencial elétrico

$\rho_c$  = densidade do cimento

$\varepsilon_c$  = porosidade do concreto carbonatado

$f_{cm}$  = resistência à compressão média aos 28 dias

$\rho_p$  = densidade da adição mineral

$\rho_w$  = densidade da água

$a/mc$  = relação água/ material cimentício

AC = absorção capilar

Ad = teor de adição no concreto

$a_f$  = quantidade de  $CO_2$  necessária para a carbonatação completa (capacidade de fixação do  $CO_2$ )

- C = massa do cimento
- $C(x,t)$  = teor de cloretos a uma determinada profundidade a um determinado tempo de exposição
- $c_{CaO}$  = teor de CaO no cimento
- $C_{cb,s}$  = teor de CO<sub>2</sub> na atmosfera;
- $C_{cim}$  = consumo de cimento
- $c_{cl}$  = concentração livre de cloretos dissolvidos em água
- CDC = coeficiente de difusão de cloretos conservativo
- CH = teor de Ca(OH)<sub>2</sub> no concreto
- ci = concentração do íon
- Cl = concentração superficial de cloretos
- CO<sub>2</sub> = concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente
- $C_s$  = concentração do CO<sub>2</sub>
- $C_{sa}$  = teor aparente de cloretos superficial
- CSH = quantidade de CSH no concreto
- $D_a$  = coeficiente aparente de difusão de cloretos
- $D_{cb}$  = coeficiente de difusão de CO<sub>2</sub> efetivo do concreto seco carbonatado em um ambiente definido com T=20°C e UR = 65%
- $D_{CO_2}$  = coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> no concreto
- $D_{e,CO_2}$  = difusividade efetiva de CO<sub>2</sub> no concreto carbonatado
- $D_{F1}$  = coeficiente de difusão (primeira lei de Fick)
- $D_{F2}$  = coeficiente de difusão (segunda lei de Fick)
- DH = grau de hidratação
- Di = coeficiente de difusão do íon
- $D_p$  = coeficiente de difusão de cloretos previsto

- $E_c$  = módulo de deformação estático
- $F$  = constante de Faraday
- $f_{c28}$  = resistência à compressão aos 28 dias.
- $f_{ck}$  = resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias
- $I_0$  = Corrente imediata após aplicação da voltagem
- $I_t$  = Corrente no tempo “t” de aplicação da voltagem
- $IV$  = índice de vazios
- $K$  = coeficiente de carbonatação
- $M$  = massa molar da substância respectiva
- $P$  = massa da adição mineral
- $Q$  = Carga passante, em Coulombs
- $q_{cl}$  = fluxo de cloretos
- $q_i$  = fluxo de cada tipo de íon
- $R$  = constante de gás ideal = 0.082 litros x atm/K x mol
- $T$  = temperatura ambiental
- $t$  = tempo de exposição
- $t_0$  = tempo de referência
- $T_a$  = temperatura absoluta em K
- $t_c$  = tempo de cura
- $UR$  = umidade relativa do ambiente;
- $V_e$  = teor de escória
- $V_e$  = teor de escória
- $V_{mc}$  = consumo de material cimentício
- $V_{mc}$  = consumo de material cimentício

W = massa da água

$W_{\text{CaO}}$  = concentração molar total de CaO na forma de  $\text{Ca(OH)}_2$  que está disponível para carbonatação

x = profundidade

X = profundidade de carbonatação

$x_f$  = posição da frente de penetração de íons

z = valência

# **CAPÍTULO 1 – Introdução**

## **1.1 Justificativa e contextualização da pesquisa**

Em 2000, algumas pesquisas relacionadas com o desenvolvimento de cimentos a partir da ativação química da escória de alto-forno e com a utilização de escória de alto-forno como adição mineral ao cimento e ao concreto foram iniciadas no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, sob a liderança da Prof. Dra Maristela Gomes da Silva.

Este movimento de pesquisa culminou com a criação do Grupo de pesquisa “Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES)”, em co-liderança com a Prof. Dra Vanessa Gomes da Silva, junto ao CNPq em 2002, e com a aprovação de 2 (dois) projetos pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) dentro do Fundo-Verde Amarelo, ambos com recursos do Ministério da Ciência e Tecnologia e da Companhia Siderúrgica de Tubarão (hoje, ArcelorMittal Tubarão): Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno: estratégia para consolidar o mercado da escória de alto-forno (Projeto Desempenho) e Desenvolvimento de estrutura hidráulica de proteção contra a ação de

ondas marinhas utilizando escória de alto-forno (Projeto Esthidra). Estes projetos foram concluídos no final de 2006.

Em decorrência desses projetos e das atividades do NEXES, três dissertações de mestrado foram concluídas, focadas em propriedades do estado fresco (abatimento do tronco de cone, teor de ar incorporado, massa específica); em propriedades físicas (retração, índice de vazios, massa específica, absorção por imersão e fervera e absorção capilar) e mecânicas (resistência à compressão, à tração por compressão diametral, à flexão e módulo de elasticidade); em propriedades relacionadas com mecanismos de deterioração relacionados com o ataque de sulfatos, com a carbonatação, com o ataque de cloretos e com a corrosão das armaduras; e no estudo da microestrutura de concretos com adição de escória de alto-forno e (COELHO, 2002; BOURGUIGNON, 2004; SILVA, 2006a; SILVA, 2006b; MORAES, 2008).

Com o histórico de intensivo programa experimental e da constatação, lastreada na tendência internacional de pesquisa em modelos de previsão de vida útil e na implementação de especificações por desempenho, esta tese começou a ser concebida em 2006, com a inserção desta autora na equipe de pesquisadores do NEXES e início de doutoramento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP.

### **1.1.1 A importância do uso da escória de alto-forno**

O uso de escória de alto-forno<sup>1</sup> como material cimentício não é novo. O primeiro registro data de 1774 (MATHER, 1957). No entanto, a utilização que vem sendo dada à escória de alto-forno não tem sido suficiente para que o volume gerado seja totalmente consumido e, considerando ser a escória granulada de alto-forno um material nobre, que, por suas características físico-químicas, apresenta propriedade aglomerante, existe um incentivo para pesquisas e novas aplicações em vários setores da sociedade.

---

<sup>1</sup> Neste trabalho, para fins de simplificação, o termo escória de alto-forno foi utilizado como sinônimo de escória granulada de alto-forno.

A produção de aço no Brasil tem aumentado consideravelmente nos últimos anos e estima-se que a capacidade instalada passe dos 37 milhões de toneladas/ano em 2006 para 52 milhões de toneladas/ano em 2012. Com isso, a geração de escória de alto-forno também tem aumentado consideravelmente, atingindo cerca de 9 milhões de toneladas em 2008 (IBS, 2009).

O processo siderúrgico gera em média 500 kg de resíduos e co-produtos por tonelada de aço produzido. Desse total, 70% correspondem à geração das escórias<sup>2</sup> e 30% aos demais pós, lamas e carepas (CST, 2006). A produção anual de aço em 2008 foi de cerca de 31 milhões de toneladas, sendo que o estado Espírito Santo contribuiu com aproximadamente 20% desta produção, por possuir o maior parque siderúrgico do país (IBS, 2009).

Uma considerável parcela da escória de alto-forno produzida é utilizada pela indústria em substituição de parte do clínquer Portland na produção de cimento, mas nem sempre todo o volume gerado é utilizado pela indústria cimenteira, ficando armazenado nos pátios dessas indústrias. Portanto, investigar a possibilidade de moagem da escória de alto-forno para atender às usinas de concreto e indústrias afins, torna-se de vital importância como estratégia de sustentabilidade sócio-ambiental para a cadeia produtiva do aço e do concreto.

O aumento da discussão sobre sustentabilidade ambiental, incluindo a diminuição das emissões de gás carbônico decorrentes da produção de insumos para a construção como o clínquer, além de algumas legislações que impedem a construção de usinas de cimento, como é o caso do estado da Califórnia nos Estados Unidos, e de acordos internacionais como o de Kyoto (UNITED NATIONS, 1998), incentivam o uso de subprodutos como a escória granulada de alto forno e a cinza volante.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) emitiu, em 1994, um relatório de recomendações sobre materiais reciclados, requerendo que os órgãos governamentais garantam que suas especificações e guias não discriminem inapropriadamente ou injustamente o uso de escória de alto-forno em cimentos e concretos (ACI, 2003).

---

<sup>2</sup> O índice de geração de escória de alto-forno varia de 250-300 kg/t de aço.

CANMET (1993) indica que para cada tonelada de cimento Portland sem adições, (equivalente ao cimento Tipo I americano), são produzidas 0,91 toneladas de CO<sub>2</sub>. Ao considerar-se a energia necessária para a moagem da escória de alto forno (cerca de 0,07 toneladas de CO<sub>2</sub>/tonelada de escória), a substituição do cimento Portland por uma mesma massa de escória de alto forno moída pode reduzir a emissão de gás carbônico em cerca de 0,84 toneladas.

Um relatório da *Slag Cement Association* (SCA, 2003a) apresentou os benefícios do uso de escória de alto-forno no que concerne ao impacto ambiental, comparando concretos contendo 100% de cimento Portland sem adições e concretos com 50% de escória de alto-forno. Neste relatório, os concretos contendo escória apresentaram 45% menos CO<sub>2</sub> incorporado do que os concretos com apenas cimento Portland. Além disso, os concretos com escória de alto-forno requereram em torno de 45% menos energia por m<sup>3</sup> concreto produzido.

No entanto, o uso da escória de alto-forno não apresenta apenas benefícios ambientais, mas também proporciona características e propriedades que podem garantir o desempenho de projeto e aumentar a durabilidade do concreto. Segundo Mukherjee (2004), não há indícios da inviabilidade técnica do uso de elevados teores de escória de alto-forno em concreto. Sabe-se, porém, que a utilização de escória de alto-forno no concreto, principalmente em teores acima de 50%, traz alguns inconvenientes: a) uma maior velocidade das reações de carbonatação que conduzem à diminuição do pH da água dos poros do concreto de cobrimento, criando uma das condições que podem levar à corrosão das armaduras; b) menores resistências iniciais, inconveniente esse que pode ser minimizado por meio do aumento da finura da escória e do clínquer, cura térmica ou redução da relação água/materiais cimentícios (a/mc), por exemplo; c) um maior tempo de cura – superior a 14 dias; e d) a adição de escória de alto-forno diretamente na betoneira necessita de um maior tempo de homogeneização das misturas.

Por outro lado, a adição de escória de alto-forno ao concreto reduz consideravelmente a difusão de cloretos, vantagem esta que pode ser perdida se o concreto estiver carbonatado, pois os cloretos permanecem quimicamente combinados em meios de alta alcalinidade. É necessário, então, diminuir a possibilidade de entrada de agentes agressivos como os cloretos, CO<sub>2</sub> atmosférico e outros, por meio da redução da

permeabilidade do concreto e de outras propriedades relacionadas com transporte de massa.

Uma dosagem adequada, utilizando-se baixa relação água/materiais cimentícios para se obter concretos menos porosos; execução cuidadosa, com a adequada homogeneização da mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto; e maior tempo de cura são procedimentos que contribuem para evitar o aparecimento de fissuras e a entrada dos agentes agressivos.

Entre outros benefícios técnicos da incorporação de escória de alto-forno, como adição mineral ou como agregado, podem-se citar a melhoria da qualidade do concreto pelo aumento da durabilidade, devido à alteração da microestrutura e à diminuição da permeabilidade, resultando num aumento da resistência ao ataque de sulfatos; proteção contra a reação álcali-agregado; melhoria da trabalhabilidade, podendo permitir a diminuição da relação água/materiais cimentícios; aumento da resistência mecânica final e menor calor de hidratação (KOSMATKA *et al.*, 2004).

O uso da escória no cimento é normalizado no Brasil e no mundo. No Quadro 1. 1 e Quadro 1. 2 têm-se as exigências estabelecidas para a escória de alto-forno no Brasil e no Quadro 1. 3 os teores permitidos em várias normas. Há muitos registros, também, de sua utilização em concreto, inclusive em teores superiores a 50% (KLIEGER; ISBERNER, 1967; LANG; GEISELER, 1996; SARIC-CORIC; AITCIN, 2003; MUKHERJEE, 2004).

**Quadro 1. 1 - Teores de escória de alto-forno admitidos por normas de cimento no brasil.**

Norma	Exigência
NBR 5 735/1991 – Cimento Portland de Alto-Forno	Estabelece o percentual de adição de escória granulada de alto-forno moída de 35% a 70% em massa do total do cimento
NBR 11 578/1991 – Cimento Portland Composto	Estabelece o percentual de adição de escória granulada de alto-forno moída de 6% a 34% em massa do total do cimento

**Quadro 1. 2 - Referência de normas brasileiras em relação ao emprego de escória de alto-forno em concreto.**

<b>Norma</b>	<b>Conteúdo</b>
NBR 12 654/2000 – Controle tecnológico de materiais e componentes do concreto	Define o que é adição mineral e permite o uso da escória de alto-forno como adição mineral ao concreto desde que produzidos em central e armazenados de acordo com a NBR 12 655/1996
NBR 12 655/1996 – Concreto, preparo e recebimento	Estabelece que cada adição mineral deve ser armazenada separadamente e devidamente identificada, citando nesta categoria todos os sólidos minerais, em estado seco na forma pulverulenta, inertes ou ativos e que devem ser medidos em massa
NBR 12 655/2006 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento	Recente revisão que não cita mais as adições minerais como constituintes do concreto.

**Quadro 1. 3 - Normas de cimento de diferentes países e os respectivos teores máximos de escória de alto-forno permitidos.**

<b>País</b>	<b>Norma</b>	<b>Teor máximo de escória de alto-forno</b>
México	NMXC – 414 ONNCCE	60%
Inglaterra*	BS 146/2002	95%
Canadá	CAN/CSA A3001 (2003)	70%
Estados Unidos	ASTM C 1157 (2008)	Norma de desempenho, não há restrições quanto a composição e constituintes do cimento
	ASTM C595 (2005)	70%
Japão	JIS R 5211 (2003)	70%
Argentina	IRAM 50000 (2000)	75%
Chile	NCh 148 Of68	75%
Alemanha*	DIN 1164	85%
Inglaterra*	BS 4246/96	90%
França*	NF P15-301	95%

\* Substituídas pela norma europeia ENV 197-1:2000, que admite até 95% de escória de alto-forno.

Existe hoje uma tendência na Europa e em países como o Japão, África do Sul, Estados Unidos e Canadá (ACI, 2003) de permitir a adição de escória de alto-forno diretamente ao concreto, em percentuais de até 70%, sendo que, em alguns casos, para que isso seja possível, exige-se o uso de cimento Portland sem adições. No Reino Unido, por exemplo, a substituição do cimento Portland por escória de alto-forno gira em torno de 30% a 50%, porém há vários registros do uso de 85% (MUKHERJEE, 2004).

As normas atuais têm como base o conhecimento empírico obtido por meio da observação do comportamento de misturas tradicionalmente usadas. No entanto, as misturas atualmente utilizadas e que o serão cada vez mais no futuro podem diferir significativamente das misturas usadas no passado. Estas diferenças podem ser decorrentes da mudança das características das matérias-primas, escassez de materiais ou por motivos ambientais, técnicos e econômicos.

As normas internacionais mais modernas de cimento e concreto já têm se alinhado à tendência de especificação por desempenho, classificando os cimentos de acordo com as propriedades que proporciona, e os concretos, de acordo com o seu ambiente de exposição. Esta abordagem abre um novo horizonte para que se produzam misturas com maiores teores de adições minerais, inclusive misturas ternárias, além da possibilidade do uso de materiais que não atendem às normas atuais, como o caso de alguns agregados, sem, no entanto, comprometer o desempenho do concreto.

### **1.1.2 O conceito de especificação por desempenho**

O ACI 116-00 (2005a) define especificação como um conjunto explícito de critérios que um material, produto, sistema ou serviço deve atender. Há dois tipos de especificações: as prescritivas e as por desempenho.

As especificações prescritivas focam nas características das matérias-primas, na dosagem do concreto, na mistura e no transporte e numa grande variedade de operações, tais como lançamento e cura. Nestas especificações, o desempenho desejado do concreto não é necessariamente descrito (BICKLEY *et al.*, 2006). Isso porque as especificações prescritivas, entre elas a NBR 6118/2003, ACI 318/2008, ACI 301/1999 e os guias de projeto

do CEB (1989 e 1990), assumem que o desempenho desejado é atingido indiretamente por meio de “*receitas*” normalmente estabelecidas com base em experiência anterior (ABNT, 2003b; CEB, 1989, CEB, 1990, ACI, 2008b, ACI, 2005b).

Por exemplo, há um consenso de que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/materiais cimentícios e que a permeabilidade é diretamente proporcional à relação água/materiais cimentícios. No entanto, não existe uma relação clara entre resistência a compressão e permeabilidade. Além disso, sabe-se que, para uma mesma relação água/materiais cimentícios, podem-se obter permeabilidades completamente diferentes, em concretos com ou sem adições minerais, ou quando concretos com volume de pasta bem diversos são comparados. Dessa forma, especificar a relação água/materiais cimentícios máxima não garante que a permeabilidade desejada seja alcançada, a não ser que a relação água/materiais cimentícios seja tão conservadora que garanta que, no pior dos casos, a permeabilidade adequada seja atendida, o que pode não ser uma solução eficiente em termos econômicos e técnicos.

Além disso, especificações prescritivas impedem o uso de soluções mais inovadoras que potencialmente podem resultar em produtos com desempenho comparável ou até melhor do que aqueles que são produzidos de acordo com as prescrições. Assim, uma das soluções potenciais para o avanço tecnológico é o uso de especificações por desempenho.

Em contraste, as especificações por desempenho tratam daquilo que se requer do produto, e não prescrevem como esse produto deve ser produzido (GIBSON, 1982). Em outras palavras, ao invés de partirem dos materiais que compõem o concreto, partem do desempenho desejado, em termos de suas propriedades mensuráveis no estado plástico, endurecido e em termos de durabilidade, deixando a seleção dos materiais, a dosagem e os métodos construtivos a cargo daqueles que, contratualmente, devam atender às especificações (BICKLEY *et al.*, 2006). Nesse caso, como não há restrições dos materiais ou de suas proporções, soluções mais inovadoras podem ser usadas.

As características essenciais das especificações por desempenho são a descrição das necessidades do usuário, por meio de requisitos de desempenho e da definição dos critérios de aceitação. Esses requisitos devem ser quantificáveis, bem entendidos e devem ser capazes de auxiliar na previsão do desempenho ao longo da vida útil (BECKER; FOLIENSTE, 2005).

A abordagem de desempenho na construção civil não é um conceito novo. O primeiro registro é atribuído ao rei Hammurabi da Babilônia, que reinou de 1955 a 1913 aC. Esta especificação ainda pode ser vista em um obelisco que se encontra atualmente no museu de Louvre (GROSS, 1996). A especificação diz "O construtor que construir uma casa para um homem e se sua obra não for suficientemente resistente e a casa vier a cair, aquele construtor deve receber sentença de morte." O rei Hammurabi considerou a segurança estrutural como principal requisito de desempenho, não fazendo qualquer menção à forma de construção da casa, nem à sua estrutura e nem tampouco aos materiais que deveriam ser utilizados (SZIGETI; DAVIS, 2005).

Porém, foi só nos últimos quinze anos, quando a globalização se tornou crucial no mercado da construção e matérias-primas que atendiam às normas vigentes se tornaram mais escassas, que a comunidade internacional começou a se conscientizar da necessidade do uso de especificações por desempenho (ARMAGHANI; BLOOMQUIST, 1992) e começou a implementar esse conceito (BECKER; FOLIENTE, 2005). Iniciativas como o "*da Prescrição para o Desempenho*" ou "*Prescription to Performance*" (P2P), nos Estados Unidos, a criação de comitês como o Materiais ativados por álcalis (AAM)<sup>3</sup>, da RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) e algumas ações na África do Sul e no Canadá são exemplos da mudança que vem se intensificando nos últimos anos na área de cimentos e concretos. Atualmente, a Europa e países como Estados Unidos, Canadá, Austrália e África do Sul têm incentivado a criação de documentos que incorporam o conceito de desempenho na indústria do concreto.

Atualmente, a maioria das especificações de concreto é predominantemente prescritiva com alguns aspectos de desempenho. Há um consenso de que essa realidade deve ser mudada para um aumento de vida útil das estruturas (TAYLOR, 2004). O Brasil já começou a utilizar o conceito de especificações por desempenho. A ABNT aprovou, em 2008, a norma NBR 15 575, Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho, que estará em estágio probatório até maio de 2010. A nova normatização tem em vista o desempenho geral do sistema e não avalia a qualidade de cada item isoladamente. Ela está concentrada no desempenho do conjunto e não trata especificamente do concreto.

---

<sup>3</sup> Alkali activated materials (AAM).

No âmbito internacional, no entanto, muitos códigos, normas e especificações de concreto já incluíram o conceito de desempenho há alguns anos, por meio, por exemplo, da definição de classes de exposição. Documentos como ACI 318/2008; ACI 301/1999; NBR 6118/2003 consistem, em sua grande maioria, em documentos híbridos, contendo ainda prescrições para a relação água/materiais cimentícios máxima; teor máximo de cinza volante, sílica ativa e escória de alto-forno; e quantidade mínima de cimento. Ainda existem poucas especificações que contenham requisitos puramente de desempenho (BICKLEY *et al.*, 2006).

De maneira geral, as especificações por desempenho para concretos funcionam da seguinte maneira (BICKLEY *et al.*, 2006):

- A especificação deve estipular claramente os requisitos funcionais de desempenho para o concreto no estado fresco;
- A especificação deve estipular claramente os requisitos funcionais de desempenho para o concreto no estado endurecido, incluindo durabilidade;
- Os produtores do concreto e os empreiteiros devem se associar para garantir que o concreto adequado seja desenvolvido, entregue e lançado;
- A especificação por desempenho requer um sistema de qualificação/certificação que estabeleça os requisitos para o controle de qualidade, qualificação de mão-de-obra e requisitos para as instalações de produção de concreto;
- A especificação não apresenta uma lista detalhada de materiais e proporções, mas sim a garantia de que o concreto vai atender os requisitos e critérios de desempenho, incluindo os resultados de ensaio na fase de pré-qualificação;
- Depois do lançamento do concreto, ensaios de aceitação são realizados para determinar se o concreto atende aos critérios de desempenho;
- Há um conjunto de instruções a serem seguidas caso os critérios de desempenho não sejam atendidos.

Os critérios de desempenho devem levar em conta não apenas as características da estrutura em serviço e durabilidade, mas também a construtibilidade. Os critérios de desempenho devem ser definidos em termos de propriedades com limites claros para cada uma delas, por meio de ensaios pré-determinados. Quanto ao aspecto durabilidade, as especificações por desempenho devem levar em consideração as condições ambientais ou

de exposição, vida útil de projeto e mecanismos de deterioração mais prováveis, tais como: carbonatação, ataque de cloretos, reação álcali-agregado, corrosão das armaduras, entre outros. Os requisitos da durabilidade resultantes são os parâmetros fundamentais para a previsão da durabilidade do material e da estrutura e devem ser quantificáveis por meio de ensaios de laboratório confiáveis, com baixa variabilidade, boa repetibilidade e relativa facilidade de execução.

Nas últimas décadas, houve um aumento substancial dos critérios de desempenho para as estruturas de concreto, tanto em termos de resistência, como de durabilidade. Em 1928, os engenheiros especificavam concretos com resistência a compressão da ordem de 15 MPa (LORD, 1928), enquanto hoje em dia há registro da construção de estruturas com até 150 MPa (Association Française de Génie Civil, 2002; HAJAR *et al.*, 2003; CAVILL; CHIRGWIN, 2004; BEHLOUL, *et al.*, 2004). Com relação à durabilidade, atualmente algumas obras de arte já são projetadas para uma vida útil de 100 anos (FHWA, 2003).

Essa evolução, associada à necessidade cada vez maior do uso de adições minerais por motivos ambientais, técnicos e econômicos, levou ao desenvolvimento de concretos mais *sofisticados* ou complexos, no sentido que o concreto já não consiste mais na mistura de cimento, água e agregados, mas também inclui adições minerais (por vezes misturas ternárias), diversos tipos de aditivos e fillers. As especificações por desempenho abrem novas perspectivas para o desenvolvimento desses concretos. No entanto, elas devem ser embasadas pela comprovação científica de que o desempenho desejado possa ser atingido.

### **1.1.3 Modelos de previsão de vida útil**

O estabelecimento de especificações em função do ambiente de exposição e da vida útil requerida é uma tarefa que deve se fundamentar nas classes de durabilidade potencial, nas classes de exposição e nos valores limites dos critérios de durabilidade. Isso requer que o desempenho da estrutura, ao longo da sua vida útil, possa ser estimado. Para tanto, são necessários modelos de previsão de vida útil que correlacionem os critérios de durabilidade, medidos em laboratório por meio de ensaios acelerados, e o desempenho em serviço, obtido por meio de dados em condições reais.

O efeito do meio ambiente nas estruturas de concreto e sua resposta correspondente são muito complexos, dificultando o desenvolvimento de modelos confiáveis. Durante a sua vida útil, a estrutura está exposta a vários tipos de agentes agressivos e a sua durabilidade é controlada predominantemente pela difusividade e pela permeabilidade do concreto (MARCHAND; GÉRARD, 1995). A Figura 1. 1 mostra a interdependência de vários fatores na durabilidade e no desempenho do concreto. Observa-se que a combinação de transporte de calor, umidade e substâncias químicas, bem como o efeito do microclima são chave para determinar a durabilidade.

Muitos modelos foram apresentados nas últimas décadas com graus diferentes de sofisticação dos mecanismos de deterioração e de facilidade de uso. Normalmente, eles descrevem o mecanismo físico de deterioração por meio de ferramentas matemáticas em conjunto com os parâmetros dos materiais e com as condições de contorno (KROPP, 2004). No entanto, qualquer solução calculada por meio de modelos matemáticos apresenta incertezas relacionadas ao modelo, aos materiais e ao ambiente (ACI, 2000).

Segundo trabalhos de levantamento das condições das estruturas de concreto no Brasil (DAL MOLIN, 1988; ANDRADE, 1997), a corrosão da armadura é responsável por até 64% dos danos às estruturas de concreto. Esse é um fenômeno também constatado em nível mundial. Por esse motivo, a grande maioria dos modelos de previsão de vida útil encontrados na literatura modela os mecanismos que podem levar à corrosão da armadura, como por exemplo, a carbonatação e a penetração de cloretos. O número de modelos de penetração de cloretos é normalmente muito superior ao número de modelos de carbonatação, por ser o mecanismo principal de deterioração de concretos em países de clima frio, onde sais de degelo são usados durante o inverno, e também em regiões litorâneas.

Como o mecanismo de transporte é considerado a causa predominante de deterioração do concreto, grande parte dos modelos se baseia na segunda lei de Fick (lei da difusão) (KROPP, 2004). Para esses mecanismos, os modelos matemáticos consideram a taxa de entrada dos agentes agressivos no concreto e a taxa de reações químicas e os mecanismos físicos (ACI, 2000). Todos os modelos seguem ou uma abordagem determinística ou uma abordagem probabilística, descritas nas próximas seções.

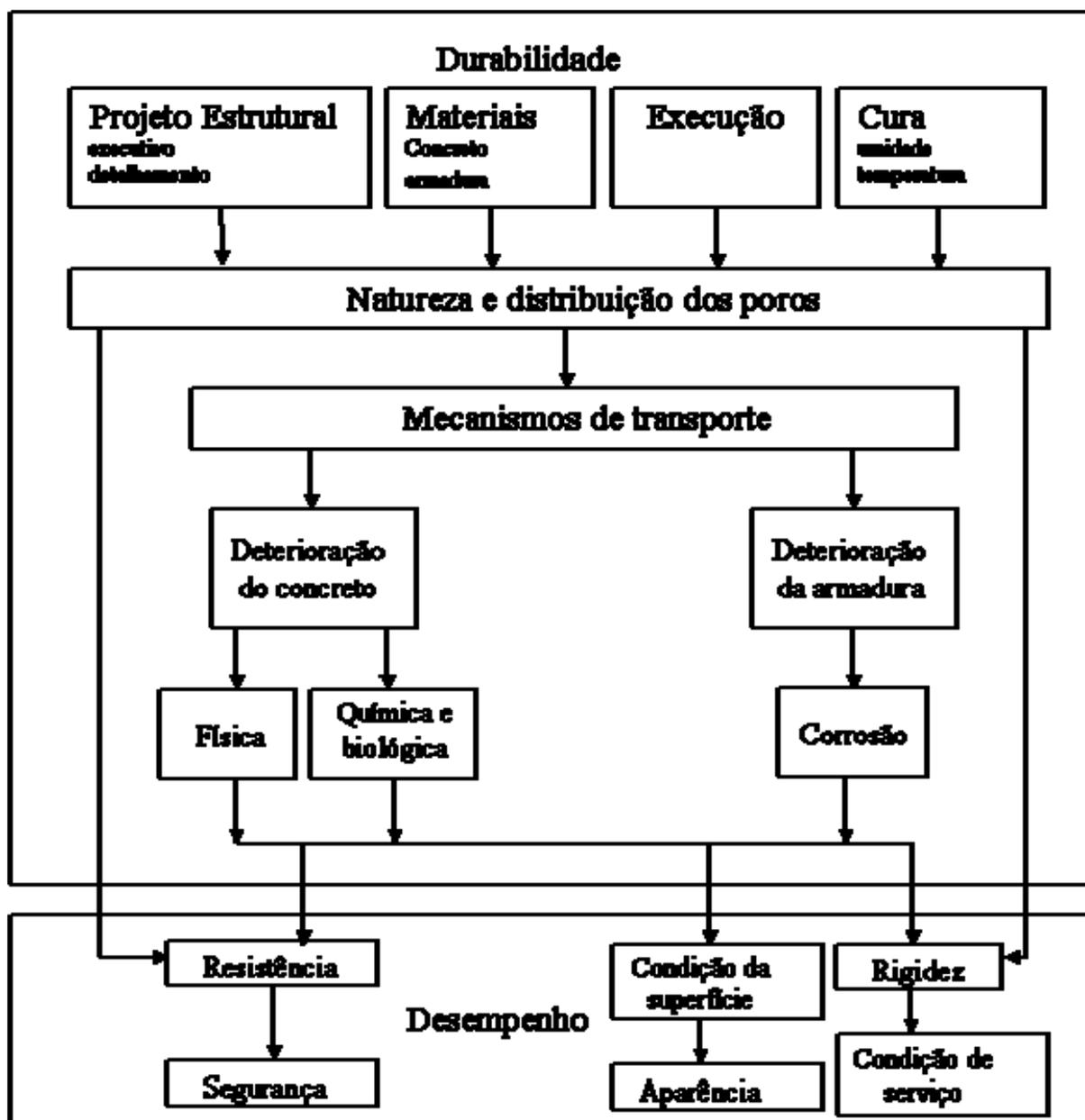


Figura 1.1 – Relação entre durabilidade e desempenho (CEB, 1992).

### 1.1.3.1 Abordagem determinística

Neste tipo de abordagem, considera-se a qualidade do concreto por meio de parâmetros relacionados ao transporte de massa (gás, íons e líquidos), ou seja, a rede de poros, e também o percurso que o agente agressivo deve percorrer até atingir a armadura

em concentrações suficientes para causar danos à estrutura (HELENE, 1997). Esta abordagem pode ser utilizada para o desenvolvimento dos modelos empíricos e dos modelos físicos.

Os **modelos empíricos** apóiam-se em equações que relacionam propriedades do material a determinados coeficientes de transporte, que são deduzidos de uma série de dados experimentais. Esses modelos baseiam-se, por exemplo, na profundidade de penetração de cloretos, nas condições de contorno, no tempo de exposição e na suposição do mecanismo predominante de transporte. Na maioria dos casos, esta relação é derivada de uma análise estatística dos dados experimentais (MARCHAND; GÉRARD, 1995), e o transporte de cloretos é considerado um mecanismo de difusão, que segue a segunda lei de Fick. Como a função de erro de Gauss representa a solução da segunda lei de Fick, a regressão é realizada de forma a relacionar o perfil de concentração de cloretos com a função de erro de Gauss (KROPP, 2004).

Um dos inconvenientes dos modelos empíricos é que se torna muito difícil o desenvolvimento de um programa experimental, com base em métodos estatísticos, devido ao grande número de fatores que diretamente afetam as propriedades de transporte do concreto.

Já os **modelos físicos** visam descrever analiticamente os mecanismos que governam o transporte o mais realisticamente possível, levando em consideração todos os parâmetros que influenciam o fenômeno (KROPP, 2004). Eles diferem dos modelos empíricos por se basearem num melhor conhecimento dos mecanismos envolvidos no fenômeno de transporte de massa. Porém, os parâmetros de entrada, tais como coeficiente de transporte, isotermas de umidade, temperatura e concentração de cloretos, tipo de aglomerante, entre outros, devem ser determinados experimentalmente. Como os modelos físicos se fundamentam em coeficientes determinados empiricamente, torna-se difícil distinguir claramente modelos empíricos dos modelos físicos (MARCHAND; GÉRARD, 1995).

### **1.1.3.2 Abordagem probabilística ou estocástica**

Os **modelos estocásticos** se baseiam na premissa de que a vida útil não pode ser precisamente prevista, pois envolve mecanismos naturais e fenômenos aleatórios. Pesquisadores estão empregando cada vez mais as teorias de confiabilidade para prever, com certa margem de segurança, como se comportará a estrutura de concreto.

O método da confiabilidade combina os princípios dos ensaios acelerados com conceitos de probabilidade (ACI, 2000). Nesse caso, considera-se a aleatoriedade das características dos materiais, da ação dos esforços, de fatores ambientais e das respostas dos materiais aos microclimas (ANDRADE, 2001). A dispersão dos dados é tratada na forma de funções de densidade das propriedades dos materiais, levando a funções de densidade, por exemplo, do perfil de penetração de cloretos em um determinado instante. A partir daí, define-se a probabilidade de atingir o estado limite (KROPP, 2004).

Cada uma das abordagens anteriores apresenta vantagens e desvantagens que dependem do tipo de aplicação, da quantidade de ensaios e dados disponíveis e necessários e da finalidade de seu uso.

## **1.2 Formulação da hipótese do trabalho**

A hipótese a ser demonstrada neste trabalho é se é possível obter concretos duráveis com elevados teores de escória de alto-forno. Confirmada esta hipótese, serão propostas diretrizes para emprego de abordagem por desempenho, validada por modelos de previsão de vida útil, para especificação de tais concretos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

Propor diretrizes para a criação de especificações por desempenho para concretos com adição de escória de alto-forno validadas por modelos de previsão de vida útil centrados em mecanismos preponderantes de despassivação da armadura, contribuindo para a base normativa nacional e internacional.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver modelos empíricos para previsão de diversas propriedades dos concretos com escória de alto-forno para fins de dosagem;
- Verificar se os concretos produzidos podem potencialmente atingir a vida útil desejada, por meio da utilização de modelos de previsão de vida útil;
- Avaliar as misturas estudadas na pesquisa levando em consideração as recomendações apresentadas para as especificações por desempenho e comparar com as normas brasileiras atualmente em uso.

## **1.4 Organização do trabalho**

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre as especificações por desempenho, além de discutir suas vantagens e desvantagens, especificações disponíveis, iniciativas mundiais na direção de especificações por desempenho e exemplos de alguns dos critérios de desempenho nas especificações atuais. Este capítulo delinea o caminho para as diretrizes para a criação de especificações por desempenho para concreto apresentadas no capítulo 9.

O capítulo 3, por sua vez, apresenta uma revisão bibliográfica dos modelos de previsão de vida útil para os mecanismos de deterioração relativos à armadura. Estes modelos são usados para determinar a vida útil e o desempenho potenciais, criando a base para a escolha dos requisitos e critérios de desempenho.

O capítulo 4 apresenta o projeto experimental, os materiais e os métodos da pesquisa. Os capítulos 5, 6 e 7 trazem os resultados experimentais, bem como a análise dos resultados. Estes capítulos mostram o desempenho estrutural e de durabilidade das misturas.

O capítulo 8 apresenta os modelos empíricos das propriedades estudadas desenvolvidos para auxiliar na dosagem futura de concretos com escória de alto-forno. Além disso, apresenta a aplicação e discussão de alguns dos modelos de previsão de vida útil, citados no capítulo 3. A vida útil das misturas preparadas no estudo experimental é estimada.

O capítulo 9 apresenta diretrizes para a criação de especificações por desempenho, incluindo sugestões de requisitos e recomendações para a revisão da NBR 6118/2003, com base nas análises dos capítulos 5, 6, 7 e 8. Além disso, avalia as misturas desta pesquisa sob o ponto de vista de desempenho e compara com as normas brasileiras atualmente em uso.

O capítulo 10 apresenta as principais conclusões do trabalho e aponta as prioridades e oportunidades para continuidade da pesquisa.

O pós-texto contém as referências, o apêndice A que apresenta a caracterização dos materiais, o apêndice B, que apresenta os modelos empíricos para a previsão de propriedades: Regressões matemáticas e o anexo A, que apresenta o ensaio para a determinação do coeficiente aparente de difusão de cloretos (ASTM C 1556-04),

## **CAPÍTULO 2 – Especificações para concreto: da prescrição tradicional para a abordagem por desempenho**

Este capítulo reúne os principais códigos, normas e especificações para concreto, sejam eles voltados à abordagem tradicional (prescritiva) ou à especificação por desempenho.

### **2.1 Principais códigos, normas e especificações**

#### **2.1.1 EUA**

O código ACI 318-08 (ACI, 2008b) constitui uma especificação predominantemente prescritiva no que se refere à durabilidade de estruturas de concreto. O capítulo 4 desse documento apresenta classes de exposição e traz limites para a relação água/materiais cimentícios, ar incorporado, teor máximo de adições minerais, limites para o teor de cloretos

e requisitos<sup>1</sup> para o uso de determinados tipos de cimento (Quadro 2. 1). O código também traz provisões para a prevenção da corrosão da armadura, por meio do cobrimento mínimo (Quadro 2. 2), além da necessária densificação da matriz para diminuir o ingresso de agentes agressivos.

O ACI 318-08 tenta promover a densificação da matriz ou melhorar as propriedades relacionadas com a permeabilidade, de maneira indireta, por meio da especificação da relação água/materiais cimentícios máxima e do uso de adições minerais. No entanto, o ACI 318-08 não permite **(1)** o ajuste da relação água/materiais cimentícios quando adições minerais são usadas, ou seja, considera que, independentemente dos materiais utilizados, o mesmo nível de impermeabilidade será atingido para cada relação água/materiais cimentícios, o que não é correto; nem **(2)** apresenta critérios<sup>2</sup> prescritivos para estruturas que não apresentem problemas potenciais de durabilidade (ACI, 2008b).

Como se pode observar, o documento resulta simplista, ao não considerar fatores relevantes sobre o ambiente de exposição e a qualidade do concreto, já que esta não depende tão somente da resistência à compressão ou relação água/materiais cimentícios, mas também da presença de adições, condições de cura, entre outras. Em seus comentários, o ACI 318-08 apresenta a ASTM C 1202 (ASTM, 2005) como um indicador de desempenho para a permeabilidade, discussão que será retomada no Capítulo 4 (ACI, 2008b).

---

<sup>1</sup> Requisito: Atributo qualitativo.

<sup>2</sup> Critério: Atributo quantitativo.

**Quadro 2. 1 - Recomendações do ACI 318 para concretos em condições especiais de exposição (ACI, 2008b).**

Classes de Exposição	Severidade	Subclasse	Relação água/cimento máxima	Resistência à compressão mínima (MPa)
Gelo-degelo	Não aplicável	F0	-	17
	Moderado	F1	0,45	31
	Forte	F2	0,45	31
	Muito forte	F3	0,45	31
Sulfatos	Não aplicável	S0	-	17
	Moderado	S1	0,50	28
	Forte	S2	0,45	31
	Muito forte	S3	0,45	31
Baixa permeabilidade	Não aplicável	P0	-	17
	Necessária	P1	0,50	28
Proteção contra corrosão	Não aplicável	C0	-	17
	Moderado	C1	-	17
	Forte	C2	0,40	35

**Quadro 2. 2- Cobrimentos mínimos para concreto armado (ACI, 2008b)<sup>3</sup>.**

Condições de Exposição	Cobrimento mínimo em mm
Concreto permanentemente em contato com o solo	75
Concreto em contato com o solo ou exposto à intempérie	50
Concreto sem contato com o solo e não exposto à intempérie	40

<sup>3</sup> Esta tabela é uma simplificação do ACI 318 (2008b), o qual apresenta subclassificações em função do diâmetro da barra e do tipo de elemento estrutural.

Alguns estados americanos já estão utilizando especificações por desempenho (ou melhor, especificações híbridas). Indiana tem sido um estado pioneiro na utilização de requisitos de desempenho. Minnessota também tem feito progresso na direção de especificações por desempenho. Virginia, em 2004, publicou um rascunho de especificação por resultado final. Não é uma especificação puramente por desempenho, já que requer que a concreteira forneça detalhes sobre o traço do concreto e porque os critérios são subjetivamente escolhidos sem que se possa prever qual seria a vida útil do projeto. O pagamento da obra, incluindo eventuais bônus, baseia-se no atendimento dos critérios de resistência à compressão e valores máximos de carga passante (em Coulomb), de acordo com a ASTM C1202-05 (BICKLEY *et al.*, 2006).

### **2.1.2 Canadá**

A norma canadense CSA A23.1 (CSA, 2004a) oferece duas opções para a especificação: prescritiva e desempenho (na verdade híbrida), para um país com problemas de durabilidade similares aos dos Estados Unidos. A tabela 5 do anexo da norma apresenta os requisitos a serem definidos e atingidos por cada parte envolvida e suas respectivas responsabilidades. Fica claro que existe uma mudança radical das responsabilidades no caso de especificação por desempenho (Quadro 2. 3).

Essa norma apresenta, ainda, cinco classes de exposição principais e várias subclasses que visam refletir diferentes graus de agressividade (Quadro 2. 4). Apesar de limitar a relação água/materiais cimentícios máxima, a resistência à compressão mínima e o teor de ar mínimo (ar incorporado e ar aprisionado), também faz menção ao tipo de cura e em alguns casos onde há exposição a cloretos, limita a carga passante máxima aos 56 dias de acordo com a ASTM C1202 (ASTM, 2005d), como forma indireta de garantir a impermeabilidade do concreto e a resistência à penetração de cloretos.

**Quadro 2.3 – Métodos alternativos de especificação de concreto da CSA A 23.1 (CSA, 2004a).**

Alternativa	O dono deve especificar	O empreiteiro deve	O fornecedor deve
<p>Desempenho: Quando o dono requer que o fornecedor de concreto assuma a responsabilidade pelo desempenho do concreto entregue e o empreiteiro assumo a responsabilidade pelo concreto lançado.</p>	<p>critérios estruturais; requisitos e critérios de durabilidade, incluindo classe d exposição; requisitos adicionais de durabilidade e critérios de pré-qualificação e verificação; requisitos de gerenciamento de qualidade; certificações necessárias para o fornecedor; outros requisitos.</p>	<p>trabalhar com o fornecedor para estabelecer os seus critérios para o concreto no estado fresco e endurecido; submeter documentação que comprove que os critérios do dono foram atendidos na fase de pré-qualificação de misturas; preparar e implementar o plano de qualidade para garantir que os critérios do dono serão atendidos e submeter documentação que comprove que os critérios do dono foram atendidos.</p>	<p>obter certificação para a usina e equipamentos; certificar que a mistura satisfaz os requisitos da norma; certificar que a produção e entrega vai atender os requisitos da norma; certificar que o concreto atende os critérios especificados; preparar e implementar um plano de controle de qualidade para garantir que os requisitos do dono e do empreiteiro serão atendidos; fornecer documentação da certificação do fornecedor; caso o dono requeira, submeter documentação que demonstre que a mistura proposta atingirá a resistência, durabilidade e desempenho especificados.</p>
<p>Prescrição: Quando o dono assume a responsabilidade pelo concreto.</p>	<p>proporções da mistura; abatimento de tronco de cone; plano de qualidade; outros requisitos.</p>	<p>planejar os métodos construtivos com base na mistura especificada pelo dono; obter a aprovação do dono para qualquer desvio da mistura especificada pelo dono; identificar antecipadamente para o dono qualquer problema ou deficiência com a mistura relacionada a construção.</p>	<p>fornecer verificação de que a usina, equipamentos e materiais obedecem os requerimentos da norma; demonstrar que o concreto obedece os critérios prescritivos do dono; identificar antecipadamente para o empreiteiro qualquer problema ou deficiência com a mistura relacionada a construção.</p>

**Quadro 2. 4 - Classes de exposição da CSA A 23.1 (CSA, 2004a).**

<b>Subclasse</b>	<b>Definição</b>
<b>Exposição a cloretos</b>	
C-XL	Concreto armado estrutural exposto a cloretos ou outro ambiente severo com ou sem condições de gelo e degelo, com expectativas de durabilidade superiores a C-1, A-1 ou S-1.
C-1	Concreto armado estrutural exposto a cloretos ou outro ambiente agressivo com ou sem condições de gelo e degelo.
C-2	Concreto armado não-estrutural exposto a cloretos e gelo e degelo.
C-3	Concreto continuamente submerso, mas não submetido a gelo e degelo.
C-4	Concreto armado não-estrutural exposto a cloretos, mas não a gelo e degelo.
<b>Exposição a gelo e degelo</b>	
F-1	Concreto exposto a gelo e degelo na condição saturada, mas não exposto a cloretos.
F-2	Concreto não saturado, exposto a gelo e degelo, mas não a cloretos.
<b>Sem exposição a influência externa</b>	
N	Concreto não exposto a cloretos, nem a gelo e degelo.
<b>Exposição a ataque químico</b>	
A-1	Concreto armado estrutural severamente exposto a rejeitos ou gases, com ou sem gelo e degelo. Concretos expostos a vapores acima do esgoto e de efluentes industriais.
A-2	Concreto armado estrutural sujeito à exposição de moderada a severa a rejeitos, gases ou líquidos, com ou sem exposição a gelo e degelo.
A-3	Concreto armado estrutural sujeito à exposição de moderada a severa a rejeitos, gases ou líquidos, com ou sem exposição a gelo e degelo, continuamente submerso.
A-4	Concreto armado não estrutural moderadamente exposto a rejeitos, gases ou líquidos, sem exposição a gelo e degelo.
<b>Exposição a sulfatos</b>	
S-1	Concreto sujeito a exposição muito agressiva a sulfatos.
S-2	Concreto sujeito a exposição agressiva a sulfatos.
S-3	Concreto sujeito a exposição moderada a sulfatos.

A CSA 23.1 (CSA, 2004a) limita os constituintes e as propriedades para atingir os requisitos de durabilidade para cada classe. Esses requisitos podem ser usados como prescrições. Já as classes de exposição podem ser usadas para especificações por desempenho. Os requisitos de desempenho são aplicáveis quando o proprietário requer que o concreteiro assuma a responsabilidade pelo desempenho do concreto. O empreiteiro tem a responsabilidade pelo lançamento, adensamento e cura do concreto, pelo atendimento da resistência à compressão requerida e a durabilidade esperada.

Cada província e municipalidade pode, no entanto, criar suas próprias especificações. O Quadro 2. 5 mostra um resumo das propriedades especificadas no Canadá, para concretos de alto desempenho, em diversas províncias.

**Quadro 2. 5 - Requisitos de desempenho das especificações das províncias no Canadá para concreto de alto desempenho (BICKLEY *et al.*, 2006).**

Província	ASTM C1202	ASTM C457	Descascamento	Fissuração por retração	Absorção	Ductilidade	Durabilidade
British Columbia		X				X	
Alberta	X	X		X			
Manitoba	X	X		X			
New Brunswick	X	X					
Nova Scotia	X	X					
Ontário	X	X	X		X		
Quebec	X	X	X	X			X (gelo-degelo)
Newfoundland	X	X					
Toronto	X	X					
Montreal	X	X					
Edmonton	X	X	X				
Calgary	X	X	X				

### 2.1.3 Europa

#### 2.1.3.1 EN 206-1

Em 2000, foi publicada - na ocasião – a nova norma europeia EN 206-1 – *Concrete – Part I: Specification, performance, production and conformity* (EUROCODE, 2000). No entanto, cada país criou o seu anexo nacional, a fim de levar em consideração as peculiaridades de cada país e facilitar o consenso. Assim, limites para a composição do concreto e o cobrimento mínimo da armadura podem variar de um país a outro.

A possibilidade do uso de uma abordagem de desempenho foi considerada durante o desenvolvimento da norma. O comitê CEN/TC 104 optou por adotar uma visão prescritiva, alegando a falta de métodos de ensaios confiáveis, mas permite o uso de requisitos de desempenho aos países que possuam ensaios nacionais e se sintam suficientemente

confiantes para usá-los. CEN/TAC 104 continuará o desenvolvimento de métodos relacionados com desempenho para avaliar a durabilidade do concreto em nível europeu.

A EN 206-1 (EUROCODE, 2000) especifica critérios para os materiais constituintes, para as propriedades do concreto fresco e endurecido e sua verificação, apresenta limites para a composição do concreto, especifica o procedimento de controle da produção, os critérios de conformidade e a avaliação da conformidade.

O principal mecanismo de deterioração considerado na EN 206-1 é o de corrosão das armaduras, seja ela resultado da carbonatação, do ingresso de cloretos, do gelo e degelo ou do ataque químico. A ação do ambiente é classificada em termos de classes de exposição (Quadro 2. 6). Para cada classe, são recomendados requisitos puramente prescritivos, em termos do tipo e classe de materiais constituintes, relação água/materiais cimentícios máxima, volume de ar incorporado mínimo, quantidade mínima de cimento e classe de resistência (por exemplo, Quadro 2. 7 e Quadro 2. 8). A vida útil adotada é de 50 anos. Com relação ao uso de adições minerais, apenas a sílica ativa e a cinza volante são incluídas. A escória de alto-forno normalmente não é adicionada como substituição ao cimento Portland em concreto, mas sim como parte integrante dos cimentos com adições (EUROCODE, 2000).

**Quadro 2. 6 - Classes de exposição da EN 206-1 (EUROCODE, 2000).**

Classe	Descrição do ambiente	Quantidade de sub-classes
XO	Sem risco de corrosão (ambientes internos com baixa umidade relativa)	1
XC	Corrosão da armadura devido à carbonatação	4
XD	Corrosão da armadura devido ao ataque de cloretos não provenientes da água do mar	3
XS	Corrosão da armadura decorrente do ataque de cloretos provenientes da água do mar	3
XF	Ataque do gelo-degelo, com ou sem presença de sais descongelantes	4
XA	Ataque químico	3

**Quadro 2. 7 - Classe de exposição XC: Corrosão induzida por carbonatação (EUROCODE, 2000).**

Classe	Ambiente	Exemplo de onde esta classe ocorre	Máxima relação a/mc	Classe de resistência mínima (MPa)	Consumo mínimo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
XC1	Seco ou constantemente molhado	Ambientes internos com baixa umidade relativa	0,65	20	260
XC2	Molhado, raramente seco	Estruturas de retenção de água Fundações	0,60	25	280
XC3	Moderadamente úmido	Ambientes internos com umidade relativa alta Estruturas externas protegidas da chuva	0,55	30	280
XC4	Ciclos de molhagem e secagem	Estruturas externas desprotegidas da chuva	0,50	30	300

**Quadro 2. 8 - Classe de exposição XS: Corrosão da armadura devido ao ataque de cloretos provenientes da água do mar (EUROCODE, 2000).**

Classe	Ambiente	Exemplo de onde esta classe ocorre	Máxima relação a/mc	Classe de resistência mínima (MPa)	Quantidade mínima de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
XS1	Expostos a sais suspensos no ar, mas sem contato com água do mar	Ambientes costeiro	0,50	30	300
XS2	Submerso	Estruturas marinhas	0,45	35	320
XS3	Zonas de respingos	Estruturas marinhas	0,45	35	340

A EN 206-1 (EUROCODE, 2000) apresenta, no entanto, o conceito de *desempenho equivalente*, que permite uma alteração dos requisitos prescritivos para o consumo mínimo de cimento e para a relação água/materiais cimentícios máxima. Isso é aplicado a uma determinada combinação adição mineral-cimento, desde que o concreto apresente um

desempenho equivalente em termos de resposta à ação do ambiente e durabilidade, quando comparado ao do concreto de referência para uma mesma classe de exposição.

O anexo J (*Performance-related design methods with respect to durability*) da EN 206-1 (EUROCODE, 2000) não traz nenhum direcionamento no sentido da escolha dos requisitos e critérios de desempenho a serem considerados nas dosagens com base em desempenho. Apenas apresenta uma definição dos métodos por desempenho e um balizamento de quando a abordagem de desempenho deva ser considerada como uma opção.

### **2.1.3.2 Guia CEB para projeto de estruturas duráveis de concreto (CEB, 1989)**

Dos textos que utilizam requisitos prescritivos, o guia de projeto de CEB<sup>4</sup> (1989) é um dos trabalhos mais completos. Suas recomendações englobam todo o processo de construção desde o projeto, determinando as responsabilidades e interações do planejamento, projeto, construção, entrega da obra, manutenção e utilização.

Visando garantir a qualidade do concreto, esse manual aponta alguns fatores e recomendações para a qualidade da estrutura:

- Motivação, informação e educação da mão-de-obra;
- Projeto e detalhamento: dando ênfase para a drenagem, água parada, respingos, fissuração, destacamentos;
- Materiais: cimento, agregados, água de mistura, aditivos, adições;
- Execução;
- Cura;
- Condições de serviço;
- Inspeção, manutenção e reparo.

Além disso, esse guia traz uma classificação quanto à agressividade do meio, com limites de pH, concentração de CO<sub>2</sub>, amônia, magnésio e sulfatos. Essa classificação é apresentada de forma simplificada no Quadro 2. 9.

De acordo com a classe de exposição, são apresentadas recomendações quanto à resistência à compressão mínima, relação água/materiais cimentícios máxima, consumo de cimento mínimo, teor de ar mínimo, permeabilidade (Quadro 2. 10) e cobertura de armadura (Quadro 2. 11), além de espaçamento de armadura e abertura máxima de fissuras.

---

<sup>4</sup> *Comité Euro-International du Béton.*

**Quadro 2. 9 - Classes de exposição do concreto, segundo o guia de projeto do CEB (1989).**

Classe de Exposição		Condições ambientais
1		Ambiente seco, UR ≤ 70%
2	A	Ambiente com variações de umidade freqüentes, com ocasionais riscos de condensação
	B	Ambiente com variações de umidade freqüentes, com elevados riscos de condensação
3		Ambiente úmido sujeito a gelo e degelo
4		Ambiente marinho
5	A	Ambiente ligeiramente agressivo quimicamente
	B	Ambiente medianamente agressivo quimicamente
	C	Ambiente altamente agressivo quimicamente

**Quadro 2. 10 - Recomendações de durabilidade segundo o guia de projeto do CEB (1989).**

Recomendação		Classe de exposição								
		1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5c
Resist. ISO 4012 (MPa)	concreto	≥12/15								
	CA	≥16/20	≥20/25	≥20/25	≥20/25	≥25/30	≥25/30	≥20/25	≥25/30	≥30/35
	CP	≥20/25								
a/c	concreto	-	≤0,70							
	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,55	≤0,55	≤0,50	≤0,55	≤0,50	≤0,45
	CP	≤0,60	≤0,60							
Consumo de cimento (kg/m³)	concreto	≥150	≥180	≥180	≥180					
	CA	≥270	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300
	CP	≥300	≥300	≥300	≥300					
Ar incorpor. % (DMC)	≤32mm			Se houver risco de saturação idem 3	≥4		Se houver risco de saturação idem 3			
	≤16mm	-	-		≥5	-		-	-	
	≤8mm				≥6					
Penetração água ISO 4848		-	-	≤50	≤50	≤30	≤30	≤50	≤30	≤50
Recomendação p/agregado		-	-	Resist. congel.	Resist. congel.	-	Resist. congel.	-	-	-

Nota: CA designa concreto armado e CP, concreto protendido.

**Quadro 2. 11 - Cobrimento de armadura mínimo (Cmin), segundo o CEB/FIP model code (CEB, 1990).**

Classe de exposição	C min (mm)	
	Concreto armado	Concreto protendido
1	15	25
2	30	35
3, 4	40	50
5	*	*
* Depende do tipo de meio ambiente encontrado		

### 2.1.3.3 França

Baroghel-Bouny (2004) utiliza o conceito de requisito de durabilidade: propriedade do material com um significado físico claro (BICKLEY *et al.*, 2006). As propriedades contempladas são porosidade, coeficiente de difusão (penetração de cloretos), permeabilidade e quantidade de hidróxido de cálcio. A partir destas propriedades, o concreto pode ser classificado em cinco classes de durabilidade (Quadro 2. 12).

### 2.1.3.4 Itália e Noruega

Esses países apresentam soluções prescritivas, e muitas classes de exposição. Têm requisitos de consumo mínimo de cimento, máxima relação água/materiais cimentícios, resistência à compressão mínima e porcentagem mínima de ar. O uso de adições minerais (cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa) é permitido na Noruega, porém, na Itália, apenas o uso de cinza volante é permitido (BICKLEY *et al.*, 2006).

**Quadro 2. 12 - Classes de durabilidade potencial com respeito à corrosão das armaduras e aos limites associados ao requisito de durabilidade, para concretos curados em água por 90 dias ou menos (BAROGHEL-BOUNY, 2004).**

Durabilidade potencial	Classes e limites				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Porosidade acessível a água (%)	>16	14 a 16	12 a 14	9 a 12	6 a 9
Resistividade elétrica (Ohm.m)	<50	50 a 100	100 a 250	250 a 1000	>1000
Coefficiente efetivo de difusão de cloretos ( $10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) <sup>1</sup>	>8	2 a 8	1 a 2	0,1 a 1	<1
Coefficiente aparente de difusão de cloretos ( $10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	>50	10 a 50	5 a 10	1 a 5	
Coefficiente aparente de difusão de cloretos ( $10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) <sup>3</sup>				< 5	
Permeabilidade aparente a gás ( $10^{-18} \text{ m}^2$ ) <sup>4</sup>	>1000	300 a 1000	100 a 300	30 a 100	<30
Permeabilidade à água ( $10^{-18} \text{ m}^2$ ) <sup>5</sup>	>10	1 a 10	0,1 a 1	0,01 a 0,1	<0,01
Quantidade de Ca(OH) <sub>2</sub> (% da massa de cimento) <sup>6</sup>	<10	10 a 13	13 a 20	20 a 25	≥25

<sup>1</sup> Primeira Lei de Fick

<sup>2</sup> Segunda lei de Fick e medida por meio do ensaio de migração

<sup>3</sup> Segunda lei de Fick e medida por meio do ensaio de difusão

<sup>4</sup> Medida por meio de um permeâmetro de cabeça constante a 0,2 MPa e depois de secagem a  $T = 105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

<sup>5</sup> por meio de medida de fluxo constante, depois de saturação

<sup>6</sup> Para misturas sem adições.

### 2.1.3.5 Reino Unido

A BS 8500 (BSI, 2006) apresenta cinco abordagens diferentes para a especificação de concreto: Concreto designado, Concreto projetado para classes de exposição, Concreto prescrito, Concreto padrão prescrito, e Concreto registrado (Quadro 2. 13). O uso de adições minerais se dá por meio de cimentos com adições, sendo permitidas a cinza volante, a escória de alto-forno e a sílica ativa.

**Quadro 2. 13 - Cinco abordagens para a especificação de concreto de acordo com a BS 8500/2006 (BICKLEY *et al.* 2006).**

<b>Abordagem de especificação</b>	<b>Descrição</b>
<b>Concreto designado para uso específico (<i>Designated concrete</i>)</b>	Para usos específicos. O concreto é especificado por meio de uma série de tabelas que são usadas para orientar o processo de especificação. Esta opção deve ser usada apenas onde a certificação por uma terceira parte for selecionada para a especificação do concreto.
<b>Concreto projetado para classes de exposição (<i>Designed Concrete</i><sup>5</sup>)</b>	Oferece mais flexibilidade ao especificador que o <i>designated concrete</i> . São apresentados limites para a composição do concreto levando em conta a vida útil e o cobrimento da armadura. Este concreto é derivado de classes de exposição com limitações para o tipo e o consumo de cimento, máxima relação água/materiais cimentícios e condições para cloretos e sulfatos.
<b>Concreto prescrito</b>	Esta abordagem permite que o especificador prescreva a composição exata e os constituintes do concreto, mas não permite a inclusão de requisitos de resistência à compressão. Esta é uma opção com aplicabilidade limitada.
<b>Concreto padrão prescrito</b>	Eram conhecidas como misturas-padrão na BS 5328 (1997). Esta abordagem é adequada onde o concreto é dosado na obra ou adquirido de uma concreteira que não possua certificação ou ainda para aplicações onde a qualidade requerida seja baixa com controle de qualidade básico e alto consumo de cimento.
<b>Concreto registrado</b>	É apropriado quando se exigam requisitos de desempenho, por meio do uso de métodos de ensaio definidos. Este concreto é selecionado pelo produtor e pelo especificador.

Desde 2003, *UK Highway Agency*, a agência de rodovias britânicas, está desenvolvendo especificações por desempenho. A agência oferece três opções: i) desenvolvimento de especificações existentes com baixo risco, mas também baixo benefício; ii) especificação por desempenho com fins exclusivos de manutenção; iii) especificação totalmente por desempenho, que transferirá o risco da agência para o produtor, mas que permitirá que ele lance mão de soluções inovadoras.

<sup>5</sup> A expressão original em inglês foi mantida, pois a tradução pode gerar confusões com “concreto projetado”, que é a tradução de “*shotcrete*” ou “*sprayed concrete*”.

## **2.1.4 Brasil**

### **2.1.4.1 NBR 15 575/2008**

Primeira norma brasileira de desempenho na construção civil, a NBR 15 575/2008: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2008) trata do desempenho geral do sistema e não avalia a qualidade de cada item isoladamente. Ela estará em estágio probatório até maio de 2010. Para cada sistema, a norma baseia-se em uma série de itens, em acordo com a ISO 6 241/1984.

A NBR 15 575 (ABNT, 2008) visa a quebra de paradigmas e apresenta uma evolução da mentalidade da indústria da construção. A norma possui 6 partes distintas:

Parte 1 – Requisitos Gerais

Parte 2 – Estrutura

Parte 3 – Pisos Internos

Parte 4 – Fachadas e Paredes Internas

Parte 5 – Coberturas

Parte 6 – Sistemas Hidro-Sanitários

A NBR 15 575 (ABNT, 2008), parte 1, apresenta várias considerações gerais, incluindo o desempenho estrutural e a durabilidade. Apesar de não tratar especificamente, pode servir de base para a criação de uma especificação por desempenho de estruturas de concreto. Além disso, define vida útil, prazo de garantia, durabilidade e desempenho.

Elementos não manuteníveis, tais como a fundação ou algumas partes estruturais, devem ter a mesma vida útil da edificação. Na ausência da indicação da vida útil no projeto, consideram-se os prazos estabelecidos no Quadro 2. 14.

**Quadro 2. 14 – Vida útil mínima para sistemas e subsistemas de edificações, segundo a NBR 15 575 (ABNT, 2008).**

Vida útil dos sistemas (em anos)	
Estrutura	40
Pisos internos	13
Vedação vertical externa	40
Vedação vertical interna	20
Cobertura	20
Hidrosanitário	20

**2.1.4.2 NBR 6118/2003**

Em 2003 foi publicada a atualização da NBR 6118 (Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento), que teve seu escopo desmembrado em duas normas, a NBR 6118/2003 (para o projeto) e a NBR 14 931/2003 (para a execução), que entraram em vigor em 2004.

A NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) traz classes de agressividade (Quadro 2. 15 e Quadro 2. 16) e, de acordo com essas classes, recomendações de relação água/ cimento máxima, resistência à compressão mínima (Quadro 2. 17) e cobrimento mínimo (Quadro 2. 18).

**Quadro 2. 15 - Classes de agressividade ambiental da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b).**

Classe de agressividade	Agressividade	Risco de deterioração
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

**Quadro 2. 16 - Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b).**

Macro-clima	Micro-clima			
	Interior das edificações		Exterior das edificações	
	Seco UR ≤ 65%	Úmido ou com ciclos de molhagem e secagem	Seco UR ≤ 65%	Úmido ou com 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	Úmido e agressivo II, III ou IV

Estas classificações são, no entanto, muito subjetivas, pois não existem parâmetros específicos para diferenciar classes de risco de deterioração ou de nível de agressividade. Uma classificação mais rigorosa apresentando as concentrações de alguns íons agressivos ao concreto ou à armadura seria mais conveniente.

O Quadro 2. 17 deixa explícito que a norma entende a qualidade do concreto como função da relação água/ cimento e da resistência à compressão, sem levar em conta o tipo de cimento utilizado, a presença de adições, a qualidade da cura, entre outros aspectos. Apesar da importância da relação água/ materiais cimentícios, existe uma série de outros aspectos que interferem nos vários mecanismos de deterioração do concreto e que, portanto, necessitam ser adequadamente considerados. O cobrimento apresentado no Quadro 2. 18 aumentou em relação à versão da NBR 6118 de 1978, visando promover uma maior vida útil.

**Quadro 2. 17 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b).**

Concreto	Classe de agressividade				
	Tipo	I	II	III	IV
Relação água/cimento	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto NBR 8 953	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

**Quadro 2. 18 - Correspondência entre nível de agressividade e cobrimento nominal<sup>6</sup> da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b).**

Cnom (mm)	Componente ou elemento	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Concreto armado	laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	todos	30	35	45	55

## 2.2 Especificações por desempenho

De acordo com ACI 116-00 (ACI, 2005a), especificação é um conjunto explícito de requisitos que devem ser satisfeitos por um material, produto, sistema ou serviço. Na especificação por desempenho, o concreto é definido em termos de propriedades mensuráveis (ou critérios) do concreto no estado plástico, endurecido e em termos de durabilidade.

Souza (2007) expõe que o desempenho de um produto é sinônimo de seu comportamento na fase de uso, e que, infelizmente, nos últimos anos, a maioria dos esforços no setor da construção no Brasil focou apenas na gestão da qualidade e na racionalização de processos e pouco se trabalhou na melhoria do desempenho do produto final. Algumas das ações que podem ser desenvolvidas nesse sentido são:

- Elaboração de especificações por desempenho;

<sup>6</sup> O chamado cobrimento nominal é o cobrimento mínimo mais 10 mm.

- Adoção de critérios de desempenho na elaboração de projetos;
- Capacitação de projetistas, construtores, fabricantes e contratantes sobre os conceitos de desempenho;
- Elaboração de normas técnicas e códigos baseados em requisitos de desempenho.

Não existe uma definição consensual para o termo “especificação por desempenho”. Isso porque há uma variedade de opções e interpretações do termo (BICKLEY *et al.*, 2006). O Quadro 2. 19 apresenta algumas das definições.

As raízes do conceito de projeto baseado em desempenho remontam a um artigo de arquitetura escrito por Vitruvius, há mais de 2 000 anos. No entanto, a abordagem que ainda é normalmente utilizada nas especificações e normas tem por base a obtenção do desempenho desejado por meio de prescrições resultantes de experiências anteriores, que se mostraram satisfatórias (BECKER; FOLIENSTE, 2005).

Atualmente, a maioria das especificações relativas ao concreto é predominantemente prescritiva, com um ou outro aspecto de desempenho, como, por exemplo, critérios para a relação água/materiais cimentícios máxima. Há um consenso de que esta realidade deveria ser mudada para o aumento da vida útil das estruturas (TAYLOR, 2004).

O modelo Nórdico, o qual foi adotado pelo *ICC Performance Code* (ICC, 2003) e pelo *Australian-NZ Building Code*, está sob implementação no código canadense e foi utilizado conceitualmente nas ISO 6240 (1980), ISO 6241 (1984) e ISO 6242 (1992) (BECKER; FOLIENSTE, 2005). A maioria das especificações por desempenho na construção civil, atualmente em vigor ou em desenvolvimento, segue esse modelo. A seguir, apresenta-se a estrutura do modelo Nórdico aplicado à especificação por desempenho de concretos:

1. Estabelecimento dos objetivos, ou seja, necessidades do usuário;
2. Estabelecimento dos requisitos funcionais, que são parâmetros qualitativos;
3. Estabelecimento dos critérios de desempenho. Devem ser estipulados os critérios de desempenho para o concreto nos estados fresco e endurecido, incluindo durabilidade. Estes critérios devem levar em conta não apenas as características da estrutura em serviço e durabilidade, mas também a construtibilidade, e devem ser definidos em termos de propriedades com limites claros para cada uma delas, por meio de ensaios pré-determinados. Quanto ao aspecto durabilidade, as especificações por desempenho devem levar em consideração as condições ambientais ou de exposição, vida útil de projeto e mecanismos de deterioração mais prováveis.

**Quadro 2. 19 – Definições de especificações por desempenho, segundo diferentes normas e documentos de referência.**

CIB Commission W060 (BECKER; FOLIENTE, 2005)	Prática que trabalha em termos dos fins e não dos meios.
Administração das rodovias federais americanas - <i>U.S. Federal Highway Administration</i> (FHWA, 2004)	“A especificação por desempenho define os requisitos de desempenho do produto final e os relaciona com a construção, os materiais e outros itens sob controle do empreiteiro”.
Associação das concreteiras americanas - NRMCA ( <i>National ready mixed concrete association</i> ) (BICKLEY <i>et al.</i> , 2006)	“A especificação por desempenho é um conjunto de instruções que resumem os requisitos funcionais do concreto endurecido, dependendo de sua aplicação.”
Norma canadense CSA A23-1 (CSA, 2006)	“Especificação por desempenho é um método para se especificar um produto de construção no qual o produto final é definido por meio de uma linguagem mandatória, de maneira que os requisitos de desempenho possam ser medidos por meio de métodos e normas aceitas. Os processos, materiais ou atividades usados pelos empreiteiros, subempreiteiros, produtores e fornecedores de materiais são deixados a cargo deles.”
Agência das rodovias britânicas - UK <i>Highway Agency</i> (BICKLEY <i>et al.</i> , 2006)	As especificações por desempenho são definidas como: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>“Requisitos</b> que definem o produto final. Isso se dá, normalmente, na forma de uma série de requisitos que contribuirão para o resultado desejado. Por exemplo, o atendimento do requisito de resistência ao derrapamento da superfície de um pavimento é um requisito que vai ajudar atingir o resultado de segurança; e</li> <li>• <b>Medidas de resultado</b> que definem os benefícios que devem ser atingidos como consequência. Isso, normalmente, se dá na forma dos níveis de serviços requeridos, por exemplo, a confiabilidade do tempo de viagem ou nível de segurança”.</li> </ul>
Associação do cimento e concreto da Nova Zelândia (BICKLEY <i>et al.</i> , 2006)	“Uma especificação com base em desempenho prescreve as propriedades do concreto requeridas, mas não diz como elas devem ser atingidas”.
Associação mundial de rodovias - PIARC – <i>World road association</i> (BICKLEY <i>et al.</i> , 2006)	“ - Uma especificação que descreve o desempenho do produto final ao longo do tempo. - Uma especificação que descreve os níveis desejáveis para as propriedades fundamentais para o desempenho (por exemplo, módulo resiliente, fluência, fadiga)”.
NBR 15 575/2008 (ABNT 2008 <sup>a</sup> ), Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho	Comportamento em uso de um produto, frente às condições de exposição.

Porém, para que se garanta o desempenho do concreto na fase de uso ainda é necessário que se apliquem as seguintes medidas (BICKLEY *et al.*, 2006):

- Criação de um sistema de qualificação/certificação que estabeleça os requisitos para o controle de qualidade, qualificação de mão-de-obra e requisitos para as instalações de produção de concreto.
- Os ensaios de desempenho para o proporcionamento dos materiais no concreto e para a aceitação do concreto na obra devem ser construídos com base em conceitos estatísticos, que considerem a variabilidade dos ensaios, e no gerenciamento de risco entre o produtor e o comprador (OBLA; LOBO, 2007 a e b).
- A especificação não deve apresentar uma lista detalhada dos materiais e proporções, mas sim uma coleção de requisitos e critérios de desempenho a serem atingidos, assim como os resultados esperados de ensaios na fase de pré-qualificação.
- Depois do lançamento do concreto, uma série de ensaios de aceitação deve ser realizada para determinar se o concreto atende aos critérios de desempenho.
- Criação de um conjunto de instruções a serem seguidas caso os critérios de desempenho não sejam atendidos.

### **2.2.1 Oportunidades e desafios**

Segundo Becker e Foliente (2005), a implementação de especificações por desempenho pode, de maneira geral, melhorar o desempenho em uso e oferecer novas oportunidades para inovações organizacionais e tecnológicas no campo da construção civil. Mais especificamente no campo do concreto, um sistema de especificação por desempenho deve garantir a detecção e a penalização de concretos que sejam insatisfatórios, evitar a rejeição do concreto satisfatório, promover um controle de qualidade adequado e evitar qualquer dúvida sobre a qualidade do concreto (DAY, 1982).

As especificações por desempenho permitem que o produtor de concreto desenvolva um traço que seja único para a combinação de materiais e métodos construtivos que serão empregados em cada obra. Elas se apresentam como uma alternativa às especificações prescritivas, pois estas (TAYLOR, 2004; BICKLEY *et al.*, 2006; DAY, 2005):

- Não garantem que os seus requisitos resultarão no desempenho desejado;

- Inibem as inovações;
- Limitam a competitividade;
- Descrevem detalhadamente fonte, composição e proporções dos materiais;
- Os riscos são assumidos pelo dono e pelo especificador;
- Tem que ser suficientemente detalhadas para considerar todos os fatores que afetam o desempenho;
- Necessitam de uma supervisão muito intensa para que se garanta que todos os critérios prescritivos sejam atendidos;
- Não incluem requisitos do produto final ou de desempenho, como durabilidade;
- Não acomodam a variabilidade dos materiais durante a execução, pois não permitem mudanças de traço;
- Eliminam qualquer incentivo para o produtor do concreto para que ele melhore a sua dosagem e controle de qualidade.

Cabe ressaltar mais uma vez que a maior vantagem do uso de especificações por desempenho, em substituição às especificações prescritivas, é que nelas especifica-se como o concreto deve comportar-se durante sua vida útil, e quais os níveis esperados das propriedades do produto final, o que ultrapassa a restrição usual ao estabelecimento de requisitos de resistência à compressão.

A adoção de especificações por desempenho enfrenta, porém, alguns desafios para que sejam empregadas com segurança (LOBO, 2002; TAYLOR, 2004; BICKLEY *et al.*, 2006b):

- A falta de métodos de ensaios confiáveis para avaliar alguns mecanismos, tais como reação álcali-agregado;
- Há necessidade do estabelecimento de modelos de previsão de vida útil confiáveis, calibrados para as condições e materiais brasileiros, com resultados de longo prazo;
- Há necessidade da revisão de normas, especificações e códigos, tais como ACI 318-08 e NBR 6118/2003, que previnem a inovação, por meio da limitação, por exemplo, da relação água/materiais cimentícios e do teor máximo de adições minerais;
- A construção civil é uma indústria reconhecidamente conservadora e que se opõe a mudanças radicais. É também uma indústria que é influenciada pelo interesse de grandes corporações;
- Existe no Brasil uma cultura de certa desconfiança, o que dificulta a mudança dos papéis e das responsabilidades dos envolvidos em todo o processo da construção de

estruturas em concreto. Para superar esta barreira, talvez seja necessário que as concreteiras desenvolvam sistemas de qualidade e sejam certificadas por organizações externas, idôneas e com credibilidade;

- Há necessidade de estabelecimento de correlações entre os ensaios usados na pré-qualificação dos traços e aqueles que serão utilizados no controle de qualidade durante a obra;
- É necessário um controle de qualidade em cada estágio do produto, sempre que ocorrer mudança de responsabilidades, ou seja, para o concreto que foi enviado à obra, para o concreto que foi lançado e curado;
- Especificadores e projetistas ainda não estão familiarizados com os critérios de desempenho;
- Como a capacidade de atendimento dos critérios de desempenho depende de vários fatores que incluem as usinas de concreto, os equipamentos e a mão-de-obra, deve-se estabelecer um sistema de qualificação e certificação de usinas, empreiteiros e mão-de-obra. Esta certificação deve visar o treinamento da mão-de-obra, bem como a manutenção do sistema de controle de qualidade adequado;
- Necessidade de ampliação dos ensaios de verificação de uniformidade no momento do recebimento do concreto, para incluir, além do ensaio de abatimento de tronco de cone, os ensaios de massa específica e de quantidade de água (ensaio de microondas, por exemplo), entre outros;
- O uso de especificações por desempenho requer uma mudança de mentalidade também em termos de responsabilidades técnicas. Cada profissional deve ter sua responsabilidade claramente definida para articular as condições de exposição e as características de desempenho a serem atendidas. Esta redefinição de responsabilidades gera um novo ambiente em termos do estabelecimento de bônus e penalidades.

### **2.2.2 Algumas iniciativas e tendências**

Apesar do conceito de especificação por desempenho não ser novo, recentemente a discussão tem crescido consideravelmente no âmbito internacional, com a finalidade de desenvolver especificações com foco na durabilidade e assim garantir uma maior vida útil do ambiente construído.

Nos Estados Unidos, um bom exemplo dos esforços no sentido de estabelecer-se uma especificação por desempenho na construção civil é o “*Superpave*” (**SU**perior **PER**forming *Asphalt PAVE*ments). Em 1987, O Congresso Americano estabeleceu um programa de pesquisa com duração de cinco anos e com o intuito de melhorar o desempenho, a durabilidade, a segurança e a eficiência do sistema rodoviário do país. Para esse plano de pesquisa e implementação foi aprovado um orçamento de 150 milhões de dólares. A pesquisa realizada entre 1987 e 1993 resultou em uma especificação por desempenho para o asfalto, um método de dosagem, métodos de ensaios e modelos de previsão de desempenho. Esta especificação é totalmente por desempenho e vem sendo usada com muito sucesso.

As especificações por desempenho têm despertado um grande interesse na Europa. A *Performance Based Building Network (PeBBu)* é uma rede temática financiada pela comissão europeia de Competitividade e Desenvolvimento Sustentável e gerenciada pelo *International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB)*. Participam dela mais de 70 organizações internacionais (BECKER; FOLIENSTE, 2005).

A PeBBu tem facilitado o avanço das pesquisas já existentes sobre construção com base em desempenho e tem também contribuído para a disseminação e adaptação da construção por desempenho. A PeBBu é também a patrocinadora da *Performance Based Building (PBB)*, cujo objetivo é facilitar o desenvolvimento e a introdução no mercado de tecnologias e de sistemas de construção inovadores, além de reduzir as barreiras técnicas para o mercado livre e aumentar a qualidade dos edifícios de maneira geral (BECKER; FOLIENSTE, 2005).

No estágio atual, vislumbra-se a necessidade da criação de um código europeu por desempenho, o *European Performance-based Model Code for Buildings*, similar, porém mais detalhado que o ICC 2003, e que deve cobrir os atributos de desempenho. Esses atributos de desempenho já fazem parte do currículo de algumas escolas de engenharia nas universidades europeias, na Austrália, na Nova Zelândia, em Israel, no Canadá e nos EUA (BECKER; FOLIENSTE, 2005).

Também refletindo essa tendência europeia, foi criado em 1996 um comitê conjunto da CIB e RILEM sobre métodos de previsão de vida útil de materiais de construção e componentes (CIB W080/RILEM 175 SLM), que produziu um relatório apresentando ferramentas operacionais para especificações com base em desempenho (CIB, 2004).

Os códigos estruturais europeus – Structural Eurocodes (CEN) – são o conjunto de documentos de projeto com base em conceitos de desempenho mais detalhado e seguem uma abordagem semi-probabilística. Partem da premissa de que a construção deva ser segura e o usuário deve sentir-se seguro. Os Eurocodes estabelecem metas de segurança e condições de serviço em termos físicos relacionados com os fatores que afetam o desempenho do edifício sob o ponto de vista do usuário (deformações, fissuras, vibrações) e valores limites para estes fatores físicos. Os *Eurocodes* praticamente não possuem nenhuma disposição prescritiva, nem mesmo para a seção mínima de pilares (BECKER; FOLIENSTE, 2005).

A engenharia de segurança ao fogo na Europa está seguindo a mesma linha que os *Eurocodes*, dando a opção de projeto por desempenho. A Sociedade Americana de Engenharia de Proteção ao Fogo (SFPE) também está tentando aplicar essa abordagem (SFPE 2004; ROSENBAUM 2005).

Os códigos de energia na maioria dos estados norte-americanos apresentam duas opções: a prescritiva, que oferece disposições para resistência térmica de elementos de revestimento externo, dimensão de janelas, entre outros, e a opção de desempenho que requer uma análise da demanda de energia em comparação com os recursos calculados de energia (DOE 2005a, DOE 2005b).

Tanto a ASTM quanto a ISO já estabeleceram comitês ou subcomitês responsáveis por normas relacionadas com desempenho das construções, como por exemplo, a ASTM E06, ISO SC 03 e a ISO SC 15 (BECKER; FOLIENSTE, 2005). Outros campos que estão desenvolvendo ferramentas para o projeto por desempenho incluem acústica, proteção contra umidade, durabilidade e qualidade do ar.

No âmbito nacional, o Brasil já começou a utilizar o conceito de especificações por desempenho. A ABNT aprovou em 2008 a norma NBR 15 575/2008, Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho, que estará em estágio probatório até maio de 2010. Como a normatização tem em vista o desempenho geral do sistema, ela não avalia a qualidade de cada item isoladamente.

Mais especificamente relacionado ao concreto, podem ser citadas iniciativas como o *da Prescrição para Desempenho* (PAD) ou *Prescription to Performance* (P2P), iniciativa promovida pelo comitê de engenharia e normas da associação de concreteiras americanas (*National Ready-Mixed Concrete Association* – NRMCA). A NRMCA é a principal entidade promotora da abordagem de desempenho da indústria do concreto nos EUA.

Já a *Federal Highway Administration* (FHWA) estabeleceu um plano detalhado e estratégico para pavimentos em concreto (*Road Map*), que guiará o investimento em pesquisa para os próximos dez anos. Este plano estratégico é dividido em doze áreas de concentração, sendo que três delas se referem a desempenho: i) Sistema de dosagem de concreto para pavimento com abordagem por desempenho, cujo investimento esperado é de 68 milhões de dólares; ii) Guia de projeto para pavimentos novos e reabilitados com abordagem por desempenho, cujo investimento esperado é de 60 milhões de dólares e iii) Desempenho de pavimentos de concreto, cujo investimento esperado é de 4 milhões de dólares (FERRAGUT *et al.*, 2005).

Seguindo essa mesma tendência internacional, em 2007 o ACI criou o *Task group ITG-8 Performance Criteria for Concrete Materials* (Critérios de desempenho para concretos). Em 2009 este *Task group* foi expandido com a criação do comitê ACI 329, *Performance criteria for ready-mixed concrete*, cuja primeira reunião se realizará em Março de 2010. O objetivo desse comitê é desenvolver e apresentar informação sobre critérios de desempenho para concreto usinado.

A RILEM também organizou o comitê AAM<sup>7</sup> (materiais ativados por álcalis), cujo principal objetivo é desenvolver especificações por desempenho e recomendações para o desenvolvimento de normas de desempenho aplicáveis especificamente a materiais ativados por álcalis, como escórias, cinzas volantes, geopolímeros e outras tecnologias emergentes.

Em 2010, o encontro anual do *Transportation Research Board* (TRB) vai apresentar uma sessão sobre métodos de ensaios para especificações por desempenho e um *workshop* com estudos de casos de projetos que implementaram especificações por desempenho.

---

<sup>7</sup> Acrônimo da expressão original em inglês *Alkali activated materials*.

## **CAPÍTULO 3 – Modelos de previsão de vida útil**

### **3.1 Introdução**

Para atender à necessidade crescente de inclusão de requisitos de desempenho referentes à durabilidade do concreto nas especificações e normas, é necessário que o desempenho da estrutura, ao longo da sua vida útil possa ser estimado, o que, por sua vez, requer modelos de previsão de vida útil que correlacionem os requisitos de durabilidade, medidos em laboratório por meio de ensaios acelerados, e o desempenho em serviço, medido em condições reais.

Um modelo consiste em dados de entrada, que incluem informações sobre o concreto e informações sobre o ambiente; e parâmetros de saída, que deve concordar com os dados de desempenho real das estruturas em vários ambientes de exposição, tais como: submerso, respingo, atmosfera, entre outros. Em outras palavras, modelagem é, por exemplo, o processo pelo qual se estima o perfil de cloretos, a profundidade de carbonatação e da penetração de sulfatos e, a partir daí, estima-se a vida útil da estrutura (NILSSON, 2005).

A tecnologia do concreto se beneficia de modelos consistentes que descrevem os mecanismos de deterioração. Esses modelos podem, por sua vez, afetar a segurança e a durabilidade, pois podem garantir um projeto racional e coerente de vida útil. Modelos consistentes incorporam o conhecimento de várias disciplinas técnicas, tais como: estática, tecnologia dos materiais, projeto, construção, estatística e economia. A experiência advinda da inspeção, manutenção e reparo de estruturas existentes pode ser usada para identificar e calibrar os parâmetros críticos que governam esses mecanismos (ROSTAM, 1993).

Existe um número grande de modelos de previsão de desempenho para concreto. Esse número cresceu muito, nas últimas duas décadas, com o desenvolvimento de ferramentas que auxiliam na medição dos parâmetros que governam os mecanismos de deterioração, tais como equipamentos de ensaio, sensores, entre outros, além do desenvolvimento no campo da tecnologia da informação, que auxilia na solução matemática desses modelos. A análise de todos os modelos existentes configura-se como uma tarefa quase impossível. Este capítulo visa, portanto, apresentar um panorama geral sobre modelagem referente à deterioração por despassivação, para auxiliar na escolha dos modelos utilizados no restante desta tese para a avaliação do desempenho de concretos com escória de alto-forno.

### **3.2 Modelos de previsão da despassivação por cloretos**

Como a corrosão das armaduras é responsável por até 64% dos danos às estruturas de concreto (DAL MOLIN, 1988; ANDRADE, 1997), a grande maioria dos modelos de previsão de vida útil encontrados na literatura modelam os mecanismos que podem levar à corrosão da armadura, como, por exemplo, a carbonatação e a penetração de cloretos.

Dentre eles, os modelos de penetração de cloretos são os mais numerosos. O relatório WP4, de modelagem da penetração de cloretos (NILSSON, 2005), lista cerca de 25 modelos de previsão (Quadro 3. 1) e os divide em duas categorias: modelos com base na segunda lei de Fick (ERFC<sup>1</sup>, soluções analíticas e soluções matemáticas), e modelos com

---

<sup>1</sup> Função de erro de Gauss ERFC.

base nas equações de fluxo (primeira lei de Fick e Equação de fluxo de Nernst-Planck). Além desses modelos, podem-se citar os modelos desenvolvidos por Andrade (2001) e Andrade *et al.* (1989), que servem, respectivamente, para determinar a posição da concentração crítica de cloretos e para determinar a perda da seção da armadura ao longo do tempo; e o modelo Petre-Lazar (2000), que se divide em um modelo físico e em um tratamento probabilístico.

**Quadro 3. 1 - Uso de modelos para a previsão da penetração de cloretos (Nilsson, 2005).**

Modelos com base na segunda lei de Fick			Modelos com base nas equações de fluxo	
ERFC	Soluções analíticas	Soluções numéricas	Primeira lei de Fick	Equação de fluxo de Nernst-Planck
Tradicional	Mejbro-Poulsen	NIST	ClincConc	Ms-Diff
Colleparidi	Hetek	LEO	HetekConv	Li&Page
Japão		Life-365	Imperial	Johannesson
Tuutti			Toronto	Stadium
Selmer-Poulsen			THI EdF	
Bamforth			LERM	
Allied			Meijers	
Firth				
Duracrete				
Nilsson				

Quando os cloretos penetram no concreto, seja por absorção e/ou difusão iônica, parte deles é fixada formando cloroaluminatos; parte permanece adsorvida junto às paredes dos poros, e o restante permanece livre (BAUER; HELENE, 1993). Estes cloretos livres são os que, efetivamente, participam do mecanismo de corrosão das armaduras no concreto (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997).

Os cloretos que penetram no concreto com teores que excedam um determinado limite em relação à concentração de hidroxilas na solução dos poros do concreto despassivam a superfície do aço e iniciam o mecanismo de corrosão (COMENTÁRIOS TÉCNICOS NBR 6118, 2003). Em concretos com dosagens usuais, o limite de teor de

cloreto para se iniciar a corrosão deve estar na faixa de 0,6 a 0,9 kg Cl<sup>-</sup> por m<sup>3</sup> (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Os cloretos têm participação importante, tanto no período inicial como no período de propagação do mecanismo de corrosão. No período de iniciação, os cloretos agem diretamente na despassivação da armadura, por meio de acidificações locais que levam a desestabilizações puntiformes da película passivante. A seguir, participam ativamente do mecanismo de corrosão, aumentando substancialmente a condutividade elétrica do eletrólito, além de participar das reações para formação dos produtos de corrosão (CASCUDO, 1997).

### 3.2.1 Modelos com base na segunda lei de Fick

A segunda lei de Fick (Equação 3.1) consiste numa equação de equilíbrio de massa. Inicialmente, ela foi criada para ser aplicada onde não houvesse fixação de cloretos, mas foi posteriormente aplicada para o transporte de massa em meios porosos, com ou sem fixação de cloretos.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D_{F2} \frac{\partial^2 c}{\partial^2 x} \quad \text{Equação 3. 1}$$

Sendo:

C(x,t) = teor de cloretos a uma determinada profundidade e a um determinado tempo de exposição;

D<sub>F2</sub> = coeficiente de difusão de cloretos (segunda lei de Fick);

x = profundidade;

t = tempo de exposição.

#### 3.2.1.1 Função de erro de Gauss (ERFC)

A solução matemática para a segunda lei de Fick ( Equação 3. 2) é conhecida para um meio semi-infinito com um coeficiente de difusão constante e um teor de cloretos superficial constante. Como a função de erro de Gauss representa a solução da segunda lei

de Fick, a regressão é realizada de forma a relacionar o perfil de concentração de cloretos com a função de erro de Gauss (KROPP, 2004).

$$C(x,t) = C_{sa} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right) \quad \text{Equação 3. 2}$$

Sendo:

$C(x,t)$  = teor de cloretos a uma determinada profundidade e a um determinado tempo de exposição;

$C_{sa}$  = teor aparente de cloretos superficial;

$D_a$  = coeficiente aparente de difusão de cloretos;

$x$  = profundidade;

$t$  = tempo de exposição.

Os modelos de função erro podem ser divididos em: a)  $D_a$  e  $C_{sa}$  constantes, b)  $D_a$  em função do tempo e  $C_{sa}$  constante, c)  $D$  (coeficiente efetivo de difusão de cloretos) em função do tempo e  $C_{sa}$  constante e d)  $D_a$  e  $C_{sa}$  em função do tempo.

#### **a) $D_a$ e $C_{sa}$ constantes**

Este modelo foi proposto em 1970 e permaneceu como único modelo disponível por mais de uma década. O princípio desse modelo é estimar o coeficiente aparente de difusão  $D_a$  e o teor aparente de cloreto superficial ( $C_{sa}$ ), a partir de dados de laboratório e campo. O modelo, porém, superestima consideravelmente a taxa de ingresso de cloretos, e, atualmente, é substituído por modelos onde o  $D_a$  varia em função do tempo. Outra limitação do modelo é a falta de concordância entre os perfis de cloreto medidos e os perfis previstos para após alguns anos de exposição. Exemplos são os modelos: tradicional, Collepari, japonês e Tuutti (NILSSON, 2005).

**b)  $D_a(t)$  e  $C_{sa}$  constante**

O princípio desse modelo é estimar o coeficiente aparente de difusão ( $D_a$ ), em função do tempo e o teor aparente de cloreto superficial ( $C_{sa}$ ) a partir de dados de laboratório e de campo.

Uma das limitações desse modelo consiste no fato de que o fenômeno de mudança do coeficiente aparente de difusão com o tempo ainda não é totalmente entendido. Essa falta de conhecimento leva a uma grande incerteza na previsão, pois se corre o risco dessa dependência com o tempo não seguir as equações empíricas e, por exemplo, o coeficiente aparente de difusão poder parar de diminuir após certo tempo. Exemplos desse modelo são o Selmer-Poulsen, o Bamforth, o Allied e o Firth (NILSSON, 2005).

**c)  $D(t)$  e  $C_{sa}$  constante**

Os princípios deste modelo são:

- Determinar o coeficiente de difusão de cloretos para um concreto por meio de ensaios de curta duração;
- Calcular o coeficiente efetivo de difusão ( $D$ ) após certo tempo de exposição, por meio da correção do coeficiente de difusão de cloretos, levando-se em conta o efeito do método de ensaio, cura, ambiente e envelhecimento durante a exposição;
- A partir da exposição em campo de concreto similar, em condições ambientais similares, estimar o teor de cloreto superficial aparente  $C_{sa}$  (constante); e
- Prever o ingresso de cloretos após certo tempo de exposição, o perfil de cloretos e o coeficiente efetivo de difusão.

Esse modelo apresenta várias limitações na parte de equações matemáticas e necessita ser revisado para poder considerar adequadamente o efeito do tempo no coeficiente de difusão (NILSSON, 2005). Exemplo desse modelo é o DuraCrete, um projeto de pesquisa grande realizado pela União Européia com o intuito de desenvolver uma metodologia de projeto de durabilidade de concreto baseada na abordagem probabilística.

**d)  $D_a(t)$  e  $C_{sa}(t)$** 

O princípio deste modelo é estimar o coeficiente aparente de difusão ( $D_a$ ) e o teor de cloretos superficial aparente ( $C_{sa}$ ) em função do tempo, a partir de dados de ensaio de exposição em campo.

Esse modelo apresenta limitações na parte de equações matemáticas para a solução da segunda lei de Fick e subestima o ingresso de cloretos. Exemplo desse modelo é o Nilsson (2005).

**3.2.1.2 Soluções analíticas  $D_{F2}(t)$  e  $C_{sa}(t)$** 

Com a evolução do conhecimento do mecanismo de penetração de cloretos dos últimos anos, constatou-se que o teor de cloretos superficial é variável com o tempo, até mesmo para concretos submersos e que, para essas condições de contorno, a equação de erro de Gauss não seria mais válida (NILSSON, 2005).

O princípio dos modelos com base em soluções analíticas é estimar o coeficiente de difusão  $D_{F2}$  e o teor aparente de cloretos superficial ( $C_{sa}$ ) em função do tempo, a partir de ensaios de exposição em campo, e prever o ingresso de cloretos depois de certo tempo de exposição, ou seja, o perfil de cloretos.

De acordo com os próprios autores do modelo, ele não modela os mecanismos físicos e químicos reais envolvidos no ingresso de cloretos, mas descreve o resultado desses mecanismos no perfil de cloretos. Além disso, como a maioria dos modelos, ele é dependente de boas medidas ambientais e do tipo de concreto, e as medidas devem representar um período longo de exposição (FREDERIKSEN *et al.*, 1997). Como os parâmetros do modelo são obtidos a partir de dados de exposição de campo, o modelo se limita ao caso estudado, mas pode ser adaptado para outros ambientes se houver dados suficientes. Exemplos desse modelo são o Mejlbro-Poulsen e o Hetek (NILSSON, 2005).

**3.2.1.3 Soluções numéricas  $D_{F2}(t)$  e  $C_{sa}(t)$** 

O princípio deste modelo é estimar o coeficiente de difusão de cloretos ( $D_{F2}$ ) com o tempo, e o teor aparente de cloretos superficial ( $C_{sa}$ ), possivelmente variável com o tempo, a

partir de isotermas de fixação de cloretos ou de ensaios de exposição em campo, e prever o ingresso de cloretos para um determinado período de exposição.

Existe uma limitação no que tange à definição e a quantificação do coeficiente de difusão em função do tempo, por vezes causando certa confusão entre o coeficiente de difusão e o coeficiente aparente de difusão (NILSSON, 2005). Exemplos desse modelo são o NIST, o LEO e o Life-365. Life-365 é uma ferramenta matemática desenvolvida para facilitar o uso desse modelo. O programa está disponível gratuitamente, é de fácil utilização, e possui uma base de dados grande para as condições ambientais norte-americanas, a qual deve ser adaptada para as condições brasileiras. Caso disponha de dados de boa qualidade, o usuário pode mudar todos os dados de entrada, que compreendem localização geográfica, tipo de estrutura, espessura do revestimento, composição do concreto e estratégias de proteção da armadura (VIOLETTA, 2002).

### **3.2.2 Modelos com base em equações de fluxo de íons**

Nos modelos físicos, todos os processos físicos e eletroquímicos devem ser descritos da maneira mais científica possível. Nesse tipo de modelo, não se usa regressão para relacionar os dados de entrada (como por exemplo, os perfis de concentração de cloretos) com os dados de exposição. Ao contrário, os dados de exposição servem apenas para validar as previsões oferecidas pelo modelo. Esses modelos baseiam-se fundamentalmente no conceito de transporte de cloretos e fixação de cloretos (NILSSON, 2005).

#### **3.2.2.1 Modelos com base na primeira lei de difusão de Fick, sem convecção**

A primeira lei de difusão de Fick é definida segundo a Equação 3.3.

$$q_{cl} = -D_{Fl} \frac{\partial c_{cl}}{\partial x}$$

Equação 3.3

Sendo:

$q_{cl}$  = fluxo de cloretos;

$D_{F1}$  = coeficiente de difusão (primeira lei de Fick);

$c_{cl}$  = concentração de cloretos livres dissolvidos em água;

$x$  = profundidade.

O fluxo de cloretos é descrito com o coeficiente de difusão de cloreto ( $D_{F1}$ ) na primeira lei de Fick calculado a partir do ensaio de migração, a uma determinada idade. A fixação de cloretos é descrita por uma isoterma de fixação, a qual é função do pH e da temperatura. Finalmente, a lixiviação dos álcalis é descrita por meio da difusão dos hidróxidos do concreto e do perfil de pH (NILSSON, 2005).

Uma das vantagens desse modelo consiste no fato de que se requer apenas um pequeno número de dados de entrada. No entanto, a parte física do modelo apenas se aplica a concretos submersos. Além disso, o fato de que o efeito de todos os íons no processo de transporte de cloretos é ignorado, levanta certa suspeita sobre a precisão desse modelo (NILSSON, 2005).

O programa ClinConc foi desenvolvido com base nesse modelo de fluxo, e é um dos programas mais avançados para a previsão da penetração de cloretos no concreto.

### **3.2.2.2 Modelos com base na primeira lei de difusão de Fick, com convecção**

Vários modelos foram desenvolvidos levando em conta a convecção, a fim de se prever o ingresso de cloretos em estruturas submetidas a fluxo de umidade e a ciclos de molhagem e secagem.

A convecção de cloretos é governada pelo fluxo de umidade. Como esta influencia a concentração de cloretos, a sua distribuição deve ser prevista por meio da solução de equilíbrio de massa para umidade. Esse tipo de modelo é o único capaz de tratar os casos onde o fluxo de umidade representa um papel dominante. No entanto, esse tipo de modelo normalmente é complexo, de difícil operação e cuja aplicação prática é questionável. Além disso, requer uma quantidade de dados de entrada muito grande. Assim como no caso dos modelos com base na primeira lei de difusão de Fick sem convecção, o fato do efeito de todos os íons no processo de transporte de cloretos não ser considerado levanta suspeita

quanto a sua precisão (NILSSON, 2005). Exemplos desse modelo são o Imperial, HetekConv, ConFlux, LERM, etc.

### 3.2.2.3 Modelos físicos com base na equação de fluxo de Nernst-Planck

Este modelo leva em consideração o fluxo de todos os íons no sistema e a influência que têm uns sobre os outros, por meio da criação de um campo elétrico na solução dos poros. A equação de fluxo de Nernst-Planck pode ser descrita na Equação 3.4:

$$q_i = -D_i \left( \frac{\partial c_i}{\partial x} + c_i \frac{\partial \ln a_i}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT_a} c_i \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \quad \text{Equação 3.4}$$

Sendo:

i = cada tipo de íon;

$q_i$  = fluxo de cada tipo de íon;

$D_i$  = coeficiente de difusão do íon;

$c_i$  = concentração do íon;

$a_i$  = constante;

$z$  = valência;

$F$  = constante de Faraday;

$R$  = constante de gás ideal = 0.082 litros x atm/K x mol;

$T_a$  = temperatura absoluta em K;

$x$  = profundidade;

$\Phi$  = campo elétrico;

$\delta\Phi/\delta x$  = gradiente de potencial elétrico.

Esse modelo supre a lacuna dos dois anteriores, porém requer uma enorme quantidade de dados de entrada, sendo que os coeficientes de difusão e os coeficientes de fluxo de umidade para cada íon devem ser dados em função de uma série de parâmetros, o que dificulta o uso desse modelo. Exemplos desse modelo são o MS-Diff, o Li & Page e o Stadium (NILSSON, 2005).

### 3.2.3 Modelo Andrade

Andrade (2001) desenvolveu um modelo de penetração de cloretos (Equação 3. 5), levando em consideração os cimentos brasileiros, bem como o uso de algumas adições.

$$x_f = 7,35 \cdot \frac{UR^{0,7} \cdot T^{0,1} \cdot Cl^{0,7}}{K_1 \cdot f_{ck} \cdot K_2 \cdot (1 + Ad)^{0,2}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 3. 5}$$

Sendo:

$x_f$  = posição da frente de penetração de cloretos (equivalente a um teor de cloretos de 0,4% em relação à massa de cimento);

UR = umidade relativa do ambiente;

T = temperatura ambiental;

Cl = concentração superficial de cloretos;

$K_1$  = fator que depende do tipo de cimento (Quadro 3. 2);

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão;

$K_2$  = fator que depende do tipo de adição empregada (Quadro 3. 3);

Ad = teor de adição no concreto;

t = tempo.

**Quadro 3. 2 – Valores de K1 em função do tipo de cimento (ANDRADE, 2001).**

$K_1$	Tipo de cimento
0,98	CP II - E
1,00	CP II - F
1,05	CP II - Z
1,21	CP III – AF
1,17	CP IV – Poz
0,95	CP V – ARI

**Quadro 3. 3 – Valores de K<sub>2</sub> em função do tipo de adição (ANDRADE, 2001).**

K <sub>2</sub>	Tipo de adição
1,00	Sílica ativa
0,97	Metacaulim
0,76	Cinza da casca de arroz

Esse modelo pode ser considerado de fácil utilização e não necessita a determinação do coeficiente de difusão, porém apresentou resultados piores que o modelo com base na 2ª Lei de Fick, em relação a medidas *in situ* de uma estrutura localizada no sistema portuário na cidade de Rio Grande (ANDRADE, 2001).

### 3.2.4 Modelo Baweja *et al.* (1999)

Baweja *et al.* (1999) criaram dois modelos que prevêem a vida útil de estruturas em ambiente marinho, a partir do cobrimento e da resistência média aos 28 dias, para dois níveis de resistividade: baixa e alta. Os modelos foram desenvolvidos tendo como base apenas 6 misturas, sendo que apenas uma delas continha escória de alto-forno (35%). As equações foram baseadas em um modelo simplificado de difusão de cloretos, considerando constantes o coeficiente de difusão de cloretos e a concentração de cloretos na superfície. Os autores não apresentam detalhes do modelo de difusão e não indicam se a segunda lei de Fick foi utilizada. A Equação 3. 6 apresenta o modelo para concretos com baixa resistividade elétrica e a Equação 3. 7 apresenta o modelo para concretos com alta resistividade elétrica. O limite entre baixa e alta resistividade é 8000 ohm.cm.

$$d_c = \frac{2822}{f_{cm}^{2,61}} \cdot \sqrt{t}$$

Equação 3. 6

$$d_c = \frac{226537}{f_{cm}^{2,61}} \cdot \sqrt{t}$$

Equação 3. 7

Sendo:

$d_c$  = cobrimento em mm;

$f_{cm}$  = resistência à compressão média aos 28 dias em MPa;

$t$  = tempo para iniciação da corrosão em anos.

Pode-se observar que esse modelo é muito simplista, pois leva em consideração apenas a resistência à compressão e ignora as diferenças que possam ocorrer quando são usados diferentes materiais cimentícios.

### 3.3 Modelos de previsão de carbonatação

A previsão da profundidade de carbonatação é de extrema importância para a previsão da vida útil de uma estrutura. A carbonatação é um mecanismo natural, que, normalmente, ocorre em presença de umidade em ambientes com diferentes concentrações de  $\text{CO}_2$ . Trata-se de um processo físico-químico complicado, que inclui o transporte de  $\text{CO}_2$  no concreto (difusão) e a reação química do  $\text{CO}_2$  com o  $\text{Ca(OH)}_2$  e outras espécies alcalinas dissolvidas na água do poro do concreto, formando carbonato de cálcio e água. Como esse mecanismo é complexo, pode-se afirmar que alguns desses aspectos ainda não foram totalmente entendidos e modelados. Nos últimos anos, vários estudos têm se concentrado na compreensão e modelagem da carbonatação por meio de estudos experimentais ou teóricos (ZHANG *et al.*, 1997).

A carbonatação, assim como o ingresso de cloretos, é governada pelo mecanismo de difusão acompanhado pela reação do  $\text{CO}_2$  com o  $\text{Ca(OH)}_2$  e outras espécies, o que promove a imobilização de algumas das moléculas de  $\text{CO}_2$  e impede que tomem parte no mecanismo de difusão.

As reações de carbonatação no concreto ocorrem, geralmente, com o hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , segundo a reação simplificada, mostrada na Equação 3. 8 (HELENE *et al.*, 1995; KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996):



A carbonatação pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Difusão do  $\text{CO}_2$  do ambiente por meio da fase gasosa dos poros do concreto;
2. Dissolução do  $\text{CO}_2$  na água do poro;
3. Reação do  $\text{CO}_2$  com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e outras espécies alcalinas, dissolvidos na água do poro do concreto;
4. Redução do volume de poro devido à formação de produtos sólidos da carbonatação.

As reações de carbonatação podem ocorrer também com os outros compostos hidratados da pasta de cimento como o C-S-H, o  $\text{C}_3\text{AH}_{13}$  e o  $\text{C}_3\text{A}(\text{CS})_3\text{H}_{32}$ , segundo as reações propostas por Calleja *apud* Nunes, (1998), bem como com os compostos anidros da pasta de cimento, quando submetidos a altas pressões de dióxido de carbono (RICHARDSON, 1988). No entanto, a principal reação de carbonatação é com o hidróxido de cálcio e, em menor escala, com o silicato de cálcio hidratado, pois, em pastas de cimento totalmente hidratadas, o volume das fases CH e C-S-H é de aproximadamente 70 a 75% do total das fases hidratadas (MATALA, 1997; WEE; SURYAVANSHI, LOGENDRAN, 1999).

### 3.3.1 Modelo da raiz quadrada do tempo (modelo Ushida-Hamada, 1928)

O modelo de carbonatação mais difundido é o modelo da raiz quadrada do tempo (USHIDA; HAMADA, 1928), que é uma simplificação da primeira lei de Fick (Equação 3. 9).

$$X = K \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 3. 9}$$

Sendo:

X = profundidade de carbonatação;

K = coeficiente de carbonatação, o qual é função do volume de pasta, da relação água/materiais cimentícios, porosidade da pasta, idade do concreto, umidade relativa e quantidade e tipo de material cimentício;

t = tempo.

A grande importância desse modelo matemático está na previsão da vida útil de projeto, considerada como o período de tempo necessário para que a frente de carbonatação atinja a armadura (despassivação), também denominado *período de iniciação*, controlado pela termodinâmica do sistema concreto-armadura-meio ambiente (ROSENBERG *et al.*, 1989; HELENE *et al.*, 1995; ZHANG *et al.*, 1997).

### 3.3.2 Modelo Häkkinen (1993)

Häkkinen (1993) tentou superar a dispersão de resultados, normalmente encontrada na profundidade de carbonatação de estruturas diferentes, relacionando o modelo de Ushida-Hamada com a resistência a compressão do concreto. Ele assume que existe uma relação entre a resistência à compressão e a resistência ao ingresso de dióxido de carbono (Equação 3. 10).

$$X = \xi_{env} \cdot \xi_a \cdot f_{cm}^{\xi_b} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 3. 10}$$

Sendo:

X = profundidade de carbonatação;

$\xi_{env}$  = coeficiente ambiental (1,0 para estruturas protegidas da chuva e 0,5 para estruturas expostas a chuva);

$\xi_a$  = parâmetro relacionado com o tipo de cimento;

$\xi_b$  = parâmetro relacionado com o tipo de cimento;

$f_{cm}$  = resistência à compressão média aos 28 dias;

t = tempo.

Häkkinen (1993) determinou que, para concretos contendo 70% de escória granulada de alto-forno, o valor de  $\xi_a$  é 360 e o valor de  $\xi_b$  é -1,2.

### 3.3.3 Modelo Zhang et al. (1997)

Zhang *et al.* (1997) desenvolveram um modelo com base na difusão, usando a segunda lei de Fick, onde incorporam parâmetros da microestrutura (Equação 3. 11).

$$X = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} \cdot C_s \cdot t}{W_{CaO}}} \quad \text{Equação 3. 11}$$

Sendo:

X = profundidade de carbonatação;

$D_{CO_2}$  = coeficiente de difusão do  $CO_2$  no concreto;

$C_s$  = concentração do  $CO_2$ ;

$W_{CaO}$  = concentração molar total de CaO na forma de  $Ca(OH)_2$  que está disponível para carbonatação;

t = tempo.

Como pode ser observado, esse modelo é mais complexo e a determinação de alguns parâmetros, tais como  $D_{CO_2}$  e  $W_{CaO}$ , pode dificultar a sua utilização.

### 3.3.4 Modelo Papadakis et al. (1991) e Papadakis (2000)

Papadakis *et al.* (1991) desenvolveram um modelo experimental de carbonatação que leva em consideração o coeficiente de difusão de  $CO_2$ , a quantidade de  $Ca(OH)_2$  e C-S-H presentes no concreto e a concentração de  $CO_2$  no ambiente (Equação 3. 12).

$$X = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2} \cdot (CO_2 / 100) \cdot t}{0,33CH + 0,214CSH}} \quad \text{Equação 3. 12}$$

Sendo:

X = profundidade de carbonatação;

CO<sub>2</sub> = concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente;

CH = teor de Ca(OH)<sub>2</sub> no concreto;

CSH = quantidade de C-S-H no concreto;

t = tempo;

D<sub>e,CO2</sub> = difusividade efetiva de CO<sub>2</sub> no concreto carbonatado (Equação 3. 13).

$$D_{e,CO_2} = A \left( \frac{\varepsilon_c}{\frac{C}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_p} + \frac{W}{\rho_w}} \right)^a \cdot (1 - UR/100)^b \quad \text{Equação 3. 13}$$

Sendo:

A, a e b são coeficientes obtidos por meio de regressão linear, respectivamente, 6,1x10<sup>-6</sup>, 3,0 e 2,2;

ε<sub>c</sub> = porosidade do concreto carbonatado;

C = massa do cimento;

P = massa da adição mineral;

W = massa da água

ρ<sub>c</sub> = densidade do cimento;

ρ<sub>p</sub> = densidade da adição mineral;

ρ<sub>w</sub> = densidade da água;

UR = umidade relativa.

Papadakis (2000) modificou esse modelo, a fim de incluir fatores de eficiência das adições minerais. Segundo esse conceito, o fator de eficiência (fator k) é definido como a parcela da adição mineral que pode ser considerada como equivalente ao cimento Portland, quando se compara uma propriedade específica de um concreto pozolânico com a mesma propriedade do concreto sem adição mineral. Em outras palavras, a quantidade de adição mineral é multiplicada pelo fator k para que se estime a quantidade de cimento portland equivalente. O fator k pode ser calculado levando-se em consideração a resistência à compressão ou propriedades que reflitam a durabilidade, tais como a carbonatação e a

penetração de cloretos. Assim, a Equação 3. 12 e a Equação 3. 13 podem ser reescritas (Equação 3. 14 e Equação 3. 15):

$$X = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2} \cdot (CO_2/100) \cdot t}{0,218(C + kP)}} \quad \text{Equação 3. 14}$$

$$D_{e,CO_2} = 6,1 \times 10^{-6} \left( \frac{(W - 0,267(C + kP))/1000}{\frac{C + kP}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w}} \right)^3 \cdot (1 - UR/100)^{2,2} \quad \text{Equação 3. 15}$$

Papadakis (2000) determinou experimentalmente o fator k em relação à carbonatação de concretos contendo sílica ativa, cinza volante com baixo teor de cálcio e cinza volante com alto teor de cálcio, respectivamente 0,3; 0,5 e 0,7. O fator k para concretos contendo escória de alto-forno não foi determinado.

### 3.3.5 Modelo do CEB (1997)

O modelo do CEB (CEB, 1997) se baseia na primeira lei de Fick e combina dois mecanismos, a difusão e a fixação do CO<sub>2</sub>, e leva em consideração a umidade relativa, a secagem e molhagem do concreto, e heterogeneidades. O modelo considera que a carbonatação depende da molhagem e secagem do cobrimento da armadura. Isso porque no concreto úmido, os seus poros estão cheios de água e o dióxido de carbono não consegue penetrar no concreto. O modelo usa parâmetros que são calibrados para a profundidade de carbonatação em ambientes específicos (GAAL, 2004).

$$X = \sqrt{2 \cdot \Psi_1 \cdot \Psi_2 \cdot \Psi_3 \cdot C_{cb,s}} \cdot \sqrt{\frac{D_{cb}}{a_f} \cdot t} \cdot \left( \frac{t_0}{t} \right)^\Psi \quad \text{Equação 3. 16}$$

Sendo:

$X$  = profundidade de carbonatação;

$\Psi_1$  = parâmetro para as condições do micro-clima, que descreve a umidade média do concreto (Quadro 3. 4);

$\Psi_2$  = parâmetro que descreve as condições de cura (Quadro 3. 4);

$\Psi_3$  = parâmetro que descreve o efeito da separação da água (relação água/materiais cimentícios local) (Quadro 3. 4);

$C_{cb;s}$  = teor de  $CO_2$  na atmosfera;

$D_{cb}$  = coeficiente de difusão de  $CO_2$  efetivo do concreto seco, carbonatado em um ambiente definido com  $T=20^\circ C$  e  $UR = 65\%$ ;

$t_0$  = tempo de referência;

$t$  = tempo em serviço;

$\Psi$  = parâmetro para as condições do micro-clima, que descreve a molhagem e secagem (Quadro 3. 4);

$a_f$  = quantidade de  $CO_2$  necessária para a carbonatação completa (capacidade de fixação do  $CO_2$ ) (Equação 3. 17).

$$a_f = \left( 0,75 \cdot C_{cim} \cdot c_{CaO} \cdot DH \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right) \quad \text{Equação 3. 17}$$

Sendo:

$c_{CaO}$  = teor de CaO no cimento;

$C_{cim}$  = consumo de cimento;

DH = grau de hidratação;

M = massa molar da substância respectiva.

**Quadro 3. 4 – Parâmetros do modelo de carbonatação do CEB (CEB, 1997).**

Classe	I	II	III	IV	V
<b>Cura</b>	<b>ruim</b>	<b>boa</b>	<b>boa</b>	<b>boa</b>	<b>boa</b>
$\Psi_1$	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6
$\Psi_2$	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\Psi_3$	1,5	1,2	1,2	1,0	1,0
$\Psi$	0,3	0,3	0,2	0,1	0,05
I, II : ocasionalmente molhado III: molhado durante a chuva IV, V: partes cobertas					

### 3.3.6 Modelo Probabilístico

Este modelo, utilizado pelo DuraCrete, combina o modelo de carbonatação do CEB com o conceito probabilístico. A profundidade de carbonatação é calculada por meio do modelo do CEB (1997) e, a partir daí, deve-se então calcular a probabilidade de que a profundidade de carbonatação atinja ou supere o cobrimento da armadura, a qual deve ser menor que um valor predefinido (Equação 3. 18).

$$p_f = p(X \geq d_c) \leq \Phi(-\beta) = p_{target} \quad \text{Equação 3. 18}$$

Sendo:

p = probabilidade;

$p_f$  = probabilidade de falha;

X = profundidade de carbonatação;

$d_c$  = cobrimento da armadura;

$\Phi$  = função da distribuição probabilística da distribuição normal;

$\beta$  = índice de confiabilidade;

$P_{target}$  = probabilidade de falha alvo, definida pela norma nacional.

Esse modelo tem um grau de complexidade elevado, pois considera vários fatores como a umidade, a execução, o gradiente de concentração de CO<sub>2</sub>, o micro-clima e funções probabilísticas, dificultando o seu uso.

## **CAPÍTULO 4 – Materiais, Planejamento Experimental e Métodos**

### **4.1 Introdução**

A pesquisa foi desenvolvida em oito etapas distintas, conforme apresentado na Figura 4. 1.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a produção dos concretos, as metodologias para dosagem experimental e avaliações das propriedades físicas, mecânicas, de deterioração relativa à corrosão (despassivação por carbonatação e/ou por elevado teor de cloretos) e da própria corrosão da armadura.

### **4.2 Caracterização dos materiais – Apêndice A**

Os materiais caracterizados e utilizados na produção dos concretos foram cimento Portland composto CP II-E-32, o cimento Portland de alto-forno CP III-32-RS, a escória granulada de alto-forno moída, areia, pedra britada n.º 0 e pedra britada n.º 1.

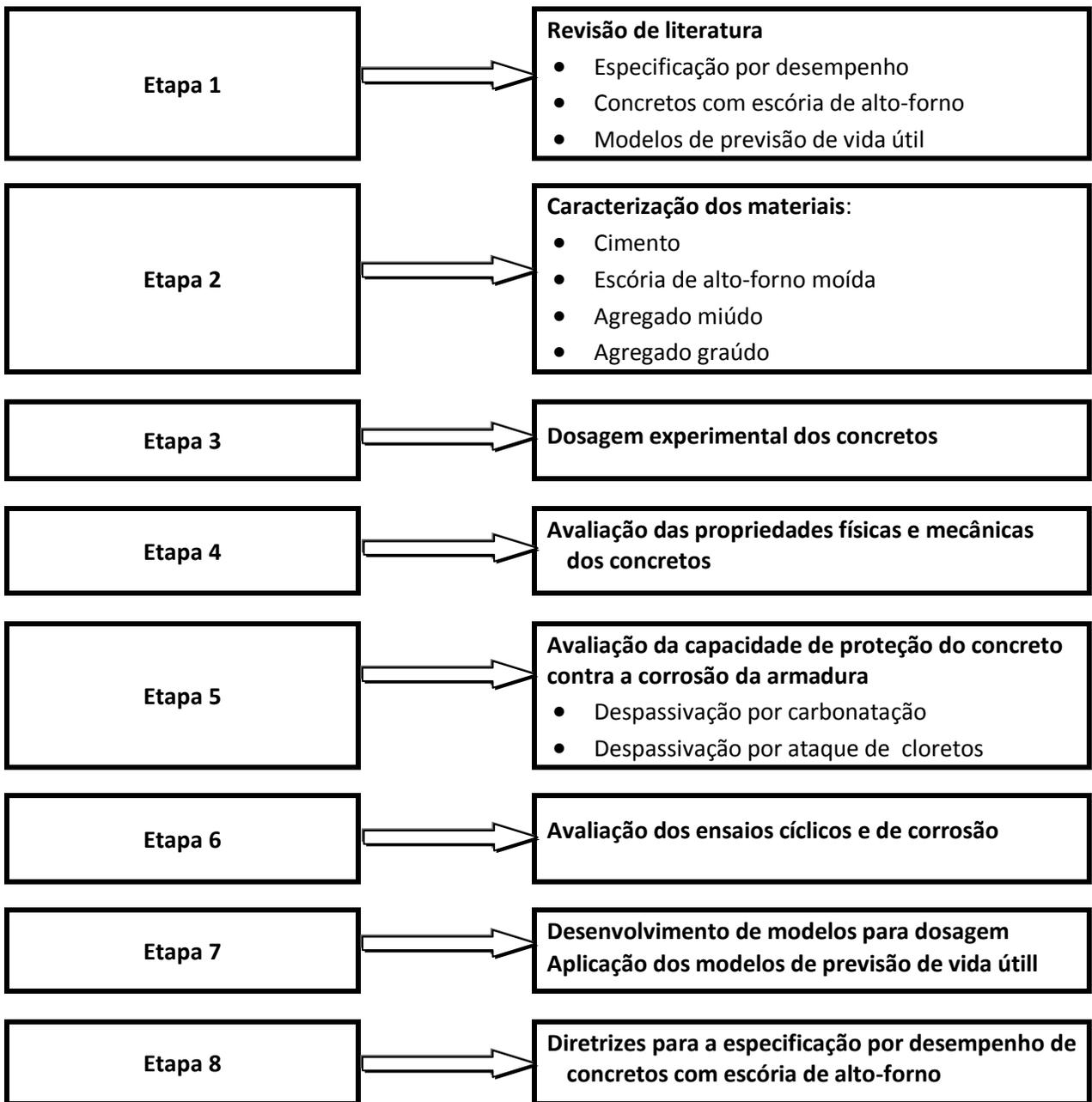


Figura 4. 1 – Etapas da pesquisa.

#### 4.2.1 Materiais cimentícios

Os materiais cimentícios caracterizados foram o cimento *Portland* composto com escória CP II-E-32 (NBR 11 578/1991), o cimento *Portland* de alto-forno CP III-32-RS (NBR 5 735/1991), e a mistura, em massa, de 50% de cimento *Portland* de alto-forno CP III-32-RS com 50% de escória granulada de alto-forno moída.

Foram realizadas a caracterização física, a análise química e a determinação do teor de escória dos materiais cimentícios, que foram comparadas com as especificações técnicas da NBR 11 578/1991 e NBR 5 735/1991 para cimento CP II-E-32 e CP III-32-RS, respectivamente.

A escória granulada de alto-forno moída utilizada na produção dos concretos, proveniente da ArcelorMittal Tubarão (antiga Companhia Siderúrgica do Tubarão - CST), foi caracterizada física, química e microestruturalmente (técnicas de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS).

#### 4.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia Jaguarussú, proveniente de depósitos naturais da região da Grande Vitória, de natureza quartzosa, que atendeu às especificações da NBR 7 211/2005.

#### 4.2.3 Agregado graúdo

Os agregados graúdos utilizados foram a pedra britada n.º 0 e n.º 1 proveniente da região da Grande Vitória, de natureza gnáissica, que atenderam às especificações da NBR 7 211/1983<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> A brita 1 correspondeu à zona granulométrica 9,5/25 da NBR 7 211/ 2005 e a brita 0 correspondeu a zona 37,5/75 da NBR 7 211/ 2005.

### 4.3 Dosagem experimental dos concretos

A dosagem experimental do concreto teve como base os diagramas de dosagem de concreto desenvolvidos por Bourguignon (2004<sup>2</sup>), conforme recomendações de Helene e Terzian (1993), onde foram considerados como materiais cimentícios (i) o cimento Portland composto com escória CP II-E-32 (30% de escória de alto-forno em relação à massa total de aglomerante), (ii) o cimento *Portland* de alto-forno CP III-32-RS (66% de escória de alto-forno em relação à massa total de aglomerante) e (iii) o material cimentício composto com 50% de cimento *Portland* de alto-forno CP III-32-RS e 50% de escória granulada de alto-forno moída (83% de escória de alto-forno em relação à massa total de aglomerante), em massa.

Na confecção dos diagramas de dosagem foi, inicialmente, determinado o teor adequado de argamassa e o consumo de água para um abatimento de  $(70 \pm 10)$  mm. A seguir, para cada material cimentício, foram dosados três traços com diferentes consumos de material cimentício, cujas resistências à compressão axial foram determinadas nas idades de 7 dias e 28 dias de idade (BOURGUIGNON, 2004).

Por meio de análises estatísticas e das correlações das Leis de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinare foram obtidas as curvas de dosagem e suas respectivas equações, conforme apresentado nas Figura 4. 2, Figura 4. 3 e Figura 4. 4 (BOURGUIGNON, 2004).

Com base nas equações obtidas para cada material cimentício (Quadro 4. 1), foram dosadas 4 séries de concreto, para cada tipo de material cimentício, de forma a atender as resistências de 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa aos 28 dias de idade, cujos traços obtidos nos diagramas de dosagem são apresentados no Quadro 4. 2.

---

<sup>2</sup> Esta pesquisa de doutoramento insere-se e deu continuidade à obtenção e tratamento de dados dos Projetos de Pesquisa: Estratégia para consolidar o mercado da escória de alto-forno (Projeto Desempenho) e Desenvolvimento de estrutura hidráulica de proteção contra a ação de ondas marinhas utilizando escória de alto-forno (Projeto Esthídra).. Os relatórios do projeto (SILVA, 2006<sup>a</sup>; Silva 2006b), porém, são de acesso restrito e por questão de cláusula de confidencialidade, optou-se, aqui, por referenciar a dissertação de Bourguignon (2004), disponível para consulta pública.

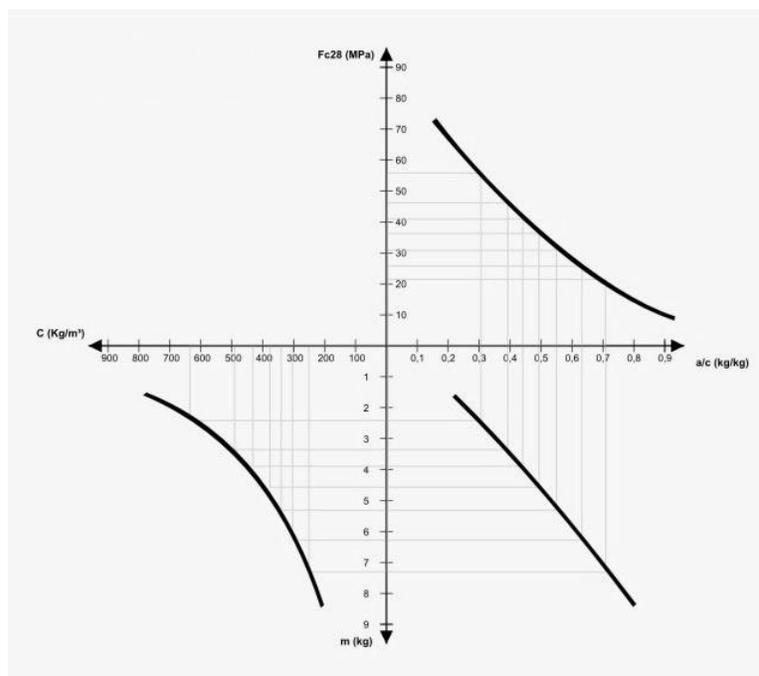


Figura 4. 2 – Diagrama de dosagem aos 28 dias para o cimento CP II-E-32 (BOURGUIGNON, 2004).

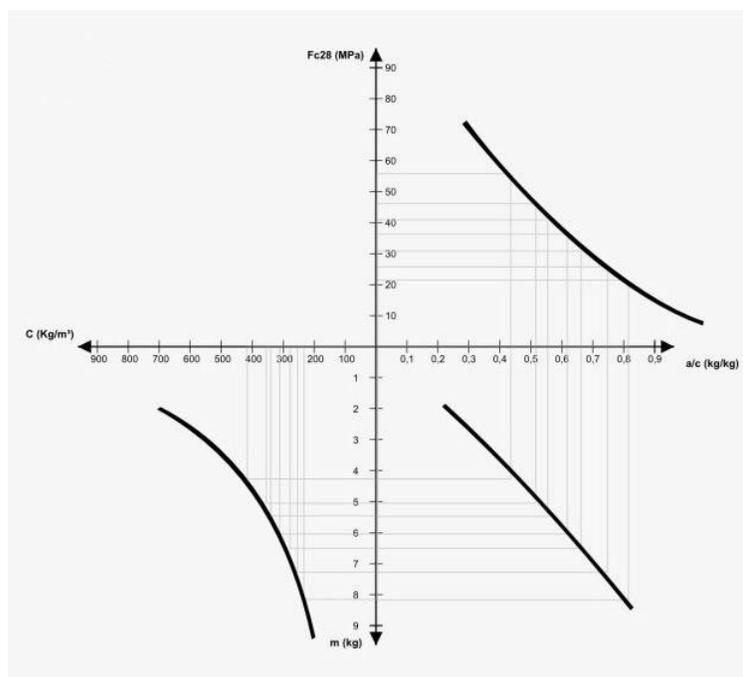


Figura 4. 3 – Diagrama de dosagem aos 28 dias para o cimento CP III-32-RS (BOURGUIGNON, 2004).

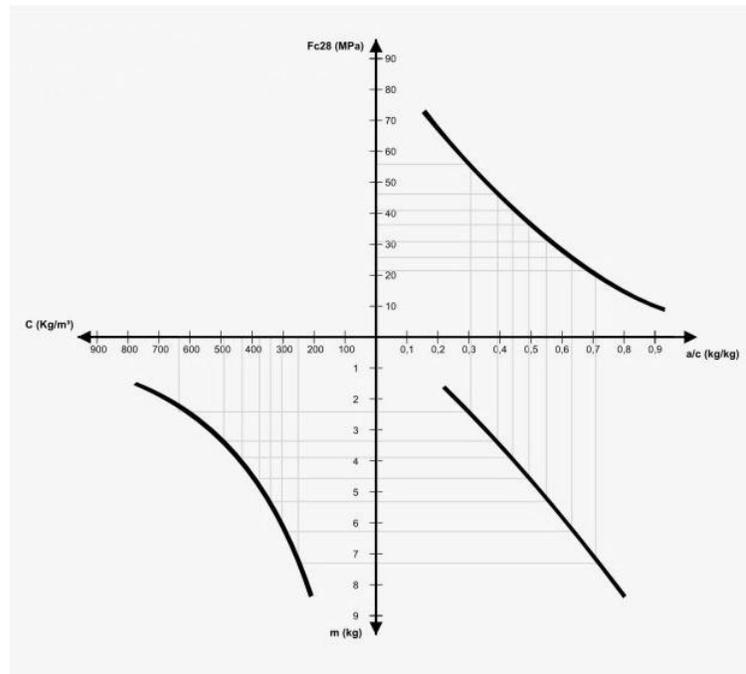


Figura 4. 4 – Diagrama de dosagem aos 28 dias para a mistura, em massa, de 50% de cimento CP III-32-RS + 50% de escória granulada de alto-forno moída (BOURGUIGNON, 2004).

**Quadro 4. 1 - Modelo de ajustes para as equações das curvas para os diagramas de dosagem.**

y	x	Modelo	Coef.1	Coef. 2	Equação
Diagrama 1 (CP II-E-32)					
$f_{ck}$	a/c	$\text{Ln} y = \text{Ln} a + x b + \varepsilon$	a=116.488	b = -2,3336	$\text{Ln} f_{ck} = \text{Ln} 116,488 - 2,3336 x + \varepsilon$
m	x	$Y = a + b x + \varepsilon$	a = -1,2192	b = 11,8012	$Y = -1,2192 + 11,8012 x + \varepsilon$
C	m	$Y = 1000 / (k_5 + k_6 \cdot m) + \varepsilon$	$K_5 = 0,4732365$	$K_6 = 0,4572186$	$Y = 1000 / (0,4732365 + 0,4572186 m) + \varepsilon$
Diagrama 2 (CP III-32-RS)					
$f_{ck}$	a/c	$\text{Ln} y = \text{Ln} a + x b + \varepsilon$	a = 165,91	b = -2,4393	$\text{Ln} f_{ck} = \text{Ln} 165,91 - 2,4393 x + \varepsilon$
m	x	$Y = a + b x + \varepsilon$	a = - 0,0486	b = 9,6823	$Y = - 0,0486 + 9,6823 x + \varepsilon$
C	m	$Y = 1000 / (k_5 + k_6 \cdot m) + \varepsilon$	$K_5 = 0,3655175$	$K_6 = 0,4771054$	$Y = 1000 / (0,3655175 + 0,4771054 m) + \varepsilon$
Diagrama 3 (CP III-32-RS + escória)					
$f_{ck}$	a/c	$\text{Ln} y = \text{Ln} a + x b + \varepsilon$	a =117,367	b = -2,3532	$\text{Ln} f_{ck} = \text{Ln} 117,367 - 2,3532 x + \varepsilon$
m	x	$Y = a + b x + \varepsilon$	a = -1,4723	b = 12,4667	$Y = -1,4723 + 12,4667 x + \varepsilon$
C	m	$Y = 1000 / (k_5 + k_6 \cdot m) + \varepsilon$	$K_5 = 0,46850672$	$K_6 = 0,4581581$	$Y = 1000 / (0,46850672 + 0,4581581 m) + \varepsilon$

**Quadro 4. 2 - Traços, em massa, utilizados na produção dos concretos em estudo.**

Concreto	$f_{ck}$ (MPa)	Água/mat. cimentício	m	C (kg)	Traços em massa (mat. cimentício: areia: brita 0: brita 1: a/mat. cim.)
Diagrama 1 (CP II-E-32)					
C20/CP II	20	0,6328	6,2494	300,244	1: 2,99: 1,63: 1,63: 0,6328
C30/CP II	30	0,4961	4,6355	385,696	1: 2,10: 1,27: 1,27: 0,4961
C35/CP II	35	0,4412	3,9880	435,420	1: 1,74: 1,12: 1,12: 0,4412
C40/CP II	40	0,3926	3,4140	491,594	1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,3926
Diagrama 2 (CP III-32-RS)					
C20/CP III	20	0,7504	7,3145	259,381	1: 3,57: 1,87: 1,87: 0,7504
C30/CP III	30	0,6196	6,0477	307,602	1: 2,88: 1,59: 1,59: 0,6196
C35/CP III	35	0,5671	5,5395	332,397	1:2,60: 1,47: 1,47: 0,5671
C40/CP III	40	0,5205	5,0889	357,973	1: 2,35: 1,37: 1,37: 0,5205
Diagrama 3 (CP III-32-RS + escória)					
C20/CP III + E	20	0,6307	6,3916	294,385	1: 3,07: 1,66: 1,66: 0,6307
C30/CP III + E	30	0,4951	4,7009	381,346	1: 2,14: 1,28: 1,28: 0,4951
C35/CP III + E	35	0,4407	4,0225	432,623	1: 1,76:1,13: 1,13: 0,4407
C40/CP III + E	40	0,3925	3,4212	491,161	1: 1,43: 0,99: 0,99: 0,3925

#### 4.4 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas

O estudo experimental foi composto das seguintes etapas: dosagem do concreto (Quadro 4. 3), avaliação das propriedades físicas e mecânicas, avaliação da durabilidade do concreto com escória granulada de alto-forno moída e avaliação de resistência à corrosão, por meio de ensaios cíclicos.

O número de corpos-de-prova para cada experimento foi dimensionado a partir das normas e em análise estatística, considerando um acréscimo, devido à variabilidade natural de uma pesquisa.

Após o preparo das misturas, para cada concreto foi determinada a consistência, por meio do abatimento do tronco de cone e da resistência à compressão aos 28 dias de idade, com a qual foi avaliada a classe do concreto em estudo. Além disso, foram medidas as

resistências à compressão aos 7, 28 e 63 dias, módulo de deformação, retração por secagem e absorção por capilaridade. O Quadro 4. 4 apresenta as variáveis estudadas e as respectivas normas das propriedades físicas e mecânicas avaliadas.

**Quadro 4. 3 - Dosagem do concreto: fatores e variáveis.**

Fatores	Variáveis
Materiais cimentícios Traço do concreto $f_{ck}$	Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade

**Quadro 4. 4 - Propriedades físicas e mecânicas: fatores e variáveis.**

Fatores	Variáveis	Norma
Materiais cimentícios Traço do concreto $f_{ck}$	Abatimento do tronco de cone	NBR NM67/1996
	Resistência à compressão axial aos 7, 28 e 63 dias de idade	NBR 5 739/1994
	Módulo de deformação	NBR 8 522/1984
	Retração por secagem (sem peneiramento – CPs de 75 x 75 x 300 mm)	NBR 8 490/1984
	Absorção por capilaridade	NBR 9 779/1995

No Quadro 4. 5 e Quadro 4. 6 os ensaios e os números de corpos-de-prova utilizados.

**Quadro 4. 5 - Número de corpos-de-prova (CPs) e/ou leitura executada nos ensaios das propriedades físicas (retração por secagem e absorção por capilaridade).**

Traço		Aglomerante	Retração secagem	Absorção capilaridade
			12 idades	63 dias
T1	20MPa	CPII E	5	4
T2		CPIII	5	4
T3		CPIII + escória	5	4
T4	30MPa	CPII E	5	4
T5		CPIII	5	4
T6		CPIII + escória	5	4
T7	35MPa	CPII E	5	4
T8		CPIII	5	4
T9		CPIII + escória	5	4
T10	40MPa	CPII E	5	4
T11		CPIII	5	4
T12		CPIII + escória	5	4
Total de CPs			60	48
Dimensões dos CPs (mm)			75x75x300	150x150

**Quadro 4. 6 - Número de corpos-de-prova (CPs) e/ou leitura executada nos ensaios das propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de deformação).**

Traço		Aglomerante	Resistência compressão			Módulo de deformação
			7dias	28 dias	63 dias	28 dias
T1	20MPa	CPII E	4	4	4	5
T2		CPIII	4	4	4	5
T3		CPIII + escória	4	4	4	5
T4	30MPa	CPII E	4	4	4	5
T5		CPIII	4	4	4	5
T6		CPIII + escória	4	4	4	5
T7	35MPa	CPII E	4	4	4	5
T8		CPIII	4	4	4	5
T9		CPIII + escória	4	4	4	5
T10	40MPa	CPII E	4	4	4	5
T11		CPIII	4	4	4	5
T12		CPIII + escória	4	4	4	5
Total de CPs			144			60
Dimensões dos CPs (mm)			100x200			150x300

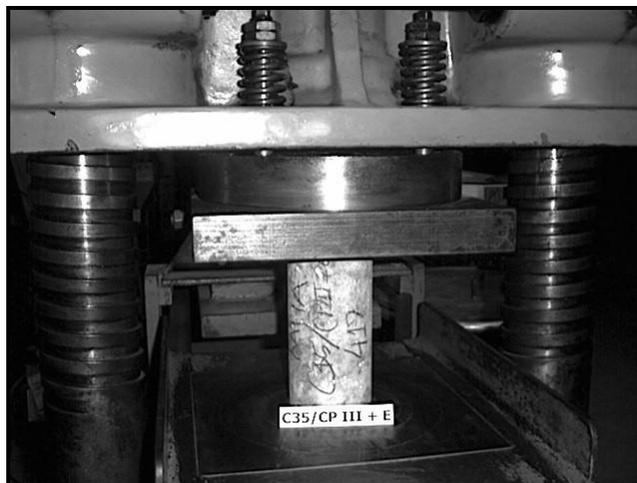
#### 4.4.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Os ensaios para a determinação da consistência do concreto no estado fresco pelo abatimento do tronco de cone foram realizados segundo a NBR NM 67/1996.

#### 4.4.2 Resistência à compressão axial

Os corpos-de-prova para ensaios de resistência à compressão axial foram moldados segundo a NBR 5 738/1994, em cilindros de concreto com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, e ensaiados nas idades de 7, 28 e 63 dias, segundo a NBR 5 739/1994.

Para cada uma das idades foram moldados 4 (quatro) corpos-de-prova de cada mistura, que permaneceram em cura úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) até a data de ensaio, sendo previamente capeados e, então, procedida a ruptura (Figura 4. 5). A resistência à compressão axial foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova.



**Figura 4. 5 – Corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão axial.**

#### **4.4.3 Módulo de deformação**

O ensaio para obtenção do módulo de deformação estático foi realizado de acordo com a NBR 8 522/1984, utilizando 5 corpos-de-prova cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, preparados e moldados segundo a NBR 5 738/1994. Destes, 2 corpos-de-prova foram rompidos à compressão axial segundo a NBR 5 739/1984, e 3 corpos-de-prova, destinados à obtenção do diagrama tensão x deformação, conforme recomendação da NBR 8 522/1984. A Figura 4. 6 mostra o ensaio de módulo de deformação.



**Figura 4. 6 – Corpo-de-prova submetido ao ensaio de módulo de deformação.**

#### **4.4.4 Retração por secagem**

O método de ensaio adotado para a avaliação da retração foi adaptado da NBR 8 490 (ABNT, 1984). Os corpos-de-prova usados foram 5 prismas com dimensões de (75 x 75 x 300) mm, adequados à dimensão do agregado graúdo utilizado, já que não foi realizado peneiramento do concreto. Os corpos-de-prova foram preparados e moldados segundo as recomendações da NBR 5 738/1994 e adaptações utilizadas em FURNAS (1997).

Os prismas foram curados em câmara úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) por 23 horas, desformados e deixados submersos por cerca de ¼ de hora. A primeira medida de comprimento foi feita após a retirada do banho, imediatamente após o período inicial de 24 horas.

Depois da primeira medida, os corpos-de-prova foram curados em água saturada de cal (temperatura a  $(23 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ ) até a idade de 14 dias. Neste período, foi realizada uma segunda medida à idade de 7 dias e uma terceira, ao final dos 14 dias.

Os corpos-de-prova foram, então, armazenados em câmara seca, com umidade relativa do ar igual a  $50 \pm 4\%$  e temperatura entre 21°C e 25°C. As leituras foram feitas nas

seguintes idades: 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 dias. Antes de cada leitura, os corpos-de-prova foram retirados da câmara seca e mantidos, por meia hora, em ambiente de laboratório (temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ).

Para a medida de retração, foi utilizado relógio comparador graduado para leitura, com unidade de 0,001 mm.

#### **4.4.5 Absorção por capilaridade**

Os ensaios para determinação da absorção por capilaridade foram realizados segundo a NBR 9 779/1995. Os corpos-de-prova possuíam dimensões de 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura, e foram moldados segundo a NBR 5 738/1994, permanecendo em cura úmida (temperatura entre  $21^\circ\text{C}$  e  $25^\circ\text{C}$  e umidade relativa maior que 95%) até a data de ensaio. Foram utilizadas 4 amostras para cada concreto, ensaiados aos 63 dias de idade.

A metodologia consistiu na secagem dos corpos-de-prova, em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , até constância de massa, sendo posteriormente resfriado ao ar à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Em seguida foram dispostos sobre uma lâmina d'água com espessura constante de  $(5 \pm 1)$  mm.

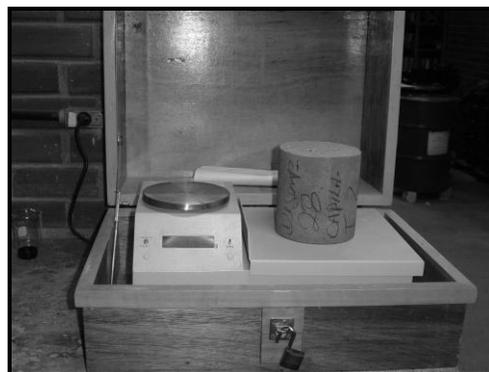
Procedeu-se, então, a determinação da massa dos corpos-de-prova decorrida 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h de ensaio. Em seguida, os corpos-de-prova foram rompidos por compressão diametral de modo a permitir a anotação do perfil de ascensão capilar de água no seu interior.

A absorção de água por capilaridade foi determinada dividindo-se o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície em contato com a água, expressa em  $\text{g}/\text{cm}^2$ , e a altura máxima de ascensão capilar, em centímetros.

Na Figura 4. 7 e Figura 4. 8 encontram-se algumas etapas do ensaio de absorção por capilaridade.



(a)



(b)

**Figura 4. 7 – Ensaio de absorção por capilaridade: a) corpos-de-prova dispostos sobre uma lâmina d'água; b) pesagem dos corpos-de-prova para verificação da constância de massa.**



(a)



(b)

**Figura 4. 8 – Ensaio de absorção por capilaridade: a) rompimento para leitura da altura de ascensão capilar; b) altura ascensão capilar dos corpos-de-prova.**

#### 4.5 Avaliação da capacidade de proteção do concreto contra a corrosão da armadura

A durabilidade do concreto com altos teores de escória granulada de alto-forno moída foi avaliada quanto à despassivação por carbonatação, despassivação por cloretos e ao risco de corrosão das armaduras. O Quadro 4. 7 apresenta as variáveis estudadas.

**Quadro 4. 7 - Capacidade de proteção do concreto contra a corrosão da armadura - fatores e variáveis.**

Fatores	Variáveis
Materiais cimentícios Traço do concreto $f_{ck}$	Profundidade de carbonatação na condição acelerada aos 63, 77 e 91 dias de idade, com concentração de CO <sub>2</sub> 10%.
	Profundidade de carbonatação natural nas condições de laboratório aos 63, 77,91 e 365 dias de idade.
Materiais cimentícios Traço do concreto $f_{ck}$	Penetração de cloretos - Carga total passante aos 28 e 63 dias

No Quadro 4. 8 observam-se os ensaios e os números de corpos-de-prova utilizados para a avaliação da durabilidade do concreto. e da corrosão da armadura.

**Quadro 4. 8 - Número de corpos-de-prova e/ou leituras executadas nos ensaios de durabilidade (penetração de cloretos, carbonatação acelerada 10%).**

Traço	Aglomerante	Penetração de cloretos		Carobatação natural	Carbonatação acelerada (10% CO <sub>2</sub> )	
		28 dias	,63 dias	63, 77, 91 e 365 dias	63, 77 e 91 dias	
T1	20MPa	CPII E	4	4	9	9
T2		CPIII	4	4	9	9
T3		CPIII + escória	4	4	9	9
T4	30MPa	CPII E	4	4	9	9
T5		CPIII	4	4	9	9
T6		CPIII + escória	4	4	9	9
T7	35MPa	CPII E	4	4	9	9
T8		CPIII	4	4	9	9
T9		CPIII + escória	4	4	9	9
T10	40MPa	CPII E	4	4	9	9
T11		CPIII	4	4	9	9
T12		CPIII + escória	4	4	9	9
Total de CPs/leituras		96		108	108	
Dimensões dos CPs (mm)		100x200		100x200	100x200	

#### **4.5.1 Carbonatação acelerada**

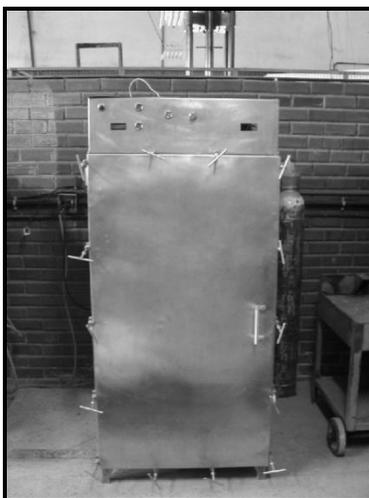
A avaliação da carbonatação do concreto contou com a utilização de corpos-de-prova cilíndricos (100 mm x 200 mm de comprimento), preparados de acordo com a NBR 5 738/1996. Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas, permanecendo em câmara úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) até a idade de 15 dias. Em seguida, foram mantidos em câmara seca (temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e UR  $(50 \pm 5)\%$ ) até a idade de 63 dias, quando foi feita a primeira leitura da profundidade de carbonatação. Os corpos de prova foram, então, submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada conforme metodologia recomendada por Isaia (2001), Coelho (2002) e Bourguignon (2004).

Para cada concreto, foram utilizados 9 corpos-de-prova para o ensaio de carbonatação acelerada (ambiente de 10%  $\text{CO}_2$ ) e outros 9 corpos-de-prova, conservados em câmara seca com umidade e temperatura controladas, como referência.

##### **4.5.1.1 Condições da câmara de carbonatação**

A câmara de carbonatação, construída no LEMAC/UFES (Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção da UFES), foi projetada para acelerar a carbonatação de materiais em ambiente com temperatura, umidade e teor de  $\text{CO}_2$  controlados.

Para a realização da carbonatação acelerada, o ambiente da câmara tem 10% de  $\text{CO}_2$ , 60% e 70% de umidade relativa e temperatura de  $(26 \pm 2)^\circ\text{C}$ . A Figura 4. 9 mostra a câmara de carbonatação utilizada nos ensaios.



**Figura 4. 9 – Câmara de carbonatação utilizada nos ensaios.**

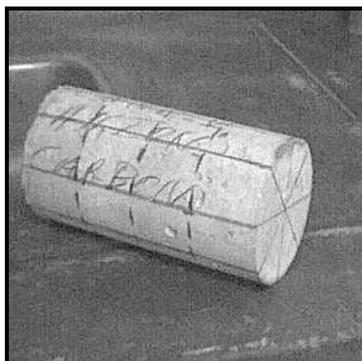
#### **4.5.1.2 Idade e procedimento de leitura para determinar a profundidade de carbonatação**

A leitura da profundidade de carbonatação foi realizada em seções transversais extraídas dos corpos de prova, rompidas nas idades de 63 dias (idade de início do ensaio de carbonatação acelerada), 77 dias (14 dias de carbonatação acelerada) e 91 dias (28 dias de carbonatação acelerada).

A ruptura dos corpos-de-prova foi executada por seccionamento em compressão transversal ao eixo dos corpos de prova, de modo a obter segmentos cilíndricos de, aproximadamente, 50 mm de altura, com marcações prévias de 8 pontos, diametralmente opostos (Figura 4. 10).

Para determinação da profundidade de carbonatação foi aspergida solução de fenolftaleína, preparada com a dissolução de 1g do reagente em 100 ml de etanol, conforme recomendado por Kasmierczak e Lindenmeyer (1996). O intervalo de viragem do pH da solução compreende valores entre 8,3 e 10,0. A região carbonatada permanece inalterada, enquanto a região não carbonatada apresenta cor carmim. A superfície da fratura foi limpa, para remover as impurezas, antes de se aspergir a solução de fenolftaleína.

A leitura foi realizada com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,5 mm e efetuada depois de, no mínimo, dez minutos da aspensão do indicador, quando se tornou mais nítida a região delimitada pelo reagente.



**Figura 4. 10 – Detalhe do corpo-de-prova marcado nas posições a serem seccionadas transversalmente para posterior medida da profundidade de carbonatação (COELHO, 2002).**

#### **4.5.2 Carbonatação natural**

Nas pesquisas de Bourguignon (2004), corpos-de-prova foram curados por 15 dias em câmara úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) e subseqüentemente ao ar até a idade de 365 dias em ambiente controlado de laboratório (câmara seca), com umidade relativa do ar igual a (50±4)% e temperatura entre 21°C e 25°C, proporcionando um equilíbrio de umidade e temperatura com o ambiente.

#### **4.5.3 Carga passante**

A propriedade de transporte é um fator determinante na durabilidade do concreto. Em sólidos porosos, a água é a responsável por vários processos físicos e químicos de deterioração. A água pode ser a fonte do processo de deterioração, tais como o gelo e degelo, mas também pode ser o veículo que transporta íons agressivos causando, por exemplo, a corrosão da armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Existem três mecanismos principais pelos quais os agentes externos penetram no concreto: absorção, permeabilidade e difusão. **Absorção** refere-se ao ingresso de líquidos devido a forças capilares, enquanto sorptividade é a tendência de um material absorver um fluido. **Permeabilidade** refere-se ao fluxo de um fluido sob um diferencial de pressão. **Difusão** refere-se ao movimento de substâncias de regiões de maior concentração para regiões com concentrações menores (ACI, 2004). A permeabilidade e a difusividade são a consequência da continuidade dos poros. A difusão de íons depende da microestrutura e a composição da solução dos poros (BUENFELD; NEWMAN, 1987).

O ensaio, utilizado neste trabalho, descrito na ASTM C 1202/2005, ou AASHTO T 277/1996, “*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*” (ASTM, 2005d; AASHTO, 1996), apesar de ser comumente chamado de ensaio de permeabilidade, na verdade, fornece uma avaliação da resistência à penetração de íons cloreto com base na a condutância elétrica do concreto, como um substituto para a difusividade .

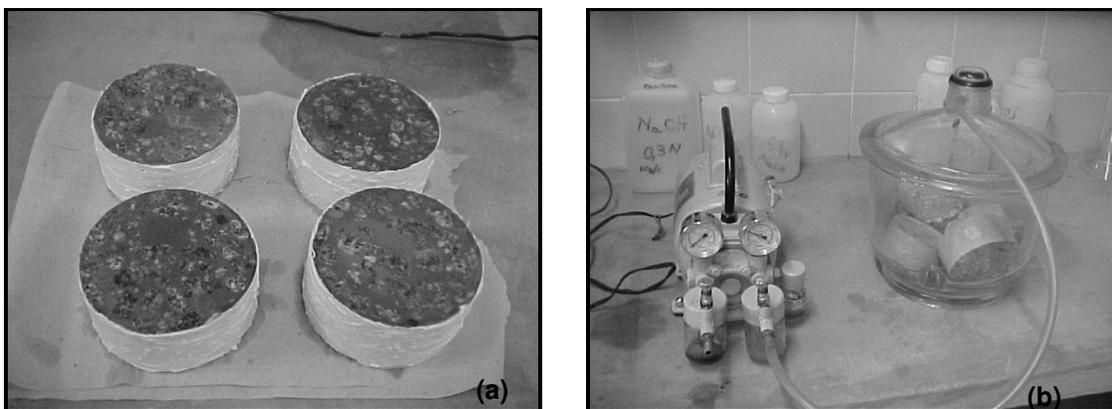
A relação entre condutância elétrica e difusão pode variar com diferentes proporções de materiais cimentícios, pois afetam a solução dos poros, o mecanismo e o tipo de difusão. A presença de vazios e fissuras pode afetar significativamente os resultados do ensaio, pois a difusão por meio de fissuras difere da difusão no resto do concreto (ZHANG; GJØRV, 1991).

#### **4.5.3.1 Procedimento de ensaio e preparação da amostra**

O ensaio consiste em submeter uma amostra de concreto, disposta em células de voltagem, à passagem de uma corrente elétrica por uma diferença de potencial de 60 V. Esse ensaio mede a carga elétrica passante como consequência do movimento iônico total, não apenas o movimento dos íons cloreto. A presença de aditivos ou qualquer material condutivo no concreto aumenta a condutância. Outra crítica a esse ensaio é que ele é muito severo e pode causar um aumento de temperatura, que, por sua vez, pode causar mudanças físicas e químicas na estrutura dos poros, e resultar em um aumento da carga elétrica passante. O aumento de temperatura é mais significativo em concretos com microestrutura menos densa.

Nesta pesquisa foram utilizados 4 corpos-de-prova cilíndricos (100 mm x 200 mm de comprimento), para cada série de concreto, ensaiados aos 28 e 63 dias de idade.

Os corpos-de-prova foram submetidos à cura úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) até a idade dos ensaios, quando foram extraídas as amostras com 50 mm de espessura. A seguir, essas amostras receberam uma resina do tipo EPOXI na sua área lateral (Figura 4. 11 (a)) e foram levadas ao aparelho de saturação a vácuo, garantindo a uniformidade do grau de saturação no seu interior (Figura 4. 11 (b)).



**Figura 4. 11 – (a) Amostras de concreto revestidas com selante para serem submetidas à saturação a vácuo. (b) Amostras de concreto sendo submetidas à saturação a vácuo.**

Após a preparação das amostras de 50 mm de espessura, extraídas do terço médio de um corpo-de-prova cilíndrico (100 mm x 200 mm), uma célula de voltagem foi fixada em cada extremidade, uma contendo uma solução de 3% de NaCl e a outra uma solução de 1,2% de NaOH (Figura 4. 12(a)). A seguir as células foram submetidas a uma diferença de potencial de 60 V com registro da corrente elétrica passante, em intervalos de 30 minutos, durante 6h (Figura 4. 12 (b)). A carga total passante foi determinada em Coulombs, conforme a seguir:

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

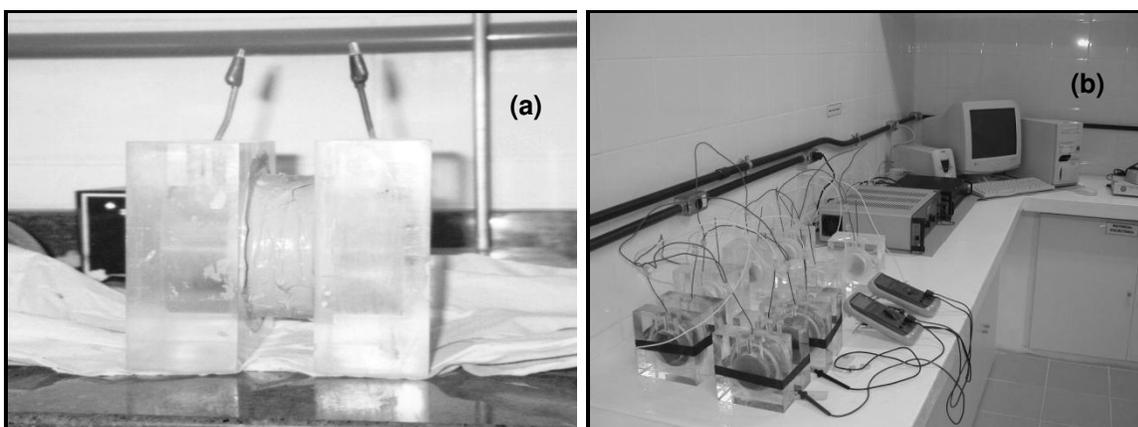
Equação 4. 1

Sendo:

$Q$  = Carga passante, em Coulombs;

$I_0$  = Corrente imediatamente após aplicação da voltagem, em Amperes;

$I_t$  = Corrente no tempo “t” de aplicação da voltagem, em Amperes.



**Figura 4. 12 – (a) Montagem das células de difusão. (b) Aplicação da diferença de potencial ao sistema de células.**

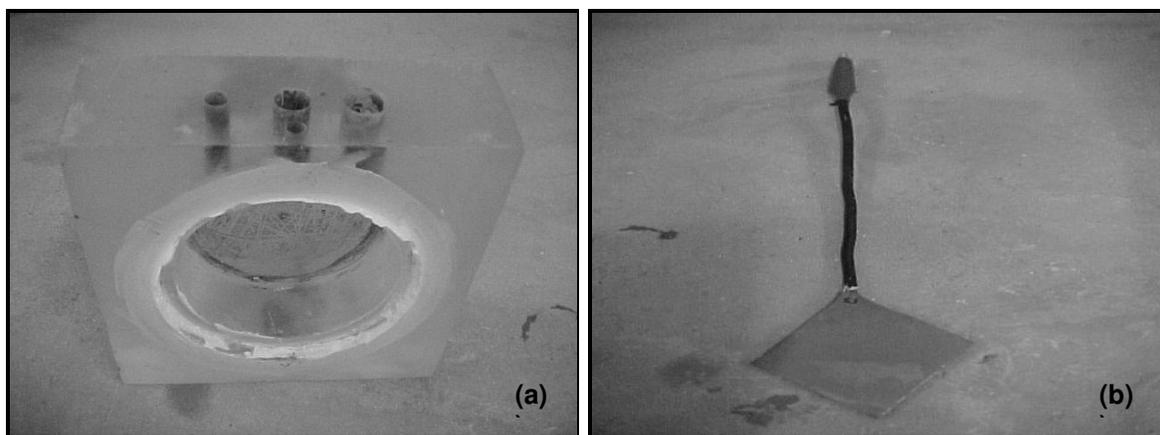
A ASTM C 1202 (ASTM, 2005d) apresenta uma tabela onde é feita uma classificação dos concretos segundo a quantidade de carga passante em Coulomb (C) obtida no ensaio (Quadro 4. 9).

**Quadro 4. 9 - Avaliação qualitativa do concreto segundo a ASTM 1202 (ASTM, 2005d).**

Carga Passante (C)	Risco de penetração do íon cloreto
> 4 000	Alto
2 000 – 4 000	Moderado
1 000 – 2 000	Baixo
100 – 1 000	Muito baixo
<100	Desprezível

#### 4.5.3.2 Célula de voltagem

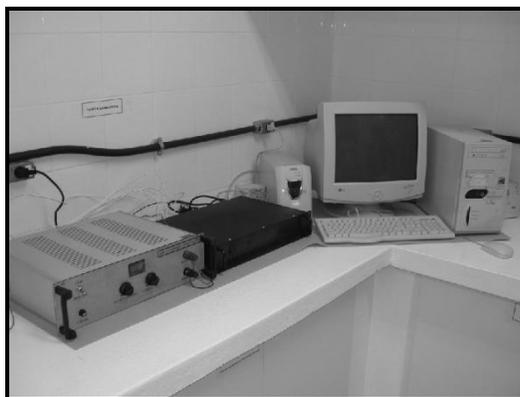
A célula de voltagem é fabricada em acrílico conforme dimensões e detalhes especificados na ASTM C 1202 (ASTM, 2005d), com instalação de um termômetro com graduação de 0°C a 120°C, de forma a controlar a temperatura do ensaio. A vedação entre a célula de voltagem e a amostra foi feita com silicone (Figura 4. 13).



**Figura 4. 13 - (a) Célula para o ensaio de carga passante em acrílico 150x150x50 mm; (b) contato elétrico.**

#### 4.5.3.3 Equipamento para aplicação da voltagem e leitura da corrente

A aplicação de voltagem e leitura dos dados foi executada por um sistema constituído por uma fonte de 0-80 V dc, 0-2 A, capaz de manter constante uma voltagem de  $(60 \pm 0,1)$  V e uma corrente de 12 A, e um sistema de aquisição de dados (*datalogger*), que registrou o valor da carga passante (Figura 4. 14).



**Figura 4. 14 – Fonte e sistema de aquisição de dados – *datalogger*.**

#### **4.6 Avaliação dos ensaios cíclicos e de corrosão**

A durabilidade do concreto com altos teores de escória granulada de alto-forno moída também foi avaliada, utilizando-se ensaios cíclicos e ensaios de corrosão da armadura. O Quadro 4. 10 apresenta as variáveis estudadas.

**Quadro 4. 10 – Ensaios cíclicos e de corrosão da armadura: fatores e variáveis.**

Fatores	Variáveis
Materiais cimentícios Traço do concreto $f_{ck}$ Cobrimento	Potencial de corrosão
	Resistividade
	Profundidade de cloretos
	Profundidade de carbonatação

No Quadro 4. 11 observam-se os ensaios os ensaios e os números de corpos-de-prova utilizados para a avaliação da corrosão da armadura.

**Quadro 4. 11 - Número de corpos-de-prova (CPS) e/ou leituras executadas nos ensaios de durabilidade (corrosão de armaduras).**

Traço <sup>3</sup>	Aglomerante	Corrosão armaduras*		Corrosão armaduras**	Corrosão armaduras Prof. carbonatação	Corrosão armaduras Prof. cloretos	
		30 mm	20 mm				
T1	20MPa	CPII E	2	2	4	6	6
T2		CPIII	2	2	4	6	6
T3		CPIII + e	2	2	4	6	6
T4	30MPa	CPII E	2	2	4	6	6
T5		CPIII	2	2	4	6	6
T6		CPIII + e	2	2	4	6	6
T10	40MPa	CPII E	2	2	4	6	6
T11		CPIII	2	2	4	6	6
T12		CPIII + e	2	2	4	6	6
<b>Total de CPs/leituras</b>			18	18	36	54	54
<b>Dimensões dos CPs (mm)</b>			90x150x150	70x150x150	100x200	100x200	100x200

\*Potencial de corrosão

\*\*resistividade elétrica

O estudo da corrosão das armaduras, neste trabalho, teve como objetivo avaliar a capacidade do revestimento de proteção das armaduras, levando em consideração as recomendações da NB1/1978 e a NBR 6 118/2003.

A concepção dos corpos-de-prova obedeceu às condições de durabilidade exigidas pelas normas. Para definição do revestimento mínimo, considerou-se a agressividade do ambiente (região de névoa salina), relação água/materiais cimentícios, classe do concreto e tipo de estrutura (vigas e pilares), cujo revestimento mínimo recomendado é 20 mm, pela

<sup>3</sup> Os traços T7, T8 e T9 (35 MPa) não foram dosados a fim de se racionalizar o número de cps, por não apresentarem diferença significativa dos traços com 30 MPa e 40 MPa.

NB1/1978, e o cobrimento nominal de 40 mm (30 mm mínimo + 10 mm de tolerância), pela NBR 6 118 /2003.

Os corpos-de-prova foram prismáticos, com seção de 70 mm x 150 mm e 90 mm x 150 mm, e comprimento de 150 mm, contendo em seu interior três barras de aço (10 mm de diâmetro), sendo uma delas de aço inox, para funcionar como contra-eletródo na região central do corpo-de-prova. Os corpos-de-prova foram submetidos à cura úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) até a idade de 28 dias, posteriormente dispostos em ambiente de laboratório por um período de 365 dias e, então, submetidos ao ensaio acelerado de envelhecimento para avaliação da corrosão pelas técnicas eletroquímicas. Foram utilizados 4 corpos-de-prova nas séries do concreto de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa.

Adicionalmente, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (100 x 200 mm), não armados, para avaliar a profundidade de carbonatação e o teor de cloretos presente durante os ciclos do ensaio de envelhecimento acelerado.

#### **4.6.1 Preparo dos corpos-de-prova**

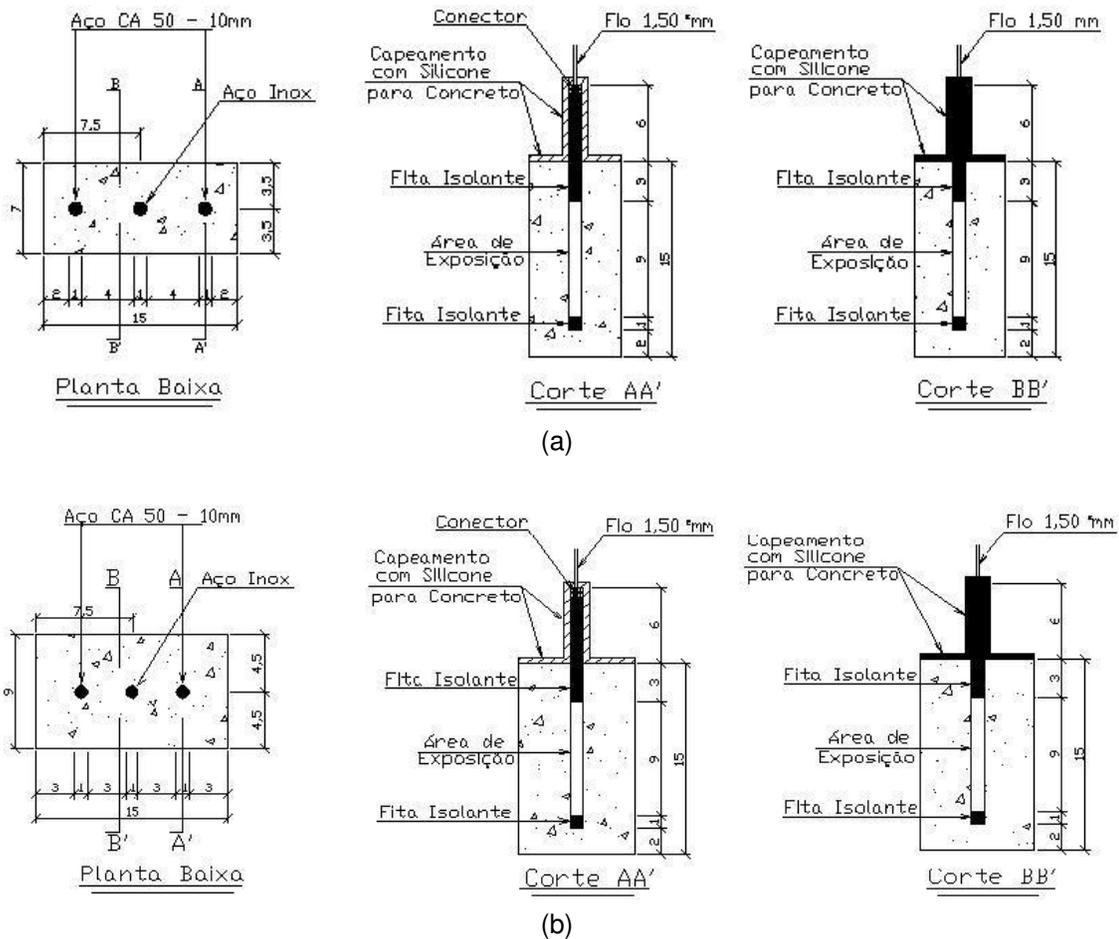
Os corpos-de-prova foram moldados em fôrmas metálicas de forma a obter precisão nas dimensões e no posicionamento das barras metálicas (aço CA 50).

A armadura empregada tinha comprimento final de 190 mm e foi limpa, para conferir condições superficiais idênticas.

A delimitação da zona de exposição da barra de aço foi feita cobrindo-se com fita isolante de PVC as regiões onde não se desejava o desenvolvimento da corrosão. A área de exposição foi de aproximadamente 2950 mm<sup>2</sup>.

As conexões elétricas para medidas eletroquímicas e o capeamento com epóxi foram feitos após 15 dias de cura, para se evitar um possível ingresso de cloretos pela parte superior do corpo-de-prova.

A disposição das barras, em dois tipos de corpos-de-prova, permitiu avaliar a eficiência do cobrimento das armaduras de 20 e 30 mm. A Figura 4. 15 apresenta, de forma esquemática, os corpos-de-prova utilizados no ensaio.



**Figura 4.15 - Representação esquemática dos corpos-de-prova de corrosão utilizados no ensaio de corrosão das armaduras: corpo-de-prova (a) 70 mm x150 mm x150 mm e (b) 90 mm x150 mm x150 mm.**

#### 4.6.2 Preparo das barras de aço

As barras de aço foram submetidas ao processo de limpeza recomendado pela ASTM C 1152 (ASTM, 2004a), utilizado também por Bauer (1995), Pessoa (2002), Lara (2003) e Ferreira (2003), de modo que todas as barras apresentassem as mesmas condições superficiais.

O procedimento foi constituído das seguintes etapas:

- Imersão das barras em uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de

hexametilenotetramina durante 15 minutos;

- Escovação das barras em água corrente para remoção dos óxidos;
- Imersão em acetona, por dois minutos para a retirada de elementos gordurosos e favorecer a evaporação da água na superfície;
- Secagem com jato de ar quente.

A seguir, foram feitas as delimitações da barra a ser exposta ao ataque do agente agressivo com fita isolante de PVC, sendo mantidas em ambiente fechado, com sílica gel, para evitar a umidade, até o momento de montagem do corpo-de-prova.

Moldados os corpos-de-prova, os ensaios foram efetuados sob duas condições de exposição: natural e após os ciclos de envelhecimento acelerado.

#### **4.6.3 Ensaios na condição natural**

Os ensaios naturais compreenderam medidas iniciais antes da exposição aos ciclos de envelhecimento acelerado. Foram executados os seguintes ensaios:

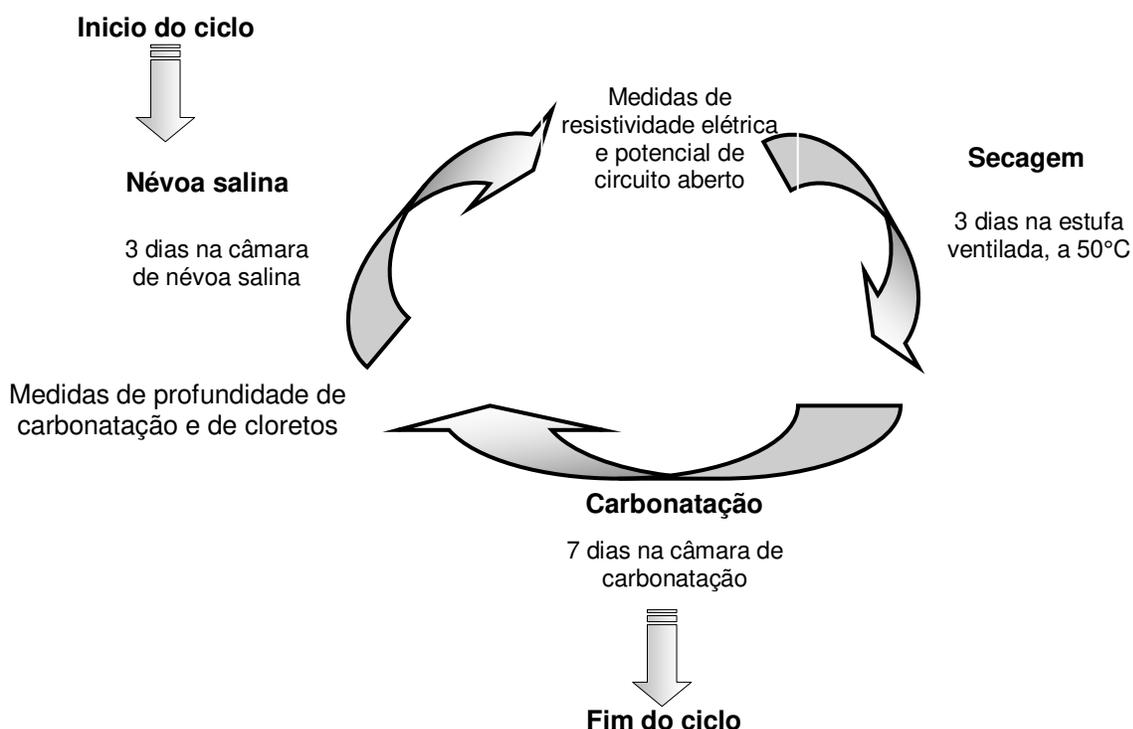
- ensaio de penetração natural de íons cloreto, conforme descrito no 4.6.5, aos 365 dias de idade, após cura úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) de 28 dias e cura ao ar, em ambiente natural de laboratório sem controle das condições ambientais;
- ensaio de carbonatação natural, aos 365 dias de idade, após cura úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) de 28 dias e cura ao ar, em ambiente natural de laboratório sem controle das condições ambientais.
- ensaios de resistividade elétrica e potencial de circuito aberto: medidas realizadas por um período compreendido entre 63 dias de idade e 365 dias de idade. Os corpos-de-prova foram curados por 28 dias em câmara úmida (temperatura entre 21°C e 25°C e umidade relativa maior que 95%) e, após, em ambiente natural de laboratório sem controle das condições ambientais, sendo submetidos aos ensaios de resistividade elétrica e de potencial de circuito aberto ou de eletrodo.

#### 4.6.4 Ensaios na condição de envelhecimento acelerado

O envelhecimento acelerado dos corpos-de-prova visou simular o mecanismo desenvolvido pelo ataque de cloretos em ambiente de névoa salina e carbonatação, sendo constituído de ciclos em câmara de névoa salina (3 dias), secagem em estufa ventilada (3 dias) e em câmara de carbonatação (7 dias).

O tratamento se iniciou com o ciclo de envelhecimento dos corpos-de-prova no ambiente da câmara de névoa salina durante 3 dias. A seguir, foram realizados ensaios de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e de resistividade elétrica ( $\rho$ ). Após a realização dessas medidas, os corpos-de-prova passaram por secagem em estufa ventilada (temperatura de 50°C), durante 3 dias e, finalmente, foram levados à câmara de carbonatação (10% de CO<sub>2</sub>, umidade relativa entre 60% e 70% e temperatura de 26°C) durante 7 dias. Ao saírem da câmara de carbonatação, os corpos-de-prova foram submetidos às leituras das profundidades de carbonatação e de penetração de cloretos.

A Figura 4. 16 apresenta um esquema do envelhecimento acelerado dos corpos-de-prova para a determinação do potencial de circuito aberto e para a determinação dos ensaios de profundidade de carbonatação e de cloretos, como medidas de referências.



**Figura 4. 16 – Esquema de envelhecimento acelerado proposto.**

#### 4.6.5 Monitoramento da profundidade de penetração de cloretos

A profundidade de penetração de cloretos foi avaliada por meio da aspersão de nitrato de prata: a presença de cloretos livres foi detectada por meio da formação de um precipitado branco de cloreto de prata, enquanto os cloretos combinados foram detectados por meio da formação de um precipitado escuro, no caso, óxido de prata (JUCÁ *et al*, 2002). Com base nesse método, objetivou-se avaliar se a frente de cloretos alcançou as armaduras.

Para avaliação da frente de penetração de cloretos foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos (100 mm de diâmetro x 200 mm de comprimento), não armados, rompidos ao final de cada ciclo, sendo tomadas sete medidas de leitura, ao longo do corpo-de-prova, de forma a permitir o registro de valores máximos, mínimos e médios da região investigada.

#### 4.6.6 Monitoramento da profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação após tratamento de envelhecimento foi monitorada em corpos-de-prova cilíndricos, com seção de 100 mm e comprimento de 200 mm, moldados segundo a NBR 5 738/1994, não armados, rompidos, ao final de cada ciclo, para leitura da profundidade de carbonatação executada com o auxílio da aspersão de fenolftaleína.

#### 4.6.7 Medidas de resistividade elétrica e potencial de circuito aberto

A cada ciclo foram executadas as seguintes medidas eletroquímicas para a avaliação do processo de corrosão: (i) potencial de corrosão – E e (ii) Resistividade. Por meio para a obtenção destas grandezas em questão foram necessários os seguintes elementos:

- Multivoltímetro com sensibilidade de décimo de mV (2 equipamentos);
- Eletrodo de referência (calomelano saturado); e
- Equipamento RESI.

O potencial de corrosão indica a despassivação ou não da armadura; a leitura foi feita diretamente no multivoltímetro, com o auxílio do eletrodo de calomelano saturado.

Geralmente, quanto mais negativo for o potencial medido, maior a probabilidade de corrosão. Com base na ASTM C 876 (ASTM, 1991), valores mais negativos do que – 276 mV, medidos por meio do eletrodo de calomelano saturado, indicam probabilidade de corrosão maior do que 90%.

Resistividade indica a suscetibilidade de o concreto sofrer corrosão e o valor é obtido direto do equipamento (RESI). O medidor de resistividade RESI fornece diretamente a medida da resistividade elétrica do concreto que constitui o eletrólito. Quanto maior a resistividade menor a probabilidade de passagem de corrente elétrica, portanto menores são as chances de se iniciar o mecanismo de corrosão das armaduras. De acordo com as recomendações do CEB 192 (CEB, 1989), a probabilidade de corrosão será muito alta se a resistividade tiver valores menores do que 5 kohm.cm.

#### **4.7 Análise dos resultados**

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente, por meio de técnicas de estatística descritiva (cálculo da média, desvio padrão, gráfico de dispersão), para caracterizar as variáveis (propriedades do concreto e comportamento quanto à carbonatação, à penetração de cloretos e ao risco de corrosão das armaduras, bem como a proteção do seu revestimento à armadura).

O nível de significância adotado foi de 5%. Para determinar diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos resultados, foram utilizados testes de hipóteses paramétricas - ANOVA e DUNCAN (MONTGOMERY, 1991). Além disso, vários modelos de previsão de propriedades foram desenvolvidos a partir da composição da mistura.

#### **4.8 Modelos para futura dosagem**

Foram desenvolvidos modelos matemáticos simplificados para a previsão, em futuras dosagens experimentais, de diversas propriedades a uma determinada idade, por meio da composição da mistura. Os modelos desenvolvidos correlacionam cada propriedade com o consumo de material cimentício, o teor de escória e a relação água/materiais cimentícios. Esses modelos podem auxiliar na dosagem futura de outros concretos contendo escória de alto-forno que devam atender a critérios determinados de desempenho.

#### **4.9 Modelos de previsão de vida útil**

A partir da revisão de literatura foram levantados os principais modelos de previsão de vida útil, considerando as condições de exposição e os mecanismos de despassivação por carbonatação e despassivação por cloretos.

A vida útil dos concretos preparados foi estimada por meio dos modelos de vida útil encontrados na literatura e analisada à luz dos requisitos de vida útil e condições de exposição apresentados na NBR 6 118/2003.

#### **4.10 Diretrizes para a especificação por desempenho de concretos com escória de alto-forno**

A partir da revisão de literatura, dos resultados obtidos no estudo experimental e da aplicação dos modelos de previsão de vida útil, apresentam-se, mais adiante neste trabalho, diretrizes para a criação de especificações por desempenho, considerando os princípios fundamentais desse tipo de especificação, expostos no Capítulo 2, e provendo uma proposta preliminar de especificações por desempenho para concretos com adição de escória de alto-forno, contribuindo para a base normativa nacional e internacional.

## **CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto**

### **5.1 Introdução**

O programa experimental compreendeu quatro etapas de produção de concreto. O Quadro 5. 1 apresenta as propriedades avaliadas em cada etapa. Este capítulo apresenta os resultados das propriedades físicas e mecânicas.

### **5.2 Avaliação das similaridades das misturas empregadas nas etapas de produção dos concretos (ensaios de controle)**

No âmbito do projeto de pesquisa do qual deriva este estudo (SILVA, 2006a; SILVA 2006b), foram moldados corpos-de-prova de referência em quatro etapas de produção de concreto, os quais foram rompidos em compressão axial aos 28 dias. A Tabela 5. 1

apresenta a resistência à compressão média aos 28 dias de cada uma dessas etapas. A partir dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias em cada etapa, foram avaliadas as curvas de ajustes desses concretos e a similaridade entre as etapas de produção de concreto. As etapas 3 e 4 foram realizadas por Moraes (2008) e Bourguignon (2004), respectivamente.

**Quadro 5. 1– Etapas de produção de concreto do programa experimental.**

1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa	4ª Etapa
Resistência à compressão axial aos 7, 28 e 63 dias	Resistência à compressão axial aos 28 dias	Resistência à compressão axial aos 28 dias	Resistência à compressão axial aos 28 dias
Módulo de deformação	Absorção por capilaridade	Corrosão das armaduras (ensaios eletroquímicos) (MORAES, 2008)	Avaliação da profundidade de carbonatação natural (BOURGUIGNON, 2004)
Retração por secagem	Avaliação da penetração de cloretos	Corrosão das armaduras (ensaios complementares: profundidade de Carbonatação e Penetração de cloretos) (MORAES, 2008)	
	Avaliação da profundidade de carbonatação a 10% CO <sub>2</sub>		

Como se pode observar na Tabela 5. 1, os resultados da 2ª etapa de produção dos concretos são diferentes do esperado, apesar dos materiais, a dosagem, procedimento de mistura e moldagem serem os mesmos das outras etapas. Isso ocorreu provavelmente pela variabilidade no armazenamento dos aglomerantes, escória de alto-forno e cimento, assim como pela possibilidade de excesso de finos no agregado graúdo, proveniente da parte inferior do depósito. Nesses resultados, observa-se que a análise das propriedades e da durabilidade desses concretos deve ser cuidadosa e em função das classes reais obtidas para cada concreto, calculadas com base na NBR 12 655/1992.

Foi realizada uma avaliação de todas as etapas estudadas nesta pesquisa. Geraram-se, então, os gráficos apresentados na Figura 5. 1, Figura 5. 2 e Figura 5. 3, por meio de uma análise de regressão exponencial, tendo como base os limites adotados a partir das curvas obtidas para os diagramas de dosagem de cada aglomerante.

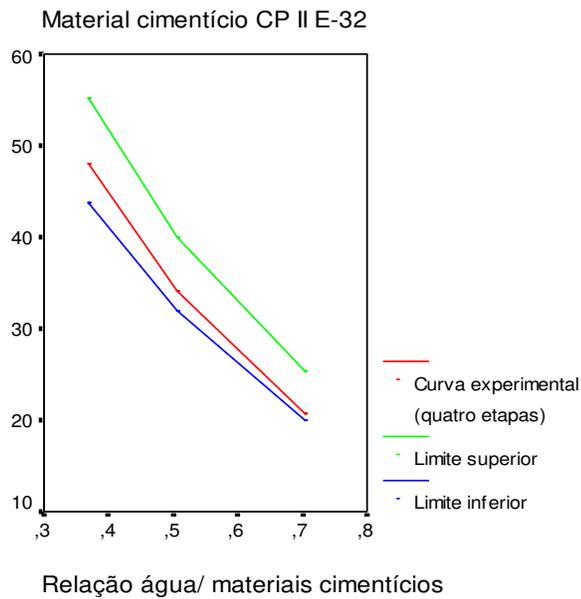
**Tabela 5. 1– Resistência à compressão média aos 28 dias dos concretos em cada etapa de produção.**

Traço	Concreto	a/mc	Resistência à compressão axial média aos 28 dias (MPa) nas Etapas de produção do concreto			
			1ª etapa	2ª etapa	3ª etapa*	4ª etapa **
T1	C20CPIIE	0,63	27,8	22,8	23,1	26,2
T2	C20CPIII	0,75	25,6	27,0	28,4	26,4
T3	C20CPIII+e	0,63	27,2	24,7	29,3	25,2
T4	C30CPIIE	0,49	36,1	27,4	37,0	39,7
T5	C30CPIII	0,61	36,2	29,0	37,4	36,9
T6	C30CPIII+e	0,49	34,0	27,0	38,5	38,1
T7	C35CPIIE	0,44	40,0	35,4	***	41,9
T8	C35CPIII	0,56	43,0	34,8	***	40,0
T9	C35CPIII+e	0,44	43,4	34,1	***	40,8
T10	C40CPIIE	0,39	47,8	43,4	48,8	44,7
T11	C40CPIII	0,52	42,2	40,4	51,8	43,5
T12	C40CPIII+e	0,39	42,8	34,2	53,7	43,2

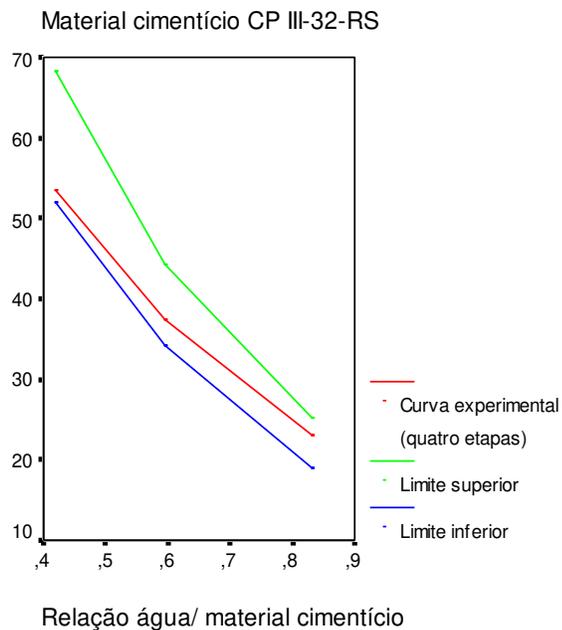
\* Resultados obtidos por Moraes (2008), referentes ao estudo de corrosão da armadura dos concretos com altos teores de escória granulada de alto-forno.

\*\* Resultados obtidos por Bourguignon (2004), referentes ao estudo de dosagem dos concretos com altos teores de escória granulada de alto-forno.

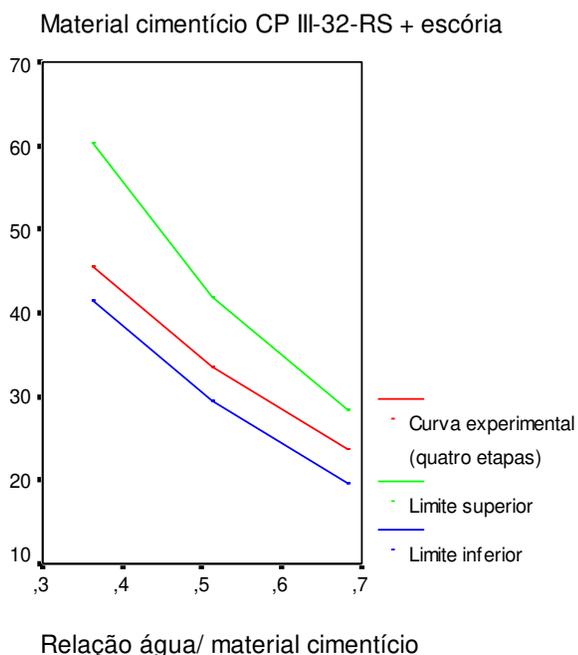
\*\*\* Os concretos não foram dosados.



**Figura 5. 1 – Curva de ajuste correspondente ao intervalo de confiança experimental das quatro etapas de produção de concreto para o material cimentício CP II-E-32.**



**Figura 5. 2 – Curva de ajuste de resultados correspondente ao intervalo de confiança experimental das quatro etapas de produção de concreto para o material cimentício CP III-32-RS.**



**Figura 5. 3 – Curva de ajuste de resultados obtidos em relação ao intervalo de confiança experimental das quatro etapas de produção de concreto para o material cimentício CP III-32-RS +escória.**

Na Figura 5. 1, Figura 5. 2 e Figura 5. 3 foram estabelecidos os limites superior e inferior, a partir dos diagramas de dosagens apresentados no capítulo 4 e correspondentes a  $\pm 5\%$  dessas curvas, o que garante a probabilidade de 95% dos resultados atenderem às resistências características. As curvas obtidas experimentalmente, para as quatro etapas de produção dos concretos, com os respectivos aglomerantes, e inseridas nesses limites, encontram-se dentro desses intervalos. Dessa maneira,, as pesquisas prosseguiram e se estabeleceu a tendência de cada propriedade estudada, em curvas, em função da classe real, obtida para cada concreto.

### 5.3 Avaliação das propriedades físicas dos concretos

#### 5.3.1 Retração por secagem

O comportamento em relação à retração e à fissuração por retração tem um efeito variável, dependendo do tipo de elemento estrutural, condições ambientais, cura, tipo e espaçamento de juntas, detalhes e quantidade de armadura e das características das misturas.

A NBR 8 490/1984 traz um ensaio de retração livre e serve apenas como uma indicação de como as misturas se comparam, pois não acessa o comportamento em relação à fissuração por retração.

A Tabela 5. 2, Tabela 5. 3, Tabela 5. 4 e Tabela 5. 5 apresentam, respectivamente, os valores de retração por secagem nas idades de 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 dias para cada traço e para as classes de concreto em estudo (C20, C30, C35 e C40).

**Tabela 5. 2 – Resultado médio da retração por secagem nas idades de 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 dias de idade para classe de resistência C20.**

Idade (dias)	Resultado médio da retração por secagem para classe de resistência C20 (%)					
	CP IIE	DP *	CP III	DP *	CP III+e	DP *
7	0,006	0,003	0,010	0,005	0,010	0,006
14	0,000	0,005	0,017	0,003	0,017	0,005
28	-0,007	0,007	-0,030	0,005	0,004	0,007
32	-0,017	0,007	0,000	0,007	-0,005	0,018
35	-0,018	0,008	-0,033	0,007	-0,002	0,004
42	-0,019	0,007	-0,033	0,019	-0,004	0,004
56	-0,026	0,008	-0,034	0,020	-0,007	0,004
84	-0,033	0,009	-0,059	0,020	-0,032	0,004
140	-0,062	0,009	-0,060	0,021	-0,026	0,004
252	-0,057	0,010	-0,062	0,021	-0,047	0,005
365	-0,062	0,010	-0,064	0,020	-0,056	0,005

\*DP = Desvio Padrão

**Tabela 5. 3 – Resultado médio da retração por secagem nas idades de 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 dias de idade para classe de resistência C30.**

Idade (dias)	Resultado médio da retração por secagem para classe de resistência C30 (%)					
	CP IIE	DP *	CP III	DP *	CP III+e	DP *
7	0,004	0,006	0,008	0,004	0,012	0,014
14	0,005	0,009	0,010	0,001	0,000	0,031
28	-0,016	0,005	-0,023	0,002	-0,010	0,019
32	-0,021	0,006	-0,024	0,001	-0,011	0,019
35	-0,018	0,006	-0,025	0,001	-0,012	0,019
42	-0,021	0,005	-0,029	0,002	-0,016	0,019
56	-0,023	0,004	-0,030	0,003	-0,018	0,019
84	-0,045	0,005	-0,042	0,002	-0,031	0,017
140	-0,044	0,002	-0,051	0,002	-0,043	0,016
252	-0,047	0,005	-0,055	0,003	-0,050	0,016
365	-0,048	0,005	-0,062	0,003	-0,064	0,015

\*DP = Desvio Padrão

**Tabela 5. 4 – Resultado médio da retração por secagem nas idades de 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 dias de idade para classe de resistência C35.**

Idade (dias)	Resultado médio da retração por secagem para classe de resistência C35 (%)					
	CP IIE	DP *	CP III	DP *	CP III+e	DP *
7	0,000	0,002	0,008	0,001	0,005	0,001
14	0,003	0,005	0,008	0,003	-0,001	0,001
28	-0,016	0,007	-0,030	0,001	-0,027	0,008
32	-0,017	0,007	-0,030	0,001	-0,032	0,008
35	-0,022	0,006	-0,031	0,001	-0,033	0,008
42	-0,024	0,007	-0,034	0,001	-0,034	0,007
56	-0,031	0,009	-0,039	0,001	-0,039	0,007
84	-0,042	0,010	-0,043	0,002	-0,048	0,006
140	-0,050	0,007	-0,051	0,001	-0,061	0,003
252	-0,053	0,007	-0,051	0,001	-0,062	0,003
365	-0,062	0,007	-0,066	0,002	-0,082	0,004

\*DP = Desvio Padrão

**Tabela 5. 5 – Resultado médio da retração por secagem nas idades de 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 dias de idade para classe de resistência C40.**

Idade (dias)	Resultado médio da retração por secagem para classe de resistência C40 (%)					
	CP IIE	DP *	CP III	DP *	CP III+e	DP *
7	0,004	0,001	0,008	0,005	0,012	0,001
14	0,005	0,004	0,010	0,006	0,000	0,002
28	-0,016	0,004	-0,023	0,010	-0,010	0,002
32	-0,021	0,004	-0,024	0,005	-0,011	0,002
35	-0,018	0,005	-0,025	0,006	-0,012	0,003
42	-0,021	0,004	-0,029	0,005	-0,016	0,002
56	-0,023	0,004	-0,030	0,006	-0,018	0,002
84	-0,045	0,004	-0,042	0,006	-0,031	0,001
140	-0,044	0,005	-0,051	0,006	-0,043	0,003
252	-0,042	0,005	-0,058	0,006	-0,064	0,003
365	-0,050	0,006	-0,067	0,006	-0,077	0,003

\*DP = Desvio Padrão

Para verificar o comportamento das diferentes classes de concreto C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória) foi realizado o teste estatístico de Análise de Variância (ANOVA) e o teste *a posteriori* de DUNCAN, com um nível significância de 5%, fixando a classe de resistência e a idade dos corpos-de-prova, conforme se observa na Tabela 5. 6, Tabela 5. 7, Tabela 5. 8 e Tabela 5. 9, respectivamente.

**Tabela 5.6 - Resultados de Anova e teste de DUNCAN para a variável retração por secagem aos 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 de idade para classe de resistência do concreto C20, com fator de variação - material cimentício (n=3).**

Classe	Idade	F	p-valor	Diferenças estatísticas para o fator-material cimentício
C20	7	1,443	0,274	Não ocorrem
	14	12,087	0,01	C20CPIIE não há variação dimensional e nos concretos C20CPIII e C20CPIII+e ocorreram expansões similares
	28	11,207	0,02	Ocorre retração para C20CPIII > que a variação dimensional dos concretos (C20CPIIE e C20CPIII+e)*
	35	8,749	0,005	Ocorre retração para os concretos C20CPIII > que a retração dos concretos (C20CPIIE, C20CPIII+e)*
	42	7,125	0,009	
	56	6,303	0,013	Ocorre retração para os concretos (C20CPIII, C20CPIIE)* > que a retração dos concretos C20CPIII+e
	84	7,477	0,008	Ocorre retração para C20CPIII > que a retração dos concretos (C20CPIIE, C20CPIII+e)*
	140	8,359	0,005	Ocorre retração para (C20CPIII, C20CPIIE)* > que a retração dos concretos C20CPIII+e
	252	1,457	0,271	Não ocorrem
	365	0,430	0,660	

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

**Tabela 5.7 - Resultados de Anova e teste de DUNCAN para a variável retração por secagem aos 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 de idade para classe de resistência do concreto C30, com fator de variação - material cimentício (n=3).**

Classe	Idade	F	p-valor	Diferenças estatísticas para o fator-material cimentício
C30	7	1,044	0,384	Não ocorrem
	14	0,423	0,665	
	32	1,756	0,218	
	35	1,647	0,237	
	42	1,901	0,195	
	56	1,740	0,221	
	84	2,610	0,118	
	140	1,214	0,334	
	252	0,997	0,40	
	365	4,731	0,033	Ocorre retração para os concretos (C30CPIII+e, C30CPIII)* > que a retração do concreto C30CPIIE

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativos.

**Tabela 5.8 - Resultados de Anova e teste de DUNCAN para a variável retração por secagem aos 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 de idade para classe de resistência do concreto C35, com fator de variação - material cimentício (n=3).**

Classe	Idade	F	p-valor	Diferenças estatísticas para o fator-material cimentício
C35	7	6,405	0,013	Ocorre expansão para os concretos (C35CPIII, C35CPIII+e)* > que a expansão do concreto C35CPIIE
	14	0,493	0,623	Não ocorrem diferenças na expansão
	28	7,908	0,006	Ocorre retração para os concretos (C35CPIII, C35CPIII+e)* > que a retração do concreto C35CPIIE
	32	28,195	0,000	Ocorre retração para os concretos (C35CPIII, C35CPIII+e)* > que a retração do concreto C35CPIIE
	35	21,708	0,000	Ocorre retração para o concreto C35CPIII > C35CPIII+e > C35CPIIE
	42	26,397	0,000	Ocorre retração para o concreto (C35CPIII, C35CPIII+e)* > C35CPIIE
	56	20,703	0,000	Ocorre retração para o concreto (C35CPIII+e, C35CPIII)* > C35CPIIE
	84	25,141	0,000	Ocorre retração para o concreto C35CPIII > C35CPIII+e > C35CPIIE
	140	17,267	0,000	Ocorre retração para o concreto (C35CPIII+e, C35CPIII)* > C35CPIIE
	252	23,941	0,000	Ocorre retração para o concreto (C35CPIII+e, C35CPIII)* > C35CPIIE
	365	37,425	0,000	Ocorre retração para o concreto C35CPIII+e > C35CPIII > C35CPIIE

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativos.

**Tabela 5.9 - Resultados de Anova e teste de DUNCAN para a variável retração por secagem aos 7, 14, 28, 32, 35, 42, 56, 84, 140, 252 e 365 de idade para classe de resistência do concreto C40, com fator de variação - material cimentício (n=3).**

Classe	Idade	F	p-valor	Diferenças estatísticas para o fator-material cimentício
C40	7	53,925	0,000	Retração concreto C40CPIIE e expansão para C40CPIII > que a expansão para C40CPIII+e
	14	7,749	0,009	Retração concreto C40CPIII+e, e expansão para (C40CPIIE, C40CPIII)*
	28	8,197	0,006	Ocorre retração para o concreto (C40CPIII, C40CPIII+e)* > C40CPIIE
	32	8,036	0,006	Ocorre retração para o concreto (C40CPIII+e, C40CPIII)* > C40CPIIE
	35	4,908	0,028	Retração concreto (C40CPIII+e, C40CPIII)* > C40CPIIE
	42	5,112	0,025	Retração concreto (C40CPIII+e, C40CPIII)* > C40CPIIE
	56	2,792	0,101	Não ocorrem
	84	1,285	0,312	Não ocorrem
	140	8,975	0,004	Retração concreto C40CPIII+e > (C40CPIII, C40CPIIE)*
	252	7,997	0,006	Retração concreto C40CPIII+e > (C40CPIIE, C40CPIII)*
	365	26,329	0,000	Retração concreto C40CPIII+e > (C40CPIII, C40CPIIE)*

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativos.

O comportamento das diferentes classes de concreto C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória), é apresentado na Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7, respectivamente. Observa-se que grande parte da retração ocorre nos primeiros 84 dias.

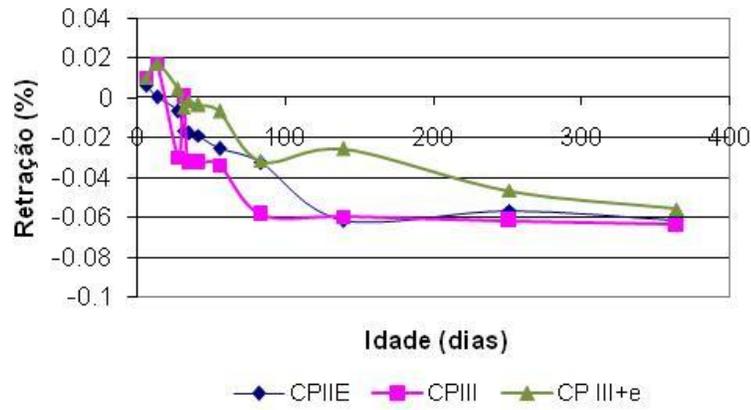


Figura 5. 4 – Retração das misturas de classe C20 em função da idade.

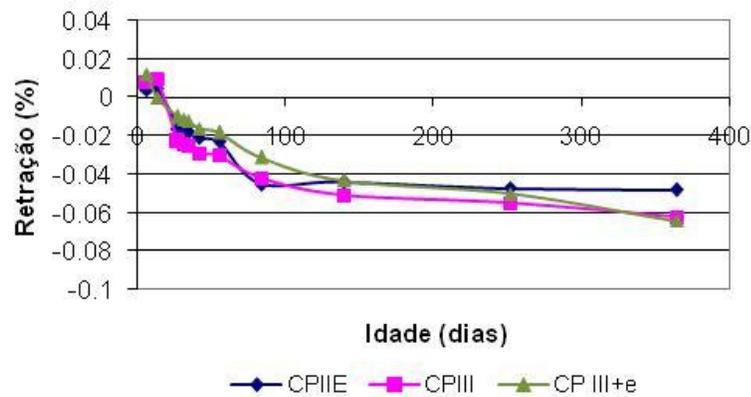


Figura 5. 5 - Retração das misturas de classe C30 em função da idade.

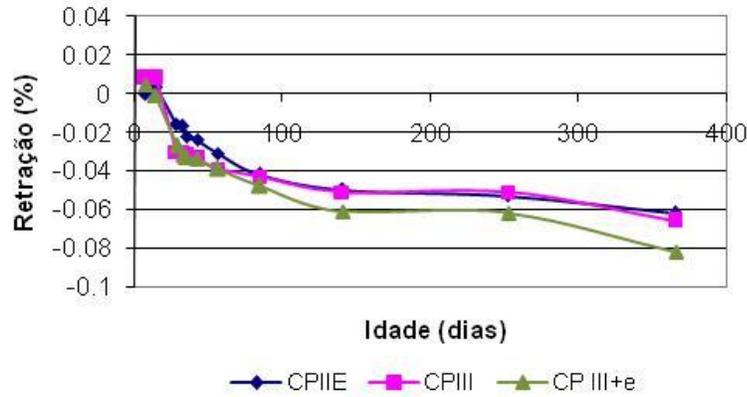


Figura 5. 6 - Retração das misturas de classe C35 em função da idade.

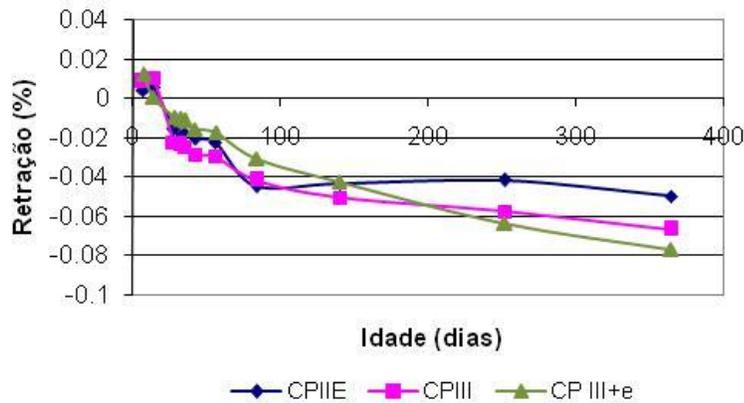


Figura 5. 7 - Retração das misturas de classe C40 em função da idade.

Até os 14 dias, quando os corpos-de-prova das misturas ficaram em cura imersa, verifica-se que não ocorrem diferenças estatisticamente significativas de expansão ou retração para os concretos de classe C20 (com exceção do CP II-E-32), C30 e C35 com os diferentes materiais cimentícios. Já em relação aos concretos C40, foram observadas diferenças para os diferentes materiais cimentícios. Isso talvez se deva ao fato de que a

expansão e/ou retração nessa idade foi muito pequena e o desvio padrão relativamente alto, dificultando a diferenciação das misturas.

Para os concretos de classe C20, ocorre maior retração para os concretos com CP III 32-RS até os 140 dias de idade, sendo que, a partir dessa data, não ocorrem mais diferenças estatisticamente significativas para os concretos com o CP II-E-32, e, a partir dos 252 dias, deixa de haver diferenças também para os concretos com CP III 32-RS+ escória.

No caso dos concretos de classe C30, não ocorrem diferenças estatísticas significativas para retração com os diferentes teores de escória de alto-forno no concreto até os 252 dias de idade. Porém, esse quadro muda aos 365 dias, onde as misturas com CP III 32-RS+ escória e CP III 32-RS apresentaram maiores valores de retração.

Nos concretos de classe C35 e C40 os concretos com CP II-E-32 apresentaram menor retração em todas as idades.

De uma forma geral, adições de escória de alto-forno podem aumentar a retração, em especial em idades mais avançadas, devido: a) ao aumento do volume de pasta, pois o volume de escória de alto-forno é maior se comparado ao volume de uma mesma massa de cimento portland; b) a maior quantidade de C-S-H formada e c) à alteração do diâmetro dos poros (MALHOTRA, 1987). De acordo com Metha e Monteiro (1994) e Hasparyk *et al.* (2005), as adições tendem a aumentar o volume de poros finos no produto de hidratação do cimento e a retração que está relacionada com água dos pequenos poros.

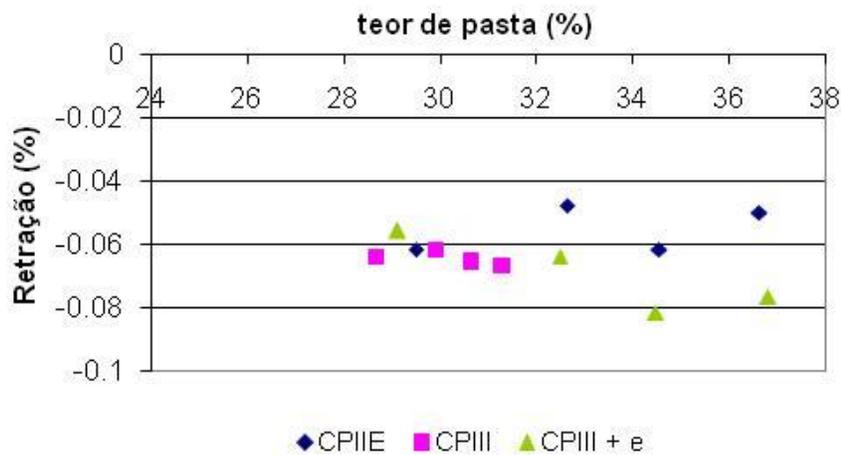
Além da influência da utilização de cimento com substituição parcial de escória de alto-forno, a quantidade de cimento, a cura, classe do concreto e a relação água/materiais cimentícios são condições importantes para o aumento ou diminuição da retração (BROOKS *et al.*, 1992).

A elevada relação água/materiais cimentícios pode ser um agravante no que se refere ao aumento da retração, quando se utiliza escória de alto-forno em substituição parcial do cimento. Em concretos com escória de alto-forno que tenham uma relação água/materiais cimentícios baixa, a retração é similar ou pode ser até menor, comparado à do concreto sem adição (BROOKS *et al.*, 1992; COELHO, 2002).

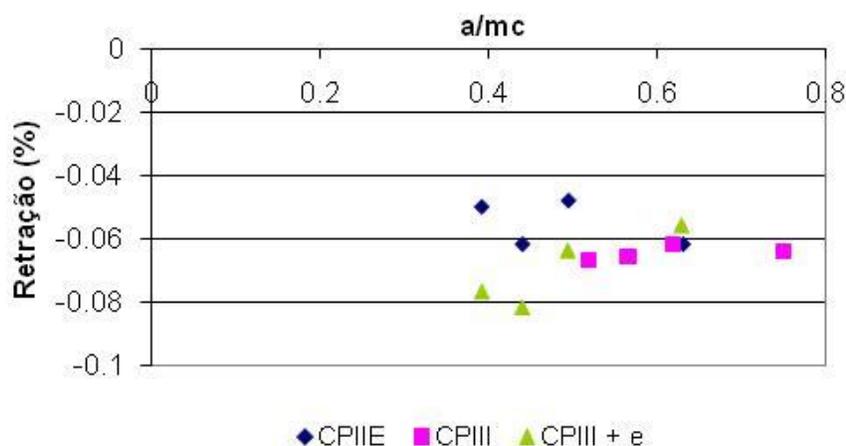
No caso da retração medida neste trabalho (Tabela 5. 2, Tabela 5. 3, Tabela 5. 4 e Tabela 5. 5), apesar de observarem-se maiores valores de retração aos 365 dias para

misturas com maiores teores de escória de alto-forno (com exceção dos concretos C20), não se pode concluir que a maior retração foi decorrente apenas do maior teor de escória, mas devem-se também considerar as diferenças na relação água/materiais cimentícios e no teor de pasta.

Cabe salientar que, para a manutenção da trabalhabilidade, sem o uso de aditivos, a relação água/materiais cimentícios e o teor de pasta de cada mistura foram diferentes. Contudo, não se encontrou uma correlação clara entre retração e teor de pasta ou retração e água/materiais cimentícios aos 365 dias (Figura 5. 8 e Figura 5. 9).



**Figura 5. 8 - Retração das misturas aos 365 dias em função do teor de pasta.**



**Figura 5.9 - Retração das misturas aos 365 dias em função da água/materiais cimentícios.**

O modelo que melhor representa a retração em relação ao teor de pasta é o modelo polinômico. Para as misturas contendo CP II-E-32, o coeficiente de correlação  $R^2$  encontrado foi muito baixo (0,21) e, portanto, não houve uma correlação entre retração e teor de pasta. No entanto, o coeficiente de correlação para as misturas com CP III 32-RS e CP III 32-RS+ escória foi, respectivamente, 0,77 e 0,81, o que indica uma correlação entre retração e teor de pasta.

Da mesma forma, ao correlacionar-se a retração com a relação água/materiais cimentícios obtém-se coeficientes de correlação bem distintos, dependendo do tipo de material cimentício. Para as misturas contendo CP II-E-32, o coeficiente de correlação  $R^2$  encontrado foi novamente muito baixo (0,26), não havendo uma correlação entre retração e relação água/materiais cimentícios. No entanto, o coeficiente de correlação para as misturas com CP III 32-RS e CP III 32-RS+ escória foi, respectivamente, 0,80 e 0,82, o que indica uma boa correlação entre retração e água/materiais cimentícios nesses casos.

No entanto, quando vários fatores são levados em consideração conjuntamente, pode-se entender melhor o comportamento das misturas. Nesse sentido, o capítulo 8 apresenta um modelo mais complexo, que relaciona a retração com o teor de escória de

alto-forno, a relação água/materiais cimentícios e o consumo de materiais cimentícios. Naquele caso, foi encontrada uma tendência muito clara, cuja correlação passou de 0,90.

Petrucci (1971) e Neville (1997) estipulam valores máximos de retração de cerca de 0,0700%. Os concretos aqui estudados apresentaram resultados de retração dentro desta faixa.

A fim de reduzir a probabilidade de fissuração por retração, Mokarem *et al.* (2003) apresentam especificações por desempenho que limitam a retração a 0,0300%, aos 28 dias de exposição à secagem (leituras aos 42 dias) e 0,0400% aos 90 dias de exposição à secagem (leituras aos 104 dias). Todas as misturas, com exceção das misturas C20 CP III-32-RS, C35 CP III-32-RS e C35 CP III-32-RS+ escória, atenderam ao requisito dos 28 dias de secagem. No entanto, observa-se que aos 84 dias, ou seja 70 dias de secagem, a retração já é maior do que este requisito nas misturas com CP III-32-RS de todas as classes de resistência, nas misturas com CP II-E-32, classes C30, C35 e C40 e na mistura C35 CP III-32-RS + escória.

Não foi possível comparar os valores máximos de retração deste estudo com o calculado segundo a NBR 6118/2003 da ABNT, pois os valores da Tabela 8.1 dessa norma são válidos apenas para concretos plásticos e de cimento Portland comum.

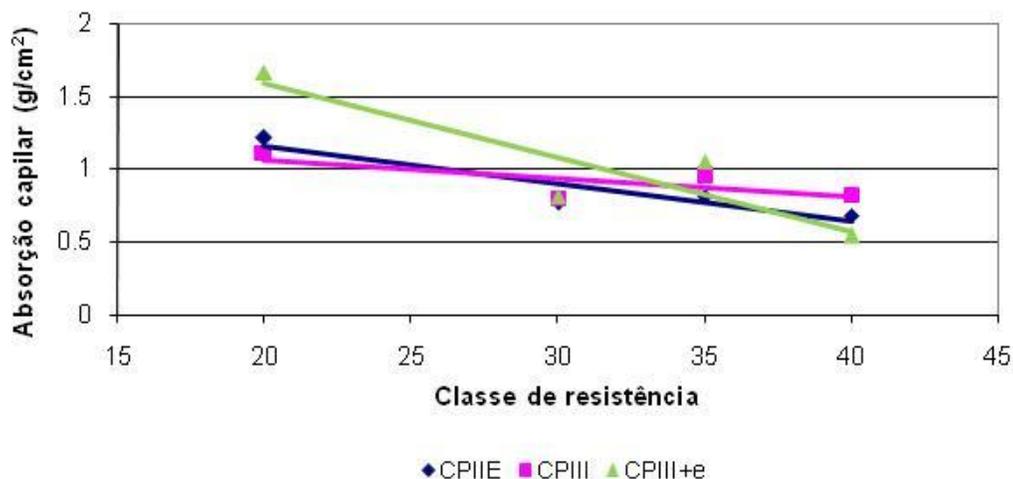
### **5.3.2 Absorção por capilaridade**

A Tabela 5. 10 apresenta os valores médios obtidos para a absorção por capilaridade para cada traço de concreto.

**Tabela 5. 10 – Resultado médio da absorção por capilaridade e altura de ascensão capilar aos 63 dias de idade para os concretos em estudo.**

Traço	Concreto	a/ Mat. Cim.	Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)	Absorção por capilaridade 63 dias (g/cm <sup>2</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>2</sup> )	Altura de ascensão capilar (cm)	Desvio padrão (cm)
T1	C20CPIIE	0,63	22,81	1,21	0,15	12,10	1,17
T2	C20CPIII	0,75	27,02	1,11	0,13	10,62	0,92
T3	C20CPIII+e	0,63	24,66	1,66	0,23	13,90	1,11
T4	C30CPIIE	0,49	27,42	0,77	0,08	8,10	1,18
T5	C30CPIII	0,61	28,98	0,80	0,05	8,71	0,63
T6	C30CPIII+e	0,49	27,00	0,81	0,06	9,38	0,64
T7	C35CPIIE	0,44	35,38	0,81	0,10	8,43	0,87
T8	C35CPIII	0,56	34,79	0,95	0,14	10,30	1,70
T9	C35CPIII+e	0,44	34,07	1,05	0,09	10,97	1,40
T10	C40CPIIE	0,39	43,35	0,68	0,06	7,06	0,65
T11	C40CPIII	0,52	40,40	0,82	0,06	9,18	0,23
T12	C40CPIII+e	0,39	34,18	0,54	0,08	6,40	0,85

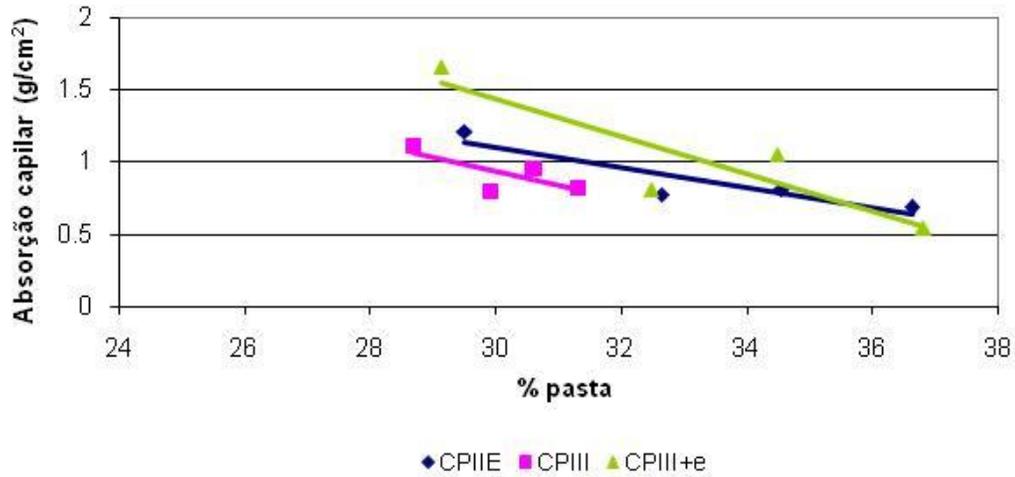
Na Figura 5. 10 apresentam-se as curvas de tendência (regressão linear) da absorção por capilaridade média aos 63 dias em função das classes de concreto. Os coeficientes de correlação obtidos por regressão linear foram de 0,86; 0,56 e 0,81 para CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória, respectivamente, indicando uma tendência da diminuição da absorção por capilaridade com o aumento da classe de resistência, conforme esperado. Observa-se que esta diminuição é mais significativa nos concretos contendo CP III-32-RS+ escória.



**Figura 5. 10 – Curvas de tendência da absorção por capilaridade média aos 63 dias em função das classes dos concretos estudadas, para os três diferentes tipos de materiais cimentícios.**

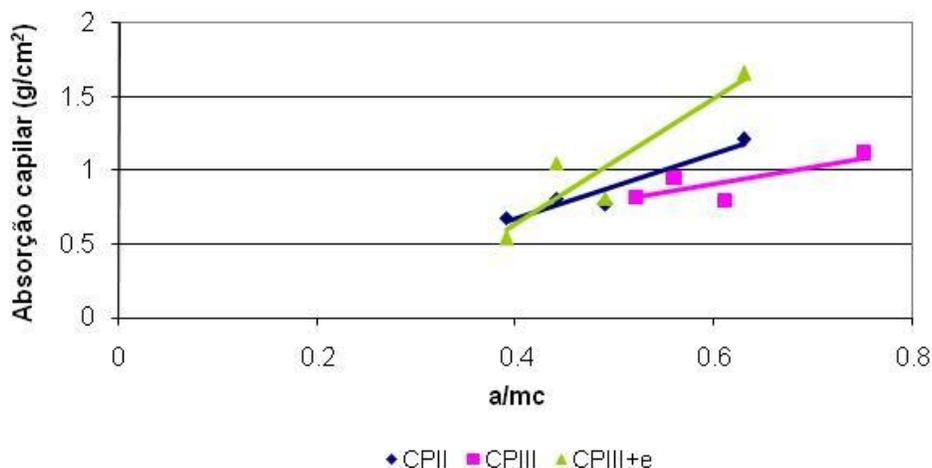
A Figura 5. 11 apresenta a regressão linear da absorção por capilaridade média aos 63 dias, em função do teor de pasta dos concretos. Os coeficientes de correlação obtidos por regressão linear foram de 0,82, 0,54 e 0,79 para CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória, respectivamente, indicando uma tendência forte de diminuição da absorção por capilaridade com o aumento do teor de pasta, contrário do que seria usualmente esperado.

No entanto, cabe ressaltar que, neste estudo, o teor de pasta aumentou com o aumento da classe de resistência, ao mesmo tempo que a relação água/materiais cimentícios diminuiu. Portanto, as misturas com maior teor de pasta possuíram menor relação água/materiais cimentícios e, conseqüentemente, menor absorção por capilaridade, conforme esperado.



**Figura 5. 11 - Curvas de tendência da absorção por capilaridade média aos 63 dias em função do teor de pasta, para os três diferentes tipos de materiais cimentícios.**

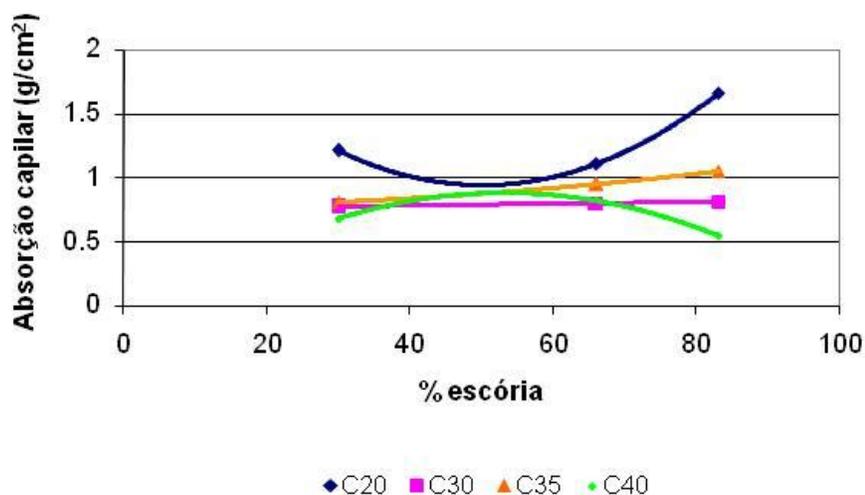
A Figura 5. 12 apresenta a regressão linear da absorção por capilaridade média aos 63 dias, em função da relação água/materiais cimentícios dos concretos. Os coeficientes de correlação obtidos por regressão linear foram de 0,82; 0,54 e 0,79 para CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória, respectivamente, indicando uma tendência do aumento da absorção por capilaridade com o aumento da relação água/materiais cimentícios, conforme esperado.



**Figura 5. 12 - Curvas de tendência da absorção por capilaridade média aos 63 dias em função da relação água/materiais cimentícios, para os três diferentes tipos de materiais cimentícios.**

A adição da escória de alto-forno promove o refinamento da estrutura dos poros, aumentando a desconexão dos capilares e reduzindo a espessura da interface pasta-agregado (LUCO, 2001). Esperava-se, portanto, que os concretos com maiores teores de escória de alto-forno apresentassem absorção por capilaridade menor. No entanto, a Figura 5. 12 mostra que para uma mesma relação água/materiais cimentícios, os concretos com CP III-RS-32+ escória (com exceção da classe C40) apresentaram maior absorção capilar.

Os resultados ilustrados na Figura 5. 13 indicam uma tendência pouco clara da absorção capilar, em função do teor de escória. No entanto, quando vários fatores são levados em consideração conjuntamente, pode-se entender melhor o comportamento das misturas. Nesse sentido, o capítulo 8 apresenta um modelo que relaciona a absorção capilar com o teor de escória de alto-forno, a relação água/materiais cimentícios e o consumo de materiais cimentícios. Naquele caso, foi encontrada uma tendência muito clara, cuja correlação superior a 0,90.



**Figura 5. 13 - Curvas de tendência da absorção por capilaridade média aos 63 dias em função do teor de escória na mistura, para cada classe de resistência.**

Na Figura 5. 14 apresentam-se as curvas de tendência (regressão linear) da altura de ascensão capilar média aos 63 dias, em função das classes de concreto. Os coeficientes de correlação obtidos por regressão linear foram de 0,86; 0,56 e 0,81 para CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória, respectivamente, indicando uma tendência da diminuição da altura de ascensão capilar com o aumento da classe de resistência, conforme esperado.

A Figura 5. 15 apresenta a regressão linear da altura de ascensão capilar média aos 63 dias em função da relação água/materiais cimentícios dos concretos. Os coeficientes de correlação obtidos na regressão linear foram de 0,91; 0,63 e 0,84 para CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória, respectivamente, indicando uma tendência do aumento da altura de ascensão capilar com o aumento da relação água/materiais cimentícios, conforme esperado.

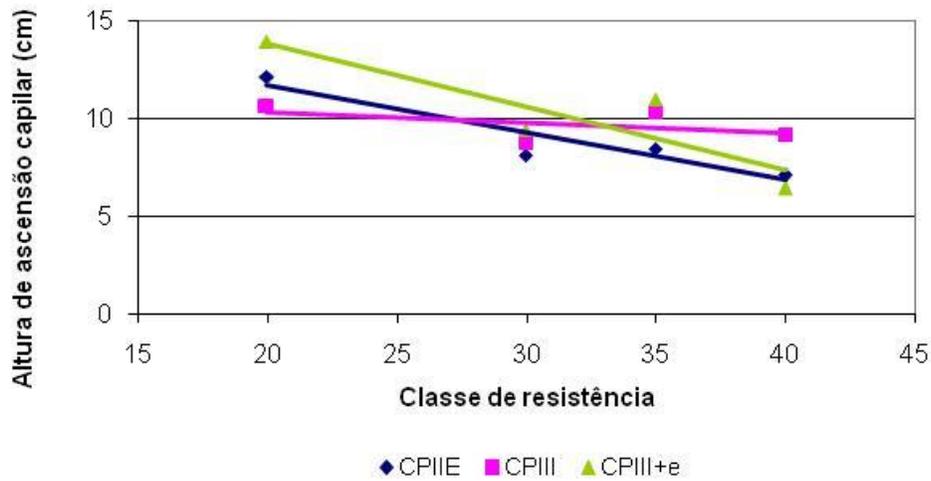


Figura 5. 14 – Curvas de tendência da altura de ascensão capilar média aos 63 dias em função das classes dos concretos estudadas, para os três diferentes tipos de materiais cimentícios.

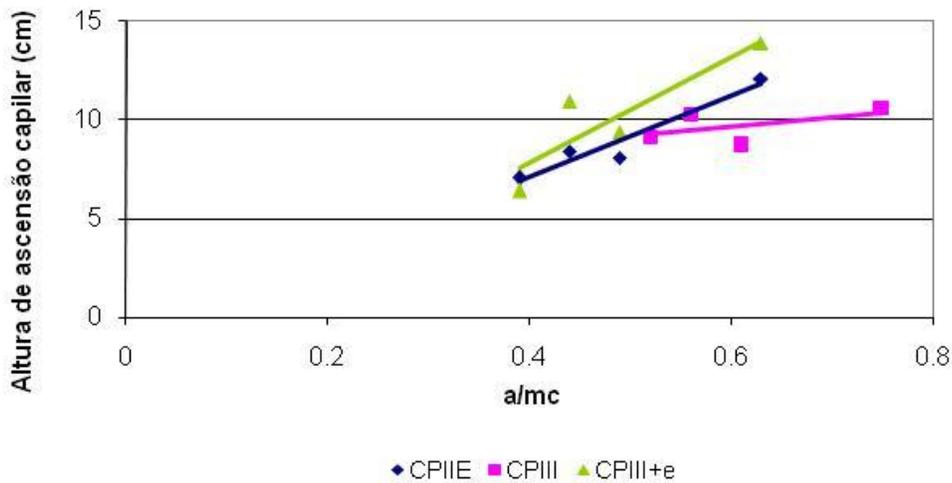


Figura 5. 15 – Curvas de tendência da altura de ascensão média aos 63 dias em função da relação água/materiais cimentícios, para os três diferentes tipos de materiais cimentícios.

Observa-se que o comportamento da altura de ascensão capilar, em função da relação água/materiais cimentícios, é similar ao da absorção por capilaridade, ou seja, quanto maior a relação água/materiais cimentícios, maior a altura de ascensão capilar. Além disso, para uma mesma relação água/materiais cimentícios, as misturas com CP III-32-RS+ escória apresentaram maior altura de ascensão capilar, exceto para a classe C40, em que não há diferença entre CP III-32-RS+ escória e o CP II-E-32.

## **5.4 Avaliação das propriedades mecânicas dos concretos**

### **5.4.1 Resistência à compressão axial**

Os valores médios de resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 63 dias para cada traço de concreto em estudo e seus respectivos desvios padrão são apresentados na Tabela 5. 11.

Para verificar o comportamento das diferentes classes de concreto C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória), foram realizados o teste estatístico de Análise de Variância (ANOVA) e o teste *a posteriori* de DUNCAN, com um nível significância de 5%, fixando-se a classe de resistência e a idade dos corpos-de-prova, como se vê na Tabela 5. 12.

**Tabela 5. 11– Resultado médio da resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 63 dias de idade para os concretos em estudo.**

Traço	Concreto	Resistência à compressão axial média (MPa)					
		7 dias	D. Padrão	28 dias	D. Padrão	63 dias	D. Padrão
T1	C20CPIIE	17,0	0,24	27,8	0,98	29,2	1,50
T2	C20CPIII	14,7	0,19	25,6	1,79	30,2	1,56
T3	C20CPIII+e	17,5	1,16	27,2	0,38	32,5	1,16
T4	C30CPIIE	26,5	0,37	36,1	0,46	42,5	1,26
T5	C30CPIII	19,4	1,26	36,2	1,00	39,1	2,65
T6	C30CPIII+e	22,6	1,79	34,0	1,23	38,7	1,24
T7	C35CPIIE	29,8	0,58	40,0	0,39	46,6	1,18
T8	C35CPIII	26,7	1,04	43,0	1,38	46,1	1,06
T9	C35CPIII+e	32,7	1,88	43,4	1,05	53,9	3,55
T10	C40CPIIE	39,0	1,26	47,8	1,90	52,9	1,59
T11	C40CPIII	23,3	1,43	42,2	0,91	49,0	3,16
T12	C40CPIII+e	26,1	1,57	42,8	4,93	51,9	1,96

**Tabela 5. 12- Resultados de Anova e teste a *posteriori* de DUNCAN para a variável resistência à compressão com fator de variação - material cimentício (n=4).**

Classe	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas (fator-material cimentício)
Concreto C20	7	18,469	0,001	Crescem nesta ordem: C20CPIII, (C20CPIIE, C20CPIII+e)*
	28	3,783	0,064	Crescem nesta ordem: (C20CPIII, C20CPIII+e)*, (C20CPIII+e, C20CPIIE)*
	63	5,854	0,024	Crescem nesta ordem: (C20CPIIE, C20CPIII)*, C20CPIII+e
Concreto C30	7	30,837	0,000	Crescem nesta ordem: C30CPIII, C30CPIII+e, C30CPIIE
	28	6,730	0,016	Crescem nesta ordem: C30CPIII+e, (C30CPIIE, C30CPIII)*
	63	5,262	0,031	Crescem nesta ordem: (C30CPIII+e, C30CPIII)*, C30CPIIE
Concreto C35	7	22,163	0,000	Crescem nesta ordem: C35CPIII, C35CPIIE, C35CPIII+e
	28	13,391	0,002	Crescem nesta ordem: C35CPIIE, (C35CPIII, C35CPIII+e)*
	63	15,313	0,001	Crescem nesta ordem: (C35CPIII, C35CPIIE)*, C35CPIII+e
Concreto C40	7	137,548	0,000	Crescem nesta ordem: C40CPIII, C40CPIII+e, C40CPIIE
	28	3,992	0,057	Crescem nesta ordem: (C40CPIII, C40CPIII+e)*, C40CPIIE
	63	3,116	0,094	Crescem nesta ordem: (C40CPIII, C40CPIII+e)*, (C40CPIII+e, C40CPIIE)*

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

Nos resultados de Anova e de teste a *posteriori* de DUNCAN, observa-se que, na idade de 7 dias para os concretos de classe de resistência C30 e C40, as resistências à compressão axial das misturas com material cimentício CP II-E-32 (com maior teor de clínquer), foram maiores que as misturas com CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória. Nos concretos de classe de resistência C20, os valores médios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias das misturas com CP II-E-32 e CP III-32-RS + escória não apresentaram diferenças estatisticamente significativas (Tabela 5. 12).

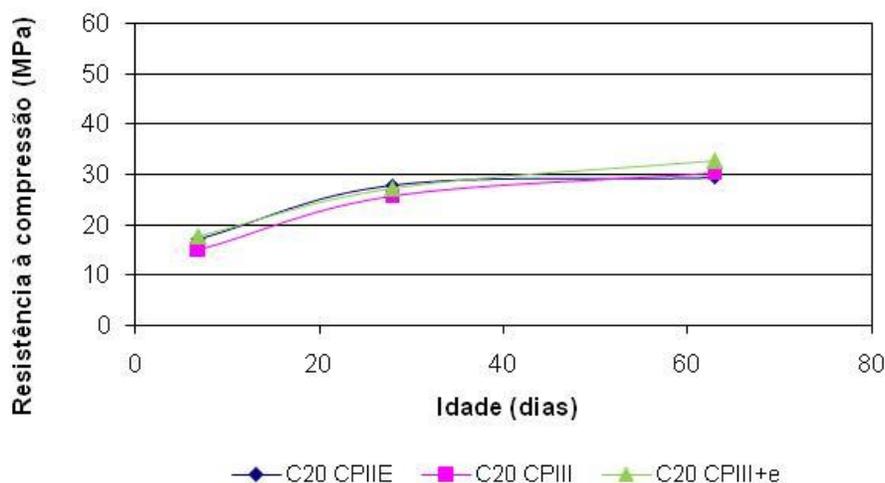
Com relação aos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, com exceção da classe C35, os concretos com CP II-E-32 apresentaram maiores resistências. No entanto, para cada classe de concreto, embora existam algumas diferenças estatísticas ao se variar os materiais cimentícios, esses resultados enquadram-se dentro

nível de significância de 95% estabelecido em curvas de dosagem para todos os concretos, nas quatro etapas de produção.

Na idade de 63 dias, os concretos de classe de resistência C20, C35 e C40 apresentaram maiores valores de resistência à compressão axial nas misturas com material cimentício CP III-32-RS+ escória, ou seja, com maior teor de escória granulada de alto-forno moída presente no aglomerante, sendo esses resultados de acordo com as pesquisas de Malhotra (1987); Sakai *et al.* (1992), Nakamura *et al.* (1992). É importante considerar que esses valores também dependem da quantidade e da finura da escória de alto-forno, da relação água/materiais cimentícios, das características e do tipo de cimento utilizado (MEUSEL; ROSE, 1983; TORRENT *et al.*, 1985; MALHOTRA, 1987; FERREIRA *et al.*, 2004; CASTRO, 2003).

A evolução da resistência à compressão axial com a idade do concreto, para cada material cimentício e cada classe de concreto é apresentada na Figura 5. 16, na Figura 5. 17, Figura 5. 18 e na Figura 5. 19.

O aumento da resistência à compressão axial entre 28 e 63 dias para o CP III-32-RS e o CP III-32-RS+ escória é maior do que para o CP II-E-32, o que pode levar a maiores resistências à compressão axial em idades avançadas para aqueles dois materiais cimentícios se comparados ao CP II-E-32.



**Figura 5. 16 - Evolução da resistência à compressão axial para os materiais cimentícios CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória, para a classe C20.**

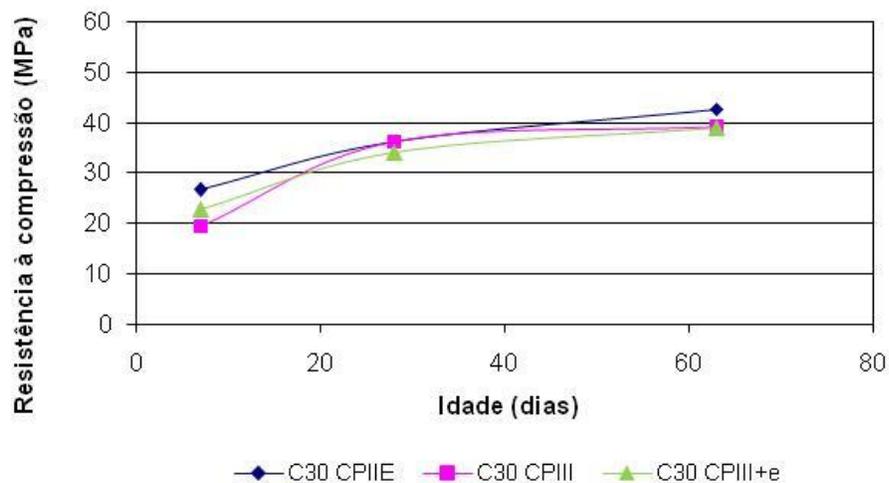
A resistência em longo prazo é melhorada com escória de alto-forno, em consequência da obtenção de uma microestrutura mais densa da pasta de cimento, resultado da maior formação de C-S-H na hidratação do cimento com adição de escória de alto-forno (REGOURD, 1980).

Segundo Malhotra (1987); Aïtcin (2000) e Bharatkumar *et al.* (2001), em geral, a evolução da resistência à compressão de concretos com escória de alto-forno, em comparação a um concreto de referência, é mais lenta nos cinco primeiros dias de idade. Entre 7 e 28 dias, a resistência se aproxima à do concreto de referência e, após esta idade, a resistência do concreto com escória de alto-forno é, geralmente, superior à do concreto de referência.

Uma maneira de acelerar a velocidade de hidratação e o ganho de resistência de misturas com escória de alto-forno seria o aumento da temperatura. Isso porque a solubilidade dos vidros de sílica cresce com o aumento de temperatura. Para elevados teores de escória (entre 40% e 80%) a cura térmica acelera, consideravelmente, a hidratação e o endurecimento desses cimentos, assegurando boas características mecânicas (CAMARINI, 1995; SILVA, 1998).

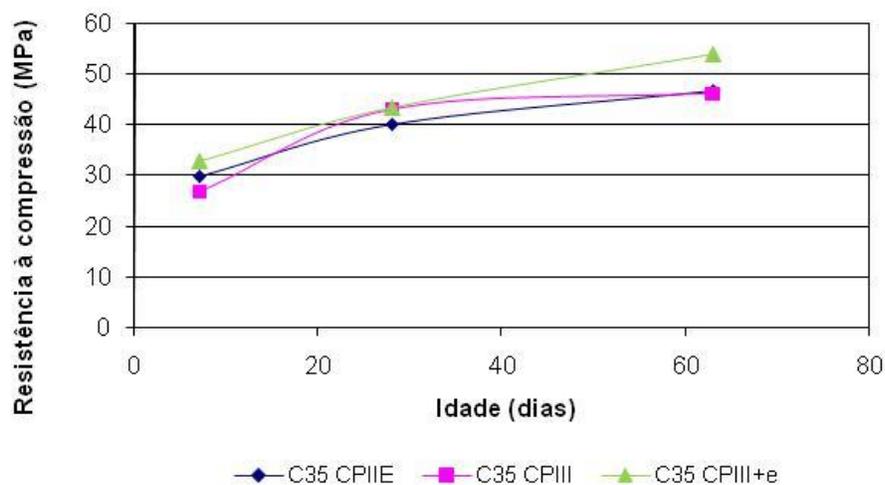
Swamy *et al.* (1994) encontraram, em concretos com 70% de escória de alto-forno, a mesma resistência à compressão encontrada em concretos com cimento Portland comum, para a idade de 91 dias. Lim e Wee (2000), por sua vez, encontraram, para concretos com 30%, 50%, 65% e 80% de escória de alto-forno (água/materiais cimentícios = 0,30,  $m_c \cong 500 \text{ kg/m}^3$ ), resistências à compressão maiores do que para concretos com cimento Portland comum, para a mesma idade.

Em ambas as classes C20 e C30 (Figura 5. 16 e Figura 5. 17) as resistências à compressão axial aos 63 dias são bem próximas para os três tipos de material cimentício.



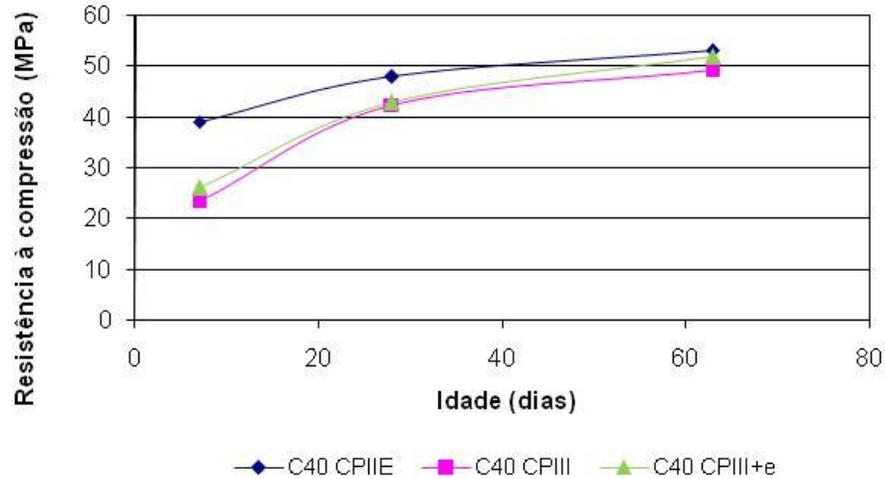
**Figura 5. 17 - Evolução da resistência à compressão axial para os materiais cimentícios CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória, para a classe C30.**

Para a classe C35 (Figura 5. 18), o CP III-32-RS+ escória apresenta maiores resistências à compressão axial em todas as idades ensaiadas, até mesmo aos 7 dias. Também pode ser observado na Figura 5. 18, o grande crescimento de resistência entre 28 e 63 dias. Crescimentos menos pronunciados foram observados nos outros dois materiais cimentícios. A resistência a longo prazo das misturas com maiores teores de escória é melhorada, em consequência da obtenção de uma microestrutura mais densa da pasta de cimento, resultado da maior formação de C-S-H na hidratação do cimento com adição de escória de alto-forno (REGOURD, 1980).



**Figura 5. 18 - Evolução da resistência à compressão axial para os materiais cimentícios CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória, para a classe C35.**

Quanto à classe C40, o concreto contendo CP II-E-32 apresentou resistência maior em todas as idades (Figura 5. 19). Aos 63 dias, não se observa diferenças significativas entre os três materiais cimentícios. No entanto, um crescimento de resistência muito mais pronunciado entre as idades de 7 e 28 dias foi observado nas misturas com CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória (com maiores teores de escória) conforme também observado em outras pesquisas (SMOLCZYK, 1980; MALHOTRA, 1987; AİTCIN, 2000; BHARATKUMAR *et al.*, 2001). Isso se deve ao fato de que a hidratação da escória de alto-forno é mais lenta comparativamente à do clínquer, pois depende da decomposição da fase vítrea pelos íons hidroxila liberados durante a hidratação do clínquer (BROOKS *et al.*, 1992).



**Figura 5. 19 - Evolução da resistência à compressão axial para os materiais cimentícios CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória, para a classe C40.**

Foi também analisada a evolução da resistência à compressão em função do material cimentício, para as diferentes classes de resistência dos concretos estudados nesta pesquisa. Dessa forma, na Figura 5. 20, na Figura 5. 21 e na Figura 5. 22 é apresentado o comportamento de cada classe de resistência quanto ao material cimentício e a idade de ensaio.

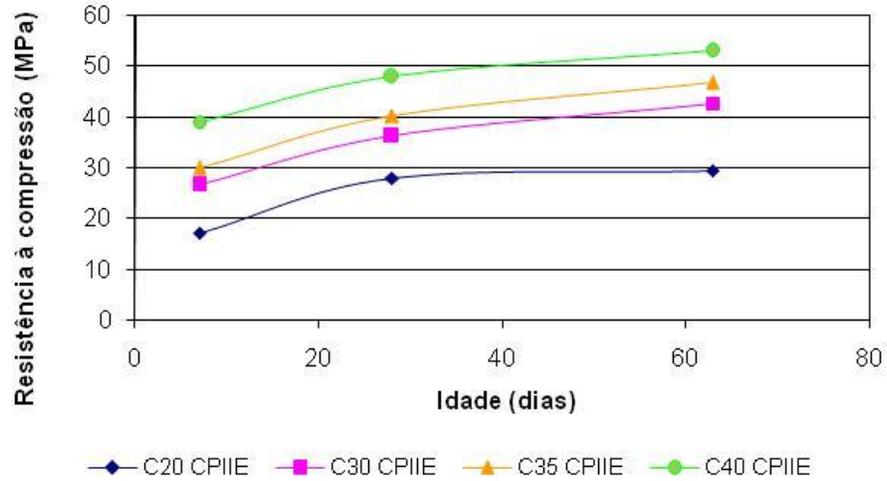


Figura 5. 20- Evolução da resistência à compressão axial para as classes C20, C30, C35 e C40, para o material cimentício CP II-E-32.

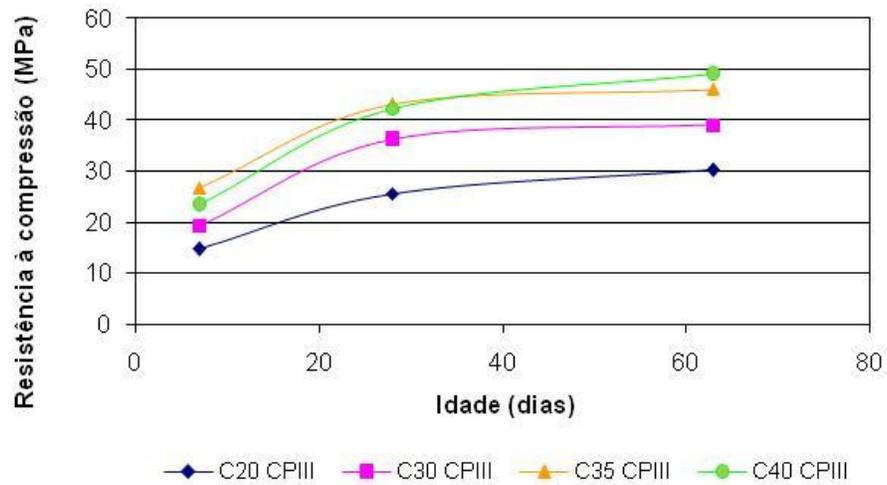
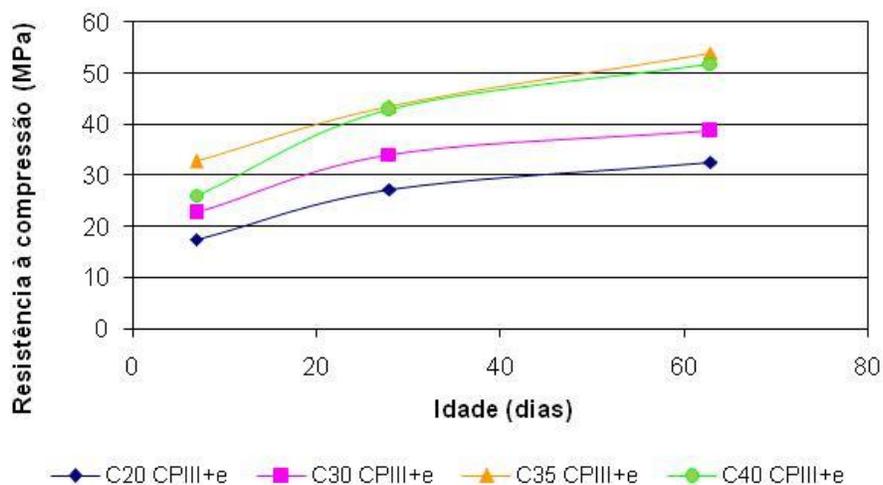


Figura 5. 21 - Evolução da resistência à compressão axial para as classes C20, C30, C35 e C40, para o material cimentício CP III-32-RS.



**Figura 5. 22 - Evolução da resistência à compressão axial para as classes C20, C30, C35 e C40, para o material cimentício CP III-32-RS+escória.**

Observam-se, para os concretos com o aglomerante CP II-E-32, menores crescimentos dos resultados de resistência à compressão axial entre as idades de 28 e 63 dias para o concreto de classe C20.

Nota-se nos gráficos que representam a evolução das quatro classes de resistência estudadas, para cada material cimentício utilizado, que os concretos com resistências maiores (C35 e C40) e produzidos com CP III-32-RS e com CP III-32-RS+ escória apresentam ganho de resistência maior entre 28 e 63 dias do que as misturas de classe C20 e C30.

Isso corrobora a expectativa de contribuição da escória de alto-forno na resistência à compressão menor nas primeiras idades e crescente para as idades mais avançadas, pelo desenvolvimento de uma microestrutura mais densa da pasta de cimento, em decorrência do aumento da hidratação da escória de alto-forno e do refinamento dos poros.

A influência da relação água/materiais cimentícios pode ser observada na Figura 5. 23, na Figura 5. 24 e na Figura 5. 25. Apesar dos concretos serem dosados para atingir uma mesma resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, ao compará-los para uma mesma relação água/materiais cimentícios, observou-se que os concretos contendo CP II-E-

32 apresentaram resistências à compressão axial maiores aos 7 dias, como esperado. Já aos 28 e 63 dias, esse quadro muda, sendo que as misturas contendo CP III-32-RS apresentaram maiores resistências à compressão axial, quando comparadas às outras misturas com a mesma relação água/materials cimentícios.

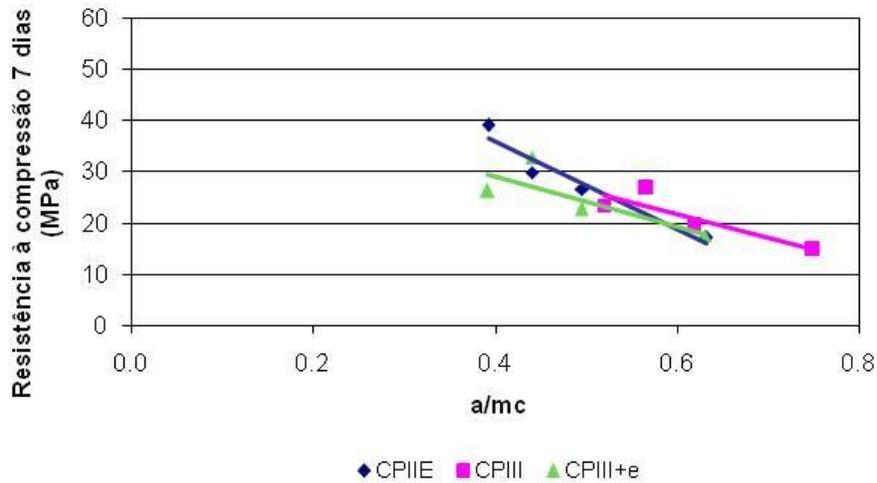


Figura 5. 23 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 7 dias de idade, para os três tipos de materiais cimentícios, em função da relação água/ material cimentício.

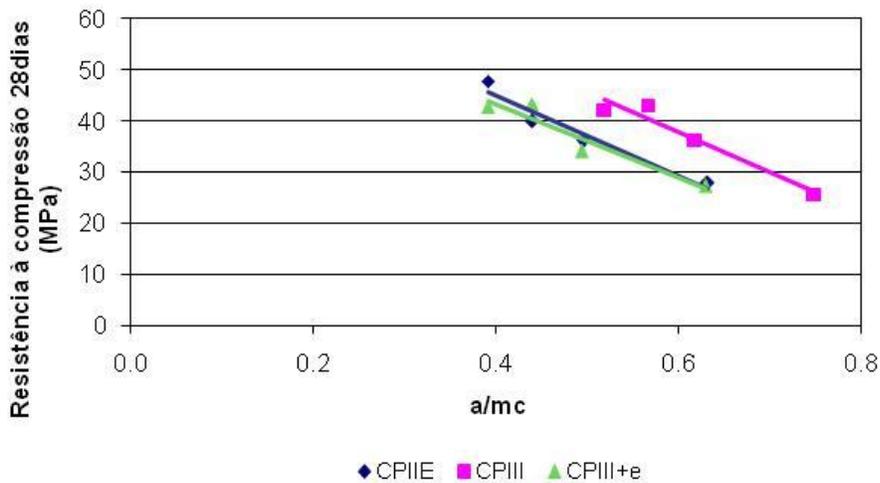
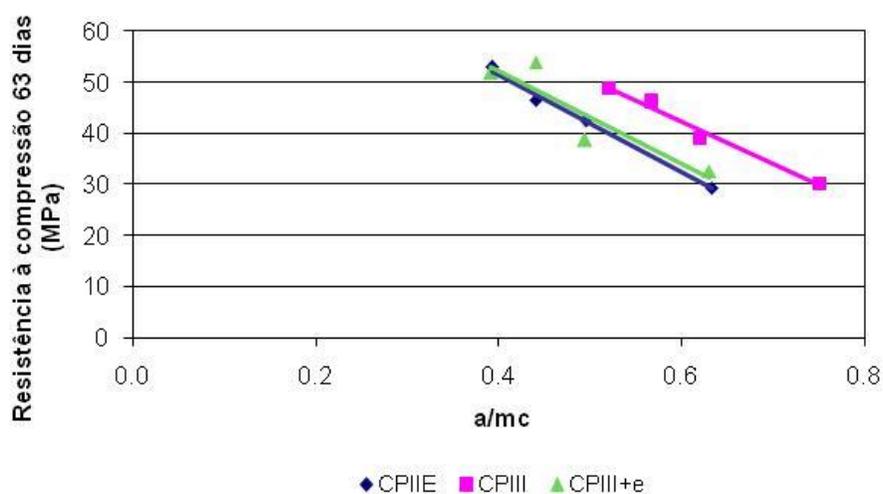


Figura 5. 24 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias de idade, para os três tipos de materiais cimentícios, em função da relação água/ material cimentício.



**Figura 5. 25 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 63 dias de idade, para os três tipos de materiais cimentícios, em função da relação água/ material cimentício.**

#### 5.4.2 Módulo de deformação

Os valores médios de módulo de deformação, para cada traço de concreto em estudo, e seus respectivos desvios padrão são apresentados na Tabela 5. 13.

Para verificar o comportamento das diferentes classes de concreto (C20, C30, C35 e C40), em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+e), foram realizados o teste estatístico de Análise de Variância (ANOVA) e o teste *a posteriori* de DUNCAN, com um nível significância de 5%, fixando a classe de resistência e a idade dos corpos-de-prova, conforme observado na Tabela 5. 14.

**Tabela 5. 13 – Resultado médio do módulo de deformação para os concretos em estudo.**

Traço	Concreto	a/ Mat. Cim.	Módulo de deformação (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
T1	C20CPII	0,63	27,7	0,91*
T2	C20CPIII	0,75	26,1	0,26
T3	C20CPIII+e	0,63	27,8	0,77
T4	C30CPII	0,49	30,0	1,01*
T5	C30CPIII	0,61	27,6	1,73*
T6	C30CPIII+e	0,49	28,9	0,25
T7	C35CPII	0,44	29,8	0,36
T8	C35CPIII	0,56	30,2	0,25
T9	C35CPIII+e	0,44	30,7	0,40
T10	C40CPII	0,39	30,4	0,82
T11	C40CPIII	0,52	30,6	1,38*
T12	C40CPIII+e	0,39	31,3	0,71

\* Ensaios com elevado desvio padrão.

**Tabela 5. 14 - Resultados de Anova e teste a posteriori de DUNCAN para a variável módulo de deformação aos 28 dias de idade, com fator de variação - material cimentício (n=3).**

Classe	F	p-valor	Diferenças estatísticas para o fator-material cimentício
C20	9,61	0,013	Crescem nesta ordem: C20CPIII, (C20CPIIE, C20CPIII+e)*
C30	4,84	0,056	Crescem nesta ordem: (C20CPIII, C30CPIII+e)*, (C30CPIII+e, C30CPIIE)*
C35	2,87	0,13	Não ocorrem
C40	1,197	0,365	Não ocorrem

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

O comportamento das diferentes classes de concreto (C20, C30, C35 e C40), em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória), é apresentado na Figura 5. 26.

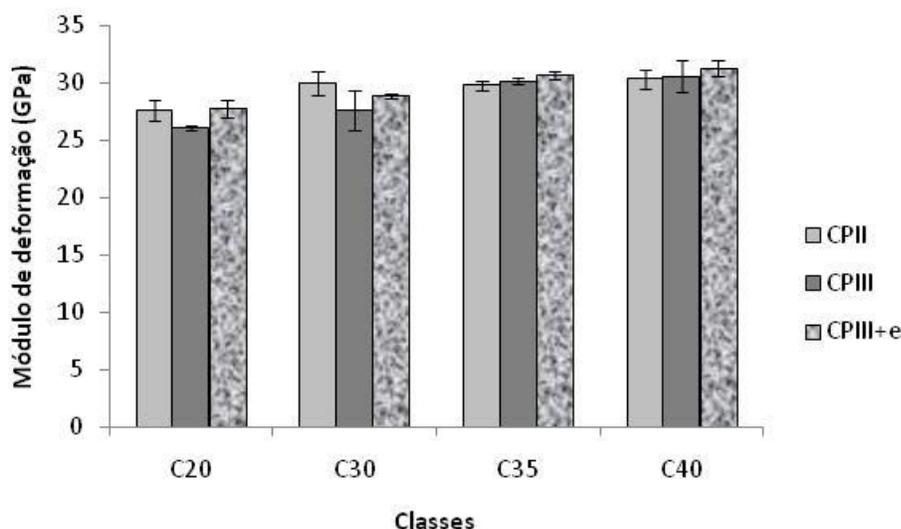
Na análise estatística dos resultados dos concretos, os concretos de classe de resistência C20 e C30 com CP II-E-32 e CP III-32-RS+ escória, não apresentaram módulo de deformação estatisticamente diferentes entre si, e seu módulo de deformação foi maior do que os concretos com CP III-32-RS.

De acordo com Sivasundaram e Malhotra (1992), o módulo de deformação aumenta com o aumento do teor de escória de alto-forno e com a diminuição da relação água/material cimentício, fato observado para os concretos de classe de resistência C20 e C30 desta pesquisa.

Já as classes C35 e C40 não apresentaram diferenças significativas nesta propriedade, observando-se que, nesses casos, o aumento do teor de escória de alto-forno não proporcionou melhoria no módulo de deformação, fato esse observado também por Bharatkumar *et al.* (2001).

Cabe salientar que os ensaios de módulo de deformação foram realizados na idade-padrão (28 dias) para tal ensaio. Porém, a influência do teor de escória pode ser mais significativa em idades mais avançadas, com o desenvolvimento de uma microestrutura mais

densa da pasta de cimento em decorrência do aumento da hidratação da escória de alto-forno e, portanto, pode não ter sido capturada por este ensaio.



**Figura 5. 26 – Módulo de deformação para os concretos das classes 20, 30, 35 e 40 para os três diferentes tipos de materiais cimentícios.**

A influência dos diversos fatores intervenientes, como teor de escória, relação água/materiais cimentícios e consumo de materiais cimentícios, deve ser analisada conjuntamente para um melhor entendimento do comportamento de cada mistura. Nesse sentido, o capítulo 8 apresenta um modelo o qual relaciona o módulo de deformação com o teor de escória de alto-forno, a resistência à compressão e o consumo de materiais cimentícios. Naquele caso, foi encontrada uma tendência muito clara, cuja correlação foi superior a 0,90.

Além das análises comparativas dos valores médios, foram calculados os valores de módulo de deformação para as misturas estudadas neste trabalho por meio da determinação estimada pela NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) (Equação 5. 1), pelo ACI 318-08 (ACI, 2008b) (Equação 5. 2), pelo CEB model FIP-90 (CEB, 1993) (Equação 5. 3) e pela CSA A 23.3-04 (CSA, 2004b) (Equação 5. 4). A Tabela 5. 15 e a Figura 5. 27 apresentam o módulo de deformação estimado por cada um desses modelos, assim como os obtidos

experimentalmente. A Equação 5. 5 é resultado da regressão dos valores experimentais, cujo coeficiente de correlação encontrado foi 0,79.

$$E_c = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 5. 1}$$

$$E_c = 4700\sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 5. 2}$$

$$E_c = 9500 \cdot \sqrt[3]{(f_c + 8)} \quad \text{Equação 5. 3}$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 5. 4}$$

$$E_c = 5169,5\sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 5. 5}$$

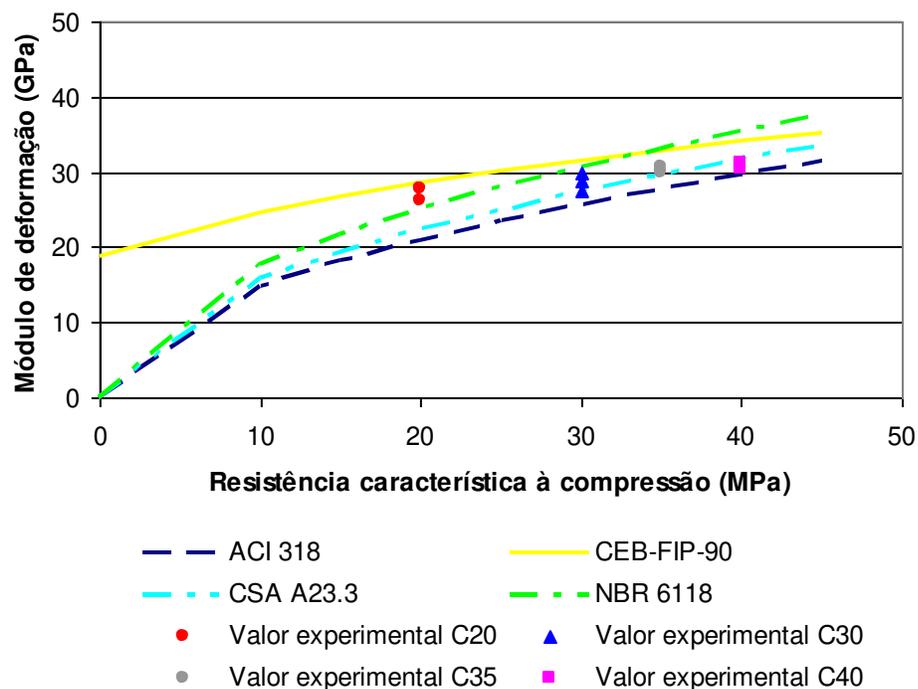
Sendo:

$E_c$  = módulo de deformação estático (MPa);

$f_{ck}$  = resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias (MPa).

**Tabela 5. 15 - Módulo de deformação estimado pela NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) , pelo ACI 318-08 (ACI, 2008b), pelo CEB model FIP-90 (CEB, 1993) (e pela CSA A 23.3 (CSA, 2004b).**

Concreto	Módulo de deformação estimado						
	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	NBR 6118/2003 $E_{ci}^*$ (GPa)	Valor adotado por norma $E_{cs}^{**}$ : $0.85E_{ci}$	Valor Experim. (GPa)	ACI 318-08 (GPa)	CEB-FIP-90 (GPa)	CSA A23.3-04 (GPa)
C20CPIIE	27.8	25.04	21.28	27.7	21.0	28.5	22.4
C20CPIII	25.6	25.04	21.28	26.1	21.0	28.5	22.4
C20CPIII+e	27.2	25.04	21.28	27.8	21.0	28.5	22.4
C30CPIIE	36.1	30.67	26.06	30	25.7	31.6	27.4
C30CPIII	36.2	30.67	26.06	27.6	25.7	31.6	27.4
C30CPIII+e	34	30.67	26.06	28.9	25.7	31.6	27.4
C35CPIIE	40	33.13	28.16	29.8	27.8	32.9	29.6
C35CPIII	43	33.13	28.16	30.2	27.8	32.9	29.6
C35CPIII+e	43.4	33.13	28.16	30.7	27.8	32.9	29.6
C40CPIIE	47.8	35.41	30.09	30.4	29.7	34.1	31.6
C40CPIII	42.2	35.41	30.09	30.6	29.7	34.1	31.6
C40CPIII+e	42.8	35.41	30.09	31.3	29.7	34.1	31.6



**Figura 5. 27 - Módulo de deformação estimado e medido experimentalmente.**

Os valores obtidos experimentalmente para os concretos de classe C20 aproximam-se mais dos valores estimados pelos modelos da NBR 6118/2003 (Equação 5. 1) e do CEB model FIP-90/1990 (Equação 5. 3). Já os valores obtidos experimentalmente para os concretos das classes C30 e C35 aproximam-se mais do modelo da CSA 23.3/2004 (Equação 5. 4) e para os concretos da classe C40 aproximam-se mais do modelo da CSA 23.3/2004 e do modelo do ACI 318/2008 (Equação 5. 2), que são muito similares. De modo geral, os valores experimentais foram mais altos que todos os calculados, exceto para o CEB FIP-90/1990, cujo modelo resultou nos maiores valores de módulo de deformação, enquanto o modelo do ACI 318 (2008) resultou nos valores mais baixos dentre os calculados.

Quanto à NBR 6118/2003, em particular, verifica-se que os valores de módulo de deformação dos concretos estudados estão atendendo aos estabelecidos pela norma, correspondentes ao valor adotado pelos projetistas Ecs (módulo de deformação secante), igual a  $0,85E_{ci}$ . Assim, as condições estabelecidas para desforma em execução de obra,

dentro dos prazos estabelecidos por norma, são atendidas com a utilização dos teores de escória de alto-forno e para as faixas de concreto estudadas nesta pesquisa.

## 5.5 Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foram analisadas a retração por secagem, a absorção por capilaridade, a resistência à compressão e o módulo de deformação. Com os resultados obtidos neste estudo verifica-se que a utilização de adição de escória de alto forno de modo geral exerce uma influência positiva nas propriedades físicas e mecânicas.

Observou-se que grande parte da retração ocorreu nos primeiros 84 dias. Apesar de observarem-se maiores valores de retração aos 365 dias para misturas com maiores teores de escória de alto-forno (com exceção dos concretos C20), verificou-se que os concretos estudados apresentaram retração por secagem inferior à especificada por autores tradicionais como Petrucci (1971) e Neville (1997).

O comportamento da altura de ascensão capilar e da absorção por capilaridade foram similares, sendo que se observou uma tendência da diminuição da altura de ascensão capilar para as misturas com maior teor de escória, à medida em que aumenta a resistência à compressão, confirmando a influência da adição de escória de alto-forno e da relação água/materiais cimentícios nessas propriedades.

Quanto à resistência à compressão, a adição de escória de alto-forno teve um efeito positivo, principalmente para idades mais avançadas. Já o módulo de deformação foi pouco afetado pela adição de escória de alto forno.

Vale destacar que os valores de módulo de deformação dos concretos com os teores de escória de alto-forno e para as faixas de concreto estudadas nesta pesquisa atendem às condições estabelecidas para desforma em execução de obra, dentro dos prazos estabelecidos. Esta conclusão é importante, pois ajuda a desmistificar uma das maiores dificuldades práticas recorrentemente apontadas para o uso desse material cimentício.

## **CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – Avaliação da capacidade de proteção do concreto contra a corrosão da armadura**

### **6.1 Introdução**

O aumento da durabilidade dos concretos produzidos com escória de alto-forno como adição mineral ao cimento e concreto é, indubitavelmente, uns dos fatores mais relevantes de sua utilização. Está relacionado diretamente à redução da porosidade do material e à sua capacidade de fixar os cloretos, o que o torna menos suscetível ao ingresso de agentes agressivos provenientes do meio.

Um bom exemplo do uso de concretos com adição de escória de alto-forno é o maior aquário do mundo situado em Atlanta, Geórgia, EUA. Ele foi executado em concreto de alto desempenho contendo escória de alto-forno (substituindo de 20 a 75% da massa de cimento) e cinza volante, com o intuito de diminuir a permeabilidade do concreto, minimizar o potencial do ataque de sulfatos pela exposição à água do mar e diminuir a probabilidade de corrosão decorrente do ingresso de cloretos.

Este capítulo analisa os resultados dos ensaios de durabilidade do concreto relativos à deterioração da armadura. Ele apresenta a discussão de resultados dos ensaios de carbonatação acelerada e natural e penetração de cloretos.

## 6.2 Carbonatação

O mecanismo de carbonatação do concreto é complexo e, normalmente, ocorre em presença de umidade, envolvendo uma série de reações químicas entre o dióxido de carbono atmosférico ( $\text{CO}_2$ ) e os produtos hidratados da pasta de cimento, formando carbonato de cálcio e água. É um mecanismo natural, que ocorre em ambientes com diferentes concentrações de  $\text{CO}_2$ .

A principal reação de carbonatação é com o hidróxido de cálcio e, em menor escala, com o silicato de cálcio hidratado pois, em pastas de cimento totalmente hidratadas, o volume das fases CH e C-S-H é de, aproximadamente, 70 a 75% do total das fases hidratadas (MATALA, 1997; WEE; SURYAVANSHI, LOGENDRAN, 1999).

A carbonatação se dá, progressivamente, da superfície para o interior do concreto, por meio da difusão do  $\text{CO}_2$  pelo sistema de poros da estrutura da pasta de cimento hidratada. Essa difusão é um mecanismo lento, gradual e relativamente uniforme que, à medida que penetra no concreto, separa-o em duas zonas com pH distintos. A linha que separa as duas zonas é denominada de *frente de carbonatação* (MEDEIROS; HELENE, 2001).

A carbonatação propriamente dita não é a causa direta da deterioração do concreto, mas tem efeitos determinantes sobre o seu envelhecimento e durabilidade. Entre esses efeitos, podem ser citados a retração por carbonatação e a despassivação da armadura, que irá concorrer decisivamente para a corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado.

Entretanto, a carbonatação também pode ter algumas conseqüências positivas, tais como a deposição do carbonato de cálcio nos poros, obturando-os e colmatando-os, ao

longo do tempo. Assim, a própria carbonatação resulta em barreira eficaz contra si mesma e a colmatção dos poros colabora para o aumento da dureza superficial do concreto, fato benéfico para concretos sujeitos a abrasão, além de, também, aumentar a proteção contra a ação de sulfatos (HELENE *et al.*, 1995; NEVILLE, 1997; MATALA, 1997; NGALA; PAGE, 1997). Concretos com escória de alto-forno são mais suscetíveis à carbonatação, pois a quantidade de hidróxido de cálcio livre é menor do que em concretos com cimento Portland comum. No entanto, concretos com escória de alto-forno têm baixa permeabilidade, o que pode diminuir a difusão do CO<sub>2</sub>, tornando a carbonatação mais lenta (BAUER; HELENE, 1993; GEISELER; KOLLO; LANG, 1995).

### 6.2.1 Carbonatação acelerada com 10% de CO<sub>2</sub>

A Tabela 6. 1 apresenta os valores médios obtidos para a profundidade de carbonatação, para cada traço de concreto em estudo, após submissão a ensaio de carbonatação acelerada (10% CO<sub>2</sub>). Nela também se pode observar o alto desvio padrão, principalmente das misturas de classes de resistência menores.

Nas misturas C30 CIII-32-RS, C35 CIII-32-RS e C40 CII-E-32, não se observaram diferenças estatisticamente significativas (nível de significância de 5%) entre as profundidades de carbonatação aos 77 e aos 91 dias. Isso pode ser uma indicação de que a carbonatação ocasionou o depósito de carbonato de cálcio nos poros, colmatando-os e impedindo a difusão gradual do CO<sub>2</sub> e o progresso da profundidade de carbonatação (HELENE *et al.*, 1995; NEVILLE, 1997; MATALA, 1997; NGALA; PAGE, 1997).

**Tabela 6. 1 - Resultados experimentais médios da profundidade de carbonatação acelerada (10% de CO<sub>2</sub>) para os concretos em estudo.**

Traço	Concreto	Resistência média à compressão 28d (MPa)	a/mc	Profundidade de carbonatação (mm)					
				63 dias*	DP**	77 dias***	D.P.	91 d.***	D.P.
T1	C20CPIIE	22,8	0,63	5,0	1,5	18,3	3,3	26.6	6.8
T2	C20CP III	27,0	0,75	5.5	1.0	22.8	2.5	34.0	4.8
T3	C20CPIII+e	24,7	0,63	6.4	1.1	24.9	2.4	33.8	4.7
T4	C30CPIIE	27,4	0,49	5.1	0.9	18.0	2.4	23.2	4.1
T5	C30CP III	29,0	0,61	6.3	1.0	17.3	2.5	16.4	1.6
T6	C30CPIII+e	27,0	0,49	6.2	1.4	23.8	2.5	26.9	3.1
T7	C35CPIIE	35,4	0,44	3.6	1.2	13.3	2.1	10.8	1.2
T8	C35CP III	34,8	0,56	4.8	1.2	12.9	1.5	13.3	1.8
T9	C35CPIII+e	34,1	0,44	5.3	1.4	14.6	1.3	16.9	2.0
T10	C40CPIIE	43,3	0,39	3.2	1.2	8.0	1.4	7.2	1.5
T11	C40CP III	40,4	0,52	4.9	0.9	7.7	1.2	10.3	0.9
T12	C40CPIII+e	34,2	0,39	4.3	1.5	11.7	1.9	15.6	2.2

\* idade inicial; \*\* desvio padrão; \*\*\* idades de 77 dias e 91 dias correspondem, respectivamente, a 2 e 4 semanas de exposição em ambiente acelerado.

Para verificar o comportamento das diferentes classes de concreto C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória), foi realizado o teste estatístico de Análise de Variância - ANOVA (nível de significância de 5%) fixando-se a classe de resistência e a idade dos corpos-de-prova, conforme se observa na Tabela 6. 2.

**Tabela 6. 2 - Resultados de Anova para a variável carbonatação acelerada com fator de variação - material cimentício.**

Classe de resistência	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas para o fator-material cimentício
C20	63	2,947	0,072	Não ocorrem
	77	13,421	0,000	Crescem nesta ordem: C20CPIIE, C20CPIII, C20CPIII+e
	91	5,151	0,014	Crescem nesta ordem: C20CPIIE, (C20CPIII, C20CPIII+e)*
C30	63	2,723	0,086	Não ocorrem
	77	18,976	0,000	Crescem nesta ordem: (C30CPIII, C30CPIIE)*, C30CPIII+e
	91	26,630	0,000	Crescem nesta ordem: C30CPIII, C30CPIIE, C30CPIII+e
C35	63	3,972	0,032	Crescem nesta ordem: C35CPIIE, (C35CPIII, C35CPIII+e)*
	77	2,585	0,096	Não ocorrem
	91	28,757	0,000	Crescem nesta ordem: C35CPIIE, C35CPIII, C35CPIII+e
C40	63	4,429	0,023	Crescem nesta ordem: C40CPIIE,, (C40CPIII+e, C40CPIII)*
	77	19,508	0,000	Crescem nesta ordem: (C40CPIII, C40CPIIE)*, C40CPIII+e
	91	64,388	0,000	Crescem nesta ordem: C40CPIIE, C40CPIII, C40CPIII+e

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

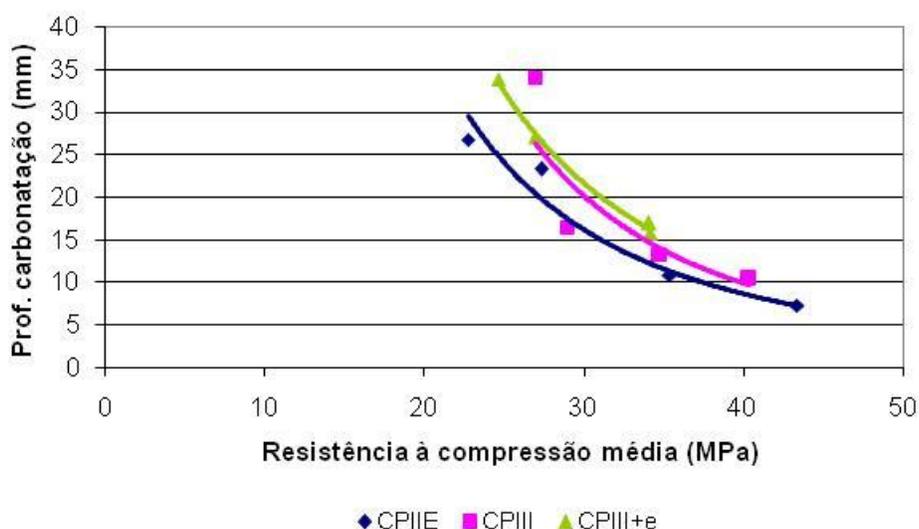
Segundo Helene *et al.* (1995), Wee *et al.* (1999) e Coelho (2002), a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento do teor de escória. Entretanto, alguns pesquisadores argumentam que esta profundidade de carbonatação não é suficiente para despassivar a armadura se o cobrimento for adequado e o concreto dosado com baixas relações água/materiais cimentícios (ISAIA; VAGHETTI; GASTALDINI, 2001; COELHO, 2002).

Nos resultados de Anova (Tabela 6. 2), esta tendência não fica muito clara, Observa-se que, na idade de 63 dias para os concretos de classe de resistência C20 e C30, as profundidades de carbonatação não apresentaram diferenças estatisticamente significativas (nível significância de 5%), para todas as misturas. Observa-se também que,

em todas as classes, a profundidade de carbonatação é maior nas misturas com CP III-32-RS+escória, ou seja, com maior teor de escória granulada de alto-forno presente no cimento ou concreto, o que se alinha às pesquisas de Helene *et al.* (1995); Wee *et al.* (1999) e Coelho (2002). No entanto, isso não significa necessariamente que estes concretos sejam mais susceptíveis à corrosão.

A Tabela 6. 1 e a Figura 6. 1 mostram que há uma tendência da profundidade de carbonatação diminuir com o aumento da resistência à compressão, corroborando os resultados obtidos em outras pesquisas (PARROT, 1992; NUNES, 1998; HOUST; WITTMANN, 2002). Isso porque a resistência à compressão é diretamente influenciada pela relação água/material cimentício. Concretos com menores relações água/cimento apresentam menor porosidade e menor conectividade entre os poros (MEHTA; MONTEIRO, 1994) e, conseqüentemente, menor profundidade de carbonatação (Figura 6. 2).

Na Figura 6. 2 também se observa que, para uma mesma relação água/material cimentício, os concretos com CP III-32-RS+escória apresentam maiores profundidades de carbonatação, enquanto os concretos com CP III-32-RS apresentam as menores profundidades de carbonatação.



**Figura 6. 1 – Profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias, em função da resistência à compressão aos 28 dias.**

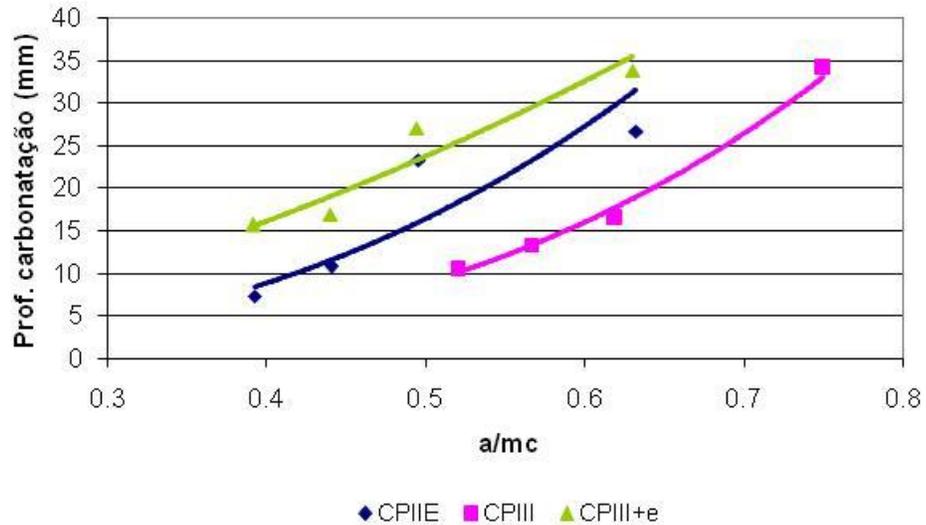


Figura 6. 2 – Profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias, em função da relação água/material cimentício.

Na Figura 6. 3 e Figura 6. 4 observam-se as diferenças na profundidade de carbonatação das diferentes misturas.

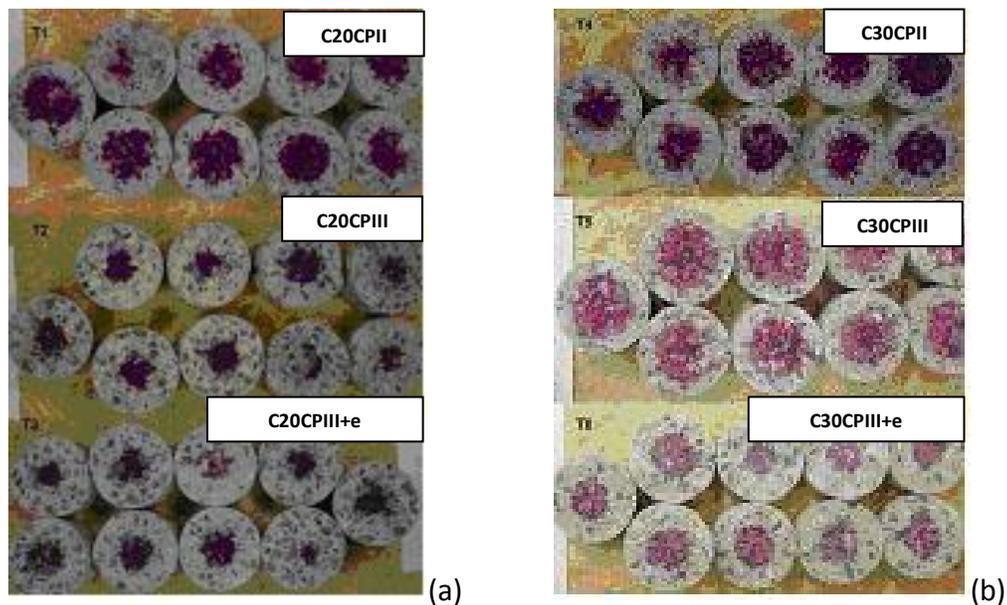
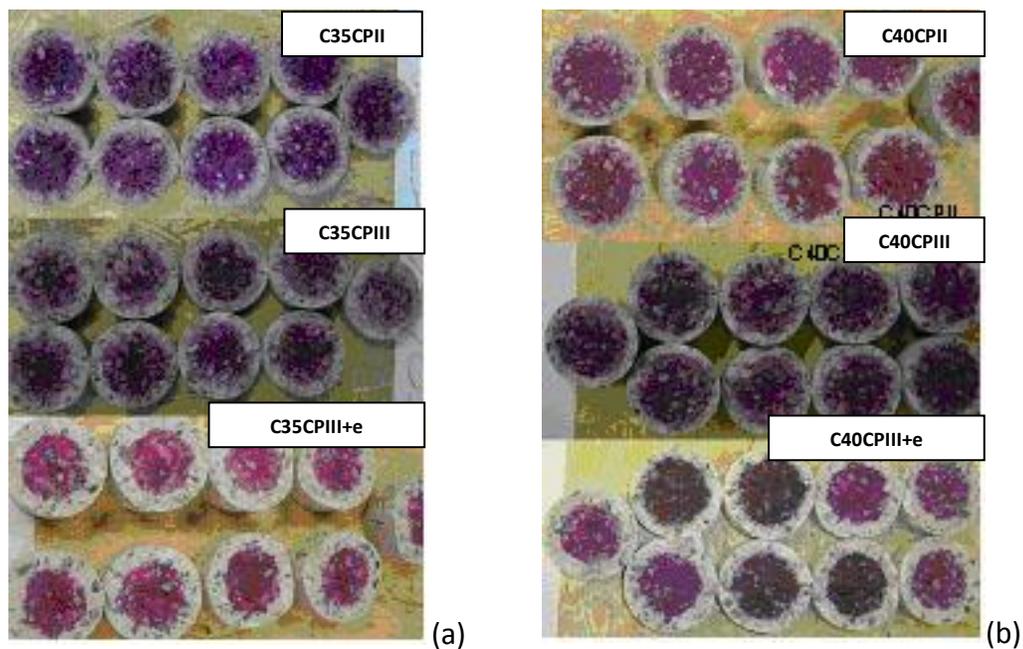


Figura 6. 3 – Carbonatação acelerada dos traços: (a) C20CPIIE, C20CPIII e C20CPIII+escória e (b) C30CPIIE, C30CPIII e C30CPIII+escória.



**Figura 6. 4 – Carbonatação acelerada dos traços: (a) C35CPIIE, C35CPIII e C35CPIII+escória e (b) C40CPIIE, C40CPIII e C40CPIII+escória.**

### 6.2.2 Carbonatação natural

Os valores obtidos por Bourguignon (2004) para a carbonatação natural para cada traço de concreto em estudo são apresentados na Tabela 6. 3.

**Tabela 6. 3 – Resultado da carbonatação natural (média e desvio padrão) para os concretos em estudo (BOURGUIGNON, 2004).**

Traço	Concreto	Resistência compressão média 28d (MPa)	a/mc	Profundidade carbonatação (mm)							
				63d*	DP*	77d	DP	91d	DP	365d	DP
T1	C20CPIIE	26,15	0,63	0,1	0	0,3	0,17	1,2	0,84	7,9	1,2
T2	C20CPIII	26,41	0,75	0,1	0,1	4,5	1,32	4,9	1,01	12,2	1,5
T3	C20CPIII+e	25,17	0,63	0,2	0,24	4,9	1,16	4,7	0,95	11,6	1,38
T4	C30CPIIE	39,68	0,49	0,03	0,06	0,4	0,58	1,6	0,99	6,5	0,95
T5	C30CPIII	36,85	0,61	0,1	0,09	3,7	1,63	4,3	0,84	10,1	1,82
T6	C30CPIII+e	38,09	0,49	0,4	0,42	4,2	1,65	4,3	1,31	9,2	1,45
T7	C35CPIIE	41,89	0,44	0,1	0,13	0,4	0,3	0,54	0,84	6,0	0,68
T8	C35CPIII	40,01	0,56	0,5	0,56	1,2	1,18	3,9	1,02	9,0	0,84
T9	C35CPIII+e	40,75	0,44	0,8	0,68	0,7	0,59	2,8	0,69	8,8	0,84
T10	C40CPIIE	44,74	0,39	0,1	0,1	0,3	0,7	1,16	0,75	4,8	1,37
T11	C40CPIII	43,47	0,52	0,4	0,37	0,6	0,49	2,5	0,85	8,4	1,08
T12	C40CPIII+e	43,17	0,39	0,6	0,82	1,3	0,84	2,0	0,9	7,8	1,54

\* Profundidade de carbonatação 63 dias (mm) - inicial em câmara seca a  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  e umidade  $(50\pm 2)\%$ ; \*\*D.P. – Desvio padrão; 63d, 77d, 91d e 365d = Idades de medição em ambiente de câmara seca.

Para verificar o comportamento das diferentes classes de concreto C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+ escória), foi realizado o teste estatístico de Análise de Variância - ANOVA (nível de significância de 5%) fixando a classe de resistência e a idade dos corpos-de-prova, como se vê na Tabela 6. 4.

**Tabela 6. 4 - Resultados de Anova para a carbonatação com fator de variação - material cimentício.**

Classe	Idade (dias)	F	p-valor	Diferenças estatísticas (fator-material cimentício)
Concreto C20	63	1,331	0,283	Não ocorrem
	77	56,249	0,000	Crescem nesta ordem: C20CPIIE,( C20CPIII, C20CPIII+e)*
	91	44,483	0,000	Crescem nesta ordem: C20CPIIE,( C20CPIII+e , C20CPIII)*
	365	26,174	0,000	Crescem nesta ordem: C20CPIIE,( C20CPIII+e , C20CPIII)*
Concreto C30	63	5,546	0,011	Crescem nesta ordem: (C30CPIIE, C30CPIII)*, C30CPIII+e
	77	20,139	0,000	Crescem nesta ordem: C30CPIIE, (C30CPIII, C30CPIII+e)*
	91	19,287	0,000	Crescem nesta ordem: C30CPIIE, (C30CPIII, C30CPIII+e)*
	365	15,001	0,000	Crescem nesta ordem: C30CPIIE, (C30CPIII+e, C30CPIII)*
Concreto C35	63	4,199	0,027	Crescem nesta ordem: C35CPIIE, (C35CPIII, C35CPIII+e)*
	77	2,409	0,111	Não ocorrem
	91	35,657	0,000	Crescem nesta ordem: C35CPIIE, C35CPIII+e, C35CPIII
	365	40,542	0,000	Crescem nesta ordem: C35CPIIE, (C35CPIII+e, C35CPIII)*
Concreto C40	63	2,087	0,146	Não ocorrem
	77	4,952	0,016	Crescem nesta ordem: (C40CPIIE, C40CPIII)*, C40CPIII+e
	91	5,910	0,008	Crescem nesta ordem: C40CPIIE, (C40CPIII+e, C40CPIII)*
	365	18,549	0,000	Crescem nesta ordem: C40CPIIE, (C40CPIII+e, C40CPIII)*

\* Os resultados que se encontram entre parênteses não apresentam diferenças estatisticamente significativas.

Nas classes C20, C30, C35 e C40, não se observaram diferenças estatisticamente significativas, com um nível significância de 5%, entre as misturas CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória em todas as idades, com exceção da classe C30 aos 63 dias, da classe C 35 aos 91 dias e da classe C40 aos 77 dias. De maneira geral, as misturas contendo CP II E-32 apresentaram menores profundidades de carbonatação.

O comportamento das diferentes classes de concreto C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória), para o ensaio de carbonatação natural a idade de 365 dias, e em função da

classe de resistência, é apresentado na Figura 6. 5, e, em função da relação água/materiais cimentícios, na Figura 6. 6.

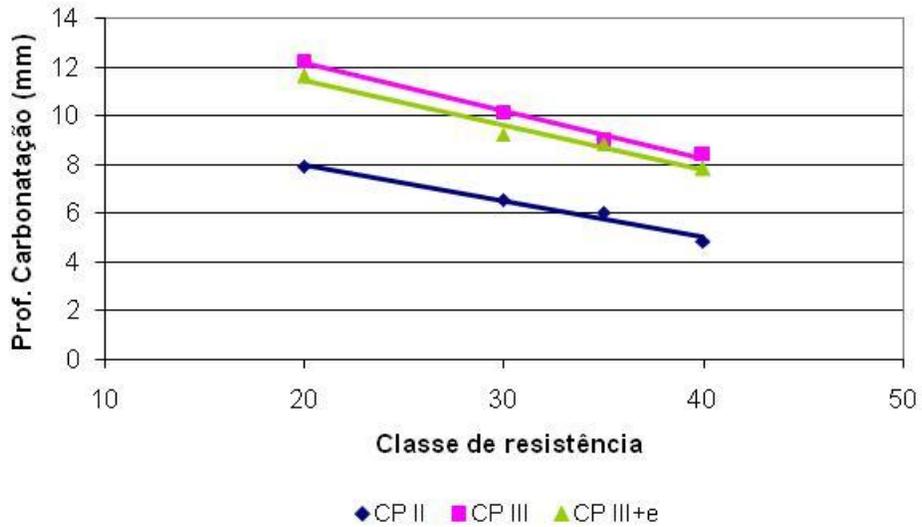


Figura 6. 5 – Profundidade de carbonatação natural aos 365 dias em função da classe de resistência.

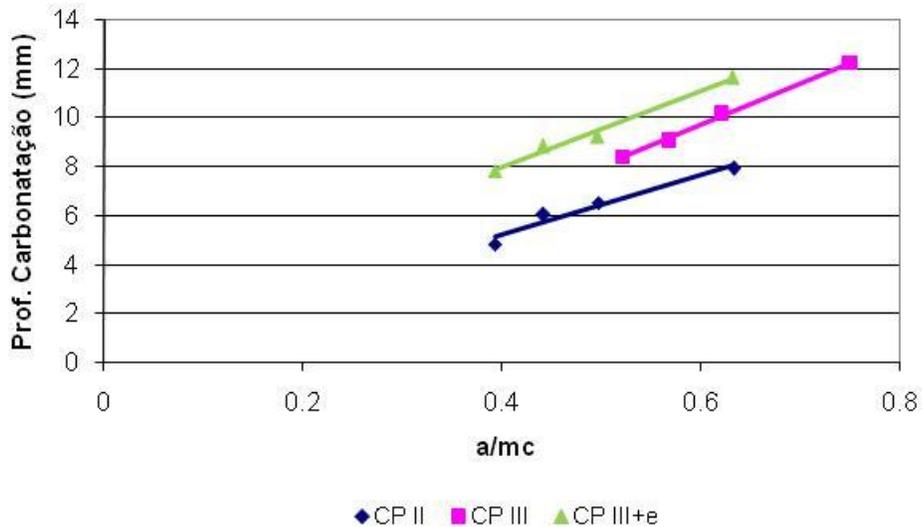


Figura 6. 6 – Profundidade de carbonatação natural aos 365 dias em função da relação água/materiais cimentícios.

Na Figura 6. 5 observa-se que a profundidade de carbonatação natural aos 365 dias diminui com o aumento da classe de resistência. Além disso, também se observa que há pouca diferença de comportamento entre os concretos contendo CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória, conforme já havia sido verificado na análise de variância. As linhas apresentadas na Figura 6. 5 representam regressões lineares, cujos coeficientes de correlação obtidos foram, em todos os casos, acima de 0,97.

Os resultados ilustrados na Figura 6. 6 mostram que a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento da relação água/materiais cimentícios, como esperado, uma vez que ela afeta diretamente a porosidade e a conectividade dentre os poros (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A Figura 6. 6 também mostra que para uma mesma relação água/material cimentício, os concretos com CP III-32-RS apresentam maiores profundidades de carbonatação que os concretos com CP II-E-32. Isso difere dos resultados de carbonatação acelerada, em que, para uma mesma relação água/material cimentício, os concretos com CP III-32-RS apresentaram as menores profundidades de carbonatação. A relação entre as profundidades de carbonatação natural e de carbonatação acelerada variou de 1,2 a 3,6, sem apresentar uma tendência clara, dificultando a sua utilização para a avaliação das misturas neste estudo.

Sanjuán *et al.* (2003) observaram que ensaios de carbonatação acelerada (5% de CO<sub>2</sub>) nem sempre são ferramentas eficazes para a avaliação de concretos contendo adições minerais, pois a maior concentração de CO<sub>2</sub> pode alterar o gel C-S-H e modificar a microestrutura do material, dependendo do tipo e quantidade de adição mineral. A alteração do gel não só pode se dar de maneira diferente, dependendo da adição presente, mas também pode se dar em graus diferentes, dependendo do teor de adição na mistura.

Justamente por esse motivo, não existe um consenso de qual seria o teor ideal para os ensaios acelerados de carbonatação, conforme apresentado no Quadro 6. 1.

**Quadro 6. 1 – Concentração de CO<sub>2</sub> em câmara de carbonatação de algumas pesquisas.**

Autor	Teor CO <sub>2</sub> (% volume)
SANJUÁN; ANDRADE; CHEYREZY (2003)	Natural (0,03%, 5% e 100%)
CADORE; ISAIA; GASTALDINI; THRUN (2005)	5
SILVA; LIBÓRIO (2005)	80
POSSAN; DAL MOLIN; ANDRADE (2005)	5
MEIRA; PADARATZ; BORBA; ALONSO; ANDRADE (2005)	Ambiental (amb. marinho)
BARBOSA, BORDELLS; CAMARINI (2005)	Ambiental
COSTA; SILVA; PINHEIRO; SOUZA; ZANDONADE; COELHO; MORIMOTO (2005)	10
BOURGUIGNON; SILVA; PINHEIRO; SOUZA; ZANDONADE, (2005)	Ambiental e (95±5)
CAVALCANTI; BORGES; MONTEIRO; HELENE (2005)	Ambiental
PAULETTI; DAL MOLIN; KAZMIERCZAC; BREZEZINSKI (2005)	6 e saturada

**6.3 Carga passante**

Os valores médios obtidos para a carga passante (ASTM C 1202/2005) para cada traço de concreto em estudo são apresentados na Tabela 6. 5.

A Tabela 6. 5 mostra que a carga passante diminuiu sensivelmente dos 28 para os 63 dias, conforme esperado. Isso porque a densificação da matriz com a idade torna-se um obstáculo para os cloretos, diminuindo, assim, a sua penetração, traduzida pela diminuição da carga passante. Esta diminuição com a idade pode ser ainda mais pronunciada em concretos contendo adições minerais como a escória de alto-forno, pois as reações de hidratação são mais lentas (JOHN *et al.*, 1994).

A carga passante tem sido usada em várias especificações como requisito de desempenho e o ensaio ASTM C 1202/2005, como ensaio de controle de qualidade. No caso

de especificações por desempenho, os resultados aos 28 dias não refletem a real contribuição das escórias de alto-forno na diminuição da penetração de cloretos, sendo mais apropriado o uso dos resultados aos 63 dias.

**Tabela 6. 5 – Resultado médio da carga passante para os concretos em estudo.**

Traço	Concreto	Resistência à compressão média 28 d.(MPa)	a/mc	Carga passante (C) 28 d.	DP	Carga passante (C) 63 d.	DP
T1	C20CPIIE	22,81	0,63	3580	411	2328	399
T2	C20CPIII	27,02	0,75	2666	321	2051	414
T3	C20CPIII+e	24,66	0,63	1275	221	850	89
T4	C30CPIIE	27,42	0,49	2624	247	1359	254
T5	C30CPIII	28,98	0,61	3837	310	1352	173
T6	C30CPIII+e	27,00	0,49	1860	177	522	109
T7	C35CPIIE	35,38	0,44	3874	293	2983	376
T8	C35CPIII	34,79	0,56	2783	250	2185	87
T9	C35CPIII+e	34,07	0,44	1421	67	1201	106
T10	C40CPIIE	43,35	0,39	2877	262	2446	169
T11	C40CPIII	40,4	0,52	2751	99	1818	168
T12	C40CPIII+e	34,18	0,39	1134	43	829	317

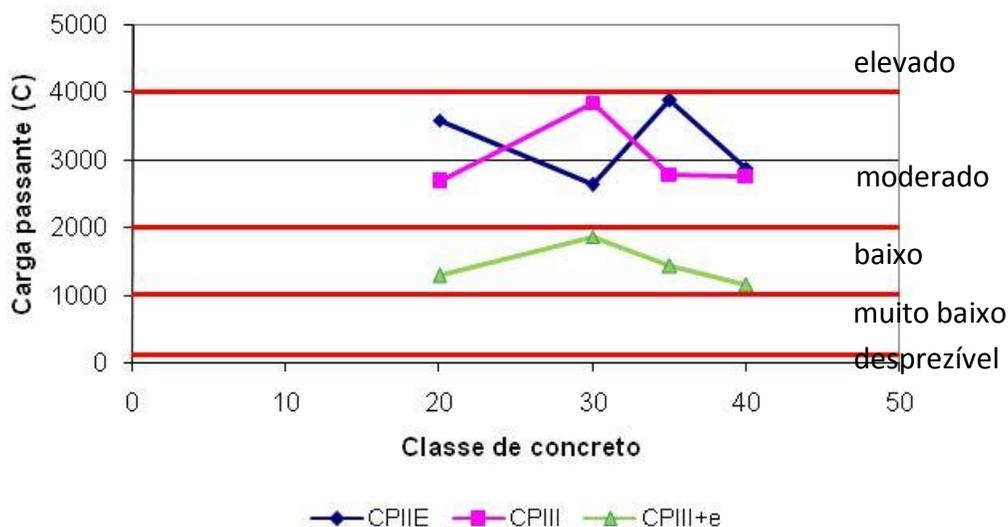
\*DP = Desvio Padrão

Por essa razão, Ozyildirim (1998) propôs um método alternativo de cura acelerada de concretos que contenham adições minerais. O subcomitê C9.66 (*Concrete's resistance to fluid penetration*) da ASTM está considerando a inclusão deste método de cura na ASTM C 1202. Este regime consiste na cura do concreto por sete dias a 23°C, seguido por 21 dias de cura a 38°C. Segundo Ozyildirim (1998), este regime de cura produz concretos com carga passante equivalente a concretos curados a 23°C por 180 dias. Este regime de cura tem sido amplamente utilizado nos EUA, nos últimos anos.

A Tabela 6. 5 também mostra a alta variabilidade do ensaio, principalmente para os concretos de classe de resistência menor. Isso pode ser uma característica intrínseca ao

próprio ensaio, como também pode ser decorrente do aquecimento das células durante o experimento, relativamente longo (6 horas). Misturas com uma microestrutura menos densa são mais propensas ao super-aquecimento, que promove um aumento da carga passante (HOOTON *et al.*, 2001).

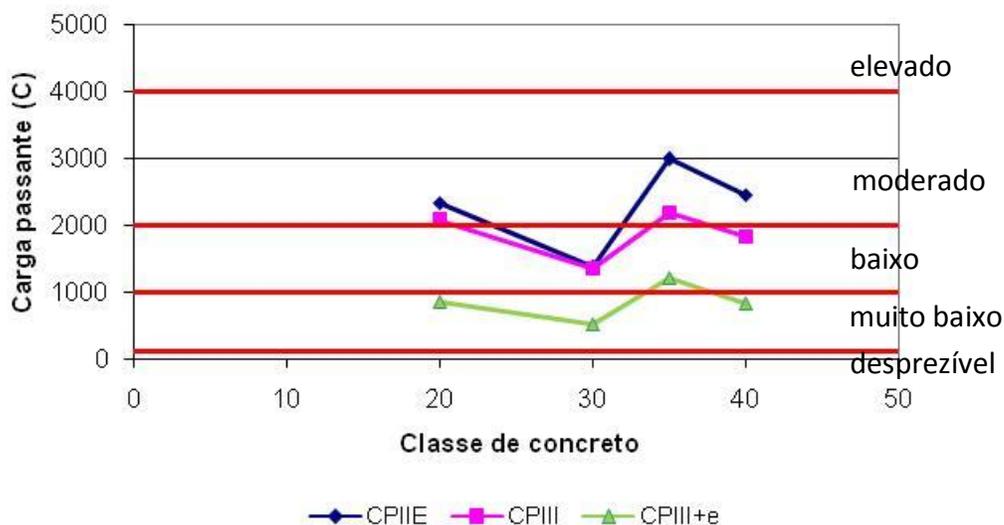
Com os resultados, foram obtidas tendências de carga passante aos 28 (Figura 6. 7) e 63 dias (Figura 6. 8), em função da classe de resistência estimada para os concretos, calculada considerando-se o desvio padrão real obtido para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias de cada um dos concretos. A Figura 6. 7 e Figura 6. 8 também mostram faixas de risco de penetração de cloretos, conforme a classificação apresentada pela ASTM C 1202/2005.



**Figura 6. 7 – Carga passante aos 28 dias de idade, para as classes de concretos estudadas, para os três tipos de materiais cimentícios.**

Com base na classificação da ASTM C 1202/2005 e nos resultados aos 63 dias, para todas as classes de resistência, os concretos utilizando material cimentício CP III-32-RS + escória apresentaram um risco de penetração de cloretos de “muito baixo” a “baixo”, caracterizando-se como mais resistentes à penetração de cloretos. Já os demais concretos apresentaram um moderado risco de penetração de cloretos, variando os valores médios em

função da classe de resistência, do tipo de material cimentício e da relação água/materiais cimentícios.



**Figura 6. 8 – Carga passante aos 63 dias de idade, para as classes de concretos estudadas, para os três tipos de materiais cimentícios.**

Na Figura 6. 8 observa-se que a influência da classe de resistência é bem menor do que a influência do teor de escória de alto-forno.

Vale destacar que o intervalo de carga passante que a norma ASTM C 1202/2005 estipula é grande, podendo colocar concretos de classe de resistência C20 e C30 no mesmo nível de risco de penetração de cloretos. Recomenda-se, então, a utilização de outros ensaios que forneçam o coeficiente de difusão de cloreto ASTM 1556-06 ou o teor de cloretos livres, em cada um desses concretos, como por exemplo, os métodos quantitativos teor de cloretos totais (ASTM C 1152/2008), extração da solução dos poros do concreto, titulação, potenciometria, entre outros (JUCÁ, 2002).

De maneira geral, os concretos contendo CP III-32-RS + escória apresentaram carga passante significativamente mais baixa do que os demais concretos. Os concretos com CP III-32-RS apresentaram carga passante relativamente similar ou mais baixa do que

os concretos com CP II-E-32. Isso indica que a escória de alto-forno promove a diminuição da penetração de cloretos e confirma os resultados obtidos em outras pesquisas (SIVASUNDARAM; MALHOTRA, 1992; GASTALDINI; ISAIA, 2000; BASHEER *et al.*, 2002).

A principal justificativa está no fato da adição de escória de alto-forno promover o refinamento dos poros e dificultar a intercomunicação entre os poros (PICCOLI *et al.*, 1999; ISAIA, 1999; BHARATKUMAR *et al.*, 2001). Além de modificar a composição do C-S-H, aumentando a sua capacidade de fixação de cloretos, reduzindo o teor de cloreto livre no material (GASTALDINI; ISAIA, 2000). As misturas com escória de alto-forno possuem também maior resistividade elétrica,

Na hidratação das pastas de cimento Portland com adição de escória de alto-forno ocorre uma deposição dos produtos hidratados nos poros e canais existentes na pasta, contribuindo para a densificação da matriz. Acontece, então, a formação de uma estrutura de poros descontínua e com uma média de tamanho de poros menor do que a de pastas com cimento Portland (raio 300 Å). A porosidade total é pouco modificada e a baixa permeabilidade é conseqüência da redistribuição dos poros. Esse refinamento de poros torna o concreto menos permeável, aumentando sua durabilidade e melhorando seu desempenho com relação ao ingresso de agentes agressivos (SMOLCZYK, 1980; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

#### **6.4 Considerações sobre o capítulo**

A capacidade de proteção do concreto contra a corrosão da armadura foi avaliada neste capítulo: profundidade de carbonatação e carga passante.

No que diz respeito às profundidades de carbonatação, em ambientes naturais e acelerados, observou-se que os valores crescem com o tempo de exposição a esses ambientes, e com o aumento da relação a/mc, e diminuem com o aumento da classe de resistência do concreto, em concordância com a literatura.

Com relação ao teor de escória dos concretos, de maneira geral não se observou diferença estatisticamente significativa (nível significância de 5%) da profundidade de carbonatação natural entre os concretos com teores de escória de alto-forno de 83% (CP III-32-RS+escória) e os concretos com teor de escória de alto-forno de 66% (CP III-32-RS) quando estas misturas foram comparadas em função de uma mesma classe de resistência. Os concretos com CP II-E-32 apresentaram profundidade de carbonatação menor.

No ensaio de penetração de cloretos, os concretos com teor de 83% de escória de alto-forno em massa do material cimentício proporcionaram uma maior resistência à penetração desses íons aos 63 dias de idade. Com base no ensaio estabelecido na norma ASTM C 1202/2005, a maioria dos concretos produzidos com esse material cimentício, aos 63 dias de idade, foi caracterizada como de baixo risco de penetração de cloretos, enquanto os concretos produzidos com o cimento CP II-E-32 e com o cimento CP III-32-RS foram classificados como de risco moderado a alto.

## **CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS – Ensaio cíclicos e de corrosão**

### **7.1 Introdução**

Este capítulo avalia os resultados de propriedades analisadas em ensaios cíclicos e de corrosão da armadura. Conforme apresentado no capítulo 5, as resistências à compressão variaram em cada etapa da pesquisa, apesar da dosagem e dos materiais utilizados serem os mesmos. Portanto, nessa etapa, adotou-se a classe de resistência estimada obtida para os concretos, calculando-se o desvio padrão real e, a partir daí, a classe de resistência, com base na equação estabelecida na NBR 12 655/1992. Assim, todos os resultados referentes ao estudo dessa etapa foram analisados a partir das curvas de tendência traçadas em função da classe de resistência real calculada para cada concreto.

Conforme descrito no Capítulo 4, os ensaios naturais compreenderam medidas iniciais dos concretos submetidos à cura úmida por 28 dias e exposição ao ar até os 365 dias de idade, antes da exposição aos ciclos de envelhecimento acelerado (câmara de névoa salina, estufa e carbonatação acelerada com 10% de CO<sub>2</sub>).

## 7.2 Profundidade de penetração de cloretos

Quando os cloretos penetram no concreto, quer seja por absorção e/ou difusão iônica, parte deles são fixados formando cloroaluminatos, outra parte permanece adsorvida junto às paredes dos poros e uma terceira parte permanece livre (BAUER; HELENE, 1993). Esses cloretos livres são os que, efetivamente, participam do mecanismo de despassivação das armaduras no concreto (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997).

Os cloretos têm participação importante, tanto no período inicial como no período de propagação da corrosão. No período de iniciação, os cloretos agem diretamente na despassivação da armadura, por meio de acidificações locais que levam a desestabilizações puntiformes da película passivante. A seguir, participam ativamente do mecanismo de corrosão, aumentando substancialmente a condutividade elétrica do eletrólito, além de participar das reações para formação dos produtos de corrosão (CASCUDO, 1997).

O efeito individual do ingresso de cloretos e da carbonatação no desempenho do concreto com escória de alto-forno foi vastamente estudado por vários pesquisadores (SMOLCZYK, 1980; BAUER; HELENE, 1993; OSBORNE, 1999; LUO *et al.*, 2002). No entanto, o efeito combinado desses dois mecanismos de deterioração, que potencialmente podem acelerar a corrosão da armadura, ainda não foi profundamente investigado (SAEKI, 2002). Os itens 7.2 e 7.3 apresentam o estudo do efeito combinado da penetração de cloretos e da carbonatação, por meio de ensaios na condição natural seguidos por ensaios acelerados cíclicos.

### 7.2.1 Ensaio na condição natural

Na Tabela 7. 1 apresentam-se os resultados da profundidade de penetração natural de cloretos dos concretos submetidos ao procedimento descrito no Capítulo 4: cura úmida por 28 dias com subsequente exposição a ambiente de laboratório até 365 dias de idade, quando foram, então, submetidos ao regime de ciclos de envelhecimento acelerado (câmara de névoa salina, secagem em estufa e carbonatação acelerada com 10% de CO<sub>2</sub>).

Adotou-se o método de análise de penetração de cloretos pelo método da aspersão de nitrato de prata de Jucá (2002). Este método é sensível na avaliação de cloretos livres nas primeiras idades, pois, uma vez que o concreto carbonata, há uma interferência da ação do CO<sub>2</sub>. De acordo com Jucá (2002), após 365 dias de idade, observa-se, no concreto carbonatado, a presença de sais de cloretos e também de precipitados brancos de carbonatos o que torna a análise mais complexa.

**Tabela 7. 1 – Profundidade (média e desvio padrão) de penetração natural de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) (média e desvio padrão) para os concretos em estudo na etapa de avaliação da corrosão das armaduras.**

Traço	Concreto	Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)	a/ mc	Prof. Penetração (mm)	
				365dias*	DP**
T1	C20CPIIE	23,10	0,63	5,60	2,10
T2	C20CPIII	28,4	0,75	5,55	1,89
T3	C20CPIII+e	29,31	0,63	5,48	1,06
T4	C30CPIIE	36,97	0,49	1,43	0,75
T5	C30CPIII	37,44	0,61	2,33	0,83
T6	C30CPIII+e	38,52	0,49	3,01	1,09
T10	C40CPIIE	48,75	0,39	0,40	0,47
T11	C40CPIII	51,78	0,52	0,44	0,27
T12	C40CPIII+e	53,66	0,39	0,91	0,39

\*média; \* DP = desvio padrão.

A Figura 7. 1 apresenta as profundidades de penetração de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos), em função da classe de resistência do concreto, enquanto a Figura 7. 2 apresenta essas mesmas profundidades em função da relação água-material cimentício.

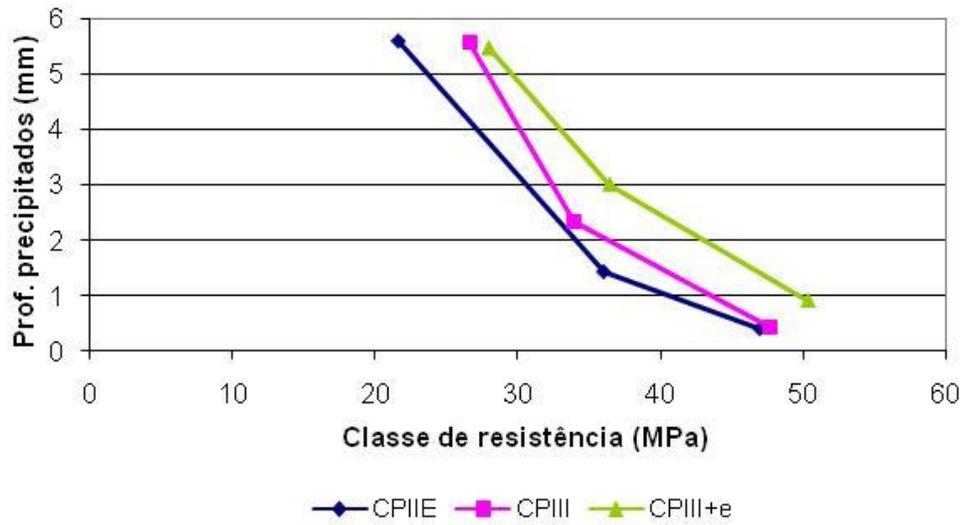


Figura 7. 1 – Profundidade de penetração natural de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) aos 365 dias em função da classe real da resistência do concreto.

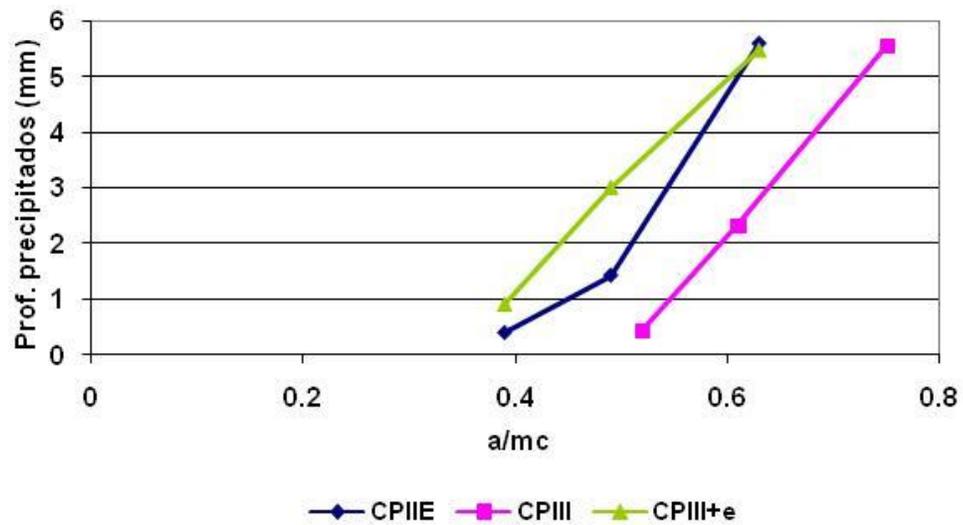


Figura 7. 2 – Profundidade de penetração natural de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) aos 365 dias em função da relação água/material cimentício.

Na Figura 7. 1 observa-se que a mistura de classe C30 e contendo CP III-32-RS + escória apresentou maior profundidade de precipitados brancos quando comparada com a mistura de mesma classe contendo CP II-E-32.

A mistura de classe C40 e contendo CP III-32-RS + escória também apresentou maior profundidade se comparada à mistura de mesma classe e contendo CP III-32-RS, apesar da mistura com CP III-32-RS apresentar maior relação água/materiais cimentícios. No entanto, todas as demais misturas, quando comparadas por classe, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, com um nível significância de 5%.

Quando se analisaram as profundidades de precipitados brancos em função da relação água/material cimentício, observou-se que nos casos extremos, ou seja, para as relações água-material cimentício baixas ou altas, as profundidades de precipitados das misturas produzidas com CP II-E-32 e CP III-32-RS + escória se aproximaram.

No ensaio de penetração de cloretos pela aspersão de nitrato de prata são também observados carbonatos, de acordo com Jucá (2002). Há um consenso de que o maior teor de escória de alto-forno, em princípio, proporciona maior profundidade de carbonatação, o que pode dificultar a diferenciação entre a penetração de cloretos e a penetração dos carbonatos e, conseqüentemente, a correlação entre a profundidade de penetração de cloretos com o teor de escória de alto-forno.

### **7.2.2 Ensaio na condição acelerada**

Como o ingresso progressivo de cloretos em estruturas de concreto ocorre sob ciclos de molhagem e secagem, esta pesquisa tentou representar este fenômeno por meio de ciclos de molhagem e secagem, anteriormente descritos no capítulo 4. No entanto, cabe salientar que o transporte de cloretos é altamente influenciado pela exata seqüência do ciclo de molhagem e secagem, velocidade do vento, exposição ao sol e configuração da peça. Isso dificulta a modelagem do comportamento real de uma estrutura por meio de ensaios de laboratório, mas pode dar uma boa indicação do comportamento esperado da estrutura.

Além disso, objetivou-se analisar o efeito sinérgico de penetração de cloretos e carbonatação em concretos com escória de alto-forno, pois Saeki (2002) mostrou que nesse

tipo de concreto o efeito combinado desses dois mecanismos pode exacerbar a deterioração do concreto (Figura 7. 3) e diretamente influenciar o desempenho da mistura.

### **7.2.3 Efeito sinérgico da penetração de cloretos e da carbonatação**

Kobayashi (1991) descreve o mecanismo de deterioração decorrente do efeito combinado da penetração de cloretos e da carbonatação da seguinte maneira:

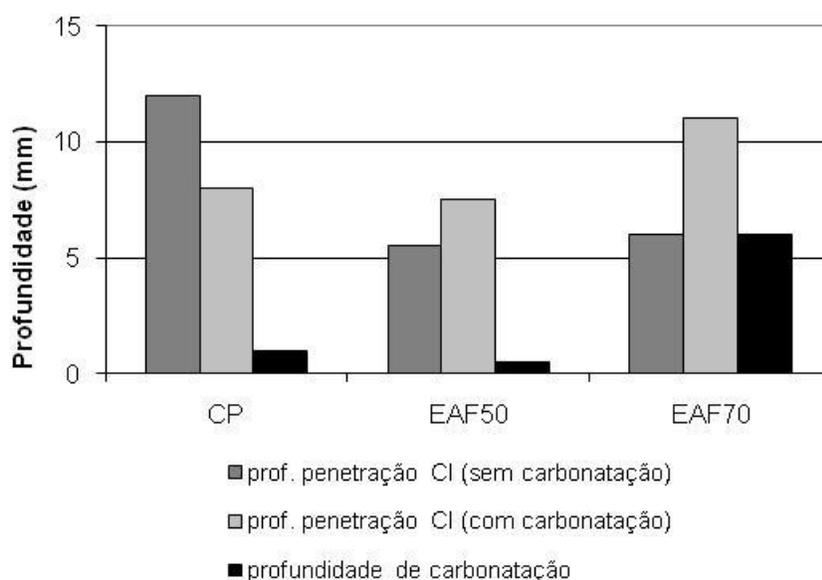
- Formação do sal de Friedel devido à reação do monossulfato (AFm) com os cloretos;
- Carbonatação do sal de Friedel e do AFm. Quando a carbonatação do AFm ocorre, os cloretos que haviam sido fixados no sal de Friedel se tornam livres;
- Dissolução dos cloretos na solução dos poros que tenham sido imobilizados no sal de Friedel e
- Aumento da concentração de cloretos na solução dos poros, resultando no aumento da profundidade de penetração dos cloretos, devido ao efeito cíclico de carbonatação-difusão de cloretos.

Sabe-se que a carbonatação modifica a microestrutura do concreto. Sabe-se, também, que a difusão de cloretos depende da microestrutura. Dessa forma, a carbonatação pode influenciar diretamente a difusão de cloretos no concreto.

Ensaios cíclicos também foram utilizados por Saeki (2002) para a avaliação do efeito conjunto do ataque de cloretos e da carbonatação, porém em corpo-de-prova de argamassa. Os ciclos de Saeki (2002) diferiram dos utilizados na presente pesquisa e consistiram em submersão dos corpos-de-prova em 3.5% de solução de NaCl por 2 dias, seguidos por câmara de carbonatação a 5% (20°C e 60% de umidade relativa) por 6 dias.

Em paralelo, foram executados ensaios cíclicos das mesmas misturas onde a carbonatação foi substituída pela exposição ao ar à mesma temperatura e umidade relativa da câmara de carbonatação. Concluiu-se que a carbonatação controla o ingresso de cloretos e que há uma tendência de concentração de cloretos devido à carbonatação dos produtos de hidratação (SAEKI, 2002).

Além disso, as argamassas contendo 50% e 70% de escória de alto-forno apresentaram menor penetração de cloretos quando foram submetidas aos ciclos sem a carbonatação, se comparadas às argamassas de referência contendo apenas cimento Portland. No entanto, quando as mesmas misturas foram submetidas aos ciclos com carbonatação, observou-se a aceleração da penetração de cloretos (Figura 7. 3).



**Figura 7. 3 – Profundidade de penetração de cloretos e profundidade de carbonatação (CP- argamassa de referência, EAF50 – argamassa com 50% de escória de alto-forno, EAF70 – argamassa com 70% de escória de alto-forno) (SAEKI, 2002).**

Já na presente pesquisa essa tendência não ficou tão clara. A Tabela 7. 2 apresenta os resultados da profundidade de penetração de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) das misturas, após serem submetidas aos ciclos de envelhecimento acelerado (câmara de névoa salina, secagem em estufa e carbonatação acelerada com 10% de  $\text{CO}_2$ ).

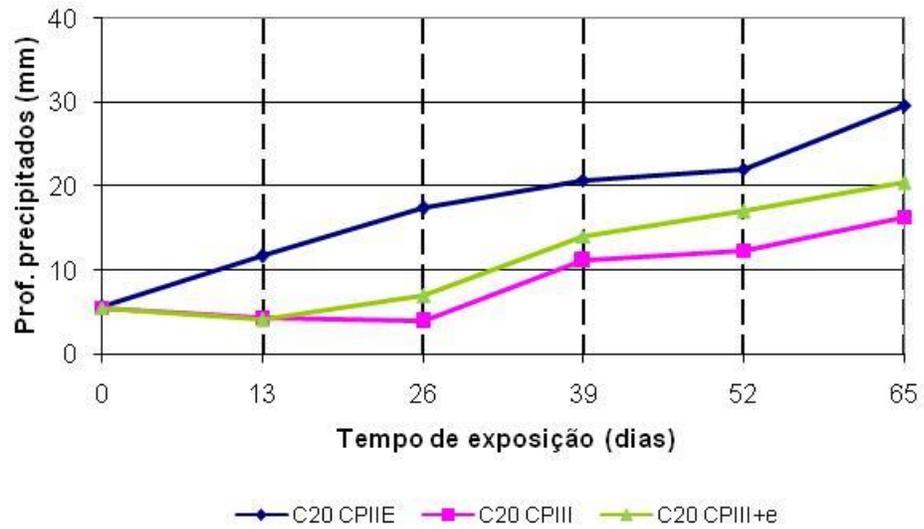
Na Figura 7. 4, Figura 7. 5 e Figura 7. 6 observa-se a tendência crescente de aumento da profundidade de penetração de precipitados brancos com o tempo de exposição, por faixa de resistência, após os corpos-de-prova de concreto com diferentes

aglomerantes serem submetidos aos ciclos de envelhecimento. Cada idade medida corresponde ao fim de um ciclo (13 dias - 1º ciclo, 26 dias - 2º ciclo, 39 dias - 3º ciclo, 52 dias - 4º ciclo e 65 dias - 5º ciclo).

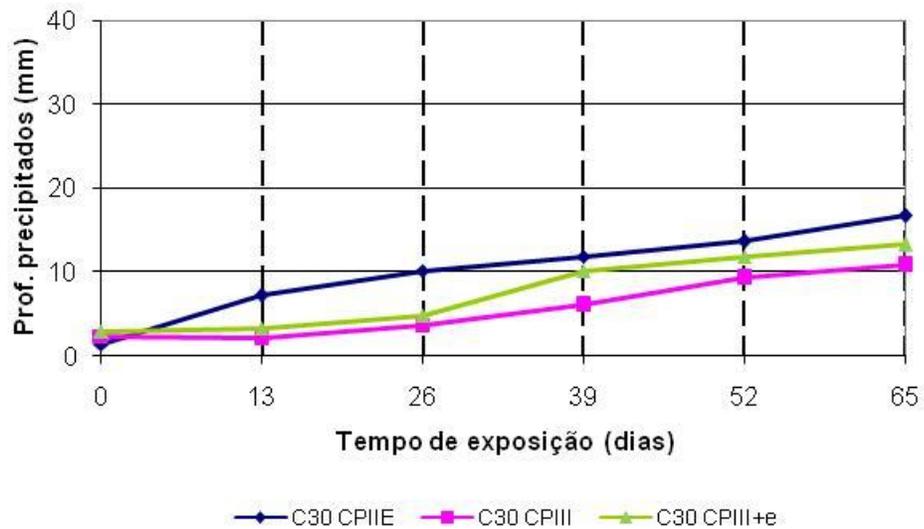
**Tabela 7. 2 – Resultado da penetração de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) (média e desvio padrão), após os ciclos de envelhecimento para os concretos em estudo.**

Traço	Concreto	Resistência compressão média aos 28 dias (MPa)	a/mc	Prof. de penetração de precipitados brancos (média e desvio padrão em mm)									
				1º ciclo	DP*	2º ciclo	DP	3º ciclo	DP	4º ciclo	DP	5º ciclo	DP
T1	C20CPIIE	23,10	0,63	11,7	1,7	17,4	2,4	20,7	2,7	22,0	2,1	29,6	4,5
T2	C20CPIII	28,40	0,75	4,4	0,8	3,9	1,3	11,1	2,5	12,3	2,3	16,3	4,2
T3	C20CPIII+e	29,31	0,63	4,1	0,7	6,9	3,2	14,0	2,6	17,0	2,6	20,4	1,8
T4	C30CPIIE	36,97	0,49	7,2	1,6	10,2	1,8	11,9	1,9	13,7	2,0	16,7	2,0
T5	C30CPIII	37,44	0,61	2,2	0,9	3,7	1,2	6,1	1,8	9,3	2,3	10,8	1,5
T6	C30CPIII+e	38,52	0,49	3,3	1,0	4,9	1,7	10,1	2,0	11,9	2,3	13,3	1,8
T10	C40CPIIE	48,75	0,39	2,0	0,9	5,5	1,2	5,3	1,0	8,5	2,2	10,3	1,8
T11	C40CPIII	51,78	0,52	0,9	0,3	3,0	1,3	3,9	0,8	6,4	1,0	6,4	1,5
T12	C40CPIII+e	53,66	0,39	1,1	0,5	3,3	1,6	4,6	1,0	9,8	1,3	8,7	1,5

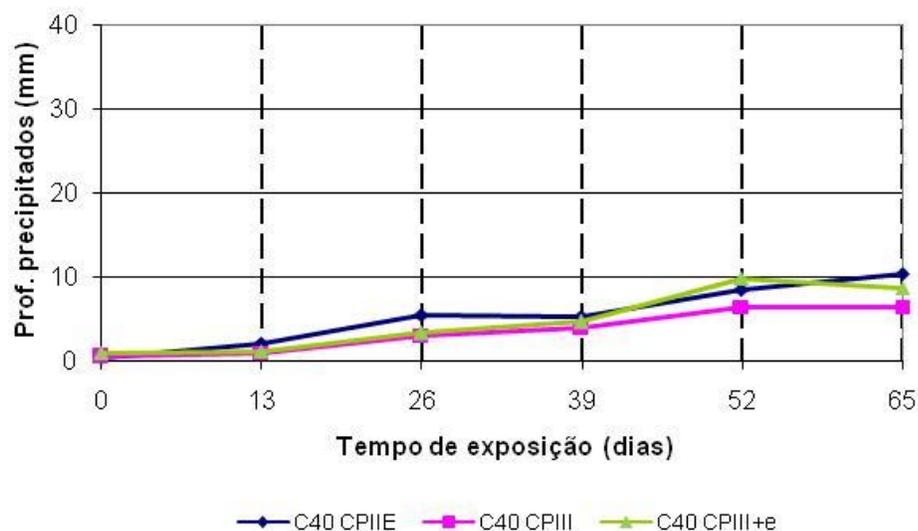
\*DP = desvio padrão.



**Figura 7. 4 – Profundidade de penetração de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) em função do tempo de exposição para os concretos de classe C20.**



**Figura 7. 5 – Profundidade de penetração de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) em função do tempo de exposição para os concretos de classe C30.**



**Figura 7. 6 – Profundidade de penetração de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos) em função do tempo de exposição para os concretos de classe C40.**

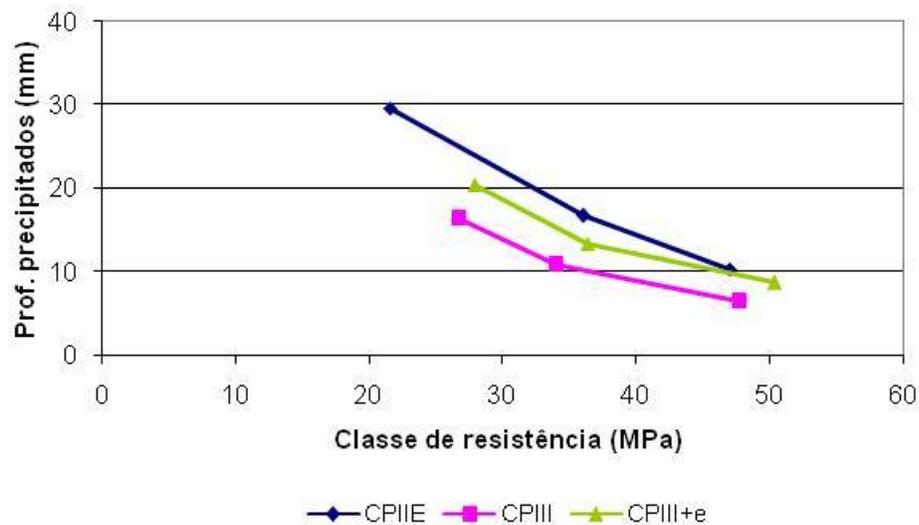
Quando a Figura 7. 4, a Figura 7. 5 e a Figura 7. 6 são comparadas, nota-se que, para um mesmo material cimentício, as profundidades de penetração de precipitados (cloretos ou carbonatos) crescem com a diminuição da classe de resistência. De maneira geral, os concretos de classe C20 apresentam profundidades de precipitados em torno de 2,5 vezes maior que os concretos de classe C40, enquanto os concretos de classe C30 apresentam profundidades em torno de 1,6 maior que os concretos de classe C40.

Os resultados nas Figura 7. 4, a Figura 7. 5 e a Figura 7. 6 também mostram que há uma tendência das profundidades de penetração de precipitados brancos serem maiores nos concretos com cimento CP II-E-32 e menores nos concretos contendo CP III-32-RS, apesar desses últimos terem maior relação água/materiais cimentícios.

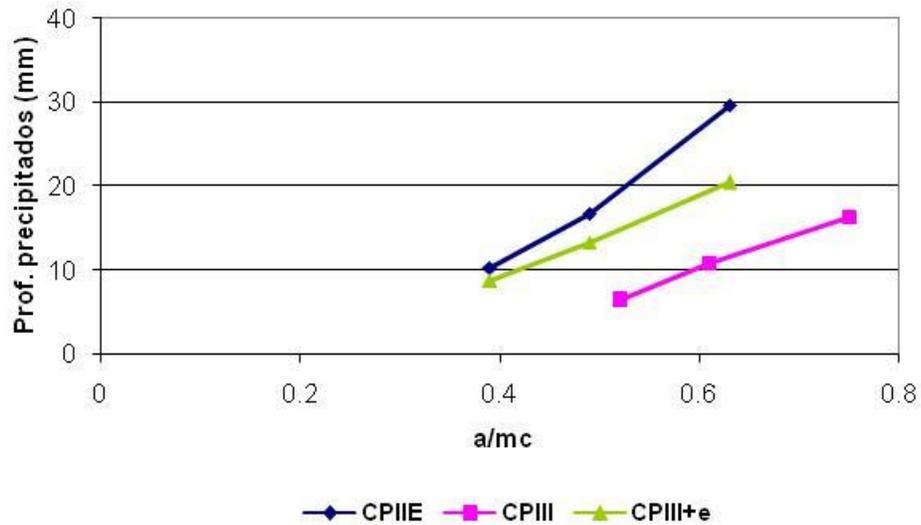
Nos concretos com cimento CP II-E-32, a profundidade de penetração de cloretos é maior do que a profundidade de penetração da frente de carbonatação, o que talvez não ocorra nas misturas com maior teor de escória onde a visualização das profundidades alcançadas pelos precipitados brancos é mais difícil, com uma linha que delimita a mudança de cor branca para marrom bastante difusa. Esta dificuldade de visualização também foi observada na pesquisa de Jucá (2002).

A Figura 7. 7 e a Figura 7. 8 apresentam as profundidades de precipitados ao final do quinto ciclo de envelhecimento acelerado, em função da classe de resistência real e da relação água-material cimentício, respectivamente. Observa-se, respectivamente, uma diminuição da profundidade de precipitados com o aumento da classe e a diminuição da relação água/materiais cimentícios.

Após os concretos serem submetidos aos cinco ciclos de envelhecimento acelerado, verifica-se, em relação às medidas das profundidades iniciais (aos 365 dias de idade e antes do início dos ciclos de envelhecimento), uma mudança na tendência nessa idade.



**Figura 7. 7 – Profundidade de penetração, após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado, de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos), em função da classe real de resistência do concreto.**



**Figura 7. 8 – Profundidade de penetração, após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado, de precipitados brancos (cloretos ou carbonatos), em função da relação água/material cimentício.**

Aos 365 dias de idade, de maneira geral, o tipo de material cimentício não produziu diferenças significativas na profundidade de penetração. Isso talvez se deva ao fato das penetrações serem muito pequenas e à dificuldade na leitura das medidas. Esta dificuldade levou a uma alta variabilidade (coeficiente de variação<sup>1</sup> variou de 19% a 117%) e, conseqüentemente, desvio padrão muito elevado se comparado à profundidade de penetração.

Já ao se compararem as profundidades ao final do quinto ciclo de envelhecimento acelerado, observa-se uma tendência clara de maiores profundidades nas misturas contendo CP II-E-32 e menores profundidades naquelas contendo CP III-32-RS, exceto para a classe C40 onde não houve diferença estatisticamente significativa entre as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS + escória. Da mesma forma, não houve diferenças estatisticamente significativas entre as misturas de classe C20 contendo CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória.

<sup>1</sup> Coeficiente de variação é o desvio padrão dividido pela média.

Isso difere do relatado por Saeki (2002), que observou que as misturas com 70% de escória de alto-forno apresentaram a maior profundidade de penetração de cloretos, enquanto as misturas com 50% de escória de alto-forno apresentaram profundidades similares às das misturas de referência. Nesse caso, a carbonatação das misturas com maior teor de escória de alto-forno teve um papel determinante para a maior profundidade de penetração de cloretos. Essa diferença pode ser devido ao fato de Saeki (2002) ter usado argamassas, ao invés de concreto, e empregado uma metodologia de ensaio diferente, incluindo o teor de CO<sub>2</sub>. Conforme observado no Capítulo 6, o teor de CO<sub>2</sub> pode modificar o desempenho das misturas.

A adição de escória granulada de alto-forno moída no concreto propicia baixos índices de permeabilidade e de difusão de cloretos pela capacidade de fixação do cloreto proporcionada ao material (SMOLCZYK, 1980; BAUER; HELENE, 1993; OSBORNE, 1999; LUO *et al.*, 2002). Esses concretos podem ser mais propensos à carbonatação, sendo que a carbonatação pode colmatar os poros, dificultando a penetração de cloretos.

Os resultados dos ensaios com base na ASTM C 1202/2005 apresentados no Capítulo 6 também confirmam a tendência dos concretos contendo CP II-E-32 apresentarem maiores profundidades de penetração de cloretos, porém diferem no que tange os concretos contendo CP III-32-RS. No caso dos ensaios cíclicos, os concretos contendo CP III-32-RS foram os que apresentaram menores penetrações e no caso dos ensaios ASTM C 1202/2005 os concretos contendo CP III-32-RS + escória apresentaram menor carga passante.

Isso porque nos ensaios de carga passante do Capítulo 6, apenas o efeito separado da penetração de cloretos foi estudada. Naquele caso, não se levou em consideração o efeito sinérgico da penetração de cloretos e carbonatação e o efeito da carbonatação pode aumentar a profundidade de penetração de cloretos (SAEKI, 2002).

Além disso, a carga passante medida pela ASTM C 1202/2005 é susceptível ao aumento de temperatura das células durante o ensaio e misturas com maiores relações água/materiais cimentícios, como as CP-III-32-RS, tendem a ser mais propensas a esse fenômeno.

### 7.3 Profundidade de carbonatação

#### 7.3.1 Ensaio na condição natural

A Tabela 7. 3 apresenta os resultados da profundidade de carbonatação natural pela aspersão de fenolftaleína nos concretos submetidos à cura úmida até os 28 dias de idade e à cura em ambiente de laboratório até os 365 dias de idade, quando foram, então, submetidos a ciclos de envelhecimento acelerado.

**Tabela 7. 3 – Resultados da profundidade de carbonatação natural (média e desvio padrão) para os concretos em estudo.**

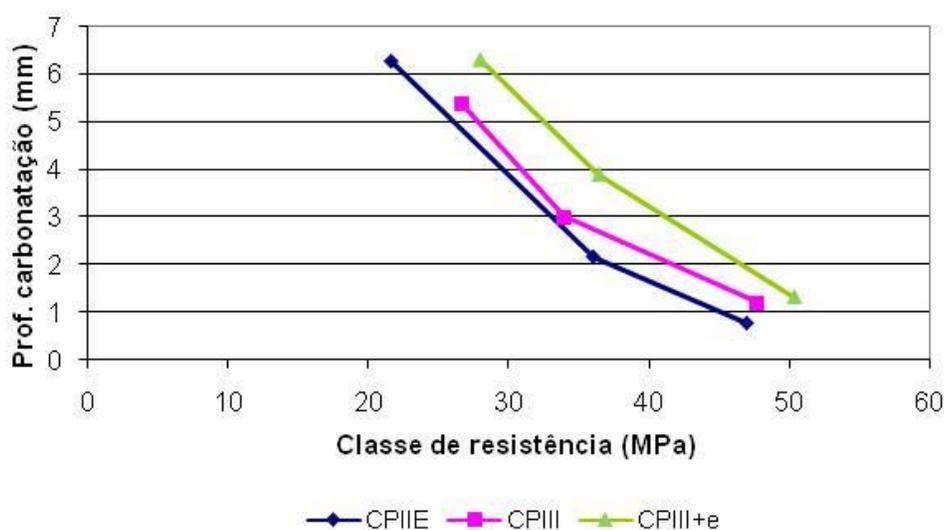
Traço	Concreto	Resist. à compressão média (MPa)	a/mc	Prof. carbonatação (mm)	
				365 dias*	DP**
T1	C20CPIIE	23,10	0,63	6,29	1,69
T2	C20CPIII	28,4	0,75	5,38	1,02
T3	C20CPIII+e	29,31	0,63	6,32	1,12
T4	C30CPIIE	36,97	0,49	2,17	0,83
T5	C30CPIII	37,44	0,61	3,00	1,06
T6	C30CPIII+e	38,52	0,49	3,91	1,07
T10	C40CPIIE	48,75	0,39	0,77	1,05
T11	C40CPIII	51,78	0,52	1,21	1,19
T12	C40CPIII+e	53,66	0,39	1,33	0,72

\* média; \*\*DP = Desvio padrão.

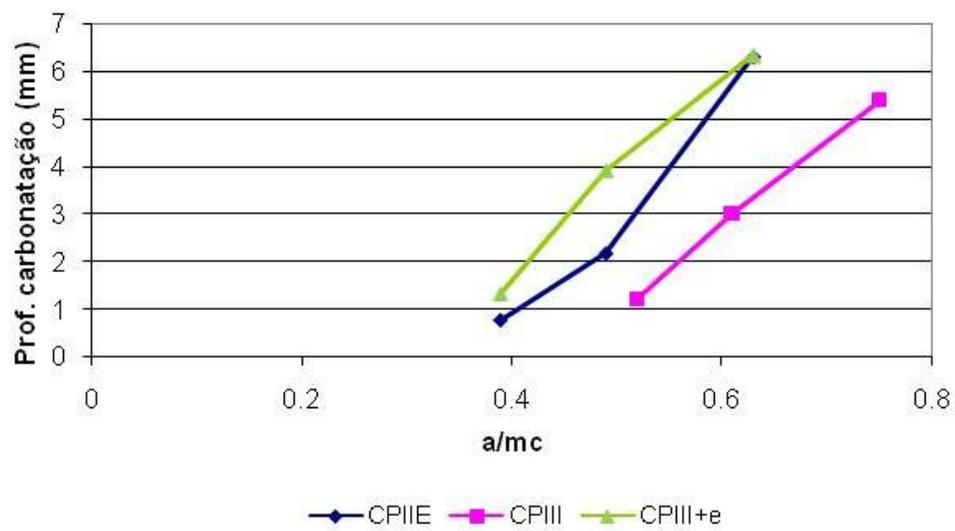
A Figura 7. 9 e Figura 7. 10 apresentam os resultados da profundidade de carbonatação aos 365 dias em função das classes reais de resistência e relação água/material cimentício, para cada material cimentício utilizado nas misturas, obtidas por meio da aspersão de fenolftaleína na superfície recém-fraturada.

Observa-se nos resultados da carbonatação natural que as diferenças existentes nas profundidades, quando comparadas em função da classe de resistência, são da ordem de 1 mm e quando comparadas em função da relação água/ material cimentício são da ordem de 2 mm. Da mesma forma que ocorreu na análise da penetração de cloretos na condição natural, a dificuldade de leitura das medidas resultou em grande variabilidade (o coeficiente de variação entre 18% e 136%) e tornou difícil a diferenciação das misturas.

Ao se compararem as misturas por classe de resistência não se observa nenhuma diferença estatisticamente significativa, com exceção das misturas de classe C30, onde a mistura contendo CP III-32-RS + escória apresentou maior profundidade de carbonatação que a mistura CP II-E-32.



**Figura 7. 9 – Profundidade de carbonatação natural aos 365 dias em função da classe de resistência real.**



**Figura 7. 10 – Profundidade de carbonatação natural aos 365 dias em função da classe da relação água/material cimentício.**

### 7.3.2 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado

Na Tabela 7. 4 têm-se os resultados da profundidade de carbonatação dos concretos submetidos à cura úmida por 28 dias e cura ao ar até os 365 dias de idade, quando foram, então, submetidos a ciclos de envelhecimento acelerado.

**Tabela 7. 4 – Resultado da carbonatação acelerada (média e desvio padrão), para os concretos em estudo, após os ciclos de envelhecimento acelerado.**

Traço	Concreto	Resist. compressão (MPa)	a/mc	Profundidade carbonatação acelerada (10% de CO <sub>2</sub> ) (mm)									
				1º ciclo	DP*	2º ciclo	DP	3º ciclo	DP	4º ciclo	DP	5º ciclo	DP
T1	C20CPIIE	23,10	0,63	12,1	2,3	17,0	1,9	19,8	2,9	22,6	2,5	27,1	4,9
T2	C20CPIII	28,40	0,75	7,9	1,8	12,0	2,0	16,2	2,3	14,4	2,0	18,8	2,3
T3	C20CPIII+e	29,31	0,63	12,2	2,0	15,8	1,8	17,3	2,5	20,6	1,8	24,0	3,2
T4	C30CPIIE	36,97	0,49	7,3	1,9	9,6	1,9	10,9	1,9	12,3	2,2	14,3	2,2
T5	C30CPIII	37,44	0,61	5,7	1,2	8,1	1,6	8,0	1,7	10,5	1,8	10,5	1,9
T6	C30CPIII+e	38,52	0,49	8,3	1,7	11,8	1,3	13,4	2,1	15,4	2,0	16,7	1,6
T10	C40CPIIE	48,75	0,39	3,0	1,4	4,9	1,3	5,3	1,0	5,9	1,3	7,3	1,6
T11	C40CPIII	51,78	0,52	2,2	1,3	4,3	1,3	4,1	0,8	4,8	1,1	6,9	1,4
T12	C40CPIII+e	53,66	0,39	5,9	1,4	6,8	0,8	6,2	0,7	8,6	1,2	9,9	1,2

\*D. – Desvio padrão

A Figura 7. 11, a Figura 7. 12 e a Figura 7. 13 apresentam a profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição ao envelhecimento acelerado. Cada idade medida corresponde ao fim de um ciclo (13 dias - 1º ciclo, 26 dias - 2º ciclo, 39 dias - 3º ciclo, 52 dias - 4º ciclo e 65 dias - 5º ciclo). Observa-se que a profundidade de carbonatação aumenta com a diminuição da classe de resistência.

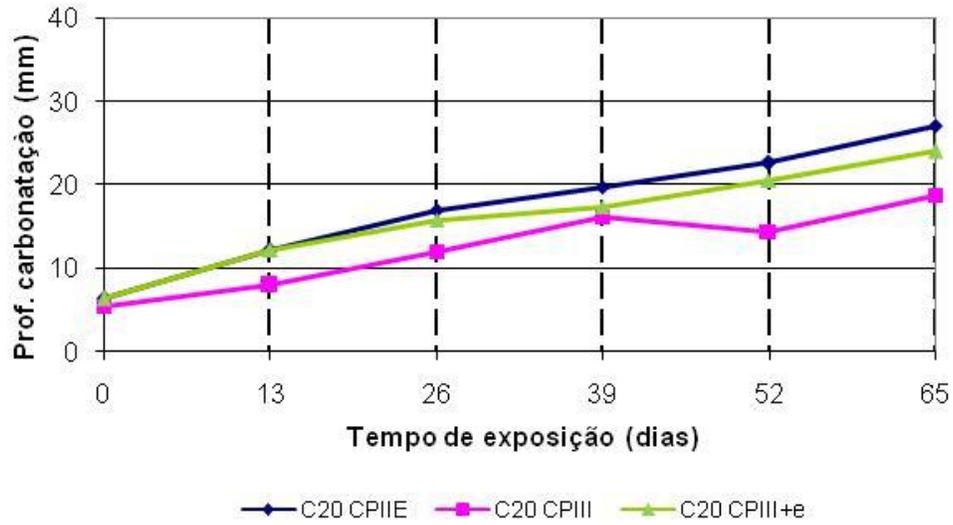


Figura 7. 11– Profundidade de carbonatação para os traços C20CPIIE, C20CPIII e C20CPIII+e em função do tempo de exposição aos ciclos de envelhecimento acelerado.

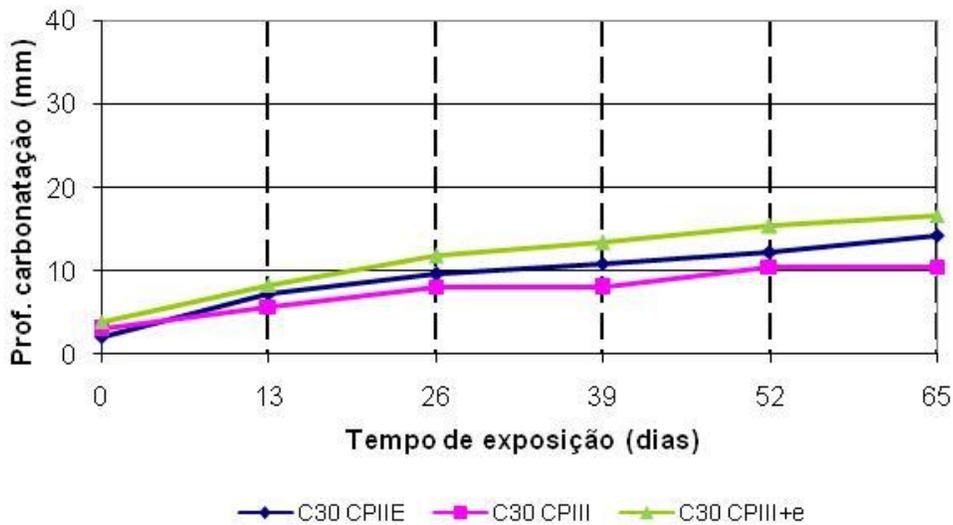
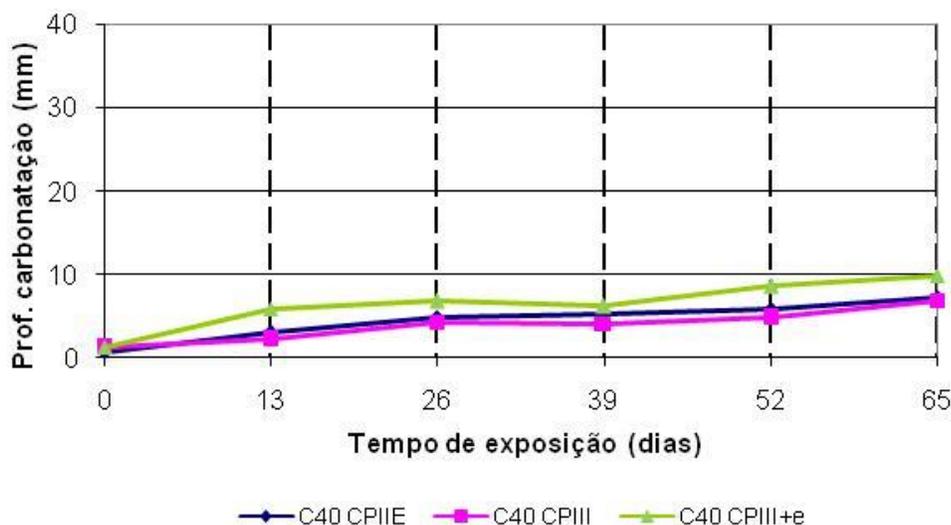


Figura 7. 12 – Profundidade de carbonatação para os traços C30CPIIE, C30CPIII e C30CPIII+e em função do tempo de exposição aos ciclos de envelhecimento acelerado.



**Figura 7. 13 – Profundidade de carbonatação para os traços C40CPIIE, C40CPIII e C40CPIII+e em função do tempo de exposição aos ciclos de envelhecimento acelerado.**

Ao se compararem as profundidades de carbonatação ao final do quinto ciclo, os concretos de classes C20 e C30 observa-se a tendência das misturas contendo CPIII-32-RS apresentarem menor profundidade de carbonatação, enquanto as misturas contendo CP II-E-32 e CPIII-32-RS + escória apresentam profundidades estatisticamente similares. O fato das misturas contendo CPIII-32-RS apresentarem profundidades de carbonatação menores talvez se deva ao fato de que, apesar de conterem 66% de escória de alto-forno e, portanto serem potencialmente mais suscetíveis à carbonatação, a escória de alto-forno possa ter promovido uma densificação da matriz que dificultou o progresso da frente de carbonatação.

Já nos concretos de classe C40 observou-se um comportamento diferente. As misturas contendo CP II-E-32 e CPIII-32-RS não apresentaram profundidades de carbonatação estatisticamente diferentes entre si, e as misturas contendo CPIII-32-RS + escória apresentaram profundidades de carbonatação maiores.

A Figura 7. 14 e a Figura 7. 15 apresentam as profundidades de carbonatação ao final do quinto ciclo em função da classe de resistência real e da relação água-material cimentício, respectivamente.

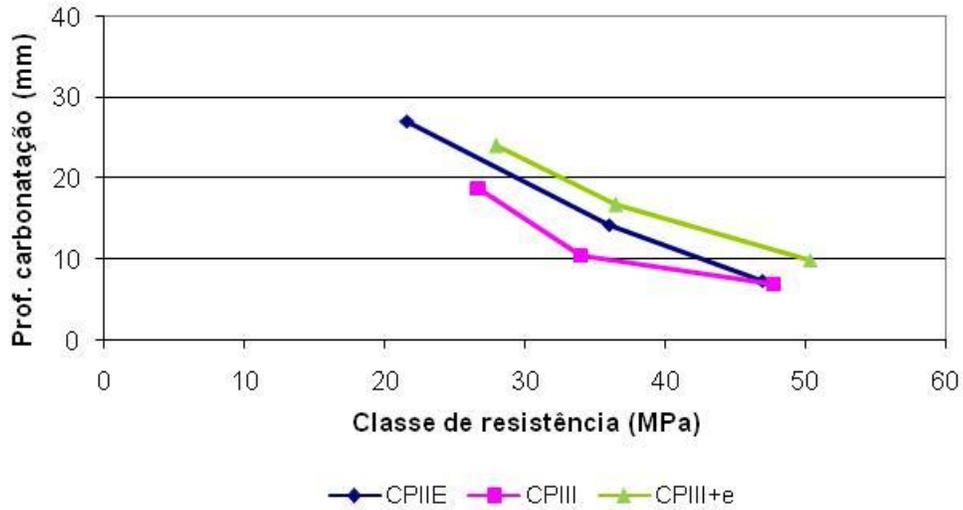


Figura 7. 14 – Profundidade de carbonatação, após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado, em função da classe real de resistência do concreto.

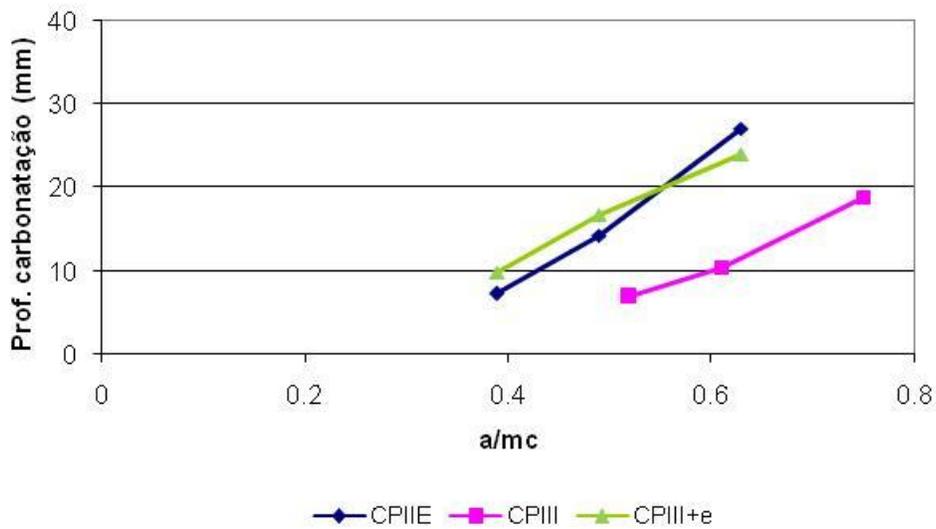
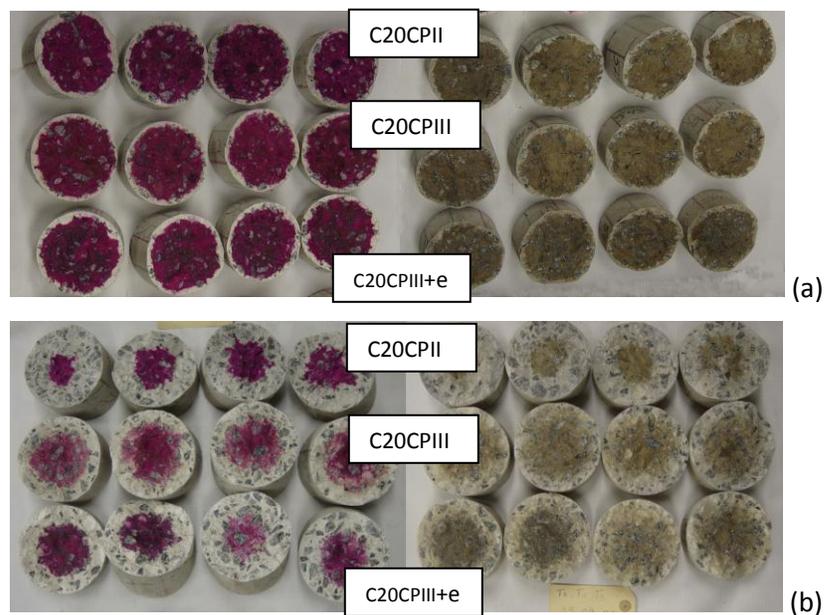


Figura 7. 15 – Profundidade de carbonatação, após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado, em função da relação água/material cimentício.

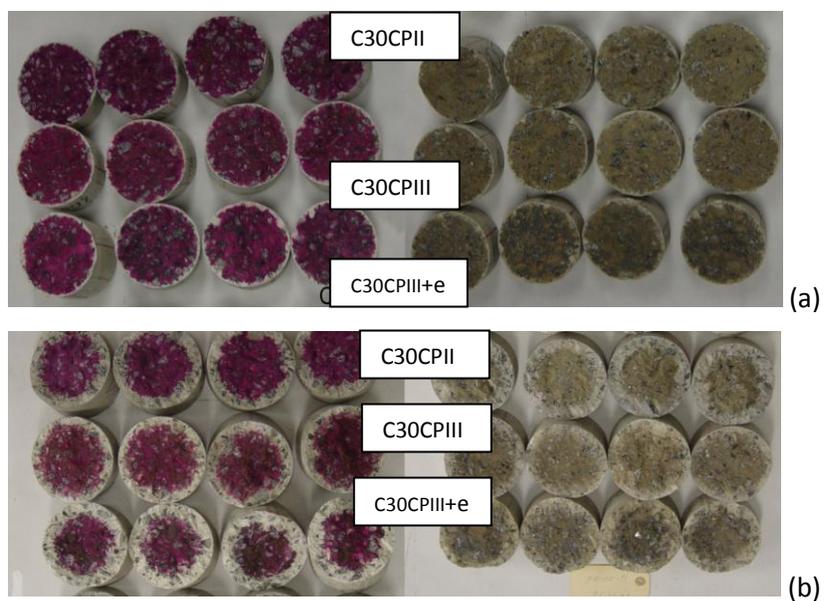
Verifica-se, em relação às medidas das profundidades de carbonatação iniciais (aos 365 dias de idade, antes do início dos ciclos de envelhecimento), uma mudança na tendência nessa idade. Aos 365 dias de idade, de maneira geral, o tipo de material cimentício não produziu diferenças significativas na profundidade de carbonatação. Isso talvez se deva pelo fato das profundidades serem muito pequenas e haver uma dificuldade na leitura das medidas. O desvio padrão observado foi muito elevado (o coeficiente de variação entre 18% a 133%) se comparado à profundidade de penetração.

Já ao se compararem as profundidades ao final do quinto ciclo, observa-se uma tendência clara de menores profundidades de carbonatação das misturas contendo CP III-32-RS, exceto para a classe C40 onde não houve diferença estatisticamente significativa entre as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS.

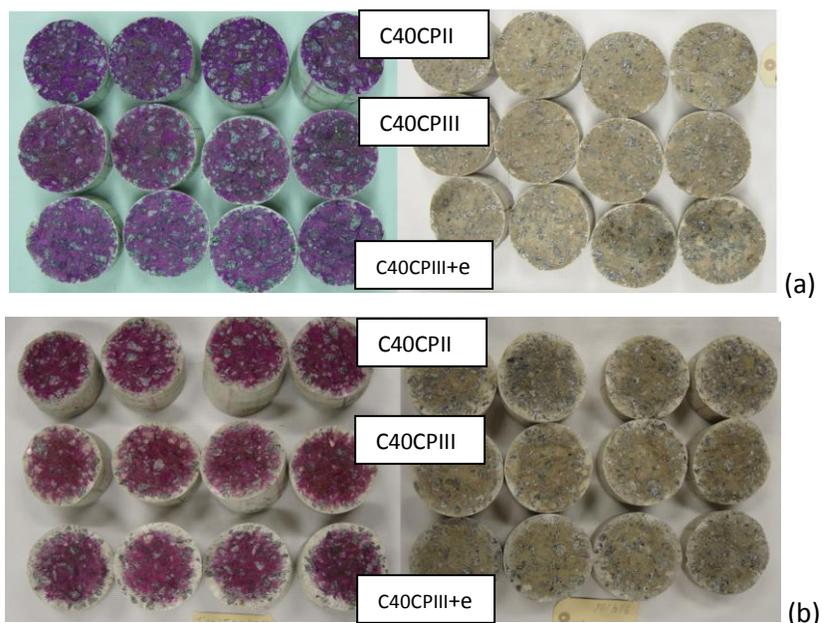
A Figura 7. 16, a Figura 7. 17 e a Figura 7. 18 comparam as profundidades de precipitados brancos e a profundidade de carbonatação das misturas aos 365 dias e após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado. Observa-se que em todas as classes, é difícil de se diferenciar os tipos de materiais cimentícios principalmente aos 365 dias. Além disso, observa-se que as profundidades de precipitados brancos são muito próximas às profundidades de carbonatação.



**Figura 7. 16 – Carbonatação e ataque de cloretos do concreto C20: (a) aos 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; (b) após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado.**



**Figura 7. 17 – Carbonatação e ataque de cloretos do concreto C30: (a) aos 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; (b) após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado.**



**Figura 7. 18 – Carbonatação e ataque de cloretos do concreto C40: (a) aos 365 dias, antes dos ciclos de envelhecimento; (b) após o quinto ciclo de envelhecimento acelerado.**

#### 7.4 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica em conjunto com o acesso do oxigênio à armadura são os principais controladores do mecanismo eletroquímico da corrosão das armaduras (FERREIRA, 2003; CASCUDO, 2005).

A resistividade elétrica indica a facilidade de passagem de corrente ( $I_{corr}$ ) pelo concreto, porém segundo Andrade; Alonso (1996) deve ser analisada em conjunto com outras técnicas. Os resultados da evolução da resistividade elétrica de concretos, segundo Cascudo (2005), fornecem apenas uma idéia qualitativa da corrosão das armaduras.

O CEB 192 propõe diretrizes para a avaliação do risco de corrosão por meio da resistividade elétrica (Quadro 7. 1).

**Quadro 7. 1 – Critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto de acordo com os critérios do CEB 192 (CEB, 1989).**

Resistividade do concreto (kohm.cm)	Indicação de probabilidade de corrosão
> 20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito alta

Segundo Kazberuk e Jeziarski (2005), a resistividade elétrica do concreto pode variar de 1 a 10.000 kohm.cm, dependendo da umidade e da composição da mistura. A corrente é carregada pelos íons na solução dos poros. Ao aumentar-se o grau de saturação dos poros ou o tamanho e a quantidade de poros (por exemplo, com o aumento da relação água/materiais cimentícios), a resistividade elétrica diminui.

Além disso, para uma mesma umidade, a resistividade cresce com o aumento do grau de hidratação, com a secagem ou com a carbonatação do concreto. Outros fatores que influenciam a resistividade elétrica são o gradiente de umidade causado por ciclos de molhagem e secagem, o ingresso de sais e a superfície rica em cimento ou com maior relação água-materiais cimentícios que o resto da peça (MILLARD; GOWERS, 1991).

**7.4.1 Ensaio na condição natural**

Os resultados do monitoramento da resistividade elétrica a partir de 63 dias de idade até o início dos ciclos de envelhecimento acelerado, aos 365 dias de idade, são apresentados na Figura 7. 19, na Figura 7. 20 e na Figura 7. 21. Esses resultados representam a média de quatro medidas.

Cabe salientar que as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS apresentaram dispersão de resultados bem superior às misturas contendo CP III-32-RS+ escória. A maior dispersão de resultados foi observada na classe C30.

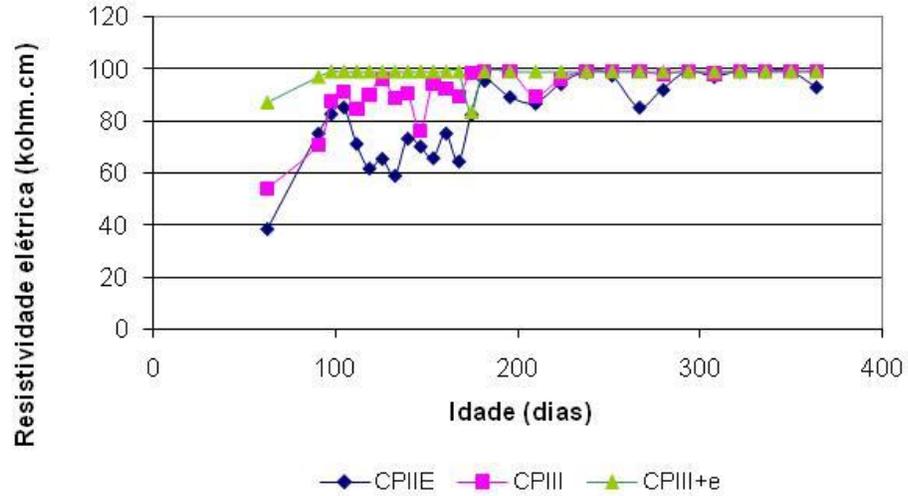


Figura 7. 19 – Resultados de resistividade elétrica para a classe C20 com diferentes materiais cimentícios.

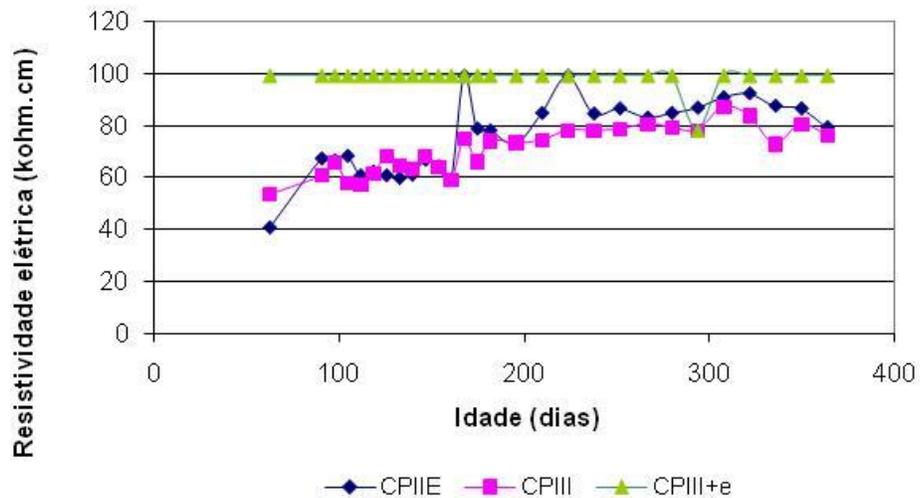
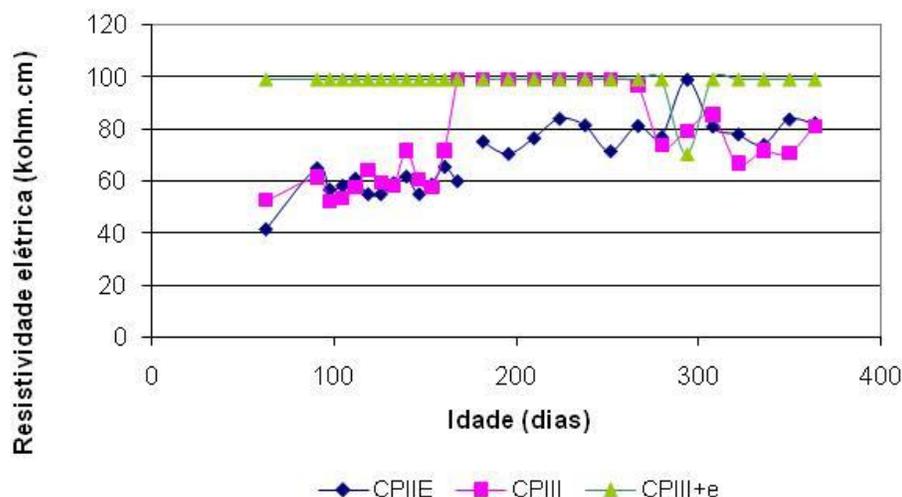


Figura 7. 20 - Resultados de resistividade elétrica para a classe C30 com diferentes materiais cimentícios.



**Figura 7. 21 - Resultados de resistividade elétrica para a classe C40 com diferentes materiais cimentícios.**

As misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS apresentam a tendência de aumento da resistividade elétrica com a idade. Nas classes C20 e C30, não se observam diferenças estatisticamente significativas entre as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS.

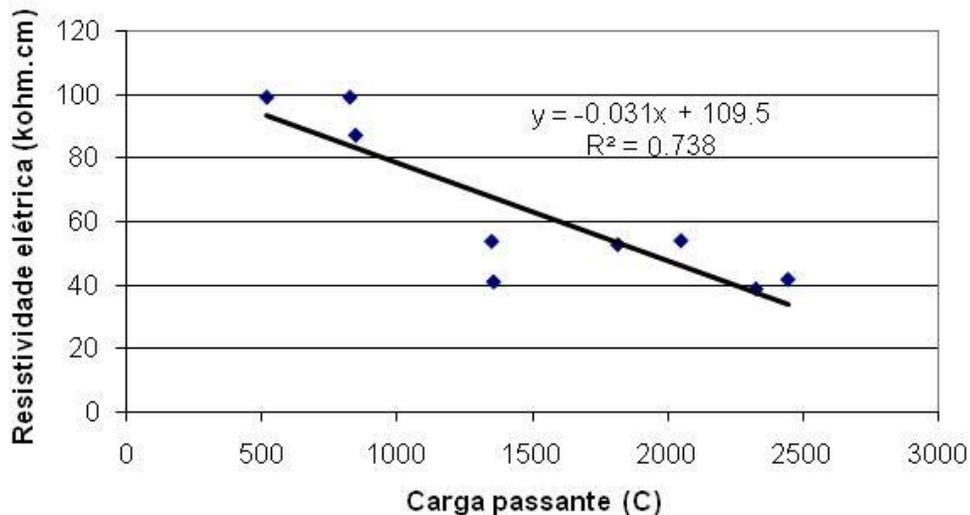
Já para a classe C40, até aproximadamente 160 dias, as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS se comportaram de maneira similar. A partir daí, por aproximadamente mais 120 dias, a resistividade elétrica das misturas contendo CP III-32-RS apresentou-se similar à resistividade elétrica da mistura com CP III-32-RS+ escória. Ao atingir a idade de 280 dias a resistividade elétrica da mistura contendo CP III-32-RS voltou a aproximar-se da resistividade da mistura com CP II-E-32.

Em todas as misturas das classes C20, C30 e C40, independentemente do material cimentício usado, observou-se, durante o período de monitoramento da resistividade elétrica natural, valores acima de 20 kohm.cm, que, de acordo com os critérios do Quadro 7. 1, , indicam probabilidade desprezível de corrosão,.

Os concretos produzidos com o material cimentício CP III-32-RS+escória apresentaram valores de resistividade sempre maiores, comparados com os resultados dos

concretos produzidos com CP II-E-32 e com CP III-32-RS. Esses resultados estão de acordo com Hope e Ip (1987) que afirmam que quanto maior o teor de escória de alto-forno do concreto, maiores são os valores de resistividade elétrica. Isso pode ser devido à diminuição da porosidade da mistura e aumento da densificação da matriz, a qual diminui a difusão da mistura.

Observa-se na Figura 7. 22 que há uma tendência de diminuição da resistividade elétrica com o aumento da carga passante. Entretanto, a correlação entre estas duas propriedades foi de  $R^2$  0,74, o que não foi considerada satisfatória. Isso pode ter ocorrido pelo fato da resistividade ter sido medida na fase 3 deste trabalho, enquanto a carga passante foi medida na fase 2. Além disso, os corpos-de-prova usados para o ensaio de resistividade elétrica foram submetidos à cura úmida até os 28 dias e posteriormente armazenados em ambiente de laboratório, enquanto os corpos-de-prova usados para os ensaios de carga passante foram submetidos à cura úmida até a idade do ensaio.



**Figura 7. 22 – Relação entre carga passante aos 63 dias e a resistividade elétrica aos 63 dias.**

### 7.4.2 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado

A Tabela 7. 5 apresenta os resultados da resistividade elétrica em função dos ciclos de envelhecimento acelerado. As medidas foram realizadas antes do início dos ciclos e ao final da exposição dos corpos-de-prova ao ambiente de câmara de névoa salina pelo fato dos corpos de prova estarem úmidos. Observa-se que em alguns casos, o desvio padrão foi extremamente elevado e deve ser levado em consideração ao analisar-se os resultados.

**Tabela 7. 5 – Resultado da resistividade elétrica dos concretos durante os ciclos de envelhecimento acelerado.**

Concreto	Resistividade elétrica (kohm.cm)											
	0*	DP	1º ciclo	DP	2º ciclo	DP	3º ciclo	DP	4º ciclo	DP	5º ciclo	DP
C20CPIIE	93,0	2,0	48,8	35,8	17,8	5,6	32,0	6,8	28,3	8,6	15,8	6,3
C20CPIII	99,0	0,0	71,3	31,0	44,5	34,0	45,5	26,1	29,0	8,7	24,3	12,6
C20CPIII+e	99,0	0,0	25,5	4,1	13,0	4,1	10,4	2,5	13,5	3,1	7,7	0,8
C30CPIIE	79,3	6,7	60,3	8,8	46,8	5,6	42,0	6,8	31,5	2,9	30,5	6,0
C30CPIII	76,0	15,6	35,5	11,0	38,0	13,1	36,0	8,4	31,3	7,4	31,0	3,7
C30CPIII+e	99,0	0,0	46,3	12,5	36,0	5,7	32,8	6,7	19,8	1,7	17,8	2,5
C40CPIIE	82,3	1,0	71,5	11,2	87,3	7,1	67,8	9,4	52,0	4,2	61,8	8,9
C40CPIII	80,8	13,2	66,5	8,2	95,3	7,5	82,5	13,7	61,5	7,5	71,8	12,0
C40CPIII+e	99,0	0,0	69,3	18,1	50,0	5,7	40,5	6,0	33,5	3,9	29,8	2,1

\*Tempo de exposição correspondente a 365 dias de idade e ao início dos ciclos

Na Figura 7. 23, na Figura 7. 24 e na Figura 7. 25 tem-se a tendência observada para a resistividade para as misturas submetidas a ciclos de envelhecimento, considerando-se a idade de 365 dias correspondente ao tempo inicial de exposição aos ciclos.

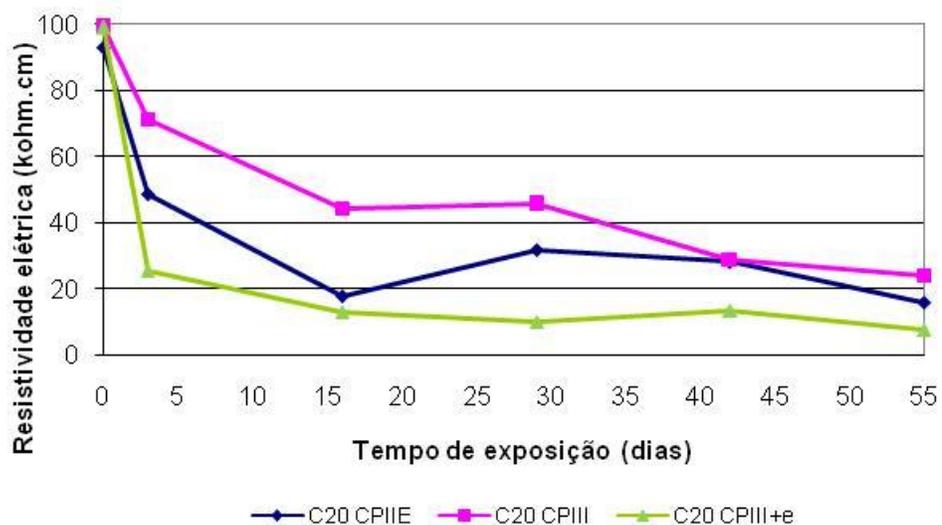


Figura 7. 23 - Resistividade elétrica durante a exposição aos ciclos de envelhecimento para os traços T1 (C20CPIIE), T2 (C20CPIII) e T3 (C20CPIII+escória).

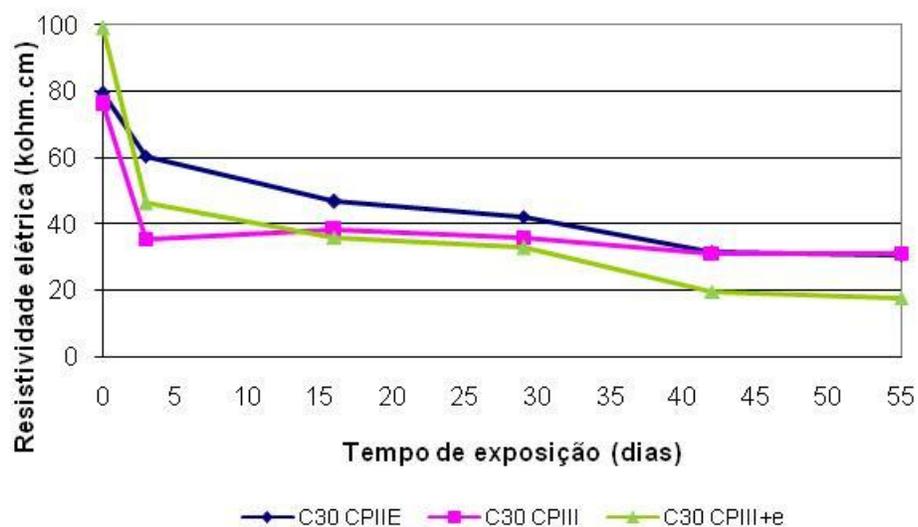
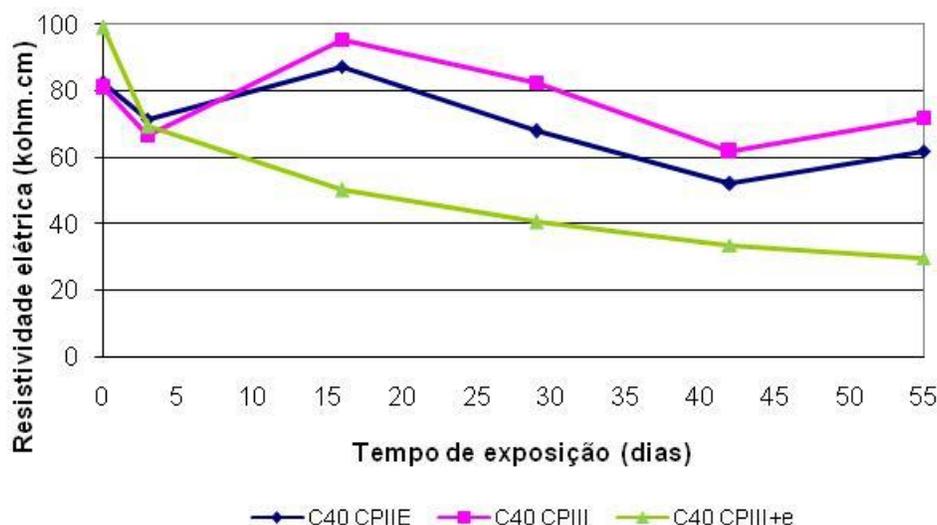


Figura 7. 24 - Resistividade elétrica durante a exposição dos traços T3 (C30CPIIE), T4 (C30CPIII) e T5 (C30CPIII+escória) aos ciclos de envelhecimento.



**Figura 7. 25- Resistividade elétrica durante a exposição dos traços T10 (C40CPIIE), T11 (C40CPIII) e T12 (C40CPIII+escória) aos ciclos de envelhecimento.**

Em primeiro lugar, observa-se que resistividade elétrica aumenta com o aumento da classe de resistência. Em segundo, que as misturas com CP III-32-RS+escória apresentaram as menores resistividades elétricas. Porém na condição natural, estas misturas apresentaram as maiores resistividades elétricas. Essa diferença pode ser resultado da severidade do ensaio e do efeito sinérgico, que poderia modificar a microestrutura do material, dependendo do tipo de adição mineral, principalmente em decorrência da carbonatação. A maior concentração de  $\text{CO}_2$  pode alterar o gel C-S-H, alteração esta que não só pode se dar de maneira diferente dependendo da adição presente, como também em graus diferentes dependendo do teor de adição na mistura (SANJUÁN *et al.*, 2003).

Nas três classes de resistência, observa-se que houve uma diminuição significativa da resistividade elétrica após a primeira exposição (1º ciclo) à câmara de névoa salina. Segundo Millard e Gowers (1991) existe uma dificuldade na interpretação dos resultados de resistividade elétrica quando há uma camada superficial com resistividade maior ou menor do que a parte interior do concreto, levando a erros nas medidas. Possíveis causas desse gradiente de resistividade elétrica são, por exemplo, molhagem ou carbonatação do concreto, podendo haver um aumento aparente de 2 ou 3 ordens de grandeza da resistividade elétrica devido à carbonatação superficial. O efeito da carbonatação sobre a

resistividade elétrica também foi relatado por Claisse *et al.* (1999). Além disso, segundo Kazberuk e Jezierski (2005), a resistividade elétrica é inversamente proporcional à umidade do corpo-de-prova.

Na presente pesquisa, os corpos-de-prova, ao início do envelhecimento cíclico, já haviam sido expostos ao ambiente de laboratório por 337 dias e já haviam sofrido uma pequena carbonatação superficial, conforme observado em 7.3.1. A carbonatação superficial pode ter sido parcialmente responsável pelos altos valores iniciais de resistividade. Parte dos produtos da carbonatação pode ter sido lixiviada na câmara salina.

Durante as medidas de resistividade elétrica na condição natural, os corpos-de-prova foram deixados em ambiente de laboratório dos 28 dias aos 365 dias.

Assim, nas medidas realizadas ao início do ciclo de envelhecimento acelerado, ou seja aos 365 dias de idade ou antes da exposição acelerada, os corpos-de-prova estavam relativamente secos, apresentando alta resistividade. Porém, ao serem submetidos à câmara salina por 3 dias, a umidade superficial desses corpos-de-prova aumentou, diminuindo a resistividade elétrica, sem necessariamente indicar que houve mudança significativa da probabilidade de corrosão.

A diminuição da resistividade elétrica após a primeira exposição à câmara salina pode também ser reflexo da exposição a cloretos. Segundo Millard e Gowers (1991), uma pequena diminuição da resistividade elétrica pode ocorrer quando há penetração superficial de cloretos. Segundo Morris *et al* (2002), ocorre uma queda abrupta da resistividade elétrica dos concretos quando há contato com cloretos, pois o cloreto de sódio ao entrar em contato com a água sofre dissociação iônica, liberando íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , A condutividade elétrica da solução dos poros aumenta e a resistividade, muito dependente da condutividade iônica do eletrólito, diminui consideravelmente (ANDRADE, 1992, CASCUDO, 1997; FERREIRA, 2003).

Observou-se que essa queda foi mais pronunciada nas misturas com CP III-32-RS+escória, pois essas misturas, proporcionam, após a carbonatação, uma maior microporosidade e maior conectividade entre os poros (MATALA, 1994) e por isso, de acordo com Basheer *et al* (2001), uma maior sorptividade, ou seja, uma maior taxa de penetração da água, sendo mais suscetíveis ao ingresso de cloretos.

Na Figura 7. 23 (C20) observa-se que, durante os ciclos, a mistura com CP III-32-RS+escória apresentou as menores resistividades elétricas, podendo seu risco de corrosão ser considerado alto. As misturas desta classe, com CP II-E-32 e CP III-32-RS, apresentaram resultados de resistividades elétricas sem diferenças estatisticamente significativas, com exceção do 2º ciclo. Seu risco de corrosão pode ser considerado entre baixo e desprezível.

A Figura 7. 24 (C30) mostra que, durante os ciclos, a mistura com CP III-32-RS+escória apresentou, nos dois primeiros ciclos, resultados de resistividades elétricas sem diferenças estatisticamente significativas em comparação com a mistura com CP III-32-RS. Até aquele momento, o seu risco de corrosão poderia ser considerado desprezível. A partir do terceiro ciclo, a resistividade desta mistura diminuiu ao ponto de tornar-se a menor do grupo, e seu risco de corrosão passou a estar no limite de classificação entre desprezível e baixo. As misturas dessa classe, com CP II-E-32 e CP III-32-RS, apresentaram resultados de resistividades elétricas sem diferenças estatisticamente significativas nos dois últimos ciclos e seu risco de corrosão ao longo de todo o envelhecimento acelerado poderia ser considerado desprezível.

Os resultados ilustrados na Figura 7. 25 (C40) indicam que todas as misturas apresentaram risco desprezível de corrosão ao longo do envelhecimento acelerado. Além disso, pode-se observar que, a partir do segundo ciclo, a mistura com CP III-32-RS+escória apresentou as menores resistividades elétricas (cerca da metade das demais misturas) e a mistura com CP III-32-RS apresentou as maiores resistividades elétricas.

A Figura 7. 26 e a Figura 7. 27 apresentam, respectivamente, a influência da classe de resistência à compressão e da relação água/materiais cimentícios sobre a resistividade elétrica. Observa-se que a resistividade elétrica diminuiu com o aumento da relação água/materiais cimentícios e cresceu com o aumento da classe de resistência à compressão.

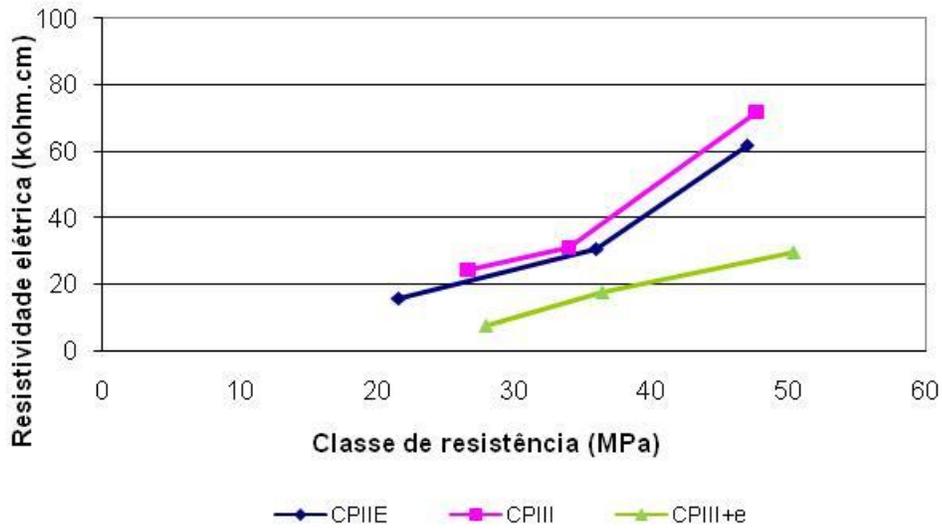


Figura 7. 26 – Resistividade elétrica após o quinto ciclo de envelhecimento em função da classe de resistência à compressão.

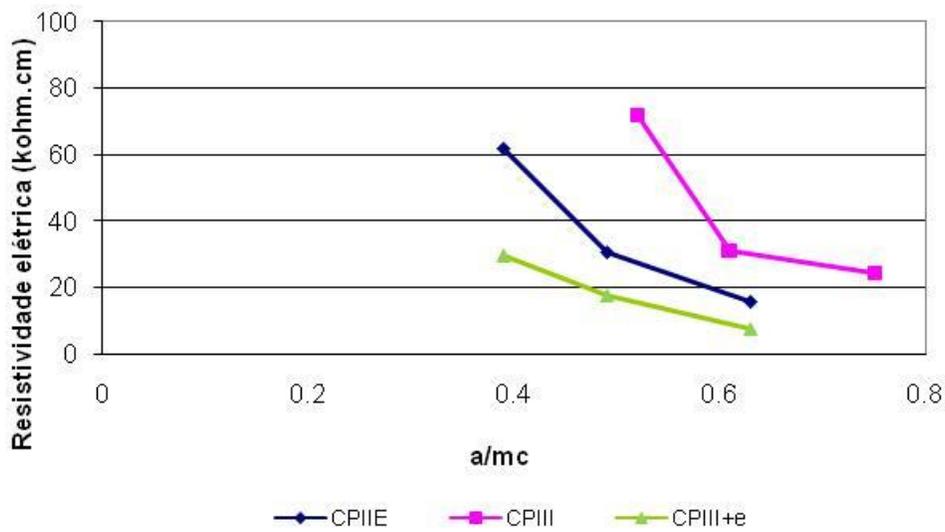


Figura 7. 27 – Resistividade elétrica após o quinto ciclo de envelhecimento em função da relação água/materiais cimentícios.

Após o quinto ciclo de envelhecimento, não foi observada nenhuma correlação entre a resistividade elétrica e a profundidade de carbonatação e entre a resistividade elétrica e a profundidade de penetração de cloretos.

Isso levanta as questões de (1) se a resistividade elétrica realmente reflete os mecanismos de penetração de cloretos e da frente de carbonatação; e (2) se ela pode ser usada adequadamente como um requisito de desempenho. No entanto, não se pode ignorar que os ensaios cíclicos são muito severos e podem afetar o desempenho das misturas de maneira diferente da que ocorre em exposição natural, conforme anteriormente observado.

## 7.5 Potencial de circuito aberto ou de eletrodo

Em armaduras em processo de corrosão, o excesso de elétrons na armadura se move da armadura para a célula de corrosão e o potencial de circuito aberto pode ser medido. Quanto mais negativo for o potencial, mais elétrons em excesso a armadura possuirá e, portanto, maior a probabilidade da ocorrência de corrosão. No Quadro 7. 2 apresentam-se os critérios para avaliação do potencial de corrosão, de acordo com a ASTM C 876/1999 .

**Quadro 7. 2 – Critérios de avaliação dos potenciais (ASTM C 876/1999).**

Potencial de corrosão (mV)	Probabilidade de corrosão
Mais negativo que -276	Superior a 90%
Mais positivo que -126	Inferior a 10%
De -126 a -276	incerta

Eletrodo de referência de calomelano saturado.

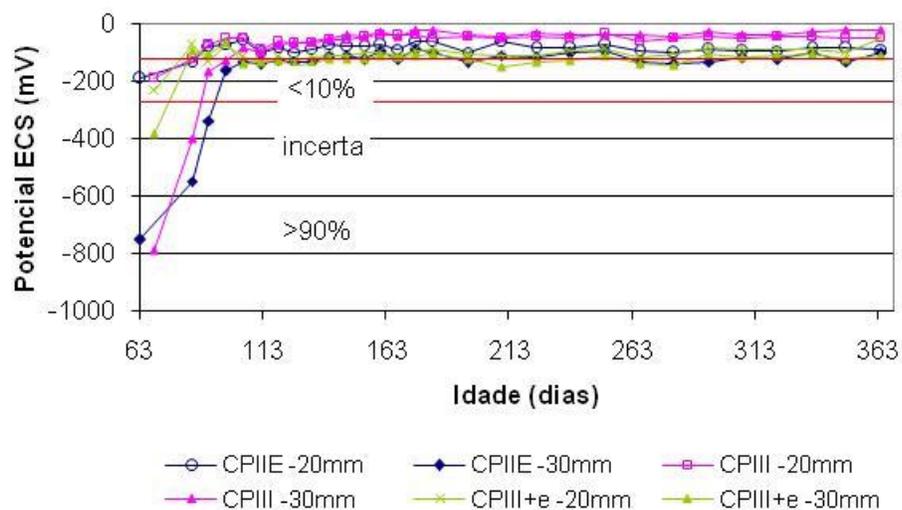
O potencial de corrosão pode ser afetado por vários fatores, tais como: camadas superficiais de concreto de alta resistividade; elevada espessura do revestimento; frentes de carbonatação, que tornam os valores do potencial mais eletropositivos com diferenças em relação aos valores reais da ordem de 200mV a 300 mV; e frente de cloretos e teor de umidade do concreto, que distorcem os valores de potencial para mais eletronegativos, com diferenças em relação aos valores reais da ordem de 100mV a 200 mV (CASCUDO, 2005). Além disso, de acordo com Alonso *et al.* (2000), quanto maior o teor de cloretos totais, mais eletronegativos são os valores do potencial de corrosão.

Portanto, segundo Andrade e Alonso (1996) e Cascudo (1997), a técnica de potencial, apesar de ser qualitativa, é útil para detectar as mudanças nas condições da barra de aço, de maneira que quando monitorada por um longo período, pode fornecer uma idéia da probabilidade de ocorrência da corrosão.

### **7.5.1 Ensaio na condição natural**

A Figura 7. 28, a Figura 7. 29 e a Figura 7. 30 apresentam os potenciais medidos durante um período de monitoramento antes do início dos ciclos de envelhecimento acelerado, ou seja, entre 63 e 365 dias para as classes C20, C30 e C40, respectivamente.

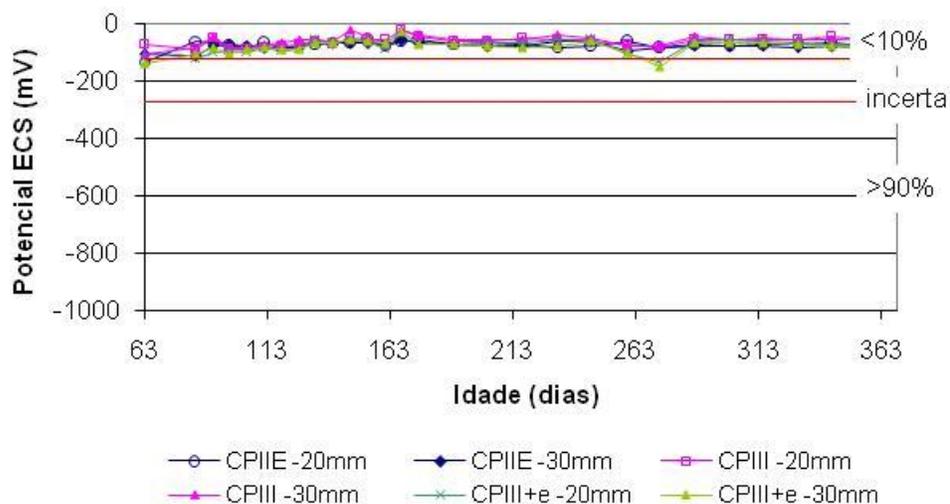
Na Figura 7. 28 (C20), observa-se que, para os três materiais cimentícios analisados, os corpos-de-prova com 30 mm de revestimento se apresentaram, nas primeiras idades, mais eletronegativos que os corpos-de-prova com 20 mm de revestimento. A partir dos 100 dias, porém, já não se observava nenhuma diferença entre os corpos-de-prova com 20 mm e 30 mm. Quando as misturas com os três materiais cimentícios são comparadas, observa-se que aquelas com CP III-32-RS apresentaram valores mais eletropositivos.



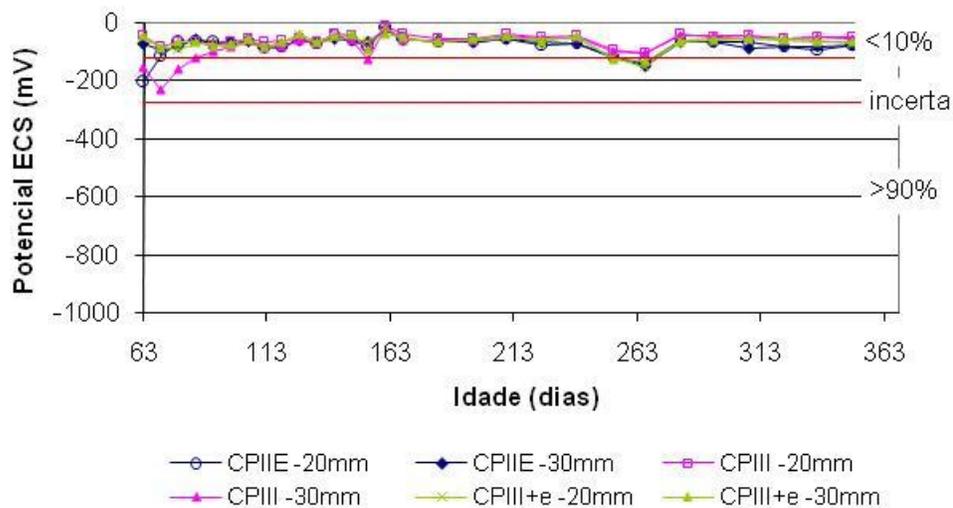
**Figura 7. 28 – Potencial de circuito aberto (ECS) e probabilidade de corrosão para os traços T1 (C20CPIIE), T2 (C20CPIII) e T3 (C20CPIII+escória) entre 63 e 365 dias de idade (eletrodo de referência de calomelano saturado).**

A Figura 7. 29 (C30) e a Figura 7. 30 mostram que os corpos-de-prova com 20 mm e 30 mm de cobertura se comportaram de maneira semelhante. Para ambas as classes, não foi possível diferenciar-se o comportamento das misturas com os três materiais cimentícios.

Observa-se que esse ensaio não se apresentou como uma ferramenta adequada para diferenciar misturas, ou corpos-de-prova com cobrimentos diferentes que, teoricamente poderiam possuir potencial de corrosão diferente.



**Figura 7. 29 – Resultados do potencial de circuito aberto (ECS) e probabilidade de corrosão para os traços T4 (C30CPIIE), T5 (C30CPIII) e T6 (C30CPIII+escória) no período compreendido entre 63 dias e 365 dias de idade.**



**Figura 7. 30 – Potencial de circuito aberto (ECS) e probabilidade de corrosão para os traços T10 (C40CPIIE), T11 (C40CPIII) e T12 (C40CPIII+escória) entre 63 e 365 dias de idade.**

### 7.5.2 Ensaio na condição de envelhecimento acelerado

A Tabela 7. 6 e a Tabela 7. 7 mostram o potencial de corrosão durante os ciclos de envelhecimento acelerado. Observa-se a tendência esperada de aumento do potencial de corrosão no decorrer dos ciclos.

Como o desvio padrão foi elevado, não foi possível diferenciar as misturas no que concerne ao tipo de material cimentício nos corpos-de-prova com 20 mm de cobrimento (Tabela 7. 6) ao final do envelhecimento acelerado. As misturas contendo CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória apresentaram potencial de corrosão, ao final dos ciclos de envelhecimento acelerado, sem diferenças estatisticamente significativas.

**Tabela 7. 6 – Resultado do potencial de corrosão (eletrodo de referência de calomelano saturado) dos concretos durante os ciclos de envelhecimento acelerado e espessura de cobrimento de 20 mm.**

Concreto	Potencial de corrosão (-mV)											
	0*	DP**	1º ciclo	DP	2º ciclo	DP	3º ciclo	DP	4º ciclo	DP	5º ciclo	DP
C20CPIIE	89,8	12,0	187,5	81,8	223,3	99,6	287,3	155,7	285,3	219,0	422,8	183,2
C20CPIII	51,0	16,1	104,0	26,9	189,3	91,6	315,3	167,9	519,8	81,7	517,5	49,3
C20CPIII+e	54,8	40,0	120,5	16,6	172,0	75,0	274,3	198,4	390,0	250,1	520,0	104,7
C30CPIIE	70,5	9,3	168,0	33,4	136,0	29,1	167,5	87,7	313,3	141,4	324,5	150,3
C30CPIII	51,0	14,8	164,0	74,8	231,8	117,2	215,8	129,7	376,8	121,9	380,3	157,7
C30CPIII+e	75,0	8,1	106,8	14,1	212,7	95,9	263,8	111,1	389,0	74,1	377,3	79,0
C40CPIIE	69,0	7,5	164,8	59,2	141,0	22,8	192,5	158,9	158,5	125,1	143,5	79,7
C40CPIII	35,8	13,5	137,8	43,8	116,3	20,8	95,0	9,2	98,0	43,3	256,5	125,1
C40CPIII+e	75,0	6,3	128,0	51,3	111,8	9,1	117,5	71,2	216,8	107,9	251,8	71,9

\*Tempo de exposição correspondente a 365 dias de idade ( início dos ciclos).

\*\* DP = desvio padrão.

No caso dos corpos-de-prova com cobrimento de 30 mm (Tabela 7. 7), as misturas com CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória apresentaram potencial de corrosão, ao final dos ciclos de envelhecimento acelerado, sem diferenças estatisticamente significativas para as classes de resistência à compressão de C20 e C40. Nessas classes, as misturas com CP II-E-32 apresentaram potencial de corrosão estatisticamente mais negativo do que as misturas com os outros dois materiais cimentícios. Já na classe de resistência C30, a mistura com CP III-32-RS+escória se apresentou como a mais eletronegativa e a mistura CP III-32-RS mais eletropositiva.

**Tabela 7. 7 – Resultado do potencial de corrosão (eletrodo de referência de calomelano saturado) dos concretos durante os ciclos de exposição e espessura de cobrimento de 30 mm.**

Concreto	Potencial de corrosão (-mV)											
	0*	DP	1º ciclo	DP	2º ciclo	DP	3º ciclo	DP	4º ciclo	DP	5º ciclo	DP
C20CPIIE	100,5	40,5	163,8	39,4	170,8	33,4	149,5	17,1	204,3	57,0	197,0	76,3
C20CPIII	26,0	13,1	119,3	64,1	125,3	69,3	145,5	108,4	170,0	94,5	90,0	82,5
C20CPIII+e	115,0	12,6	166,0	36,9	240,3	80,4	206,3	96,1	244,3	97,3	89,3	19,8
C30CPIIE	57,8	5,7	180,8	69,7	128,0	30,4	144,0	27,8	96,5	23,0	91,0	30,1
C30CPIII	49,5	13,2	139,5	83,4	99,0	20,0	79,8	19,6	74,8	13,2	43,0	17,9
C30CPIII+e	76,5	2,9	120,0	24,3	99,3	9,6	181,0	192,0	165,5	153,1	100,8	97,1
C40CPIIE	66,0	7,0	150,3	35,3	113,5	12,0	85,5	9,1	61,3	26,1	112,3	15,3
C40CPIII	40,5	2,9	148,0	64,9	96,0	12,6	89,0	23,6	73,3	33,1	66,3	15,3
C40CPIII+e	70,3	12,3	187,5	108,5	108,0	12,6	122,3	102,5	104,8	87,6	79,3	17,1

\*Tempo de exposição correspondente a 365 dias de idade (início dos ciclos).

\*\* DP = desvio padrão.

A Figura 7. 31, a Figura 7. 32 e a Figura 7. 33 mostram o potencial de corrosão ao longo do ciclo de envelhecimento acelerado, para as classes, C20, C30 e C40, respectivamente, com cobrimento de 20 mm, considerando-se a idade de 365 dias correspondente ao tempo inicial de exposição aos ciclos de envelhecimento.

Observa-se que, para as classes C20 e C30, a probabilidade de corrosão ao final dos ciclos de envelhecimento é superior a 90% para todos os tipos de materiais cimentícios, enquanto que para a classe C40 essa probabilidade está na faixa da incerteza.

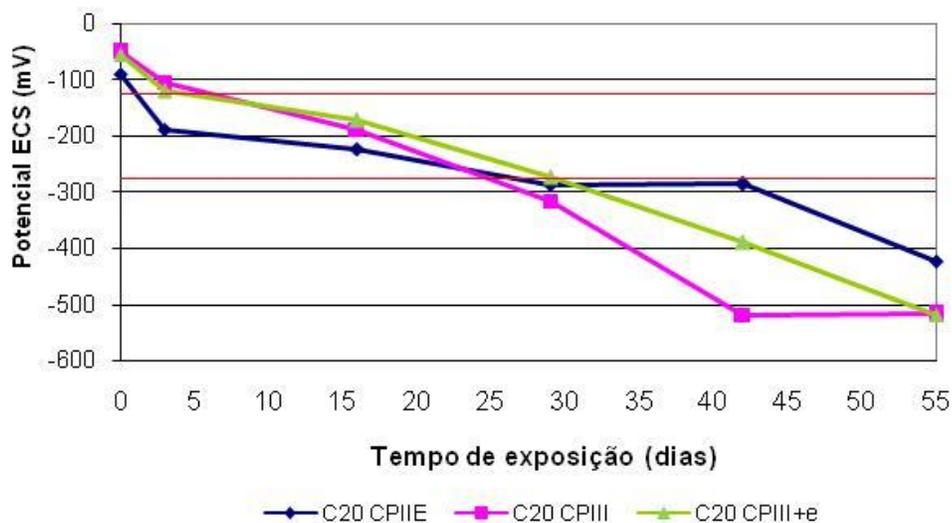


Figura 7. 31 – Potencial de corrosão (ECS) durante os ciclos de envelhecimento para os traços T1 (C20CPIIE); T2 (C20CPIII) e T3 (C20CPIII+escória) e cobertura 20 mm.

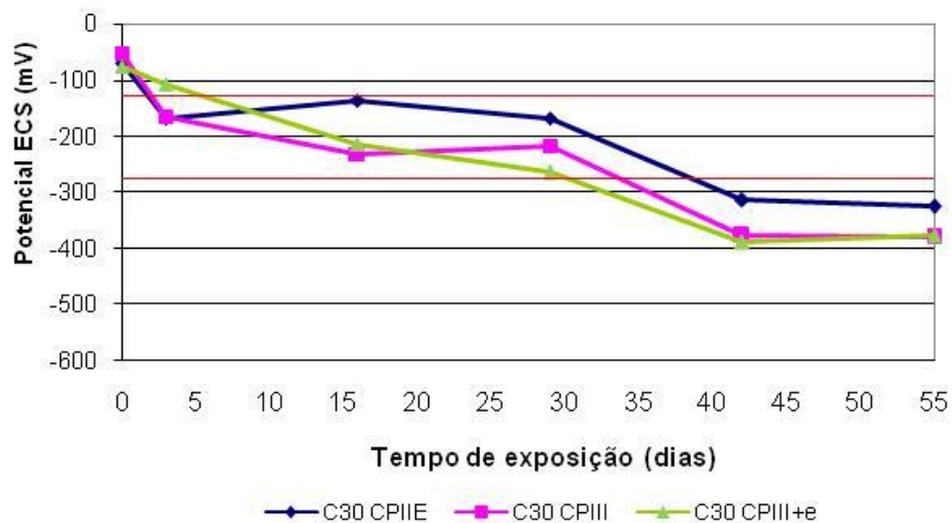
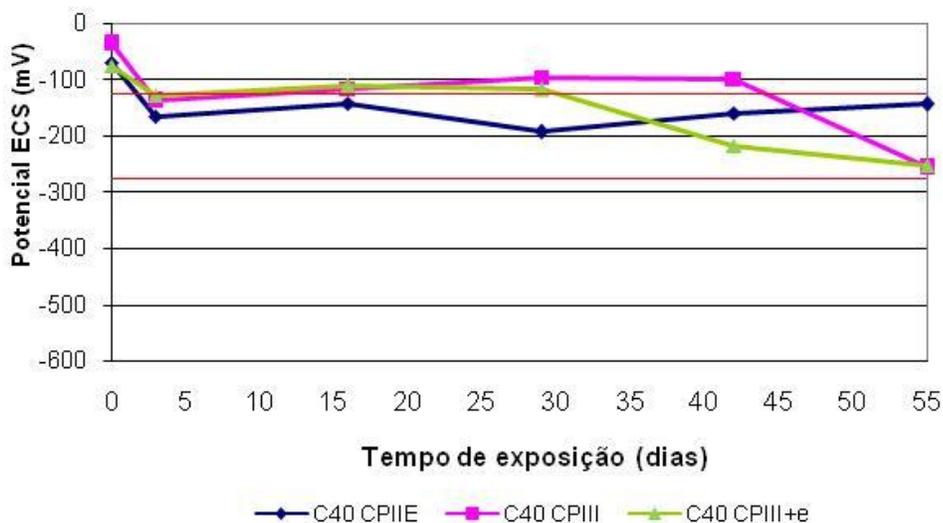


Figura 7. 32 – Potencial de corrosão (ECS) durante os ciclos de envelhecimento para os traços T4 (C20CPIIE); T5 (C20CPIII) e T6 (C20CPIII+escória) e cobertura 20 mm.



**Figura 7. 33 – Potencial de corrosão (ECS) durante os ciclos de envelhecimento para os traços T10 (C40CPIIE); T11 (C40CP III) e T12 (C40CP III+escória) e cobrimento 20 mm.**

A Figura 7. 34, a Figura 7. 35 e a Figura 7. 36 mostram o potencial de corrosão ao longo do ciclo de envelhecimento acelerado, para as classes, C20, C30 e C40, respectivamente, com cobrimento de 30 mm, considerando-se a idade de 365 dias correspondente ao tempo inicial de exposição aos ciclos de envelhecimento.

O aumento do cobrimento diminuiu a probabilidade de corrosão. As misturas de classe C20 com CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória apresentaram uma probabilidade de corrosão no limite dos 10%, enquanto a mistura contendo CP II-E-32 apresentou probabilidade incerta. Todas as misturas das classes C30 e C40 apresentaram potencial de corrosão menor que 10%, apesar do ensaio ser altamente agressivo. Isso comprova a importância da escolha de um cobrimento adequado. As figuras mostram ainda que, apesar das misturas com altos teores de escória de alto-forno apresentarem uma maior tendência à carbonatação, o seu comportamento quanto à corrosão apresentou-se satisfatório.

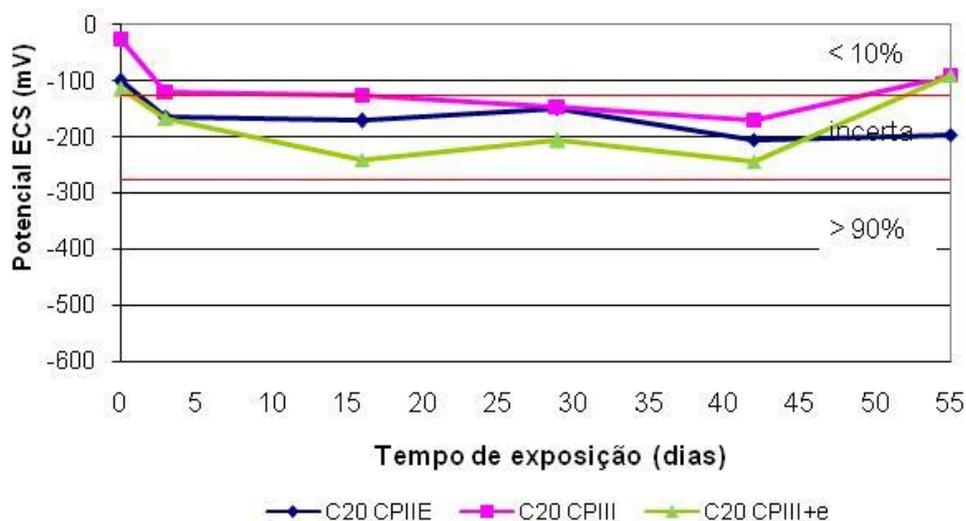


Figura 7. 34 – Potencial de corrosão (ECS) durante os ciclos de envelhecimento para os traços T1 (C20CPIIE); T2 (C20CPIII) e T3 (C20CPIII+escória) e cobertura 30 mm.

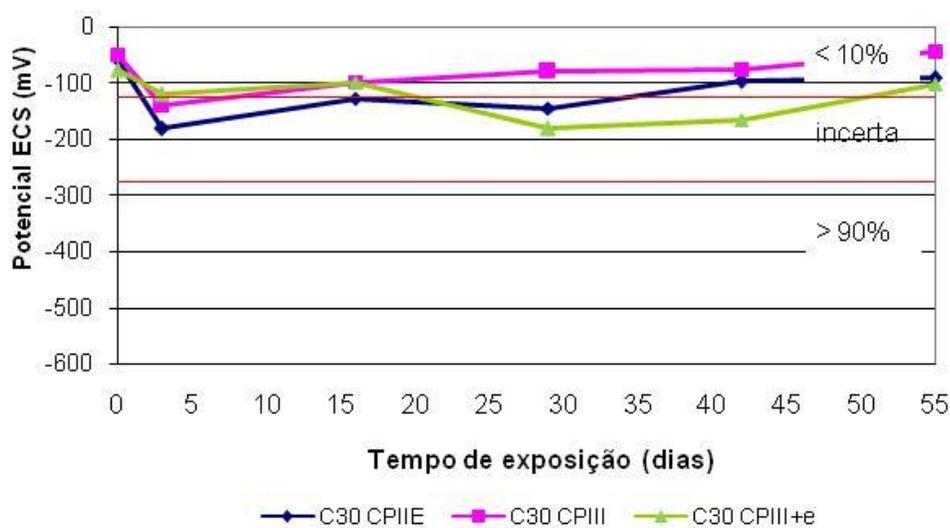
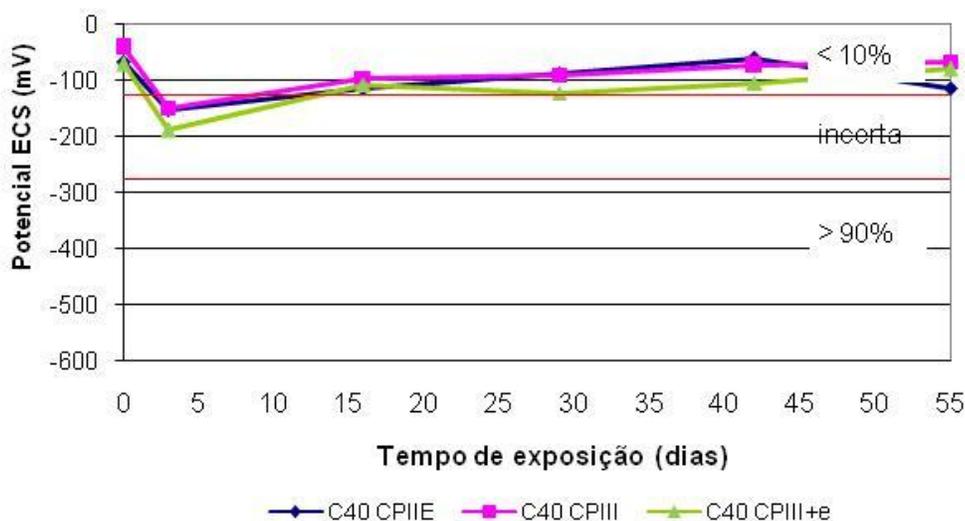


Figura 7. 35 – Potencial de corrosão (ECS) durante os ciclos de envelhecimento para os traços T4 (C30CPIIE); T5 (C30CPIII) e T6 (C30CPIII+escória) e cobertura 30 mm.



**Figura 7. 36 – Potencial de corrosão (ECS) durante os ciclos de envelhecimento para os traços T10 (C40CPIIE); T11 (C40CPIII) e T12 (C40CPIII+escória) e cobertura 30 mm.**

Em todas as situações de envelhecimento acelerado, verifica-se uma queda brusca dos potenciais de corrosão após a primeira exposição à câmara salina (primeiro ciclo), da mesma forma que foi observado nos resultados de resistividade elétrica. Vários são os fatores que podem ter contribuído para esse fenômeno.

Em primeiro lugar, os corpos-de-prova foram expostos a ambiente de laboratório por 337 dias antes do início dos ciclos de envelhecimento. Durante este período, iniciou-se a frente de carbonatação. Como mencionado, frentes de carbonatação podem tornar os valores do potencial mais eletropositivos com diferenças em relação aos valores reais da ordem de 200mV a 300 mV (CASCUDO, 2005). Assim, a carbonatação superficial pode ter sido parcialmente responsável pelos valores mais eletropositivos iniciais de potencial de corrosão. Parte dos produtos da carbonatação podem ter sido solubilizados na câmara salina, tornando o potencial de corrosão mais eletronegativo.

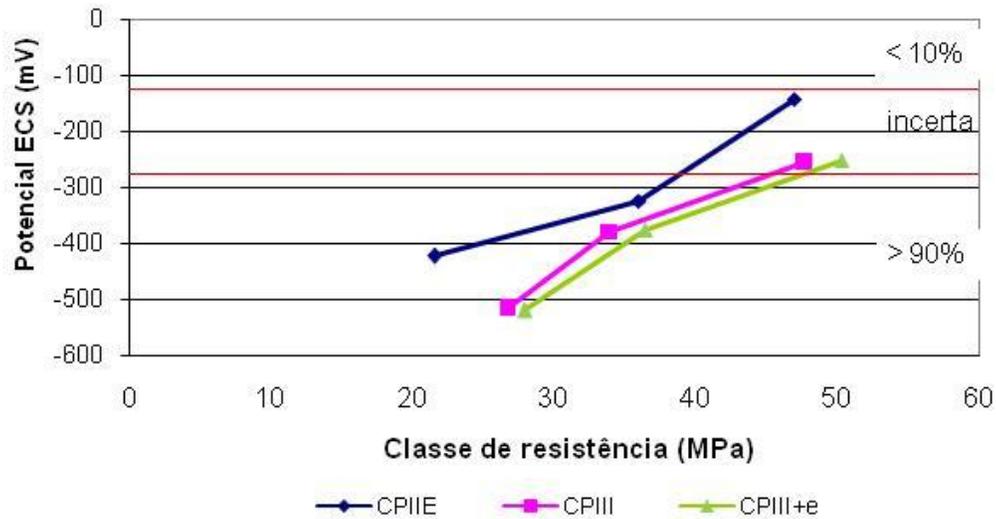
A armadura no interior do concreto está protegida da corrosão, uma vez que esse meio alcalino conduz a formação de uma película protetora passiva envolvendo o aço. Por outro lado, a maior carbonatação das misturas contribui para a diminuição do pH e da capacidade de fixação dos cloretos, pois, nessa situação, a estabilidade do cloroaluminato

de cálcio ou sal de Friedel é menor (HÄKKINEN, 1993; BAUER, 1995, SURYAVANSHI; SWAMY; NARAYAN, 1996; COELHO, 2002). Essa camada passiva estável que tende a corroer em meios ácidos pode ser quebrada localmente pela contaminação com sais ou pela diminuição do pH (THANGAVEL; RENGASWAMY, 1998).

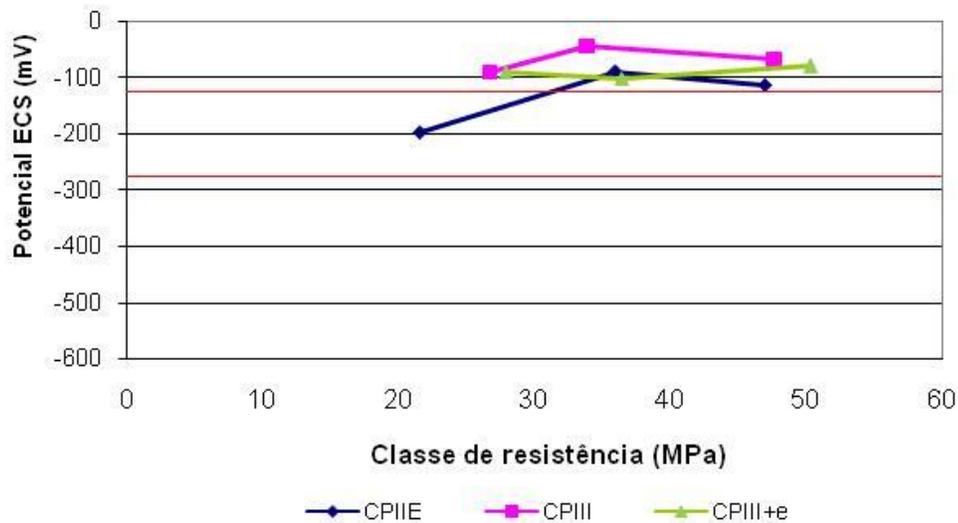
Outro fator que deve ser mencionado é o teor de umidade do concreto, que distorce os valores de potencial de corrosão para mais eletronegativos, com diferenças em relação aos valores reais da ordem de 100mV a 200 mV (CASCUDO, 2005). Ao realizar-se as medidas ao início do ciclo de envelhecimento acelerado, ou seja, aos 365 dias de idade, os corpos-de-prova estavam relativamente secos, apresentando potencial mais eletropositivos. Ao serem submetidos à câmara de névoa salina por 3 dias, a umidade superficial desses corpos-de-prova aumentou, tornando o potencial de corrosão mais eletronegativo, sem necessariamente significar que houve uma mudança significativa da probabilidade de corrosão.

A súbita queda do potencial de corrosão após a primeira exposição à câmara de névoa salina pode também ser reflexo da exposição a cloretos. Segundo Cascudo (2005), a frente de cloretos pode tornar o potencial de corrosão mais eletronegativo.

A Figura 7. 37 e a Figura 7. 38 mostram o potencial de corrosão após o quinto ciclo de envelhecimento, em função da classe real de resistência, à compressão para os cobrimentos de 20 mm e 30 mm, respectivamente.



**Figura 7. 37 – Potencial de corrosão (ECS) para o cobrimento de 20 mm após o quinto ciclo de envelhecimento em função da classe de resistência real do concreto.**



**Figura 7. 38 – Potencial de corrosão (ECS) para o cobrimento de 30 mm após o quinto ciclo de envelhecimento em função da classe de resistência real do concreto.**

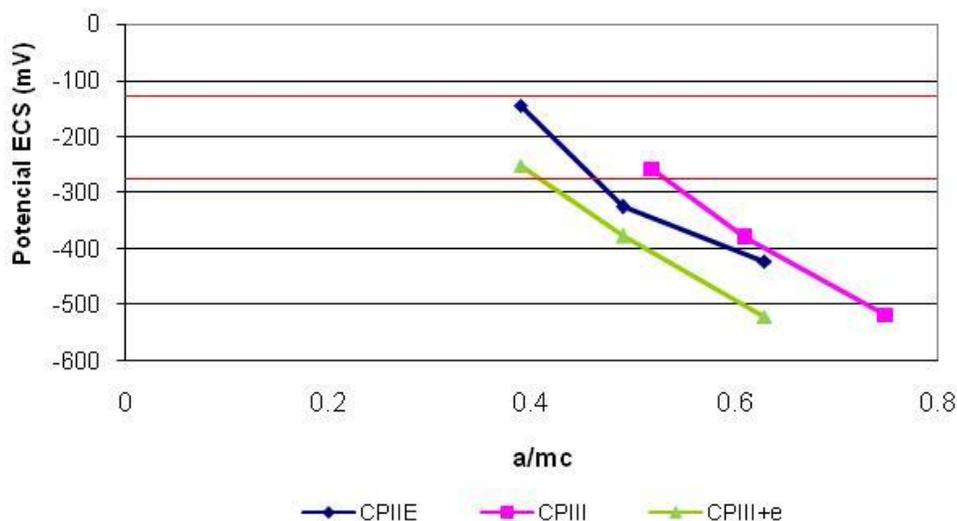
Observa-se que para uma mesma classe de resistência à compressão, os concretos com 20 mm de cobrimentos apresentam potenciais muito mais eletronegativos do que

aqueles com 30 mm de cobrimento, conforme esperado. Também é clara a tendência dos potenciais de corrosão se tornarem mais eletropositivos com o aumento da classe de resistência.

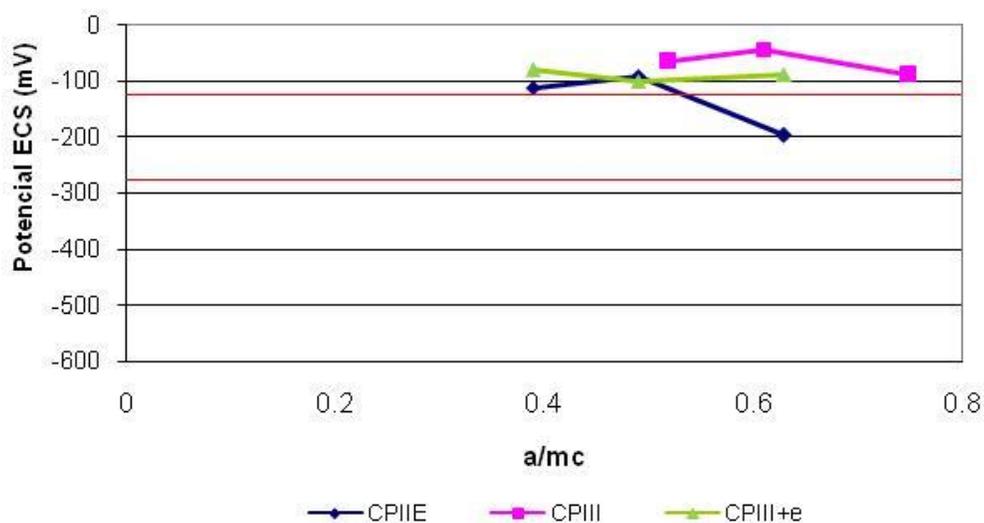
Na Figura 7. 38 observa-se uma tendência das misturas com CP-II-E-32 apresentarem potenciais mais negativos. No entanto, como o desvio padrão do potencial destas misturas foi muito elevado, estatisticamente não há diferença entre estas misturas.

A Figura 7. 39 e a Figura 7. 40 mostram o potencial de corrosão após o quinto ciclo de envelhecimento, em função da relação água/materiais cimentícios para os cobrimentos de 20 mm e 30 mm, respectivamente.

Para os corpos-de-prova com cobrimento de 20 mm fica claro que o aumento da relação água/materiais cimentícios torna o potencial de corrosão mais eletronegativo. Contudo, para os corpos-de-prova com cobrimento de 30 mm a influência da relação água/materiais cimentícios não é tão grande.



**Figura 7. 39 – Potencial de corrosão (ECS) para o cobrimento de 20 mm após o quinto ciclo de envelhecimento em função da relação água/materiais cimentícios.**



**Figura 7. 40 – Potencial de corrosão (ECS) para o cobrimento de 30 mm após o quinto ciclo de envelhecimento em função da relação água/materiais cimentícios.**

## 7.6 Considerações sobre o capítulo

A corrosão das armaduras é um mecanismo complexo. Tanto a penetração de cloretos como a carbonatação representam um papel importante na despassivação das armaduras. É fundamental a avaliação do efeito sinérgico desses dois mecanismos de deterioração.

A penetração de cloretos e a carbonatação foram estudadas tanto no estado natural de envelhecimento, como também por meio de ensaios acelerados cíclicos, que objetivaram simular os ciclos de molhagem e secagem aos quais as estruturas estão expostas durante a sua vida útil e o efeito sinérgico da penetração de cloretos e da carbonatação. A penetração de cloretos foi avaliada por meio da aspersão de nitrato de prata e a medida da profundidade de precipitados brancos, enquanto a carbonatação foi avaliada por meio da aspersão de

fenolftaleína. Além disso, a corrosão foi avaliada por meio da determinação da resistividade elétrica e do potencial de circuito aberto.

Quanto à penetração de cloretos no estado de envelhecimento natural, a mistura com CP III-32-RS + escória apresentou maior profundidade de precipitados brancos. No entanto, todas as demais misturas, quando comparadas por classe, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Isso poderia ser explicado por não ser possível separar a contribuição dos cloretos dos carbonatos, havendo um consenso de que maiores teores de escória de alto-forno podem proporcionar maiores profundidades de carbonatação. Além disso, as profundidades de precipitados brancos durante o período estudado (um ano) foram relativamente pequenas, dificultando a diferenciação das misturas.

Quando se analisaram as profundidades de precipitados brancos em função da relação água/material cimentício, observou-se que elas aumentam com o aumento da relação água/materiais cimentícios. No que tange à influência da resistência à compressão, a profundidade de precipitados diminuiu com o aumento da classe de resistência à compressão.

Nos ensaios cíclicos, as profundidades de precipitados brancos diminuíram com o aumento da classe de resistência do concreto, de maneira geral, os concretos de classe C20 apresentam profundidades de precipitados em torno de 2,5 vezes maior do que os de classe C40.

Observou-se uma mudança de tendência das misturas ao compararem-se os resultados dos ensaios aos 365 dias e após os ensaios cíclicos acelerados, pois no estado de envelhecimento natural nem sempre foi possível diferenciar as misturas, enquanto nos ensaios acelerados, ao final do quinto ciclo, observou-se uma tendência clara das misturas com CP II-E-32 apresentarem maiores profundidades e das misturas contendo CP III-32-RS apresentarem menores profundidades de precipitados brancos.

Isso pode ser devido ao fato das misturas com maiores teores de escória de alto-forno apresentarem maiores profundidades de carbonatação e da carbonatação dificulta a visualização dos precipitados brancos ou talvez porque a carbonatação tenha colmatado os poros, dificultando a penetração de cloretos. Além disso, a adição de escória de alto-forno

promove o refinamento dos poros, a diminuição da permeabilidade e, conseqüentemente, da difusão de cloretos.

No que concerne à relação água/materiais cimentícios, as profundidades de precipitados brancos aumentaram com o aumento da relação água/materiais cimentícios.

Da mesma forma que ocorreu na análise da penetração de cloretos na condição de envelhecimento natural, foi difícil diferenciar-se as misturas quanto à profundidade de carbonatação natural. Ao compararem-se as misturas por classe de resistência não se observou nenhuma diferença estatisticamente significativa, com exceção das misturas de classe C30, onde a mistura contendo CP III-32-RS + escória apresentou maior profundidade de carbonatação do que a mistura CP II-E-32.

Já nos ensaios acelerados, observou-se uma tendência das misturas contendo CP III-32-RS apresentarem menor profundidade de carbonatação. As misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS + escória apresentaram profundidades sem diferenças estatisticamente significativas nas misturas de classes C20 e C30.

Nos concretos de classe C40, o comportamento foi diferente, sendo que as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS não apresentaram diferenças significativas de profundidade de carbonatação e as misturas contendo CP III-32-RS + escória apresentaram maiores profundidades de carbonatação.

A resistividade elétrica das misturas também foi avaliada nas condições de envelhecimento natural e acelerado. Na condição de envelhecimento natural, não se observaram diferenças estatisticamente significativas entre as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS, na maior parte dos resultados. As misturas contendo CP III-32-RS+escória apresentaram as maiores resistividades elétricas e, portanto menor risco de corrosão.

Na condição de envelhecimento acelerado, observou-se que houve uma diminuição significativa da resistividade elétrica após a primeira exposição (primeiro ciclo) à câmara salina. Isso pode ser devido a: 1) possível existência de uma camada superficial com resistividade bem diferente; 2) efeito da carbonatação sobre a resistividade; 3) mudança de umidade do corpo-de-prova e 4) ataque de cloretos.

Na classe C20, os concretos com CP II-E-32 e CP III-32-RS apresentaram resistividades elétricas sem diferenças estatisticamente significativas, com risco de corrosão

entre baixo e desprezível. Já a mistura com CP III-32-RS+escória apresentou risco de corrosão alto.

Na classe C30, as misturas com CP II-E-32 e CP III-32-RS, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas na resistividade elétrica nos dois últimos ciclos e seu risco de corrosão poderia ser considerado desprezível. Já a mistura com CP III-32-RS+escória apresentou as menores resistividades elétricas nos dois últimos ciclos e seu risco de corrosão foi no limite entre baixo e desprezível. Na classe C40, todas as misturas apresentaram risco desprezível de corrosão.

A resistividade elétrica diminuiu com o aumento da relação água/materiais cimentícios e aumentou com o aumento da classe de resistência à compressão.

O potencial de circuito aberto foi medido para verificar a probabilidade da ocorrência de corrosão. Na condição de envelhecimento natural, as misturas de classe C20, C30 e C40 apresentaram probabilidade de corrosão de até 10%. Observou-se, porém, que esse ensaio não é uma ferramenta adequada para diferenciar misturas ou corpos-de-prova com cobrimentos diferentes.

Na condição de envelhecimento acelerado, não foi possível diferenciar as misturas nos corpos-de-prova com 20 mm de cobrimento ao final do envelhecimento acelerado. Já no caso dos corpos-de-prova com cobrimento de 30 mm, as misturas com CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória apresentaram potencial de corrosão sem diferenças estatisticamente significativas. As misturas com CP II-E-32 (classes C20 e C40) apresentaram potencial estatisticamente mais negativo.

Observou-se que a probabilidade de corrosão ao final dos ciclos de envelhecimento para as classes C20 e C30 foi superior a 90% para todos os tipos de materiais cimentícios, enquanto que para a classe C40 essa probabilidade está na faixa da incerteza para o cobrimento de 20 mm. O aumento do cobrimento para 30 mm diminui a probabilidade de corrosão. Todas as misturas de classe C30 e C40 apresentaram potencial de corrosão menor que 10%.

O potencial de corrosão se tornou mais eletropositivo com o aumento da classe de resistência à compressão e com o aumento do cobrimento.

Para os corpos-de-prova com cobrimento de 20 mm fica claro que o aumento da relação água/materiais cimentícios torna o potencial de corrosão mais eletronegativo. Contudo, para os corpos-de-prova com cobrimento de 30 mm a influência da relação água/materiais cimentícios não é tão grande.

Quanto ao tipo de material cimentício, nos corpos-de-prova com 20 mm de cobrimento não foi possível a diferenciação das misturas e nos corpos-de-prova com 30 mm de cobrimento, as misturas com CP II-E-32 apresentaram-se mais eletronegativas.

De maneira geral, os ensaios estudados neste capítulo mostram que o aumento da adição de escória de alto-forno ou não exerce nenhum efeito sobre a durabilidade do concreto, ou exerce um efeito benéfico, dependendo da classe de concreto, do tipo de condição de envelhecimento e do método de ensaio utilizado na avaliação.

## **CAPÍTULO 8 – Modelos empíricos para dosagem e modelos para previsão da vida útil**

### **8.1 Introdução**

Este capítulo apresenta dois aspectos diferentes desta pesquisa. Primeiro, para cada propriedade estudada nos Capítulos 5 e 6, foram desenvolvidos modelos matemáticos empíricos para auxiliar em futuras dosagens de concretos com escória de alto-forno. Os modelos empíricos para dosagem foram desenvolvidos a partir dos resultados de ensaio obtidos, relacionando-os com a composição de cada mistura. Isso pode ser uma ferramenta útil no caso de especificações por desempenho que contenham requisitos para as propriedades estudadas. Os modelos empíricos para dosagem foram desenvolvidos a partir dos resultados de ensaio obtidos, relacionando-os com a composição de cada mistura.

Segundo traz também a aplicação dos resultados obtidos experimentalmente (Capítulos 5, 6 e 7) nos modelos de previsão de vida útil apresentados e discutidos no capítulo 3. A seleção dos modelos utilizados baseou-se no fato de que um *modelo viável* é um modelo que não apenas é consistente com os resultados experimentais, como também utilize propriedades ou parâmetros facilmente determinados durante uma investigação

experimental. Modelos complexos que necessitem de parâmetros de determinação complexa, dificilmente poderão ser utilizados para a comparação de diversas alternativas de misturas potencialmente utilizáveis em uma determinada estrutura.

## 8.2 Modelos matemáticos empíricos para dosagem de concretos com escória de alto-forno

### 8.2.1 Modelo empírico para a previsão da retração por secagem a partir da composição da mistura

Por meio da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados da retração e partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa, desenvolveram-se três modelos empíricos para a previsão da retração por secagem aos 42 dias, aos 140 dias e aos 365 dias (Equação 8. 1, Equação 8. 2 e Equação 8. 3), com coeficientes de correlação<sup>1</sup> de 0,92, 0,99 e 0,98, respectivamente. Os índices de regressão quadrática de cada modelo encontram-se na Tabela 8. 1. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$\varepsilon_{42} = b_0 + b_1 \cdot V_{mc} + b_2 \cdot V_e + b_3 \cdot a/mc + b_4 \cdot V_{mc}^2 + b_5 \cdot V_{mc} \cdot V_e + b_6 \cdot V_{mc} \cdot a/mc + b_7 \cdot V_e^2 + b_8 \cdot V_e \cdot a/mc + b_9 \cdot a/mc^2$$

**Equação 8. 1**

<sup>1</sup> Coeficiente de determinação  $R^2$ : Quadrado do coeficiente de correlação (R) do momento do produto de Pearson. O valor  $R^2$  pode ser interpretado como a proporção da variância em y que pode ser atribuída à variância em x. É um número entre 0 e 1 que indica quão bem a curva de tendência é capaz de estimar os valores em relação aos dados reais. Números próximos ou iguais a 1 indicam maior proximidade entre os valores estimados e os valores reais.

$$\varepsilon_{140} = b_0 + b_1 \cdot V_e + b_2 \cdot V_{mc} + b_3 \cdot a/mc + b_4 \cdot V_e^2 + b_5 \cdot V_e \cdot V_{mc} + b_6 \cdot V_e \cdot a/mc + b_7 \cdot V_{mc}^2 + b_8 \cdot V_{mc} \cdot a/mc + b_9 \cdot a/mc^2$$

**Equação 8. 2**

$$\varepsilon_{365} = b_0 + b_1 \cdot V_{mc} + b_2 \cdot V_e + b_3 \cdot a/mc + b_4 \cdot V_{mc}^2 + b_5 \cdot V_{mc} \cdot V_e + b_6 \cdot V_{mc} \cdot a/mc + b_7 \cdot V_e^2 + b_8 \cdot V_e \cdot a/mc + b_9 \cdot a/mc^2$$

**Equação 8. 3**

Sendo:

$\varepsilon$  = retração por secagem (%);

$V_e$  = teor de escória de alto-forno (%);

$a/mc$  = relação água/ materiais cimentícios;

$V_{mc}$  = consumo de material cimentício ( $kg/m^3$ ) e

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_9$  = índice da regressão .quadrática.

**Tabela 8. 1 – Índices da regressão quadrática para a previsão da retração por secagem a partir da composição da mistura.**

Índices	42 dias	140 dias	365 dias
b0	9,406	12,09	13,20
b1	-0,02656	-0,01537	-0,03897
b2	-0,01011	-0,03436	-0,00544
b3	-15,80	-20,52	-23,95
b4	1,87E-05	2,77E-05	2,72E-05
b5	7,36E-06	1,38E-05	1,53E-06
b6	0,02279	0,01389	0,03761
b7	3,49E-05	2,39E-05	2,3E-05
b8	0,00663	0,03028	0,00414
b9	6,530	8,229	10,12

Cabe salientar que os modelos desenvolvidos são aplicáveis a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de consumo de material

cimentício, teor de escória e relação água/materiais cimentícios. Não se pode garantir uma boa previsão da retração por secagem para misturas que estejam fora dessa faixa.

Da mesma forma que se criou um modelo de retração por secagem correlacionando essa propriedade com o teor de escória, a relação água/materiais cimentícios e o consumo de material cimentício, tentou-se criar um modelo correlacionando a retração por secagem com a classe de resistência e a relação água/materiais cimentícios. No entanto, o coeficiente de determinação encontrado foi baixo ( $R^2 = 0,197$ ), o que indica que especificar a classe de resistência e a relação máxima água/materiais cimentícios não garante necessariamente que a retração ficará abaixo dos valores especificados. Como a fissuração por retração é função, entre outros fatores, da retração, a especificação da classe de resistência e da relação água/materiais cimentícios máxima *per si* não garante baixa fissuração.

## 8.2.2 Modelo empírico de previsão da absorção por capilaridade a partir da composição da mistura

Por meio da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados da absorção capilar e partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa, desenvolveu-se um modelo empírico para a previsão da absorção capilar (Equação 8. 4), com coeficiente de determinação de 0,94. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$AC = -269,94 + 0,837*V_{mc} - 0,3575*V_e + 521,43*a/mc - 0,000579*V_{mc}^2 + 5,97E-07*V_{mc}*V_e - 0,885*V_{mc}*a/mc + 0,000258*V_e^2 + 0,010*V_e*a/mc - 222,91*a/mc^2$$

**Equação 8. 4**

Sendo:

AC = absorção capilar (g/cm<sup>2</sup>);

V<sub>e</sub> = teor de escória de alto-forno (%);

a/mc = relação água/ materiais cimentícios;

V<sub>mc</sub> = consumo de material cimentício (kg/m<sup>3</sup>).

Cabe salientar que o modelo desenvolvido é aplicável a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de consumo de material cimentício, teor de escória e relação água/materiais cimentícios. Não se pode garantir uma boa previsão da absorção capilar para misturas que estejam fora dessa faixa.

Da mesma forma que se criou um modelo de absorção capilar correlacionando essa propriedade com o teor de escória, a relação água/materiais cimentícios e o consumo de material cimentício, tentou-se criar um modelo correlacionando a absorção capilar com a classe de resistência e a relação água/materiais cimentícios. O coeficiente de determinação encontrado foi baixo ( $R^2 = 0,597$ ), o que indica que especificar a classe de resistência e a relação máxima água/materiais cimentícios não garante necessariamente que a absorção capilar esteja abaixo de valores especificados. Isso porque para uma mesma classe e relação água/materiais cimentícios, concretos preparados com diferentes consumos de materiais cimentícios e teor de adição poderão apresentar matrizes com densidade e porosidade diferentes.

### 8.2.3 Modelo empírico para a previsão da resistência à compressão axial a partir da composição da mistura

Por meio da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados das resistências à compressão axial média aos 63 dias e partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa, desenvolveu-se um modelo empírico para a previsão da resistência à compressão aos 63 dias (Equação 8. 5), com coeficiente de determinação de 0,96. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$f_{c63} = -4234,5 + 1,518 \cdot V_e + 7843,5 \cdot a/mc + 12,87 \cdot V_{mc} - 0,01903 \cdot V_e^2 + 0,569 \cdot V_e \cdot a/mc + 0,00086 \cdot V_e \cdot V_{mc} - 3409,7 \cdot a/mc^2 - 12,83 \cdot a/mc \cdot V_{mc} - 0,00897 \cdot V_{mc}^2$$

**Equação 8. 5**

Sendo:

$f_{c63}$  = resistência à compressão axial aos 63 dias (MPa);

$V_e$  = teor de escória de alto-forno (%);

$a/mc$  = relação água/ materiais cimentícios;

$V_{mc}$  = consumo de material cimentício ( $kg/m^3$ ).

Cabe salientar que o modelo desenvolvido é aplicável a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de consumo de material cimentício, teor de escória e relação água/materiais cimentícios. Não se pode garantir uma boa previsão de resistência à compressão axial para misturas que estejam fora dessa faixa.

#### 8.2.4 Modelo empírico para a previsão do módulo de deformação a partir da composição da mistura

Por meio da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados do módulo de deformação médio aos 28 dias e partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa, desenvolveu-se um modelo empírico para a previsão do módulo de deformação aos 28 dias (Equação 8. 6), com coeficiente de determinação de 0,94. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$E_c = 18,22 + 0,124 * V_{mc} - 0,839 * f_{c28} - 0,02736 * V_e - 9,47E-06 * V_{mc}^2 - 0,00301 * V_{mc} * f_{c28} + 1,979E-05 * V_{mc} * V_e + 0,02582 * f_{c28}^2 + 0,00126 * f_{c28} * V_e - 0,000202 * V_e^2 \quad \text{Equação 8. 6}$$

Sendo:

$E_c$  = módulo de deformação aos 28 dias (GPa);

$V_e$  = teor de escória de alto-forno (%);

$V_{mc}$  = consumo de material cimentício ( $kg/m^3$ );

$f_{c28}$  = resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa)

Cabe salientar que o modelo desenvolvido é aplicável a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de consumo de material cimentício e teor de escória. Não se pode garantir uma boa previsão do módulo de deformação para misturas que estejam fora dessa faixa. Não se pode ignorar o fato de que o agregado usado tem influência sobre o módulo de deformação e que todas as misturas estudadas utilizaram o mesmo tipo de agregados.

## 8.2.5 Modelos empíricos de previsão da profundidade de carbonatação acelerada

### 8.2.5.1 A partir da composição da mistura

Por meio da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados da profundidade de carbonatação acelerada (10% de CO<sub>2</sub>) aos 91 dias e partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa, desenvolveu-se um modelo empírico para a previsão da carbonatação acelerada aos 91 dias (Equação 8. 7), com coeficiente de determinação de 0,99. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$X = 7364,8 - 20,6*V_{mc} - 6,1*V_e - 13551,6*a/mc + 0,0138*V_{mc}^2 + 0,00334*V_{mc}*V_e + 20,22*V_{mc} *a/mc + 0,03136*V_e^2 + 2,807*V_e*a/mc + 6020,2*a/mc^2 \quad \text{Equação 8. 7}$$

Sendo:

X = profundidade de carbonatação (mm);

V<sub>e</sub> = teor de escória de alto-forno (%);

a/mc = relação água/ materiais cimentícios;

V<sub>mc</sub> = consumo de material cimentício (kg/m<sup>3</sup>).

Cabe salientar que o modelo desenvolvido é aplicável a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de consumo de material cimentício, teor de

escória e relação água/materiais cimentícios. Não se pode garantir uma boa previsão da carbonatação acelerada aos 91 dias para misturas que estejam fora dessa faixa.

### 8.2.5.2 A partir da composição da resistência média à compressão e da composição da mistura

Conforme se verifica nos resultados de resistência à compressão, alguns concretos não atingiram a classe de resistência desejada. Dessa forma, para verificar o comportamento das diferentes classes de concreto C20, C30, C35 e C40, em função dos três tipos de materiais cimentícios utilizados (CP II E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória) e partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa e de suas respectivas resistências à compressão média, desenvolveu-se um modelo empírico para a previsão da carbonatação acelerada (10% de CO<sub>2</sub>) aos 91 dias (Equação 8. 8). Este modelo partiu da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados da profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias, e obteve coeficiente de determinação de 0,99. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$X = 531,79 - 14,51 \cdot f_{c28} - 2,725 \cdot V_e - 841,24 \cdot a/mc + 0,111 \cdot f_{c28}^2 + 0,00848 \cdot f_{c28} \cdot V_e + 11,94 \cdot f_{c28} \cdot a/mc + 0,01778 \cdot V_e^2 + 1,102 \cdot V_e \cdot a/mc + 417,6 \cdot a/mc^2 \quad \text{Equação 8. 8}$$

Sendo:

X = profundidade de carbonatação (mm);

$f_{c28}$  = resistência à compressão (MPa);

$V_e$  = teor de escória de alto-forno (%);

$a/mc$  = relação água/ materiais cimentícios.

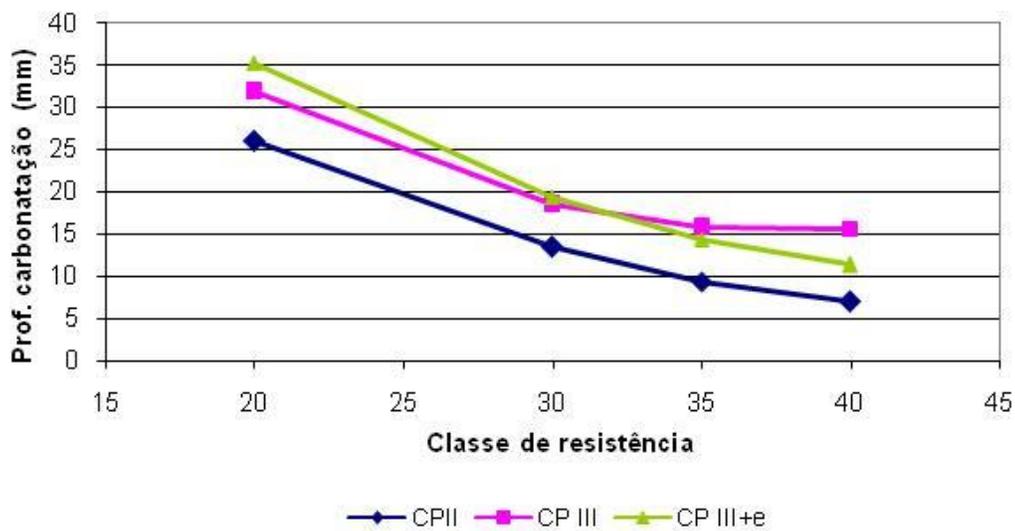
Cabe salientar que o modelo desenvolvido é aplicável a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de teor de escória e relação água/materiais cimentícios. Não se pode garantir uma boa previsão da carbonatação acelerada aos 91 dias para misturas que estejam fora dessa faixa.

Assim, por meio da Equação 8. 8 estima-se a profundidade de carbonatação (Tabela 8. 2), traçando-se na Figura 8. 1, as curvas correspondentes à profundidade de carbonatação em função da classe de resistência estimada (C20, C30, C35 e C40) considerando-se o desvio padrão real.

**Tabela 8. 2 – Estimativa da profundidade de carbonatação acelerada a 10% de CO<sub>2</sub> para as classes de concreto em estudo.**

Traço	Concreto	relação água/materiais cimentícios	Profundidade estimada (mm)
T1	C20CPIIE	0,63	26,0
T2	C20CP III	0,75	31,8
T3	C20CP III+e	0,63	35,4
T4	C30CPIIE	0,49	13,5
T5	C30CP III	0,61	18,4
T6	C30CP III+e	0,49	19,4
T7	C35CPIIE	0,44	9,4
T8	C35CP III	0,56	15,7
T9	C35CP III+e	0,44	14,4
T10	C40CPIIE	0,39	6,9
T11	C40CP III	0,52	15,7
T12	C40CP III+e	0,39	11,4

Na Figura 8. 1 observa-se claramente que as misturas contendo CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória apresentam comportamento semelhante independentemente da classe de resistência. Para todas as classes, as misturas contendo CP II-E-32 apresentaram menores profundidades de carbonatação, comparativamente às misturas preparadas com outros materiais cimentícios.



**Figura 8. 1 – Profundidade de carbonatação acelerada a 10% aos 91 dias, para os concretos das classes 20, 30, 35 e 40 diferentes tipos de materiais cimentícios.**

### 8.2.6 Modelo empírico de previsão da profundidade de carbonatação natural a partir da composição da mistura

Por meio da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados da profundidade de carbonatação natural aos 365 dias e partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa, desenvolveu-se um modelo empírico para a previsão da carbonatação natural aos 365 dias (Equação 8. 9), com coeficiente de determinação de 1,00. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$X = -380 + 1,14 \cdot V_{mc} - 0,348 \cdot V_e + 707,2 \cdot a/mc - 0,00082 \cdot V_{mc}^2 + 0,000439 \cdot V_{mc} \cdot V_e - 1,085 \cdot V_{mc} \cdot a/mc + 0,000233 \cdot V_e^2 + 0,412 \cdot V_e \cdot a/mc - 309,58 \cdot a/mc^2$$

**Equação 8. 9**

Sendo:

X = profundidade de carbonatação (mm);

$V_e$  = teor de escória de alto-forno (%);

a/mc = relação água/ materiais cimentícios;

$V_{mc}$  = consumo de material cimentício ( $\text{kg/m}^3$ ).

Cabe salientar que o modelo desenvolvido é aplicável a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de consumo de material cimentício, teor de escória e relação água/materiais cimentícios. Não se pode garantir uma boa previsão da carbonatação natural aos 365 dias para misturas que estejam fora dessa faixa.

### 8.2.7 Modelo empírico de previsão da carga passante aos 63 dias a partir da composição da mistura

Por meio da regressão quadrática que estatisticamente melhor representa os resultados da carga passante aos 63 dias e, partindo da composição de cada uma das doze misturas estudadas nesta pesquisa, desenvolveu-se um modelo empírico para a previsão da carga passante aos 63 dias (Equação 8. 10), com coeficiente de determinação de 0,88. Os detalhes da regressão encontram-se no Apêndice B.

$$Q_{63} = -822260 + 2468 \cdot V_{mc} + 471 \cdot V_e + 1505833 \cdot a/mc - 1,7 \cdot V_{mc}^2 - 0,3 \cdot V_{mc} \cdot V_e - 2462 \cdot V_{mc} \cdot a/mc - 2,1 \cdot V_e^2 - 289 \cdot V_e \cdot a/mc - 629280 \cdot a/mc^2$$

**Equação 8. 10**

Sendo:

$Q_{63}$  = carga passante aos 63 dias(C);

$V_e$  = teor de escória de alto-forno (%);

a/mc = relação água/ materiais cimentícios;

$V_{mc}$  = consumo de material cimentício ( $\text{kg/m}^3$ ).

Cabe salientar que o modelo desenvolvido é aplicável a misturas com o mesmo tipo de material cimentício e para a mesma faixa de consumo de material cimentício, teor de

escória e relação água/materiais cimentícios. Não se pode garantir uma boa previsão da carga passante aos 63 dias para misturas que estejam fora dessa faixa.

## **8.3 Aplicação de modelos de previsão da vida útil**

### **8.3.1 Aplicação dos modelos de previsão de despassivação por carbonatação**

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica dos modelos de previsão de carbonatação. A partir da revisão bibliográfica encontrada no Capítulo 3, selecionou-se um modelo de previsão de carbonatação para ser utilizado.

O modelo Ushida-Hamada (1928) é o mais difundido pela facilidade de obtenção dos dados necessários para a sua aplicação e, portanto, será utilizado nesta pesquisa. Como todo modelo, ele apresenta limitações. A principal limitação – assim como da maioria dos modelos de carbonatação - consiste na necessidade de resultados de ensaios por períodos extremamente longos, por modelar um mecanismo muito lento.

O modelo Häkkinen (1993) considera algumas condições ambientais, parâmetros relacionados com o tipo de cimento e resistência à compressão média. Como o modelo Häkkinen (1993) não especifica como os parâmetros relacionados com o tipo de cimento podem ser obtidos, não foi possível utilizar tal modelo neste trabalho.

O modelo Zhang *et al.* (1997) é mais complexo e considera a difusão como o mecanismo principal de carbonatação. Além do coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$ , é necessário o conhecimento da concentração molar total de  $\text{CaO}$  na forma de  $\text{Ca(OH)}_2$  na mistura que está disponível para carbonatação.

O modelo de Papadakis *et al.* (1991) também considera a difusão como o mecanismo predominante. Para a sua aplicação, é necessário, além do coeficiente de difusão, o conhecimento do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  e de C-S-H no concreto além da porosidade do concreto carbonatado, sem porém especificar a metodologia para a obtenção desta porosidade.

O modelo do CEB (1997) inclui fatores como o micro clima e a qualidade da cura, que não fazem parte dos modelos comentados acima. Também tem como parâmetro o coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  e requer o conhecimento do grau de hidratação do concreto, o que não é um ensaio normalizado e exige habilidade por parte do operador.

A determinação do coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$  não é uma tarefa fácil. Na realidade, não existe um método de ensaio normalizado para a determinação do coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$ , e os modelos que fazem uso deste coeficiente não especificam como obtê-lo. A previsão da profundidade de carbonatação é altamente influenciada pela metodologia usada para a determinação do coeficiente de difusão do  $\text{CO}_2$ . Portanto, os modelos que usam o coeficiente de difusão não puderam ser utilizados nesta pesquisa.

O modelo probabilístico tem um grau de complexidade elevado, pois considera vários fatores como a umidade, a execução, o gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$ , o micro clima e funções probabilísticas, dificultando o seu uso.

#### **8.3.1.1 Aplicação do modelo da raiz quadrada do tempo (modelo Ushida-Hamada) à carbonatação acelerada**

Os modelos de previsão de vida útil, no que concerne à carbonatação, apresentados no Capítulo 3, são baseados, em sua grande maioria, nas condições de carbonatação natural no longo prazo. No entanto, resolveu-se utilizar o modelo da raiz quadrada do tempo e obter-se o coeficiente de carbonatação acelerado (10% de  $\text{CO}_2$ ) para ser comparado com o coeficiente de carbonatação natural.

O modelo Ushida-Hamada (1928) é o modelo de previsão de carbonatação mais difundido. Por meio de interações múltiplas, determinou-se o coeficiente de carbonatação acelerado (Tabela 8. 3). Como o coeficiente foi determinado a partir das profundidades de carbonatação medidas, ele segue as mesmas tendências que as profundidades de carbonatação discutidas no Capítulo 6, ou seja, são maiores para os concretos contendo CP III-32-RS+escória (maiores teores de escória de alto-forno) e decrescem com o aumento da resistência à compressão.

**Tabela 8. 3 – Coeficiente de carbonatação acelerado.**

Traço	Concreto	Relação água/materiais cimentícios	K acelerado (mm.anos <sup>-1/2</sup> )
T1	C20CPIIE	0,63	42,2
T2	C20CP III	0,75	52,8
T3	C20CPIII+e	0,63	54,9
T4	C30CPIIE	0,49	39,0
T5	C30CP III	0,61	33,1
T6	C30CPIII+e	0,49	47,7
T7	C35CPIIE	0,44	23,0
T8	C35CP III	0,56	25,7
T9	C35CPIII+e	0,44	30,6
T10	C40CPIIE	0,39	15,2
T11	C40CP III	0,52	20,4
T12	C40CPIII+e	0,39	26,5

### 8.3.1.2 Aplicação do modelo da raiz quadrada do tempo (modelo Ushida-Hamada) à carbonatação natural

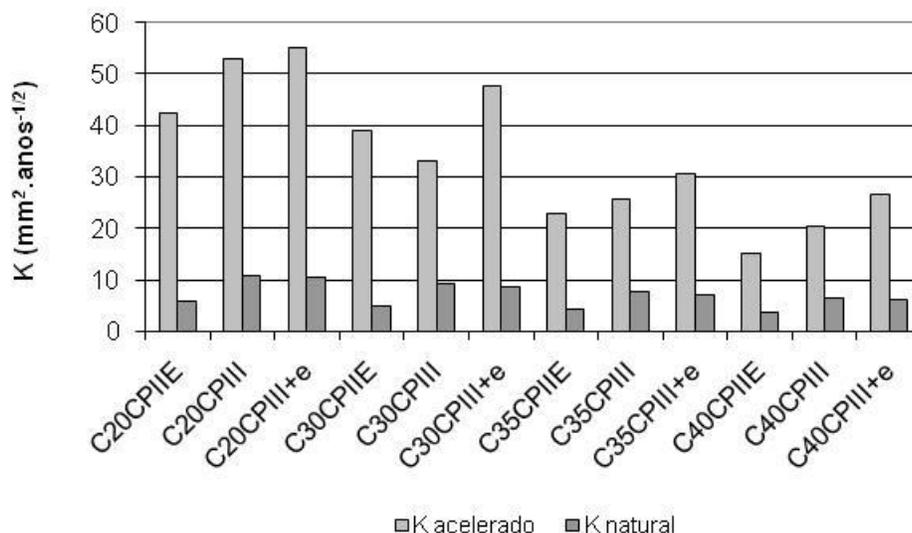
Helene (1993) sugere uma classificação do concreto em função do coeficiente de carbonatação K. Este coeficiente aplica-se a concretos de cimento Portland comum, submetidos à cura adequada, durante período igual ou superior a cinco dias e, a partir daí, mantidos em ambientes de UR entre 60% e 80%, com temperaturas de 20°C a 30°C e concentração normal de gás carbônico no ar (0,03%, em volume). Portanto, não se aplica aos concretos estudados nesta pesquisa.

Por meio de interações múltiplas, determinou-se o coeficiente de carbonatação natural das misturas estudadas (Tabela 8. 4). Como o coeficiente foi determinado a partir das profundidades de carbonatação medidas, ele segue as mesmas tendências que as profundidades de carbonatação discutidas no Capítulo 6.

**Tabela 8. 4 – Coeficiente de carbonatação natural.**

Traço	Concreto	a/ Mat. Cim.	K natural (mm.anos <sup>-1/2</sup> )
T1	C20CPIIE	0,63	5,8
T2	C20CP III	0,75	11,0
T3	C20CPIII+e	0,63	10,6
T4	C30CPIIE	0,49	5,0
T5	C30CP III	0,61	9,1
T6	C30CPIII+e	0,49	8,8
T7	C35CPIIE	0,44	4,3
T8	C35CP III	0,56	7,7
T9	C35CPIII+e	0,44	7,1
T10	C40CPIIE	0,39	3,7
T11	C40CP III	0,52	6,7
T12	C40CPIII+e	0,39	6,3

A Figura 8. 2 mostra que o coeficiente de carbonatação acelerada (10% CO<sub>2</sub>) foi de 4 a 7 vezes maior que o coeficiente de carbonatação natural, o que indica que quando submetidas à condições de ensaio acelerado, cada mistura respondeu de maneira diferente à aquela na condição natural. Isso porque o coeficiente de carbonatação é calculado a partir dos resultados de ensaio e segue a mesma tendência da profundidade de carbonatação medida. Conforme apresentado no Capítulo 6, nos ensaios de carbonatação acelerada, a maior concentração de CO<sub>2</sub> pode alterar o gel C-S-H e modificar a microestrutura do material, dependendo do tipo e quantidade de adição mineral (SANJUÁN *et al.*, 2003).



**Figura 8. 2 – Comparação entre os coeficientes de carbonatação acelerada a 10% CO<sub>2</sub> (Kacelerado) e coeficientes de carbonatação natural (Knatural).**

Isso também foi observado em outras pesquisas (SANJUÁN *et al.*, 2003; BIER *et al.*, 1989), que atribuíram o fato às diferenças em reatividade entre o CO<sub>2</sub> e o gel de C-S-H que se forma pela hidratação do C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S em comparação com o gel que se forma pela reação das escória de alto-forno em meio alcalino, ou seja, parece haver diferentes graus de alteração da microestrutura para diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>. Além disso, as diferenças na dosagem das misturas também influenciam a porosidade e a quantidade de material alcalino capaz de fixar CO<sub>2</sub>.

Assim, poderia usar-se o coeficiente de carbonatação para classificar quais misturas são mais carbonatáveis. No entanto, quando o coeficiente de carbonatação acelerada é utilizado (Figura 8. 2), em alguns casos, obtém-se uma classificação diferente daquela obtida com os coeficientes de carbonatação natural. Por exemplo, nas classes C30, C35 e C40, os coeficientes de carbonatação acelerada das misturas contendo CP III-32-RS+escória são bem maiores que aqueles das misturas contendo CP III-32-RS. No entanto, os coeficientes de carbonatação natural não apresentam diferença significativa entre as misturas com esses dois materiais cimentícios, talvez pelo fato de que o ensaio deveria ter

durado mais do que um ano e as profundidades de carbonatação natural foram ainda muito pequenas.

Dessa maneira, não foi possível (1) determinar uma relação entre a profundidade de carbonatação acelerada e a natural, mostrando que os ensaios acelerados nem sempre refletem o comportamento no longo prazo das misturas; e (2) fazer uma correlação para o período de ensaio natural necessário para atingir os mesmos resultados do ensaio acelerado.

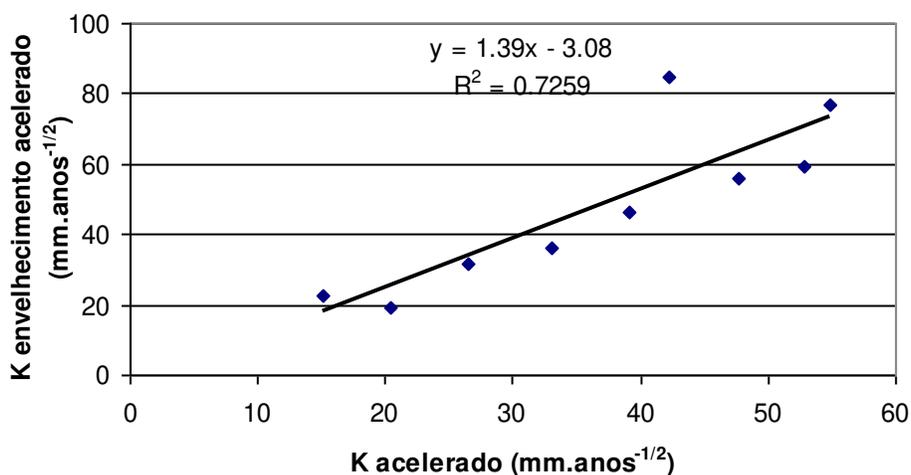
### **8.3.1.3 Aplicação do modelo da raiz quadrada do tempo (modelo Ushida-Hamada) à carbonatação por meio de ensaios cíclicos**

A Tabela 8. 5 apresenta o coeficiente de carbonatação obtido por meio do envelhecimento acelerado (ensaios cíclicos) e compara com os obtidos por ensaios acelerados. Observa-se que o coeficiente de carbonatação dos ensaios cíclicos são maiores, devido ao efeito sinérgico da carbonatação e da penetração de cloretos.

Observa-se que os coeficientes de carbonatação são maiores para os concretos contendo CP III-32-RS+escória (ou seja, maiores teores de escória de alto-forno) e decrescem com o aumento da resistência à compressão. Essa mesma tendência foi observada nos ensaios acelerados apresentados no item 8.3.1.1, conforme pode ser observado na Figura 8. 3.O coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,73$ , o que não foi considerado adequado. Contudo se o valor espúrio for removido, esse coeficiente de determinação se torna  $R^2 = 0,93$ .

**Tabela 8. 5 – Coeficiente de carbonatação acelerada por meio de ciclos de envelhecimento (ensaios cíclicos).**

Traço	Concreto	K acelerado (mm.anos <sup>-1/2</sup> )	K cíclico (mm.anos <sup>-1/2</sup> )
T1	C20CPIIE	42,2	84,8
T2	C20CP III	52,8	59,6
T3	C20CPIII+e	54,9	76,7
T4	C30CPIIE	39,0	46,4
T5	C30CP III	33,1	36,3
T6	C30CPIII+e	47,7	56,0
T10	C40CPIIE	15,2	22,7
T11	C40CP III	20,4	19,5
T12	C40CPIII+e	26,5	31,6



**Figura 8. 3 – Relação do coeficiente de carbonatação obtido por meio do envelhecimento acelerado (ensaios cíclicos descritos no capítulo 7) e do ensaio acelerado de carbonatação (Capítulo 6).**

### 8.3.2 Aplicação dos modelos de previsão de despassivação por cloretos

O Capítulo 3 apresentou os principais modelos de previsão de ingresso de cloretos. A partir dessa revisão bibliográfica, selecionou-se o modelo de previsão de penetração de cloretos para ser utilizado.

Todos os modelos de previsão de ingresso de cloretos encontrados na literatura, com exceção do modelo desenvolvido por Andrade (2001), têm o coeficiente de difusão de cloretos como parâmetro principal de entrada. O modelo Andrade (2001) não pôde ser utilizado, pois uma de suas constantes se relaciona com o tipo de adição mineral, mas o autor não fornece nenhum valor da constante para a escória de alto-forno.

A determinação do coeficiente de difusão de cloretos se dá por meio de ensaios trabalhosos, com alta variabilidade, tais como o descrito na ASTM 1556-04, que normalmente tratam da análise da concentração de cloretos em função da distância da superfície (Anexo A). Por essa razão, no presente trabalho o coeficiente de difusão não foi contemplado no programa experimental.

O coeficiente de difusão aparente, calculado a partir dos perfis de cloretos, inclui os efeitos da fixação de cloretos e pode incluir ingresso de cloretos por absorção e convecção. No caso de ambientes marinhos com zonas de respingos de maré, o efeito combinado de difusão, absorção e convecção pode aumentar significativamente o conteúdo de cloretos no concreto e levar a um valor calculado de coeficiente de difusão aparente que é muitas vezes superior ao coeficiente de difusão efetivo.

Dessa forma, não foi possível a previsão do ingresso de cloretos de maneira mais exata. O coeficiente de difusão foi estimado indiretamente por meio de modelos matemáticos e utilizado nos modelos de previsão de ingresso de cloretos, com finalidades de comparação das misturas preparadas nesta pesquisa, mas não com o intuito de determinar exatamente a vida útil esperada de estruturas de concreto.

Grande parte dos modelos se baseia na segunda Lei de Fick, portanto, decidiu-se usar um modelo que a aplicasse. Além disso, buscou-se um modelo que aliasse facilidade de aplicação e de determinação de dados de entrada. Tendo isso em mente, decidiu-se utilizar o modelo Life-365 (item 8.3.2.1.3).

### 8.3.2.1 Estimativa do coeficiente de difusão de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos é um parâmetro importante no que concerne a despasse da armadura por cloretos. Pesquisas observaram em concretos contendo escória de alto-forno, que este coeficiente pode variar significativamente de aproximadamente  $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $20 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (YANG, 2005; OLEK *et al.*, 2002). Três modelos foram encontrados na literatura para estimar o coeficiente de difusão de cloretos no concreto e serão discutidos a seguir.

#### 8.3.2.1.1 Modelo Luciano e Miltenberger (1999)

Luciano e Miltenberger (1999) desenvolveram um modelo de previsão do coeficiente de difusão de cloretos a partir da composição da mistura (Equação 8. 11). A Tabela 8. 6 apresenta a faixa da composição das misturas a partir das quais o modelo foi obtido.

$$D_p = (5,76 + 5,81x_1 - 0,567x_2 - 1,323x_3 + 0,74x_4 - 2,117x_5 - 2,78x_6 + 0,254x_7 - 0,368x_8 + 1,071x_1x_4 - 2,891x_1x_6 - 1,504x_4x_6)^2$$

**Equação 8. 11**

Sendo:

$D_p$  = coeficiente de difusão de cloretos previsto ( $\text{mm}^2/\text{ano}$ );

$x_1$  =  $(a/mc - 0,45)/0,2$ ;

$x_2$  =  $(V_{mc} - 425)/175$ ;

$V_{mc}$  = consumo de material cimentício ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$x_3$  =  $(\text{teor de sílica ativa} - 5)/5$ ;

$x_4$  =  $(\text{teor de cinza volante} - 22,5)/22,5$

$x_5$  =  $(V_e - 35)/35$ ;

$V_e$  = teor de escória de alto-forno (%);

$x_6$  =  $\log_{10}(t_c - 2)/3$ ;

$t_c$  = tempo de cura, dias;

$x_7$  =  $(\text{temperatura do concreto} - 24)/14$ ;

$x_8$  = 1, para agregado angular e 0 para agregado arredondado.

Recomenda-se a utilização do CDC (coeficiente de difusão de cloretos conservativo) (Equação 8. 12), calculado a partir da Equação 8. 11, que garante aproximadamente 95% de confiança.

$$\text{CDC} = 16 + 1,24 \cdot D_p$$

**Equação 8. 12**

**Tabela 8. 6 - Faixa da proporção das misturas utilizadas no modelo de Luciano e Miltenberger (1999).**

Fator	Faixa
a/mc	0,25 a 0,65
V <sub>mc</sub>	250 a 600
Teor de sílica ativa (%)	0 a 10
Teor de cinza volante (%)	0 a 45
V <sub>e</sub>	0 a 70
t <sub>c</sub>	3 a 1100
Temperatura do concreto ©	10 a 38
Angularidade do agregado	Angular arredondado

Qualquer modelo de regressão matemática pode apresentar erros elevados quando utilizados além das faixas de composição para as quais foi determinado. Dessa maneira, para evitar extrapolação inadequada, é prudente calcular-se a distância estatística  $\Delta$  (Equação 8. 13). Não se aconselha o uso desse modelo para  $\Delta$  superior a 6.

$$\Delta = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 + x_6^2 + x_7^2 + x_8^2)^{1/2}$$

**Equação 8. 13**

$\Delta$  = distância estatística.

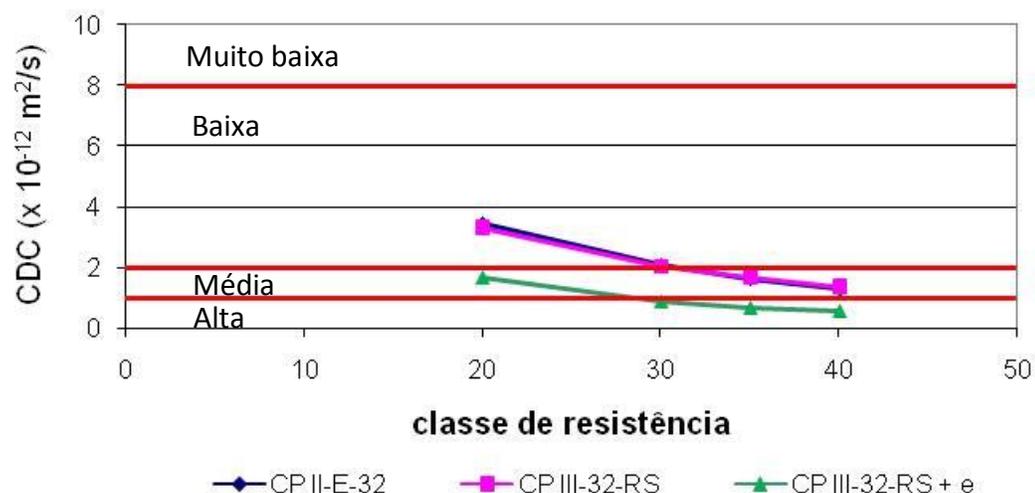
A Tabela 8. 7 apresenta os coeficiente de difusão de cloreto previsto para as misturas desta pesquisa e a distância estatística correspondente.

Como se pode observar, das doze misturas preparadas nesta pesquisa, apenas uma tem relação água/materiais cimentícios fora da faixa da Tabela 8. 6 e quatro misturas (contendo CP III-32-RS + escória) têm teor de escória de alto-forno superior ao da faixa da Tabela 8. 6. No entanto, como todas as misturas apresentaram distância estatística inferior a 6, o CDC obtido por esse modelo será utilizado para fins de comparação das misturas.

**Tabela 8. 7 – Coeficiente de difusão de cloreto previsto aos 63 dias por Luciano e Miltenberger (1999).**

Concreto	Relação água/materiais cimentícios	$D_p$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	CDC ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	$\Delta$
C20CPIIE	0,63	2.4	3.5	2.2
C20CPIII	0,75	2.2	3.3	2.7
C20CPIII+e	0,63	0.9	1.7	2.6
C30CPIIE	0,49	1.3	2.1	1.9
C30CPIII	0,61	1.3	2.1	2.3
C30CPIII+e	0,49	0.3	0.9	2.3
C35CPIIE	0,44	0.9	1.6	1.8
C35CPIII	0,56	0.9	1.7	2.2
C35CPIII+e	0,44	0.1	0.7	2.3
C40CPIIE	0,39	0.6	1.3	1.9
C40CPIII	0,52	0.7	1.3	2.1
C40CPIII+e	0,39	0.0	0.6	2.3

Observa-se na Figura 8. 4, que ao se aumentar o teor de escória de alto forno, diminui-se consideravelmente o coeficiente de difusão de cloretos. Além disso, segundo a especificação por desempenho francesa (BOROGHEL-BOUNY, 2004) (Quadro 2.12), e pelos valores de coeficiente de difusão de cloretos estimado, as misturas C30 CP III-32-RS+escória, C35 CP III-32-RS+escória e C40 CP III-32-RS+escória estariam na classe de durabilidade alta, as misturas C20 CP III-32-RS+escória, C35 CP II-E-32, C35 CP III-32-RS, C40 CP II-E-32 e C40 CP III-32-RS estariam classe de durabilidade média e as demais misturas estariam na classe de durabilidade baixa.



**Figura 8. 4 – CDC aos 63 dias em função da classe de resistência para cada material cimentício. Limites de durabilidade segundo (BAROGHEL-BOUNY, 2004)**

### 8.3.2.1.2 Modelo Olek et al. (2002)

Olek *et al.* (2002), em seu trabalho de especificações por desempenho para pontes de concreto de alto desempenho, criaram um modelo de previsão do coeficiente de difusão de cloretos em concreto de alto desempenho, a partir da carga passante obtida por meio da ASTM C 1202 (Equação 8. 14). Cabe salientar que modelos como este têm sido criticados, pois correlacionam dois mecanismos diferentes.

$$D_{p56} = 2E-15*Q_{56}+4E-13$$

**Equação 8. 14**

Sendo:

$D_{p56}$  = coeficiente de difusão de cloretos previsto aos 56 dias, em m<sup>2</sup>/s;

$Q_{56}$  = carga passante aos 56 dias em Coulombs.

Como os ensaios desta pesquisa foram realizados aos 63 dias, ao invés de 56 dias, a Equação 8. 14 foi extrapolada para os 63 dias.

A Tabela 8. 8 mostra os coeficientes de difusão de cloretos previstos por esse modelo. Como se pode observar, esse modelo prevê coeficientes bem maiores que o CDC do modelo de Luciano e Miltenberger (1999), chegando a ser, em alguns casos 4 vezes maior. No entanto, ambos os modelos mostram a mesma tendência de decréscimo do  $D_p$  na seguinte ordem CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS +escória. o que comprova os benefícios da adição de escória de alto-forno.

**Tabela 8. 8– Coeficiente de difusão de cloreto aos 63 dias previsto por Olek et al. (2002).**

Concreto	Relação água/materiais cimentícios	$D_p$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)
C20CPIIE	0,63	5.1
C20CPIII	0,75	4.5
C20CPIII+e	0,63	2.1
C30CPIIE	0,49	3.1
C30CPIII	0,61	3.1
C30CPIII+e	0,49	1.4
C35CPIIE	0,44	6.4
C35CPIII	0,56	4.8
C35CPIII+e	0,44	2.8
C40CPIIE	0,39	5.3
C40CPIII	0,52	4.0
C40CPIII+e	0,39	2.1

### 8.3.2.1.3 Modelo Life-365

Life-365 é um software gratuito criado por um consórcio estabelecido pelo ACI para o desenvolvimento de um modelo de custo no ciclo de vida com base na segunda lei de Fick, com solução numérica da Função de Erro de Gauss.

Este software permite a entrada das proporções da mistura e, a partir daí, prevê o coeficiente de difusão aparente e a vida útil da estrutura. Havendo medidas do coeficiente de difusão, este pode ser usado.

Cabe salientar que o Life 365 usa como parâmetros de entrada a relação água-material cimentício, o teor de escória, as características geométricas da peça, o local (isto é, condições ambientais como a temperatura), o ambiente de exposição (zona de respingo de maré, etc.) e o tempo de exposição (Equação 8. 15). A concentração superficial de cloretos pode ser um outro parâmetro de entrada, porém usou-se o valor predeterminado pelo programa para cada caso.

O modelo permite o uso de relação água/materiais cimentícios igual ou menor que 0,60 e teor de escória de alto-forno até 70%. O modelo considera que até os 28 dias, a escória de alto-forno não contribui para a diminuição do coeficiente de difusão.

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad \text{Equação 8. 15}$$

Sendo:

$D(t)$  = coeficiente de difusão a uma determinada idade;

$D_{ref}$  = coeficiente de difusão a uma idade de referência;

$m$  = constante que depende da mistura (Equação 8. 16).

$$m = 0,2 + 0,4 \cdot (V_e/70) \quad \text{Equação 8. 16}$$

Sendo  $V_e$  o teor de escória de alto-forno em %.

Como o modelo permite o intervalo de 0,2 a 0,6 para a constante  $m$ , mesmo que se tente extrapolar o teor de escória de alto-forno para incluir as misturas CP III-32-RS + escória, o modelo usará o valor máximo de 0,6, que corresponde a 70% de escória.

Como o programa foi desenvolvido para os EUA, a temperatura e a concentração de cloretos é dada para cada cidade do país. Caso o usuário saiba a temperatura média mensal e as condições de exposição aos cloretos para sua localidade específica, pode inseri-las.

Como dito anteriormente, o coeficiente de difusão aos 28 dias pode ser um parâmetro de entrada ou pode ser estimado pelo programa. A Tabela 8. 9 apresenta uma comparação entre os valores de coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias, estimados pelo programa Life 365 e pelos modelos Luciano e Miltenberger (1999) e Olek *et al.* (2002) para as misturas desta pesquisa. Como se pode observar, Life 365 estima valores de coeficiente de difusão muito superiores aos dois outros modelos citados anteriormente (8.3.2.1.1 e 8.3.2.1.2). Além disso, o modelo não leva em conta a melhoria da microestrutura com a adição de escória de alto-forno, quando o seu teor supera 70%. Como o coeficiente de difusão é um parâmetro de extrema significância, tal diferença pode levar a estimativas de vida útil bem diferentes.

**Tabela 8. 9 – Coeficiente de difusão aos 28 dias estimado por Life 365 , Luciano e Miltenberger (1999) e Olek et al. (2002).**

Mistura	Concreto	Relação água/materiais cimentícios	Life 365 ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Luciano e Miltenberger ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Olek et al. ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)
T1	C20CPIIE	0,63	<sup>1</sup>	3,8	7,6
T2	C20CPIII	0,75	<sup>1</sup>	3,8	5,7
T3	C20CPIII+e	0,63	<sup>1</sup>	1,9	3,0
T4	C30CPIIE	0,49	13,1	2,2	5,6
T5	C30CPIII	0,61	<sup>1</sup>	2,3	8,1
T6	C30CPIII+e	0,49	13,1 <sup>2</sup>	1,0	4,1
T7	C35CPIIE	0,44	9,9	1,7	8,1
T8	C35CPIII	0,56	19,2	1,8	6,0
T9	C35CPIII+e	0,44	9,9 <sup>2</sup>	0,7	3,2
T10	C40CPIIE	0,39	7,5	1,3	6,2
T11	C40CPIII	0,52	15,4	1,5	5,9
T12	C40CPIII+e	0,39	7,5 <sup>2</sup>	0,6	2,7

<sup>1</sup> Mistura apresenta relação água/materiais cimentícios superior ao máximo permitido pelo programa.

<sup>2</sup> Mistura contém volume de escória de alto-forno superior ao máximo permitido pelo programa.

Em estudo recente da avaliação de concretos contendo escória de alto-forno, Thomas *et al.* (2008) estudaram 16 misturas, com relação água/materiais cimentícios de

0,40 a 0,60 e teor de escória de alto-forno de 0% a 65%, expostas a ambiente de zona de maré por 25 anos. O estudo comparou os resultados do coeficiente de difusão e profundidade de penetração de cloretos medidos com os estimados pelo programa. Os autores concluíram que os valores estimados foram muito próximos aos medidos. Por essa razão, esse modelo foi selecionado para este estudo, apesar da limitação do teor de escória de alto-forno e da relação água/materiais cimentícios máximos admitidos.

Como não foram encontrados estudos de longo prazo para os modelos Luciano e Miltenberger (1999) e Olek *et al.* (2002), nem com uma variedade tão grande de misturas contendo escória de alto-forno e tendo em conta os resultados obtidos por Thomas *et al.* (2008), é razoável admitir que o Life 365 é o modelo mais confiável dentre os três.

### **8.3.2.2 Estimativa da vida útil das misturas por meio da aplicação do Life 365**

A fim de avaliar as misturas desta pesquisa, para cada mistura foram realizados três estudos de caso de peças de concreto armado, usando o Life 365. Foi investigado o tempo necessário para que a frente de despassivação por cloretos chegasse à armadura e iniciasse a corrosão.

O caso 1 consiste em uma viga ou pilar de uma estrutura em ambiente urbano, correspondente à classe de agressividade II da NBR 6118/2003. Foi utilizado o limite recomendado por esta norma para o cobrimento mínimo<sup>2</sup>, ou seja, 20 mm (ABNT, 2003b).

O caso 2 consiste em uma viga ou pilar de uma estrutura exposta a ambiente marinho, em zona de respingo, correspondente à classe de agressividade IV da NBR 6118/2003. Foi utilizado o limite recomendado por esta norma para o cobrimento mínimo, ou seja, 40 mm (ABNT, 2003b).

O caso 3 consiste em uma viga ou pilar de uma estrutura exposta a ambiente marinho, a uma distância de 800 m do mar, correspondente à classe de agressividade III da NBR 6118/2003. Foi utilizado o limite recomendado por esta norma para o cobrimento mínimo, ou seja, 30 mm (ABNT, 2003b).

---

<sup>2</sup> Segundo a NBR 6118/2003, para garantir-se o cobrimento mínimo, o projeto e execução devem considerar o cobrimento nominal, o qual é o cobrimento mínimo acrescido de 10 mm de tolerância de execução. Os valores utilizados nesse exemplo são os valores da tabela 7.2 da NBR 6118/2003 menos os 10 mm de tolerância.

Como a temperatura ao longo do ano e a condição de exposição de cloretos não estavam disponíveis para as condições brasileiras, escolheu-se como localidade para o caso 1 a cidade de Atlanta, na Geórgia, cujas condições ambientais e de temperatura são similares ao Paraná (entre 5°C e 26°C). Já para os casos 2 e 3, escolheu-se a cidade de Jacksonville (Flórida), a qual se trata de uma cidade litorânea, cuja temperatura média se aproxima daquelas do litoral de São Paulo (entre 12°C e 28°C).

A Tabela 8. 10 apresenta a vida útil estimada pelo Life 365 a partir do coeficiente de difusão de cloretos estimado pelo próprio programa. Cabe salientar que todas as misturas com teor de escória de alto-forno superior a 70% (CP III-32-RS + escória), o teor utilizado foi 70%. Isso implica que nem todo o benefício da escória de alto-forno das misturas CP III-32-RS + escória pode ser levado em consideração. Além disso, as misturas com relação água/materiais cimentícios superior a 0,60 (relação água/materiais cimentícios máxima permitida pelo programa) não foram analisadas. Só foram estudadas as misturas cuja resistência à compressão e a relação água/materiais cimentícios satisfariam os requisitos da NBR 6118/2003 para as classes correspondentes a cada estudo de caso, ou seja,  $\geq 25$  MPa e  $\leq 0,60$ ,  $\geq 40$  MPa e  $\leq 0,45$  e  $\geq 30$  MPa  $\leq 0,55$ , respectivamente para os casos 1, 2 e 3.

A vida útil estimada pelo Life-365 aumenta com o aumento do teor de escória de alto-forno, isto é, do valor calculado  $m$ . Além disso, como era de se esperar, o coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias diminui com a diminuição da relação água/materiais cimentícios. Portanto, de maneira geral, vida útil das misturas cresceu na ordem CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória e com o aumento da classe de resistência.

O estudo de caso 3 (classe de exposição III) apresentou-se como o mais crítico, com menor vida útil, chegando apenas a 10 anos, apesar do cobrimento utilizado ser compatível com a classe de exposição, segundo a NBR 6118/2003. Apesar desta norma não especificar a vida útil mínima, a vida útil potencial apresentada na Tabela 8. 10 não seria aceitável para a maioria das estruturas em concreto.

**Tabela 8. 10 – Vida útil estimada por meio da aplicação do modelo Life 365 para os três estudos de caso.**

Mistura	Concreto	Relação água/materiais cimentícios	m	Caso 1	Caso 2	Caso 3
				(classe II)	(classe IV)	(classe III)
				Vida útil (anos)	Vida útil (anos)	Vida útil (anos)
T4	C30CPIIE	0,49	0,37	25	NA	4
T6	C30CPIII+e <sup>1</sup>	0,49	0,60	34	NA	6
T7	C35CPIIE	0,44	0,37	27	NA	4
T8	C35CPIII	0,56	0,58	30	NA	NA
T9	C35CPIII+e <sup>1</sup>	0,44	0,60	37	NA	8
T10	C40CPIIE	0,39	0,37	28	5	5
T11	C40CPIII	0,52	0,58	31	NA	5
T12	C40CPIII+e <sup>1</sup>	0,39	0,60	41	13	10

<sup>1</sup> Valor do teor de escória superior ao máximo permitido pelo programa. Valor do teor de escória utilizado nesse caso foi 70%.

Já o estudo de caso 1 (exposição II) apresentou a maior vida útil, porém não chegou aos 50 anos mínimos recomendado pelo Ibracon, nos seus comentários técnicos (2003).

O fato das misturas não atingirem a vida útil de 50 anos é surpreendente, pois uma grande parte das misturas obedece a NBR 6118 (2003) no que tange a relação água/materiais cimentícios máxima e a classe de resistência mínima, conforme pode mostrado na Tabela 8. 10.

Por outro lado, cabe salientar que o coeficiente de difusão, um dos parâmetros mais importantes nos cálculos de vida útil não foi medido, mas sim estimado pelo programa. Isso pode ter levado a erros na determinação da vida útil da estrutura ou reflete o fato da NBR 6118/2003 não apresentar limites adequados para as condições estudadas.

A Tabela 8. 11 apresenta a vida útil estimada pelo Life 365, para o estudo de caso 3, quando são utilizados os coeficientes de difusão de cloretos estimados pelos outros dois modelos da Tabela 8. 9. Ambos os modelos apresentam vida útil crescente com o aumento do teor de escória de alto-forno.

A vida útil estimada para os coeficientes de difusão de Luciano e Miltenberger (1999) é bem superior às estimativas de Olek *et al.* (2002). Todas as misturas contendo CP III-32-RS + escória apresentaram vida útil superior a 50 anos.

**Tabela 8. 11 – Vida útil estimada pelo Life 365 usando o coeficiente de difusão aos 28 dias estimado por Luciano e Miltenberger (1999) e Olek et al. (2002), para o estudo de caso 3.**

Traço	Concreto	Relação água/materiais cimentícios	Luciano e Miltenberger (anos)	Olek et al. (anos)
T4	C30CPIIE	0,49	12	6
T6	C30CPIII+e	0,49	80	18
T7	C35CPIIE	0,44	15	5
T9	C35CPIII+e	0,44	115	23
T10	C40CPIIE	0,39	19	6
T11	C40CP III	0,52	47	11
T12	C40CPIII+e	0,39	135	28

### 8.3.2.3 Aplicação do modelo de Baweja et al.

Baweja *et al.* (1999) criaram um modelo que prevê a vida útil de estruturas em ambiente marinho, a partir do cobrimento e da resistência média aos 28 dias.

De acordo com a classificação para resistividade elétrica, todas as misturas ensaiadas nesta pesquisa podem ser consideradas de alta resistividade. Assim, aplicando-se o modelo Baweja *et al.* (1999) apresentado no Capítulo 3, equação 3.7, pode-se estimar o cobrimento mínimo necessário para que uma vida útil de 50 anos seja alcançada, caso a estrutura esteja em ambiente de respingo de maré (classe de agressividade IV da NBR 6118/2003), da mesma forma que o caso 2 anteriormente analisado (Tabela 8. 12). Escolheu-se 50 anos como a vida útil mínima, seguindo a recomendação do Ibracon, nos seus comentários técnicos (2003).

Como esse modelo apenas considera a resistência à compressão e não as diferenças que possam ocorrer pelo uso de diferentes materiais cimentícios, tais como diferenças na densificação da zona de transição, maior ou menor capacidade de fixação de

cloretos e efeito da carbonatação, todos os concretos de uma mesma classe apresentam cobrimento mínimo semelhante, exceção feita à Classe 20.

**Tabela 8. 12 – Cobrimento mínimo para vida útil de 50 anos em ambiente marinho.**

Traço	Concreto	Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)	Relação água/materiais cimentícios	Cobrimento mínimo necessário (cm)
T1	C20CPIIE	23,1	0,63	44
T2	C20CP III	28,4	0,75	26
T3	C20CPIII+e	29,3	0,63	24
T4	C30CPIIE	37	0,49	13
T5	C30CP III	37,4	0,61	13
T6	C30CPIII+e	38,5	0,49	12
T10	C40CPIIE	48,8	0,39	6
T11	C40CP III	51,8	0,52	5
T12	C40CPIII+e	53,7	0,39	4

Observa-se ainda que apenas os concretos de classes de resistência C20 e C30 apresentam cobrimentos mínimos pouco realistas, enquanto que os concretos de classe C40 requerem cobrimentos razoáveis, porém bem superiores aos especificados pela NBR 6118 (2003).

Cabe salientar que esse modelo é muito simplista e foi desenvolvido a partir de um número limitado de misturas, sendo que apenas uma delas continha escória de alto-forno. Portanto, não se pode, neste momento, assumir que esse modelo seja suficientemente confiável.

## 8.4 Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foram desenvolvidos modelos matemáticos empíricos para dosagem por meio da regressão quadrática correlacionando propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade com o consumo de material cimentício, o teor de escória e a relação água/materiais cimentícios. Todos os modelos propostos apresentaram altos índices de correlação ( $R^2 > 0,9$ ).

Esses modelos têm por objetivo auxiliar no processo de dosagem de concretos com escória de alto-forno, diminuindo o número de misturas a serem preparadas. Eles podem ser uma ferramenta útil no caso de especificações por desempenho que contenham requisitos que coincidam com as propriedades estudadas.

Os modelos desenvolvidos incluíram retração por secagem, absorção por capilaridade, resistência à compressão, módulo de deformação, profundidade de carbonatação acelerada, profundidade de carbonatação natural e carga passante.

Além disso, a vida útil de estruturas foi estimada por meio da aplicação de modelos de previsão da desp passivação da armadura por carbonatação ou por cloretos.

O modelo Ushida-Hamada (1928) foi usado para a determinação tanto do coeficiente de carbonatação acelerado como do coeficiente de carbonatação natural. Os coeficientes de carbonatação acelerados das misturas estudadas nesta pesquisa variaram de 15 a 55 mm/ano<sup>1/2</sup>.

Já os coeficientes de carbonatação natural variaram de aproximadamente 3 a 11 mm/ano<sup>1/2</sup>. Conforme a classificação proposta por Helene (1993), todas as misturas contendo CP II-E-32 poderiam ser consideradas normais, enquanto todas as misturas contendo CP III 32-RS e CP III 32-RS+escória poderiam ser consideradas deficientes.

No entanto, o uso dessa classificação deve ser feito com cautela, pois ela foi criada a partir de misturas que não continham escória de alto-forno, além da umidade relativa dos ensaios na condição natural nesta pesquisa diferirem daquelas utilizadas por Helene (1993).

O coeficiente de carbonatação acelerada (10% CO<sub>2</sub>) foi de 4 a 7 vezes maior que o coeficiente de carbonatação natural, o que indica que quando submetidas à condições de

ensaio acelerado, cada mistura respondeu de maneira diferente daquela na condição natural.

Dessa maneira, não foi possível determinar-se uma relação entre a profundidade de carbonatação acelerada e a natural, mostrando que os ensaios acelerados nem sempre refletem o comportamento no longo prazo das misturas.

Quanto à despassivação por cloretos, um dos parâmetros de entrada mais importantes dos modelos de previsão de vida útil é o coeficiente de difusão de cloretos. Como esta propriedade não foi medida neste trabalho, três modelos foram usados para estimá-la: Luciano e Miltenberger (1999), Olek *et al.* (2002) e Life-365. Os modelos resultaram em coeficientes de difusão bem diferentes, que foram utilizados no programa Life-365 para a previsão da vida útil das misturas, em três estudos de caso, simulando diferentes condições de exposição. Vidas úteis bem maiores foram obtidas quando foram utilizados os coeficientes de difusão obtidos por meio do modelo de Luciano e Miltenberger (1999).

Independentemente do modelo utilizado para a previsão da despassivação por cloretos, a vida útil prevista aumentou com o aumento do teor de escória de alto-forno. De maneira geral, vida útil das misturas cresceu na ordem CP II-E-32, CP III-32-RS e CP III-32-RS + escória e com o aumento da classe de resistência.

## **CAPÍTULO 9 – Análise crítica da NBR 6118/2003 e diretrizes para o desenvolvimento de especificações por desempenho de concretos com adição de escória de alto-forno**

### **9.1 Introdução**

O desenvolvimento e a aplicação de especificações por desempenho não são tarefas fáceis, principalmente por se tratar, no que tange aos aspectos relacionados à durabilidade, de uma abordagem ainda pouco utilizada.

No entanto, alguns requisitos<sup>1</sup> de desempenho já são aplicados nas especificações de concreto atuais no Brasil, sem que ninguém se dê conta. Eles são, por exemplo, o abatimento de tronco de cone (subrequisito<sup>2</sup> de trabalhabilidade relacionado com a construtibilidade), resistência à compressão (subrequisito relacionado com a segurança estrutural) e módulo de elasticidade (subrequisito relacionado com a rigidez estrutural).

---

<sup>1</sup> Atributo qualitativo.

<sup>2</sup> Propriedade relacionada com requisito de desempenho.

Além disso, já existe uma norma brasileira de desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos (NBR 15 575/2008), publicada no ano de 2009, que trata dos vários sistemas, e que entra em funcionamento em 2010 (ABNT, 2008a; ABNT, 2008b).

Este capítulo apresenta recomendações para a elaboração de especificações por desempenho especificamente para concretos, principalmente de misturas com escória de alto-forno, as quais podem apresentar um comportamento diferente das misturas sem adição, no que se refere a algumas propriedades relacionadas com mecanismos de deterioração do concreto e das armaduras.

## **9.2 Uma análise crítica sobre o enfoque prescritivo da NBR 6118/2003**

Em 2003, foi publicada a revisão da NBR 6118/2003, que teve seu escopo desmembrado em duas normas, a NBR 6118/2003 (para projetos) e a 14 931/2003 (para execução), que entraram em vigor em 2004.

A NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) traz classes de agressividade (Quadro 2. 15 e Quadro 2. 16) da mesma forma que outras normas e especificações internacionais, tais como EN 206-1 (EUROCODE, 2000) e ACI 318 (ACI, 2008b). De acordo com essas classes, a norma brasileira faz recomendações de relação água/cimento máxima, resistência à compressão mínima (Quadro 2. 17) e cobrimento nominal mínimo (Quadro 2. 18).

Ao analisarem-se os quadros de classe de agressividade, a primeira questão que se levanta é que elas são relativamente subjetivas. Não existem parâmetros específicos para a classificação do nível de agressividade. Uma classificação mais rigorosa, apresentando, por exemplo, as concentrações de alguns íons agressivos ao concreto ou à armadura, é necessária.

Além disso, a qualidade do concreto é entendida como diretamente relacionada à relação água/cimento e à resistência à compressão (Quadro 2. 17). A norma brasileira não leva em conta o tipo de cimento utilizado, a presença de adições minerais, a vida útil especificada, a qualidade da cura, entre outros aspectos. Apesar da comprovada importância da relação

água/cimento no que concerne à durabilidade, ela não é o único fator que governa os vários mecanismos de deterioração do concreto.

O Quadro 2. 17 também mostra que as relações água/cimento máximas permitidas são relativamente altas, principalmente para o caso da classe de agressividade III. Nesse caso, apesar de ser uma classe de forte agressividade, a relação água/cimento de 0,55 é permitida.

Os mecanismos de transporte de massa que levam ao movimento e à concentração iônica dos cloretos no concreto são a absorção capilar, a difusão iônica, a permeabilidade e a migração iônica (CASCUDO, 1997). Esses mecanismos estão diretamente relacionados à porosidade e à permeabilidade do material. Assim, concretos que apresentem uma estrutura mais densa, geralmente, são mais resistentes à penetração de cloretos.

Assim, com relação à despassivação por cloretos, a relação água/materiais cimentícios desempenha um importante papel na penetração desses íons no concreto, sendo mais lenta com a redução da relação água/materiais cimentícios, em função do maior refinamento dos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além disso, outro fator interveniente de extrema importância na difusão de cloretos é o tipo de material cimentício. É sabido que o uso de adições minerais aumenta a vida útil das estruturas sujeitas a diversos mecanismos de deterioração, incluindo a despassivação por cloretos.

Regattieri (1998) constatou que, de uma maneira geral, os concretos preparados com cimento com adições (CP II-E, CP III, CP IV e CP V-ARI RS) apresentaram maior resistência à penetração de cloretos quando comparados com os concretos preparados com os demais cimentos (CP I-S, CP II-F, CP V-ARI).

A resistência à penetração de cloretos aumenta com o aumento do teor de adição mineral. No caso da escória de alto-forno, esta resistência se deve, principalmente, à capacidade de fixação dos cloretos livres pelos produtos resultantes da hidratação escória (SMOLCZYK, 1980; OSBORNE, 1999; LUO *et al.*, 2002). Além disso, o uso de adições minerais dificulta a intercomunicação entre os poros e promove o refinamento dos poros e (PICCOLI *et al.*, 1999; ISAIA, 1999).

De maneira geral, na hidratação das pastas de cimento Portland com adições minerais ocorre uma deposição dos produtos hidratados nos poros e canais existentes, contribuindo para a densificação da matriz.

Forma-se, então, uma estrutura de poros descontínua e com uma média de tamanho de poros menor do que a de pastas com cimento Portland (raio 300 Å). A baixa permeabilidade é consequência do refinamento de poros e de grãos, o que resulta em aumento de durabilidade em relação ao ingresso de agentes agressivos (SMOLCZYK, 1980; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Bauer e Helene (1993) estudaram a corrosão da armadura induzida pela penetração de cloretos. Os concretos com escória de alto-forno apresentaram menores taxas de corrosão da armadura, medida pela técnica de resistência de polarização, quando comparados com concreto sem escória de alto-forno.

Da mesma forma, Al-Gahtani *et al.* (1994) mostraram que o nível de corrosão, em concretos com 50% de escória granulada de alto-forno em substituição ao cimento Portland, pode ser reduzido em aproximadamente 4 (quatro) vezes, comparativamente a um concreto sem esta substituição.

Finalmente, outro aspecto a ser observado é que os limites apresentados pela NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) foram determinados com base na experiência, empírica ou não, e não no entendimento e na modelagem dos mecanismos de deterioração envolvidos. Além disso, como não especifica uma vida útil mínima, não se sabe qual seria a vida útil atingida com o uso dos critérios<sup>3</sup> da NBR 6118/2003<sup>4</sup>.

### **9.2.1 Estudo de casos - Vida útil estimada**

O capítulo 8 apresentou três estudos de casos, representativos de três classes de agressividade da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b), ou seja, classes II, III e IV e considerando as misturas estudadas nesta pesquisa. Apenas a despassivação por cloretos foi estudada.

---

<sup>3</sup> Atributo quantitativo.

<sup>4</sup> A NBR 15 575/2008 apresenta a recomendação de vida útil para sistemas estruturais de concreto mínima de 40 anos.

Segundo aquele estudo, a vida útil estimada aumentou com o teor de escória de alto-forno, fato que não é considerado pela NBR 6118/2003. Além disso, como era de se esperar, o coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias diminuiu com a diminuição da relação água/materiais cimentícios.

Os estudos de caso para as classes de exposição III e IV apresentaram-se como muito críticos, com vida útil máxima de apenas 10 e 13 anos, respectivamente, o que demonstra que os critérios da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) não são suficientes para atender às recomendações da NBR 15 575/2008 (ABNT, 2008a; ABNT, 2008b), que, por si só, também não representa a tendência mundial de vida útil de estruturas de concreto de, no mínimo, 50 anos.

Já o estudo de caso para a classe de exposição II apresentou previsões de vida útil superiores, porém apenas a mistura T12 (C40 CP III+escória) atingiu os 40 anos mínimos recomendados pela NBR 15 575/2008.

O fato das misturas não atingirem a vida útil de 40 anos é surpreendente, pois uma grande parte das misturas obedece a NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) no que tange à relação água/materiais cimentícios máxima e a classe de resistência mínima. Isso apenas reforça a constatação que a NBR 6118/2003 não oferece subrequisitos e critérios suficientes para garantir a durabilidade e a vida útil das estruturas.

Contudo, não apenas a despassivação por cloretos deve ser considerada. Quando a carbonatação atinge a armadura pode ocorrer a despassivação por carbonatação e haver risco de corrosão. A Tabela 9. 1 apresenta a idade estimada para que a profundidade de carbonatação atinja a armadura para a classe de exposição III (cobrimento mínimo de 30 mm), por meio da aplicação do modelo Ushida-Hamada (1928). Só foram estudadas as misturas cuja resistência à compressão e a relação água/materiais cimentícios satisfizeram os critérios da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) para a classe III, ou seja, resistência à compressão  $\geq 30$  MPa e  $a/c \leq 0,55$ .

Considerou-se que a idade para que a carbonatação atinja a armadura equivaleria teoricamente ao período de iniciação da corrosão, o que, por sua vez, corresponderia ao final vida útil da estrutura exposta à carbonatação.

**Tabela 9. 1 – Vida útil prevista com base na profundidade de carbonatação.**

Mistura		Relação a/mc	Classe	Componente	Vida útil prevista (anos)	K (mm.ano <sup>-1/2</sup> )*
T4	C30CPIIE	0,49	30	Viga/Pilar	36	5,0
T6	C30CPIII+e	0,49	30	Viga/Pilar	12	8,8
T7	C35CPIIE	0,44	35	Viga/Pilar	49	4,3
T9	C35CPIII+e	0,44	35	Viga/Pilar	18	7,1
T10	C40CPIIE	0,39	40	Viga/Pilar	66	3,7
T11	C40CPIII	0,52	40	Viga/Pilar	20	6,7
T12	C40CPIII+e	0,39	40	Viga/Pilar	23	6,3

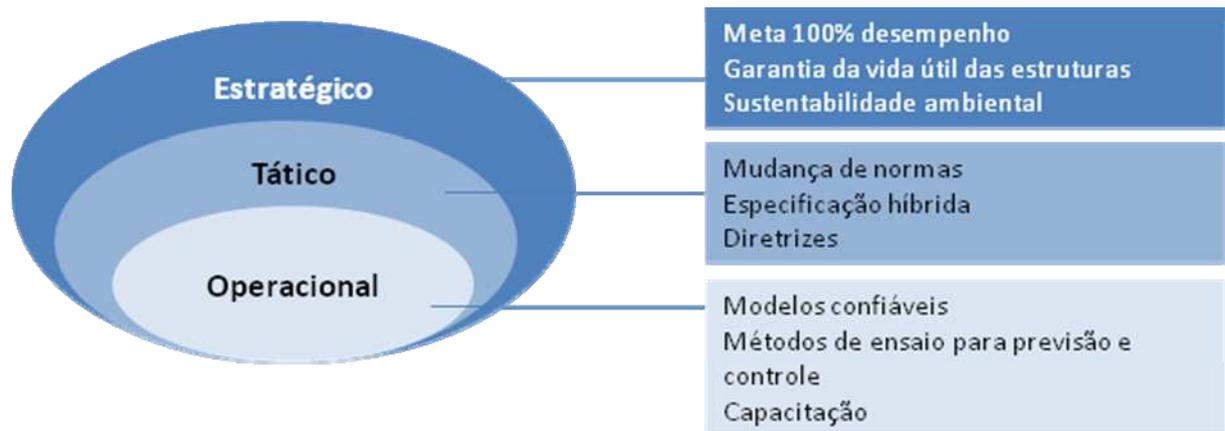
\* Coeficiente de carbonatação determinado no capítulo 8.

Apesar de todas as misturas na Tabela 9. 1 atenderem aos critérios da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b), apenas as misturas T7 (C35CPIIE) e T10 (C40CPIIE) apresentaram vida útil estimadas superior a 40 anos. Isso apenas reforça o fato de que as recomendações da NBR 6118/2003 não garantem a durabilidade e a vida útil da estrutura, nem mesmo a especificada pela NBR 15 575/2008.

Portanto, os limites de relação água/materiais cimentícios, resistência à compressão e cobrimento mínimo da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) não garantem que estruturas duráveis sejam construídas. Uma tendência mundial para que se aumente a durabilidade e se garanta o desempenho das misturas é a inclusão de requisitos de desempenho nas especificações (TANESI *et al.*, 2008).

### 9.3 Plano de ações estruturantes para a criação e implementação de especificações por desempenho

A Figura 9. 1 mostra um esquema de plano de ações estruturantes em nível estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo) para a criação e a implementação de especificações por desempenho para o concreto.



**Figura 9. 1 – Plano de ações estruturantes em nível estratégico, tático e operacional para criação e implementação de especificações por desempenho para o concreto.**

As ações estruturantes em nível estratégico correspondem a ações com metas de longo prazo e uma visão mais sistêmica, que somente podem ser alcançadas depois das ações táticas e operacionais terem sido concluídas.

As ações estruturantes em nível tático tratam de ações de médio prazo, mais específicas do que as ações estratégicas, enquanto as ações estruturantes em nível operacional tratam de ações de curto prazo, bem específicas e constantemente revisadas ao longo do processo.

### 9.3.1 Ações estruturantes em nível estratégico

A atual situação da normalização brasileira ainda se encontra longe de uma abordagem de desempenho, mas deve ser redirecionada nesse sentido, para que se obtenham estruturas de concreto mais duráveis. Há também uma tendência internacional do aumento da vida útil de estruturas de concreto e a única forma de garanti-la é por meio do uso de especificação por desempenho.

Outro aspecto que deve ser considerado é a sustentabilidade ambiental. A escassez de matérias primas e as novas políticas ambientais cada vez mais forçam a adoção de soluções mais inovadoras para o uso de materiais e recursos disponíveis, sem que, no entanto, o desempenho da estrutura seja sacrificado. A sustentabilidade ambiental também requer que se mova na direção das especificações por desempenho.

Porém, ainda existe um longo caminho a ser percorrido para que se chegue a uma especificação totalmente por desempenho para concretos. Especificações totalmente por desempenho requerem a modelagem matemática dos mecanismos de deterioração da estrutura para a previsão da sua vida útil. Não se pode, de maneira alguma, separar especificações por desempenho da modelagem matemática. Essa modelagem deve visar a garantia da vida útil de projeto.

A especificação de requisitos de desempenho sem o uso de modelagem matemática para a previsão da vida útil da estrutura não constitui uma especificação totalmente por desempenho, mas sim uma especificação híbrida. Isso porque, da mesma forma que as especificações prescritivas, os critérios se tornam subjetivos e não necessariamente ligados a uma determinada vida útil.

A construção civil é uma indústria reconhecidamente conservadora e que se opõe a mudanças radicais. É também uma indústria que é influenciada pelo interesse de grandes corporações. Para que se implementem as especificações por desempenho, faz-se necessária a mudança de mentalidade de todos os envolvidos no processo, principalmente no que tange às responsabilidades técnicas. Cada profissional deve ter sua responsabilidade claramente definida para articular as condições de exposição e as características de desempenho a serem atendidas.

Isso significa que deve haver uma redistribuição de riscos. Porém, se o produtor e o empreiteiro vão assumir novos riscos, é de se esperar que lhes seja dada mais liberdade na produção do produto que atenda aos requisitos da especificação (BICKLEY *et al.*, 2006). Como consequência, gera-se um novo ambiente em termos do estabelecimento de bônus e penalidades.

Algumas especificações atualmente em uso já apresentam bônus para aqueles fornecedores que produzam produtos que superem os critérios estabelecidos na especificação como forma de incentivo para a melhoria da qualidade do produto (BICKLEY *et al.*, 2006).

### **9.3.2 Ações estruturantes em nível tático**

Vários aspectos devem ser considerados quando se cria uma especificação por desempenho para concretos: subrequisitos para a segurança e rigidez estrutural (propriedades mecânicas), subrequisitos para a construtibilidade (propriedades no estado fresco), subrequisitos para a durabilidade (propriedades físicas e durabilidade) e subrequisitos para a sustentabilidade (particularmente, na dimensão ambiental e no custo ao longo do ciclo de vida).

#### **9.3.2.1 Mudança das normas vigentes**

A definição e seleção de requisitos de desempenho têm um papel determinante na durabilidade da estrutura, pois, conforme apresentado anteriormente, a especificação da relação água/material cimentício máxima, da classe de resistência e de consumo mínimo de cimento não são suficientes para garantir a vida útil da estrutura.

Um exemplo claro da inadequação da especificação prescritiva da dosagem de materiais é a especificação de consumo mínimo de cimento. Apesar de não ser uma exigência da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) e sim da NBR 12 655/2006 (ABNT, 2006), muitos especificadores ainda requerem o consumo mínimo de cimento. Não apenas este requisito não é suficiente para garantir a durabilidade, mas pode ser até mesmo prejudicial para ela. Isso porque ao requerer-se um consumo mínimo, corre-se o risco de usar-se um consumo de cimento elevado, o que pode causar retração e fissuração, além de não ser uma decisão nem

sustentável e nem econômica. Algumas agências americanas já iniciaram a discussão sobre a possibilidade da substituição do consumo mínimo de cimento pelo consumo máximo (SIMONS, 2004).

No entanto, no Brasil, sabe-se que se o consumo mínimo não for especificado, corre-se o risco de que misturas com baixo consumo de cimento sejam usadas, com consumo bem inferior ao tecnicamente apropriado. É por isso, que nas especificações por desempenho há uma mudança total da responsabilidade técnica, fazendo com que todos os envolvidos busquem a melhor solução a longo prazo.

Para que uma especificação por desempenho possa ser desenvolvida no Brasil, existe uma necessidade de mudança das normas vigentes, em especial da NBR 6118/2003 e da NBR 12 655/2006.

Sugere-se como primeira adequação a opção do uso de três tipos de especificações: prescritivas, híbridas ou por desempenho (Quadro 9. 1), similar ao apresentado na norma canadense CSA A23.1-04 (CSA, 2004a), a qual permite o uso de dois tipos de especificações: prescritiva ou por desempenho, cabendo a ressalva de que, na opinião desta autora, o que a CSA A23.1-04 chama de especificação por desempenho é, na verdade, uma especificação híbrida. Também é importante destacar que ainda não existe nenhuma especificação para concreto totalmente por desempenho.

Neste trabalho considera-se uma especificação totalmente por desempenho aquela que usa modelagem matemática associada à definição de requisitos, subrequisitos e critérios de desempenho para a garantia da vida útil das estruturas de concreto esperada pelo proprietário.

Especificações por desempenho requerem a criação de classes de exposição mais detalhadas do que as classes de agressividade já existentes na NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b). Sugere-se uma combinação das classes atuais da NBR 6118/2003 e das classes da EN 206/2000 (EUROCODE, 2000) (Quadro 9. 2).

**Quadro 9. 1- Métodos alternativos para a especificação de concreto, com base na CSA A23.1-04 (CSA, 2004a).**

Alternativa	Cliente ou proprietário ou representante deve especificar
Híbrida e por desempenho	<ul style="list-style-type: none"><li>• subrequisitos e critérios para segurança e rigidez estrutural</li><li>• subrequisitos e critérios para durabilidade e vida útil</li><li>• subrequisitos e critérios para sustentabilidade (dimensão ambiental)</li><li>• outras subrequisitos (cor, textura, resistência ao derrapamento, entre outros)</li></ul>
Prescrição	Mesmos requisitos da atual NBR 6118, com revisão das exigências para as classes de agressividade III e IV.

**Quadro 9. 2– Classes de exposição propostas.**

Classe de exposição	Tipo de exposição	Subclasses (níveis de agressividade) <sup>5</sup>
I	Risco de corrosão ou ataque insignificante	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rural<sup>6</sup></li> <li>2. Totalmente submersa<sup>6</sup></li> <li>3. Interior de edifícios (peças protegidas das intempéries) com baixa umidade relativa</li> </ol>
CB	Despassivação induzida por carbonatação	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Seco (áreas internas de edifícios com baixa umidade) ou permanentemente imerso</li> <li>2. Molhado, quase nunca seco (superfície em constante contato com água, fundações)</li> <li>3. Moderadamente úmido (áreas internas de edifícios com alta umidade relativa e áreas externas protegidas da chuva)</li> <li>4. Ciclos de molhagem e secagem</li> </ol>
CAM	Despassivação induzida por cloretos provenientes da água do mar	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Exposição a sais presentes no ar, não diretamente à água salina (estruturas no litoral)<sup>7</sup></li> <li>2. Permanentemente submersas (estruturas marinhas)<sup>7</sup></li> <li>3. Zona de respingos e marés (estruturas marinhas)<sup>8</sup></li> </ol>
AQ <sup>9</sup>	Ataque químico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Agressividade baixa</li> <li>2. Agressividade moderada<sup>7</sup></li> <li>3. Agressividade alta<sup>8</sup></li> </ol>
E	Exposição especial não coberta nas outras classes	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reação álcali-sílica</li> <li>2. Reação álcali-carbonato</li> <li>3. Concreto massa</li> <li>4. Outros</li> </ol>

<sup>5</sup> Limites ou específicos devem ser estabelecidos para cada subclasse.

<sup>6</sup> Classe de agressividade I da NBR 6118/2003.

<sup>7</sup> Classe de agressividade III da NBR 6118/2003.

<sup>8</sup> Classe de agressividade IV da NBR 6118/2003.

<sup>9</sup> Limites específicos para  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{CO}_2$ , pH devem ser especificados para cada nível de agressividade.

### 9.3.2.2 Escolha de requisitos e subrequisitos de desempenho

Para cada classe de exposição devem-se definir subrequisitos que garantam a durabilidade e a vida útil desejada, por meio de propriedades mensuráveis. Além disso, devem-se estabelecer subrequisitos e critérios relacionados com a construtibilidade (em termos de propriedades do concreto no estado fresco), com a segurança estrutural, com a rigidez estrutural e com a sustentabilidade (na dimensão ambiental).

Os subrequisitos de desempenho podem ser especificados para duas fases distintas: aqueles relacionados com parâmetros que devem ser observados durante a dosagem das misturas (qualificação das misturas) e os que serão verificados no controle de qualidade do concreto na obra<sup>10</sup>. Contudo, os parâmetros de controle devem ser apenas uma ferramenta para garantir que o concreto entregue seja igual às misturas escolhidas durante a dosagem e que possuam as mesmas propriedades. Deve-se estabelecer uma correlação entre os parâmetros de qualificação das misturas e os de controle.

Os parâmetros de qualificação das misturas devem ser selecionados a partir da sua relevância para a quantificação e previsão de subrequisitos relacionados com a durabilidade, como por exemplo, as propriedades de transporte de massa.

Na maioria dos casos, um único subrequisito não é suficiente para caracterizar o comportamento do concreto frente a mecanismos físicos e químicos complexos que podem estar sujeitos a efeitos sinérgicos, onde diversos mecanismos estão presentes (BAROGHELBOUNY, 2004).

Os subrequisitos devem ser mensuráveis por meio de métodos de ensaio confiáveis, com boa repetibilidade e com relativamente baixa variabilidade. Além disso, custo dos ensaios de controle deve ser levado em consideração e ensaios de longa duração não são recomendados.

Esta tese enfoca misturas contendo escória de alto-forno, seus requisitos, subrequisitos e critérios específicos de desempenho. Os parâmetros de controle de qualidade ultrapassam os objetivos deste trabalho e não serão objeto de discussão.

---

<sup>10</sup> Os parâmetros de controle de qualidade são utilizados para o estabelecimento do atendimento da especificação e são usados para o estabelecimento de bônus e penalidades.

**9.3.2.2.1 Subrequisitos relacionados com a construtibilidade (propriedades no estado fresco), com a segurança estrutural e com a rigidez estrutural de misturas contendo escória de alto-forno**

Os subrequisitos relacionados com a construtibilidade (propriedades no estado fresco) dependem do tipo de estrutura, da taxa de armadura, do tipo de lançamento e de adensamento. Normalmente, é especificado em termos de abatimento de tronco de cone, porém, em alguns casos, especifica-se a perda de abatimento com o tempo, a exsudação e o tempo de pega inicial, pois eles podem ter um efeito direto na construção, além do efeito na qualidade do concreto endurecido e na sua durabilidade.

Os subrequisitos relacionados com a segurança estrutural e com a rigidez estrutural também dependem do uso específico e do projeto da estrutura, e entre eles estão a resistência à compressão, a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a fluência.

Cabe salientar que no caso específico de misturas contendo escória de alto-forno, a resistência à compressão aos 28 dias nem sempre é um subrequisito adequado, pois se sabe que essas misturas ganham resistência mais lentamente do que as misturas contendo cimentos sem essas adições.

Todas as misturas estudadas nesta pesquisa foram proporcionadas a fim de atender a certo abatimento de tronco de cone e a determinadas classes de resistência. Esses foram os subrequisitos iniciais de desempenho. Não se constatou a necessidade de nenhum subrequisito especial para as misturas contendo maiores teores de escória de alto-forno, no que concernem às propriedades físicas e mecânicas, conforme apresentado na análise dos resultados do capítulo 5.

**9.3.2.2.2 Subrequisitos relacionados com a durabilidade de misturas contendo escória de alto-forno**

Os subrequisitos relacionados com a durabilidade são mais difíceis de serem especificados do que os subrequisitos relacionados com a segurança estrutural e devem ser selecionados a partir da classe de exposição da estrutura. A Figura 9. 2 apresenta a seqüência para a seleção de subrequisitos e critérios de desempenho relacionados com a durabilidade.

**Passo 1:** o cliente deve escolher a vida útil mínima a ser atendida. No âmbito internacional, algumas estruturas já estão sendo projetadas para uma vida útil mínima de 100 anos. Porém, nem todas as estruturas necessitam durar por um mesmo período de tempo.

Estruturas de obras de arte com um custo associado mais elevado, cujo reparo e reconstrução podem causar mais perturbação ao meio ambiente e que oferecem um risco maior à sociedade normalmente requerem vida útil mais elevada. Um exemplo é uma ponte, cuja reconstrução implicaria no fechamento do tráfego, o que, por conseguinte, poderia afetar o trânsito de toda uma região, ou mesmo impossibilitar o acesso a determinadas áreas, o que resultaria em custos sociais.

**Passo 2:** o cliente deve especificar se deseja algum requisito ou subrequisito especial, tal como a cor, textura, resistência ao derrapamento, entre outros, e sustentabilidade (dimensão ambiental). A definição de subrequisitos relacionados com a sustentabilidade (dimensão ambiental) é importante nesse estágio, porque além de ser necessária para a definição dos critérios de desempenho (passo 7), também pode influenciar a definição das classes de exposição (passo 4).

A construção civil tem sido foco de muita discussão no que se refere à sustentabilidade (particularmente no que tange à sua dimensão ambiental). A indústria do concreto tem sido especialmente afetada pelo impacto ambiental da produção de clínquer. Várias entidades, tais como a NRMCA (*National Ready Mixed Concrete Association*) e a PCA (*Portland Cement Association*), estão apresentando sugestões para a instituição de objetivos para a redução da emissão de dióxido de carbono. Esses objetivos chegam a ser muito ambiciosos, com metas de redução de até 40% da emissão de CO<sub>2</sub> para cada m<sup>3</sup> de concreto produzido até 2020. O congresso americano chegou a considerar limitar a emissão de CO<sub>2</sub> e até mesmo instituir a aplicação de novos impostos sobre o uso de combustíveis fósseis, incluindo a produção de cimento (RAMSEUR; PARKER, 2009).

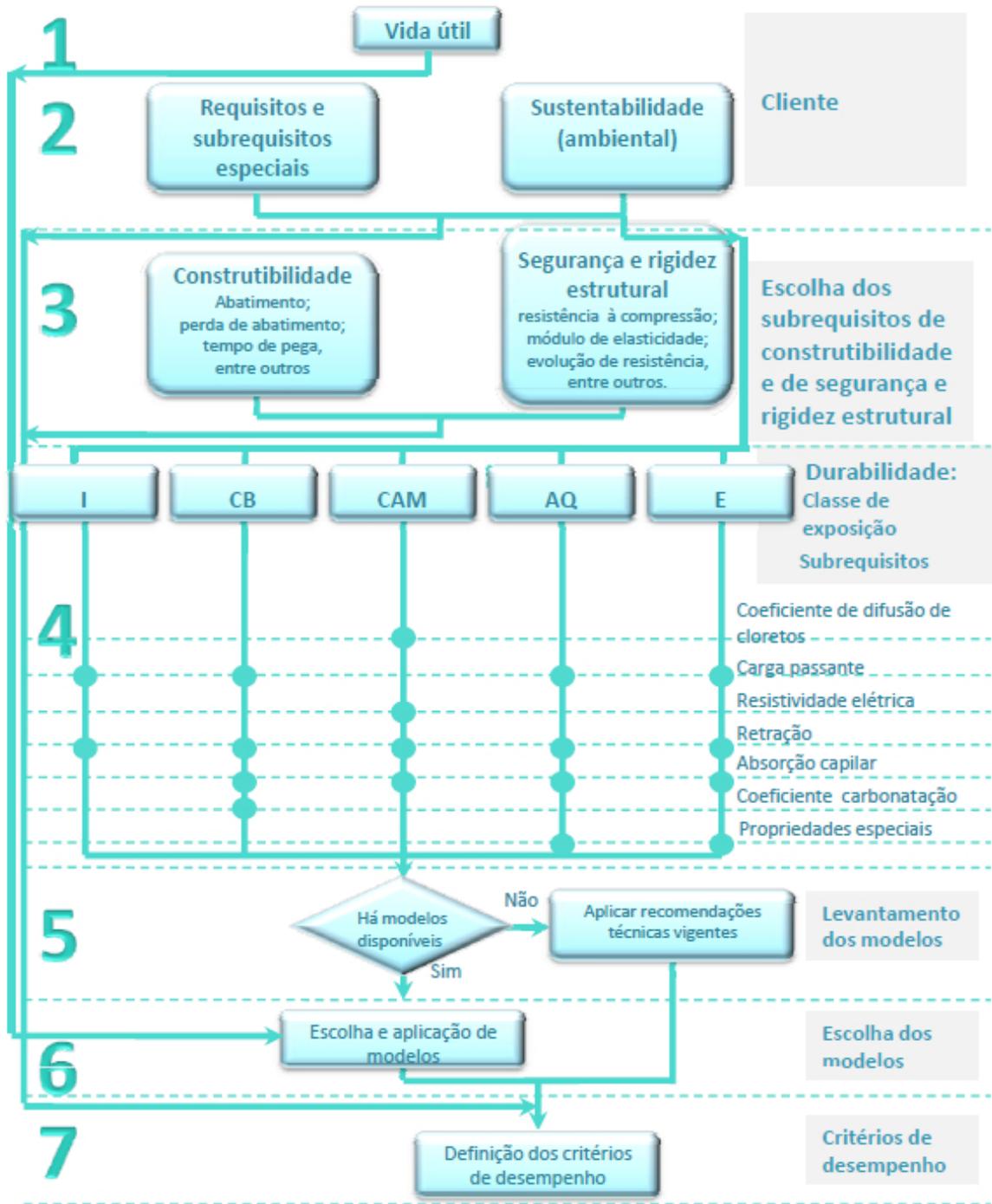


Figura 9. 2– Diagrama para a seleção de subrequisitos e critérios de desempenho relacionados com a durabilidade.

Infelizmente, a sustentabilidade na sua dimensão ambiental ainda está focada quase que inteiramente na redução do CO<sub>2</sub>. Aspectos relacionados com a conservação de água, energia incorporada e reciclagem ainda estão sendo negligenciados.

Caso essas metas de diminuição de CO<sub>2</sub> incorporado sejam implementadas, a inclusão de subrequisitos de desempenho relacionados com a sustentabilidade ambiental nas especificações vão se tornar imprescindíveis. Estes subrequisitos podem ser especificados na forma de atributos isolados ou pela abordagem ideal de análise de ciclo de vida.

No entanto, um enfoque mais amplo deveria ser empregado. O uso de concretos de alto desempenho por vezes requer um consumo de material cimentício mais elevado. Neste caso, ao invés do uso de cimento Portland, uma grande parcela do cimento deveria ser substituída por materiais cujo impacto ambiental é bem mais baixo, tal como a escória de alto-forno, tanto em termos de emissão de CO<sub>2</sub>, de conservação de energia, de uso de materiais reciclados e de diminuição de uso de recursos naturais esgotáveis, como as matérias-primas para a produção de cimento.

A *Portland Cement Association* publicou um inventário do ciclo de vida (LCI) para diversas misturas típicas usadas na produção de blocos de concreto, concreto massa, concreto usinado e concreto para pavimentos nos Estados Unidos (MARCEAU *et al.*, 2007). A análise incluiu misturas com 0%, 35% e 50% escória de alto-forno nas misturas de concreto usinado e para pavimentos e de 0%, 65% e 80% de escória de alto-forno para as misturas de concreto massa. Esta análise mostrou o grande benefício da adição de escória de alto-forno no que tange aos efeitos ao longo do ciclo de vida.

Caso subrequisitos de sustentabilidade sejam incorporados nas especificações brasileiras, faz-se necessária a criação de ferramentas de cálculo do inventário de ciclo de vida para as condições e materiais disponíveis no Brasil.

Além da sustentabilidade, cada estrutura apresenta suas peculiaridades e pode necessitar que requisitos e subrequisitos especiais de desempenho sejam especificados. Alguns desses requisitos incluem, porém não se limitam, a resistência ao derrapamento, calor de hidratação, tempo necessário para a abertura de pavimento ao tráfego (relacionado ao tempo de fim de pega e desenvolvimento de resistência), estética, cor, textura, refletância, planicidade (no caso de pisos e pavimentos) e custo ao longo do ciclo de vida.

**Passo 3:** o projetista estrutural deve especificar os subrequisitos relacionados com a segurança estrutural, tais como resistência à compressão e a resistência à flexão, entre outros e com a rigidez estrutural, tal como o módulo de elasticidade. Além disso, dependendo do espaçamento da armadura, das dimensões das peças e do método de lançamento/adensamento do concreto, deve definir o abatimento de tronco de cone mínimo ou outro parâmetro relacionado com a trabalhabilidade.

Ainda neste estágio, o empreiteiro deve considerar questões construtivas e relacionadas com o ambiente de exposição, tal como a temperatura na época da construção, e, a partir daí, especificar qualquer subrequisito relacionado com a construtibilidade (em termos de propriedades no estado fresco) necessário, como, por exemplo, tempo de pega, perda de abatimento com o tempo e velocidade de ganho de resistência mecânica.

**Passo 4:** o especificador deve escolher as classes de exposição. Várias classes de exposição podem ser necessárias para caracterizar uma estrutura, pois vários mecanismos de deterioração podem estar envolvidos, como, por exemplo, uma estrutura que, além de estar sujeita à despasse da armadura induzida por cloretos provenientes da água do mar (classe CAM), também corre o risco da ocorrência de reação álcali-agregado (classe E).

Caso haja intenção do uso de concretos com teores elevados de escória de alto-forno, que poderiam potencialmente apresentar uma susceptibilidade maior à carbonatação, em alguns casos, pode ser aconselhável a incorporação de classe de exposição CB, de maneira que qualquer mistura utilizada seja investigada no que tange à carbonatação e, se necessário, medidas sejam tomadas para prevenir a despasse da armadura induzida por carbonatação.

Além disso, partes diferentes da estrutura podem estar sujeitas a níveis de agressividade distintos. Por exemplo, o tabuleiro de uma ponte poderia ser considerado como CAM-1, enquanto que os pilares poderiam ser considerados CAM-3. Subclasses diferentes apesar de apresentarem os mesmos requisitos e subrequisitos de desempenho podem ter critérios de desempenho bem distintos.

Ainda neste estágio, devem-se estabelecer os subrequisitos de desempenho relacionados com a durabilidade. A escolha destes subrequisitos deve levar em conta quais modelos de previsão de vida útil serão utilizados, pois estes subrequisitos são os parâmetros de entrada para os modelos ou devem ter uma clara correlação com eles. Ademais, os subrequisitos

relacionados com a durabilidade devem ser capazes de refletir os mecanismos de deterioração aos quais a estrutura estará sujeita.

A seguir apresentam-se alguns dos subrequisitos relacionados com a durabilidade normalmente especificados ou que poderiam ser potencialmente especificados. Eles foram subdivididos em subrequisitos relativos à despassivação das armaduras por cloretos, subrequisitos relativos à despassivação por carbonatação, subrequisitos gerais e subrequisitos especiais.

#### **9.3.2.2.3 Subrequisitos relativos à despassivação da armadura por cloretos**

**a1) Coeficiente de difusão de cloretos** – este é um dos mais importantes subrequisitos relacionados com a durabilidade, pois tem uma relação direta com o ingresso de cloretos e, portanto, com a despassivação da armadura. A maioria dos modelos matemáticos para a previsão da vida útil no que tange à despassivação da armadura induzida por cloretos usa o coeficiente de difusão com um dos seus parâmetros de entrada. O capítulo 8 mostrou como o coeficiente de difusão pode influenciar a vida útil prevista e como ele pode variar caso seja estimado por meio de modelos matemáticos, ao invés de ser medido.

O ensaio utilizado para a determinação desse coeficiente é o ASTM C 1556-04 (ASTM, 2004b) (*Chloride bulk diffusion test*). Neste ensaio, os corpos-de-prova são imersos em uma solução de cloreto de sódio e, após a exposição, a superfície é pulverizada ou moída em camadas de 1-2 mm. Cada camada sofre um tratamento ácido para a extração dos cloretos. O teor de cloretos é colocado em um gráfico em função da profundidade, e, por meio de regressão matemática, o coeficiente de difusão pode ser calculado.

Esse ensaio leva aproximadamente três meses e, além de muito trabalhoso, é relativamente difícil de ser executado. A pulverização das camadas é uma tarefa muito delicada que pode levar a uma alta variabilidade dos resultados do ensaio. Dessa maneira, faz-se necessária o desenvolvimento de outro ensaio que possa dar uma indicação do coeficiente de difusão.

O ensaio de migração rápida NT Build 492:1999 (Nordest, 1999), desenvolvido com base na pesquisa de Tang e Nilsson (1992), apresenta uma equação para o cálculo do coeficiente de

migração de cloretos, o qual normalmente é usado como coeficiente de difusão. No entanto, o coeficiente calculado com base nessa norma não se trata do coeficiente aparente de difusão utilizado pelos modelos matemáticos de previsão de vida útil. Em realidade, esse coeficiente nem sequer se trata do coeficiente de difusão de cloretos, mas sim de uma aproximação. Isso porque, difusão é o movimento de íons sob um gradiente de concentração ou potencial químico, enquanto que o ensaio de migração na verdade mede o movimento de íons sob a ação de um campo elétrico externo.

Caso se decida utilizar o coeficiente de difusão como subrequisito relacionado com durabilidade, recomenda-se que modelos como Life-365 sejam utilizados para o cálculo do coeficiente de difusão máximo aceitável para as condições específicas da estrutura em estudo. As misturas selecionadas devem ser ensaiadas e devem obedecer tais limites. Um exemplo é apresentado no item 9.4 - Exemplo da aplicação de especificação por desempenho .

**a2) Carga passante** - A ASTM C 1202-05 (ASTM, 2005d), apesar de ser normalmente referenciada como ensaio de permeabilidade, é, na verdade, um ensaio de condutância e não um método de ensaio para determinação do coeficiente de difusão. Apesar dessas considerações, é o ensaio mais utilizado em especificações híbridas, pela sua facilidade de execução.

Esse ensaio é parte de um grande número de especificações. Cada especificação apresenta um valor máximo aceitável, que normalmente se encontra entre 1000 e 2000 Coulombs aos 56 dias ou após a cura acelerada proposta por Ozyildirim (1998). A escolha do valor máximo se dá pela experiência do especificador, sem, no entanto, ter alguma ligação quantitativa com uma determinada vida útil e com a classe de exposição.

Nenhuma das misturas estudadas nesta pesquisa contendo CP II E 32 (30% de escória de alto-forno) apresentou carga passante aos 63 dias inferior a 1500 Coulombs. Todas as misturas contendo CP III-32-RS + escória (83% de escória de alto-forno) apresentaram carga passante inferior a 1500 Coulombs e as misturas contendo CP III-32-RS (66% de escória de alto-forno) apresentaram um comportamento intermediário, o que demonstra os benefícios da adição de escória de alto-forno na densificação da matriz e a capacidade do ensaio de diferenciar as várias misturas.

No entanto, também se observou uma alta variabilidade dos resultados. Isso pode ser uma característica intrínseca do próprio ensaio, como também pode ser decorrente do aquecimento das células durante o ensaio, que tem duração de 6 horas. Misturas com uma microestrutura menos densas são mais propensas ao superaquecimento, que acaba promovendo um aumento da carga passante (HOOTON *et al.*, 2001). Várias pesquisas têm sido realizadas para a avaliação de modificações desse ensaio (McGRATH; HOOTON 1999; HOOTON *et al.*, 2001; ROY *et al.*, 2002).

No entanto, essa não é a única crítica feita ao ASTM C 1202-05 (ASTM, 2005d). A presença de vazios e fissuras pode afetar significativamente os resultados do ensaio, pois a difusão através de fissuras difere da difusão do resto do concreto (ZHANG; GJØRV, 1991). Além disso, este ensaio mede a carga elétrica passante como consequência do movimento iônico total, não apenas do movimento dos íons cloreto. A presença de aditivos ou qualquer material condutivo no concreto aumenta a condutância, sem necessariamente significar aumento da permeabilidade ou do risco à corrosão.

Uma alternativa para o ASTM C1202-05 (ASTM, 2005d) é o AASHTO TP 64 (AASHTO, 2003), ensaio de migração rápida, o qual tende a ter uma boa correlação com o ASTM C 1202, sem ser susceptível a presença de íons provenientes de aditivos.

**a3) Resistividade elétrica** – A resistividade elétrica em conjunto com o acesso do oxigênio à armadura são os principais controladores do mecanismo eletroquímico que conduz à corrosão das armaduras (FERREIRA, 2003; CASCUDO, 2005). Além disso, é um ensaio de fácil execução.

A resistividade do concreto e a taxa de corrosão da armadura estão relacionadas, pois a resistividade controla a facilidade da penetração de íons através de uma região catódica da armadura para uma região anódica.

O CEB 192 (CEB, 1989) propõe diretrizes para a avaliação do risco de corrosão por meio da resistividade elétrica, as quais poderiam ser incorporadas nas especificações por desempenho.

Como a corrente é carregada pelos íons na solução dos poros, vários fatores podem influenciar a resistividade elétrica, tais como o tamanho e a quantidade de poros (por exemplo, com o aumento da relação água-material cimentício), umidade, o grau de hidratação, a carbonatação do concreto, o ingresso de sais e a superfície rica em cimento ou

com maior relação água-material cimentício que o resto da peça (MILLARD; GOWERS, 1991). Portanto, a resistividade elétrica deve ser analisada em conjunto com outras técnicas (ANDRADE; ALONSO, 1996).

Todas as misturas estudadas nesta pesquisa apresentaram uma resistividade elétrica equivalente a um risco de corrosão baixo, de acordo com a classificação do CEB 192 (CEB, 1989), sendo que as misturas contendo CP III-32-RS + escória apresentaram as resistividades mais elevadas (inversamente proporcional ao risco de corrosão), quando submetidas a condições naturais de exposição.

#### **9.3.2.2.4 Subrequisitos relativos à despassivação da armadura por carbonatação**

**b1) Coeficiente de carbonatação** - A carbonatação propriamente dita não é a causa direta da deterioração do concreto, mas tem efeitos determinantes sobre a sua durabilidade. Por exemplo, a retração por carbonatação e a despassivação da armadura por carbonatação poderá concorrer decisivamente para a corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado.

A profundidade de carbonatação normalmente é medida por meio da aspensão de fenolftaleína sobre a superfície fraturada do corpo-de-prova, após a sua exposição ao ambiente. Um modelo matemático muito simples (modelo Ushida-Hamada, 1928) pode ser utilizado para a obtenção do coeficiente de carbonatação  $k$ . Nesse caso, pode-se obter o  $k$  máximo para que a profundidade de carbonatação atinja a armadura para um determinado cobrimento.

Como alternativa a esse método, Helene (1993) apresentou uma classificação dos concretos, no que tange à durabilidade, a partir desse coeficiente. Esse coeficiente aplica-se a concretos de cimento Portland comum, submetidos à cura adequada, durante período igual ou superior a cinco dias e, a partir daí, mantidos em ambientes de UR entre 60% e 80%, com temperaturas de 20<sup>o</sup>C a 30<sup>o</sup>C e concentração normal de gás carbônico no ar (0,03% - carbonatação natural).

A carbonatação natural é um ensaio extremamente longo, podendo levar anos. Os resultados apresentados no capítulo 7 mostram que um ano de exposição pode não ser

suficiente para a diferenciação estatística de misturas. Observou-se que as diferenças existentes nas profundidades, quando comparadas em função da classe de resistência, são da ordem de 1 mm e quando comparadas em função da relação água/ material cimentício são da ordem de 2 mm. O coeficiente de variação do ensaio ficou entre 18% e 136%.

Além disso, vários fatores podem influenciar o ensaio de carbonatação natural, como, por exemplo, a umidade interna do concreto, as condições ambientais (umidade e temperatura) e as condições de cura, além das condições de execução do concreto. Dessa forma, como é praticamente impossível reproduzir as condições às quais a estrutura estará exposta, o desempenho apresentado em laboratório não reproduz necessariamente o comportamento em serviço.

A carbonatação acelerada pode diminuir o tempo de ensaio, apesar de ter o inconveniente de não representar as condições de exposição em serviço. O capítulo 8 mostrou que o coeficiente de carbonatação acelerada foi de 4 a 7 vezes maior do que o coeficiente de carbonatação natural, o que indica que quando submetidas a condições de ensaio acelerado, cada mistura respondeu de maneira diferente àquela na condição natural.

Isso também foi observado em outras pesquisas (SANJUÁN *et al.*, 2003; BIER *et al.*, 1989), as quais atribuíram o fato às diferenças de reatividade entre o CO<sub>2</sub> e o C-S-H que se forma pela hidratação do C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S do clínquer Portland em comparação com o C-S-H que se forma pela reação das escória de alto-forno em meio alcalino. Ou seja, parece haver um grau de alteração da microestrutura diferente para diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>.

Apesar do coeficiente de carbonatação em teoria ser um bom subrequisito relacionado com a durabilidade, o fato da carbonatação acelerada não ser necessariamente comparável com a natural, dificulta a sua utilização.

#### **9.3.2.2.5 Subrequisitos gerais relacionados com a durabilidade**

**c1) Absorção capilar** – é uma propriedade relacionada com mecanismos de transporte de massa, os quais desempenham, por sua vez, um papel importante em vários mecanismos de deterioração, tais como carbonatação, corrosão, ataque sulfático, ataque de cloretos e reação álcali-agregado.

A NBR 9 779 (1995) apresenta o método de ensaio para a determinação da absorção capilar. Este ensaio pode ser utilizado como ferramenta na comparação de misturas. Não existem critérios claros para esta propriedade.

No capítulo 5 não foi observada nenhuma relação entre absorção capilar e o teor de escória de alto-forno, devido à influência da relação água/material cimentício, que se apresentou como o principal condicionante.

Além disso, não foi encontrado nenhum limite específico para a absorção capilar que possa ser utilizado em especificações por desempenho, nem tampouco nenhum modelo de previsão de vida útil que use esta propriedade.

Dessa maneira, acredita-se que, com base nos resultados obtidos no capítulo 5, essa propriedade talvez não seja um subrequisito adequado para especificações híbridas, sobretudo no caso de concretos com adição de escória de alto-forno. Esse assunto, porém, merece maior investigação, bem como exige o desenvolvimento de modelos específicos que associem vida útil de estruturas à absorção capilar e a proposição de critérios de desempenho.

**c2) Retração por secagem** – A retração por secagem livre pode ser medida por meio da NBR 8 490 (ABNT, 1984b) e da ASTM C 157 (ASTM, 2008a). Essas normas são semelhantes. Como elas medem a retração livre, elas não representam o comportamento da estrutura, que normalmente está submetida a alguma restrição. A NBR 8 490 (1984) apenas oferece uma indicação limitada da tendência de estabilidade de volume.

O capítulo 5 apresenta o comportamento das misturas estudadas nesta pesquisa no que concerne à retração. Apesar de maiores valores de retração aos 365 dias terem sido observados para misturas com maiores teores de escória de alto-forno (com exceção dos concretos C20), verificou-se que os concretos estudados apresentaram retração por

secagem inferior à normalmente especificada por diversos autores. Esses valores variam de 0,030% após 28 dias a 0,070% após 365 de exposição à secagem.

Não se pode concluir que a maior retração seja decorrente apenas do maior teor de escória de alto-forno, pois a retração é função da água/materiais cimentícios e do teor de pasta, que não foram mantidos constantes para as misturas com os diversos teores de escória de alto-forno, pois as premissas do delineamento experimental foram a associação de propriedades a classes de resistência da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) e a manutenção do abatimento nas várias misturas.

No caso de especificações por desempenho, a retração deveria ser especificada por um período de exposição que não seja muito elevado, porém que seja capaz de capturar o comportamento da mistura ao longo de tempo. No caso desta pesquisa, esse período foi por volta dos 84 dias de exposição.

Além disso, quando a relação água/material cimentício é muito baixa, normalmente inferior a 0,40, o concreto está sujeito à retração autógena. Ainda não existe um método de ensaio normalizado e nem tampouco recomendações para um limite máximo de retração autógena que garantiriam que o concreto não fissuraria em decorrência desse tipo de retração. A especificação de consumo mínimo de material cimentício também pode favorecer esse tipo de retração.

Não se encontrou nenhum modelo de previsão de vida útil que inclua a retração como um dos seus parâmetros de entrada. Porém esta pode ser uma ferramenta útil de comparação de misturas, exigindo pesquisas e desenvolvimento de modelos para sua inclusão em especificações híbridas ou por desempenho.

**c3) Fissuração** – a fissuração normalmente é decorrente da retração restringida. O único método de ensaio normalizado para a avaliação da tendência à fissuração é a ASTM C 1581 (ASTM, 2004c), ou o ensaio do anel, que foi desenvolvido inicialmente por Coutinho em 1954. Este ensaio apresenta alta variabilidade, não representa o grau de restrição ao qual uma determinada estrutura estará submetida e apenas avalia a tendência à fissuração decorrente da retração por secagem, ignorando uma parte importante proveniente da retração plástica (TANESI, 1999). Este ensaio normalmente apresenta a idade para o aparecimento da primeira fissura.

Não existem recomendações para a fissuração máxima nas especificações estudadas.

#### 9.3.2.2.6 *Subrequisitos especiais*

##### **a) Subrequisitos especiais relacionados com a durabilidade**

Alguns dos subrequisitos especiais relacionados com a durabilidade que poderiam ser citados, apesar de não terem sido avaliados no programa experimental desta tese são:

a1) **Resistência ao ataque sulfático** – A norma brasileira para a avaliação da resistência ao ataque sulfático é a NBR 13 583 (ABNT, 1996). Esta propriedade não foi avaliada por esta pesquisa, mas concretos com escória de alto-forno são especificados para construções em contato com água do mar que, além de cloretos, contêm, também, sulfatos (GEISELER *et al.* 1995; BINJEN, 1996).

Sabe-se, também, que concretos com escória de alto-forno normalmente apresentam alta resistência a sulfatos. Esta resistência é devido ao baixo teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  ou de  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  e, talvez, mais importante ainda, em função da microestrutura mais densa, que faz com que a taxa de penetração de sulfatos em concretos com escória de alto-forno seja muito baixa, em comparação com concreto com cimento Portland comum (DOUGLAS, 1987; BINJEN, 1996). Outra causa pode ser a menor espessura da zona de interface agregado-pasta de cimento com escória de alto-forno, o que reduz o espaço para a cristalização de etringita (BINJEN, 1996).

Não existe nenhuma recomendação nas normas brasileiras com relação ao limite máximo de expansão nesse ensaio que garantiriam que a mistura seja resistente ao ataque sulfático. O ACI 201.2R-08 (ACI, 2008a) recomenda que misturas contendo escória de alto-forno, avaliadas por meio do ensaio ASTM C 1012-04 (ASTM, 2004), apresentem expansão  $\leq 0,10\%$  aos 6 meses de exposição para a classe de exposição 1 e expansão de  $\leq 0,05\%$  aos 6 meses para a classe de exposição 2. Classes 1 e 2 correspondem a classes de exposição intermediárias, sendo que a classe 0 indica nenhum risco de ataque sulfático e classe 3 indica risco elevado.

a2) **Resistência à abrasão** – em casos especiais, como no caso de pisos e pavimentos, pode ser necessária a especificação da resistência à abrasão. A resistência à abrasão normalmente é indicada por meio da perda de massa ou a profundidade da abrasão. Vários

métodos de ensaio têm sido utilizados para a avaliação desta propriedade, como por exemplo, ASTM C 779 (ASTM, 2005b) e ASTM C 944 (ASTM, 2005c). Esta propriedade não foi avaliada por esta pesquisa.

a3) **Reação álcali-agregado** – quando se suspeita que os agregados a serem utilizados na obra possam ser susceptíveis à reação álcali-agregado, devem-se incluir recomendações que garantam que a reação não ocorra, seja por meio da mudança da fonte de agregados ou pela adoção de outras medidas, tais como a adição de escória de alto-forno.

A escória de alto-forno reduz o potencial da ocorrência de reação álcali-sílica, pois reduz a quantidade de álcalis no sistema, consome os álcalis durante a sua hidratação, reduz o tamanho dos poros - dificultando a mobilidade dos álcalis - e reduz a quantidade de solução alcalina dos poros que reagiria com os agregados.

Existem vários métodos de ensaio para a avaliação da susceptibilidade do agregado ou da mistura à reação álcali-agregado. Dentre eles, ASTM C 1260 (ASTM, 2007b), ASTM C1293 (ASTM, 2008d), ASTM C289 (ASTM, 2007a) e ASTM C 1567 (ASTM, 2008e). Esta propriedade não foi avaliada no programa experimental desta tese.

**Passo 5:** Deve-se então levantar-se os modelos de previsão de vida útil disponíveis, sua aplicabilidade e confiabilidade. O Quadro 9. 3 apresenta um sumário de alguns subrequisitos relacionados com a durabilidade que servem de parâmetros de entrada para modelos de previsão de vida útil.

Caso se determine que não existam modelos que incluam alguns dos requisitos selecionados, a escolha dos critérios de desempenho deve ser feita a partir da aplicação de recomendações técnicas vigentes.

**Passo 6 :** A escolha dos modelos a serem utilizados deve ser feita de maneira muito criteriosa a partir da análise cuidadosa e com princípios técnicos condizentes com os mecanismos de deterioração envolvidos. Então, aplicam-se os modelos, incorporando-se a vida útil mínima estabelecida no passo 1.

**Passo 7 :** A definição dos critérios de desempenho se faz a partir dos valores determinados com a aplicação dos modelos de previsão de vida útil para que a vida útil especificada seja atingida. Além disso, devem-se determinar os critérios para os requisitos especiais, para os requisitos ambientais, para os requisitos estruturais e construtivos.

**Quadro 9.3 – Subrequisitos de desempenho relacionados com a durabilidade que possuem modelos matemáticos para a previsão da vida útil.**

Subrequisito	Existe modelo matemático que correlacione esse subrequisito com a vida útil?
Difusão de cloretos	Sim
Carga passante (ASTM C 1202)	Não
Resistividade elétrica	Não
Coeficiente de carbonatação	Sim
Absorção capilar	Não
Retração	Não
Fissuração	Não
Expansão por ataque sulfático	Sim
Expansão por reação álcali-agregado	Sim
Perda de massa por abrasão	Não

### 9.3.3 Especificações híbridas

Este trabalho entende por especificação híbrida aquela que não usa modelos matemáticos para prever a vida útil da estrutura e para determinar os critérios de desempenho, mas possui alguns subrequisitos de desempenho escolhidos com base em recomendações técnicas ou uma combinação de recomendações prescritivas e subrequisitos de desempenho.

Um exemplo disso são documentos que especificam a resistência à compressão e a carga passante como subrequisitos, ao invés da relação água/materiais cimentícios. Um dos subrequisitos mais comumente especificado em especificações híbridas é a carga passante (ASTM C 1202/2005). A difusão de íons depende da microestrutura e a composição da

solução dos poros (BUENFELD; NEWMAN, 1987). Este ensaio fornece uma avaliação da resistência à penetração de cloretos com a condutância elétrica do material.

A relação entre condutância elétrica e difusão pode variar com diferentes proporções de materiais cimentícios, pois esses afetam a solução dos poros, o mecanismo e o tipo de difusão. A presença de vazios e fissuras pode influenciar significativamente os resultados do ensaio, pois a difusão através de fissuras difere daquela do restante do concreto (ZHANG; GJØRV, 1991).

Em um estudo de misturas binárias e ternárias, Bleszynski et al. (2002) ensaiaram 7 misturas com escória de alto-forno e/ou sílica ativa por um período de 8 anos. Os autores constataram que as adições minerais diminuíram o coeficiente de difusão de cloretos em até 90%. Além disso, o estudo observou que a carga passante também diminuiu em até 83% com o uso das adições.

Este estudo demonstrou que não só as misturas binárias e ternárias apresentam maior resistência à penetração de cloretos quando comparadas às misturas contendo apenas cimento Portland, mas também que o ensaio ASTM C 1202-05 (ASTM, 2005d) é capaz de captar os benefícios das adições. Assim, o ensaio descrito na ASTM C 1202-05 pode ser utilizado como um subrequisito que aponte a maior susceptibilidade das misturas à penetração de cloretos.

Quando se especifica apenas a relação água/materiais cimentícios máxima, não se diferencia os benefícios decorrentes do uso de diferentes materiais cimentícios. A especificação da carga passante pode contribuir para identificação dos benefícios da adição mineral ou de outras definições particularmente para o caso de ataque de cloretos. No entanto, como essa propriedade não está ligada a nenhuma modelagem matemática, a especificação de carga passante máxima não garante que uma determinada vida útil seja obtida.

A ASTM C 1202-05 (ASTM, 2005d) apresenta uma classificação quanto ao risco de penetração de cloretos. No entanto, o intervalo de carga passante que esta norma estipula é muito grande, podendo colocar concretos bem diferentes no mesmo nível de risco de penetração de cloretos. Essa classificação, portanto, não é suficientemente sensível às diferenças microestruturais que podem ocorrer, nem sequer é adequada para garantir a

durabilidade das estruturas, especialmente por não considerar as condições de exposição da estrutura.

As especificações por desempenho disponíveis, que são, na verdade, especificações híbridas, na visão desta autora, normalmente não utilizam essa classificação, mas estipulam um valor máximo de carga passante a uma determinada idade.

Um valor de 1500 Coulombs aos 56 dias tem se mostrado adequado para a maioria dos casos com condições de exposição semelhantes a classes de exposição III e IV da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b). Caso este limite fosse aplicado às misturas estudadas nesta pesquisa, todas as misturas de classe de resistência C30 ou superior contendo CP III+ escória atenderiam esse requisito, além das misturas C30CPIIE e C30CPIII, caso considerasse que houve uma diminuição insignificante da carga passante entre as idades de 56 dias e 63 dias, quando os ensaios foram executados.

#### **9.3.4 Ações estruturantes em nível operacional**

Conforme anteriormente apresentado, para que especificações por desempenho possam ser implementadas, faz-se necessário uma mudança de mentalidade da indústria. Para tal, podem-se criar seminários de atualização de engenheiros onde o conceito seria apresentado, bem como as suas implicações, vantagens e desvantagens.

Além disso, segundo Bickley *et al.* (2006), para que as especificações por desempenho possam ser implementadas com sucesso, faz-se necessário que:

- a indústria estabeleça sistemas de certificação que ofereça requisitos de controle de qualidade, qualificação da mão-de-obra e requisitos para as usinas de concreto;
- os produtores e os empreiteiros trabalhem em parceria para que a mistura adequada seja preparada, entregue e lançada;
- os subrequisitos de desempenho possam ser avaliados por um conjunto de ensaios para várias etapas do processo (qualificação da mistura e construção). No caso dos ensaios durante a construção, deve-se levar em conta o sistema de controle de qualidade e a variabilidade do método de ensaio;

- seja criado um conjunto de instruções claras sobre ações a serem tomadas caso o concreto não atenda aos subrequisitos, incluindo penalidades e bônus;
- modelos matemáticos confiáveis sejam desenvolvidos ou calibrados com base em dados de exposição de longo prazo para as condições brasileiras (características macroambientais e materiais).

## **9.4 Exemplo da aplicação de especificação por desempenho**

### **9.4.1 Descrição da estrutura**

Estrutura em concreto armado aparente em ambiente marinho (Santos, São Paulo), mas sem contato direto com água do mar, situada a 800 m de distância do mar, similar ao estudo de caso descrito em 9.2.1. Concreto com resistência à compressão mínima de 30 MPa, correspondente à classe de agressividade III da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b). Foi utilizado o limite recomendado pela NBR 6118 /2003 para o cobrimento mínimo, ou seja, 30 mm para pilares.

### **9.4.2 Enfoque de especificação por desempenho**

No caso da especificação por desempenho, a metodologia apresentada na Figura 9. 2 será utilizada.

A Figura 9. 3 mostra os passos para a definição dos subrequisitos e critérios de desempenho para este exemplo.

Passo 1: o cliente determinou que a vida útil mínima deveria ser 50 anos.

Passo 2: como subrequisito relacionado com a sustentabilidade (dimensão ambiental), o cliente determinou que escória de alto-forno deveria ser usada, mas não especificou nenhum subrequisito relativo ao inventário do ciclo de vida, nem especificou o teor mínimo de escória de alto-forno a ser utilizado.

Passo 3: o concreto deve apresentar resistência à compressão característica de 30 MPa e abatimento de tronco de cone de  $(70 \pm 10)$  mm.

Passo 4: Tendo como base as classes e subclasses apresentadas no Quadro 9. 2, essa estrutura poderia ser classificada como CAM-1 e CB-3.

Em vista das condições de exposição e dos materiais a serem usados e por se tratar de uma classe de exposição severa, escolheram-se os seguintes subrequisitos de desempenho relacionados com durabilidade – difusão de cloretos, retração, resistividade elétrica e coeficiente de carbonatação.

Passo 5: Como não existem modelos que incluam a retração e a resistividade elétrica, deve-se aplicar as recomendações técnicas vigentes para esses requisitos.

Passos 6 e 7: escolha e aplicação dos modelos - Life 365 e Ushida-Hamada para coeficiente de difusão e coeficiente de carbonatação, respectivamente:

a) O coeficiente de difusão máximo aceitável pode ser obtido com a aplicação de Life-365 para as condições apresentadas em 9.4.1 e para o cobrimento mínimo requerido pela NBR 6118 /2003 (ABNT, 2003b).

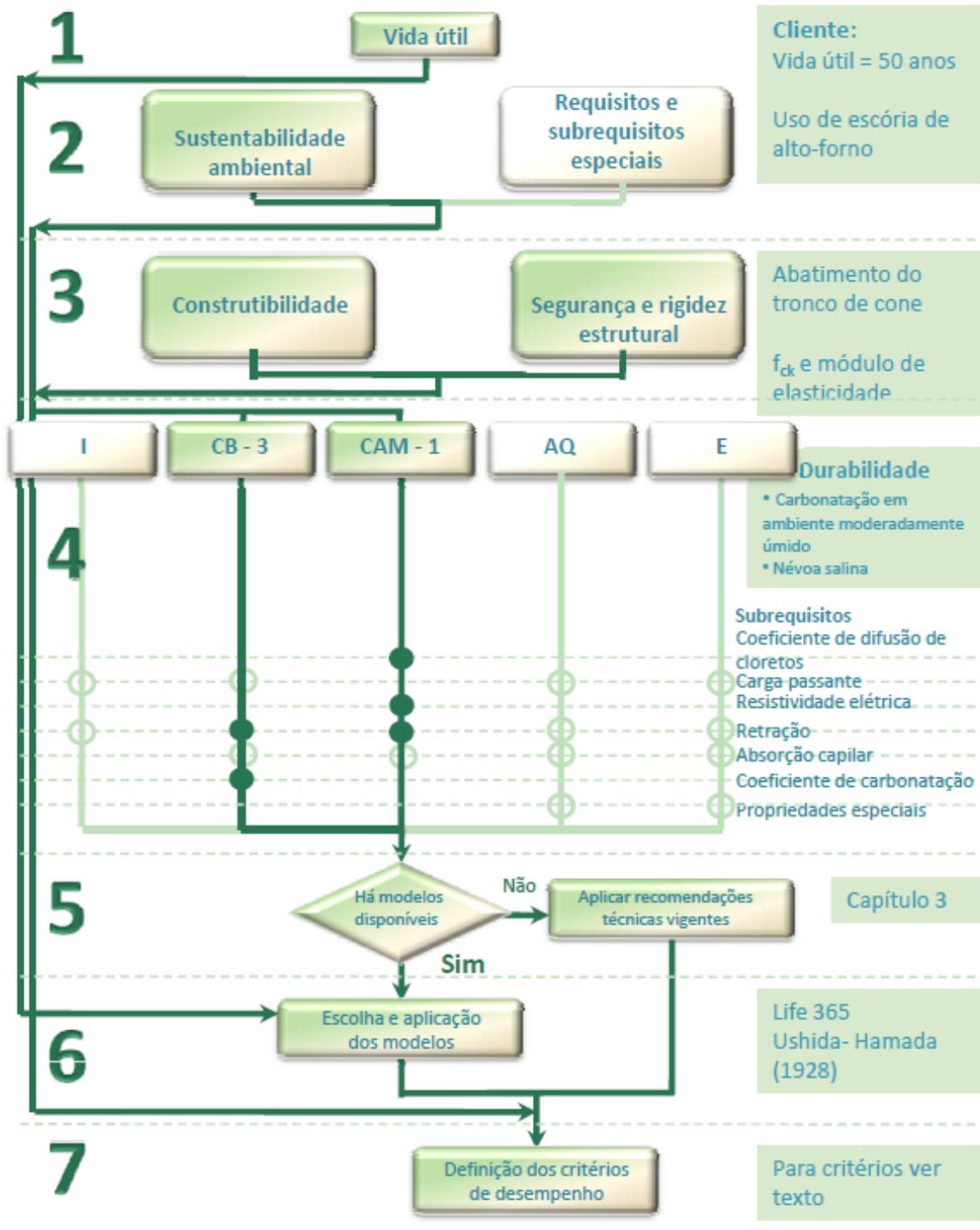


Figura 9. 3– Diagrama para a obtenção dos subrequisitos e critérios de desempenho relacionados com a durabilidade para o exemplo

A Tabela 9. 2 apresenta os coeficientes de difusão máximos aos 28 dias para cada caso. Vale ressaltar que, como o coeficiente de difusão diminui com o tempo de maneira diferente dependendo do teor de escória de alto-forno presente na mistura, faz-se necessário o estabelecimento de limites diferentes para cada caso.

Observa-se claramente como a escória de alto-forno contribui para a diminuição do coeficiente de difusão e, por conseqüência, tem um efeito positivo contra a corrosão da armadura. O coeficiente máximo permitido para uma mistura com 30% de escória de alto-forno é cerca de três vezes menor que aquele de misturas com 70% de escória de alto-forno, para uma mesma relação água/materiais cimentícios, no caso de vigas e pilares.

**Tabela 9. 2 – Coeficiente de difusão máximo aos 28 dias previsto pelo Life-365 para cobrimento mínimo da NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b).**

Teor de escória de alto-forno (%)	Coeficiente de difusão ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
30	0,4
66	1,4
70*	1,6

\* Life-365 não permite previsão de vida útil de misturas com teores de escória de alto-forno superior a 70%. Supõe-se que para um teor de 83% de escória de alto-forno, o coeficiente máximo seria superior a aquele de 70%.

Porém cabe salientar que a NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) apresenta cobrimentos mínimos bem inferiores do que em outras especificações, como o ACI 318-08 (ACI, 2008b). Nessa especificação, o exemplo apresentado em 9.4.1 poderia se enquadrar na classe de exposição C2, cujo cobrimento mínimo é 50 mm.

Como a NBR 6118/2003 apresenta cobrimentos mínimos inferiores à maioria dos códigos internacionais, decidiu-se aferir quais seriam os coeficientes de difusão de cloretos máximos aceitáveis caso o especificador especificasse um cobrimento mínimo de 40 mm, ou seja o cobrimento mínimo da NBR 6118/2003 acrescido de 10 mm (Tabela 9. 3).

Ao compararem-se a Tabela 9. 2 e a Tabela 9. 3 fica claro que um aumento de apenas 10 mm no cobrimento mínimo, aumenta consideravelmente o coeficiente de difusão máximo aceitável.

**Tabela 9. 3 – Coeficiente de difusão máximo aos 28 dias previsto pelo Life-365 para cobrimento mínimo de 40 mm para vigas e pilares.**

Teor de escória de alto-forno (%)	Coeficiente de difusão ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)
30	1,1
66	3,2
70	3,7

b) Carga passante – Não existem modelos que incluam a carga passante como um dos parâmetros de entrada para o cálculo da vida útil. No caso de uma especificação totalmente por desempenho, onde o coeficiente de difusão é determinado, não haveria necessidade da especificação da carga passante. Porém, a carga passante poderia ser medida e uma correlação poderia ser estabelecida entre o coeficiente de difusão e a carga passante. Dessa forma, a carga passante poderia ser utilizada como uma ferramenta de controle de qualidade na fase de execução da obra.

c) Resistividade elétrica: da mesma forma que a retração, não existem modelos que relacionem os resultados dos ensaios de resistividade e a vida útil da estrutura. Conforme o CEB 192 (1989), há um risco de corrosão desprezível quando a resistividade elétrica é maior que 20 kohm.cm. Todas as misturas tenderam a este critério.

A Tabela 9. 4 apresenta um sumário dos subrequisitos e critérios de desempenho escolhidos para este exemplo e as misturas que atenderam aos critérios especificados no item 9.4.2.

Como não se mediu o coeficiente de difusão de cloretos, não se pode afirmar com certeza quais seriam as misturas que atenderiam a todos os requisitos, recomendando maior investigação.

d) Coeficiente de carbonatação máximo- Quando se aplica o modelo Ushida-Hamada (1928) para uma vida útil de 50 anos e cobrimento da armadura de 30 mm para vigas e pilares, obtém-se o valor de k máximo de 4,2 mm.ano<sup>-1/2</sup>. Se o requisito de k calculado for aplicado, apenas as misturas T7 (C35CPIIE) e T10 (C40CPIIE) poderiam ser aplicadas em vigas e pilares.

**Tabela 9. 4 – Sumário dos subrequisitos e critérios de desempenho para o exemplo apresentado.**

Subrequisito de desempenho	Critério de desempenho		Misturas que atenderam
Resistência à compressão	$\geq 30$ MPa		Todas as misturas C30, C35 e C40
Abatimento de tronco de cone	$70 \pm 10$ mm		Todas as misturas
Coeficiente de difusão para vigas e pilares	30% de EAF <sup>11</sup>	$\leq 0,4 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s	Não foi medido
	66% de EAF	$\leq 1,4 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s	Não foi medido
	83% de EAF	$\leq 1,6 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s <sup>12</sup>	Não foi medido
Coeficiente de carbonatação para vigas e pilares	$\leq 4,2$ mm.anos <sup>-1/2</sup>		C35CPIIE, C40CPIIE
Retração aos 28 dias	$\leq 0,03\%$		Todas as misturas
Retração aos 365 dias	$\leq 0,07\%$		C30CPIIE, C30CPIII, C30CPIII+e, C35CPIIE, C35CPIII, C40CPIIE, C40CPIII
Resistividade elétrica	$> 20$ kohm.cm		Todas as misturas

Contudo, vale salientar novamente que 30 mm de cobrimento mínimo para uma estrutura exposta a esse nível de agressividade do meio pode ser muito baixo. Caso o cobrimento mínimo aumente, o coeficiente de carbonatação máximo aceitável também aumenta.

Já o critério apresentado por Helene (1993) é mais conservador e aceita  $k$  inferiores a 3 mm.anos<sup>-1/2</sup> e nenhuma das misturas estudadas nesta pesquisa atendem este critério.

Contudo, vale salientar que esses coeficientes foram estimados a partir de ensaios naturais por 1 ano. Sabe-se que um ano de exposição é um tempo longo para a avaliação de várias propriedades, no caso da carbonatação, trata-se de um período muito curto, gerando uma

<sup>11</sup> EAF – escória de alto-forno.

<sup>12</sup> Determinado para 70%, pois o programa não calcula para misturas com teores superiores. No caso de misturas com 83% de escoria de alto-forno, o coeficiente máximo apresentaria um valor superior.

grande possibilidade de erros na determinação do coeficiente de carbonatação. É importante a criação de um modelo capaz de correlacionar a carbonatação acelerada com a vida útil.

e) Retração - dois critérios foram escolhidos, com base na revisão da literatura: 0,030% após 28 dias e 0,070% após 365 dias de exposição. Das misturas preparadas nesta pesquisa, apenas as misturas T9 (C35CPIII+escória) e T12 (C40CPIII+escória) apresentaram retração aos 365 dias superior ao critério. Quanto à retração aos 28 dias, todas as misturas atenderam ao critério da especificação. Cabe ressaltar que 1 ano de exposição é um período muito longo para fins práticos.

## **9.5 Considerações sobre o capítulo**

Este capítulo apresentou uma proposta para a criação de especificações por desempenho e de especificações híbridas. Para tal, são necessárias mudanças nas normas brasileiras vigentes, especialmente a NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) e a NBR 12 655/2006 (ABNT, 2006).

Dentre as mudanças, faz-se necessária a permissão do uso de especificações por desempenho e, nesse caso, a abolição da recomendação de relação água/material cimentício máxima é imprescindível.

Novas classes de exposição foram propostas, levando em consideração vários mecanismos de deterioração. Também foram propostas subclasses de exposição.

O processo de escolha de subrequisitos e de critérios de desempenho foi discutido. Foram analisados subrequisitos relacionados com a construtibilidade (propriedades do concreto fresco), com a segurança e rigidez estrutural, com a durabilidade, com a sustentabilidade (dimensão ambiental) e subrequisitos especiais. Além disso, foi proposta uma metodologia para a determinação dos subrequisitos e critérios de desempenho relacionados com a durabilidade.

Um estudo de caso foi analisado usando dois enfoques: prescritivo atendendo a NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) e por desempenho. As misturas estudadas nesta pesquisa foram incluídas na discussão e a sua conformidade com ambas as especificações foi verificada.

O enfoque prescritivo apresentou-se inadequado para que uma vida útil de 50 anos fosse garantida, principalmente no que tange à despassivação da armadura por ataque de cloretos.

Verificou-se que o cobrimento nominal mínimo exigido pela NBR 6118 /2003 (ABNT, 2003b) é bem menor que o do ACI 318-08 (ACI, 2008b). No estudo de caso apresentado, essa diferença é de 20 mm. Caso o cobrimento mínimo da NBR 6118/2003 fosse aumentado em 10 mm, a vida útil da estrutura aumentaria de maneira significativa.

As limitações do enfoque por desempenho também foram discutidas, principalmente no que concernem a métodos de ensaio adequados e ao efeito do uso de diferentes modelos matemáticos. No entanto, esse enfoque apresentou-se mais coerente com os resultados dos ensaios das misturas estudadas.

## **CAPÍTULO 10 – Conclusões**

### **10.1 Introdução**

Este trabalho teve como objetivo propor diretrizes para criação de especificações por desempenho para concretos com adição de escória de alto-forno, validadas por modelos de previsão de vida útil centrados em mecanismos preponderantes de despassivação da armadura, contribuindo para a base normativa nacional e internacional.

### **10.2 Avaliação das propriedades dos concretos com escória de alto-forno**

Foram estudadas propriedades físicas, mecânicas e relativas a alguns dos principais mecanismos de deterioração do concreto e das armaduras. Todas as propriedades estudadas sofreram um tratamento estatístico a fim de determinar se as diferenças e tendências encontradas eram estatisticamente significativas. Com os resultados obtidos neste estudo verificou-se que a utilização de teores de até 83% de escória de alto-forno, de

maneira geral, ou não teve nenhuma influência ou exerceu uma influência positiva sobre as propriedades estudadas.

Foram desenvolvidos modelos matemáticos simplificados para a previsão de diversas propriedades a uma idade específica, por meio da composição da mistura. Os modelos desenvolvidos correlacionam cada propriedade com o consumo de material cimentício, com o teor de escória de alto-forno e com a relação água/materiais cimentícios. Todos os modelos propostos apresentaram altos índices de correlação ( $R^2 > 0,9$ ). Estes modelos podem auxiliar na dosagem futura de outros concretos contendo escória de alto-forno que devam atender determinados requisitos de desempenho.

### **10.2.1 Propriedades físicas e mecânicas**

Quanto à retração, observou-se que grande parte dela ocorreu nos primeiros 84 dias. Apesar de observarem-se maiores valores de retração aos 365 dias para misturas com maiores teores de escória de alto-forno (com exceção dos concretos de classe C20), verificou-se que os concretos estudados apresentaram retração por secagem inferior à normalmente especificada por diversos autores.

Quanto ao comportamento da altura de ascensão capilar e de absorção por capilaridade observou-se uma tendência da diminuição da altura de ascensão capilar para as misturas com maior teor de escória à medida que aumenta a resistência, confirmando a influência da adição de escória de alto-forno e da relação água/ materiais cimentícios na análise dessas propriedades.

A adição de escória de alto-forno teve um efeito positivo sobre a resistência à compressão axial, principalmente a idades mais avançadas. Já o módulo de deformação foi pouco afetado pela adição de escória de alto forno.

Observou-se que para as propriedades físicas e mecânicas a influência da relação água/materiais cimentícios muitas vezes é um condicionante mais importante do que a própria adição de escória de alto-forno.

## 10.2.2 Propriedades relacionadas com mecanismos de deterioração da armadura

A avaliação de propriedades relacionadas com mecanismos de deterioração da armadura foi realizada em duas etapas: a) ensaios naturais e acelerados e b) ensaios cíclicos acelerados em câmara de carbonatação e de névoa salina.

### 10.2.2.1 Ensaios naturais e acelerados de carbonatação

No que diz respeito às profundidades de carbonatação em ambientes naturais e acelerados, observou-se que os valores crescem com o tempo de exposição a esses ambientes e que diminuem com o aumento da classe de resistência do concreto.

Com relação ao teor de escória dos concretos, não se observou, de maneira geral, diferença significativa da profundidade de carbonatação natural aos 365 dias de idade entre os concretos com teor de escória de alto-forno de 83% (CP III-32-RS+escória) e os concretos com teor de escória de alto-forno de 66% (CP III-32-RS) quando estas misturas são comparadas em função de uma mesma classe de resistência. Os concretos com 30% (CP II-E-32) apresentaram menor carbonatação. É importante ressaltar que a carbonatação natural foi estudada apenas por um período de 1 (um) ano, que é muito curto para que se possa ter uma real idéia do comportamento futuro das misturas.

Já na carbonatação acelerada, observou-se que, de maneira geral, os concretos com CP II-E-32 apresentaram menor profundidade de carbonatação, enquanto que as misturas com CP III-32-RS+escória apresentaram maiores profundidades de carbonatação.

O modelo Ushida-Hamada (1928) foi usado para a determinação do coeficiente de carbonatação tanto natural como acelerado. Os coeficientes de carbonatação natural variaram de aproximadamente 3 a 11 mm/anos<sup>1/2</sup>. Já os coeficientes de carbonatação acelerados com 10% de CO<sub>2</sub> variaram de 15 a 55 mm/anos<sup>1/2</sup>.

O coeficiente de carbonatação acelerada foi de 4 a 7 vezes maior que o coeficiente de carbonatação natural, o que indica que quando submetidas à condições de ensaio acelerado, cada mistura respondeu de maneira diferente à aquela na condição natural.

No ensaio de penetração de cloretos por carga passante, os concretos com teor de 83% de escória de alto-forno em massa do material cimentício (CP III-32-RS+escória) proporcionaram uma maior resistência à penetração de cloretos aos 63 dias de idades. A maioria dos concretos produzidos com este material cimentício, aos 63 dias de idade, foram caracterizados como de baixo risco de penetração de cloretos, com base no ensaio estabelecido na norma ASTM C 1202 (2005).

Os concretos produzidos com o cimento CP II-E-32 e com o cimento CP III-32-RS foram classificados como de moderado a de alto risco de penetração de cloretos. No entanto, a classificação apresentada pela ASTM C 1202 (2005) é muito ampla e sua utilização como critério de desempenho não se mostrou adequada. Este ensaio comprovou claramente a contribuição da escória de alto-forno da densificação da matriz.

Para a previsão da vida útil, quanto ao ataque de cloretos, foi necessária a determinação do coeficiente de difusão de cloretos. Para isso, foram usados três modelos: Luciano e Miltenberger (1999), Olek *et al.* (2002) e Life-365. Os modelos resultaram em coeficientes bem diversos, o que indica que essa propriedade deve ser medida ao invés de estimada.

#### **10.2.2.2      Ensaios cíclicos acelerados em câmara de carbonatação e de névoa salina**

O efeito sinérgico da penetração de cloretos e da carbonatação foi avaliado. Tanto a penetração de cloretos como a carbonatação foram estudadas depois da exposição natural por 1 ano, antes de serem submetidas aos ensaios acelerados cíclicos. Os ensaios acelerados cíclicos visaram reproduzir os ciclos de molhagem e secagem às quais as estruturas estão expostas durante a sua vida útil e o efeito sinérgico da carbonatação e penetração de cloretos.

Quanto à penetração de cloretos no estado natural, a mistura com CP III-32-RS + escória apresentou maior profundidade de precipitados brancos. No entanto, todas as demais misturas, quando comparadas por classe, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Já nos ensaios acelerados cíclicos, ao final do quinto ciclo, observou-se uma tendência clara das misturas com CP II-E-32 apresentarem maiores profundidades, enquanto as misturas contendo CP III-32-RS apresentaram menores profundidades.

Da mesma forma que ocorreu na análise da penetração de cloretos na condição natural, foi difícil diferenciar as misturas quanto à profundidade de carbonatação natural. Ao compararem-se as misturas por classe de resistência não se observou nenhuma diferença estatisticamente significativa, com exceção das misturas de classe C30, onde a mistura contendo CP III-32-RS + escória apresentou maior profundidade de carbonatação que a mistura CP II-E-32.

Já nos ensaios acelerados cíclicos, observou-se uma tendência das misturas contendo CP III-32-RS apresentarem menor profundidade de carbonatação ao final do quinto ciclo, enquanto as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS + escória apresentaram profundidades sem diferenças estatisticamente significativas nas misturas de classes C20 e C30.

Nos concretos de classe C40, o comportamento foi diferente, sendo que as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS não apresentaram profundidades de carbonatação estatisticamente diferentes e as misturas contendo CP III-32-RS + escória apresentaram profundidades de carbonatação maiores.

A resistividade elétrica das misturas também foi avaliada na condição natural e por ensaios cíclicos. Na condição natural, não se observaram diferenças estatisticamente significativas entre as misturas contendo CP II-E-32 e CP III-32-RS, na maior parte do tempo. As misturas contendo CP III-32-RS+escória apresentaram as maiores resistividades e, portanto menor risco de corrosão.

Na condição acelerada, observou-se que houve uma diminuição significativa da resistividade elétrica após a primeira exposição (1º ciclo) à câmara salina. Isso pode ser devido a: 1) possível existência de uma camada superficial com resistividade bem diferente; 2) efeito da carbonatação sobre a resistividade; 3) mudança de umidade do corpo-de-prova e 4) ataque de cloretos.

Na classe C20, os concretos com CP II-E-32 e CP III-32-RS apresentaram resistividades estatisticamente similares, com risco de corrosão entre baixo e desprezível. Já a mistura com CP III-32-RS+escória apresentou risco de corrosão alto. Na classe C30, as

misturas com CP II-E-32 e CP III-32-RS, apresentaram resistividades estatisticamente similares nos dois últimos ciclos e seu risco de corrosão poderia ser considerado desprezível. Já a mistura com CP III-32-RS+escória apresentou as menores resistividades nos dois últimos ciclos e seu risco de corrosão foi no limite entre baixo e desprezível. Na classe C40, todas as misturas apresentaram risco desprezível de corrosão.

O potencial de circuito aberto foi medido para verificar a probabilidade da ocorrência de corrosão. Na condição natural, as misturas de classe C20, C30 e C40 apresentaram probabilidade de corrosão de 10%. Na classe C20, quando as misturas com os três materiais cimentícios são comparadas, observa-se que as misturas com CP III-32-RS apresentaram menor risco de corrosão. Nas outras duas classes (C30 e C40), não foi possível diferenciar o risco de corrosão para os diferentes materiais cimentícios.

Na condição acelerada, não foi possível diferenciar-se as misturas nos corpos-de-prova com 2 cm de cobrimento nominal ao final do envelhecimento acelerado. Já no caso dos corpos-de-prova com cobrimento nominal de 3 cm, as misturas com CP III-32-RS e CP III-32-RS+escória apresentaram potencial de corrosão estatisticamente semelhantes. As misturas com CP II-E-32 (classes C20 e C40) apresentaram potencial estatisticamente mais negativo.

Observou-se que a probabilidade de corrosão ao final dos ciclos de envelhecimento para as classes C20 e C30 foi >90% para todos os tipos de materiais cimentícios, enquanto que para a classe C40 essa probabilidade está na faixa da incerteza, para o cobrimento de 2 cm. O aumento do cobrimento nominal para 3 cm diminui a probabilidade de corrosão. Todas as misturas de classe C30 e C40 apresentaram potencial de corrosão menor que 10%.

Os ensaios cíclicos apresentam uma maneira de avaliar-se o efeito sinérgico da carbonatação e dos cloretos. Quando todos os resultados de ensaios cíclicos acelerados são comparados observa-se que, de maneira geral, as misturas com CP III-32-RS apresentaram o melhor desempenho no que concerne ao mecanismo de corrosão das armaduras. Já os ensaios naturais não foram conclusivos.

Sugere-se a realização de ensaios cíclicos acelerados modulados a partir do efeito sinérgico da carbonatação e da difusão de cloretos em corpos-de-prova de concreto com idades mais baixas (a partir de 63 dias de idade) para verificação da aplicabilidade dessa

metodologia e, posteriormente, o desenvolvimento de modelos de previsão de vida útil a partir dos resultados obtidos.

Também são necessárias pesquisas para comparação de propriedades obtidas em ensaios de longa duração em exposição natural com aquelas medidas em ensaios cíclicos modulados a partir do efeito sinérgico da carbonatação e da difusão de cloretos. A partir daí, pode-se desenvolver modelos de correlação de resultados de propriedades de ensaios naturais de longa duração a partir de resultados de ensaios cíclicos acelerados.

### **10.3 Especificação por desempenho de concretos com escória de alto-forno**

As especificações prescritivas focam nas características das matérias-primas, na dosagem do concreto, na mistura e no transporte e numa grande variedade de operações, tais como lançamento e cura. Nestas especificações, o desempenho desejado do concreto não é necessariamente descrito. Isso porque as especificações prescritivas assumem que o desempenho desejado é atingido indiretamente por meio de “*receitas*” normalmente com base em experiências passadas.

Além disso, especificações prescritivas impedem o uso de soluções mais inovadoras que potencialmente poderiam resultar em produtos com desempenho comparável ou até melhor do que aqueles que são produzidos de acordo com as especificações prescritivas. Assim, uma das soluções para o avanço tecnológico é o uso de especificações por desempenho.

A NBR 6118/2003 (ABNT, 2003b) é uma norma predominantemente prescritiva, na qual a qualidade do concreto é entendida como diretamente relacionada à relação água/cimento e à resistência à compressão. A norma brasileira não leva em conta o tipo de cimento utilizado, a presença de adições, a vida útil especificada, a qualidade da cura, entre outros aspectos relevantes. Apesar da comprovada importância da relação a/c no que concerne à durabilidade, ela não é o único fator que governa os vários mecanismos de deterioração do concreto.

Analisou-se a NBR 6118/2003 no que concerne à durabilidade e à vida útil. A NBR /2003 está alinhada com a tendência internacional da especificação de classes de agressividade ou de exposição. No entanto, elas estão relativamente subjetivas. Além disso, apesar desta norma visar garantir a durabilidade das estruturas de concreto, ela não especifica a vida útil mínima.

Três estudos de casos foram utilizados para demonstrar, por meio de modelagem matemática de previsão de vida útil, que os critérios apresentados pela NBR 6118/2003 não garantem que a durabilidade da estrutura seja necessariamente atingida e não diferenciam misturas cujos desempenhos podem ser bem diferentes. As recomendações da NBR 6118/2003 mostraram-se inadequadas para que uma vida útil mínima aceitável seja atingida.

Além disso, observou-se que o aumento do teor de escória de alto-forno proporcionou um aumento na vida útil estimada para estruturas, no que concerne à despassivação por cloretos. Esta diferença em vida útil devida ao tipo de material cimentício não é considerada pela NBR 6118/2003

Como alternativa, foram apresentadas as especificações por desempenho, que tratam do que se requer do produto e não prescrevem como esse produto deve ser produzido. Essa uma tendência que vem crescendo em âmbito internacional e no Brasil, a partir da publicação da norma NBR 15.575/2008 da ABNT.

Um plano de ações estruturantes com metas de curto, médio e longo prazo para a criação e implementação de especificações por desempenho de concretos com escória de alto-forno foi apresentado e discutido no capítulo 9.

Como meta de longo prazo (nível estratégico), colocou-se a criação e a implementação de especificações 100% por desempenho, considerando as barreiras e desafios que devem ser vencidos. O objetivo destas especificações é a garantia de uma vida útil elevada e da sustentabilidade ambiental.

A durabilidade e a vida útil das estruturas têm sido objeto de preocupação constante há muito tempo, porém a importância da sustentabilidade tem crescido apenas nas últimas duas décadas com políticas públicas que favorecem o uso mais consciente de recursos naturais, particularmente no tange à dimensão ambiental da sustentabilidade.

Porém ainda existe um longo caminho a ser percorrido para que se chegue a uma especificação totalmente por desempenho para concretos. Especificações totalmente por desempenho requerem a modelagem matemática dos mecanismos de deterioração da estrutura para a previsão da sua vida útil. Não se pode, de maneira alguma, separar especificações por desempenho da modelagem matemática. Esta modelagem deve visar a garantia da vida útil de projeto.

A especificação de requisitos de desempenho sem o uso de modelagem matemática para a previsão da vida útil da estrutura não constitui uma especificação totalmente por desempenho, mas sim uma especificação híbrida. Isso porque, da mesma forma que as especificações prescritivas, os critérios se tornam subjetivos e não necessariamente ligados a uma determinada vida útil.

A construção civil é uma indústria reconhecidamente conservadora e que se opõe a mudanças radicais. É também uma indústria que é influenciada pelo interesse de grandes corporações. Para que especificações por desempenho sejam implementadas faz-se necessário:

- mudança de mentalidade de todos os envolvidos no processo, principalmente no que tange às responsabilidades técnicas;
- redistribuição de riscos;
- mais liberdade na produção do produto que atenda aos requisitos da especificação;
- estabelecimento de bônus e penalidades;
- interação entre projetistas, produtores de concreto e construtoras para garantir que o concreto adequado seja projetado, dosado, misturado, entregue e lançado.

Ações estruturantes de médio prazo (nível tático) apontam para a necessidade de revisão da NBR 6118/2003 e da NBR 12655/2006. As mudanças sugeridas foram:

- permissão de uso de especificações por desempenho, com a abolição de recomendação de relação água/materiais cimentícios máxima;
- criação de novas classes de exposição, levando em consideração vários mecanismos de deterioração;

- permissão de uso de especificações híbridas. As especificações híbridas são uma boa solução para a transição na direção de especificações por desempenho. Contudo, neste caso, faz-se necessária a revisão da NBR 6118/2003 não só para que permita esse tipo de especificação, mas também diminuindo a relação água/materiais cimentícios máxima, aumentando o cobrimento, além da inclusão de outros requisitos ou atributos de desempenho, como, por exemplo, a carga passante. Essa pode ser uma maneira eficaz e relativamente simples de aumentar a vida útil das estruturas, antes que a indústria brasileira esteja preparada para a implementação de especificações por desempenho;
- inclusão de exigência de controle de qualidade em cada estágio do produto, sempre que haja mudança de responsabilidades, ou seja, para o concreto que foi enviado à obra, para o concreto que foi lançado e curado.

Nesta tese, apresentou-se também algumas das características das especificações por desempenho. As especificações por desempenho devem:

- especificar a vida útil de projeto;
- apresentar requisitos e critérios que garantam a vida útil de projeto, ao invés de apresentar uma lista detalhada de materiais e proporções;
- depois do lançamento do concreto, propor ensaios de aceitação que se correlacionem com requisitos, subrequisitos e critérios de desempenho escolhidos;
- apresentar um conjunto de instruções a serem seguidas caso os critérios de desempenho não sejam atendidos.

O processo de escolha de requisitos de desempenho foi discutido no capítulo 9. Nesse mesmo capítulo, foram analisados subrequisitos relacionados com a construtibilidade (propriedades do concreto fresco), subrequisitos relacionados com a segurança estrutural, subrequisitos relacionados com durabilidade, sustentabilidade, subrequisitos e requisitos especiais. Além disso, foi proposta e apresentada uma metodologia para a determinação de subrequisitos relacionados com a durabilidade e discutidos alguns critérios de desempenho.

Na maioria dos casos, um único subrequisito relacionado com a durabilidade não é suficiente para caracterizar o comportamento do concreto frente a mecanismos físicos e químicos complexos, que podem estar, inclusive, sujeitos a efeitos sinérgicos.

Os subrequisitos de desempenho devem ser mensuráveis por meio de métodos de ensaio confiáveis, com boa repetibilidade e com relativamente baixa variabilidade. Além disso, o custo dos ensaios de controle deve ser levado em consideração e ensaios de longa duração não são recomendados.

Um estudo de caso foi analisado usando o enfoque de desempenho. As misturas estudadas nesta pesquisa foram incluídas na discussão e a sua conformidade com os critérios de desempenho foi verificada. Constatou-se que:

- há falta de métodos de ensaios confiáveis que avaliem algumas propriedades relacionadas com mecanismos de deterioração. Alguns dos ensaios podem levar anos para que se obtenham resultados confiáveis, o que torna o seu uso impraticável. Um bom exemplo é o ensaio de carbonatação. A exposição natural por um ano não é suficientemente longa e não apresentou nenhuma correlação com o ensaio acelerado;
- há uma necessidade de estabelecimento de modelos de previsão de vida útil confiáveis, calibrados para as condições e materiais brasileiros, com resultados de longo prazo;
- há necessidade do estabelecimento de correlações entre os ensaios usados na pré-qualificação dos traços e aqueles que serão utilizados no controle de qualidade durante a obra;
- o enfoque por desempenho apresentou-se mais coerente com os resultados dos ensaios das misturas estudadas.

Nesta tese, também foram apresentadas e discutidas algumas ações estruturantes de curto prazo (nível operacional) para implementação de especificações de desempenho, tais como:

- estabelecimento de sistemas de certificação com exigências relacionadas com controle de qualidade, com a qualificação da mão-de-obra e com a produção de concreto;
- maior associação entre projetistas, produtores de concreto e construtoras para garantir que o concreto adequado seja projetado, dosado, misturado, entregue e lançado.

- proposição de um conjunto de ensaios para avaliação de subrequisitos de desempenho associados às várias etapas do processo (da qualificação da mistura até a construção). No caso dos ensaios durante a construção, deve-se levar em conta o sistema de controle de qualidade e a variabilidade do método de ensaio.

Conclui-se que especificações híbridas já poderiam ser implementadas, porém para que as especificações por desempenho possam ser implementadas fazem-se necessárias pesquisas para o desenvolvimento de métodos de ensaio e de modelos matemáticos mais adequados às condições brasileiras, em termos de materiais e de condições específicas de exposição.

## **10.4 Pesquisas futuras**

A presente tese levantou algumas lacunas relacionadas com modelos de previsão de vida útil, com métodos de ensaios, com subrequisitos e critérios de desempenho relativos à durabilidade que necessitam ser mais profundamente investigados.

### **10.4.1 Modelos de previsão de vida útil**

Modelos nacionais, com condições regionais ou modelos internacionais calibrados para as condições locais, tanto em termos de materiais quanto em termos macroambientais, são imprescindíveis. Caso decida-se usar o Life 365, deve-se obter os dados de entrada do modelo para as condições brasileiras.

Um dos desafios da especificação por desempenho está diretamente relacionado à dificuldade dos modelos de previsão da vida útil realmente refletirem as condições de exposição e seu efeito durante períodos longos. Portanto, qualquer modelagem confiável deve ter como base medidas realizadas durante décadas, com medidas históricas. A

continuidade da pesquisa por elevados períodos, principalmente no Brasil, não é fácil e nem prática corrente.

Apesar de uma quantidade enorme de modelos de previsão de vida útil estar disponível na literatura, não existe sequer um único modelo que possa garantir a vida útil de uma estrutura quando diversos mecanismos de deterioração estejam presentes simultaneamente. São necessários modelos, que além de levar em consideração os diversos mecanismos, possam representar sua interação ou sinergia.

Além disso, não foi encontrado nenhum modelo que leve em consideração o efeito da retração ou da fissuração na vida útil da estrutura, apesar de ser consenso que a fissuração pode ser um determinante na deterioração do concreto, pois apresenta um meio de entrada de diversos agentes agressivos.

Também se faz necessário a criação de modelos de previsão de vida útil que incorporem algum ensaio de carbonatação acelerado, ao invés de carbonatação natural, pois esse ensaio é de duração muito longa e totalmente impraticável.

Outra tendência internacional que deveria ser investigada para as condições brasileiras são os modelos probabilísticos, os quais podem ser incorporados aos modelos de previsão de vida útil. Estes modelos podem ser úteis quando as especificações por desempenho consideram recompensas ou bônus e multas para o pagamento do empreiteiro.

#### **10.4.2 Métodos de ensaios**

O desempenho deve ser quantificado por meio de propriedades e seus respectivos indicadores mensuráveis, que representem os seus requisitos e subrequisitos. O desenvolvimento de ensaios que sejam relativamente de fácil execução, confiáveis e com variabilidade baixa é fundamental.

Nesse sentido, um dos maiores desafios é a determinação do coeficiente de difusão de cloretos e de CO<sub>2</sub>. A maioria dos modelos de previsão de vida útil usa essas propriedades como um dos parâmetros de entrada. Contudo, não existe um ensaio normalizado que seja de fácil execução e que ofereça relativamente baixa variabilidade, sendo que o método de ensaio normalmente usado para determinação do coeficiente de difusão de cloretos é o

ASTM C 1556 (2004). Não há ensaios padronizados para carbonatação e nem para a determinação do coeficiente de difusão de CO<sub>2</sub>.

A difusão é uma propriedade de suma importância para a durabilidade de uma estrutura, a qual não possui um método de ensaio normalizado e nenhum modelo que a incorpore. Muita pesquisa tem sido feita nessa área, contudo nenhum ensaio foi aceito.

Outro requisito importante que não possui um método de ensaio confiável é a fissuração decorrente da retração plástica em conjunto com a retração por secagem e a retração autógena. Mais pesquisas são necessárias neste campo.

Há ainda a necessidade de realização de ensaios cíclicos acelerados modulados a partir do efeito sinérgico da carbonatação e da difusão de cloretos em corpos-de-prova de concreto com idades mais baixas (a partir de 63 dias de idade) para verificação da aplicabilidade dessa metodologia e, posteriormente, o desenvolvimento de modelos de previsão de vida útil a partir dos resultados obtidos.

Também são necessárias pesquisas para comparação de propriedades obtidas em ensaios de longa duração em exposição natural com aquelas medidas em ensaios cíclicos modulados a partir do efeito sinérgico da carbonatação e da difusão de cloretos. A partir daí, pode-se desenvolver modelos de correlação de resultados de propriedades de ensaios naturais de longa duração a partir de resultados de ensaios cíclicos acelerados, que são muito importantes para o avanço do conhecimento e para a criação de uma base de informação para especificações híbridas e por desempenho.

#### **10.4.3 Requisitos e Critérios**

Não são necessárias pesquisas apenas sobre requisitos de durabilidade, porém também se faz necessária a criação de diretrizes claras na escolha de requisitos adequados para cada condição de exposição e tipo de estrutura e de seus respectivos critérios aceitáveis.

Caso requisitos de desempenho relacionados à sustentabilidade ambiental sejam incorporados nas especificações brasileiras, faz-se necessária a criação de ferramentas de cálculo do inventário de ciclo de vida para as condições e materiais disponíveis no Brasil.

Faz-se também imperativa a criação e a avaliação de parâmetros específicos de controle de qualidade, especialmente no que tange aos vários subrequisitos relacionados com a durabilidade.

Além disso, são necessários estudos de casos reais onde especificações por desempenho são criadas para obras específicas, tendo a sua construção e o seu desempenho devidamente monitorados.

## Referências

- AÏCTIN, Pierre-Claude. **Concreto de alto desempenho**. 1.ed., 667p, São Paulo: Pini, 2000.
- AL-GAHTANI; RASHEEDUZZAFAR; AL-SAADOUN, S.S. Rebar corrosion and sulfate resistance of blast furnace slag cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 6, 1994, p. 223-239.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, n. 30, p. 1047-1055, 2000.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **AASHTO TP 64**: Predicting Chloride Penetration of Hydraulic Cement Concrete by the Rapid Migration Procedure, Washington D.C., 2003.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **AASHTO T 277**: Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Washington D.C., 1996.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 116R-00**: Cement and Concrete Terminology, reprovado em 2005, Michigan, EUA, 2005a.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 201.2R-08**: Guide to durable concrete, Michigan, EUA, 2008a.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 228.2R-98**: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, reprovado em 2004, Michigan, EUA, 2004.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 233R-03**: Slag Cement in Concrete and

- Mortar. Michigan, EUA, 2003.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 301-05:** Specifications for Structural Concrete, Michigan, EUA, 2005b.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 318-08:** Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Michigan, EUA, 2008b.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 365.1R-00:** Service-Life Prediction, Michigan, EUA, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157 / C157M - 08** Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, Pennsylvania, 2008a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C289 - 07** Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates, Pennsylvania, 2007a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 595:** Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, Pennsylvania, 2005a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C779 / C779M - 05** Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces, Pennsylvania, 2005b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876 -91** Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (Withdrawn 2008b).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C944 / C944M - 99(2005).** Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method, Pennsylvania, 2005c.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1152 / C1152M -** Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, Pennsylvania, 2004a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1157 -** Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, Pennsylvania, 2008c.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202:** Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Pennsylvania, 2005d.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1260 – 07:** Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), Pennsylvania, 2007b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1293 - 08b** Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction,

- Pennsylvania, 2008d.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1556**: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion, Pennsylvania, 2004b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1567** - 08 Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), Pennsylvania, 2008e.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1581**: Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage, Pennsylvania, 2004c.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 57-78**: Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, Pennsylvania, 1984.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1-90**: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, Pennsylvania, 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**. Pennsylvania, 1996.
- ANDRADE, J. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos**. Tese de doutorado, UFRGS, Porto Alegre, Porto Alegre, 2001.
- ANDRADE, J. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análises das manifestações patológicas nas estruturas do Estado de Pernambuco**. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Porto Alegre, 1997.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. Corrosion rate monitoring in laboratory and on site. **Construction and Building Materials**. v. 10, n. 5, p. 315-328, 1996.
- ANDRADE, C; GONZALEZ, J.; RODRIGUES, J. Remaining service life of corroding structures. In: IABSE Symposium on Durability. **Proceedings**, p. 359-363, Lisboa, 1989.
- 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.
- ARMAGHANI, J. M.; BLOOMQUIST, D. G. Durability specification and ratings for concrete, In: Concrete 200, **Proceedings** of the International Conference, Dundee, Scotland, Sept. 1992, vol. I, p. 23-36.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5 735**: Cimento Portland de

- alto-forno. Rio de Janeiro, 1991a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5 738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5 739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6 118**: Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 2003b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6 474**: Cimento Portland e outros materiais em pó. Rio de Janeiro, 1984a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7 211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7 211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7 218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7 215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7 251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8 490**: Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem. Rio de Janeiro, 1984b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8 522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1984c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8 953**: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9 776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9 779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11 578**: Cimento Portland

- composto. Rio de Janeiro, 1991b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11 579**: Cimento Portland. Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11 580**: Cimento Portland. Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1991d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11 581**: Cimento Portland. Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1991e.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11 582**: Cimento Portland. Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991f.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12 654**: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto. Rio de Janeiro, 1992b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12 655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14 931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15 575-1**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2008a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15 575-1**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2008b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**: Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1991/2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1991g.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados -

- Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987d.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL, **Interim Recommendations for Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes**, 2002.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION. **AFNOR NF P15-301** : Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité. Saint-Denis, 1978.
- BARBOSA, C.D.; BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G.. Avaliação da carbonatação natural em concretos produzidos com e sem sílica ativa submetidos a diferentes procedimentos de cura. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- BAROGHEL-BOUNY, V. Durability Indicators: A Basic Tool for Performance –Based Evaluation and Prediction of Durability. In: **Proceedings** of International Seminar on Durability and Lifetime Evaluation of Concrete Structures", Higashi-Hiroshima, September, 2004.
- BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: review. **Construction and Building Materials**. 2001. v.15, p. 93-103.
- BASHEER, P. *et al.* Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 437-449, 2002.
- BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. Tese - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- BAUER, E.; HELENE, P.. 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.
- BAWEJA, D.;ROPER, H.; SIRIVIVATNANON, V. Specifications of Concrete for Marine Environments: A Fresh Approach. **ACI Materials journal** V.96 Issue 4, Michigan, July 1999.
- BECKER, R; FOLIENSTE, G. Performance Based Building Thematic Network, PBB International State of The Art, PeBBu 2nd International SotA report, Final Report, 2005.
- BEHLOUL, M.; LEE, K. C.; ETIENNE, D. Seonyu Ductal® Footbridge. In *Concrete Structures: The Challenge of Creativity*, FIB Symposium 2004 **Proceedings**, April 26-28, Avignon, France: Association Française de Génie Civil, 2004.
- BHARATKUMAR, B.; NARAYANAN, R.; RAGHUPRASAD, B.; RAMACHANDRAMURTHY, D. Mix proportioning of high performance concrete. **Cement and concrete Composites**, p. 71-80, 2001.

- BICKLEY, J.; HOOTON, D.; HOVER, K. (b) Performance Specifications for Durable Concrete: Current practice and limitations. **Concrete International**, V 28 Issue 9 Michigan, September 2006.
- BICKLEY, J.; HOOTON, R. D; HOVER, K. (a) **Preparation of a Performance –Based Specification for Cast-in-Place Concrete**, RMC Research Foundation, January, 2006.
- BIER, T.; KROPP, J.; HILSDORF, H. The formation of silica gel during carbonation of cementitious systems containing slag cements. In: 3<sup>rd</sup> International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, **Proceedings**, Trondheim, ACI-SP-114, Vol.2, Detroit 1989.
- BINJEN, J. **Blast furnace slag cement**. Den Haag: CIP Royal Library, 1996.
- BLESZYNSKI, R.; HOOTON, R.; THOMAS, M.; ROGERS, C. Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies. **ACI Materials Journal**, v.99, N.5, p.499-508, 2002.
- BOURGUIGNON, K. **Influência da resistência na profundidade de carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado). PPGECC da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES, 2004.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 146 :2002**: Specification for Portland blast furnace cements with strength properties outside the scope of BS EN 197-1, London, 2002.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 4246**: Specification for high slag blast furnace cement, London, 1996.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5328-1:1997**: Concrete. Guide to specifying concrete, London, 1997.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5328-2:1997**: Concrete. Method for specifying concrete mixes, London, 1997.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8500-1**: Concrete. Complementary British standard to BS EN 206-1. Part 1. Method of specifying and guidance for the specifier, London, 2006.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 197-1**. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 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. In: Fourth International Conference. **Proceedings**. Istanbul, Turkey, v. II, p. 1325-1342, 1992.
- BUENFELD, N.; NEWMAN, J. An examination of three methods for studying ion diffusion in cement pastes, mortars and concrete, **Materials & Structures**, Vol: 20, Pages: 3 – 10,

- 1987.
- CADORE, W.; ISAIA, G.; GASTALDINI, A. , TRUN, R. Efeitos da escória granulada e da cal hidratada na carbonatação da camada de revestimento de protótipos de concreto. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- CAMARINI, G. **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.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA A23.1**: Concrete Materials and Methods of Concrete Construction Methods of Test and Standard Practices for Concrete, Ontario, 2004a.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA A23.3**: Design of concrete structures, Ontario, 2004b.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA A3001**: Cementitious Materials for Use in Concrete, Ontario, 2003.
- CANMET. Present and Future Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, Prepared by Holderbank Consulting Ltd. for Efficiency and Alternative Energy Technology Branch/CANMET, DSS File No. 23440-1-0464. March 1993.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**, São Paulo: Pini, 1997.
- CASCUDO, O. Inspeção e Diagnóstico de Estrutura de concreto com problema de corrosão da Armadura. In: **Concreto, Pesquisa e Realizações**. v2. Ed. G. C. Isaia. p.1072-1108. São Paulo. Ibracon. 2005.
- CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. Goiânia, 2003.
- CAVALCANTI, J.; BORGES, W.; MONTEIRO, E.; HELENE, P. Contribuição ao método de procedimento experimental de carbonatação ao natural. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- CAVILL, B.; CHIRGWIN, G. The World's First RPC Road Bridge at Shepherds Gully Creek, NSW. In: **Proceedings of the Fifth Austroads Bridge Conference**, Hobart, Australia, May 2004.
- CLAISSE, P.; EI-SAYAD, H.; SHAABAN, I. Permeability and pore volume of carbonated concrete. **ACI Materials journal**, V96 Issue 3, Michigan, May-June 1999.
- COELHO, M. A. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado). PPGEC da

- Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES, 2002.
- COLLEPARDI. A state-of-art review on delayed ettringite attach on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.25, p. 401-407, 2003.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. **Bulletin d'Information**. Paris, n. 192, 1989.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB). Durable concrete structures - **Design Guide**. Great Britain, 1989.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB). Durable concrete structures - **Design Guide**. 1992.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP **Model Code 1990**. London, 1993.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion. **Bulletin 238**, Stuttgart, 1997.
- CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT (CIB). Performance Based Methods for Service Life Prediction. **CIB Report Publication 294**, 2004.
- COSTA , M.; SILVA; M. ; PINHEIRO, S.; SOUZA, F.; COELHO, M.; MORIMOTO, T. Concretos com altos teores de escória de alto-forno: Avaliação da carbonatação e da difusão de íons cloreto. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- CST – COMPANHIA SIDERÚRGICA TUBARÃO. Disponível em: <http://www.cst.com.br>. Acesso em: 04 de agosto de 2006.
- DAL MOLIN, D. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Porto Alegre, 1988.
- DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições minerais para concreto estrutural. In: **Concreto, Pesquisa e Realizações**. V1. Ed. G. C. Isaia. p.346-379. São Paulo. Ibracon. 2005.
- DAY, K. Cash Penalty Specifications Can be Fair and Effective. **Concrete International**, V4 Issue 9 Michigan, September 1982.
- DAY, K. Perspective on Prescriptions: Can America learn from the Australian experience? **Concrete International**, V27 Issue 7 Michigan, July, 2005.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E V. **DIN 1164** Special cement - Part 10: Composition, requirements and conformity evaluation for special common cement.
- DOE, 2005 (a). Building Energy Codes Program. <http://www.energycodes.gov/>. Acesso em 12 de novembro de 2007.
- DOE, 2005 (b). U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy,

- Building Technologies Program and software tools web site, Energy Plus page:[http://www.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=392/pagename\\_e\\_submenu=/pagename\\_menu=other\\_applications/pagename=subjects](http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=392/pagename_e_submenu=/pagename_menu=other_applications/pagename=subjects). Acesso em 12 de novembro de 2007.
- 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.
- EUROCODE EN 206-1 **Concrete: Specification, performance, production & conformity**, 2000.
- FERNÁNDEZ, J.; BROWN, S. Comparacion del ataque por sulfatos en barras de mortero elaboradas con cemento portland normal y cemento portland puzolanico. In: Workshop sobre Durabilidade das Construções, 2. São José dos Campos, 2002.
- FERRAGUT, T. RASMUSSEN, R.; DARTER, M.; HARRINGTON, D.; ANDERSON-WILK, M. Long-Term Plan for Concrete Pavement Research and Technology - **The Concrete Pavement Road Map**: Volume II, Tracks. FHWA-HRT-05-053, 2005.
- FERREIRA *et al.*, Avaliação da resistência à compressão, módulo de deformação e absorção de água de concretos contendo adições minerais. In: IBRACON, 46º congresso. **Anais**. Florianópolis SC, 2004.
- FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás. Setembro de 2003.
- FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Performance Specifications Strategic Roadmap - A Vision for the Future**, Washington D.C., 2004.
- FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Highways For Life, 2003 - <http://www.fhwa.dot.gov/hfl/about.cfm>. Acesso em 18 de Maio de 2007.
- FREDERIKSEN, J.; NILSSON, L.; SANDBERG, P.; POULSEN, E.; TANG, L.; ANDERSEN, A. A system for estimation of chloride ingress into concrete. Theoretical background. HETEK. Danish Road Directorate **Report No. 83**, 1997.
- FURNAS Equipe de Laboratório de Concreto, Deptº de Apoio e Controle Técnico. **Concreto massa estrutural projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: PINI, 1997.
- GAAL G. C. M. **Prediction of deterioration of concrete bridges. corrosion of reinforcement due to chloride ingress and carbonation**. PhD Thesis. Delft University Press, Netherlands, 2004.
- GASTALDINI, A. G.; ISAIA. Efeito de misturas compostas de pozolanas e escória na permeabilidade a cloreto. In: VIII Encontro Nacional do Ambiente construído. **Anais**.

- Salvador, 2000.
- 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.
- GIBSON, E. J. Working with the performance approach in building. Report of Working Commission W060, **CIB Publication 64**. CIB, Rotterdam, The Netherlands, 1982. .
- GROSS, J. G. Developments in the application of the performance concept in building. In: **Proceedings** of 3rd CIBASTM- ISO-RILEM International Symposium, Tel Aviv, Israel, Vol. 1, I-1, 1996.
- HAJAR, Z.; SIMON, A.; LECOINTRE, D.; PETITJEAN, J. Construction of the First Road Bridges Made of Ultra-High-Performance Concrete. In: **Proceedings**, 2003 International Symposium on High Performance Concrete, *Orlando*, FL, October 2003, 18 pp.
- HÄKKINEN, T. The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete. Part 2: Technical properties and theoretical examinations. **Cement and Concrete Research**, Vol 23. No. 3, May 1993.
- HASPARYK, N.; LOPES, A.; ANDRADE, M.; SANTOS, S.. Deformações por retração e fluência. In: **Concreto, Pesquisa e Realizações**. V1. Ed. G. C. Isaia. São Paulo. Ibracon. 2005. p.655-685.
- HELENE, P. H. **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. H. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.
- HELENE, P. Vida útil das estruturas de concreto. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. **Anais**, v. 1 Porto Alegre, 1997.
- HELENE, P.; MITIDIÉRI FILHO, C.; THOMAS, E.. Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto. In: Reunião Anual do Ibracon. **Anais**. São Paulo. 1995.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo. Pini. 1ed. 1993.
- HOOTON, R.D.; THOMAS, M.D.A.; Stanish, K. Prediction of Chloride Penetration in Concrete. Final Report No. **FHWA-RD-00-142**, McLean, VA, 2001.
- HOPE, B.; IP, A. Corrosion of steel in concrete made with slag cement. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 6, p. 525-531, Nov/Dev 1987.
- HOUST, Yves F., WITTMANN, Folker H. *Depth profiles of carbonates formed during natural*

- carbonation*. **Cement and Concrete Research**, v.2151, p.1 –8, 2002.
- ICC, **2003 ICC Performance Code for Buildings and Facilities**, International Code Council, USA.
- INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. IRAM 50000:2000 - **Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción**. Buenos Aires, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. [www.ibs.org.br](http://www.ibs.org.br). Acesso em abril 2009.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Prática recomendada IBRACON. Comentários técnicos NB-1. NBR 6118:2003**. Projeto de estruturas de concreto. Procedimento, Junho 2003.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN INN. **NCh 148 Of1968** Cemento – terminología, clasificación y especificaciones generales. Santiago, Chile.
- INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. **ISO 6240**: "Performance Standards in Building – Contents and Presentation", Geneva, Switzerland, 1980.
- INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. **ISO 6241**: "Performance Standards in Building - Principles for their Preparation and Factors to be Considered", Geneva, Switzerland, 1984.
- INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. **ISO 6242**: "Building construction - Expression of users' requirements - Part 1: Thermal requirements, Part 2: Air purity requirements, Part 3: Acoustical requirements", Geneva, Switzerland, 1992.
- ISAIA, G. C.. A durabilidade do concreto de alto desempenho e o meio ambiente: um estudo sócio-econômico. In: 41<sup>º</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Salvador, 1999.
- 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<sup>º</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Foz de Iguaçu, 2001.
- JAPAN INDUSTRIAL STANDARD, JIS R 5211:2003 **Portland blast-furnace slag cement**, 2003.
- 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, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. São Paulo :EPUSP, Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.
- JUCÁ, T. P.; SELMO, S.; FIGUEIREDO, E. Avaliação da capacidade de certos cimentos brasileiros na combinação de cloretos através do método colorimétrico. In: 42<sup>º</sup> Congresso

- Brasileiro do Concreto. **Anais**. Belo Horizonte, 2002.
- KASZBERUK, M.; JEZIERSKI, W. Evaluation of concrete resistance to chloride ions penetration by means of electric resistivity monitoring. **Journal of Civil Engineering and Management**, Vol XI, No. 2., pg. 109-114, 2005.
- KAZMIECZAK, C. S.; LINDENMEYER, Z. 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. **Proceedings**. Florianópolis, 1996.
- KLIEGER, P.; ISBERNER, A. Laboratory Studies of Blended Cements Portland Blast-Furnace Slag Cements, Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, **Bulletin 218**, reprint of the Journal of the PCA research and development laboratories, Vol. 9, No. 3, 2-22 , September 1967.
- KOBAYASHI, K.; SHIRAKI, R.; KAWAI, K. Carbonation in concrete. In: **Proceedings** of JSCE, No. 433, pages 1-14, 1991
- KOSMATKA, S.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W.; TANESI, J. **Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Portland Cement Association**, Skokie, IL, EEUU, 2004.
- KROPP, J. Third International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, RILEM TC 178 – TMC, **Proceedings**, Andrade, C. and Kropp, J (Editors), Madrid, Spain, 2004.
- LANG, E.; GEISELER, J. F. Use of Blast-Furnace Slag Cement with High Slag cement Content for High Performance Concrete, Radical Concrete Technology. In: **Proceedings** of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, June 1996, Edited by R.K. Dhir and P. C.Hewlett, Publisher: E&FN Spon.
- LARA, P. L. O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras**. Dissertação (Mestrado) – ENC/FT/ Universidade de Brasília. Brasília, 2003.
- LIM, S. N.; WEE, T. H. Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete. **ACI Materials Journal**, p. 587-593, 2000.
- LITTLE, L.; SETEPLA, A. 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.
- LOBO, C. Specifications and Submittals: Is a change in order? **Concrete International**, V 24 Issue 11 Michigan, November 2002.
- LORD, A. R. **Handbook of reinforced concrete building design**. Authorized reprint from the copyrighted proceedings Volume 24-1928, American Concrete Institute, Detroit. Michigan, Reprinted by Portland Cement Association, Concrete Reinforcing Steel Institute

- and Rail Steel Mar Association, p.186, 1928.
- LUCIANO, J.; MILTENBERGER, M. Predicting chloride diffusion coefficients from concrete mixture proportions. **ACI Materials Journal**, V 96 Issue 6, Michigan, November 1999.
- LUCO, L. F. La durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos. In: **Durabilidad del hormigón estructural – XIV Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón**. Olavarría, 2001. p. 2-45.
- 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.
- 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.
- MARCEAU, M.; NISBET, M.; VANGEEM, M. **Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete**, SN3011, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2007.
- MARCHAND, J.; GÉRARD, B. New developments in the modeling of mass transport processes in cement based composites. A review advances in concrete technology, **ACI Publication SP-154**, 1995.
- MATALA, S. Carbonation mechanism in the granulated blast furnace slag concrete. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 10<sup>th</sup>. **Proceedings**. Detroit, 1994.
- MATHER, B. "Laboratory Tests of Portland Blast- Furnace Slag Cements," **ACI Journal**, Proceedings V. 54, No. 3, Sept., pp. 205-232, 1957.
- MCGRATH, P.F., HOOTON, R.D., "Influence of Voltage on Chloride Diffusion Coefficients From Chloride Migration Tests." **Cement and Concrete Research**, vol. 26, no. 8, pp. 1239-1248, 1996.
- MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. **Revista Engenharia, Ciência e Tecnologia**, Vitória, v.4, n.5, p. 3-12, 2001.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2006.
- MEIRA, G.R.; PADARATZ, J.C.B.Jr; ALONSO; M.C.; ANDRADE, M. C. Carbonatação de estruturas de concreto armado em zona de atmosfera marinha-Influência do grau de saturação. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- 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.
- MILLARD S.G.; GOWERS K.R. . The influence of surface layers upon measurement of concrete resistivity. In: Malhotra VM ed(s). **ACI SP126: Durability of Concrete**. Detroit, Michigan, CANMET/ACI, 1991.
- MOKAREM, D.W.; WEYERS, R.E.; LANE, D.S., "Development of Performance Specifications for Shrinkage of Portland Cement Concrete", **Transportation Research Record** 1834, pp. 40-47., 2003.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- MORAES, S. **A capacidade de proteção de cobrimento de concretos com elevados teores de escória: avaliação da corrosão das armaduras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.
- MUKHERJEE, P. K. Preliminary Slag Scoping Study for Ecosmart™ Concrete Insaar Services Report Number: IN-0226-1103, Feb.2004.
- NAKAMURA, N.; SAKAI, M.; SWAMY, R.N. Effect of slag fineness on the development of concrete strength and microstructure. In: Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. **Proceedings**. Istambul, VII, 1992. p.1343-1365.
- 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.
- NILSSON, L. WP4 Report - Modeling of Chloride Ingress. CHLORTEST – EU Funded Research Project under 5FP Growth Programme. Resistance of concrete to chloride ingress – From laboratory tests to in-field performance, Sweden, 2005.
- NORDEST. Nordest method NT Build 492: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Finland, 1999.
- NUNES, F. L. **Influência da dosagem na carbonatação dos concretos**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- OBLA, K.; LOBO, C. (a) Acceptance Criteria for Durability Tests. **Concrete in Focus**, 2007.
- OBLA, K.; LOBO, C. (b) Acceptance Criteria for Durability Tests: minimizing the risks of accepting defective concrete or rejecting acceptable concrete. **Concrete International**, V 29 Issue 5 Michigan, May 2007.
- OLEK, J; LU, A; FENG, X; MAGEE, B. Performance-related specification for concrete bridge

- superstructures, Volume 2: High-performance concrete, 2002.  
<http://docs.lib.purdue.edu/jtrp/167>
- ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y EDIFICACIÓN (ONNCCE). **NMX – C-414-ONNCCE Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba**, 1999.
- OSBORNE, G. J. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. **Cement and concrete Composites**, n. 21, p. 11-21, 1999.
- OZYILDIRIM, C.. **Effects of Temperature on the Development of Low Permeability in Concrete**. *VTRC 98-R14*, Charlottesville, VA, 1998.
- PAPADAKIS, V. G. Efficiency Factors (k-Values) for Supplementary Cementing Materials Regarding Carbonation and Chloride Penetration. In: **Proceedings** of Fifth International Conference on Durability of Concrete, CANMET/ACI, ed. V. M. Malhotra, Vol. I, Barcelona, Spain, 2000.
- PAPADAKIS, V.; VAYENAS, C.; FARDIS, M. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, Vol. 88, No.4, Michigan, July-August 1991.
- PARROTT, L.J. A study of carbonation-induced corrosion. **Cement and Concrete Research**,. v 46. n166. p23-28, 1994.
- PAULETTI, C.; DAL MOLIN, D.; KAZMIERKZAK, C.; BREZEZINSKI, D. Profundidade de carbonatação em ensaios acelerados com diferentes percentuais de CO<sub>2</sub>. . In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- PESSÔA, P. **Avaliação da influência do consumo de cimento na corrosão de armaduras em estruturas de concreto carbonatadas**. Dissertação (Mestrado) – ENC/FT/ Universidade de Brasília. Brasília, 2002.
- PETRE-LAZAR, I. **Evaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers**, PhD thesis, Laval University, Québec, 2000.
- PETRUCCI, Eládio G., **Concreto de cimento Portland**., Editora Globo , Porto alegre, 1971
- PICCOLI, G. *et al.* Influência da dosagem de materiais cimentícios na resistência a compressão de concretos de alto desempenho. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Salvador, 1999.
- POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; ANDRADE, J. J. O. Concretos com adição de sílica ativa: Determinação dos coeficientes de aceleração entre a carbonatação acelerada e ao natural. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Recife, 2005.
- RAMSEUR, J.; PARKER, L. Carbon tax and greenhouse gas control: options and considerations for Congress. In: **Congressional Research Service Report for**

- Congress**, 7-5700, R40242. Washington DC, February, 2009.
- REGATTIERI, C. **Contribuição ao estudo da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- 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.
- REGOURD, M.. Altération interne des bétons. In: La Durabilité des Structures en Béton. Paris: École Nationale des Ponts et Chaussées, 1988.
- RICHARDSON, M. **Carbonation on Reinforced Concrete**, CITTIS LTD, Dublin, 1988.
- ROSEMBERG, A.; HANSON, C.; ANDRADE, C. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In: **Materials Science of Concrete**. Ed. Skalny, J. P., American Ceramic Society, v. I, 1989.
- ROSENBAUM, E. SFPE Engineering Guide to Performance-based Fire Protection Analysis and Design of buildings, SFPE, 2005. <http://sfpe.org/upload/draftrevisions.pdf>. Acesso em 12 de novembro de 2007.
- ROSTAM, S. Service life design – the european approach. **Concrete International**, V 15 Issue 7, Michigan, July 1993.
- ROY, D.M., TIKALSKY, P.J., SCHEETZ, B.E., ROSENBERGER, J., MALAK, R., KRIZE, T., Influence of Cement Composition on AASHTO T 277 Rapid Chloride Ion Permeability: Recommended Changes to the Method. In: **TRB Annual Meeting**, Washington D.C., 2002.
- SAEKI, T. Effect of carbonation on chloride penetration in concrete. In: **Proceedings**, Third Rilem workshop on testing and modelling the chloride ingress into concrete, pages 381 to 394, Madrid, September, 2002.
- SAKAI, K.; WATANABE, H; SUZUKI, M; HAMAZAKI, K. Properties of granulated blast-furnace slag cement concrete. In Fly Ash, Silica Fume, slag, and Natural Pozzolans in concrete. Fourth International Conference. ACI Special publication SP132. **Proceedings**. v. II, p.1367-1383, Istambul, 1992.
- SANJUÁN, M.; ANDRADE, C.; CHEYREZY, M. Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. **Advances in Cement Research**, v. 15, n. 4, p. 171-180, 2003.
- SARIC-CORIC, M.; AITCIN, P. Influence of curing conditions on shrinkage of blended cements containing various amounts of slag, **ACI Materials Journal**, V. 100 issue. 6 ACI, Nov. 2003.
- SCA – Slag Cement Association. Slag cement and life Cycle prediction models. Slag cement in concrete No. 23, Texas, 2003b.

- SCA – Slag Cement Association. Slag cement and the environment. Slag cement in concrete No. 22, Texas, 2003a.
- SFPE, The SFPE Code Official's Guide to Performance-based Design Review. SFPE, USA, 2004.
- SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória de alto-forno**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1998. 232p.
- SILVA, M.G. (coordenadora) (a). **Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno: estratégia para consolidar o mercado da escória de altoforno – Projeto Desempenho**. Relatório técnico (em conclusão). NEXES – Núcleo de excelência em escórias siderúrgicas. Universidade Federal do Espírito Santo. 2006a.
- SILVA, M.G. (coordenadora) (b). **Desenvolvimento de estrutura hidráulica de proteção contra a ação de ondas marinhas utilizando escória de alto-forno – Projeto Esthidra**. Relatório técnico (em conclusão). NEXES – Núcleo de excelência em escórias siderúrgicas. Universidade Federal do Espírito Santo. 2006b.
- SIMONS, B. Concrete performance specifications: New Mexico experience. **Concrete International**, V 26 Issue 4, Michigan, April 2004.
- SIVASUNDARAM, V.; MALHOTRA, V. M. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag. **ACI Materials Journal**, p. 554-563,1992.
- SMOLCZYK, H. G. *Slag structure and identification os slags*. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7<sup>th</sup>. **Iron and Steel Slags-Reports from 1974-2000**. Paris, 1980.
- SOUZA, R. – [www.cte.com.br/noticias/integagentes.asp](http://www.cte.com.br/noticias/integagentes.asp), Acesso em 12 de novembro de 2007.
- SURYAVANSHI, A.; SWAMY, R.; NARAYAN. *Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements*. **Cement and Concrete Research**, 1996. v.26, n.5, p.729-741.
- SWAMY, R. N.; SAKAI, M.; NAKAMURA, N. Role of superplasticizers and slag for high performance concrete. In: Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemicals Admixtures in Concrete. V. M. Malhotra. SP 148-1. **Proceedings**. Detroit, p. 1-26, 1994.
- SZIGETI, F.; DAVIS, G. **Special Issue: Performance-based Building**. Building Research & Information 33(2), 2005.
- TANESI, J. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, Brazil 1999.

- TANESI, J.; CAMARINI, G.; SILVA, M. Especificações por desempenho aplicadas ao concreto. IBRACON, In: 50º congresso. **Anais**. Salvador, Bahia, 2008.
- TANG, L.; NILSSON, L.O. Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field. **ACI Materials Journal**, vol. 89, no. 1, pp. 49-53, 1993.
- TAYLOR, P. Performance-Based Specifications for Concrete. **Concrete International**, V.26, Issue 6, Michigan, August, 2004.
- THANGAVEL, K; RENGASWAMY, N. Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete. **Cement and Concrete Composites**, 1998. nº 20, p. 283-292.
- THOMAS, M.; SCOTT, A.; BREMMER, T.; BILODEAU, AL.; DAY, D. Performance of Slag Concrete in Marine Environment. **ACI Materials journal**, V105 Issue 6, Michigan, November 2008.
- TORRENT, R.; ELOLA, A.; SZTEINBERG, S. Propriedades de los hormigones com adición 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.
- UNITED NATIONS. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998.
- VIOLETTA, B. Life-365 Service Life Prediction Model. **Concrete International**, V 24 Issue 12, Michigan, December 2002.
- WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A.K.; LOGENDRAN, D. *Pore structure controlling the carbonation os a hardened cement matrix blended with mineral admixture*. **Advances in Cement Research**, v. 11, n. 2, p. 81-95, 1999.
- YANG, C. A comparison of transport properties for concrete using the ponding test and the accelerated chloride migration test. **Materials & Structures**, Vol: 38, Pages: 313-320, 2005.
- ZHANG, M. H.; GJØRV, O. E. Effect of Silica Fume on Cement Hydration in Low Porosity Cement Paste, **Cement & Concrete Research**, Vol. 21, No. 5, 1991.
- ZHANG, R.; 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.

## **Apêndice A – Caracterização dos materiais**

### **A.1 Materiais cimentícios**

Os materiais cimentícios caracterizados são o cimento *Portland* composto com escória CP II-E-32 (NBR 11 578/1991), o cimento *Portland* de alto-forno CP III-32-RS (NBR 5 735/1991), e a mistura, em massa, de 50% de cimento *Portland* de alto-forno CP III-32-RS com 50% de escória granulada de alto-forno moída.

A caracterização física, a análise química e o teor de escória dos materiais cimentícios são apresentados no Quadro A. 1, Quadro A. 2 e Quadro A. 3, respectivamente.

A caracterização da mistura, em massa, de 50% de CP III-32-RS com 50% de escória granulada de alto-forno moída (Quadro A. 1) e o teor de escória (Quadro A. 3) da mistura teve como finalidade a análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas entre os aglomerantes.

Os resultados indicam que os materiais encontram-se em conformidade com as especificações técnicas da NBR 11578/1991 e NBR 5735/1991 para cimento CP II-E-32 e CP III-32-RS, respectivamente.

**Quadro A. 1 – Caracterização física do cimento Portland – CP II-E-32, CP III-32-RS e mistura, em massa, de 50% de CP III-32-RS + 50% de escória granulada de alto-forno moída.**

Ensaio	CP II-E-32	CP III-32-RS	CP III-32-RS+escória
Finura (#0,075mm) NBR 11 579/ 1991	0,2%	0,6%	0,4%
Água pasta consistência normal NBR 11 580/ 1991	149 g	152g	159g
Tempos de pega - NBR 11 581/1991	início 2,5 h	início 2,8 h	início 2,5 h
	fim 4,5 h	fim 4,3 h	fim 4,5 h
Expansibilidade de “Le Chatelier” NBR 11 582/1991	1,0 mm	0 mm	1,0 mm
Superfície específica (método de Blaine) NBR NM 76/ 1998	4.140 cm <sup>2</sup> /g	4.220 cm <sup>2</sup> /g	4.150 cm <sup>2</sup> /g
Massa específica - NBR NM 23/ 1998	2,99 g/cm <sup>3</sup>	2,97 g/cm <sup>3</sup>	2,94 g/cm <sup>3</sup>
Resistência à compressão axial NBR 7 215/1996	3 dias 20,1 MPa	16,9 MPa	14,2 MPa
	7 dias 26,4 MPa	31,7 MPa	23,4 MPa
	28dias 36,5 MPa	49,5 MPa	42,8 MPa

A escória granulada de alto-forno moída utilizada na produção dos concretos é proveniente da CST (Companhia Siderúrgica do Tubarão) e foi caracterizada física, química e microestruturalmente no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção da UFES, na ABCP – Associação Brasileira de Cimento *Portland* e nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

A análise química da escória granulada de alto-forno moída, realizada pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento *Portland*, é apresentada no Quadro A. 4.

Os teores dos óxidos analisados encontram-se dentro dos limites da composição química típica da escória granulada de alto-forno moída e apresentam uma relação CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 1,30, o que a classifica como básica (JOHN, 1995; LITTLE;SETEPLA, 1999).

**Quadro A. 2 – Análise química do cimento Portland CP II-E-32 e CP III-32-RS.**

Análise química		Resultados (%)	
		CP II-E-32	CP III-32-RS
Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	22,11	29,88
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,09	9,92
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,52	1,43
Óxido de cálcio total	CaO	54,16	50,95
Óxido de magnésio	MgO	5,95	5,78
Anidro sulfúrico	SO <sub>3</sub>	1,58	0,69
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	0,27	0,09
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	0,32	0,36
Enxofre	S	0,31	0,62
Anidro carbônico	CO <sub>2</sub>	3,76	0,15
Óxido de cálcio livre	CaO	3,61	2,30
Óxido de titânio	TiO <sub>2</sub>	0,31	0,38
Resíduo insolúvel	RI	1,39	0,35
Perda ao fogo	PF	5,40	0,32
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O (0,658 x K <sub>2</sub> O% + Na <sub>2</sub> O%)		0,48	0,33

Fonte: ensaio realizado pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento *Portland*

**Quadro A. 3 - Teor de escória de alto-forno presente nos aglomerantes.**

Material	Teor de escória (% em massa)
Cimento CP II-E-32*	30
Cimento CP III-32-RS*	66
50%CP III-32-RS + 50% de escória de alto-forno	83

\*Fonte: ensaio executado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento *Portland*

**Quadro A. 4 – Análise química da escória granulada de alto-forno moída.**

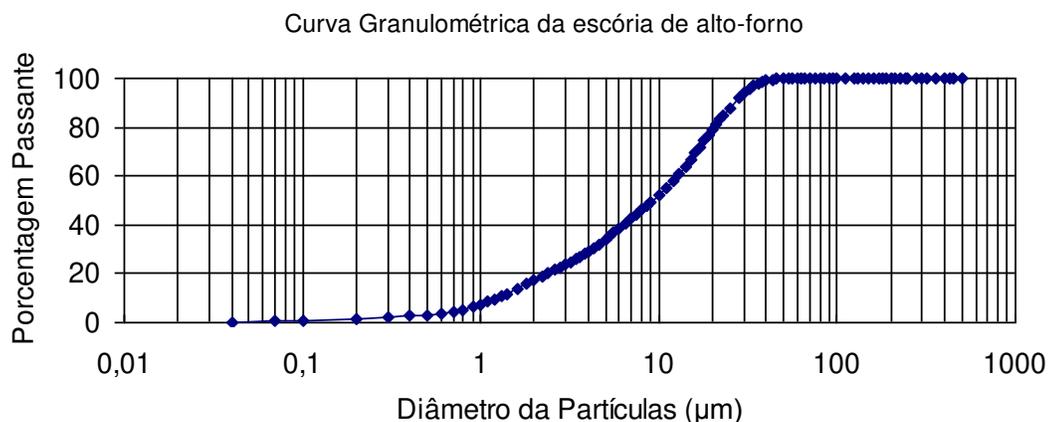
Análise química		Teor (% em massa)
Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	33,02
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,64
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68
Óxido de cálcio	CaO	42,83
Óxido de magnésio	MgO	7,71
Enxofre	S	1,06
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	0,17
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	0,31
Óxido de titânio	TiO <sub>2</sub>	0,60

Fonte: ensaio executado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento *Portland*

As características físicas da escória granulada de alto-forno moída, curva granulométrica, grau de vitrificação são apresentados no Quadro A. 5, na Figura A. 1, no Quadro A. 6, Quadro A. 7, respectivamente.

**Quadro A. 5 – Caracterização física da escória granulada de alto-forno moída.**

Ensaio de caracterização física	Escória
Finura por meio da peneira nº325 (NBR 9 202/1985)	0,4%
Superfície específica (método de Blaine) (NBR NM 76/1998)	4.100 cm <sup>2</sup> /g
Massa específica (NBR NM 23/1998)	2,91 g/cm <sup>3</sup>



Ensaio executado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento *Portland*

**Figura A. 1 - Curva granulométrica da escória granulada de alto-forno moída.**

O grau de vitrificação de 96% classifica as escórias em estudo como de boa qualidade quanto ao teor de vidros, apresentando solubilidade suficiente para sua atividade hidráulica (JOHN, 1995).

A microestrutura da escória granulada de alto-forno moída foi caracterizada pelas técnicas de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS (espectrometria a energia dispersiva).

A difração de raios-X apresentou uma amostra com alto índice de componentes amorfos, observando três picos que acusam a presença de Quartzo-SiO<sub>2</sub> (3,34), Calcita-CaCO<sub>3</sub> (2,78) e Silicato de Cálcio-Ca<sub>x</sub>Si<sub>y</sub>O<sub>z</sub> (3,02), como mostra o difratograma de raios-X da escória granulada de alto-forno moída na Figura A. 2. O resultado encontrado é corroborado pelo difratograma de raios-X da escória de granulada de alto-forno estudada por Coelho (2002).

**Quadro A. 6 – Distribuição granulométrica a laser da escória granulada de alto-forno moída.**

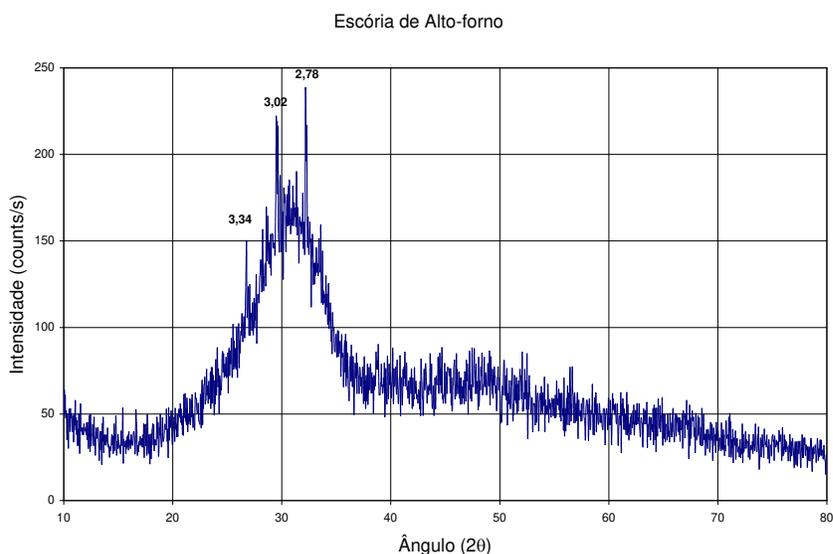
Porcentagem passante										
D (µm)	0,04	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
P (%)	0,16	0,46	0,63	1,31	2,18	2,18	3,26	3,81	4,50	5,42
D (µm)	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
P (%)	6,44	7,52	8,64	9,76	10,86	11,91	13,87	15,64	17,26	18,75
D (µm)	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3
P (%)	20,13	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

Ensaio executado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

**Quadro A. 7 – Grau de vitrificação e índice de refração da escória de alto-forno.**

Ensaio	Resultado
Grau de vitrificação (%)	96
Índice de refração (n)	1,65
Natureza	Básica

Fonte: ensaio executado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento *Portland*

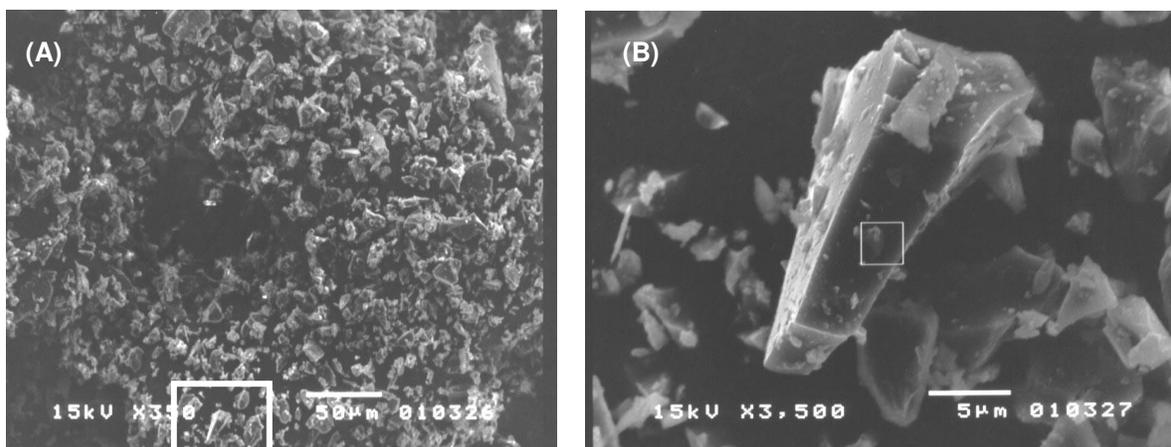


Fonte: ensaio realizado no Departamento de Engenharia de Minas da UFMG

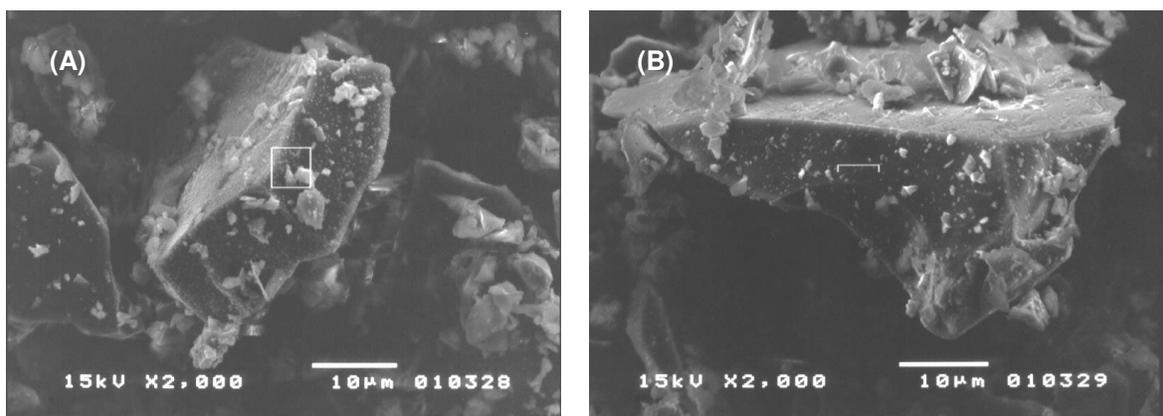
**Figura A. 2 - Difratoograma de raios-X da escória granulada de alto-forno moída**

A microscopia eletrônica de varredura 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 observadas obtidas através da emissão de elétrons secundários e a análise química elementar obtida pelo microanalisador EDS, o que possibilitou observar a predominância de elementos como o cálcio e o silício nos cristais. A Figura A. 3 e a Figura A. 4 mostram as imagens obtidas e a respectiva análise elementar qualitativa da área visualizada.



**Figura A. 3 - (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 A. 4 - Formações cristalinas observadas ao MEV; a análise elementar qualitativa através do EDS indica predominância de Ca e Si.**

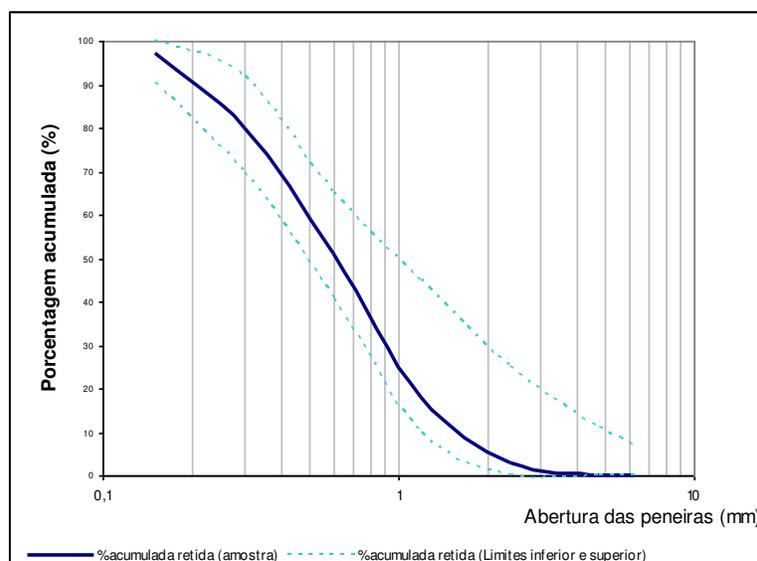
## A.2 Agregado miúdo – areia

Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados no Quadro A. 8 e na Figura A. 5.

**Quadro A. 8 – Ensaio de caracterização física da areia.**

<b>Granulometria (NBR 7 217/1987)</b>		
Peneiras malha (mm)	Médias	
	% Retida	% Retida acumulada
2,4	3	3
1,2	16	19
0,6	34	53
0,3	30	83
0,15	15	98
fundo	2	
Totais	100	
Dimensão máxima característica		2,4 mm
Módulo de finura		2,56
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7 219/1987)		0,14%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (NBR7 218/1987)		0,00%
Impurezas orgânicas húmicas (NBR NM 49/2001)		Mais clara
Massa específica (NBR 9 776/1987)		2,65 kg/dm <sup>3</sup>
Massa unitária no estado solto (NBR 7 251/1982)		1,43 kg/dm <sup>3</sup>

Na Figura A. 5 observam-se os limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7 211/1983. 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.



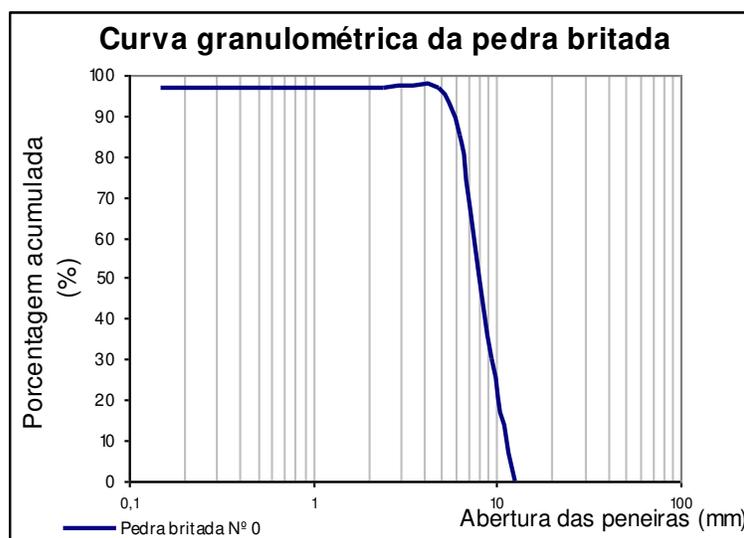
**Figura A. 5 - Curva granulométrica da areia e as curvas dos limites granulométricos da zona 3 da NBR 7211/1983.**

### A.3 Agregado graúdo – brita nº 0 e brita nº1

Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados no Quadro A. 9, na Figura A. 6, no Quadro A. 10 e na Figura A. 7.

**Quadro A. 9 – Ensaio de caracterização física da brita nº 0.**

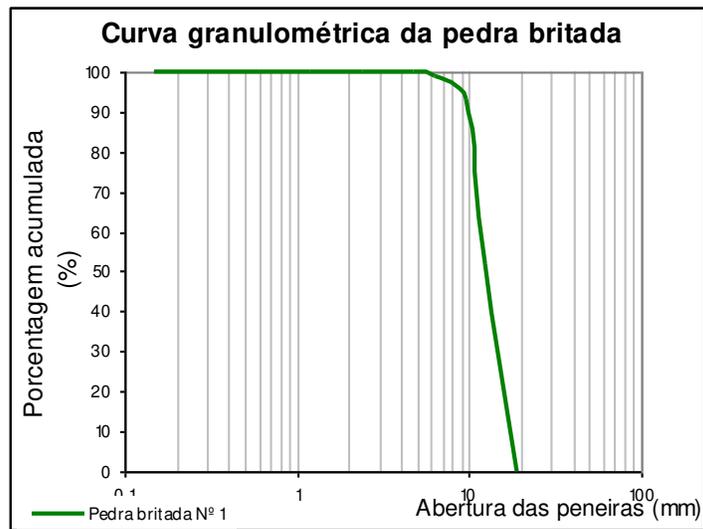
Granulometria (NBR 7 217/1987)		
Peneiras malha (mm)	Médias	
	% Retida	% Retida acumulada
9,5	30	30
6,3	55	85
4,8	12	97
fundo	3	
Totais	100	
Dimensão máxima característica	12,5 mm	
Módulo de finura	6,12	
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7 219/1987)	0,45%	
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (NBR7 218/ 1987)	0,12%	
Massa específica (NBR 9 937/1987)	2,75 kg/dm <sup>3</sup>	
Absorção (NBR 9 937/1987)	0,60%	
Massa unitária no estado solto (NBR 7 251/1982)	1,43 kg/dm <sup>3</sup>	



**Figura A. 6- Curva Granulométrica da brita nº0.**

**Quadro A. 10 – Ensaios de caracterização física da brita nº 1.**

Granulometria (NBR 7 217/1987)		
Peneiras	Médias	
malha (mm)	% Retida	% Retida acumulada
12,5	52	52
9,5	41	93
6,3	6	99
4,8	1	100
Fundo	0	
Totais	100	
Dimensão máxima característica		19,0 mm
Módulo de finura		6,93
Teor de materiais pulverulentos (NBR 7 219/1987)		0,43%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (NBR 7 218/1987)		0,16%
Massa específica (NBR 9 937/1987)		2,77 kg/dm <sup>3</sup>
Absorção (NBR 9 937/1987)		0,50%
Massa unitária no estado solto (NBR 7 251/1982)		1,47 kg/dm <sup>3</sup>
Massa unitária no estado compactado (NBR 7 810/1983)		
30% brita nº 0 + 70% brita nº 1		1,56 kg/dm <sup>3</sup>
40% brita nº 0 + 60% brita nº 1		1,60 kg/dm <sup>3</sup>
50% brita nº 0 + 50% brita nº 1		1,60 kg/dm <sup>3</sup>
60% brita nº 0 + 40% brita nº 1		1,58 kg/dm <sup>3</sup>
70% brita nº 0 + 30% brita nº 1		1,58 kg/dm <sup>3</sup>
Abrasão "Los Angeles" - mistura 50% brita nº 0 + 50% brita nº 1 (NBR NM 51/2001)		38%



**Figura A. 7– Curva granulométrica da brita nº 1.**

## **Apêndice B – Modelos empíricos para a previsão de propriedades: Regressões matemáticas**

### **B.1 Introdução**

Este apêndice apresenta os detalhes das regressões matemáticas dos modelos criados nos capítulos 6 e 7. As equações referentes aos modelos não se encontram neste apêndice, mas sim nos capítulos 6 e 7.

### **B.2 Modelo empírico para a previsão da retração por secagem a partir da composição da mistura**

#### **B.2.1 Retração aos 42 dias**

A Tabela B. 1, Tabela B. 2 e Tabela B. 3 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da retração por secagem aos 42 dias, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 1 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 1 – Sumário da regressão matemática para a retração por secagem aos 42 dias.**

<i>Sumário</i>	
R	0,956
R <sup>2</sup>	0,915
R <sup>2</sup> ajustado	0,531
Erro padrão	0,00619
# Pontos	12
PRESS <sup>1</sup>	0,06
R <sup>2</sup> para previsão	-61,994
Durbin-Watson d	1,432
Autocorrelação de primeira ordem	0,272
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	26,509

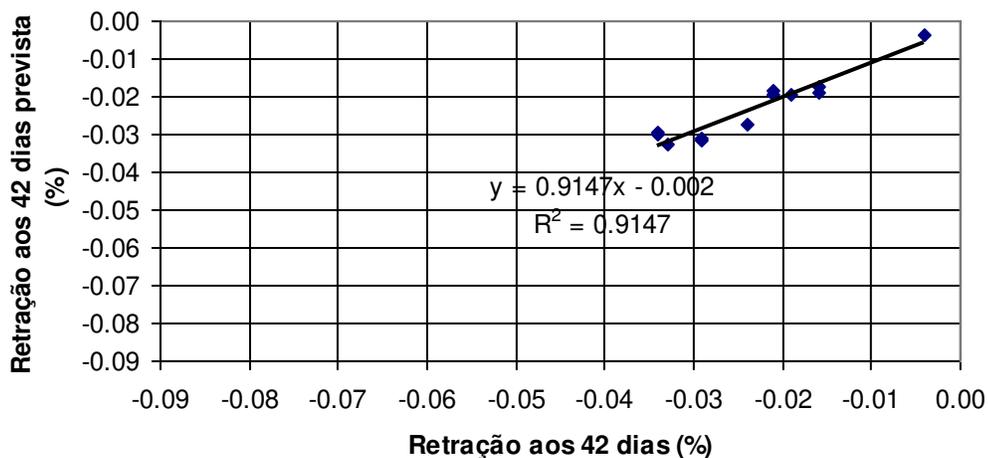
**Tabela B. 2 – Resultados de Anova para a retração por secagem aos 42 dias.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	0,000820	91	9,11275E-05	2,382	0,331	9
Residual	7,65193E-05	9	3,82597E-05			2
Total	0,000897	100				11

<sup>1</sup> PRESS – Soma dos quadrados dos erros de previsão estimada.

**Tabela B. 3 – Regressão matemática para a retração por secagem aos 42 dias.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	9.406	0.281	6.435	-18.28	37.09	1.462	
b1	-0.02656	0.289	0.01856	-0.106	0.05331	-1.431	596552
b2	-0.01011	0.253	0.00636	-0.03745	0.01724	-1.591	6184.8
b3	-15.80	0.313	11.81	-66.62	35.01	-1.338	491314
b4	1.8685E-05	0.282	1.28194E-05	-3.64724E-05	7.38424E-05	1.458	166856
b5	7.36169E-06	0.452	7.94349E-06	-2.68164E-05	4.15398E-05	0.927	1787.9
b6	0.02279	0.334	0.01806	-0.05491	0.100	1.262	678.43
b7	3.48945E-05	0.07952	1.04756E-05	-1.01783E-05	7.99673E-05	3.331	207.39
b8	0.00663	0.395	0.00617	-0.01992	0.03319	1.075	2152.9
b9	6.530	0.336	5.198	-15.83	28.89	1.256	118310



**Figura B. 1 – Correlação entre retração por secagem medida aos 42 dias e retração por secagem aos 42 dias prevista pelo modelo.**

### B.2.2 Retração aos 140 dias

A Tabela B. 4, Tabela B. 5 e Tabela B. 6 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da retração por secagem aos 140 dias, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 2 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 4 – Sumário da regressão matemática para a retração por secagem aos 140 dias.**

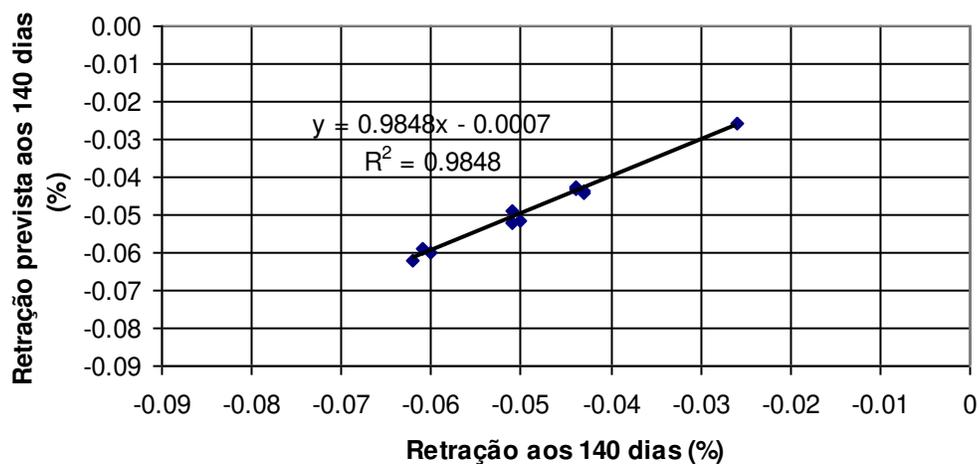
<i>Sumário</i>	
R	0,992
R <sup>2</sup>	0,985
R <sup>2</sup> ajustado	0,917
Erro padrão	0,00288
# Pontos	12
PRESS	0,01
R <sup>2</sup> para previsão	-9,971
Durbin-Watson d	1,423
Autocorrelação de primeira ordem	0,275
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	5,907

**Tabela B. 5 – Resultados de Anova para a retração por secagem aos 140 dias.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	0,00108	98	0,000120	14,43	0,06645	9
Residual	1,6644E-05	2	8,32201E-06			2
Total	0,00110	100				11

**Tabela B. 6 – Regressão matemática para a retração por secagem aos 140 dias.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	12,09	0,05649	3,001	-0,827	25,00	4,027	
b1	-0,01537	0,03524	0,00296	-0,02812	-0,00262	-5,185	6184,8
b2	-0,03436	0,05801	0,00866	-0,07161	0,00289	-3,969	596552
b3	-20,52	0,06509	5,508	-44,22	3,178	-3,726	491314
b4	2,769E-05	0,02975	4,885E-06	6,670E-06	4,871E-05	5,668	207,39
b5	1,384E-05	0,06474	3,704E-06	-2,096E-06	2,978E-05	3,737	1787,9
b6	0,01389	0,04038	0,00288	0,00150	0,02627	4,824	2152,9
b7	2,389E-05	0,05727	5,978E-06	-1,827E-06	4,962E-05	3,997	166856
b8	0,03028	0,06940	0,00842	-0,00596	0,06652	3,595	678,43
b9	8,229	0,07690	2,424	-2,201	18,66	3,395	118310



**Figura B. 2 – Correlação entre retração por secagem medida aos 140 dias e retração por secagem aos 140 dias prevista pelo modelo.**

### **B.2.3 Retração aos 365 dias**

A Tabela B. 7, Tabela B. 8 e Tabela B. 9 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da retração por secagem aos 365 dias, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 3 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 7 – Sumário da regressão matemática para a retração por secagem aos 365 dias.**

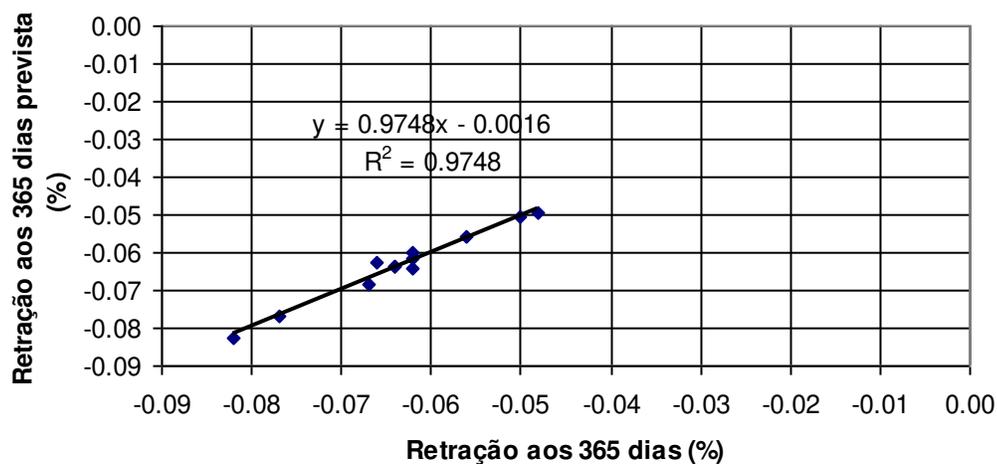
<b>Sumário</b>	
R	0,987
R <sup>2</sup>	0,975
R <sup>2</sup> ajustado	0,861
Erro padrão	0,00360
# Pontos	12
PRESS	0,01
R <sup>2</sup> para previsão	-12,708
Durbin-Watson d	1,374
Autocorrelação de primeira ordem	0,308
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	5,689

**Tabela B. 8 – Resultados de Anova para a retração por secagem aos 365 dias.**

<b>ANOVA</b>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	0,00100	97	0,000111	8,581	0,109	9
Residual	2,59682E-05	3	1,29841E-05			2
Total	0,00103	100				11

**Tabela B. 9 – Regressão matemática para a retração por secagem aos 365 dias.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	13,20	0,07207	3,749	-2,932	29,33	3,521	
b1	-0,03897	0,06911	0,01081	-0,08550	0,00756	-3,604	596552
b2	-0,00544	0,280	0,00370	-0,02137	0,01049	-1,469	6184,8
b3	-23,95	0,07356	6,880	-53,55	5,657	-3,480	491314
b4	2,71615E-05	0,06798	7,46797E-06	-4,97058E-06	5,92936E-05	3,637	166856
b5	1,53381E-06	0,772	4,6275E-06	-1,83767E-05	2,14443E-05	0,331	1787,9
b6	0,03761	0,07012	0,01052	-0,00766	0,08287	3,575	678,43
b7	2,29733E-05	0,06388	6,10258E-06	-3,28398E-06	4,92306E-05	3,765	207,39
b8	0,00414	0,368	0,00360	-0,01133	0,01961	1,152	2152,9
b9	10,12	0,07912	3,028	-2,913	23,14	3,341	118310



**Figura B. 3 – Correlação entre retração por secagem medida aos 365 dias e retração por secagem aos 365 dias prevista pelo modelo.**

### **B.3 Modelo empírico para a previsão da absorção por capilaridade a partir da composição da mistura**

A Tabela B. 10, Tabela B. 11 e Tabela B. 12 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da absorção por capilaridade, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 4 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 10 – Sumário da regressão matemática para a absorção por capilaridade.**

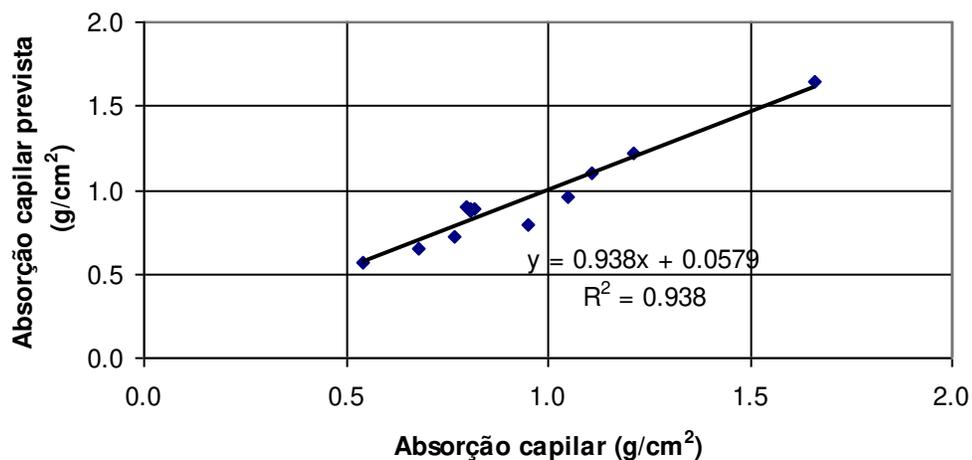
<i>Sumário</i>	
R	0,968
R <sup>2</sup>	0,938
R <sup>2</sup> ajustado	0,659
Erro padrão	0,172
# Pontos	12
PRESS	47,99
R <sup>2</sup> para previsão	-49,187
Durbin-Watson d	1,477
Autocorrelação de primeira ordem	0,253
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	18,436

**Tabela B. 11 – Resultados de Anova para a absorção por capilaridade.**

<b>ANOVA</b>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	0,897	94	0,09966	3,360	0,250	9
Residual	0,05932	6	0,02966			2
Total	0,956	100				11

**Tabela B. 12 – Regressão matemática para a absorção por capilaridade.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	-269,94	0,271	179,18	-1040,9	501,00	-1,507	
b1	0,837	0,247	0,517	-1,386	3,061	1,620	596552
b2	-0,03575	0,859	0,177	-0,797	0,726	-0,202	6184,8
b3	521,43	0,254	328,84	-893,47	1936,3	1,586	491314
b4	-0,000579	0,246	0,000357	-0,00211	0,000957	-1,622	166856
b5	5,96901E-07	0,998	0,000221	-0,000951	0,000952	0,00270	1787,9
b6	-0,885	0,220	0,503	-3,048	1,278	-1,760	678,43
b7	0,000258	0,470	0,000292	-0,000997	0,00151	0,884	207,39
b8	0,01002	0,959	0,172	-0,729	0,749	0,05834	2152,9
b9	-222,91	0,263	144,72	-845,60	399,78	-1,540	118310



**Figura B. 4 – Correlação entre a absorção por capilaridade medida e a absorção por capilaridade prevista pelo modelo.**

#### **B.4 Modelo empírico para a previsão da resistência à compressão axial aos 63 dias a partir da composição da mistura**

A Tabela B. 13, Tabela B. 14 e Tabela B. 15 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da resistência à compressão axial aos 63 dias, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 5 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 13 – Sumário da regressão matemática para a resistência à compressão axial.**

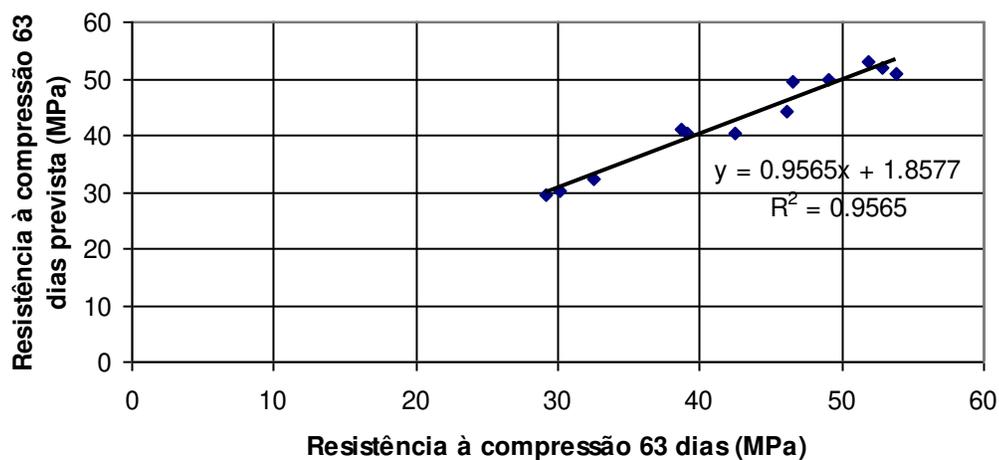
<i>Sumário</i>	
R	0,978
R <sup>2</sup>	0,957
R <sup>2</sup> ajustado	0,761
Erro padrão	4,300
# Pontos	12
PRESS	22659,39
R <sup>2</sup> para previsão	-25,641
Durbin-Watson d	1,361
Autocorrelação de primeira ordem	0,302
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	10,066

**Tabela B. 14 – Resultados de Anova para a resistência à compressão axial.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	813,57	96	90,40	4,888	0,181	9
Residual	36,99	4	18,49			2
Total	850,56	100				11

**Tabela B. 15 – Regressão matemática para a resistência à compressão axial.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	-4234,5	0,444	4474,0	-23484,4	15015,4	-0,946	
b1	1,518	0,764	4,418	-17,49	20,53	0,344	6184,8
b2	7843,5	0,440	8211,0	-27485,7	43172,6	0,955	491314
b3	12,87	0,424	12,91	-42,66	68,40	0,997	596552
b4	-0,01903	0,121	0,00728	-0,05037	0,01230	-2,613	207,39
b5	0,569	0,907	4,291	-17,89	19,03	0,133	2152,9
b6	0,000860	0,891	0,00552	-0,02290	0,02462	0,156	1787,9
b7	-3409,7	0,445	3613,6	-18957,8	12138,5	-0,944	118310
b8	-12,83	0,414	12,55	-66,84	41,19	-1,022	678,43
b9	-0,00897	0,420	0,00891	-0,04731	0,02938	-1,006	166856



**Figura B. 5 – Correlação entre resistência à compressão medida e resistência à compressão prevista pelo modelo.**

### **B.5 Modelo empírico para a previsão do módulo de deformação aos 28 dias a partir da composição da mistura**

A Tabela B. 16, Tabela B. 17 e Tabela B. 18 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão do módulo de deformação, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 6 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 16 – Sumário da regressão matemática para o módulo de deformação.**

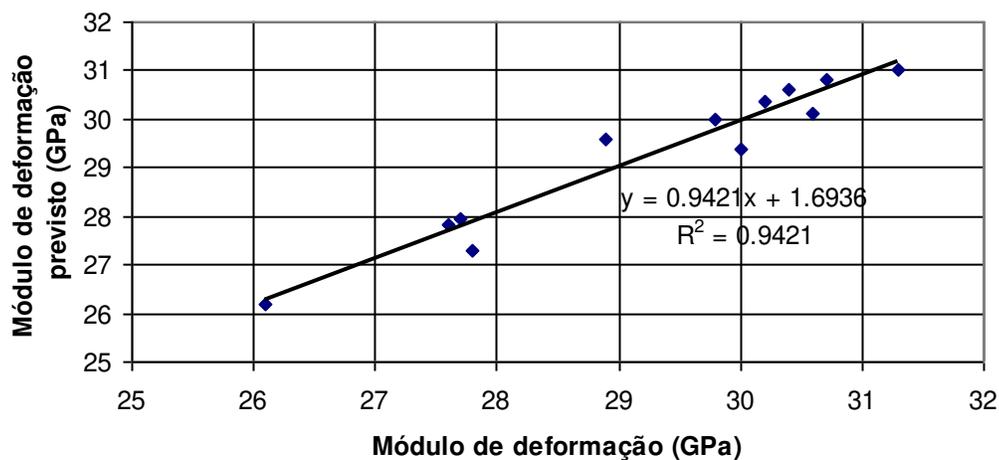
<i>Sumário</i>	
R	0,971
R <sup>2</sup>	0,942
R <sup>2</sup> ajustado	0,682
Erro padrão	0,908
# Pontos	12
PRESS	156,12
R <sup>2</sup> para previsão	-4,480
Durbin-Watson d	1,249
Autocorrelação de primeira ordem	0,330
Colinearidade	0,000
Coeficiente de variação	3,104

**Tabela B. 17 – Resultados de Anova para o módulo de deformação.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	26,84	94	2,982	3,617	0,235	9
Residual	1,649	6	0,825			2
Total	28,49	100				11

**Tabela B. 18 – Regressão matemática para o módulo de deformação.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	18,22	0,351	15,09	-46,71	83,16	1,207	
b1	0,124	0,471	0,140	-0,480	0,727	0,881	1581,8
b2	-0,839	0,638	1,526	-7,405	5,727	-0,550	1649,5
b3	-0,02736	0,937	0,306	-1,346	1,291	-0,08930	666,89
b4	9,476E-06	0,969	0,000219	-0,000933	0,000952	0,04325	2262,3
b5	-0,00301	0,506	0,00374	-0,01912	0,01310	-0,803	5201,0
b6	1,979E-05	0,989	0,00130	-0,00557	0,00561	0,01523	2222,2
b7	0,02582	0,433	0,02651	-0,08826	0,140	0,974	2591,0
b8	0,00126	0,931	0,01297	-0,05452	0,05704	0,09718	2024,5
b9	-0,000202	0,947	0,00267	-0,01171	0,01130	-0,07559	627,08



**Figura B. 6 – Correlação entre módulo de deformação medido e módulo de deformação previsto pelo modelo.**

### **B.6 Modelo empírico para a previsão da profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias a partir da composição da mistura**

A Tabela B. 19, Tabela B. 20 e Tabela B. 21 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 7 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 19 – Sumário da regressão matemática para a profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias.**

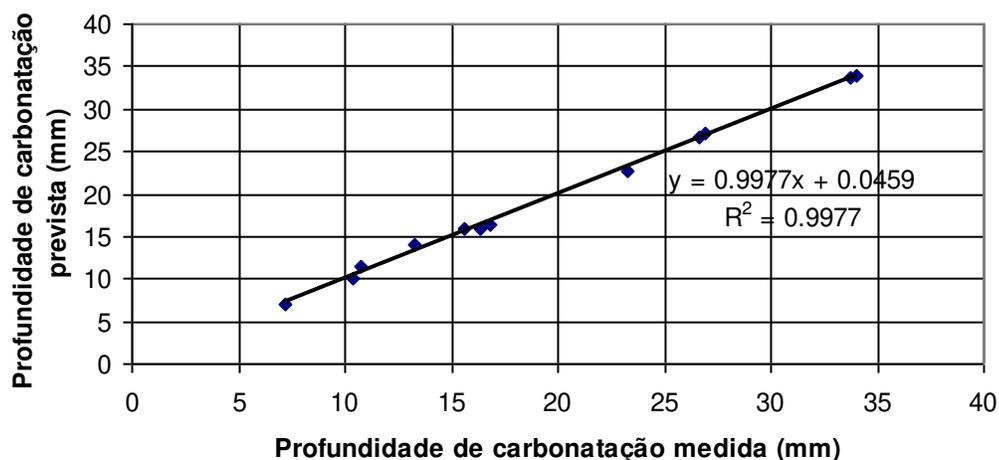
<i>Sumário</i>	
R	0,999
R <sup>2</sup>	0,998
R <sup>2</sup> ajustado	0,987
Erro padrão	1,036
# Pontos	12
PRESS	884,08
R <sup>2</sup> para previsão	0,034
Durbin-Watson d	1,294
Autocorrelação de primeira ordem	0,342
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	5,292

**Tabela B. 20 – Resultados de Anova para a profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	913,27	100	101,47	94,49	0,01051	9
Residual	2,148	0	1,074			2
Total	915,42	100				11

**Tabela B. 21 – Regressão matemática para a profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	18,22	7364,8	0,02077	1078,1	2725,9	12003,7	6,831
b1	0,124	-20,61	0,02203	3,110	-33,99	-7,226	-6,626
b2	-0,839	-6,106	0,02909	1,065	-10,69	-1,525	-5,735
b3	-0,02736	-13551,6	0,02066	1978,7	-22065,3	-5037,9	-6,849
b4	9,476E-06	0,01380	0,02337	0,00215	0,00456	0,02304	6,426
b5	-0,00301	0,00334	0,129	0,00133	-0,00239	0,00906	2,508
b6	1,979E-05	20,22	0,02167	3,025	7,200	33,23	6,682
b7	0,02582	0,03136	0,00312	0,00176	0,02380	0,03891	17,87
b8	0,00126	2,807	0,113	1,034	-1,642	7,256	2,715
b9	-0,000202	6020,2	0,02029	870,82	2273,4	9767,1	6,913



**Figura B. 7 – Correlação entre a profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias medida e a profundidade de carbonatação acelerada prevista pelo modelo.**

### **B.7 Modelo empírico para a previsão da profundidade de carbonatação acelerada a partir da resistência média à compressão e da composição da mistura**

A Tabela B. 22, Tabela B. 23 e Tabela B. 24 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da profundidade de carbonatação acelerada aos 91 dias, a partir da resistência média à compressão e da composição da mistura.

A Figura B. 8 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 22 – Sumário da regressão matemática para a profundidade de carbonatação acelerada a partir da resistência média à compressão e da composição da mistura.**

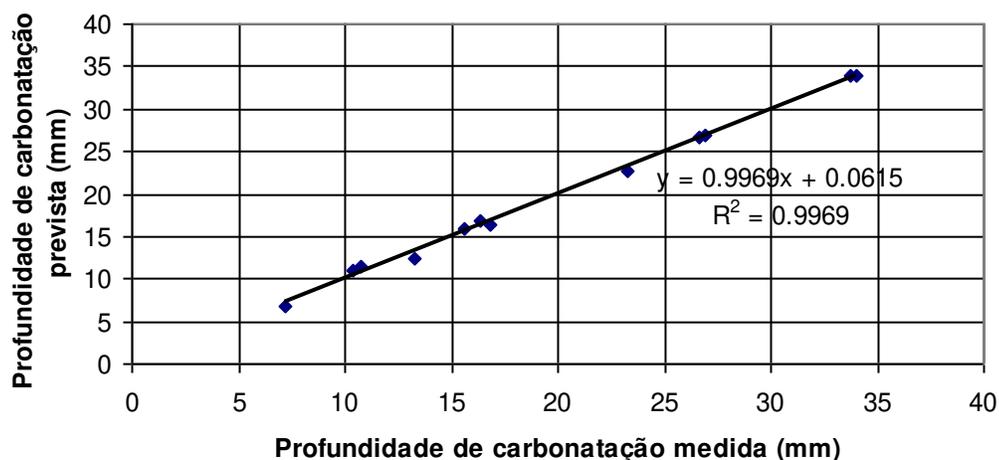
<i>Sumário</i>	
R	0,998
R <sup>2</sup>	0,997
R <sup>2</sup> ajustado	0,983
Erro padrão	1,199
# Pontos	12
PRESS	398,22
R <sup>2</sup> para previsão	0,565
Durbin-Watson d	2,255
Autocorrelação de primeira ordem	-0,146
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	6,124

**Tabela B. 23 – Resultados de Anova para a profundidade de carbonatação acelerada a partir da resistência média à compressão e da composição da mistura.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	912,54	100	101,39	70,49	0,01406	9
Residual	2,877	0	1,438			2
Total	915,42	100				11

**Tabela B. 24 – Regressão matemática para a profundidade de carbonatação acelerada a partir da resistência média à compressão e da composição da mistura.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	18,22	531,79	0,01939	75,14	208,49	855,09	7,077
b1	0,124	-14,51	0,02533	2,355	-24,65	-4,381	-6,163
b2	-0,839	-2,725	0,04478	0,597	-5,293	-0,157	-4,565
b3	-0,02736	-841,24	0,02381	132,17	-1409,9	-272,56	-6,365
b4	9,476E-06	0,111	0,03529	0,02143	0,01882	0,203	5,181
b5	-0,00301	0,00848	0,446	0,00900	-0,03026	0,04723	0,942
b6	1,979E-05	11,94	0,04425	2,599	0,758	23,12	4,594
b7	0,02582	0,01778	0,07011	0,00497	-0,00362	0,03918	3,575
b8	0,00126	1,102	0,218	0,621	-1,570	3,774	1,775
b9	-0,000202	417,60	0,02181	62,70	147,84	687,37	6,661



**Figura B. 8 – Correlação entre a profundidade de carbonatação acelerada medida e a profundidade de carbonatação acelerada prevista pelo modelo.**

### **B.8 Modelo empírico para a previsão da profundidade de carbonatação natural a um ano, a partir da composição da mistura**

A Tabela B. 25, Tabela B. 26 e Tabela B. 27 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão da profundidade de carbonatação natural a um ano, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 9 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 25 – Sumário da regressão matemática para a profundidade de carbonatação natural a um ano.**

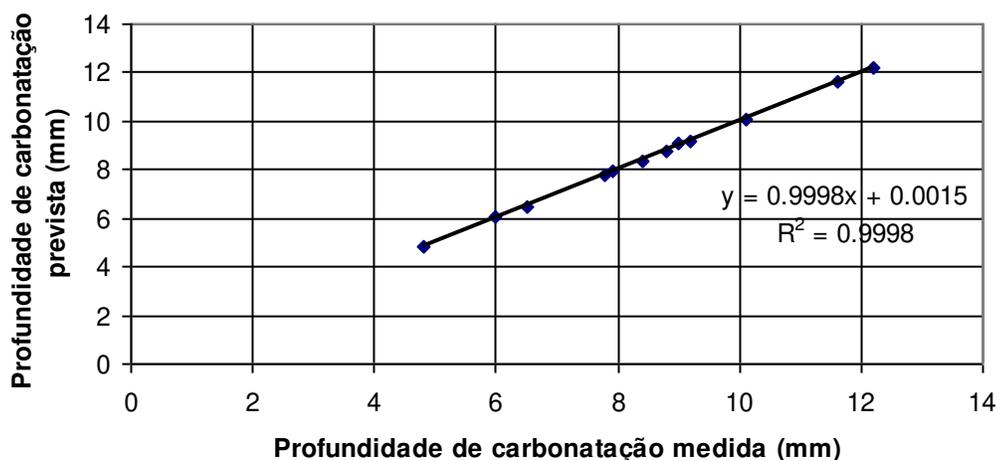
<i>Sumário</i>	
R	1,000
R <sup>2</sup>	1,000
R <sup>2</sup> ajustado	0,999
Erro padrão	0,06742
# Pontos	12
PRESS	6,26
R <sup>2</sup> para previsão	0,878
Durbin-Watson d	1,450
Autocorrelação de primeira ordem	0,274
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	0,791

**Tabela B. 26 – Resultados de Anova para a profundidade de carbonatação natural a um ano.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	51,47	100	5,719	1258,2	0,000794	9
Residual	0,00909	0	0,00455			2
Total	51,48	100				11

**Tabela B. 27 – Regressão matemática para a profundidade de carbonatação natural a um ano.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	18,22	-380,02	0,03242	70,14	-681,83	-78,21	-5,418
b1	0,124	1,143	0,02995	0,202	0,272	2,013	5,647
b2	-0,839	-0,348	0,03748	0,06927	-0,646	-0,04961	-5,019
b3	-0,02736	707,20	0,03158	128,74	153,29	1261,1	5,493
b4	9,476E-06	-0,00082	0,02776	0,000140	-0,00142	-0,00022	-5,877
b5	-0,00301	0,00044	0,03682	8,7E-05	6,6E-05	0,0008	5,066
b6	1,979E-05	-1,085	0,03134	0,197	-1,932	-0,239	-5,515
b7	0,02582	0,000233	0,178	0,000114	-0,000258	0,000725	2,043
b8	0,00126	0,412	0,02558	0,06727	0,123	0,702	6,132
b9	-0,000202	-309,58	0,03190	56,66	-553,35	-65,81	-5,464



**Figura B. 9 – Correlação entre a profundidade de carbonatação natural medida a um ano e a profundidade de carbonatação natural prevista pelo modelo.**

### **B.9 Modelo empírico para a previsão do coeficiente de carbonatação natural a partir da composição da mistura**

A Tabela B. 28, Tabela B. 29 e Tabela B. 30 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão do coeficiente de carbonatação natural, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 10 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 28 – Sumário da regressão matemática para o coeficiente de carbonatação natural.**

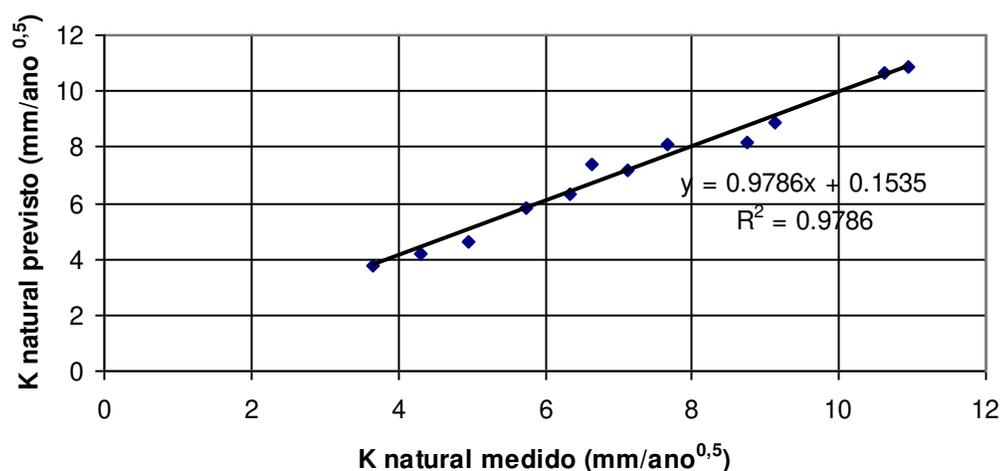
<i>Sumário</i>	
R	0,989
R <sup>2</sup>	0,979
R <sup>2</sup> ajustado	0,971
Erro padrão	0,405
# Pontos	12
PRESS	1,87
R <sup>2</sup> para previsão	0,969
Durbin-Watson d	1,529
Autocorrelação de primeira ordem	0,234
Colinearidade	0,022
Coefficiente de variação	5,654

**Tabela B. 29 – Resultados de Anova para o coeficiente de carbonatação natural.**

<b>ANOVA</b>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	59,82	98	19,94	121,69	5,15872E-07	3
Residual	1,311	2	0,164			8
Total	61,13	100				11

**Tabela B. 30 – Regressão matemática para o coeficiente de carbonatação natural.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	1,232	0,528	1,869	-3,078	5,542	0,659	
b1	-0,02468	0,423	0,02924	-0,09210	0,04274	-0,844	30,56
b2	2,849	0,469	3,747	-5,791	11,49	0,760	11,55
b3	0,184	0,01349	0,05833	0,04954	0,319	3,155	44,91



**Figura B. 10 – Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural medido e o coeficiente de carbonatação natural previsto pelo modelo.**

### **B.10 Modelo empírico para a previsão da carga passante aos 63 dias a partir da composição da mistura**

A Tabela B. 31, Tabela B. 32 e Tabela B. 33 apresentam os detalhes da regressão quadrática para a previsão do da carga passante aos 63 dias, a partir da composição da mistura.

A Figura B. 11 mostra que os resultados previstos pelo modelo se aproximam dos resultados medidos em laboratório.

**Tabela B. 31 – Sumário da regressão matemática para a carga passante aos 63 dias.**

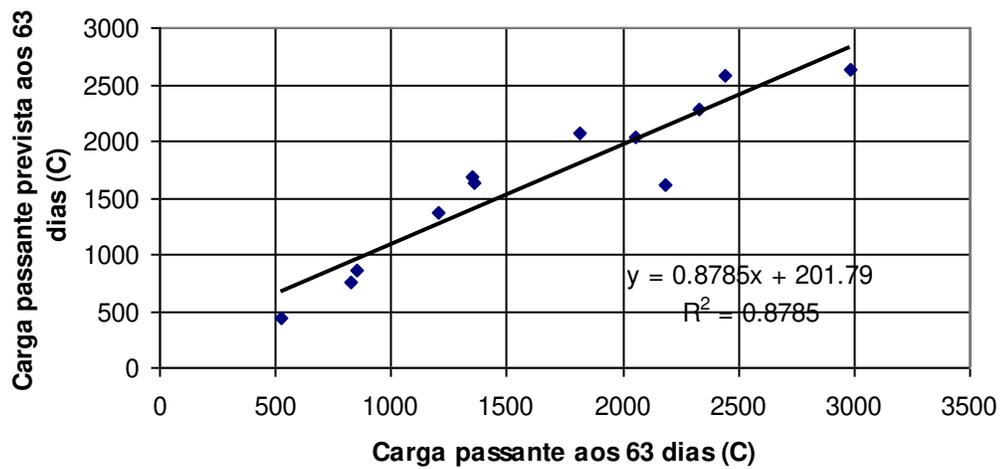
<i>Sumário</i>	
R	0,937
R <sup>2</sup>	0,878
R <sup>2</sup> ajustado	0,332
Erro padrão	619,01
# Pontos	12
PRESS	409.128.778,77
R <sup>2</sup> para previsão	-63,883
Durbin-Watson d	1,369
Autocorrelação de primeira ordem	0,311
Colinearidade	0,000
Coefficiente de variação	37,282

**Tabela B. 32 – Resultados de Anova para a carga passante aos 63 dias.**

<i>ANOVA</i>						
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>SS%</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F Signif</i>	<i>df</i>
Regressão	5.539.322,368	88	615.480	1,606	0,442	9
Residual	766346	12	383.173			2
Total	6.305.668,667	100				11

**Tabela B. 33 – Regressão matemática para a carga passante aos 63 dias.**

		Valor P	Erro padrão	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	-822.260	0,330	644.009	3.593.208,992	1.948.688,35	-1,277	
b1	2.468	0,315	1.857,6	-5.524,7	10.460,9	1,329	59655 2
b2	471,1	0,536	636,01	-2.265,4	3.207,6	0,741	6184,8
b3	1.505.833	0,331	1.181.941,64 1	3.579.651,148	6.591.317,71	1,274	49131 4
b4	-1,7	0,316	1,283	-7,223	3,817	-1,328	16685 6
b5	-0,3	0,719	0,795	-3,750	3,091	-0,414	1787,9
b6	-2.462	0,306	1.807,2	-10.237,1	5.314,0	-1,362	678,43
b7	-2,1	0,189	1,048	-6,564	2,457	-1,959	207,39
b8	-289,1	0,686	617,60	-2.946,5	2.368,2	-0,468	2152,9
b9	-629.280	0,350	520.166	2.867.375,535	1608.814,95 9	-1,210	11831 0



**Figura B. 11 – Correlação entre a carga passante medida aos 63 dias e a carga passante aos 63 dias prevista pelo modelo.**

## **Anexo A – Ensaio para a determinação do coeficiente aparente de difusão de cloretos (ASTM C 1556-04)**

### **1. Introdução**

Este anexo apresenta um resumo do ensaio ASTM C 1556-04 (ASTM, 2004b) . O coeficiente aparente de difusão de cloretos é comumente usado em modelos de ingresso de cloretos com base na segunda lei de Fick . O coeficiente aparente determinado por este método include cloretos quimicamente combinados, portanto o uso correto do coeficiente aparente de difusão para a previsão do ingresso de cloretos requer que se considere a fixação de cloretos.

### **2. Corpos-de-prova**

2.1 Usam-se corpos-de-prova cilíndricos preparados em laboratório ou corpos-de-prova retirados da estrutura. Uma amostra consiste em dois corpos-de-prova representativos da mistura. Os corpos-de-prova devem ser livres de defeitos, vazios ou fissuras visíveis. A dimensão mínima da superfície de cada corpo-de-prova deve ser de 75 mm e não menor

que três vezes o tamanho máximo nominal do agregado. A profundidade mínima do corpo-de-prova deve ser 75 mm.

2.2 A não que seja especificada outra idade, os corpos-de-prova devem ser submetidos à cura úmida por 28 dias antes da preparação dos corpos-de-prova para a imersão ao líquido de exposição.

2.3 Corte os 75 mm superiores do corpo-de-prova (parte usada como corpo-de-prova). Retire uma fatia de 20 mm do corpo-de-prova do restante do cilindro (parte usada para a determinação do teor inicial de cloretos) e descarte a parte inferior remanescente do corpo-de-prova.

2.4 Enxagüe os corpos-de-prova e seque-os com uma toalha de papel.

2.5 Sele todos os lados do corpo-de-prova, exceto a superfície acabada (superfície de exposição), da mesma forma que no ensaio de penetração de cloretos ASTM C 1202.

2.6 Imerse o corpo-de-prova em um banho saturado com hidróxido de cálcio em um container de plástico que previna a evaporação.

2.7 O corpo-de-prova deve permanecer na solução até que a massa do corpo-de-prova não mude mais do que 0.1% em 24 horas.

### **3. Procedimento**

#### **3.1 Exposição**

3.1.1 Remova os corpos-de-prova da solução de hidróxido de cálcio, enxague-os e coloque-os no container com solução de cloreto de sódio e sele-o. Coloque o container em uma câmara com controle de temperatura, a uma temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

3.1.2 Os corpos-de-prova devem permanecer na solução de exposição por, pelo menos, 35 dias.

#### **3.2 Moagem do perfil**

3.2.1 Remova os corpos-de-prova da solução, enxague-os e seque-os ao ar por 24 horas.

- 3.2.2 Obtenha a amostra em forma de pó por meio da moagem de camadas da superfície exposta.
- 3.2.3 Moa pelo menos oito camadas de acordo com o Quadro 1.
- 3.2.4 Obtenha uma amostra de pelo menos 10 gramas de pó para cada camada. Determine a distância da superfície de exposição até o meio de cada camada.

**Quadro 1 - Profundidade recomendada para o intervalo de moagem do pó (camadas) em mm.**

a/mc	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	0,60	0,70
Camada 1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1
Camada 2	1-2	1-2	1-2	1-3	1-3	1-3	1-5
Camada 3	2-3	2-3	2-3	3-5	3-5	3-6	5-10
Camada 4	3-4	3-4	3-5	5-7	5-8	6-10	10-15
Camada 5	4-5	4-6	5-7	7-10	8-12	10-15	15-20
Camada 6	5-6	6-8	7-9	10-13	12-16	15-20	20-25
Camada 7	6-8	8-10	9-12	13-16	16-20	20-25	25-30
Camada 8	8-10	10-12	12-16	16-20	20-25	25-30	30-35

- 3.2.5 Determine o teor de cloretos solúveis em ácido (Cs) das amostras de acordo com ensaio ASTM C1152.
- 3.2.6 Determine o teor de cloretos inicial da fatia de 20 mm (não exposta a nenhuma solução), por meio da moagem da amostra de acordo como ensaio ASTM C1152.

#### **4. Cálculo**

- 4.1 Determine os valores da concentração superficial e do coeficiente aparente de difusão por meio de uma regressão não-linear dos mínimos quadrados que relacione o perfil de concentração de cloretos com a segunda lei de Fick (Equação 1).

$$C(x,t) = C_{sa} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right)$$

Equação 1

Sendo:

$C(x,t)$  = teor de cloretos a uma determinada profundidade;

$C_{sa}$  = teor aparente de cloretos superficial;

$D_a$  = coeficiente aparente de difusão de cloretos;

$x$  = profundidade;

$t$  = tempo de exposição.