



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**  
**Pós-Graduação em Edificações**

**Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos  
Produzidos com os Cimentos Portland de Alta Resistência Inicial e  
de Alto-Forno Aditivados com Sílica Ativa Curados Termicamente**

**Paulo Sérgio Bardella**

**Campinas  
2005**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**  
**Pós-Graduação em Edificações**

**Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos  
Produzidos com os Cimentos Portland de Alta Resistência Inicial e  
de Alto-Forno Aditivados com Sílica Ativa Curados Termicamente**

**Paulo Sérgio Bardella**

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

Dissertação 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 Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

**Campinas  
2005**

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

B236a Bardella, Paulo Sérgio  
Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com os cimentos Portland de alta resistência inicial e de alto-forno aditivados com sílica ativa curados termicamente. / Paulo Sérgio Bardella.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Gladis Camarini.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Concreto. 2. Concreto – Efeito da temperatura. 3. Escória. 4. Concreto pré-moldado. 5. Cimento portland. 6. Sílica. 7. Propriedades mecânicas. 8. Materiais de construção – Durabilidade. I. Camarini, Gladis. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Evaluation of physical and mechanical properties of steam cured concrete made with high early strength Portland cement and blastfurnace slag cement containing silica fume

Palavras-chave em Inglês: Concrete, Concrete effect of temperature, Slag, Blastfurnace slag, Precast concrete, Portland cement, Silica fume, Mechanical properties e Durability of building materials.

Área de concentração: Edificações.

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Vitor Antonio Ducatti e Berenice Martins Toralles Carbonari

Data da defesa: 19/01/2005



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**  
**Pós-Graduação em Edificações**

**Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos  
Produzidos com os Cimentos Portland de Alta Resistência Inicial e  
de Alto-Forno Aditivados com Sílica Ativa Curados Termicamente**

**Paulo Sérgio Bardella**

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Gladis Camarini**

**Presidente e Orientadora – FEC/UNICAMP**

---

**Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Vitor Antonio Ducatti**

**FEC/UNICAMP**

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Berenice Martins Toralles Carbonari**

**UEL – Universidade Estadual de Londrina**

**Campinas, 19 de janeiro de 2005**

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho às pessoas que sempre contribuíram, acreditaram e me apoiaram durante toda a minha formação como Engenheiro Civil.*

*Lourdes Buranello Bardella (minha mãe), Décio Buranello (meu tio) e Antonio Carlos Bardella (meu irmão).*

*“Se você espera pelas condições perfeitas, você  
nunca irá realizar nada !”*

*Eclesiastes 11 : 4 (BEP)*

*“Não importa se temos tempo suficiente para vermos mudadas as coisas e pessoas pelas quais trabalhamos e desejamos, mas sim que façamos a nossa parte, de modo que tudo se transforme a seu tempo.”*

*(autor desconhecido)*

*“Assim já não sois estrangeiros, nem forasteiros, mas concidadãos dos santos, e da família de Deus, edificados sobre o fundamento dos apóstolos e dos profetas, sendo o próprio Cristo Jesus a principal pedra angular. Nele todo o edifício bem ajustado cresce para templo santo no Senhor. E nele também vós juntamente sois edificados para morada de Deus no Espírito.”*

## AGRADECIMENTOS

*Faz parte da alegria e da felicidade da vida conhecer pessoas que se tornam especiais durante nossa jornada de vida.* Compartilhar nossas experiências e realizações com essas pessoas é um privilégio. Privilégio ainda maior é dividir com elas a alegria dessa conquista. A todos, que estando presentes ou distantes contribuíram para a realização dessa dissertação, quero agradecer e compartilhar esse trabalho.

Em especial à minha mãe, meu irmão e sua família, e meu tio Décio (meu segundo pai), que mesmo de longe se fizeram presentes no meu dia-a-dia, e foram os maiores motivos de minha dedicação.

A meu pai (in memoriam) que pela vontade de DEUS não teve a oportunidade de compartilhar comigo essa realização.

A Professora Doutora Gladis Camarini, que mais do que professora e orientadora foi uma verdadeira amiga, estando sempre presente, respeitando meus limites e sempre incentivando a superá-los. Doutora, para você não basta dizer apenas obrigado, você terá sempre a minha eterna gratidão.

Aos técnicos e engenheiros do Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp: Ademir de Almeida, José Reinaldo Marçal, Luciano Passos, Marcelo Ramos e Rodolfo Bonamigo, pela prontidão em ajudar e pela grata satisfação da companhia diária.

À Holcin S.A. na pessoa do Engenheiro Francisco Mezzalira, a MBT-Degussa na pessoa do Sr. José Granato, a Galvani Engenharia na pessoa do Sr. Ronaldo Galvani, a Elken Materials South América na pessoa do Engenheiro Cláudio K. Amaral e a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp pelo fornecimento de parte dos materiais utilizados nessa pesquisa.

Aos amigos e colegas de Mestrado, Engenheiro Civil Ms. Epaminondas Ferreira Junior e a Engenheira Civil Denise Cristina Barbosa, os quais me auxiliaram em momentos de grande volume de trabalho.

Ao Professor Doutor Antônio Ludovico Beraldo da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, pelas sugestões que muito contribuíram para este trabalho e ao Professor Doutor Luis E. Brossard Pérez (Professor visitante FEAGRI/UNICAMP) pelo auxílio na análise estatística dos resultados.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (bolsa mestrado nº 130731/03-0) pelo apoio financeiro no desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos meus familiares e amigos, que torceram, acreditaram e me apoiaram incondicionalmente durante todo o mestrado.

Aos Professores do programa de Mestrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, área de Edificações, pela contribuição à minha formação.

E principalmente e acima de todos a DEUS, pelos dons e oportunidades recebidos e que através de seu Espírito, permitiu que eu levantasse a cada dia acreditando que eu podia e que eu era capaz, sempre me dando força e perseverança para a realização desse trabalho.

# SUMÁRIO

RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE ABREVIACÕES	xxii

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo Geral.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos.....	2
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Estrutura do Trabalho.....	4
<b>2</b>	<b>Cimento Portland</b>	<b>5</b>
2.1	Cimento Portland – Um Pouco de História.....	5
2.2	Processo de Produção do Cimento Portland.....	7
2.2.1	Matérias-Primas Constituintes do Cimento Portland.....	8
2.2.2	Etapas do Processo de Fabricação.....	8
2.3	Composição Química do Cimento Portland.....	9
2.4	Principais Tipos de Cimento Portland Utilizados no Brasil.....	12
2.4.1	Cimento Portland de Alto-Forno.....	13
2.4.2	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.....	14
2.5	Hidratação do Cimento Portland – Aspectos Gerais.....	15
2.5.1	Hidratação da Fase Silicato.....	16
2.5.2	Hidratação da Fase Intersticial.....	18
2.6	Hidratação do Cimento Portland – Comentários Finais.....	21
<b>3</b>	<b>Adições ao Cimento Portland: Escória de Alto-Forno e Sílica Ativa</b>	<b>23</b>
3.1	Escória Granulada de Alto-Forno.....	23
3.1.1	Escória de Alto-Forno – Um Pouco de História.....	24
3.1.2	Produção da Escória de Alto-Forno.....	24
3.1.3	Matérias-Primas para a Obtenção da Escória de Alto-Forno.....	25

3.1.4	Composição Química da Escória de Alto-Forno.....	25
3.1.5	Hidratação da Escória de Alto-Forno.....	27
3.1.6	Hidratação do Cimento Portland de Alto-Forno.....	27
3.2	Sílica Ativa.....	29
3.2.1	Sílica Ativa – Um Pouco de História.....	31
3.2.2	Matéria-Prima e Produção da Sílica Ativa.....	32
3.2.3	Composição Química da Sílica Ativa.....	33
3.2.4	Hidratação da Sílica Ativa.....	33
<b>4</b>	<b>Concreto e Pré-Moldados</b>	<b>36</b>
4.1	Um Pouco de História.....	36
4.1.1	Concreto.....	36
4.1.2	Pré-Moldados.....	38
4.2	Concreto Pré-Moldado.....	39
4.3	Cura do Concreto Pré-Moldado.....	41
4.3.1	Cura Térmica do Concreto.....	42
4.4	Durabilidade do Concreto Pré-Moldado.....	45
4.4.1	A Absorção de Água pelo Concreto.....	49
4.4.2	A Permeabilidade do Concreto.....	51
4.4.3	A Carbonatação do Concreto.....	52
<b>5</b>	<b>Programa Experimental</b>	<b>57</b>
5.1	Cimento Portland.....	57
5.2	Sílica Ativa.....	58
5.3	Agregados.....	59
5.4	Aditivo Superplastificante.....	61
5.5	Concreto.....	61
5.5.1	Dosagem do Concreto.....	61
5.5.2	Mistura e Moldagem.....	62
5.6	Cura.....	63
5.6.1	Cura ao Ar.....	63
5.6.2	Cura Térmica.....	63
5.6.3	Cura por Imersão.....	65
5.7	Ensaio Realizados.....	65
5.7.1	Resistência à Compressão Axial.....	65
5.7.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	65
5.7.3	Carbonatação Natural.....	65
5.7.4	Absorção Capilar.....	66
5.7.5	Permeabilidade ao Ar.....	67
5.7.6	Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica.....	69
5.8	Análise Estatística.....	71
<b>6</b>	<b>Resultados e Análise</b>	<b>72</b>
6.1	Concretos Produzidos com Cimento Portland CP V ARI.....	72
6.1.1	Resistência Mecânica.....	72
6.1.2	Permeabilidade ao Ar.....	78
6.1.3	Absorção Capilar.....	81

6.1.4	Ascensão Capilar.....	85
6.1.5	Absorção Total e Índice de Vazios.....	86
6.1.6	Carbonatação Natural.....	89
6.1.7	Massa Específica.....	91
6.2	Concretos Produzidos com Cimento Portland CP III.....	91
6.2.1	Resistência Mecânica.....	91
6.2.2	Permeabilidade ao Ar.....	97
6.2.3	Absorção Capilar.....	100
6.2.4	Ascensão Capilar.....	104
6.2.5	Absorção Total e Índice de Vazios.....	105
6.2.6	Carbonatação Natural.....	108
6.2.7	Massa Específica.....	109
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>110</b>
7.1	Resistência Mecânica dos Concretos.....	111
7.2	Durabilidade dos Concretos.....	112
7.3	Sugestões para Prosseguimento da Pesquisa.....	114
	<b>Referências</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>154</b>
	<b>APÊNDICE C</b>	<b>184</b>

# RESUMO

Bardella, Paulo Sérgio. **Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos Produzidos com os Cimentos Portland de Alta Resistência Inicial e de Alto-Forno Aditivados com Sílica Ativa Curados Termicamente.** 200 p.

A durabilidade das estruturas de concreto depende da estrutura porosa e da impermeabilidade do concreto, uma vez que a entrada de água e de agentes deletérios iniciam os processos patológicos que diminuem a vida útil de uma estrutura de concreto. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica, permeabilidade, absorção e carbonatação natural de concretos submetidos a diferentes condições de cura. Os procedimentos de cura adotados são normalmente utilizados em canteiros de obra e na produção de estruturas pré-moldadas de concreto: cura imersa até a idade de 7 dias, cura ambiente e cura térmica. A cura térmica foi realizada na temperatura de 60 °C. Foram empregados concretos produzidos com cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) e cimento Portland de Alto Forno (CP III) sem e com sílica ativa (em substituição ao cimento na proporção de 10% em massa) para cada um dos diferentes tipos de cura utilizados. Os resultados evidenciaram que o tipo de cura afeta o desempenho do concreto. A mudança do tipo de cura aplicada proporcionou variações nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos, principalmente no que diz respeito à sua estrutura porosa. Assim, um regime de cura adequado é essencial para garantir a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos. A utilização de sílica ativa em substituição ao cimento melhorou o desempenho dos concretos, tanto para a resistência mecânica quanto para a durabilidade, independente do tipo de cura empregado.

**Palavras-chave:** concreto, cura, pré-moldado, cimento Portland de alto-forno, cimento Portland de Alta Resistência Inicial, sílica ativa, resistência mecânica, durabilidade, absorção, carbonatação.

# ABSTRACT

Bardella, Paulo Sérgio. **Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Steam Cured Concrete Made with High Early Strength Portland Cement and Blastfurnace Slag Cement Containing Silica Fume.** 200 p.

The durability of concrete structures depends on porous structure and its impermeability. The entrance of water and deleterious agents begin the damage processes and reduce the life of the concrete structure. In that way, the aim of this work was to evaluate the mechanical resistance, permeability, absorption and natural carbonation of concretes submitted to different curing procedures. The curing procedures adopted were usually used in civil construction and in the production of precast structures: moist curing until the age of 7 days, curing in air, and steam curing. The maximum temperature of steam curing was 60 °C. All concretes were produced with High Early Strength Portland cement (CP V ARI) and Blastfurnace Portland cement (CP III) without and with silica fume (10% of replacement, by mass, of Portland cement) for each one of the different curing procedure used. The results showed that the curing procedure affects the concrete performance, providing variations in their mechanical properties and in their durability, mainly in porous structure. Therefore, the curing process used is essential to guarantee the mechanical resistance and the durability of the concretes. The use of silica fume improved the performance of the concretes, as for the mechanical resistance as for its durability, independent of the curing procedure used.

**Keywords:** concrete, curing, precast concrete, blastfurnace slag Portland cement, high initial strength Portland cement, silica fume, strength resistance, durability, absorption, carbonation.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Seqüência do Processo de Clinquerização e Resfriamento.....	10
Tabela 2.2	Composição química do clínquer de cimento Portland expressos na forma de óxidos.....	10
Tabela 2.3	Compostos químicos do clínquer de cimento Portland.....	11
Tabela 2.4	Características dos silicatos e aluminatos do cimento Portland.....	12
Tabela 2.5	Cimentos Portland utilizados com mais freqüência na construção civil.....	13
Tabela 2.6	Relação entre dimensão da partícula de cimento Portland e tempo de hidratação sob condições normais de cura.....	16
Tabela 2.7	Seqüência de hidratação do $C_3S$ .....	17
Tabela 2.8	Reações de hidratação do $C_3S$ .....	18
Tabela 3.1	Composição das Escórias de Alto-Forno Brasileiras e do Clínquer de cimento Portland.....	26
Tabela 3.2	Composição química típica de algumas sílicas ativas.....	33
Tabela 4.1	Classes de agressividade ambiental.....	46
Tabela 4.2	Relação a/c em função da classe e agressividade ambiental.....	46
Tabela 4.3	Relação entre cobrimento nominal (mm) em função da classe de agressividade ambiental.....	46
Tabela 5.1	Especificação dos cimentos Portland empregados de acordo com as normas brasileiras.....	57
Tabela 5.2	Composição química, composição potencial e características físicas dos cimentos empregados.....	58
Tabela 5.3	Dados Físicos da Sílica Ativa Utilizada.....	59
Tabela 5.4	Composição da Sílica Ativa Utilizada.....	59
Tabela 5.5	Análise granulométrica do agregado miúdo – Areia média.....	59
Tabela 5.6	Análise granulométrica do agregado graúdo – Brita 1.....	60
Tabela 5.7	Dosagem do concreto por $m^3$ .....	62
Tabela 5.8	Nomenclatura dos concretos produzidos.....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática das mudanças que ocorrem no sistema $C_3S$ - água.....	17
Figura 2.2	Curva de hidratação do $C_3A$ na presença de gipsita.....	19
Figura 2.3	Curva calorimétrica da hidratação do $C_4AF$ em água, na presença de gipsita e na presença de cal e gipsita.....	20
Figura 2.4	Modelo proposto por Chappuis .....	22
Figura 3.1	Partícula de sílica ativa visualizada por meio de microscópio eletrônico de varredura.....	30
Figura 3.2	Efeito filer da sílica ativa.....	30
Figura 4.1	Ciclo de cura .....	43
Figura 4.2	Relação entre o cobrimento da armadura e a profundidade de carbonatação.....	53
Figura 4.3	Grau de carbonatação em função da umidade do ambiente.....	54
Figura 4.4	Representação esquemática de carbonatação parcial do concreto.....	56
Figura 5.1	Composição granulométrica do agregado miúdo – Areia média.....	60
Figura 5.2	Composição granulométrica do agregado graúdo – Brita 1.....	61
Figura 5.3	Câmara de cura térmica.....	64
Figura 5.4	Dispositivo para o ensaio de absorção capilar.....	66
Figura 5.5	Aparelho de permeabilidade ao ar.....	68
Figura 6.1	Resistência à compressão de concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa.....	73
Figura 6.2	Resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa.....	77
Figura 6.3	Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI.....	79
Figura 6.4	Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com sílica ativa.....	80
Figura 6.5	Absorção inicial em concretos com CP V ARI com e sem sílica ativa.....	82
Figura 6.6	Coeficiente de absorção inicial em concretos com CP V ARI com e sem sílica ativa.....	83
Figura 6.7	Absorção capilar em concretos com CP V ARI com e sem sílica ativa.....	84
Figura 6.8	Valores de ascensão capilar para concretos produzidos com CP V ARI, com e sem sílica ativa.....	85

Figura 6.9	Absorção total – CP V ARI, com e sem sílica ativa, imersos em água por 24 horas.....	87
Figura 6.10	Absorção total – CP V ARI, com e sem sílica ativa, imersos em água por 3 dias.....	87
Figura 6.11	Índice de vazios – CP V ARI, com e sem sílica ativa, imersos em água por 24 horas.....	88
Figura 6.12	Índice de vazios – CP V ARI, com e sílica ativa, imersos em água por 3 dias.....	89
Figura 6.13	Carbonatação natural – CP V ARI, com e sem sílica ativa.....	90
Figura 6.14	Resistências à compressão de concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa.....	92
Figura 6.15	Resistências à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa.....	96
Figura 6.16	Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP III.....	98
Figura 6.17	Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP III com sílica ativa.....	99
Figura 6.18	Absorção inicial em concretos com CP III com e sem sílica ativa.....	101
Figura 6.19	Coefficiente de absorção inicial em concretos com CP III com e sem sílica ativa.....	102
Figura 6.20	Absorção capilar em concretos com CP III com e sem sílica ativa.....	103
Figura 6.21	Valores de ascensão capilar para concretos produzidos com CP III com e sem sílica ativa.....	104
Figura 6.22	Absorção total – CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 24 horas.....	106
Figura 6.23	Absorção total – CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 3 dias.....	106
Figura 6.24	Índice de vazios – CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 24 horas.....	107
Figura 6.25	Índice de vazios – CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 3 dias.....	107
Figura 6.26	Carbonatação natural – CP III, com e sem sílica ativa.....	109
Figura A1.1	Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL– Idade 1 dia.....	126
Figura A1.2	Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL– Idade 3 dias.....	126
Figura A1.3	Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL– Idade 7 dias.....	127
Figura A1.4	Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL– Idade 28 dias.....	127
Figura A1.5	Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL– Idade 90 dias.....	128
Figura A2.1	Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 1 dia.....	130
Figura A2.2	Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 3 dias.....	130
Figura A2.3	Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 7 dias.....	131
Figura A2.4	Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	131
Figura A2.5	Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	132
Figura A3.1	Permeabilidade ao ar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	134
Figura A3.2	Permeabilidade ao ar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.....	134
Figura A3.3	Permeabilidade ao ar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	135
Figura A4.1	Absorção inicial – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	137
Figura A4.2	Absorção inicial – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.....	137
Figura A4.3	Absorção inicial – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	138

Figura A5.1	Absorção capilar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	140
Figura A5.2	Absorção capilar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.....	140
Figura A5.3	Absorção capilar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	141
Figura A6.1	Absorção total – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	143
Figura A6.2	Absorção total – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.....	143
Figura A6.3	Absorção total – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	144
Figura A7.1	Absorção total – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	146
Figura A7.2	Absorção total – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.....	146
Figura A7.3	Absorção total – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	147
Figura A8.1	Índice de vazios – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	149
Figura A8.2	Índice de vazios – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.....	149
Figura A8.3	Índice de vazios – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	150
Figura A9.1	Índice de vazios – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.....	152
Figura A9.2	Índice de vazios – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.....	152
Figura A9.3	Índice de vazios – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.....	153
Figura B1.1	Resistência à compressão – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 1 dia.....	156
Figura B1.2	Resistência à compressão – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 3 dias.....	156
Figura B1.3	Resistência à compressão – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 7 dias.....	157
Figura B1.4	Resistência à compressão – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	157
Figura B1.5	Resistência à compressão – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	158
Figura B2.1	Resistência à tração – CP III– CPIII X CPIII-SIL – Idade 1 dia.....	160
Figura B2.2	Resistência à tração – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 3 dias.....	160
Figura B2.3	Resistência à tração – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 7 dias.....	161
Figura B2.4	Resistência à tração – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	161
Figura B2.5	Resistência à tração – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	162
Figura B3.1	Permeabilidade ao ar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	164
Figura B3.2	Permeabilidade ao ar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.....	164
Figura B3.3	Permeabilidade ao ar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	165
Figura B4.1	Absorção inicial – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	167
Figura B4.2	Absorção inicial – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.....	167
Figura B4.3	Absorção inicial – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	168
Figura B5.1	Absorção capilar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	170
Figura B5.2	Absorção capilar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.....	170
Figura B5.3	Absorção capilar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	171
Figura B6.1	Absorção total – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	173

Figura B6.2	Absorção total – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.....	173
Figura B6.3	Absorção total – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	174
Figura B7.1	Absorção total – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	176
Figura B7.2	Absorção total – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.....	176
Figura B7.3	Absorção total – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	177
Figura B8.1	Índice de vazios – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	179
Figura B8.2	Índice de vazios – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.....	179
Figura B8.3	Índice de vazios – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	180
Figura B9.1	Índice de vazios – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.....	182
Figura B9.2	Índice de vazios – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.....	182
Figura B9.3	Índice de vazios – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.....	183
Figura C1.1	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI submetido à cura ambiente.....	186
Figura C1.2	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura ambiente.....	186
Figura C1.3	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	187
Figura C1.4	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	187
Figura C1.5	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI submetido à cura térmica a 60 °C.....	188
Figura C1.6	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.....	188
Figura C2.1	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI submetido à cura ambiente.....	190
Figura C2.2	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura ambiente.....	190
Figura C2.3	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	191
Figura C2.4	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	191
Figura C2.5	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI submetido à cura térmica a 60 °C.....	192
Figura C2.6	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.....	192
Figura C3.1	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III submetido à cura ambiente.....	194

Figura C3.2	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III com sílica ativa submetido à cura ambiente.....	194
Figura C3.3	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	195
Figura C3.4	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III com sílica ativa submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	195
Figura C3.5	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III submetido à cura térmica a 60 °C.....	196
Figura C3.6	Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.....	196
Figura C4.1	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III submetido à cura ambiente.....	198
Figura C4.2	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III com sílica ativa submetido à cura ambiente.....	198
Figura C4.3	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral– CP III submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	199
Figura C4.4	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III com sílica ativa – submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.....	199
Figura C4.5	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III submetido à cura térmica a 60 °C.....	200
Figura C4.6	Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.....	200

## LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
ag./agl.	Relação água/aglomerante
Afm	Monossulfoaluminato de cálcio
Aft	Trissulfoaluminato de cálcio (etringita)
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio
CP III	Cimento Portland de Alto-Forno
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de sílica
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
CaO	Óxido de cálcio
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de cálcio
MgO	Óxido de magnésio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
H <sub>2</sub> S	Gás sulfídrico

## INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas técnicas e metodologias no sentido de se industrializar as construções, a indústria de estruturas pré-moldadas em concreto se destaca apresentando características específicas para o concreto usado na fabricação dessas estruturas.

Embora a produção de estruturas pré-moldadas em concreto seja um processo industrial, com uma seqüência de produção similar a uma linha de produção, deve-se observar que diferentemente de outros produtos industrializados, em uma linha de produção de elementos pré-moldados, no final dessa linha, os elementos pré-moldados ainda não estão prontos para serem utilizados. Isso se deve às propriedades específicas do concreto, que é a matéria-prima principal dessas estruturas pré-moldadas.

A principal característica que um concreto deve apresentar para ser utilizado em pré-moldados é a de apresentar uma resistência mínima para a retirada de peças das fôrmas num curto período de tempo (a resistência do concreto endurecido aumenta no decorrer do tempo). Tradicionalmente, para atender essa necessidade de rápida desmoldagem das peças concretadas com a finalidade de uma maior utilização das fôrmas, a indústria de pré-moldados utiliza o cimento CP V ARI juntamente com a aplicação de cura térmica a vapor.

Pesquisas realizadas nos últimos anos comprovaram que com o emprego de adições minerais no concreto, tais como escória granulada de alto-forno e sílica ativa, torna-se possível obter melhorias na resistência mecânica e durabilidade, principalmente em termos de porosidade, entre outras propriedades (ALEXANDER.& MAGEE, 1999; ALDEA et *al.*, 2000; AITCIN, 2000; AITCIN, 2003).

Concretos produzidos com misturas ternárias, (cimento, escória granulada de alto-forno e sílica ativa) têm sido utilizados com sucesso, por apresentarem custo reduzido, adequadas

propriedades físicas e químicas e apresentando benefícios ambientais para a sociedade, pois utilizam na sua produção subprodutos industriais. (ALEXANDER.& MAGEE, 1999; ALDEA et al., 2000; AITCIN, 2000; AITCIN, 2003).

A escória granulada de alto-forno e a sílica ativa são subprodutos industriais obtidos, respectivamente, da fabricação do ferro gusa e da produção do silício e suas ligas. Para a indústria siderúrgica, a escória e a sílica ativa eram um entulho poluente produzido em grandes volumes e de armazenamento dispendioso. Atualmente, a sílica ativa é bastante utilizada na fabricação de Concreto de Alto Desempenho – CAD; mas, no caso da escória de alto-forno, o seu emprego no cimento em elevados teores ainda não é completamente aceito pelo mercado.

Sabe-se que o ganho de resistência do cimento com adição de escória é mais lento do que o do cimento convencional. No entanto, com a utilização de cura térmica é possível a utilização de tais cimentos alternativos na indústria de pré-moldados.

## **1.1 - Objetivos**

### **1.1.1 – Objetivo Geral**

O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho físico e mecânico dos concretos produzidos com cimentos Portland de Alto-Forno (CP III) e cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), sem adição de sílica ativa e com substituição de parte do cimento por sílica ativa, quando submetidos à cura térmica.

### **1.1.2 - Objetivos Específicos**

Para determinar a influência da temperatura de cura nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos produzidos com cimento Portland de Alto-Forno (CP III) e cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), sem sílica ativa e com substituição de parte do cimento por sílica ativa na proporção de 10% em massa, é necessário que os seguintes itens sejam analisados e discutidos:

- Substituição de parte do cimento por sílica ativa,
- Emprego de cura térmica na temperatura de 60 °C,

- Determinação das propriedades mecânicas dos concretos (resistência à compressão e resistência à tração),
- Determinação da permeabilidade ao ar.
- Determinação da absorção capilar, absorção total e índice de vazios,
- Determinação da carbonatação natural dos concretos produzidos,

Deve-se observar que a cura térmica tem como objetivo ser uma ferramenta para a produção de concretos para a indústria de pré-moldados, aliando versatilidade e economia no processo de fabricação das estruturas pré-moldadas.

Além da cura térmica serão empregados outros procedimentos de cura para tornar o estudo mais abrangente, (curas ambiente e imersa até a idade de 7 dias). Dessa forma teremos informações para verificar a influência dos diferentes sistemas de cura na resistência mecânica e na durabilidade de concretos com e sem utilização de sílica ativa.

## 1.2 – Justificativa

Entre as vantagens da utilização de estruturas pré-moldadas de concreto estão: rapidez e agilidade na construção, economia no custo total da obra e diminuição na quantidade de entulho gerado durante o processo de construção (conceito de obra limpa exigido pela Resolução nº 307 - CONAMA (2002) - Conselho Nacional do Meio Ambiente).

O conceito de desperdício de materiais não se baseia somente na não geração de resíduos sólidos, mas também na não reutilização de resíduos no processo de construção, desperdiçando assim as potencialidades destes materiais. Dessa forma, deve-se tomar medidas para se transformar resíduos de processos industriais em recursos reutilizáveis na construção civil.

A utilização de concretos de cimento Portland de alto-forno e sílica ativa juntamente com a aplicação da cura térmica é uma proposta interessante e viável para a produção de estruturas pré-moldadas em concreto (armado e protendido).

Devido à necessidade de reutilização rápida de fôrmas para atender um processo de produção fabril e para diminuir o tempo de peças em estoque, a indústria de pré-moldados tem, tradicionalmente, utilizado o cimento Portland CP V ARI na fabricação de peças de concreto.

O concreto produzido com cimento Portland de alto-forno submetido à cura térmica apresenta vantagens, pois tanto a escória de alto-forno contida no cimento como a sílica ativa apresentam reações químicas que resultam em compostos resistentes (tanto a escória de alto-

forno quanto a sílica ativa geram C-S-H adicional que preenchem os espaços vazios da pasta de cimento). Além disso, com a utilização da escória de alto-forno e da sílica ativa, por se tratarem de resíduos industriais com a possibilidade de utilização na cadeia construtiva, contribui-se para o desenvolvimento sustentável.

### **1.3 – Estrutura do Trabalho**

Este trabalho inicia-se com esta Introdução onde foram apresentadas as considerações iniciais, os objetivos e a justificativa da realização do trabalho. O próximo capítulo, Capítulo 2, traz uma ampla revisão sobre o material cimento Portland abordando aspectos históricos, produção, classificação de acordo com as normas brasileiras para cada tipo de cimento Portland, terminando o capítulo apresentando alguns aspectos importantes a respeito dos mecanismos de hidratação do cimento Portland.

No Capítulo 3 é feita uma apresentação das adições minerais utilizadas nessa pesquisa (escória de alto forno e sílica ativa), abordando os aspectos históricos, obtenção, produção propriedades químicas e hidratação.

O Capítulo 4 apresenta as estruturas pré-moldadas e o concreto como material de construção abordando aspectos históricos e situação atual. Na continuidade do capítulo aborda-se a cura térmica do concreto e os fatores que afetam a durabilidade do concreto (absorção, permeabilidade e carbonatação).

No Capítulo 5 apresenta-se a metodologia empregada para a avaliação das propriedades mecânicas e da durabilidade dos concretos estudados. Ensaio de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção capilar, permeabilidade ao ar, absorção total, índice de vazios e carbonatação natural. A descrição dos equipamentos e os métodos de ensaios adotados para a realização da pesquisa estão detalhadamente apresentados e discutidos.

O Capítulo 6 traz os resultados dos ensaios realizados; nesse capítulo é feita uma discussão entre as propriedades de resistência mecânica e durabilidade, abordando a influência dos tipos de cura utilizados na pesquisa em relação aos cimentos Portland CP V ARI e CP III.

No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões da pesquisa, onde foi feita uma análise do comportamento dos concretos produzidos a partir dos dois tipos de cimento utilizados em diferentes condições de cura. E é feita uma apresentação de alguns tópicos sugeridos para o prosseguimento desse trabalho experimental.

# 2

## CIMENTO PORTLAND

Aglomerantes minerais são materiais obtidos a partir de minérios extraídos da natureza que são calcinados em determinadas temperaturas. Além do produto em si obtido pela calcinação da matéria-prima, eles recebem adições minerais. Entre os aglomerantes minerais empregados na construção civil o mais utilizado é o cimento Portland.

O cimento pode ser definido como uma substância adesiva capaz de unir fragmentos de material sólido formando um sólido homogêneo. A palavra cimento é de origem latina “caementum” que significa pedras ásperas e não talhadas (LEA, 1971; VASCONCELOS, 1992). É um dos materiais mais conhecidos em todo o mundo e tem ocupado um lugar indispensável na construção. Este material finamente pulverizado, quando hidratado, desenvolve propriedades ligantes (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

### 2.1 – Cimento Portland - Um Pouco de História

O emprego dos aglomerantes vem de longa data. Sabe-se que os antigos egípcios já usavam como produto ligante gesso impuro calcinado. Esse material foi utilizado como argamassa na construção da Pirâmide de Queops em 3000 a.C. (MINDESS & YOUNG, 1981). Os gregos e romanos usavam calcário calcinado e aprenderam, posteriormente, a produzir um novo material para a época com a mistura de cal, água, areia e pedra britada ou tijolos e telhas quebradas, formando uma espécie de concreto (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; SCHIESSI, 1996).

Os romanos trituravam cal com cinzas vulcânicas ou telhas de argila queimadas, finamente moídas, para construções sob a água (pois a argamassa de cal não endurece debaixo da água). Algumas das estruturas romanas, nas quais as pedras eram ligadas com argamassa, como o Coliseu

(Roma) e a *Pont du Gard* (França), resistem até hoje com o material ligante ainda rijo e firme. Em vários locais, nas ruínas de Pompéia (Itália), a argamassa se apresenta menos deteriorada pelas intempéries do que a pedra natural (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982).

Somente no século XVIII, após um longo período de desuso dos aglomerantes, registrou-se um avanço na tecnologia dos cimentos, quando John Smeaton, em 1756, descobriu que se obtinha uma argamassa melhor quando a pozolana era misturada ao calcário calcinado contendo elevado teor de argila. Desenvolveram-se outros cimentos hidráulicos semelhantes ao “cimento romano”. Um deles foi obtido por James Parker ao calcinar nódulos de calcário argiloso, que permitiu o desenvolvimento dos estudos culminando com Joseph Aspdin, em 1824, patenteando o cimento Portland. Esse cimento era fabricado aquecendo-se num forno uma mistura de argila finamente moída com calcário até eliminar o CO<sub>2</sub>. Nesta época, a temperatura do forno era bem inferior à necessária para formação do clínquer (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; KLEMM, 1989; VASCONCELOS, 1992; SCHIESSI, 1996).

O cimento moderno foi criado em 1845 por Isaac Johnson, que calcinou uma mistura de argila e greda (giz) até a formação do clínquer, propiciando as reações necessárias à formação de compostos de alta resistência no cimento (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; KLEMM, 1989).

O nome cimento Portland foi escolhido devido à semelhança de cor e de qualidade do cimento hidratado com a pedra de Portland (um calcário extraído em Dorset). Esse nome é usado até hoje para designar um cimento obtido pela mistura apropriada de materiais calcários e argilosos, ou outros materiais contendo sílica, alumina ou óxidos de ferro, aquecendo tudo a uma temperatura necessária para a clínquerização e moendo-se o clínquer resultante (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; KLEMM, 1989).

As primeiras fábricas de cimento Portland, de que se tem conhecimento, foram construídas na Inglaterra, em seguida na Bélgica e mais tarde na Alemanha, por volta de 1855. A partir desta data, a produção de cimento Portland na Europa cresceu rapidamente sendo iniciadas as exportações para os Estados Unidos da América - EUA (DA SILVA, 1994).

Em 1872, os Estados Unidos eram um grande importador de cimento Portland. Nessa época David Saylor, que fabricava um cimento natural nos Estados Unidos, efetuou experiências com o cimento importado e concluiu que o cimento Portland tinha propriedades próximas ao do produto por ele produzido. A partir daí ele implementou mudanças em seu processo de fabricação, obtendo um cimento Portland de excelente qualidade. Este cimento conquistou os

engenheiros da época, e em 1890 já havia 70 fábricas de cimento operando nos Estados Unidos (DA SILVA, 1994).

No Brasil, pouco se conhece a respeito do início efetivo da utilização do cimento Portland. É possível dizer que a utilização do cimento Portland provavelmente se consolidou com o início da utilização do concreto armado. O concreto armado, ou melhor, o cimento armado, como era conhecido até 1920, foi fruto da Revolução Industrial. Este era uma mistura do uso de máquinas com a execução artesanal. Devido a estes fatores, encontrou no Brasil um ambiente bastante favorável (VASCONCELOS, 1992).

Atualmente as estruturas em concreto armado se tornou o sistema construtivo mais utilizado no Brasil. Este fato teve início na Primeira Guerra Mundial, durante a qual tornou-se impraticável a importação de estruturas metálicas que eram utilizadas na construção civil. Desta forma, o concreto armado se desenvolveu com maior intensidade (PINHEIRO, 2002).

A indústria brasileira de cimento teve a sua criação em 1924, com a implementação de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, pela companhia Brasileira de Cimento Portland. Desde então são inúmeras as modificações ocorridas ao longo de sua história. A indústria brasileira vem procurando adequar os avanços tecnológicos de países desenvolvidos à realidade brasileira, com seus diversos desafios do ponto de vista econômico (CENTURIONE *et al.*, 1999).

## **2.2 – Processo de Produção do Cimento Portland**

O cimento Portland é o produto resultante da calcinação, em temperatura elevada, de uma mistura de matérias-primas minerais, em proporções adequadas. Dessa mistura calcinada obtém-se o clínquer Portland. O clínquer, após moagem com gipsita (sulfato de cálcio bi-hidratado –  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , substância que retarda a pega), e adição de alguns outros minerais, resulta nos diversos tipos de cimento Portland existentes no mercado.

A adição de resíduos industriais, como as escórias granuladas de alto-forno e as cinzas volantes de termoeletricas, representa contribuições ao meio ambiente e à qualidade do produto final, o cimento Portland (CENTURIONE *et al.*, 1999).

## 2.2.1 – Matérias-Primas Constituintes do Cimento Portland

Os calcários e as argilas utilizados no processo de fabricação do cimento, são encontrados na natureza em grandes variedades. Calcários argilosos, compostos por uma mistura de giz, argila e xisto, também são matérias-primas utilizadas. Geralmente as jazidas para extração dos minerais constituintes da matéria-prima para a fabricação do cimento Portland são localizadas próximas ao local de fabricação (LEA, 1971).

O calcário é a principal matéria-prima utilizada na fabricação do cimento (representa mais de 70% da composição, em massa). Quando exposto a temperatura acima de 800 °C, há dissociação do  $\text{CaCO}_3$  resultando em  $\text{CaO}$  e liberando o  $\text{CO}_2$ . Este  $\text{CaO}$  é que vai reagir com os óxidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  provenientes da argila e outras matérias-primas formando, no interior do forno rotativo, em temperatura de 1450 °C, os minerais constituintes do clínquer.

A argila é utilizada para fornecer os silicatos de alumínio e ferro que irão reagir com a cal no interior do forno, formando o clínquer. Quando ocorre deficiência de  $\text{SiO}_2$  na argila é necessária a utilização de areia como corretivo. Quando necessário, o minério de ferro também é utilizado para corrigir a deficiência de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  da argila. Normalmente o minério de ferro é comprado na forma de finos, rejeito das mineradoras (hematita) (MINDESS & YOUNG, 1981; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Durante a extração, processamento e estocagem, esses materiais são amostrados, e analisados física e quimicamente pelo laboratório das fábricas de cimento (MINDESS & YOUNG, 1981; JOHANSEN, 1989).

## 2.2.2 – Etapas do Processo de Fabricação

- *Extração, britagem, transporte e pré-homogeneização da matéria-prima:* são as etapas iniciais do processo de fabricação, consistindo na retirada da matéria-prima das jazidas, transporte para a fábrica, onde são misturadas e ficam em condições de serem utilizadas no processo de transformação industrial.
- *Dosagem das matérias primas e moagem:* nessa etapa, o calcário e a argila são transportados para o moinho de bolas onde são pulverizados e passam à farinha (KERTON & MURRAY, 1983).

- **Clinquerização:** é nessa etapa que se inicia o processo de transformação mineral da matéria-prima, com a evaporação da água livre, água quimicamente combinada, desprendimento do CO<sub>2</sub> do calcário, liberando o CaO para reagir com os óxidos de ferro e alumínio, provenientes principalmente da argila, obtendo-se o clínquer (TAYLOR, 1992).
- **Resfriamento:** com o objetivo de estabilizar os silicatos nas suas respectivas formas, o clínquer deve ser resfriado rapidamente depois de passar através da zona de clinquerização no forno, o resfriamento rápido consolida as características dos minerais obtidos no forno. Se o clínquer for resfriado lentamente até a temperatura ambiente irá gerar compostos sem propriedades hidráulicas. O resfriamento rápido solidifica os compostos do clínquer nas suas formas obtidas em alta temperatura, não permitindo que ocorram transformações de fases (AITCIN, 2000).
- **Moagem:** é nessa etapa onde se adiciona a gipsita (3% a 5%) e as adições minerais. Após ser moído e receber algumas adições minerais o clínquer se transforma nos diversos tipos de cimento existentes no mercado (TAYLOR, 1992).
- **Estocagem em silos para expedição:** o cimento pode ser transportado ensacado ou a granel.

### 2.3 – Composição Química do Cimento Portland

As matérias-primas usadas na fabricação do cimento Portland reagem entre si no forno, dando origem a uma série de produtos mais complexos, e com exceção de um pequeno resíduo de calcário não combinado, que não teve tempo suficiente para reagir, é alcançado um estado de equilíbrio químico. Entretanto, o equilíbrio não se mantém durante o resfriamento, e a velocidade de resfriamento, irá afetar o grau de cristalização e a quantidade de material amorfo presente no clínquer resfriado (LEA, 1971; MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982).

A Tabela 2.1 apresenta todas as etapas constituintes dos processos de clinquerização e resfriamento.

Tabela 2.1 – Sequência do Processo de Clinquerização e Resfriamento (LEA, 1971; AITCIN, 2000).

Faixa de Temperatura (°C)	Tipo de reação
<b>Aquecimento</b>	
20 - 100	Evaporação da água livre – Moagem obtendo a Farinha.
100 - 300	Perda da água combinada na argila.
400 - 900	Calcinação das argilas minerais (H <sub>2</sub> O e grupos de OH).
> 500	Modificações estruturais nos silicatos.
600 - 900	Dissociação dos carbonatos de magnésio.
> 800	Formação de βC <sub>2</sub> S, produtos intermediários, aluminatos e ferrita.
> 1250	Formação da fase líquida.
Aprox. 1450	Formação do αC <sub>3</sub> S e αC <sub>2</sub> S.
<b>Resfriamento</b>	
1300 - 1240	Cristalização da fase líquida, especialmente os aluminatos e ferrita (após zona de calcinação, antes do resfriador).
1240 - 150	Consolidação das características dos minerais obtidos no forno.

A composição do clínquer do cimento Portland contém, aproximadamente, os seguintes elementos expressos na forma de óxidos: (Tabela 2.2).

Tabela 2.2– Composição química do clínquer de cimento Portland expressos na forma de óxidos (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982).

Composto	Fórmula	Símbolo	Teor (%)
Óxido de cálcio	CaO	C	59 - 67
Sílica	SiO <sub>2</sub>	S	16 - 26
Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	4 - 8
Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	2 - 5
Magnésio	MgO	M	0,8 - 6,5
Sódio	Na <sub>2</sub> O	-	0 - 1,5
Potássio	K <sub>2</sub> O	-	0 - 1,5
SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$	0,5 - 1,2

As reações químicas que ocorrem no forno durante a clinquerização produzem compostos que podem ser, aproximadamente, representados como os compostos da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Compostos químicos do clínquer de cimento Portland (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; JOHANSEN, 1989; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

<b>Compostos Potenciais</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nomenclatura</b>
3CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	Silicato Tricálcico
2CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	Silicato Dicálcico
3CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	Aluminato Tricálcico
4CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato Tetracálcio

As propriedades do clínquer do cimento Portland estão relacionadas ao teor dos compostos. É difícil extrair conclusões a partir da análise do clínquer do cimento Portland expressa em óxidos. A indústria do cimento calcula o teor dos compostos do clínquer do cimento Portland a partir da análise dos óxidos, usando uma série de equações que foram originalmente desenvolvidas por R. H. Bogue. Essas equações são usadas para estimar a composição potencial ou teórica dos compostos minerais do clínquer do cimento Portland (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

As equações de Bogue são as seguintes: (NEVILLE, 1982)

$$C_3S = 4,07.CaO - 7,60.SiO_2 - 6,72.Al_2O_3 - 1,43.Fe_2O_3 - 2,85.SO_3$$

$$C_2S = 2,87.SiO_2 - 0,754.C_3S$$

$$C_3A = 2,65.Al_2O_3 - 1,69.Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3,04.Fe_2O_3$$

A composição mineralógica do clínquer varia de acordo com as matérias primas disponíveis e o processo de fabricação aplicado. Para cada tipo de clínquer formado a composição apresenta diferentes comportamentos de endurecimento, que proporcionalmente influenciam as propriedades do cimento nas suas aplicações (MINDESS & YOUNG, 1981; JOHANSEN, 1989).

As propriedades do cimento são relacionadas diretamente com as proporções dos silicatos e aluminatos. As propriedades do concreto contendo cimento Portland desenvolvem-se como resultado de reações químicas entre os compostos do cimento e a água. Essas reações de hidratação são acompanhadas por trocas de matéria e energia (MEHTA & MONTEIRO 1994).

Portanto, entender algumas das propriedades do cimento Portland, tais como a reatividade dos silicatos de cálcio e dos aluminatos de cálcio torna-se importante para o conhecimento do processo de endurecimento do concreto (MINDESS & YOUNG, 1981).

A Tabela 2.4 apresenta as características dos principais compostos do cimento Portland: os silicatos compostos por  $C_3S$  (silicato tricálcico) e  $C_2S$  (silicato dicálcico), e dos aluminatos, compostos por  $C_3A$  (aluminato tricálcico) e  $C_4AF$  (ferro aluminato tetracálcico).

É comum utilizar as expressões alita e belita para se referir as formas impuras do  $C_3S$  e do  $C_2S$  (AITCIN, 2000). O  $C_3A$  também é chamado de fase aluminato e o  $C_4AF$  também é chamado de fase ferrita. O  $C_3A$  e o  $C_4AF$  também são conhecidos como uma fase intersticial, pois apresentam fases mais ou menos cristalizadas.

Tabela 2.4 – Características dos silicatos e aluminatos do cimento Portland. (MINDESS & YOUNG, 1981; KATTAR & ALMEIDA; 1999).

Composto Potencial	Símbolo	Teor no Clínquer (%)	Propriedades
Silicato Tricálcico	$C_3S$	50 – 65	Endurecimento rápido, moderado calor de hidratação e elevada resistência inicial
Silicato Dicálcico	$C_2S$	15 – 25	Endurecimento lento, baixo calor de hidratação e baixa resistência inicial.
Aluminato Tricálcico	$C_3A$	6 – 10	Pega muito rápida (controlado com a adição de gipsita), suscetível ao ataque de meios sulfatados, elevado calor de hidratação, retração elevada, baixa resistência final.
Ferro Aluminato Tetracálcico	$C_4AF$	3 – 8	Endurecimento lento, moderado calor de hidratação, resistente a meios sulfatados, não contribui para a resistência

## 2.4 – Principais Tipos de Cimento Portland Utilizados no Brasil

A classificação que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1991) adotou para classificar os cimentos produzidos no Brasil é baseada, principalmente, nos tipos e teores de adições que são colocadas nos cimentos durante o processo de fabricação. Isto acontece com a verificação da quantidade de teores máximos de cada adição mineral que é utilizada na fabricação de cada tipo de cimento.

A seguir são mostrados os principais tipos de cimento Portland encontrados no mercado brasileiro, que se diferenciam entre si em função da sua composição, classificados de acordo com a nomenclatura da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- Cimento Portland comum – CP I e CP I-S;
- Cimento Portland composto – CP II-E, CP II-Z e CP II-F;
- Cimento Portland de alto-forno – CP III;
- Cimento Portland pozolânico – CP IV;
- Cimento Portland de alta resistência inicial – CP V ARI.

Tabela 2.5 – Cimentos Portland utilizados com mais frequência na construção civil.

<b>Tipo de cimento</b>	<b>Clínquer+ Gipsita (%)</b>	<b>Escória de Alto-forno (%)</b>	<b>Material Pozolânico (%)</b>	<b>Material Carbonático (%)</b>	<b>Norma Brasileira</b>
CP I	100	-	-	-	NBR 5732
CP I-S	99 - 95	-	-	1 - 5	NBR 5732
CP II-E	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10	NBR 11578
CP II-Z	94 - 76	-	6 - 14	0 - 10	NBR 11578
CP II-F	94 - 90	-	-	6 - 10	NBR 11578
<b>CP III</b>	<b>65 - 25</b>	<b>35 - 70</b>	-	<b>0 - 5</b>	<b>NBR 5735</b>
CP IV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
<b>CP V ARI</b>	<b>100 - 95</b>	-		<b>0 - 5</b>	<b>NBR 5733</b>

Como será descrito na metodologia do trabalho, foram empregados dois tipos de cimento Portland: o CP III e o CP V ARI. Assim serão determinadas as propriedades de resistência e durabilidade em concretos produzidos com esses cimentos submetidos a diferentes tipos de cura.

#### 2.4.1 - Cimento Portland de Alto-Forno

De acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991c), o cimento Portland de Alto-forno é designado pela sigla CP III. No Brasil, é comum o uso da escória adicionada ao cimento em diversos teores. No cimento Portland de Alto-forno (CP III), o teor de escória, em relação à massa total do cimento, pode ser de 35% a 70%, admitindo-se também até 5% de filler calcário (Tabela 2.5).

As escórias são adicionadas ao clínquer por apresentarem um potencial hidráulico latente e também pelo fato de o clínquer ser um de seus ativadores, pois produz um ambiente alcalino adequado para o desenvolvimento das suas reações de hidratação (CAMARINI, 1995; SILVA, 1998).

As propriedades do cimento Portland de Alto-forno (CP III) são semelhantes às do cimento Portland composto (CP II). A velocidade de endurecimento é mais lenta nas primeiras idades, porém, nas idades mais avançadas, há contribuição dos compostos formados pela hidratação da escória (DE MILITO, 2001). No CP III o calor de hidratação é mais baixo do que no CP II. Um cimento do tipo CP III geralmente tem uma melhor resistência a ataque por sulfatos (MINDESS & YOUNG, 1981).

O cimento Portland de Alto-forno (CP III) é utilizado em construção no Brasil desde a década de 1950, com excelentes resultados e com o máximo de segurança e qualidade. O CP III tem aplicação generalizada na produção de concretos, melhorando propriedades específicas como durabilidade e resistência mecânica (BATTAGIN & ESPER, 1988).

Esse tipo de cimento pode ser produzido com moagem conjunta de clínquer, escória de alto-forno seca, e gipsita, ou misturando cimento Portland em pó com a escória previamente moída. A escória é mais dura que o clínquer, o que deve ser levado em conta no processo de moagem. A moagem em separado da escória granulada resulta em superfícies mais lisas, o que é benéfico para a trabalhabilidade (NEVILLE, 1982).

#### **2.4.2 - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**

De acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991d), o cimento Portland de alta Resistência Inicial é designado pela sigla CP V ARI. O cimento Portland de alta resistência inicial apresenta um aumento mais rápido de resistência nas primeiras idades. A sua resistência na idade de sete dias é da mesma ordem de grandeza da resistência atingida por um cimento Portland composto (CP II 32) aos 28 dias, para a pasta de consistência normal (NBR 11578 – ABNT, 1991b; NBR 5733 – ABNT, 1991d).

A velocidade mais alta de endurecimento dos cimentos de alta resistência inicial é conseguida por um teor mais elevado de  $C_3S$  e pela moagem do clínquer em maiores finuras. Esse aumento rápido de resistência significa também um grande despreendimento de calor de hidratação (NEVILLE, 1982).

O uso do cimento Portland de Alta Resistência Inicial é indicado quando se necessita de um aumento rápido da resistência, por exemplo, para aceleração de retirada de fôrmas. Por essa razão, o cimento CP V ARI é muito utilizado pela indústria de pré-moldados visando alcançar aumento de produtividade.

## 2.5 – Hidratação do Cimento Portland – Aspectos Gerais

Quando se adiciona água ao cimento Portland, iniciam-se diversas reações químicas. O resultado final dessas reações é a pasta de cimento endurecida. Os detalhes que ocorrem ao longo desse processo químico dependem da composição do cimento Portland (MIER, 1997).

A hidratação dos diferentes compostos do cimento Portland ocorre de forma simultânea, formando produtos de propriedades diferentes e com velocidade de reação variada (SCRIVENER, 1989). O mecanismo de hidratação do cimento Portland desenvolve-se em duas etapas, por dissolução-precipitação e topoquímico.

As reações de hidratação do cimento são muito complexas. Devido a essa complexidade, os estudos para elucidar todos os parâmetros que envolvem as reações de hidratação são realizados em suas fases isoladamente. Entretanto, salienta-se que o estudo das fases isoladas não é totalmente válido, pois os compostos interagem entre si durante o processo de hidratação, mas mesmo assim os resultados são próximos da realidade (MINDESS & YOUNG, 1981).

Portanto, sendo resultados próximos da realidade e para conhecer os princípios básicos que regem as reações de hidratação, será visto em seguida o estudo de cada fase isoladamente.

Conforme relatado anteriormente, o clínquer do cimento Portland é formado pela mistura íntima da fase silicato, que é formada pelo silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e silicato dicálcico ( $C_2S$ ), e da fase intersticial, que é formada pela fase aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e fase ferrita ( $C_4AF$ ).

A maior parte do cimento Portland reage com a água nos primeiros dias; entretanto, as velocidades dessas reações, para cada composto do clínquer, são diferentes. Suas reatividades estão, aproximadamente, na seguinte ordem:  $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$  (MINDESS & YOUNG, 1981; JAWED et al., 1983).

Deve-se lembrar que duas preparações desses materiais não se hidratarão exatamente na mesma relação, pois suas reatividades serão afetadas por diferenças na finura e na relação de calcinação do clínquer, bem como a presença de impurezas que estão contidas no clínquer



A seqüência dessas reações pode ser descrita tomando-se como referência as curvas calorimétricas, as quais indicam a taxa de desenvolvimento de calor ao longo do tempo.

A Figura 2.1 apresenta a curva calorimétrica da hidratação do  $C_3S$ . De acordo com o que é mostrado nessa figura, o estudo das reações de hidratação do  $C_3S$  por calorimetria divide-se em 5 estágios, sendo esses estágios resumidamente descrito nas Tabelas 2.7 e 2.8 (JAWED *et al.*, 1983).

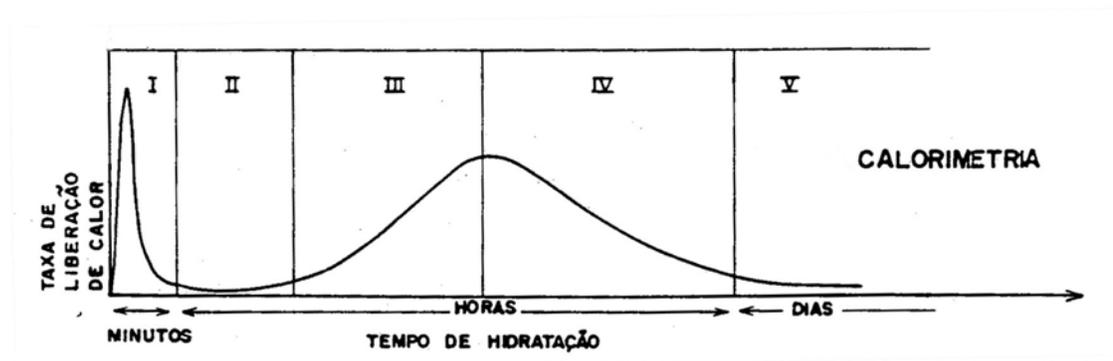


Figura 2.1 – Representação esquemática das mudanças que ocorrem no sistema  $C_3S$  – água.

Tabela 2.7 – Sequência da hidratação do  $C_3S$  (MINDESS & YOUNG, 1981; JAWED *et al.*, 1983).

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

A reação de hidratação do  $C_2S$  gera os mesmos produtos de hidratação do que aqueles obtidos na reação de hidratação do  $C_3S$ , porém a velocidade das reações e a formação da microestrutura desenvolvem-se a uma velocidade cerca de 20 vezes menor. O estudo desta reação mostra-se mais difícil por meio da avaliação da evolução do calor, pois esse calor é muito baixo (JAWED *et al.*, 1983).

Entretanto, o primeiro pico tem magnitude semelhante ao do  $C_3S$ . Imediatamente após o contato com a água (15 segundos), observa-se a formação de uma camada rica em sílica e a precipitação muito lenta do C-S-H. Não se observa supersaturação de CH (seu crescimento para

formação de cristais grandes é muito lento) e o segundo pico é muito fraco, difícil de ser medido (JAWED *et al.*, 1983).

Tabela 2.8 - Reações de hidratação do  $C_3S$  (JAWED *et al.*, 1983).

<b>Estágios</b>	<b>Ocorrência</b>
Primeiro Estágio <i>(Período de Reação Inicial)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>C_3S</math> reage imediatamente após o contato com a água.</li> <li>- Reação rápida liberando grande quantidade de calor que vai diminuindo, à medida que o C-S-H (metaestável) precipita.</li> <li>- Ao redor do grão de <math>C_3S</math>, forma-se uma camada de produto hidratado impermeável diminuindo a velocidade de reação.</li> </ul>
Segundo Estágio <i>(Período de Indução)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidade da reação diminui e a liberação de calor também é baixa.</li> <li>- O C-S-H precipitado inicialmente atua na cinética da reação da hidratação, limitando mas não impedindo totalmente a sua continuidade.</li> <li>- No final do período de indução, inicia-se a cristalização do CH formando um novo produto hidratado, o C-S-H (estável).</li> <li>- O final desse estágio é caracterizado por um rápido aumento da velocidade de hidratação e tem-se o início da pega.</li> </ul>
Terceiro Estágio <i>(Período de Aceleração)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caracterizado pela rápida formação de hidróxido de cálcio e de C-S-H.</li> <li>- Diminuição da concentração dos íons <math>Ca^{2+}</math> na mistura.</li> <li>- Aumento da temperatura devido ao crescimento dos cristais de CH e a dissolução do <math>C_3S</math>.</li> <li>- No final desse estágio ocorre o fim de pega, iniciando a fase de endurecimento.</li> </ul>
Quarto Estágio <i>(Período de Desaceleração)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidade de reação diminui sensivelmente, caracterizada pela queda na taxa de desenvolvimento de calor, pois a camada de C-S-H (estável) impede a hidratação pelo mecanismo de dissolução e precipitação passando a ser por difusão iônica, através da camada de C-S-H (estável).</li> </ul>
Quinto Estágio <i>(Período de Reação Lenta e Contínua)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reação prossegue lentamente e em velocidade cada vez menor.</li> <li>- Pouco desenvolvimento de calor.</li> </ul>

### 2.5.2 – Hidratação da Fase Intersticial

A fase intersticial é constituída pelos aluminatos  $C_3A$  e ferroaluminatos de cálcio  $C_4AF$ , sendo o  $C_3A$  o mais reativo com a água, influenciando nas reações de hidratação (CAMARINI, 1995).

O comportamento da hidratação do  $C_3A$  depende de fatores, tais como temperatura, relação água/sólido, área específica do  $C_3A$ , processo de mistura, tamanho da amostra a ser hidratada e presença de aditivos e adições (CAMARINI, 1995).

Para o cimento Portland, o que importa é a hidratação do  $C_3A$  na presença de sulfato de cálcio (gipsita), adicionado para controlar o tempo de pega, pois sem a presença da gipsita a hidratação do  $C_3A$  seria instantânea (MINDESS & YOUNG, 1981; JAWED *et al.*, 1983).

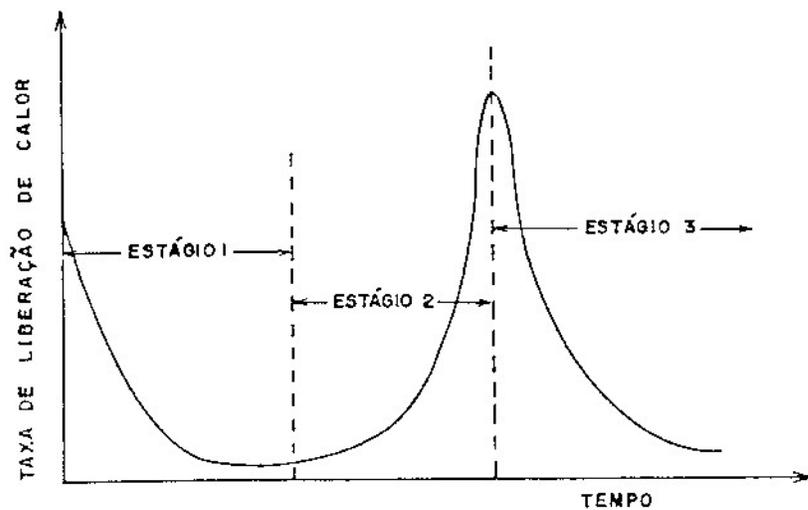


Figura 2.2 – Curva de hidratação do  $C_3A$  na presença de gipsita (JAWED *et al.*, 1983).

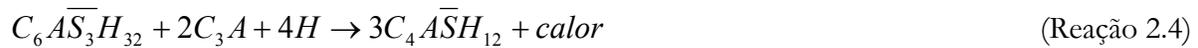
No  $C_3A$ , quando em contato com a gipsita, forma-se uma camada de etringita ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ) (1º estágio); durante a sua formação a velocidade de reação diminui gradualmente, indicando que os produtos formados na sua hidratação são mais permeáveis que os  $C_3S$  (POMMERSHEIM *et al.* 1988, *apud* CAMARINI, 1995; AITCIN, 2000).

De acordo com Jawed *et al.* (1983), a formação da etringita é dada pela reação 2.3.



Como a etringita é normalmente encontrada na superfície do  $C_3A$ , supõe-se que inicialmente, forma-se uma camada semipermeável de etringita na superfície dos grãos de  $C_3A$ , o que impede a difusão dos íons  $SiO_4^{2-}$ ,  $OH^-$  e  $Ca^{2+}$ , diminuindo a reação (2º estágio). Quando a

fase líquida do sistema hidratado torna-se deficiente de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SiO}_4^{2-}$  consumindo toda a gipsita, a camada de etringita se rompe (3º estágio) conforme a reação 2.4 (JAWED et *al.*, 1983).



A hidratação da fase ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) ocorre paralelamente à do  $\text{C}_3\text{A}$ , com formação de fases análogas à etringita ( $\text{AFt}$ ) e à fase monossulfoaluminato ( $\text{Afm}$ ). As reações são mais lentas do que as do  $\text{C}_3\text{A}$  e desenvolvem menos calor. O  $\text{C}_4\text{AF}$  nunca reage rapidamente e a gipsita retarda ainda mais sua hidratação. Na curva calorimétrica do  $\text{C}_4\text{AF}$  (Figura 2.3), observa-se que essa fase reage mais rápido, quando é colocada em contato com a água, porém na presença de sulfato de cálcio a reação torna-se mais lenta. A velocidade de reação torna-se ainda mais lenta, quando, ao sulfato, adiciona-se óxido de cálcio. Essa última condição é semelhante ao meio encontrado na hidratação do  $\text{C}_4\text{AF}$  no cimento Portland (JAWED et *al.*, 1983).

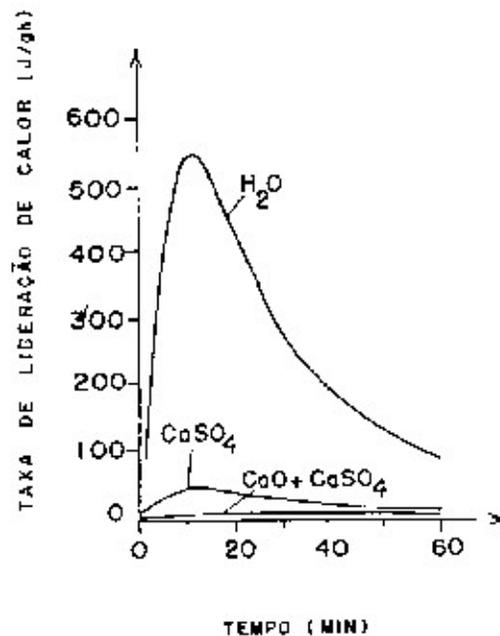


Figura 2.3 – Curva calorimétrica da hidratação do  $\text{C}_4\text{AF}$  em água, na presença de gipsita, e na presença de cal e gipsita (JAWED et *al.*, 1983).

## 2.6 – Hidratação do Cimento Portland – Comentários Finais

O processo de hidratação do cimento Portland é bastante complexo e ainda existem diversas questões a serem respondidas com relação a esse assunto, pois ainda não existe uma visão universalmente aceita sobre o processo de hidratação do cimento. Nesse capítulo foi apresentada uma “visão clássica” a respeito da hidratação do cimento Portland.

Diversas pesquisas a respeito do assunto tem sido realizadas desde o final do século 19, formulando-se teorias a respeito do mecanismo de hidratação do cimento. Com o passar do tempo e com a continuidade das pesquisas, algumas dessas teorias demonstraram não ser verdadeiras, outras, porém, demonstraram ser parcialmente válidas. Dessa forma atualmente novas pesquisas continuam a ser efetuadas todos os anos, com o objetivo de descobrir o mecanismo mais próximo possível do processo de hidratação do cimento Portland.

Le Chatelier foi o primeiro a notar, no final do século 19, que os produtos de hidratação do cimento são os mesmos da hidratação dos compostos individuais em condições similares. Isso foi confirmado, posteriormente, por Bogue e Lerch, com a ressalva de que os produtos de reação podem interagir, entre si, ou com outros compostos do sistema (NEVILLE, 1982).

Em pesquisa realizada por Scrivener (1989), englobando o estudo da hidratação do cimento através da observação simultânea das fases de hidratação ocorridas no cimento, verificou-se que a hidratação do cimento Portland é caracterizada por três fases distintas, que são:

- Fase Inicial, que ocorre nas primeiras 3 horas a partir da mistura do cimento com a água;
- Fase Intermediária, que compreende o período entre 3 e 20-30 horas e;
- Fase Final, que ocorre após 20-30 horas a partir da mistura do cimento com a água.

Essas fases, ocorrem de maneira similar àquelas que caracterizam a hidratação do  $C_3S$ . No entanto, o que caracteriza cada uma das fases não é o período em que elas ocorrem, mas sim as diferentes reações químicas inerentes a cada uma delas. Ressalta-se que o modelo de Scrivener é considerado até o momento, o mais fiel para a descrição do mecanismo de hidratação do cimento Portland.

Chappuis (1999) propôs um novo modelo para melhor compreensão da coesão do cimento Portland. O autor propôs uma nova descrição da estrutura interna do gel de C-S-H

(partículas muito pequenas de silicato de cálcio hidratado associado com quantidade variável de água), as partículas de C-S-H, as quais se repelem umas as outras em pequenas distâncias, não tem contato entre si, elas são arranjadas em camadas paralelas, com um fino filme de líquido separando as camadas, então formando grandes dimensões de lâmina. Tais lâminas têm parcialmente ou completamente preenchidos os espaços entre os outros produtos de hidratação por pasta de cimento diluída ou densificada. Durante a secagem, o filme líquido entre as partículas de C-S-H torna-se cada vez mais fino, e isso resulta em contínuas mudanças da porosidade interna da pasta de cimento hidratado. O líquido entre as partículas de C-S-H é constituído por água contendo íons dissolvidos.

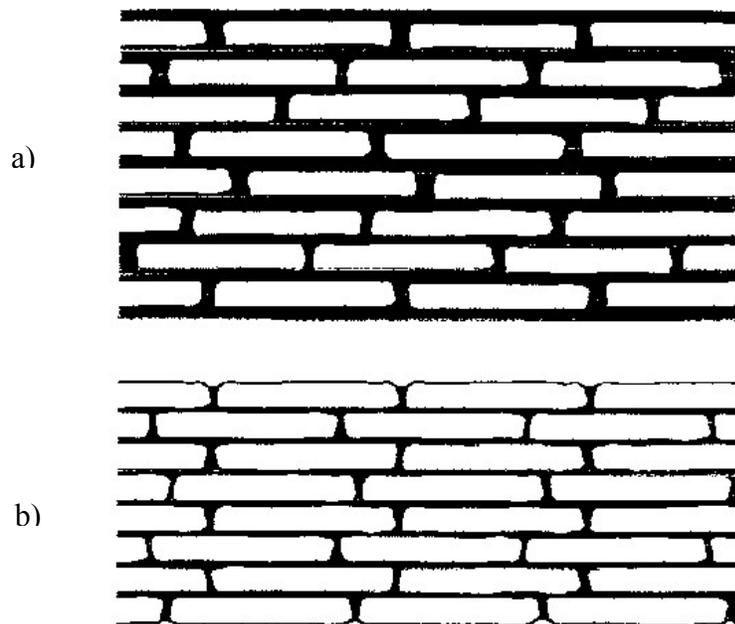


Figura 2.4 - Modelo proposto por Chappuis. a) pasta de cimento no estado plástico. b) pasta de cimento no estado endurecido (CHAPPUIS, 1999).

Diversos outros pesquisadores têm realizado pesquisas a respeito do comportamento da hidratação do cimento ao qual foi feita adição de uma ou mais substância mineral (misturas binárias ou ternárias), visando-se melhorar os desempenhos de argamassas e concretos (SCHIESSI, 1996; MARTYS & FERRARIS, 1997; ALDEA *et al.*, 2000; BASHEER *et al.*, 2001).

## ADIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND: ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E SÍLICA ATIVA

A crescente degradação do meio ambiente e a preocupação das indústrias em atender às novas legislações, que as responsabilizam por essa degradação ambiental provocada pelos seus resíduos de produção, fazem com que esses resíduos industriais sejam utilizados cada vez mais em substituição de parte do cimento (escória granulada de alto-forno, cinza pozolânica e sílica ativa). Isso ocorre, pois além de favorecer a economia dos recursos naturais, pode reduzir os danos à natureza causados pela disposição desses resíduos ao ar livre e contribuir também para a diminuição dos percentuais de CO<sub>2</sub> adicionados à atmosfera durante a fabricação do cimento Portland (BOURGUIGHON *et al.*, 2004).

O emprego de adições minerais ao cimento Portland (em adição ou substituição) produz argamassas e concretos com resistência mais elevada ao longo do tempo, aumentando a durabilidade do concreto quanto à penetração de líquidos, gases e íons, quando comparados aos concretos produzidos somente com cimento Portland comum. Neste capítulo serão discutidas as propriedades e os efeitos da adição de escória granulada de alto-forno e de sílica ativa ao cimento Portland.

### 3.1 – Escória Granulada de Alto-Forno

A escória granulada de alto-forno, ou simplesmente escória, utilizada como adição ao cimento Portland, é um produto derivado da fabricação de ferro gusa nas indústrias siderúrgicas. A quantidade de escória produzida pelas siderúrgicas corresponde a 330 kg de escória para cada tonelada de aço produzido (JOHN, 1995; JOHN & TINKER, 1998 *apud* SILVA, 1998).

A escória de alto-forno é utilizada de maneira intensa em várias regiões da Europa e dos Estados Unidos, quer seja na forma de adição aos cimentos ou de adição mineral na produção de concretos (ACI, 1987 *apud* SILVA, 1998).

O interesse por alternativas de reciclagem da escória vem crescendo nos últimos anos por fatores de ordem econômica e também pressionado por questões relacionadas com o controle e qualidade ambiental. A diminuição do consumo energético específico durante a fabricação do cimento, o seu baixo custo por se tratar de subproduto industrial, e algumas propriedades que repercutem positivamente na durabilidade das obras de concreto explicam o grande interesse despertado pela indústria cimenteira nesses materiais.

### **3.1.1 – Escória de Alto-Forno - Um Pouco de História**

O emprego da escória como material aglomerante vem de longa data. Existem relatos da capacidade aglomerante da escória granulada de alto-forno antes do registro da patente do cimento Portland em 1824; no entanto, foi somente em 1862 ou 1863 que na Alemanha iniciou-se a produção de cimentos de escória pela primeira vez, adicionando-se cal hidratada à escória granulada. O primeiro registro da capacidade aglomerante da escória é de 1865, na Alemanha, onde operavam fábricas de blocos de alvenaria, confeccionados com escória granulada moída e cal hidratada (KERSTEN, 1921 *apud* JOHN, 1995; FORSÉN, 1921, *apud* SILVA, 1998). Entretanto, o primeiro registro oficial de produção de cimento Portland com escória de alto-forno surgiu na Alemanha em 1882, com utilização de clínquer e escória moídos conjuntamente. Em 1909, o governo alemão oficializou o uso de até 30% de escória no cimento. Essa quantidade foi aumentada para até 70% em 1917 (PAPADAKIS & VENUAT, 1968 *apud* BATTAGIN & ESPER, 1988).

No Brasil, a fabricação do cimento Portland de alto-forno é mais recente, iniciada somente em 1952 pela fábrica de Cimento Tupi S.A., em Volta Redonda, no estado do Rio de Janeiro (BATTAGIN & ESPER, 1988).

### **3.1.2 – Produção da Escória de Alto-Forno**

No final do processo de produção do ferro gusa, a escória líquida é granulada por meio de resfriamento brusco por jatos de água. Esse resfriamento brusco produz um material vítreo

necessário para proporcionar as propriedades hidráulicas desejadas (CAMARINI, 1995). A hidratação da escória é função dessa fase vítrea, sendo que teores elevados favorecem a sua hidratação (SILVA, 1998). A escória granulada e vítrea, obtida pelo processo de redução rápida da temperatura na saída do alto-forno da siderúrgica, chamado de granulação, reduz a escória a grãos similares aos da areia natural (SCANDIUZZI & BATTAGIN, 1990; JOHN, 1995). A escória resfriada lentamente é cristalina e não apresenta propriedades aglomerantes (SMOLCZYK, 1980 *apud* JOHN, 1995; SILVA, 1998).

O teor da fase vítrea é tão importante para o poder hidráulico da escória que mesmo escórias que não apresentem índice de hidraulicidade adequado, mas com elevados teores de fase vítrea, podem proporcionar bons resultados. (BROOKS & AL-KAISI, 1990 *apud* CAMARINI, 1995). Assim, escórias com composições químicas semelhantes manifestam atividades hidráulicas diferentes (SMOLCZYK, 1980 *apud* CAMARINI, 1995).

### **3.1.3 – Matérias-Primas para a Obtenção da Escória de Alto-forno**

A escória de alto-forno é o subproduto da fabricação do ferro gusa nos altos-fornos, obtida sob forma granular e constituída de um vidro contendo principalmente cal ( $\text{CaO}$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ou seja, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, mas em proporções diferentes. Pode-se dizer que uma escória é considerada satisfatória se for constituída por 42% de cal, 30% de sílica, 19% de alumina, 5% de magnésio e 1% de álcalis (NEVILLE, 1982). Ela é o resultado da combinação dos minerais da ganga do minério de ferro, das cinzas do coque e da cal utilizada como fundente. Além da cal, sílica e alumina, ocorrem, secundariamente, sulfatos de cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês. A presença de magnésio está condicionada à utilização de cal dolomítica ou calcário magnesiano como fundente (SCANDIUZZI & BATTAGIN, 1990).

### **3.1.4 – Composição Química da Escória de Alto-Forno**

A composição química das escórias, determinada pela composição dos minérios, fundentes e impurezas presentes na carga do alto-forno também deverá ser adequada para que tenha atividade hidráulica compatível e seja utilizada como adição ao cimento Portland (CAMARINI, 1995).

A composição química da escória está ligada à eficiência de operação do forno, dessa forma, está relacionada com a homogeneidade da escória líquida. A sua elevada capacidade de dessulfuração e baixa viscosidade podem ser afetadas pelo teor de alumina (nas escórias brasileiras o teor de alumina varia entre 11% e 18%) e pelo valor da relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , pois, quando o valor dessa relação é maior do que 1,4 a composição da escória é mais refratária (as escórias brasileiras têm relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  na faixa de 1,14 a 1,33). Além disso, o teor de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) afetam a viscosidade da escória. Quanto maior o teor de alumina maior será a viscosidade da escória. Entretanto, esse valor deverá estar contido na faixa de 20% a 25%, valores superiores irão gerar dificuldades na operação do alto-forno (CINCOTTO et al., 1992). A Tabela 3.1 apresenta a composição das escórias de alto-forno brasileiras e a composição média do clínquer de cimento Portland.

Tabela 3.1 – Composição das Escórias de Alto-Forno Brasileiras (CINCOTTO et al., 1992) e do Clínquer de Cimento Portland (MINDESS & YOUNG, 1981).

Constituintes	Composição das	Composição do Clínquer
	Escórias Nacionais (%)	(%)
$\text{SiO}_2$	30,0 – 35,0	16,0 – 26,0
$\text{CaO}$	40,0 – 45,0	59,0 – 67,0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11,0 – 18,0	4,0 – 8,0
$\text{MgO}$	2,5 – 9,0	0,8 – 6,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,0 – 2,0	2,0 – 5,0
$\text{FeO}$	0,0 – 2,0	-
$\text{SO}_3$	0,5 – 1,5	0,5 – 1,2

A reatividade da escória granulada de alto-forno é função do processo de produção, da composição química e das características da partícula (SILVA, 1998). Em condições normais, o grau de hidratação da escória de alto-forno é muito baixo, cerca de 8 a 9 vezes menor do que o grau de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  do cimento Portland (MIRONOV, 1980 *apud* CAMARINI, 1995).

A reatividade está associada à sua obtenção no estado vítreo. Entretanto, somente esta condição não é suficiente, pois é necessário que a escória seja solúvel em água para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados. Esta solubilidade é favorecida pelo teor de óxido de cálcio presente na escória ( $\text{CaO}$ ). Dessa forma, a reação é lenta, mas em

meio fortemente alcalino ou através da ação de sulfatos, ou de ambos, a reação se acelera, sendo a velocidade de reação ainda favorecida pela finura da escória. As escórias nacionais apresentam, em média, um teor de fase vítrea de 95%, sendo a porcentagem restante constituída de fase cristalina (CINCOTTO *et al.*, 1992).

A hidraulicidade é a propriedade fundamental que se deseja obter para as escórias, essa hidraulicidade é determinada pela quantidade e propriedades da fase vítrea da escória, bem como da sua composição química (CINCOTTO *et al.*, 1992; FU *et al.*, 2000).

### **3.1.5 – Hidratação da Escória de Alto-Forno**

Embora apresente mecanismo de hidratação semelhante ao do cimento Portland, a escória se hidrata muito lentamente quando em contato com a água. A lentidão desta reação pode ser superada por ativação química (mantendo-se o meio com pH elevado), por ativação mecânica (aumentando sua finura) ou por ativação térmica (elevando a temperatura de cura). O clínquer Portland atua como ativador químico (CAMARINI, 1995; SILVA, 1998).

Como em todas as reações químicas, a temperatura tem um efeito acelerador sobre as reações de hidratação (MEHTA & MONTEIRO, 1994). A cura térmica acelera expressivamente o grau de hidratação da escória (BATTAGIN, 1992; CAMARINI, 1995; SILVA, 1998).

Observa-se que para qualquer tipo de ativador ocorre a formação de C-S-H. Esse composto, produzido pela hidratação da escória, é muito importante, pois preenche os espaços, aglutina outras fases cristalinas e adere a escória ao agregado (GLASSER, 1991).

Esse C-S-H é o principal produto de hidratação formado quando a escória granulada de alto-forno é misturada com o cimento Portland e água, sendo similar ao produzido pela hidratação do silicato de cálcio do cimento Portland (MENÉNDEZ *et al.*, 2003).

As reações de hidratação da escória acontecem de acordo com o mecanismo de hidratação do cimento, ocorrendo às reações iniciais por dissolução-precipitação (fase líquida), seguida por difusão iônica (precipitação dos compostos hidratados) (CAMARINI, 1995; SILVA, 1998).

### **3.1.6 – Hidratação do Cimento Portland de Alto-Forno**

A escória granulada de alto-forno quando adicionada ao clínquer de cimento Portland gera o cimento Portland de alto-forno. A quantidade de escória adicionada na moagem do clínquer é

muito variável e depende do tipo de cimento a ser produzido. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece dois tipos de cimento que utilizam a escória como adição mineral:

- cimento Portland composto (CP II E) – a quantidade de escória varia de 6% a 34% - NBR 11578 (ABNT, 1991b).
- cimento Portland de alto-forno (CP III) – a quantidade de escória varia de 35% a 70% - NBR 5735 (ABNT, 1991c).

O cimento Portland de alto-forno (CP III), que foi o objeto de estudo neste trabalho, apresenta um comportamento diferente do cimento Portland comum. As propriedades dos concretos e argamassas obtidos com o cimento Portland de alto-forno, se comparadas com aquelas obtidas com o cimento Portland comum, apresentam diferenças quanto aos aspectos da durabilidade, pois o CP III minimiza a reação expansiva álcali-agregado, diminui a permeabilidade, diminui o calor de hidratação, diminui a retração, aumenta a resistência ao ataque por sulfatos e aumenta a resistência mecânica à compressão em idades mais avançadas. Por outro lado, a reação de hidratação dos cimentos com escória é inicialmente mais lenta do que a do cimento Portland comum. Devido a esse fato, o cimento Portland contendo escória granulada de alto-forno apresenta resultados mais baixos de resistência nas idades iniciais (MENÉNDEZ *et al.*, 2003).

Essa hidratação mais lenta ocorre devido à hidratação da escória ser mais lenta do que a hidratação do clínquer. Em idades mais avançadas o gel de C-S-H e sulfoaluminato estável hidrata a etringita e forma uma quantidade maior de produtos de hidratação (KONSTA-GDOUTOS & SHAH, 2003). Isso gera a melhora das propriedades de durabilidade pois em idades mais avançadas com a formação desse gel de C-S-H (gerado pela hidratação da escória), quando ocorre um aumento na resistência mecânica dos concretos, também ocorre aumento da compacidade, já que esse gel se constitui em um material de enchimento. Dessa forma ocorre uma diminuição da permeabilidade (pastas de cimento Portland de alto-forno são de 10 a 100 vezes menos permeáveis do que pastas de cimento Portland comum) (BATTAGIN & ESPER, 1988).

Da mesma forma, por apresentar uma hidratação mais lenta, o calor de hidratação gerado pela escória é pequeno, ocorrendo um desenvolvimento mais lento em relação ao dos compostos potenciais presentes no cimento. Assim, a adição da escória no cimento causa um decréscimo do calor de hidratação. A alta resistência aos sulfatos, apresentada pelos cimentos de alto-forno, ocorre, pois esse tipo de cimento apresenta baixo teor de  $C_3A$  e pequena liberação de  $Ca(OH)_2$  durante a hidratação, componentes esses imprescindíveis para reagir com os sulfatos para formar a etringita expansiva.

Quando o cimento Portland de alto-forno entra em contato com a água ocorre a formação de gel de C-S-H e etringita devido à hidratação do clínquer com liberação de  $\text{Ca(OH)}_2$  (sulfato combina-se rapidamente com o  $\text{C}_3\text{A}$ ). Esse  $\text{Ca(OH)}_2$  ativa a hidratação da escória formando novos produtos de hidratação; o sódio dissolve-se imediatamente e aumenta a quantidade de álcalis na solução, e isso faz com que a fase vítrea se dissolva mais rápido e aumente os produtos da hidratação inicial, pois o clínquer é um ativador da escória (FU et al., 2000).

No cimento Portland de alto-forno, as substâncias que atuam como ativadores químicos são: o sulfato de cálcio (retardador de pega –  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e a cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) que é liberada pela hidratação dos silicatos do clínquer ( $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ ).

Como em todo tipo de cimento, a variação da composição química durante a fabricação e a diferença da matéria prima resulta em diferentes produtos de hidratação. (KONSTA-GDOUTOS & SHAH, 2003).

O efeito de dupla ativação na escória é melhor do que um único ativador, pois um ativador complementa o outro (FU et al., 2000). Dessa forma o cimento Portland de alto-forno, quando submetido à cura térmica, terá um desenvolvimento mais rápido na hidratação inicial, pois a reatividade da escória aumenta com o aumento da temperatura de cura (KONSTA-GDOUTOS & SHAH, 2003).

### 3.2 – Sílica Ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício ou de ligas de ferro-silício. É constituída de partículas muito finas; é um tipo de gás transformado em pó pela oxidação com o ar e tem uma alta superfície específica (15.000  $\text{m}^2/\text{kg}$  a 25.000  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) (SIMPLÍCIO, 1999; AITCIN, 2000).

As partículas de sílica ativa parecem perfeitamente esféricas (Figura 3.1), com diâmetros variando de menos de 0,1  $\mu\text{m}$  até 1  $\mu\text{m}$  ou 2  $\mu\text{m}$ , de tal forma que a esfera média de sílica ativa é 100 vezes menor do que a média das partículas de cimento (AITCIN, 2000).

Os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto são devidos não apenas à rápida reação pozolânica, mas também ao efeito físico das partículas, conhecido como “efeito filer” (efeito de preenchimento de vazios entre as partículas de

cimento) (Figura 3.2) (SELLEVOLD, 1987; ROSENBERG & GAIDIS, 1989; KHAYAT, 1996 *apud* AITCIN, 2000).

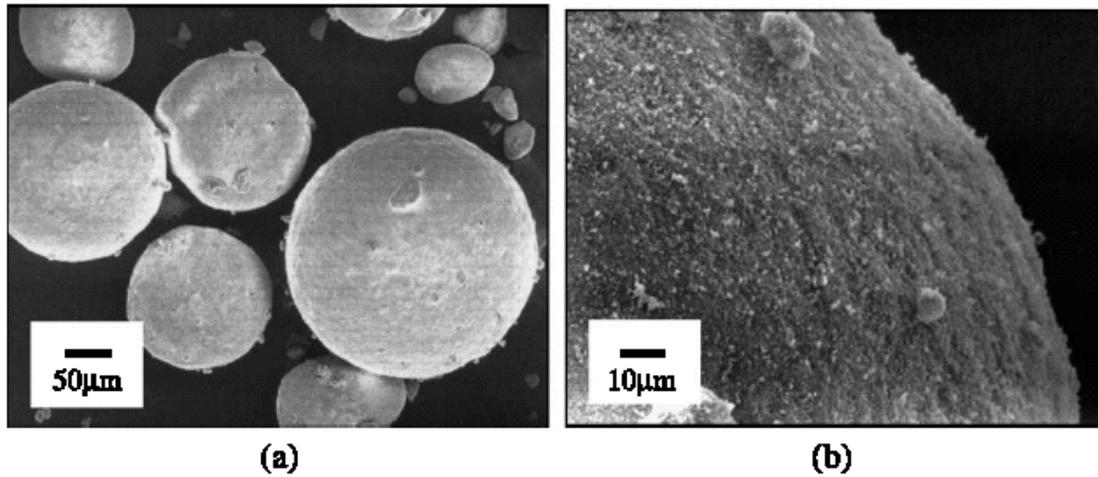


Figura 3.1 – Partícula de sílica ativa visualizada por meio de microscópio eletrônico de varredura. (a) Dimensão e tamanho da sílica ativa. (b) Aglomeração de sílica ativa (YAJUN & CAHYADI, 2003).

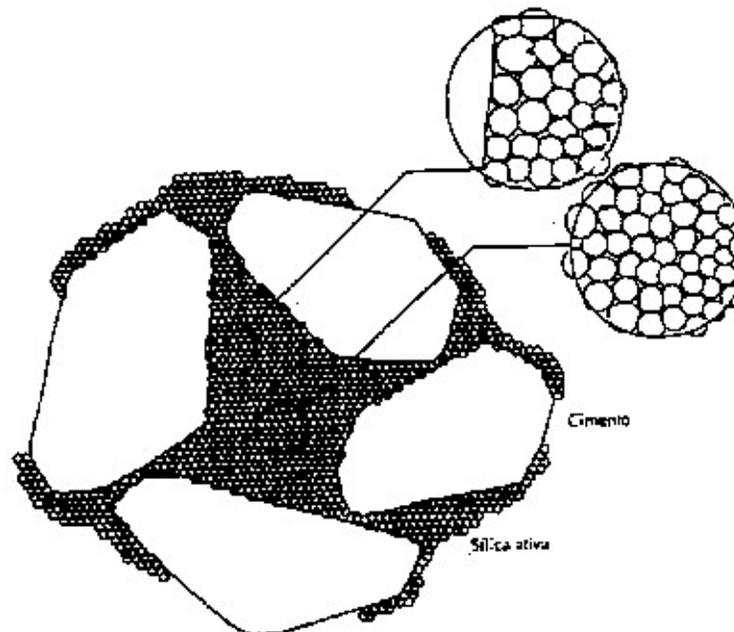


Figura 3.2 – Efeito filer da sílica ativa (BACHE, 1981 *apud* AITCIN, 2000)

Pelo efeito fíler a sílica ativa produz um melhor empacotamento e preenchimento dos vazios da matriz e na interface cimento-agregado, proporcionando uma maior compacidade localizada, gerando uma ligação mais eficiente entre a pasta e o agregado (DA SILVA, 1995).

Com o uso da sílica ativa o concreto passa a ter maior resistência à compressão, menor porosidade, maior resistência à abrasão e à corrosão química, maior adesão a outras superfícies de concreto e melhor aderência com o aço, dentre outras vantagens (SIMPLÍCIO, 1999).

Os tempos de início e fim de pega de concretos com sílica ativa não são alterados; entretanto, devido à superfície específica da sílica ativa ser elevada, torna-se necessário utilizar maiores dosagens de aditivos plastificantes e ou superplastificantes nesses concretos. Dependendo do tipo e dosagem do aditivo utilizado, o efeito do aditivo pode gerar alguma alteração no tempo de pega do concreto (DA SILVA, 1995).

### **3.2.1 – Sílica Ativa – Um Pouco de História**

Os estudos com sílica ativa foram iniciados na Noruega no início dos anos 1950, verificando-se, pela primeira vez no mundo, o comportamento de misturas minerais no concreto (AITCIN, 2000).

Os primeiros estudos de utilização de sílica ativa tiveram motivação na busca por soluções para a poluição que os rejeitos industriais causavam ao meio ambiente e nos controles de poluição ambiental (DA SILVA, 1995).

Em meados dos anos 1970, o uso da sílica ativa começou tanto em aplicações práticas como em estudos realizados em laboratório em diversos países escandinavos (Noruega, Suécia, Dinamarca e Islândia). Desde então, o uso de sílica ativa em trabalhos práticos e trabalhos de pesquisa se desenvolveram em muitos outros países do mundo (AITCIN, 2000).

Na América do Norte, a sílica ativa vem sendo utilizada há mais de vinte anos pelas indústrias de cimento e produtores de concreto. No final dos anos 1980, observou-se um crescimento da utilização da sílica ativa em concreto de alta resistência utilizado na construção de edifícios de grande altura (DA SILVA, 1995).

Uma diferença do desenvolvimento da sílica ativa entre Estados Unidos e alguns outros países, tais como, Canadá, França e Islândia, está no método da adição da sílica. No Canadá, França e Islândia, a adição da sílica ativa é no cimento, existindo vários cimentos compostos. Nos

Estados Unidos a adição da sílica ativa é efetuada durante a produção do concreto (DA SILVA, 1995; AITCIN, 2000).

No Brasil, a utilização de sílica ativa tem se tornado mais freqüente desde o início da década de 1990 com a produção de concretos de alto desempenho (CAD) (TÉCHNE, 2002). Desde o ano de 1989 as indústrias brasileiras produtoras de ferro ligas começaram a coletar a sílica ativa por motivos ambientais (DA SILVA, 1995). Dessa forma o custo de obtenção da sílica ativa tornou-se viável para a utilização na produção de concretos pois até então a sílica ativa disponível era a importada, o que acarretava um elevado custo econômico para a produção de concretos.

### **3.2.2 – Matéria-Prima e Produção da Sílica Ativa**

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício metálico ou de ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão, em forno elétrico de eletrodos de arco submerso. A sílica ativa resulta também da fabricação de liga à base de cromo-silício, manganês-silício, magnésio-silício, cálcio-silício, que são metais não ferrosos, porém originados em maiores quantidades a partir da produção de ferro-silício e silício. Esse subproduto é um dióxido de sílica amorfa ( $\text{SiO}_2$ ) que é gerado como um gás dentro dos fornos elétricos. Durante a redução da sílica, dentro do arco elétrico, o  $\text{SiO}_2$ , produzido escapa para a parte superior da carga; ele se resfria, condensa e oxida na forma de partículas finíssimas de sílica. Essas partículas são coletadas por um sistema de eliminação de pó (DA SILVA, 1995; AITCIN, 2000; YAJUN & CAHYADI, 2003).

Freqüentemente a sílica ativa produzida por diferentes fornos, resulta em diferentes ligas, é coletada em uma única câmara de filtros; em tais casos, a sílica ativa coletada pode ser uma mistura de diferentes tipos, com diferentes composições químicas e propriedades pozolânicas (reage com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  do cimento Portland). É muito importante que a composição química de qualquer sílica ativa comercial seja verificada regularmente para assegurar um uso consistente do material (AITCIN, 2000).

A composição química da sílica ativa varia em função do tipo de fabricação (produção de silício ou ferro-silício), da origem do material e do método de operação da fabricação. Apesar da sílica ativa apresentar propriedades hidráulicas muito mais intensas do que a escória de alto-forno, ela pode apresentar variações significativas na sua composição química (DA SILVA, 1995).

### 3.2.3 – Composição Química da Sílica Ativa

Geralmente as partículas de sílica ativa possuem elevados teores de sílica amorfa na presença de pequenas quantidades de alumina, ferro, cálcio, álcalis, carbono, entre outros. Em média, pode-se considerar que o teor de  $\text{SiO}_2$  varia de 85% a 98% (YAJUN & CAHYADI, 2003).

A sílica ativa é composta principalmente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ). O teor de  $\text{SiO}_2$  da sílica ativa varia, dependendo do tipo de liga produzida. Quanto maior for o teor de silício da liga, maior será o teor de  $\text{SiO}_2$  da sílica ativa. A sílica ativa produzida durante a fabricação do silício metálico geralmente contém mais de 90% de  $\text{SiO}_2$  e aquela produzida durante a fabricação de uma liga de 75% de Fe-Si tem teor de  $\text{SiO}_2$  superior a 85%, conforma mostra a Tabela 3.2 (AITCIN,2000).

Tabela 3.2 – Composição química típica de algumas sílicas ativas (AITCIN, 2000).

Constituintes Químicos	Silício Cinza (%)	Ferro-Silício Cinza (%)	Ferro-Silício Branco (%)
$\text{SiO}_2$	93,7	87,3	90,0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,6	1,0	1,0
$\text{CaO}$	0,2	0,4	0,1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,3	4,4	2,9
$\text{MgO}$	0,2	0,3	0,2
$\text{Na}_2\text{O}$	0,2	0,2	0,9
$\text{K}_2\text{O}$	0,5	0,6	1,3
Perda ao fogo	2,9	0,6	1,2

### 3.2.4 – Hidratação da Sílica Ativa

A sílica ativa atua no concreto como um material pozolânico de alta reatividade, sendo capaz de combinar-se rapidamente com o  $\text{Ca(OH)}_2$  para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, que é o principal produto responsável pela resistência de pastas de cimento Portland (SIMPLICIO, 1999; COLAK, 2003; RAO, 2003). Durante as primeiras horas da hidratação do cimento, a sílica ativa aumenta as propriedades de hidratação devido à liberação de íons  $\text{OH}^-$  e alcális no fluido dos poros (RAO, 2003).

A sílica ativa influencia a hidratação inicial do cimento, acelerando a hidratação do silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e do aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), que são os compostos que atuam nos estágios

iniciais da hidratação do cimento. Isso permite uma melhor nucleação dos produtos de hidratação, tais como, CaO, C-S-H e etringita (PINTO & HOVER, 1999; COLAK, 2003; RAO, 2003). Durante a hidratação do cimento, a sílica ativa aumenta a geração de calor. O calor total gerado é função da quantidade de sílica ativa utilizada. O calor gerado com adições médias é maior do que nenhuma adição ou quantidades altas de adição de sílica (PINTO & HOVER, 1999).

As reações da sílica ativa com o CH em soluções aquosas começam tão logo a sílica ativa entra em contato com a água. Parte da sílica passa por uma rápida dissolução após 5 a 15 minutos de mistura. A sílica em solução tende a formar um “gel amorfo”, o qual forma camadas sobre a superfície das partículas de sílica ativa. Ao mesmo tempo, as partículas de sílica ativa se aglomeram formando agrupamentos de partículas; entretanto, com o passar do tempo (após 1 hora) as camadas de “gel amorfo” começam a se dissolver e os agrupamentos de sílica ativa começam a reagir com o CH para formar C-S-H (COHEN & KLITSIKAS, 1986).

A reação pozolânica da sílica ativa com CH é acompanhada pela transformação de poros grandes em poros menores. Isso leva à formação do C-S-H amorfo, o qual preenche os espaços vazios na matriz da pasta resultando em uma microestrutura mais densa e compacta (COHEN & KLITSIKAS, 1986; COLAK, 2003; RAO, 2003). Este processo causa aumento de resistência e reduz a permeabilidade em pastas, argamassas ou concretos contendo sílica ativa (DA SILVA, 1995; COLAK, 2003; ALMUSALLAM et al., 2004; RAO, 2003). A sílica ativa também tende a afetar o modelo de cristalização e grau de orientação dos cristais de CH na superfície dos agregados durante os primeiros dias da hidratação do cimento (RAO, 2003).

A reação pozolânica da sílica ativa depende muito da temperatura nas idades iniciais, mas não depende das temperaturas nas idades finais. O consumo de CH é muito acelerado com aumento da temperatura da reação (COHEN & KLITSIKAS, 1986). A porcentagem de CH consumida pela sílica representa um índice de atividade pozolânica da sílica ativa (RAO, 2003).

A sílica ativa reduz a espessura da zona de transição da pasta de cimento e agregado. Isso pode reduzir, e até mesmo eliminar, o grau de orientação dos cristais de CH na zona de transição, resultando em microfissuras menores na zona de transição. Conseqüentemente, a ligação da pasta de cimento e agregado é mais forte, alcançando melhores resistências e propriedades mecânicas (COHEN & KLITSIKAS, 1986; ISAIA et al., 2003; RAO, 2003).

A massa específica, o ar incorporado e a trabalhabilidade diminuem com o aumento da quantidade de sílica ativa adicionada em concretos e argamassas. O desenvolvimento da resistência em concretos é maior na faixa de utilização de 12% a 28% de sílica ativa em adição ao

cimento. A quantidade de ar incorporado ao concreto é devido ao efeito fíler (ou de preenchimento de vazios), o qual permite um aumento na resistência à compressão (RAO, 2003).

O efeito pozolânico na microestrutura da pasta depende não apenas da reação pozolânica mas também do efeito fíler devido às partículas mais finas. A ação física da pozolana acarreta uma pasta uniforme, mais densa e homogênea.

A substituição de 15% em peso de cimento por sílica ativa adiciona 2.000.000 de partículas para cada grão de cimento; dessa forma, as partículas de sílica ativa rodeiam cada grão de cimento, densificando a matriz, preenchendo os espaços vazios com produtos de hidratação estáveis, e melhorando a aderência com os agregados (ISAIA et *al.*, 2003).

# 4

## CONCRETO E PRÉ-MOLDADOS

O concreto é um dos materiais de construção civil mais utilizado em todas as regiões do mundo. Essa enorme aceitação do concreto como um dos mais nobres materiais de construção civil justifica-se pela sua versatilidade, durabilidade e resistência.

Com o desenvolvimento de novas técnicas e metodologias no sentido de se industrializar as construções, a indústria de estruturas pré-moldadas em concreto se destaca apresentando características específicas de fabricação.

A pré-moldagem é caracterizada como um processo de construção em que a obra, ou parte dela, é moldada fora de seu local de utilização definitivo. Seu campo de aplicação é bastante amplo, abrangendo praticamente toda a construção civil (EL DEBS, 2000).

De acordo com a NBR 9062 (ABNT, 1985), itens 3.5 e 3.6 a definição de pré-moldados e pré-fabricados se diferencia somente com relação ao processo de controle de qualidade, sendo rigoroso para pré-moldado e muito rigoroso para pré-fabricado. Nesse trabalho foi considerado o termo de pré-moldado se referindo tanto para estruturas pré-moldadas como para estruturas pré-fabricadas, pois o objetivo do estudo é o concreto utilizado na produção dessas estruturas.

### 4.1 – Um Pouco de História

#### 4.1.1 – Concreto

A evolução histórica da tecnologia de utilização do concreto como material de construção data desde 5600 anos a .C. Nesses milhares de anos o concreto vem participando da história da humanidade e através dos tempos vem evoluindo, contribuindo para o desenvolvimento das civilizações, sendo utilizado para os mais diversos tipos de construções (LEVY & HELENE, 2002).

O concreto mais antigo de que se tem conhecimento data de 5600 a. C., na ex Iugoslávia. Trata-se do piso de um casebre com 250 mm de espessura. Esse concreto era constituído de uma mistura de cal, argila e agregado. Em 2500 a. C. a primeira das pirâmides Egípcias na cidade de Gisé foi parcialmente construída em concreto (MINDESS & YOUNG, 1981; LEVY & HELENE, 2002).

Apesar dessas evidências, alguns arqueólogos acreditam que foram os egípcios os inventores do concreto, baseando-se no fato de ter sido utilizado concreto nas partes internas das pirâmides. Entretanto, outros pesquisadores acreditam que o concreto veio do Oriente Médio, ou dos Fenícios, ou ainda dos Gregos, todos antes dos Romanos (DUMET & PINHEIRO, 2000).

O fato é que foram muitas as civilizações que desenvolveram o concreto, destinando-o a aplicações diversas; mas é creditado aos romanos o desenvolvimento do uso do concreto em construções civis em grande escala e o uso de concreto em sistemas pluviais (sistemas de abastecimento de água, redes de esgotos e sistemas de drenagens) (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; SCHIESSI, 1996; LEVY & HELENE, 2002).

Portanto, mesmo não tendo sido os Romanos os inventores do concreto (como acreditam muitos pesquisadores), eles foram sem dúvida nenhuma os primeiros que o usaram de forma eficaz e em larga escala (MINDESS & YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; LEVY & HELENE, 2002; DUMET & PINHEIRO, 2000). Os Romanos também já usavam aditivos em suas misturas para melhorar a trabalhabilidade de seus concretos. Os materiais utilizados como aditivos eram tais como banha, leite e o sangue, que funcionam como um incorporador de ar devido à presença de hemoglobina que apresenta propriedade de dispersão. Com a queda do Império Romano e a chegada dos bárbaros o uso do concreto se perdeu até quase a metade do século XVIII (MINDESS & YOUNG, 1981; SCHIESSI, 1996; DUMET & PINHEIRO, 2000).

Depois da queda do Império Romano as construções de concreto na Europa tiveram um grande declínio. Somente por volta do ano 1200 d. C. os construtores reabilitaram o concreto como material de construção, utilizando-o em fundações e estruturas (LEVY & HELENE, 2002).

A partir da segunda metade do século XVIII, pesquisadores iniciaram diversas experiências com o intuito de fabricar um cimento que possibilitasse maior resistência e durabilidade ao concreto (KLEMM, 1989; SCHIESSI, 1996; LEVY & HELENE, 2002).

Em 1824, finalmente surge o cimento Portland. A partir do desenvolvimento do cimento Portland, foi possível utilizar o concreto com mais frequência (MINDESS & YOUNG, 1981;

NEVILLE, 1982; KLEMM, 1989; VASCONCELOS, 1992; LEVY & HELENE, 2002). Este fato teria sido o marco inicial para o desenvolvimento do concreto moderno.

Apesar da história do concreto ter começado bem antes, o seu surgimento oficial é datado de 1849, com o famoso barco de Lambot (na época chamado de cimento armado) (VASCONCELOS, 1992; DUMET & PINHEIRO, 2000). O concreto como é conhecido hoje, a junção do concreto com o aço, formando o concreto armado, foi uma conseqüência natural do desenvolvimento dos materiais de construção. Durante o século XX ocorreu um grande desenvolvimento do concreto armado, em seguida do concreto protendido e, posteriormente, dos concretos de alta resistência (CAR) e de alto desempenho (CAD) (VASCONCELOS, 1992; SCHIESSI, 1996; DUMET & PINHEIRO, 2000).

#### **4.1.2 – Pré-Moldados**

A evolução histórica da construção de pré-moldados ocorreu em épocas diferentes e de maneiras diferentes para cada país, porém, as primeiras grandes construções de elementos pré-moldados de concreto armado surgiram na Europa, e tanto os Estados Unidos (EUA), o Canadá e o Brasil foram influenciados pela cultura européia de pré-moldagem (OLIVEIRA, 2002).

Somente com o fim da Segunda Guerra Mundial, em função da necessidade de se construir em grande escala, principalmente na Europa, é que começou a se difundir, de maneira mais intensiva, a construção em concreto pré-moldado. Atualmente, na Europa, a construção com elementos pré-moldados é normatizada pelo BSI (*British Standards Institution*) e pelo CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*) (OLIVEIRA, 2002).

Os EUA e Canadá basearam suas pesquisas e desenvolvimento de processos construtivos com elementos pré-moldados em experiências das construções européias do pós-guerra. Dessa forma, a construção utilizando elementos pré-moldados de concreto para edifícios de múltiplos pavimentos só se tornou viável após 1960 (OLIVEIRA, 2002).

O desenvolvimento do concreto pré-moldado acompanhou o desenvolvimento do concreto armado e protendido, principalmente na construção de galpões. No Brasil, pelo que se tem notícia, o emprego do concreto pré-moldado teve início em 1925 (EL DEBS, 2000).

No Brasil não existiu uma crise de falta de edificações em grande escala, como houve na Europa do pós-guerra. Entretanto, a preocupação com a racionalização e a industrialização de processos construtivos apareceu no final da década de 1950. Mas, devido à tentativa de privilegiar

a geração de empregos, o órgão público responsável pelo impulsionamento do setor da construção civil no Brasil, o Banco Nacional da Habitação (BNH), adotou uma política de desestímulo a pré-moldagem no setor habitacional (OLIVEIRA, 2002).

Assim, segundo a Associação Brasileira de Construção Industrializada (ABCI), não existiu no Brasil uma política de desenvolvimento tecnológico para o setor da construção industrializada. Dessa forma, por muito tempo a utilização de processos construtivos com elementos pré-moldados se concentrou nas construções industriais, comerciais e em empreendimentos hoteleiros (ABCI, 2004).

Nos anos 1980 a indústria de pré-moldados era voltada quase que exclusivamente para o setor industrial (ABCI, 2004). Nos últimos anos, com o investimento em tecnologias e maiores cuidados no acabamento das peças, os fabricantes têm atendido às exigências dos novos empreendimentos não apenas com relação à preocupação estética, mas também com o desenvolvimento de encaixes estruturais e peças para composições com outros elementos estruturais (MELO, 2004).

Atualmente a industrialização progressiva dos processos executivos da construção civil é uma tendência em evolução no Brasil, a exemplo do que já ocorreu em países industrializados da América do Norte e Europa, onde a mentalidade construtiva é a de melhorar o planejamento das atividades no canteiro de obra (MELO, 2004).

## **4.2 – Concreto Pré-Moldado**

Especificamente, na área de edificações, o concreto pré-moldado pode ser empregado nas estruturas de edifícios industriais, comerciais e habitacionais, bem como em edificações de uso múltiplo, como hospitais, terminais rodoviários e ferroviários, por exemplo (EL DEBS, 2000).

Destaca-se que, com a utilização de pré-moldados, tem se melhorado as condições de trabalho na construção civil, pois o emprego da pré-moldagem aumenta o grau de desenvolvimento tecnológico e social do país, gerando maior oferta de equipamentos, valorizando a mão-de-obra e a qualidade dos produtos (EL DEBS, 2000).

O emprego do concreto pré-moldado no Brasil é relativamente baixo comparado aos de países mais desenvolvidos. A Finlândia e a Holanda se destacam como países de maior utilização de concreto pré-moldado (EL DEBS, 2000). De acordo com a ABCI (2004), no Brasil a produção

anual é da ordem de 5 milhões de metros cúbicos de concreto pré-moldado por ano e esse número vai crescer ainda mais nos próximos anos.

A adoção de elementos pré-moldados na construção deve considerar dois fatores: a produção em larga escala através da repetitividade de elementos, e a adoção de técnicas que garantam boa qualidade aos produtos, no mínimo igual à produção in loco, executada por outros processos convencionais (MELO, 1996).

Na execução de elementos pré-moldados procura-se sempre liberar a fôrma e o elemento moldado o mais rápido possível, aumentando a produtividade do processo. As formas de acelerar o endurecimento do concreto são as seguintes (EL DEBS, 2000):

- a) Utilizar cimento de Alta Resistência Inicial (CP V ARI);
- b) Aumentar a temperatura de cura do concreto;
- c) Utilizar aditivos aceleradores.

Desses, os dois primeiros processos são os mais utilizados, pois além do alto custo, alguns dos aditivos aceleradores de pega são à base de cloretos, os quais provocam a despassivação da armadura (embora existam no mercado aditivos que não apresentem este inconveniente) (EL DEBS, 2000).

A retirada das peças das fôrmas é uma etapa crítica no processo de produção de elementos pré-moldados, pois nas idades iniciais do concreto, deve-se tomar cuidado para evitar choques e vibrações de intensidade tal que possam produzir fissuras na massa de concreto ou prejudicar a sua aderência à armadura ou cordoalhas.

Portanto, para ser retirada da fôrma, o concreto da peça pré-moldada deve ter uma resistência mínima na qual ele possa suportar os esforços internos solicitantes (principalmente o momento fletor com capacidade para resistir ao peso próprio da peça e o esforço cortante na região das alças de içamento do elemento pré-moldado) que são aplicados na peça durante o processo de retirada da fôrma e durante o transporte para o setor de estoque. Geralmente as empresas que trabalham com concreto pré-moldado utilizam concretos com  $f_{ck}$  variando entre 20 MPa e 26 MPa em elementos fabricados em concreto armado e  $f_{ck}$  entre 27 MPa e 35 MPa em elementos fabricados em concreto protendido, utilizando para efeitos práticos, os valores de 10 MPa a 15 MPa (elementos em concreto armado) e 24 MPa a 28 MPa (elementos em concreto protendido), como resistências mínimas dos concretos para efetuar a retirada das peças das fôrmas.

Tradicionalmente, as indústrias de peças de concreto pré-moldado vêm utilizando o cimento CP V ARI com o único objetivo de acelerar a retirada das peças das fôrmas. A indústria de pré-moldados ainda não se ateu ao uso de misturas minerais ao cimento Portland como uma alternativa possível, as quais poderiam reduzir custos e conservar energia (ALDEA et al. 2000). Essas adições ao cimento Portland são materiais como, escória de alto-forno, cinza volante e sílica ativa, que reagem formando produtos hidratados; portanto, elas podem substituir parcialmente o cimento Portland (ALDEA et al. 2000).

### **4.3 – Cura do Concreto Pré-Moldado**

A cura do concreto é conhecida como o conjunto de medidas que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento do concreto. O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível dessa condição, até que os espaços inicialmente ocupados pela água sejam ocupados pelos produtos da hidratação do aglomerante.

A cura adequada é fundamental para que o concreto alcance o melhor desempenho, proporcionando uma redução de sua porosidade, além de dificultar a carbonatação e difusão de íons pelo seu interior, contribuindo para aumentar a durabilidade das estruturas (LEVY & HELENE, 1996).

O concreto é sensível ao calor, pois todas as reações químicas de hidratação do cimento Portland são aceleradas com o aumento da temperatura durante a cura do concreto. Entretanto, embora o aumento de temperatura acelere o processo de hidratação do cimento, deve-se tomar cuidado para que não ocorra perda da água de hidratação do cimento. A perda de água prematura pode produzir retração ou fissuras no concreto.

As condições de umidade e temperatura são importantes para as propriedades do concreto endurecido, principalmente nas idades iniciais de desenvolvimento da resistência mecânica.

Para evitar a perda de água de hidratação do cimento no concreto, são tomadas algumas medidas, tais como (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1968):

- Manter a superfície do concreto úmida por meio da aplicação de água na sua superfície ou manter o concreto coberto para evitar que ocorra evaporação da água (nesse caso é de costume manter sempre molhado o material utilizado para cobrir o concreto). De acordo com a antiga NBR 6118 (NB 1, 1978), esse procedimento deveria ser realizado por um

período mínimo de 7 dias. Na NBR 14931 (ABNT, 2003), item 10.1, está estabelecido que os elementos estruturais de superfície devem ser curados até atingirem resistência características à compressão ( $f_{ck}$ ), de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 1996) igual ou maior que 15 MPa.

- Outra maneira de se cobrir o concreto para evitar a evaporação da água pode ser realizada por meio da aplicação de substâncias químicas na superfície do concreto.
- Cura térmica no vapor à pressão atmosférica, desenvolvida com temperaturas que variam entre 40 °C e 100 °C.
- Cura térmica no vapor em autoclave, em que as temperaturas variam entre 160 °C e 210 °C e pressões entre 6 atm e 20 atm.

Em geral, o tipo de cura empregada para elementos pré-moldados de concreto é a cura térmica no vapor à pressão atmosférica, chamada simplesmente de cura térmica, cujos detalhes serão descritos no próximo item.

#### **4.3.1 – Cura Térmica do Concreto**

A cura térmica do concreto, também conhecida como cura acelerada, tem como objetivo principal tornar mais rápido o processo de cura dos concretos e obter uma resistência mecânica mínima desejada, em um curto período de tempo. A cura térmica é muito utilizada em empresas que trabalham com concreto pré-moldado, pois reduzindo o tempo de cura permite a utilização das fôrmas, leitos de protensão e equipamentos de cura a intervalos mais freqüentes, reduzindo as áreas de estocagem e permitindo colocar peças em serviço em um período menor ao que se teria se fosse utilizada a cura convencional. (CAMARINI, 1995; BAOJU *et al.* 2001; HO *et al.*, 2003; ERDEM *et al.*, 2003).

Embora a aplicação imediata da cura térmica seja uma prática comum nas empresas de pré-moldados, pesquisas indicam que esse procedimento age em detrimento à resistência mecânica e à durabilidade do concreto. Nessas pesquisas o início de pega do concreto foi determinado como sendo um período determinante para o início da aplicação da cura térmica, pois a temperatura interfere na cinética das reações de hidratação provocando mudanças nas solubilidades dos componentes do cimento Portland, sendo mais intensa quando a reação de hidratação é controlada por dissolução e precipitação. Foi observado que o período de aplicação da cura térmica sendo igual ao período de início de pega do concreto apresentou maiores

resistências em um tempo mais curto (CAMARINI, 1995; CAMARINI & CINCOTTO, 1996; ERDEM *et al.*, 2003).

Quando o período de espera for prolongado (após o período de fim de pega do concreto), o mecanismo da hidratação passa a ser controlado por difusão iônica, e o efeito da temperatura de cura é menos acentuado (CAMARINI, 1995; CAMARINI & CINCOTTO, 1996).

Por outro lado, uma hidratação inicial rápida resulta em uma estrutura mais pobre, mais porosa, em uma distribuição menos uniforme dos produtos de hidratação no interior da pasta, comprometendo a resistência final e a durabilidade (MEHTA, 1994; MELO, *et al.*, 2000). Temperaturas de cura elevadas pioram as condições da superfície do concreto, modificando sua estrutura interna e proporcionando um aumento da porosidade na superfície (CAMARINI, 1999; MELO *et al.*, 2000).

Em estudos com concretos curados termicamente a 80 °C, Aldea *et al.* (2000) observaram queda de resistência em relação a concreto curado por imersão após 28 dias, e atribuem essa perda de resistência a uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação, por causa da rápida hidratação inicial dos compostos, ocasionando perda de resistência e aumento da porosidade.

Em geral elementos pré-moldados que recebem cura a vapor alcançam resistência à compressão na desmoldagem com valores aproximados de 70% da resistência à compressão especificada. Esses dados são referentes a elementos protendidos tais como lajes alveolares e telhas tipo W (apresentando abatimento entre 10 mm e 30 mm) que necessitam de um concreto mais seco para alimentarem as máquinas extrusoras que realizam a etapa de concretagem das peças (BAOJU *et al.* 2001).

Na cura térmica no vapor à pressão atmosférica as temperaturas não deverão exceder 80°C para não causar modificações na microestrutura do concreto. Para se evitar danos às peças, deve-se seguir um ciclo de cura (Figura 4.1). (CAMARINI & CINCOTTO, 1996).

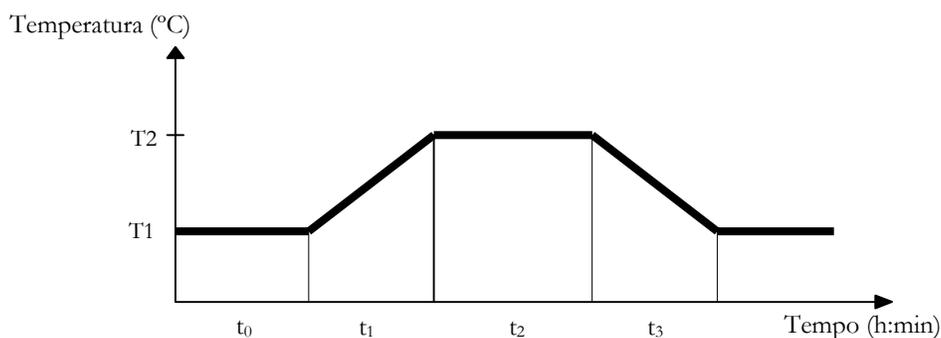


Figura 4.1 – Ciclo de Cura (CAMARINI & CINCOTTO, 1996).

Neste ciclo de cura observam-se os seguintes períodos:

**T1** → temperatura ambiente (°C).

**T2** → temperatura máxima atingida no ciclo (°C).

**t<sub>0</sub>** → período de espera (h:min). Período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento. Deve coincidir com o tempo de pega do concreto.

**t<sub>1</sub>** → período de elevação da temperatura (h:min). Aumento controlado da temperatura de cura (em gradiente controlado), não podendo ser superior a 20 °C por hora) (NBR 9062/1985).

**t<sub>2</sub>** → período de manutenção da temperatura (h:min). Regime isotérmico até que se atinja a resistência desejada (definido de acordo com as necessidades de desforma e utilização).

**t<sub>3</sub>** → período de esfriamento (h:min). Diminuição controlada da temperatura das peças até a temperatura ambiente (no máximo 30 °C por hora) (NBR 9062/1985).

**G1** → Gradiente de aquecimento.

**G2** → Gradiente de resfriamento.

A NBR 9062 (ABNT, 1985) determina a temperatura máxima de 70 °C para a cura térmica aplicada em elementos pré-moldados de concreto. O Instituto do Concreto Préfabricado (ICP) em seu manual (ICP 1001/93) (Especificações Técnicas para Produção de Elementos Prefabricados de Concreto), também especifica a utilização da temperatura máxima de 70 °C para cura térmica em elementos pré-moldados, seguindo a determinação da norma brasileira.

Devido à perda de propriedades com relação à durabilidade do concreto submetido à cura térmica, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de verificar o comportamento dos concretos com adições minerais submetidos à cura térmica. Essas pesquisas têm apontado para benefícios potenciais na utilização de concretos com adições minerais submetidos à cura térmica.

Ho, Chua e Tam (2003), utilizando concretos com várias combinações de cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa curados termicamente com temperatura máxima de 55 °C durante 8 horas, observaram que as misturas contendo sílica ativa apresentaram maior resistência à compressão e menor porosidade do que as demais misturas. As amostras contendo cinza volante e escória de alto-forno demonstraram ser mais porosas do que as amostras de referência curadas em ambiente de laboratório em temperatura de 27 °C.

Martins (2001) verificou que com aplicação de cura térmica a 60 °C, as resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral foram inferiores aquelas produzidas pela

cura em imersão a partir dos 28 dias para concretos produzidos com 3 teores de escória. O mesmo foi observado por Ferreira Junior (2003), com aplicação de cura térmica a 60 °C e 80 °C, utilizando cimento Portland com alto teor de escória (CP III) e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI).

#### **4.4 – Durabilidade do Concreto Pré-Moldado**

O concreto foi inventado em meados do século dezenove e os primeiros edifícios em concreto armado foram construídos há pouco mais de um século. Nessa época achava-se que o concreto era um material eterno.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, as obras em concreto armado, construídas no Brasil, começaram a atrair a atenção mundial. O Brasil, um país ainda considerado tecnologicamente atrasado, parecia ter dominado a técnica da construção com concreto ao mesmo tempo ou até antes que muitos países desenvolvidos. Entretanto, com o passar do tempo, o material que parecia eterno começou a mostrar que também envelhecia, em particular, as obras realizadas em concreto aparente. (SERRA, 2000).

A partir desse fato, começou a se pensar na questão da durabilidade das estruturas de concreto. A durabilidade das estruturas de concreto depende de diversos fatores, um desses fatores é a durabilidade do próprio concreto que está ligada essencialmente à sua permeabilidade (AITCIN, 2003).

A resistência de qualquer material às ações mecânicas, físicas ou físico-químicas é influenciada pela sua porosidade (PAULON, 1996). Portanto, tornou-se necessário superar o rápido envelhecimento das estruturas de concreto armado decorrente da infiltração de água nos capilares, carbonatação do concreto, despassivação e conseqüente oxidação das armaduras.

Os mecanismos de deterioração do concreto e as suas taxas de avanço são controlados pelo ambiente ao qual a estrutura está exposta, pela microestrutura da pasta e pela resistência à tração do concreto. Fatores ambientais, como variações de temperatura, chuvas, variações de umidade relativa e concentração de íons agressores são os principais agentes degradantes. (MARTINS, 2001).

A NBR 6118 (ABNT, 2003) estabelece que as estruturas de concreto armado devem manter sua estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil (entende-se por vida útil de uma estrutura de concreto um período de 50 anos, desde que

atendidos os requisitos de uso e manutenção da edificação). Nesse aspecto foram estabelecidos critérios com relação à agressividade do meio onde a estrutura de concreto está inserida e da qualidade necessária para o concreto dessas estruturas, conforme as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Classes de agressividade ambiental (NBR 6118/2003).

<b>Agressividade</b>	<b>Tipo de ambiente</b>	<b>Risco de Deterioração</b>
Fraca	Rural Submersa	Insignificante
Moderada	Urbana	Pequeno
Forte	Marinha Industrial	Grande
Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Tabela 4.2 – Relação a/c em função da classe e agressividade ambiental (NBR 6118/2003).

	<b>Tipo concreto</b>	<b>Fraca</b>	<b>Moderada</b>	<b>Forte</b>	<b>Muito forte</b>
Relação a/c	Armado	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	Protendido	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45

Tabela 4.3 – Relação entre cobrimento nominal (mm) em função da classe de agressividade ambiental (NBR 6118/2003).

<b>Estrutura</b>	<b>Elemento estrutural</b>	<b>Agressividade Ambiental</b>			
		<b>Fraca</b>	<b>Moderada</b>	<b>Forte</b>	<b>Muito forte</b>
<b>Armada</b>	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
<b>Protendida</b>	Todos	30	35	45	55

Deve-se enfatizar, entretanto, que boas práticas construtivas, incluindo boa cura, são essenciais para produzir uma estrutura de concreto durável.

Além disso, devido à necessidade de se unir às especificações de qualidade às especificações de projeto estrutural, buscando-se o menor custo de ciclo de vida em vez do menor custo inicial e aliada à questão econômica, surgiu à questão ambiental e a consciência quanto ao aproveitamento racional de recursos naturais (MARTINS, 2001).

Dessa forma, misturas minerais têm sido usadas cada vez mais na produção de concreto devido seus benefícios em termos de resistência e durabilidade. (ALDEA et al. 2000).

Isaia (1995), estudando os efeitos de misturas ternárias de pozolanas em concreto de alto desempenho, constatou que os melhores resultados obtidos para a durabilidade do concreto quanto à corrosão de armaduras foram obtidos com cinza volante (na proporção de 20%) e com cinza de casca de arroz (na proporção de 30%).

Hoje em dia é prática comum produzir concretos com utilização de cimentos compostos, os quais existem no mercado com uma ampla variedade de adições minerais em diversas proporções, dependendo do tipo de cimento composto utilizado.

Em geral, concretos com adições de escória de alto-forno ou adições de materiais pozolânicos tais como cinza volante ou sílica ativa, apresentam estruturas de pasta mais compactas e, portanto, os desempenhos desses concretos quanto à penetração de líquidos, gases e íons são consideravelmente melhores se comparados aos concretos produzidos com cimento Portland comum. Entretanto, tais adições em geral pioram o comportamento dos concretos em relação a carbonatação, mas os benefícios propiciados por cimentos com adições minerais são maiores do que os eventuais prejuízos obtidos. (CASCUDO, 1997).

A tendência de concretos produzidos com cimentos compostos com adição de escória de alto forno, apresentarem maiores profundidades carbonatadas, acontece devido ao fato de o cimento composto ter menor quantidade de clínquer. Dessa forma possui menor quantidade de hidróxido de cálcio (proveniente do clínquer), que é a substância que reage para formar o carbonato de cálcio (SILVA & LIBÓRIO, 2002).

O mesmo acontece em concretos com adição ou substituição de sílica ativa ao cimento utilizado no concreto, ocorrendo maior carbonatação devido à redução da quantidade de hidróxido de cálcio (SILVA & LIBÓRIO, 2002).

Entretanto, de acordo com Paulon (1996) a adição de 10% de sílica ativa nos concretos, não provoca diferenças significativas quando a relação água/aglomerante é de 0,25 ou 0,30. As diferenças surgem somente com relações água/aglomerante acima de 0,40, em concretos com idades acima de dois anos.

Para o aumento da durabilidade do concreto torna-se necessário à diminuição da espessura da zona de transição (a zona de transição sendo mais porosa, torna-se mais fraca que a matriz do cimento hidratado) a qual se torna a região frágil e ponto de partida para a fissuração do material. Os materiais pozolânicos têm um efeito positivo sobre a melhoria da zona de transição e na diminuição de sua espessura (COHEN & KLITSIKAS, 1986; PAULON, 1996; ISAIA; et *al.*, 2003; RAO, 2003).

A espessura da zona de transição aumenta com a idade, no caso da pasta pura. Nas pastas com adição de materiais pozzolânicos, a espessura da zona de transição diminui com a idade, o que se explica pelo melhor preenchimento dos vazios (efeito filler). A eficiência da sílica ativa, tanto como material pozzolânico de reação rápida quanto como filler de alta eficiência, resulta em diminuição rápida da espessura da zona de transição, porém somente após os três primeiros dias (COHEN & KLITSIKAS, 1986; PAULON, 1996; ISAIA *et al.*, 2003; RAO, 2003).

A maioria dos processos de deterioração do concreto desenvolve-se em duas fases (ROSTAM, 1996):

**1ª fase:** período de iniciação, quando não ocorre enfraquecimento do material ou perda funcional perceptível, mas há a quebra de alguma proteção (barreira).

**2ª fase:** período de propagação, em que se instala a deterioração ativa e observa-se perda funcional do elemento estrutural.

A forma e a velocidade com que as substâncias vão penetrar no concreto estão diretamente ligadas às condições microambientais da superfície do concreto (umidade e temperatura), e às propriedades da estrutura porosa do concreto (forma, volume e interconexão dos poros) (SCHIESSI, 1996).

De acordo com Rostam (1996), os principais processos de ataque ao concreto podem ser classificados como:

**a) processos físicos:** fissuração por cristalização de sais nos poros do concreto, ação de ciclos de gelo e degelo, deterioração pela ação do fogo, diferença entre coeficientes de dilatação térmica, abrasão, erosão, cavitação. São importantes as interações entre os agressores e a microestrutura e a resistência à tração do concreto.

**b) processos químicos:** reação álcali-agregado, ataque por sulfatos, ataque de águas ácidas. A maioria envolve o ingresso de íons agressores externos, reação com constituintes da pasta e posterior expansão e fissuração. A concentração do agente agressor e a microestrutura são decisivas.

**c) processos mecânicos:** fissuração por carregamento externo ou por mudanças internas do material ou uma combinação de ambos, impacto, fluência e relaxamento de armaduras ativas.

**d) processos eletroquímicos:** a maioria dos fatores que iniciam e propagam a corrosão está diretamente ligada à permeabilidade e resistência à fissuração do concreto. As presenças de oxigênio e água são fundamentais para a evolução da corrosão em uma taxa considerável. A despassivação da armadura pode ser causada por ação do gás carbônico da atmosfera (que penetra

por difusão no concreto, reage com alguns compostos e reduz o pH da solução) ou pela penetração de alta concentração de íons cloreto (por absorção capilar ou por difusão e destrói o filme passivamente).

Conhecendo-se as ações que influenciam na durabilidade do concreto, na maioria das vezes em que a durabilidade do concreto é comprometida, constata-se a não obediência às leis da física, da química e da termodinâmica.

Uma das principais razões para a deterioração de muitas estruturas de concreto se fundamenta no fato de que, no passado e mesmo hoje quando se projetam estruturas, muita importância é dada à resistência à compressão do concreto, e importância insuficiente aos fatores ambientais que a estrutura terá que enfrentar no desempenho da sua função estrutural. Quando se projeta uma estrutura de concreto é essencial começar por definir, da melhor maneira possível, as condições exatas às quais o concreto estará sujeito durante sua vida útil. (AITCIN, 2000).

#### **4.4.1 – A Absorção de Água pelo Concreto**

A absorção capilar e a permeabilidade situam-se dentre os principais mecanismos de transporte de agentes agressivos para o interior do concreto. A taxa de transporte de agentes agressivos, por meio da absorção e permeabilidade, é governada pela taxa de penetração de água, pois somente através da umidade é que os agentes agressivos são transportados para o interior do concreto (SATO & AGOPYAN, 2003).

O processo de penetração de agentes agressivos ocorre, com maior frequência, em áreas expostas, onde o concreto das estruturas está numa condição não saturada. Assim, a determinação da absorção é um indicativo das condições da porosidade capilar da superfície do concreto, que é o caminho preferencial da penetração de gases e líquidos (CAMARINI, 1999).

A penetração de água, íons agressivos e a porosidade da camada superficial de concreto são importantes, especialmente em relação à espessura dessa camada. Os movimentos desses agentes agressivos dependem da porosidade, isto é, do diâmetro e distribuição do tamanho dos poros, e da continuidade entre eles. A eliminação dos poros capilares contínuos deve ser considerada uma condição necessária para a obtenção de concretos duráveis (CAMARINI, 1999).

Portanto, a absorção é um processo no qual ocorre o transporte de líquidos em sólidos porosos devido à tensão superficial que age nos poros capilares. A medida da absorção do

concreto é determinada em função do volume de água absorvida em relação à área exposta para penetração da água em função do tempo (PARROT, 1992).

A absorção da água no concreto é considerada por dois parâmetros básicos (MARTYS & FERRARIS, 1997; BASHEER *et al.*, 2001):

- 1 – A massa de água que é necessária para saturar o concreto (absorção capilar) e;
- 2 – A velocidade de penetração da água (ascensão capilar ou sorção).

Em condições práticas de exposição, a umidade e a porosidade de um elemento de concreto irão variar com a idade e profundidade. Em geral, a porção de cobrimento (concreto de pele) tem o prosseguimento das reações de hidratação prejudicado pela perda facilitada de sua umidade natural, resultando numa superfície mais porosa e de poros mais interconectados de que nas regiões mais internas do concreto; e grande parte dos ataques sofridos pelo concreto está ligada à absorção de água ou de íons pela sua superfície (MARTINS, 2001).

Em estudo realizado para se verificar a durabilidade de concretos através da absorção de água em concretos submetidos a diferentes tipos de cura, os principais resultados obtidos por Camarini (1999) foram os seguintes:

- Uma cura adequada melhora a qualidade da superfície do concreto, impedindo a perda prematura de água. Portanto, para a obtenção de um concreto durável é indispensável a manutenção da umidade por períodos prolongados.
- Medir a quantidade de água que penetra no concreto por meio de ensaios de absorção, apresenta resultados eficientes num curto período de tempo com relação à durabilidade do concreto de cobrimento (concreto de pele), pois a velocidade de penetração de água por capilaridade é mais elevada do que no ensaio de permeabilidade.
- O aumento da quantidade de água absorvida indica uma quantidade maior de poros de grande diâmetro, podendo comprometer sua durabilidade.
- No caso de utilização de cura térmica, temperaturas de cura elevada geram modificações na estrutura interna do concreto proporcionando um aumento da porosidade na superfície.

- Mesmo em temperatura ambiente, a porosidade do concreto aumenta significativamente caso a cura não seja realizada. Neste caso, a quantidade de água que ingressa no concreto pode dobrar.
- Os resultados do estudo confirmaram que não é possível relacionar resistência à compressão e durabilidade. A sua determinação é necessária, mas não é indicativa de um material durável.

#### 4.4.2 – A Permeabilidade do Concreto

A permeabilidade do concreto não é simplesmente uma função de sua porosidade, mas ela depende também do tamanho, distribuição e continuidade dos poros (NEVILLE, 1982). A permeabilidade é um dos principais parâmetros de qualidade do concreto, representa a facilidade (ou dificuldade) com que determinadas substâncias (líquidas ou gasosas) transpõem determinado volume de concreto. A permeabilidade está relacionada com a interconexão de poros capilares. À medida que se baixa a relação água/cimento se obtém estruturas cada vez mais compactas, com poros capilares de menores dimensões (CASCUDO, 1997).

Com o avanço da hidratação do cimento, que depende da relação água/cimento, do tipo de cimento utilizado no concreto e das condições ambientes, a permeabilidade deve diminuir, já que os vazios capilares vão sendo preenchidos, e/ou interrompidos por produtos da hidratação do cimento (NEVILLE, 1982; POWERS, 1958; *apud* HELENE, 1986; SANJUÁN MUNÓZ-MARTIALAY, 1997; *apud* MARTINS, 2001).

Como medida qualitativa do sistema poroso, a permeabilidade é importante para determinar a durabilidade do concreto, pois não só controla a carbonatação ou o ingresso de cloretos, fatores essenciais para o início da corrosão no concreto armado, como também o ingresso de oxigênio e umidade, que influenciam na progressão do mecanismo. A razão com que o mecanismo ocorre é determinada pela lei de Darcy, na qual a taxa de escoamento é proporcional ao gradiente hidráulico (Equação 4.1) (BANTHIA & MINDESS, 1989; BASHEER *et al.*, 2001):

$$v = \frac{Q}{A} = -k.(dh/dl) \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde  $v$  é a velocidade aparente do fluxo,  $Q$  é a taxa de escoamento (ou vazão),  $A$  é a área da seção transversal ao fluxo,  $k$  é o coeficiente de permeabilidade dos poros médios e  $db$  é a perda de carga do fluxo no comprimento  $dl$ .

A lei de Darcy pode ser aplicada em qualquer direção através de um material poroso (BANTHIA & MINDESS, 1989; BASHEER et al., 2001). Entretanto a sua validade está sujeita a inúmeras simplificações (BANTHIA & MINDESS, 1989):

- a pressão do ar comprimido dentro da amostra é negligenciada;
- o fluxo ocorre sob a área total (só assim o uso da área  $A$  é justificado);
- o efeito da temperatura é negligenciado;
- a compressibilidade da amostra sob estado triaxial de tensão pode ser ignorada;
- existe fluxo paralelo;
- o fluido não exerce pressão na amostra durante o ensaio.

De acordo com Basheer et al. (2001), a lei de Darcy pode ser aplicada para qualquer fluido através da seguinte equação (Equação 4.2):

$$v = \frac{Q}{A} = (k/\mu) \cdot (dP/dl) \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde  $dP$  é a perda de pressão na espessura  $dl$  da amostra,  $\mu$  é a viscosidade do fluido e  $k$  é a permeabilidade intrínseca dos poros médios.

#### 4.4.3 – A Carbonatação do Concreto

A carbonatação do concreto é um fenômeno relacionado à permeabilidade aos gases (HELENE, 1986). O principal risco que a carbonatação oferece às estruturas de concreto armado vem do fato dela promover uma queda brusca no pH da região afetada, acabando com a estabilidade da película protetora das armaduras (MARTINS, 2001).

Isso ocorre devido ao fato do gás carbônico presente na atmosfera poder reagir com os compostos do cimento formando produtos de menor alcalinidade que os compostos originais e, dessa forma, a película de proteção do concreto é descaracterizada, deixando a armadura

vulnerável à corrosão (CASTRO et. al., 2003). O gás carbônico penetra na estrutura de poros do concreto por uma diferença de concentração denominada difusão; essa difusão realiza-se por meio de poros capilares interconectados, microfissuras ou bolhas de ar (SILVA & LIBORIO, 2002).

Quando o dióxido de carbono se difunde para dentro do concreto, na presença de água, ele reage com o hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio. Como resultado dessa reação química, o pH do concreto é reduzido (BASHEER et al., 2001).

A carbonatação avança do exterior do concreto para o seu interior, formando o que é conhecido por frente de carbonatação. Durante o processo de carbonatação ocorre no concreto uma separação em duas regiões com pH muito diferentes, uma com pH menor do que 9 (região carbonatada) e outra com pH maior que 12 (região não carbonatada) (Figura 4.2) (ROSEMBERG et al., 1989; CASCUDO, 1997; MARTINS, 2001; BASHEER; et al., 2001; CASTRO et al., 2003).

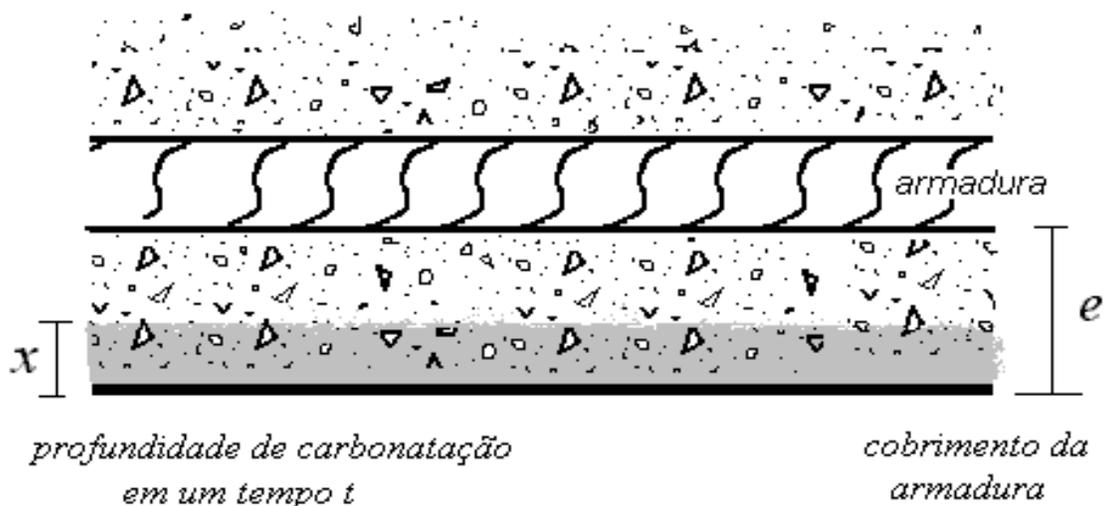


Figura 4.2 – Relação entre o cobrimento da armadura e a profundidade de carbonatação (FERREIRA JR., 2003).

A carbonatação é um fenômeno natural que ocorre mesmo em ambientes de baixa concentração de  $\text{CO}_2$ , como regiões rurais, mas tem maior importância em centros urbanos e regiões industrializadas, de alta concentração de  $\text{CO}_2$  (NEVILLE, 1982).

A alta alcalinidade do concreto (pH em torno de 12,5) obtida pela presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de cálcio) liberado durante as reações de hidratação do cimento, sofre redução com o passar do tempo devido a ação principalmente do  $\text{CO}_2$  que está presente na atmosfera mas também ocorre pela ação de outros gases ácidos tais como  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) e  $\text{H}_2\text{S}$  (gás

sulfídrico). A carbonatação é um processo lento e por estar ligada à permeabilidade aos gases deve ser estudada quanto à composição do concreto, diminuindo o risco e a velocidade de carbonatação (HELENE, 1986; CASCUDO, 1997).

A reação de carbonatação costuma ser representada de maneira simplificada de acordo com o mostrado na Reação 4.1. O pH de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio) é cerca de 9,4 (HELENE, 1986; ROSEMBERG *et al.*, 1989; SILVA & LIBORIO, 2002).



A proteção química oferecida pelo concreto à armadura é obtida em função do caráter alcalino da solução dos poros do concreto (pH em torno de 12,5), proporcionando a passivação da armadura, deixando essa armadura em equilíbrio e protegendo-a contra a corrosão (CASCUDO, 1997; KULAKOWSKI *et al.*, 2003). É importante que a carbonatação do concreto não atinja a armadura, pois nesse caso irá ocorrer a despassivação da armadura desencadeando o processo de corrosão. A carbonatação do concreto é condição essencial para o início da corrosão das armaduras (CASCUDO, 1997).

Deve-se observar que o fenômeno de carbonatação e de corrosão do aço não estão sempre diretamente ligados; a carbonatação é apenas um fator iniciador da corrosão do aço, uma vez que a umidade relativa que mais favorece a carbonatação está em torno de 60% e a que mais favorece a corrosão excede 80% (SILVA & LIBORIO, 2002). A Figura 4.3 mostra o grau de carbonatação do concreto em função da umidade relativa.

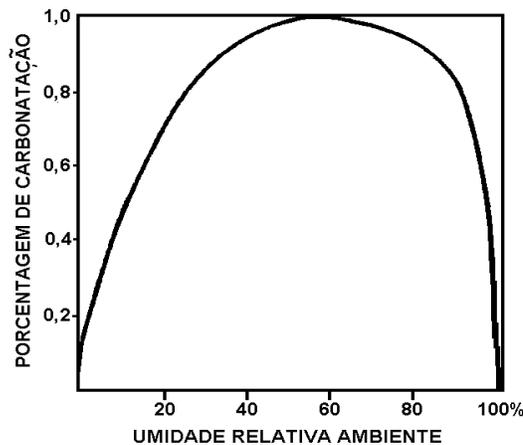


Figura 4.3 - Grau de carbonatação em função da umidade do ambiente (VENUAT, 1977, apud ROSEMBERG *et al.*, 1989).

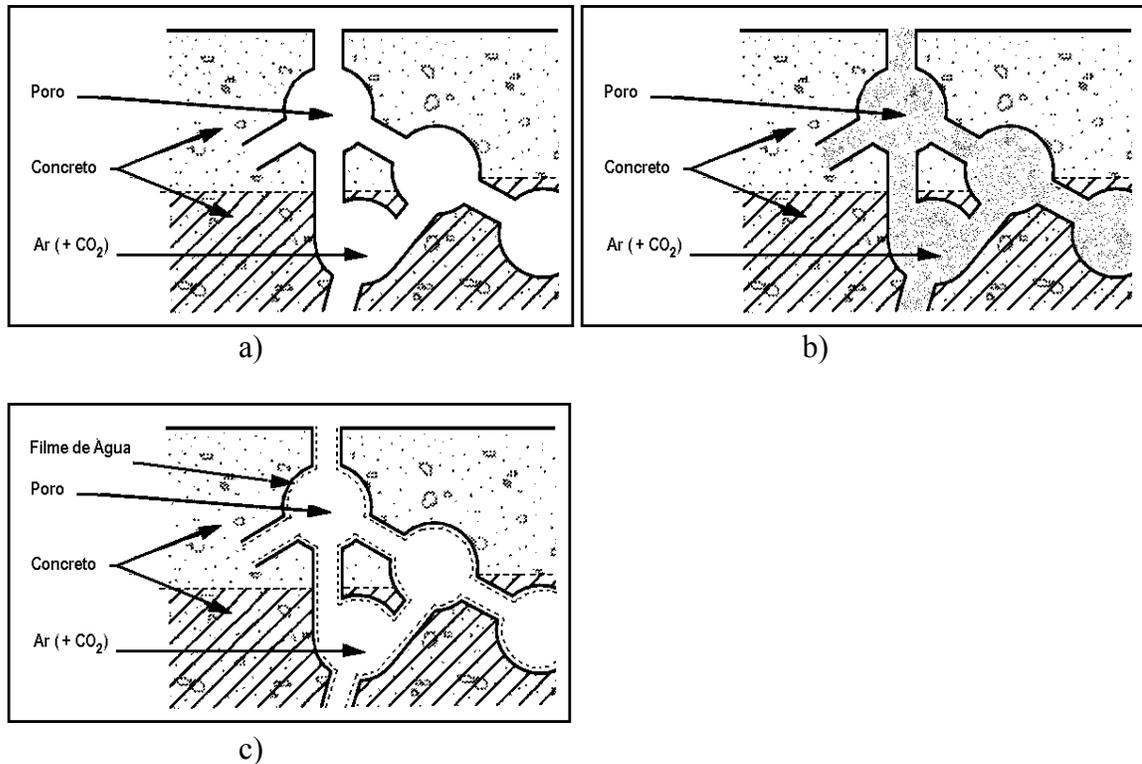
Devido ao fato do concreto ser um material microporoso, a penetração do  $\text{CO}_2$  ocorre de acordo com a forma da estrutura do poro e se os poros do concreto estão preenchidos com água ou não. Existe uma grande diferença nas taxas de difusão de  $\text{CO}_2$  no ar e na água (na água é cerca de 10.000 vezes mais baixa). Com os poros secos (Figura 4.4a), o  $\text{CO}_2$  irá se difundir no interior desses poros, mas não ocorrerá a carbonatação devido a falta de água. Com os poros preenchidos com água (Figura 4.4b), praticamente não existirá carbonatação devido à baixa difusão do  $\text{CO}_2$  na água (CASCUDO, 1997). Entretanto, se os poros estiverem apenas parcialmente preenchidos com água (Figura 4.4c), que é normalmente o que ocorre próximo à superfície do concreto (o concreto absorve umidade muito rapidamente, mas seca bem mais lentamente), a carbonatação avança até a profundidade onde os poros do concreto estejam apresentando condição favorável (CASCUDO, 1997).

Com relação ao uso de adições minerais no concreto, pode-se dizer que essas adições exercem influência na durabilidade do concreto, como já mencionado no item 4.4. Especificamente para o aspecto da carbonatação do concreto, estudos realizados observaram que com a utilização de sílica ativa e cimentos compostos com escória de alto-forno no concreto, verifica-se uma maior profundidade carbonatada, isso ocorre devido ao fato de tanto a sílica ativa como a escória de alto-forno, presentes no concreto, estão substituindo o clínquer do cimento Portland. Dessa forma, a mistura possui menor quantidade de hidróxido de cálcio para reagir e formar o carbonato de cálcio, facilitando assim o avanço da frente de carbonatação para o interior do concreto. (SILVA & LIBORIO, 2002; CASTRO et al., 2003; KULAKOWSKI et al., 2003). Entretanto, nesses estudos foi verificado que a cura do concreto é indispensável para garantir a descontinuidade capilar em função da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa.

Quando se utiliza sílica ativa, existe um limite de utilização da relação água/aglomerante para se obter a melhor durabilidade do concreto. Esse limite tem como valor máximo a relação 0,50. Abaixo desse valor a carbonatação é regida principalmente pela porosidade da matriz cimentante, e tanto o teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como o pH da água do poro, nestes níveis de relação água/aglomerante, apresentam pouca influência na profundidade de carbonatação. Acima da relação água/aglomerante 0,50, as reações pozolânicas promovidas pela sílica ativa passam a ser desfavoráveis em relação à carbonatação. (SILVA & LIBORIO, 2002; CASTRO et al., 2003; KULAKOWSKI et al., 2003).

Na corrosão de armaduras desencadeada por carbonatação, foi observado que o efeito da sílica ativa no concreto é influenciado pelo teor de adição utilizado. Para adições de até 10% de

sílica ativa ocorre efeito favorável na resistência à corrosão das armaduras, e ocorre melhoria significativa nas demais propriedades embora aumente a profundidade de carbonatação. Para teores maiores do que 10% de sílica ativa, além de aumentar a profundidade de carbonatação, o concreto torna-se desfavorável em relação à carbonatação (SILVA & LIBORIO, 2002; CASTRO et al., 2003; KULAKOWSKI et al., 2003).



Concretos que contam com a presença de sílica ativa apresentam melhor desempenho pois possuem uma microestrutura muito mais compacta que é destacada pelo efeito *filler*. Concretos produzidos sem sílica ativa, somente com cimentos compostos (com substituição de clínquer de 30%), não apresentaram desempenho similar ao obtido com sílica ativa. Esse efeito foi atribuído à queda de reserva alcalina, provavelmente o fator determinante para apresentarem desempenhos inferiores em relação a carbonatação (SILVA & LIBORIO, 2002; CASTRO et al., 2003).

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve os materiais e métodos de ensaio utilizados durante o trabalho experimental. Os ensaios foram realizados nas instalações do Laboratório de Estruturas e de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Estadual de Campinas.

### 5.1 – Cimento Portland

Dois tipos de cimento Portland foram utilizados na pesquisa: cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CP V ARI PLUS e o cimento Portland de Alto Forno – CP III 40 E (com alto teor de adição de escória de alto forno) (Tabelas 5.1 e 5.2).

Tabela 5.1 –Especificação dos cimentos Portland empregados de acordo com as normas brasileiras.

Tipo de cimento	Clínquer+Gipsita (%)	Escória de Alto-forno (%)	Material Carbonático (%)	Norma Brasileira
CP V ARI	100 – 95	---	0 - 5	NBR 5733
CP III	65 - 25	35 - 70	0 - 5	NBR 5735

A composição química do cimento utilizado nesse trabalho experimental foi fornecida pelo fabricante. As composições químicas e potenciais do cimento, assim como as características físicas e reológicas da pasta estão detalhadas na Tabela 5.2.

A composição potencial apresentada fornecida pelo fabricante foi calculada em função do teor de clínquer em cada cimento. Os valores de início e fim de pega se referem à pasta de consistência normal.

Tabela 5.2 – Composição química, composição potencial e características físicas dos cimentos empregados.

<b>Cimento</b>	<b>CP VARI PLUS</b>	<b>CP III 40 E</b>
Clínquer (% em massa de cimento)	90,6	37,9
Escória (% em massa de cimento)	--	53,4
Gipsita (% em massa de cimento)	6,0	4,4
Mat. Carbonático (% em massa de cimento)	3,4	4,3
Perda ao Fogo	2,68	3,01
Resíduo Insolúvel	0,39	0,75
SiO <sub>2</sub>	19,58	25,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,96	8,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,14	2,09
CaO	64,65	51,53
MgO	0,54	3,78
SO <sub>3</sub>	2,87	3,68
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,14
K <sub>2</sub> O	0,75	0,55
Módulo de sílica	2,42	2,48
Módulo de alumina	1,58	4,01
Fator de saturação de cal	88,7	34,5
C <sub>3</sub> S	56,7	21,0
C <sub>2</sub> S	11,7	5,0
C <sub>3</sub> A	8,1	3,2
C <sub>4</sub> AF	9,5	3,5
Início de pega (minutos)	115	260
Fim de pega (minutos)	200	400
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4650	4050
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,090	2,980

## 5.2 – Sílica Ativa

A sílica ativa foi adicionada nos concretos em substituição aos cimentos Portland na proporção de 10% (em massa). A sílica ativa utilizada no trabalho experimental foi a Microssílica Elkem 920–U, sílica ativa densificada NBR 13956 (ABNT, 1997) – Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação, suas características são apresentadas nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 – Dados Físicos da Sílica Ativa Utilizada – Valores médios.

<b>Propriedade</b>	<b>Característica</b>
Cor	Cinza Claro
Perda ao Fogo	975 °C
Massa Específica	2,2 g/cm <sup>3</sup>
Aparência	Pó impalpável de dimensões micrométricas

Tabela 5.4 – Composição da Sílica Ativa Utilizada – Valores médios.

<b>Principais Componentes</b>	<b>Teores (%)</b>
Dióxido de silício SiO <sub>2</sub>	85 a 98
Carbono	1 a 10
Óxidos de Ferro, Alumínio e Magnésio	Diferença

### 5.3 – Agregados

Os agregados utilizados na execução das amostras são os disponíveis e comumente usados na região de Campinas. Foi utilizada areia média (zona 3) NBR 7217 (ABNT 1987b), de rio, e pedra britada n° 1 (basalto) com dimensão máxima característica de 19 mm. Todos os materiais foram caracterizados segundo as Normas Brasileiras em vigor (Tabelas 5.5 e 5.6; Figuras 5.1 e 5.2).

Tabela 5.5 – Análise granulométrica do agregado miúdo – Areia média (NBR 7217/1987b).

<b>Abertura das Peneiras (mm)</b>	<b>% retida individual</b>	<b>% retida acumulada</b>
9,5	0	0
6,3	0	0
4,8	0	0
2,4	8	8
1,2	18	26
0,6	25	51
0,3	26	77
0,15	18	95
Fundo	5	-
Total	100	
DMC (mm)	4,8	
Módulo de Finura	2,57	

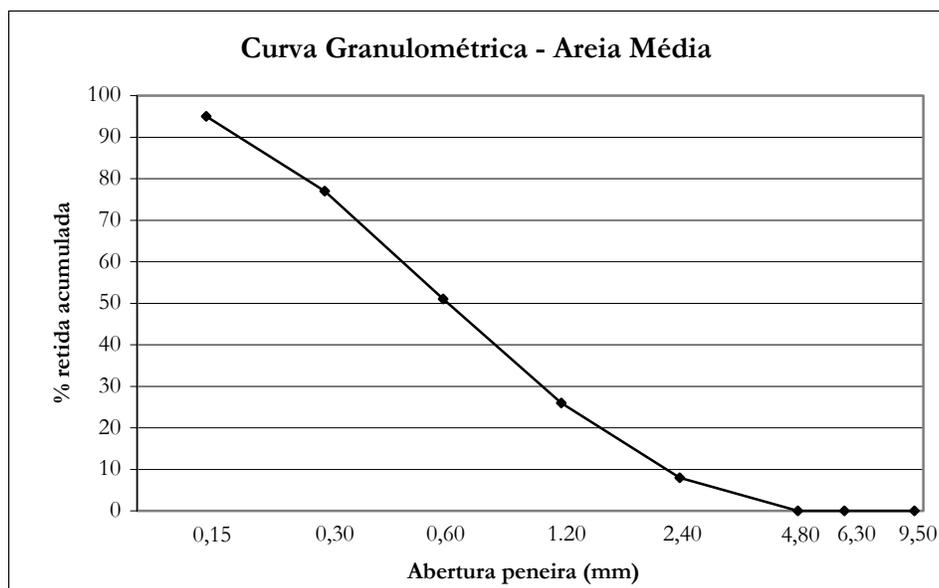


Figura 5.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo – Areia média

Tabela 5.6 – Análise granulométrica do agregado graúdo – Brita 1 (NBR 7217/1987b).

Abertura das Peneiras (mm)	% retida individual	% retida acumulada
19,0	1	1
12,5	40	41
9,5	22	63
6,3	30	93
4,8	6	99
2,4	0	99
1,2	0	99
0,6	0	99
0,3	0	99
0,15	0	99
Fundo	1	-
Total		
DMC (mm)	19	
Módulo de Finura	6,58	

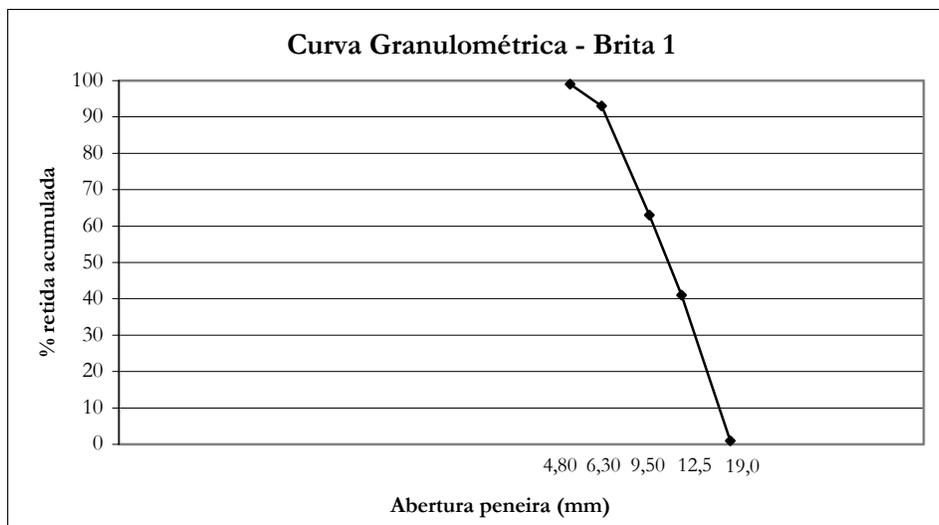


Figura 5.2 – Composição granulométrica do agregado graúdo – Brita 1

#### 5.4 – Aditivo Superplastificante

Foi utilizado um aditivo superplastificante, à base de polímeros éter carboxílico, isento de cloretos, aditivo desenvolvido para a indústria de pré-moldados e concretos protendidos. Sua densidade varia entre 1,067 a 1,107 g/cm<sup>3</sup> e seu pH de 5 a 7. A dosagem recomendada pelo fabricante, para utilização, é de 0,5 a 0,8 litros para cada 100 kg de material cimentante. O aditivo foi utilizado adicionando-o à água de amassamento, seguindo a especificação fornecida pelo fabricante para a utilização do produto.

#### 5.5 – Concreto

As amostras de concreto foram produzidas utilizando-se os dois tipos de cimento Portland já mencionados, com e sem sílica ativa, e agregados já descritos anteriormente.

##### 5.5.1 – Dosagem do Concreto

Para a dosagem do concreto utilizado nesse trabalho experimental foi adotada uma proporção de aglomerante : agregados de 1 : 5 (m = 5), com teor de argamassa de 50%. Dessa forma, atendendo a esses requisitos, o traço de concreto empregado foi 1 : 2 : 3 (em massa) com relação água/aglomerante (ag/agl = 0,42) (Tabela 5.7).

A determinação da relação água/aglomerante de 0,42 teve por objetivo obter concretos mais resistentes quando expostos a meios agressivos, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003) item 7.4.2, na qual se especifica para ambientes de agressividade muito forte, uma relação água/cimento menor que 0,45 e resistências à compressão aos 28 dias maiores do que 40 MPa.

Tabela 5.7 – Dosagem do concreto por m<sup>3</sup>.

Traço	Relação a/agl (g)	Aditivo (ml)	Cimento (kg)	Sílica ativa (kg)	Abatimento (mm)
CP V ARI PLUS referência	0,42	1435	398,40	-	20 ± 5
CP V ARI PLUS com sílica ativa	0,42	2390	358,60	39,80 *	20 ± 5
CP III 40 E referência	0,42	1425	395,30	-	20 ± 5
CP III 40 E com sílica ativa	0,42	2370	355,80	39,50 *	20 ± 5

\* Sílica ativa em substituição aos cimentos Portland na proporção de 10% em massa.

A quantidade de aditivo utilizada nos concretos foi a necessária para se manter o abatimento especificado. Adotou-se o abatimento de 20 ± 5 mm por ser freqüentemente utilizado pelas indústrias de pré-moldados em pistas de produção de peças protendidas (painéis alveolares e telhas W).

### 5.5.2 – Mistura e Moldagem

Os materiais foram misturados mecanicamente, em betoneira de eixo inclinado. O aditivo superplastificante foi adicionado à parte da água de amassamento seguindo a especificação fornecida pelo fabricante para a utilização do produto.

Para os ensaios foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura, moldados em duas camadas adensadas em mesa vibratória. O adensamento foi realizado no tempo necessário para permitir a compactação adequada do concreto no molde. Esse tempo, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 1994a), é considerado suficiente no instante em que o concreto apresente superfície relativamente plana e brilhante. Nos concretos utilizados nesse trabalho experimental esse tempo de vibração ficou em torno de 30 segundos por camada.

Foram moldados 1200 corpos-de-prova para a realização dos ensaios durante o trabalho experimental.

## 5.6 – Cura

As propriedades mecânicas e a durabilidade foram determinadas em amostras de concretos (Tabela 5.7) submetidos a três tipos de cura: cura ao ar, cura térmica a 60 °C e cura em água por um período de 7 dias (cura por imersão).

Para cada ensaio realizado, os concretos foram submetidos aos três tipos de cura: cura ao ar, cura térmica e cura por imersão.

### 5.6.1 – Cura ao Ar

Na cura ao ar, os corpos-de-prova permaneceram nos moldes por 24 horas, quando foram desmoldados, e ficaram expostos em ambiente de laboratório até a data dos ensaios (temperatura aproximada de 25 °C e umidade relativa próxima a 65%). A Tabela 5.8 mostra a nomenclatura de todos os concretos produzidos no trabalho experimental.

Tabela 5.8 – Nomenclatura dos concretos produzidos

Nomenclatura	Tipo de cimento	Tipo de cura
ARI-AMB	CP V ARI - PLUS	Ambiente
ARI-IME	CP V ARI - PLUS	Imersa
ARI-60	CP V ARI - PLUS	Térmica
ARI-SIL-AMB	CP V ARI - PLUS	Ambiente
ARI-SIL-IME	CP V ARI - PLUS	Imersa
ARI-SIL-60	CP V ARI - PLUS	Térmica
CPIII-AMB	CP III 40 E	Ambiente
CPIII-IME	CP III 40 E	Imersa
CPIII-60	CP III 40 E	Térmica
CPIII-SIL-AMB	CP III 40 E	Ambiente
CPIII-SIL-IME	CP III 40 E	Imersa
CPIII-SIL-60	CP III 40 E	Térmica

### 5.6.2 – Cura Térmica

A cura térmica foi realizada em câmara térmica de vapor à pressão atmosférica, disponível no Laboratório de Estruturas e de Construção Civil da FEC/Unicamp (Figura 5.3).

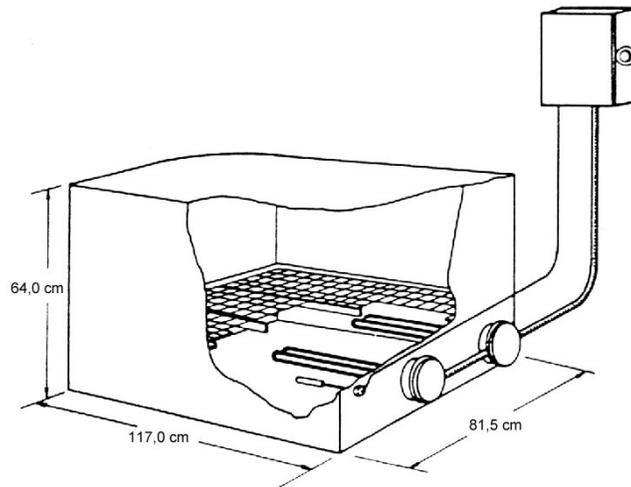


Figura 5.3 – Câmara de cura térmica (CAMARINI, 1995).

A cura térmica seguiu o ciclo recomendado por CAMARINI (1995), incluindo os seguintes períodos:

- a) **Tempo de espera:** coincidindo com o tempo de pega do concreto. Os tempos de pega determinados em laboratório foram: CP V ARI PLUS = 210 min.; CP III 40 E = 460 min.
- b) **Gradiente de elevação da temperatura:** elevação controlada da temperatura de no máximo 20 °C/h.
- c) **Regime isotérmico:** manutenção da temperatura máxima de cura. Foi adotado um período de 4 horas e temperatura de cura de 60 °C por serem frequentemente utilizados pelas indústrias de pré-moldados na produção de peças protendidas.
- d) **Gradiente de resfriamento:** decréscimo da temperatura controlado de 20 °C/h a 30 °C/h.

Os concretos foram submetidos à cura térmica dentro dos moldes. Ao final de cada ciclo, os corpos-de-prova foram desmoldados e permaneceram em ambiente de laboratório até a data dos ensaios (temperatura aproximada de 25 °C e umidade relativa próxima a 65%).

### **5.6.3 – Cura por Imersão**

Na cura por imersão, os corpos-de-prova ficaram nos moldes por 24 horas, quando foram desmoldados e então imersos em água saturada de cal até a idade de 7 dias. Após esse período os corpos-de-prova ficaram expostos em ambiente de laboratório até a data do ensaio (temperatura aproximada de 25 °C e umidade relativa próxima a 65%).

## **5.7 – Ensaio Realizados**

Todos os ensaios realizados na análise experimental seguiram as normas reguladoras brasileiras.

### **5.7.1 – Resistência à Compressão Axial**

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados segundo os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 1994b). Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, após moldagem, as rupturas foram realizadas em: 1, 3, 7, 28 e 90 dias para os corpos-de-prova submetidos a todos os regimes de cura. Para cada idade de ensaio foram moldados quatro corpos-de-prova.

### **5.7.2 – Resistência à Tração por Compressão Diametral**

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados segundo os procedimentos da NBR 7222 (ABNT, 1994c). Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, após moldagem as rupturas foram realizadas em: 1, 3, 7, 28 e 90 dias para os corpos-de-prova submetidos a todos os regimes de cura. Para cada idade de ensaio foram moldados quatro corpos-de-prova.

### **5.7.3 – Carbonatação Natural**

Após os procedimentos de moldagem e cura, os corpos-de-prova ficaram expostos em ambiente de laboratório (temperatura aproximada de 25 °C e umidade relativa próxima a 65%) até

a idade dos ensaios. Em cada data de ensaio, os corpos-de-prova foram rompidos à tração por compressão diametral e então foi medida a profundidade de carbonatação por meio de aspersão de fenolftaleína na face de ruptura dos corpos-de-prova. Para cada face resultante foram feitas dez medidas de profundidade de carbonatação, e o resultado foi a média aritmética das 10 determinações. As medições da profundidade de carbonatação foram realizadas aos 28, 56 e 90 dias. Para cada idade de ensaio foram moldados quatro corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

#### 5.7.4 – Absorção Capilar

Para cada série de concreto, foi medida a absorção capilar em 4 corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, nas idades de 28, 56 e 90 dias. Após o procedimento de cura, os corpos-de-prova ficaram expostos em ambiente de laboratório até a data de ensaio (temperatura aproximada de 25 °C e umidade relativa próxima a 65%). Nestas idades os corpos-de-prova foram secos em estufa a 60 °C por 24 horas, e tiveram suas laterais impermeabilizadas com duas demãos de verniz impermeabilizante e, então, foram submetidos ao ensaio. A impermeabilização lateral teve por objetivo garantir um sentido único de fluxo da água absorvida.

A Figura 5.4 mostra o dispositivo utilizado para a realização do ensaio de absorção capilar. Os corpos-de-prova foram mantidos com um nível de água constante, de 1 cm acima da sua face inferior, por 24 horas. A face imersa foi sempre à face inferior do corpo-de-prova na moldagem.

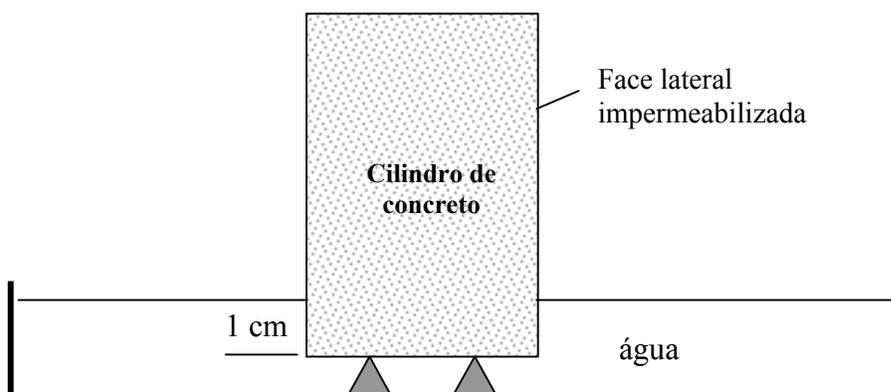


Figura 5.4 – Dispositivo para o ensaio de absorção capilar.

A absorção de água foi medida pela variação de massa, com pesagens consecutivas aos 5, 10, 15 e 30 minutos, 1 hora, 2, 4, 6, 8 e 24 horas de ensaio. Ao final, os corpos-de-prova foram rompidos à tração por compressão diametral, para que se medisse a altura de penetração da água. Este trabalho teve uma maior preocupação com a absorção em 1 hora e em 24 horas, conforme relatado por Martins (2001). Por esse motivo, não se seguiu o método descrito pela NBR 9779 (ABNT, 1995), que indica pesagens nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas e ruptura das amostras às 72 horas. Além disso, o mesmo procedimento indica secagem prévia à  $(105 \pm 5)$  °C, o que pode causar fissuração da amostra.

De posse dos valores de variação de massa e profundidade de penetração da água, foram calculados o valor da sorção, em 24 horas, e a absorção inicial, em 1 hora, segundo as Equações 5.1 e 5.2 (BALAYSSAC, 1992).

$$\text{Sorção:} \quad S = \frac{z}{\sqrt{t}} \quad (\text{m.s}^{-1/2}) \quad (\text{Equação 5.1})$$

$$\text{Absorção inicial:} \quad k_{abs} = \frac{(Wt - Wo) / A}{\sqrt{t}} \quad (\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}) \quad (\text{Equação 5.2})$$

Nas equações,  $t$  é o tempo de ensaio (s),  $z$  é a altura de penetração da água (m),  $Wo$  é a massa inicial do corpo-de-prova (kg),  $Wt$  é a massa do corpo-de-prova no tempo de ensaio (kg) e  $A$  é a área transversal do corpo-de-prova ( $\text{m}^2$ ).

### 5.7.5 – Permeabilidade ao Ar

Para a medição da permeabilidade ao ar foi empregado o permeâmetro montado no Laboratório de Estruturas e de Construção Civil da Unicamp, representado na Figura 5.5.

Após o procedimento de cura, os corpos-de-prova cilíndricos ficaram expostos em ambiente de laboratório (temperatura aproximada de 25 °C e umidade relativa próxima a 65%). Nas idades de 28, 56 e 90 dias, os corpos-de-prova foram cortados ficando com dimensões de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Em seguida, foram levados para a estufa a 60 °C por 24 horas. Após esse período, tiveram suas laterais impermeabilizadas. Para cada série de concreto foram

produzidos 2 corpos-de-prova por data de ensaio. Os resultados apresentados são a média de duas determinações.

Iniciava-se o ensaio colocando-se a amostra no topo do aparelho, apoiada sobre sua base inferior de moldagem. A vedação lateral foi completada por um anel de borracha flexível, garantindo que o fluxo de ar se produzisse somente na direção axial da amostra.

A parte inferior do porta-amostra liga-se a um tubo capilar que contém água como líquido manométrico. Nesse sistema, o vácuo foi obtido conectando-se o permeâmetro a uma bomba manual. A abertura da válvula reguladora provoca a subida da água no interior do tubo capilar e quando a água atinge o nível superior  $h_0$ , a válvula é fechada. O ar atmosférico pode então, passar através do concreto. O nível do líquido manométrico diminui e a pressão do permeâmetro varia. Mediu-se o tempo necessário para a água descer da altura  $h_0$  até  $h_1$  (Figura 5.5).

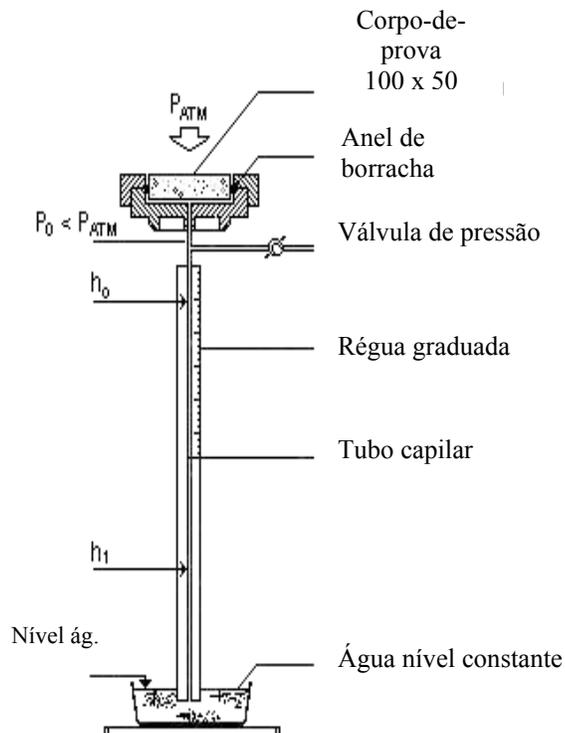


Figura 5.5 – Aparelho de permeabilidade ao ar (BALAYSSAC, 1992).

O cálculo da permeabilidade ao ar é feito por meio da teoria simplificada proposta por Balayssac (1992), de acordo com a Equação 5.3.

$$k = \frac{\mu \cdot s \cdot l}{\rho_1 \cdot g \cdot A \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{(Equação 5.3)}$$

Onde:

- k permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>);
- μ viscosidade do ar a 20 °C (Pa.s);
- s seção do tubo capilar = 26, 42 mm<sup>2</sup>;
- l altura do corpo-de-prova (m);
- A seção transversal do corpo-de-prova (mm<sup>2</sup>);
- ρ massa específica da água em temperatura ambiente (kg/m<sup>3</sup>);
- g gravidade (m/s<sup>2</sup>);
- t tempo para o líquido manométrico ir de h<sub>0</sub> até h<sub>1</sub> (s);
- h<sub>0</sub> nível de água inicial (m);
- h<sub>1</sub> nível de água final (m), no tempo t.

O procedimento de ensaio estabelece que  $\ln(h_0/h_1) = 1$ . Para respeitar-se esta relação, adotou-se uma altura inicial de leitura  $h_0 = 40$  cm e altura final  $h_1 = 14,6$  cm a partir do nível de água. No entanto, a relação dada pela teoria simplificada não se aplica desde o início do escoamento (MARTINS, 2001). Dessa forma, torna-se necessário um bombeamento adicional, elevando-se o líquido manométrico superior a  $h_0$ , de modo que ao iniciar-se a contagem do tempo quando o líquido atinge  $h_0$  o fluxo já apresenta comportamento linear. Para isso adotou-se a altura de 45 cm.

### 5.7.6 – Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizados seguindo os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 1995). Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e os ensaios foram realizados nas seguintes idades após moldagem: 28, 56 e 90 dias para os corpos-de-prova submetidos a cura térmica, ao ar e cura por imersão. Para cada idade de ensaio foram moldados quatro corpos-de-

prova. As determinações da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizadas utilizando-se as mesmas amostras.

Os corpos-de-prova foram secos em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5^\circ\text{C})$ . As amostras permaneceram na estufa por um período de 24 horas, quando foram retiradas e resfriaram em ambiente de laboratório (temperatura aproximada de  $25^\circ\text{C}$  e umidade relativa próxima a 65%) por um período de 8 horas. Após o resfriamento os corpos-de-prova foram pesados e, em seguida, colocados submersos em água por mais 24 horas, quando foram retirados da água e pesados novamente.

A absorção de água por imersão foi calculada pela Equação 5.4.

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\%) \quad \text{(Equação 5.4)}$$

Onde:

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado;

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco em estufa.

O índice de vazios foi determinado de acordo com a Equação 5.5.

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (\%) \quad \text{(Equação 5.5)}$$

Onde:

$M_i$  = massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água.

E a massa específica foi determinada utilizando-se a Equação 5.6

$$\frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad (\text{g/cm}^3) \quad \text{(Equação 5.6)}$$

## 5.8 – Análise Estatística

Os dados obtidos em laboratório foram analisados por estatística descritiva e por análise de variância (ANOVA) de forma que os resultados se apresentassem em um intervalo de confiança de 95%. Em todos os ensaios, tomou-se como procedimento descartar os valores individuais que variaram mais do que 10% em relação à média. Nos resultados obtidos para as resistências à compressão e à tração por compressão diametral foi efetuada a análise de regressão.

A análise de regressão é um método utilizado para o estabelecimento de fórmulas empíricas entre duas ou mais variáveis, relacionando essas variáveis por leis estatísticas. Dessa forma, a análise de regressão teve como objetivo obter fórmulas de funções matemáticas que reaperntassem o comportamento das resistências mecânicas dos concretos ao longo do tempo.

A estatística descritiva teve como objetivo a organização e descrição dos dados experimentais. A análise de variância (ANOVA) teve como objetivo determinar diferenças significativas entre médias, a ANOVA foi aplicada utilizando-se o Método de Tukey.

# 6

## RESULTADOS E ANÁLISE

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, permeabilidade ao ar, absorção capilar, absorção total, índice de vazios, carbonatação natural e massa específica dos concretos utilizados na pesquisa experimental.

Os dados obtidos em laboratório foram analisados por estatística descritiva e análise de variância (ANOVA), de forma que os resultados se apresentassem dentro de um intervalo de confiança de 95%. Da mesma forma, foi efetuada uma análise de regressão nos resultados obtidos para as resistências à compressão e à tração por compressão diametral, conforme descrito no item 5.8 do Capítulo 5. Os gráficos e resultados da análise estatística estão apresentados nos apêndices A, B e C.

Os resultados dos ensaios de propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos serão apresentados separadamente para os concretos produzidos com cimentos CP V ARI e CP III.

### **6.1 – Concretos Produzidos com Cimento Portland CP V ARI**

#### **6.1.1 – Resistência Mecânica**

As resistências à compressão e à tração por compressão diametral foram medidas nos concretos estudados, de acordo com a metodologia descrita nos itens 5.7.1 e 5.7.2 do Capítulo 5.

### a) Resistência à Compressão Axial

A Figura 6.1 apresenta os resultados de resistência à compressão axial obtidos com os concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI e cimento Portland CP V ARI com sílica ativa, em substituição ao cimento na proporção de 10%. Os concretos foram submetidos a diferentes procedimentos de cura: cura em ambiente de laboratório (denominada simplesmente por cura ambiente - AMB), cura térmica (denominada simplesmente por cura térmica e representada pela sigla 60) e cura por imersão em água até a idade de 7 dias (denominada simplesmente por cura imersa - IME).

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a resistência à compressão dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa, estão apresentados no apêndice A1. Os gráficos apresentando a análise de regressão (curvas de tendência) para a resistência à compressão estão apresentados no apêndice C1.

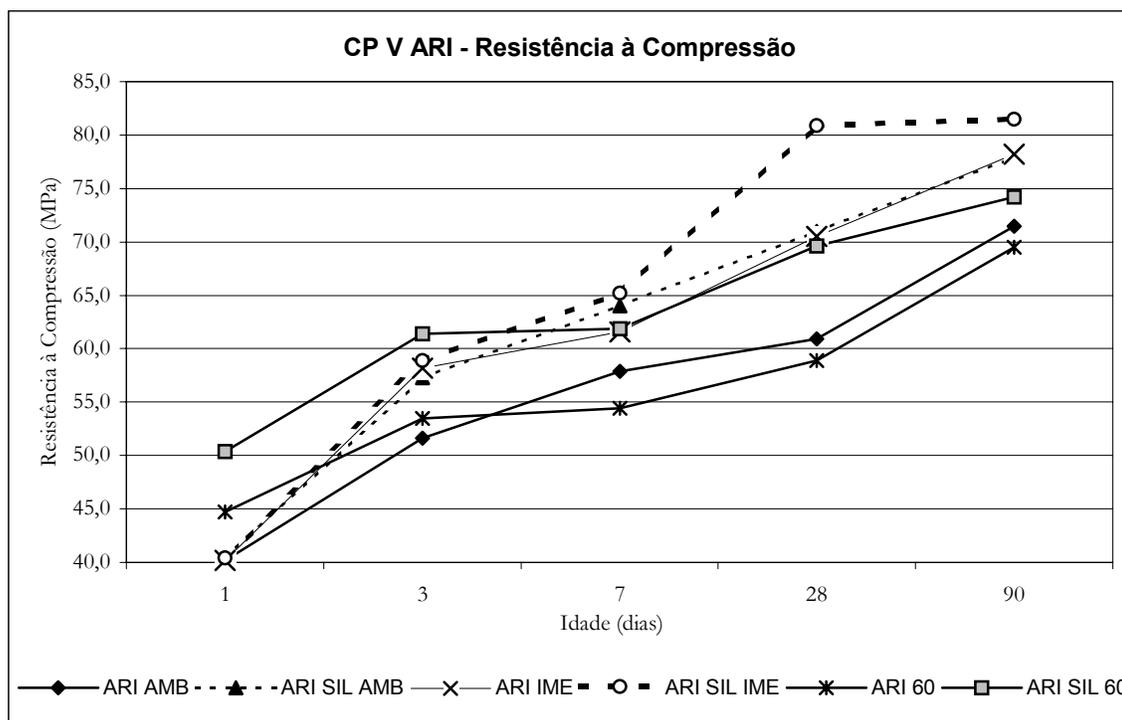


Figura 6.1 – Resistências à compressão de concretos produzidos com CP V ARI com e sem sílica ativa.

Da Figura 6.1 observa-se que cada tipo de cura teve um comportamento diferenciado tanto para concretos sem sílica ativa quanto para concretos com sílica ativa.

### **a.1) Cura Ambiente**

Os concretos ARI-AMB e ARI-SIL-AMB apresentaram resultados similares para a idade de 1 dia: 40,2 e 40,4 MPa, respectivamente.

Nos concretos com o cimento substituído por sílica ativa na proporção de 10% em massa ocorreu um aumento de resistência estatisticamente significativo em comparação ao concreto sem sílica ativa nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias. Aos 28 dias, o concreto com sílica ativa apresentou resistência 17% maior do que o concreto sem sílica ativa. Aos 90 dias o concreto ARI-SIL-AMB apresentou resistência 9% maior da apresentada pelo concreto sem sílica ativa (ARI-AMB).

### **a.2) Cura Térmica**

Na cura térmica foi observado um ganho de resistência à compressão estatisticamente significativo com 1 dia de idade comparando-se com os concretos ARI-60 e ARI-SIL-60. O concreto ARI-SIL-60 apresentou maior evolução da resistência (15% maior do que a resistência apresentada pelo ARI-60). Observou-se, também, que os concretos submetidos à cura térmica (com e sem sílica ativa) apresentaram resistências à compressão maiores do que as resistências obtidas para os concretos submetidos aos demais tipos de cura nessa idade (diferenças estatisticamente significativas).

A partir da idade de 7 dias, os concretos submetidos à cura térmica apresentaram resistências menores do que os concretos submetidos aos demais tipos de cura. Mesmo assim, continuaram ganhando resistência mecânica até a idade de 90 dias.

### **a.3) Cura Imersa**

Os resultados obtidos pelos concretos submetidos à cura imersa apresentaram as maiores resistências à compressão em comparação com os demais tipos de cura. Isso ocorreu a partir da idade de 3 dias para concretos sem sílica ativa, sendo 13% maior do que o ARI-AMB e 9% maior do que o ARI-60 nessa idade (valores estatisticamente significativos), e a partir de 7 dias para os

concretos com sílica ativa, sendo 2% maior do que o ARI-SIL-AMB e 5% maior do que o ARI-SIL-60 nessa idade. O concreto ARI-SIL-IME até a idade de 7 dias não apresentou resistências estatisticamente significativas em comparação aos concretos submetidos aos demais tipos de cura. A partir desta idade houve um crescimento de resistência estatisticamente significativo. Na idade de 28 dias o concreto ARI-SIL-IME apresentou resistência 15% maior que o concreto ARI-IME. Na idade de 90 dias o concreto ARI-SIL-IME foi o que apresentou maior resultado para a resistência à compressão dentre todos os concretos utilizados na pesquisa experimental. O concreto ARI-IME atingiu 96% da resistência do concreto ARI-SIL-IME aos 90 dias.

#### **a.4) Resistência à Compressão Axial – Observações Gerais – CP V ARI**

Observou-se que a cura térmica apresentou valores mais altos de resistência à compressão para a idade de 1 dia, sendo da ordem de 11% para os concretos sem sílica ativa e da ordem de 25% para concretos com sílica ativa, sendo esses valores estatisticamente significativos em comparação aos concretos submetidos às curas ambiente e imersa.

Para os concretos sem sílica ativa, na idade de 3 dias, apenas o concreto submetido à cura imersa apresentou resistência maior do que o ARI-60, sendo essa diferença de 9%. O ARI-60 apresentou nessa idade uma resistência 4% maior do que o ARI-AMB (diferença que não é estatisticamente significativa).

Nos concretos com sílica ativa, na idade de 3 dias, a maior resistência foi obtida pelo ARI-SIL-60, sendo 7% e 4% maior do que as resistências obtidas pelos concretos submetidos as curas ambiente e imersa, respectivamente (diferenças que não são estatisticamente significativas). O concreto submetido à cura térmica com sílica ativa apresentou resistência 15% maior do que o ARI-60 (diferença estatisticamente significativa).

A partir da idade de 7 dias, os concretos submetidos à cura térmica apresentaram resistências menores do que os concretos submetidos aos demais tipos de cura. Entretanto, o concreto ARI-SIL-60 apresentou resistências maiores do que o ARI-60, sendo 14% maior aos 7 dias, 18% maior aos 28 dias e 7% maior aos 90 dias (somente na idade de 90 dias a diferença não foi estatisticamente significativa).

Os concretos submetidos à cura imersa foram os que apresentaram o melhor desempenho dentre todos os concretos dessa pesquisa experimental. Na idade de 90 dias os concretos submetidos à cura imersa com sílica ativa apresentaram resistência 5% e 10% maior das obtidas

pelos concretos submetidos as curas ambiente e térmica respectivamente. Para concretos sem sílica ativa a cura imersa apresentou aos 90 dias valor de resistência à compressão similar aos obtidos nas curas ambiente e térmica.

Deve-se observar que a quantidade de clínquer presente no cimento Portland CP V ARI é por si só ativadora das reações de hidratação e o uso da cura térmica não contribuiu para acelerar as reações de hidratação e elevar de maneira expressiva a resistência dos concretos sem sílica ativa nas idades iniciais em comparação às curas ambiente e imersa. Entretanto, nos concretos com sílica ativa o valor obtido para a resistência a compressão, na idade de 1 dia em concretos submetidos à cura térmica, foi expressivo em comparação aos concretos submetidos às curas ambiente e imersa, e também em comparação aos concretos sem sílica ativa.

Foi observado que no concreto com sílica ativa a evolução de resistência obtida na cura térmica, em termos percentuais, foi maior do que o dobro da ocorrida no concreto sem sílica ativa para a idade de 1 dia. De acordo com Cohen & Klitsikas (1986) isto ocorre pelo fato da reação pozolânica da sílica ativa depender muito da temperatura nas idades iniciais, mas não ser tão dependente nas idades finais.

Também foi observado que os concretos produzidos com sílica ativa apresentaram em todas as idades e tipos de cura estudados um melhor desempenho para a resistência a compressão, quando comparado aos concretos sem sílica ativa; isso ocorre, pois, concretos com adições pozolânicas tais como a sílica ativa, apresentam estruturas de pasta mais compacta, o que se explica pelo melhor preenchimento dos vazios (efeito *filler*) e também ao fato da sílica ativa diminuir a espessura da zona de transição (COHEN & KLITSIKAS, 1986; PAULON, 1996; ISAILA *et al.*, 2003; RAO, 2003).

## **b) Resistência à Tração por Compressão Diametral**

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral obtidos para concretos de cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa estão apresentados na Figura 6.2.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa estão apresentados no apêndice A2. Os gráficos apresentando a análise de regressão (curvas de tendência) para a resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no apêndice C2.

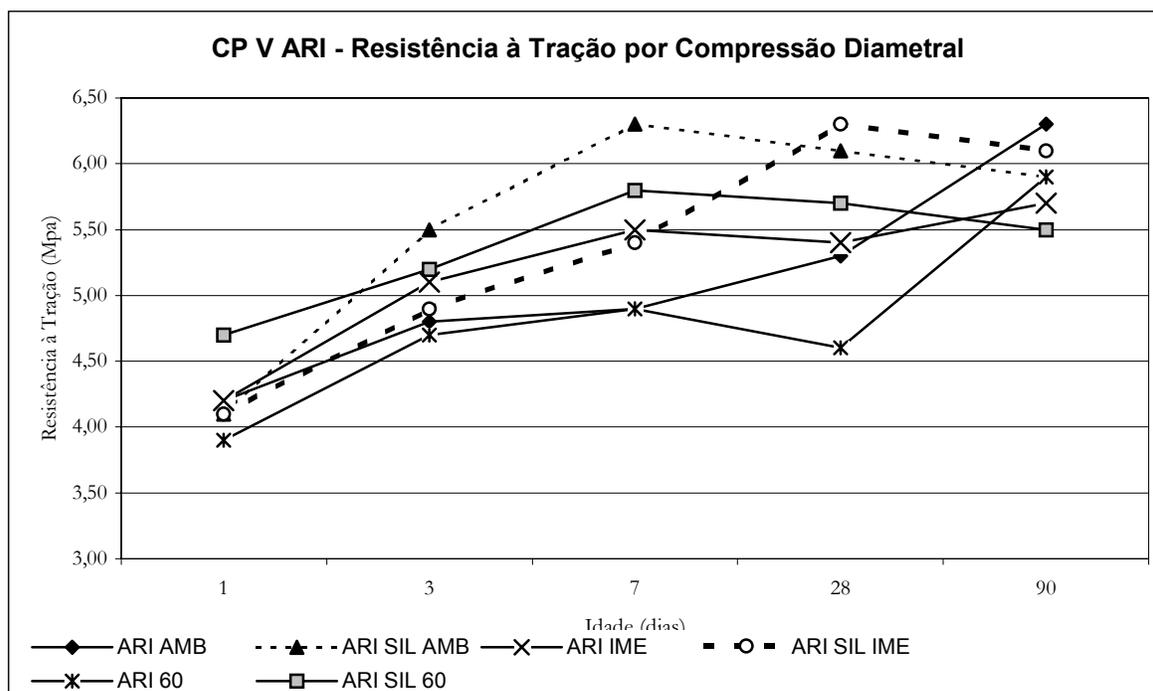


Figura 6.2 – Resistências à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com CP V ARI com e sem sílica ativa.

Os resultados observados mostram que as resistências à tração por compressão diametral dos concretos estudados apresentaram valores próximos entre eles e estão concentrados dentro de uma faixa (apresentando variação entre resultados de 0,8 MPa a 1,7 MPa). Assim, dentre todos os concretos estudados a diferença máxima entre o menor valor (ARI-60) e o maior valor (ARI-SIL-IME) foi de 1,7 MPa na idade de 28 dias. Observou-se que na idade de 1 dia o concreto ARI-SIL-60 apresentou o melhor resultado dentre os demais concretos nessa idade, apresentando uma diferença estatisticamente significativa em comparação aos demais concretos.

A evolução de resistência entre a idade de 24 horas até a idade de 3 dias variou de 11% (ARI-SIL-60), menor evolução de resistência, até 34% (ARI-SIL-AMB) maior evolução de resistência apresentada.

Na idade de 7 dias observou-se que nos concretos ARI-AMB e ARI-60 não ocorreram evolução significativa de resistência. A maior resistência foi apresentada pelo ARI-SIL-AMB com uma evolução de resistência da ordem de 54% em relação à idade de 24 horas.

Todos os demais concretos mantiveram resistências próximas, apresentando uma média de evolução de resistência de 29% em relação à idade de 24 horas.

Na idade de 28 dias observou-se que o concreto ARI-SIL-IME apresentou o melhor resultado dentre todos os concretos analisados, tendo uma evolução de resistência na ordem de 54% em relação à idade de 24 horas. Os demais concretos mantiveram resistências similares às aquelas obtidas na idade de 7 dias ou apresentaram pouca evolução de resistência até a idade de 28 dias.

Foi observado que até a idade de 28 dias os resultados obtidos pelos concretos com sílica ativa são estatisticamente significativos em comparação aos resultados obtidos pelos concretos sem sílica ativa.

Na idade de 90 dias todos os concretos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas de resistências entre si. Os concretos com sílica ativa não apresentaram evolução de resistência significativa desde a idade de 28 dias (apresentaram resistência similar à obtida na idade de 28 dias). Os concretos ARI-AMB e ARI-60 foram os que apresentaram maior evolução de resistência sendo, respectivamente, da ordem de 19% e 28% em relação à idade de 28 dias. O concreto ARI-IME teve uma evolução de resistência de 6% desde a idade de 28 dias até a idade de 90 dias.

Foi observado que em termos percentuais à resistência a tração apresentou valores em relação à resistência à compressão da ordem de 10% nas idades iniciais (até a idade de 7 dias) e da ordem de 8% em idades mais avançadas (28 dias e 90 dias).

### **6.1.2 – Permeabilidade ao ar**

O ensaio de permeabilidade ao ar teve como objetivo avaliar qualitativamente a estrutura porosa interna do concreto, medindo-se o tempo no qual o fluxo de ar sob pressão atmosférica passava através da amostra. Os ensaios foram feitos usando o permeâmetro descrito no Capítulo 5 – item 5.7.5.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a permeabilidade ao ar dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa estão apresentados no apêndice A3.

Nesse trabalho experimental, para os concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa, os melhores resultados para a permeabilidade ao ar foram obtidos pelos concretos submetidos à cura imersa. Os valores da permeabilidade ao ar nos concretos produzidos sem sílica ativa foram piores para a cura ambiente e os concretos submetidos à cura

térmica apresentaram resultados de permeabilidade ao ar próximo aos da cura ambiente (Figura 6.3).

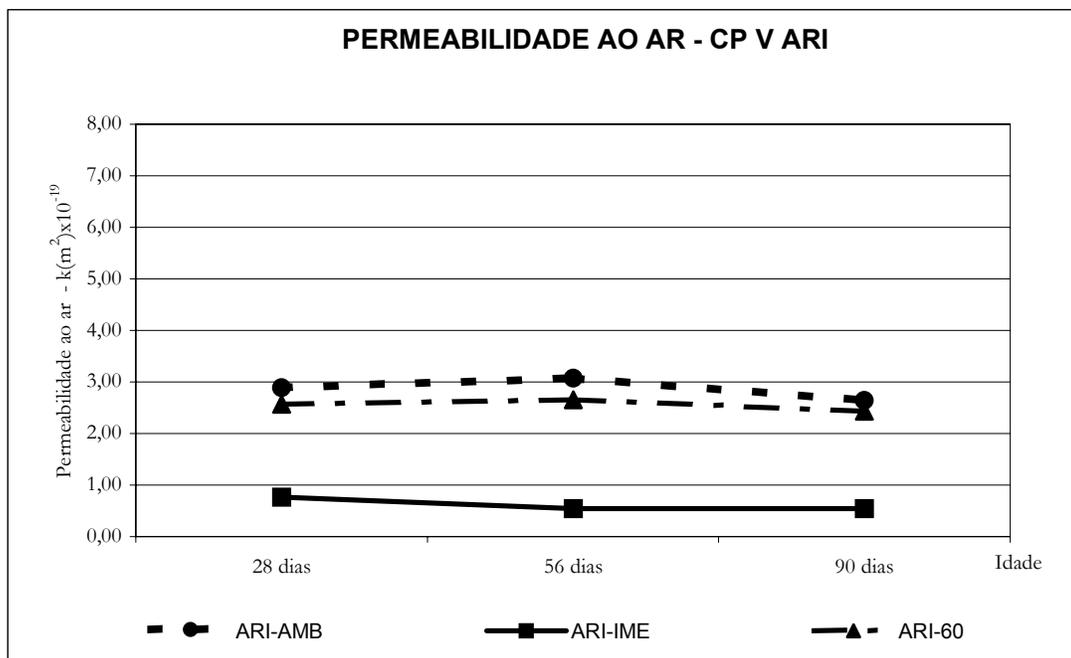


Figura 6.3 - Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI.

Na Figura 6.3 observou-se que os concretos submetidos às curas térmica e ambiente apresentaram respectivamente valores para a permeabilidade ao ar em média de 4 e 5 vezes maiores do que os obtidos nos concretos submetidos à cura imersa (valores estatisticamente significativos).

Os menores valores de permeabilidade obtidos para os concretos submetidos à cura imersa e os resultados mais elevados para a permeabilidade obtidos para os concretos curados ao ar e em cura térmica a 60 °C, estão de acordo com os resultados obtidos por Martins (2001) e Ferreira Junior (2003).

Portanto, fica evidenciado que o tipo de cura afeta a permeabilidade dos concretos. Deve-se salientar que a temperatura de cura não interfere nos produtos de hidratação do cimento, mas influencia na porosidade das pastas de cimento (SILVA, 1998). Isso pode ser atribuído ao fato de que em temperaturas elevadas de cura a hidratação do cimento apresenta uma estrutura diferente, devido à aceleração da velocidade de hidratação, impedindo assim, uma hidratação completa ao longo do tempo (CAMARINI, 1995).

Desta forma, o aumento da porosidade da pasta ocorre devido ao aumento da temperatura de cura. Quando o concreto é curado à temperatura ambiente e em condições de umidade satisfatória, tem-se um tempo suficientemente adequado para a melhor distribuição e precipitação dos compostos hidratados nos espaços existentes entre os grãos de cimento. Entretanto, quando a hidratação é acelerada pelo aumento da temperatura de cura, ocorre uma concentração de compostos hidratados ao redor do grão de cimento (uma espécie de carapaça hidratada). Essa carapaça hidratada dificulta a difusão de íons e, conseqüentemente, o prosseguimento da hidratação, aumentando a porosidade (CAMARINI, 1995; KJELLENSEN et al., 1991; KJELLENSEN; DETWILER, 1992; CAMARINI, 1995 *apud* SILVA, 1998).

Nos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com sílica ativa também foi observado os piores resultados de permeabilidade para os concretos submetidos à cura ambiente, os concretos submetidos à cura térmica apresentaram resultados de permeabilidade ao ar próximo aos dos obtidos pela cura ambiente (semelhantemente aos concretos sem utilização de sílica ativa). O concreto submetido à cura imersa apresentou o melhor resultado.

Os resultados da permeabilidade na idade de 56 dias para as curas ambiente e térmica demonstraram serem atípicos e podem ser creditados a problemas de variabilidade do ensaio (Figura 6.4).

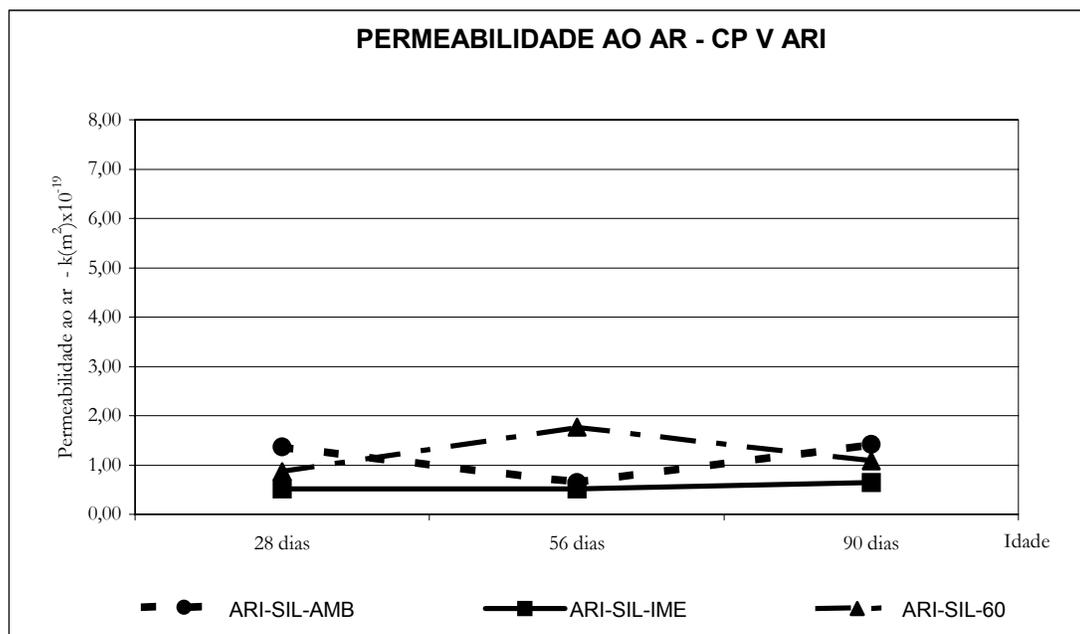


Figura 6.4 - Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com sílica ativa.

Com a utilização de sílica ativa, observou-se que os concretos submetidos às curas térmica e ambiente apresentaram, respectivamente, valores para a permeabilidade ao ar em média de 2 e 2,5 vezes maiores dos obtidos para os concretos submetidos à cura imersa (valores estatisticamente significativos).

Na idade de 28 dias o concreto submetido à cura imersa com sílica ativa apresentou uma permeabilidade 49% menor da apresentada pelo concreto sem sílica ativa (diferença estatisticamente significativa). Na idade de 56 dias os concretos submetidos à cura imersa, com e sem sílica ativa, apresentaram valores semelhantes para a permeabilidade ao ar. Entretanto, na idade de 90 dias o concreto ARI-SIL-IME apresentou uma permeabilidade 20% menor da obtida para o ARI-IME (diferença estatisticamente significativa).

Dessa forma fica evidenciado o melhor comportamento dos concretos com sílica ativa com relação à permeabilidade o que vai influenciar na durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.

Os resultados de permeabilidade mais baixa obtidos para os concretos com sílica ativa são devidos à formação do C-S-H adicional liberado pela reação pozolânica da hidratação da sílica ativa, que preenche os espaços vazios na matriz da pasta resultando em uma microestrutura mais densa e compacta (COHEN & KLITSIKAS, 1986; DA SILVA, 1995; COLAK, 2003; RAO, 2003; ALMUSALLAM *et al.*, 2004).

### **6.1.3 – Absorção Capilar**

Os ensaios de absorção capilar e a determinação do coeficiente de absorção capilar (coeficiente de absorção inicial) foram realizados de acordo com o descrito no item 5.7.4 do Capítulo 5. O ensaio de absorção capilar teve como objetivo avaliar qualitativamente a estrutura porosa do concreto na camada de cobrimento. Esse ensaio avalia a quantidade de água que o material absorve por unidade de área (absorção capilar), a quantidade de água por unidade de área em um determinado tempo (coeficiente de absorção capilar) e a altura de penetração da água pelos poros capilares (ascensão capilar).

As Figuras 6.5 a 6.7 apresentam, respectivamente, os resultados de absorção inicial, coeficiente de absorção inicial e absorção capilar após 24 horas dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI (com e sem sílica ativa) nas idades de 28, 56 e 90 dias.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a absorção inicial dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa estão apresentados no apêndice A4 e para a absorção capilar no apêndice A5.

A Figura 6.5 apresenta os valores obtidos para a absorção inicial nos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI, com e sem sílica ativa.

Nos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa, os valores da absorção inicial foram maiores para a cura ambiente em todas as idades ensaiadas. Os concretos submetidos às curas térmica e imersa apresentaram, para todas as idades, valores próximos entre si. Portanto, esses dados estão de acordo com, Camarini (1999), Martins (2001), Ferreira Junior (2003), Couto (2003), onde se expressa a importância dos procedimentos de cura no concreto.

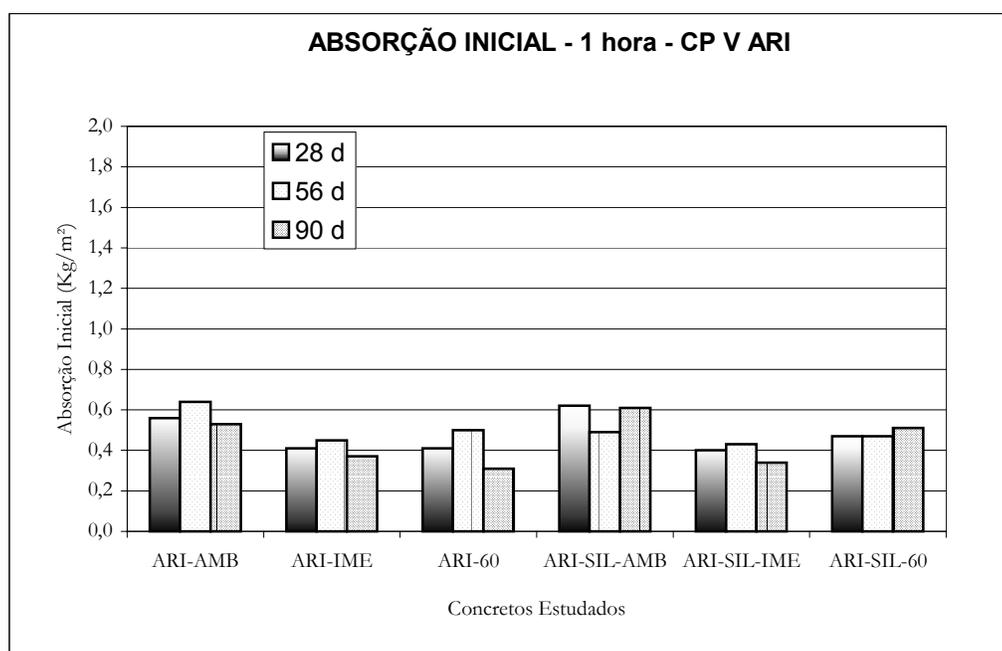


Figura 6.5 - Absorção inicial em concretos com CP V ARI com e sem sílica ativa.

De acordo com Balayssac et al. (1993), poros de diâmetro maior que 10 $\mu$ m contribuem somente para a taxa de absorção inicial, sendo dos poros menores a contribuição a partir desse período. Desse modo, como a absorção inicial representa o preenchimento dos poros maiores, e a fase física da ação da sílica ativa atua dentro do refinamento do sistema de vazios da pasta de cimento, observa-se que os resultados obtidos para a absorção inicial nos concretos com sílica ativa não apresentaram evidência da ação física que era esperada. Esse fato pode ser atribuído à

qualidade inferior da camada de cobrimento do concreto (concreto de pele), situação que ocorre em todos os concretos utilizados em construções e é devida a problemas tais como: falha na compactação, uma maior exposição à secagem, às condições de exposição do concreto, e também a segregação e exsudação, que resultam em concretos com maior porosidade e conseqüentemente sujeitos a maior penetração de água e outros agentes; dessa forma o concreto de pele tem o prosseguimento das reações de hidratação prejudicado pela perda facilitada de sua umidade natural, resultando em uma superfície mais porosa e de poros mais interconectados do que nas regiões mais internas do concreto (MARTINS, 2001; PETRY *et al.*, 2004).

A Figura 6.6 apresenta o coeficiente de absorção inicial dos concretos com CP V ARI.

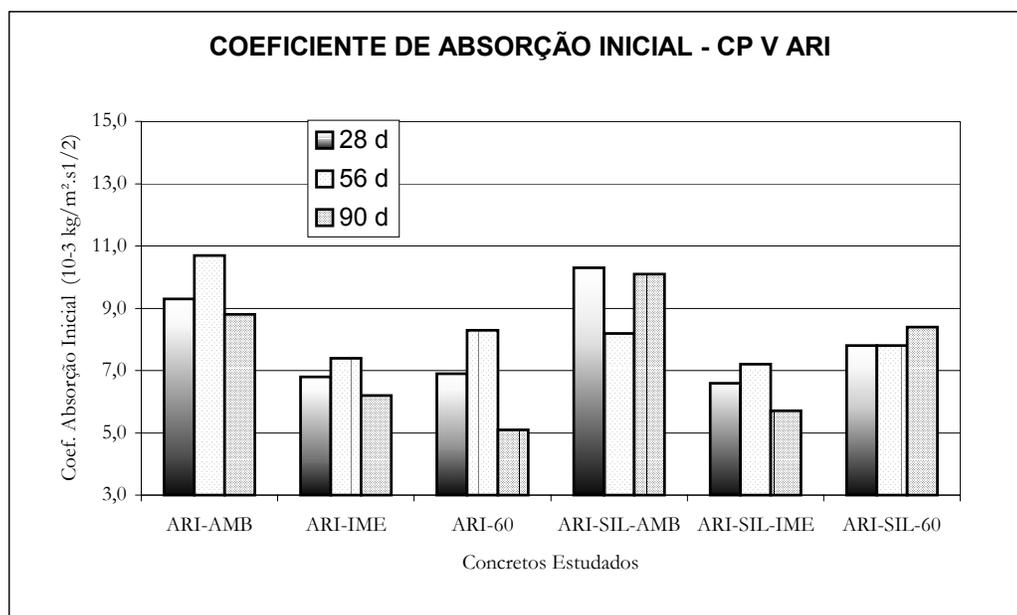


Figura 6.6 – Coeficiente de absorção inicial em concretos com CP V ARI com e sem sílica ativa.

Foi observado que o comportamento do coeficiente de absorção inicial (Figura 6.6) é semelhante ao apresentado pela absorção inicial (Figura 6.5). Os valores elevados apresentados pelos concretos com sílica ativa indicam uma quantidade de poros maiores do que 10  $\mu\text{m}$  na região correspondente à camada de cobrimento (concreto de pele).

A Figura 6.7 apresenta os valores obtidos para a absorção capilar após 24 horas nos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI, com e sem sílica ativa.

Para a absorção capilar medida após 24 horas nos concretos produzidos com e sem sílica ativa, o melhor desempenho foi para os concretos submetidos à cura imersa, os concretos

submetidos à cura ambiente apresentaram o pior desempenho, observamos que os concretos submetidos às curas ambiente e térmica apresentam uma maior quantidade de pequenos capilares no seu interior, demonstrando a importância do tipo de cura para o desenvolvimento dos produtos de hidratação dos aglomerantes utilizados na produção dos concretos. Os resultados indicam que a absorção capilar decresce da superfície para o interior do concreto.

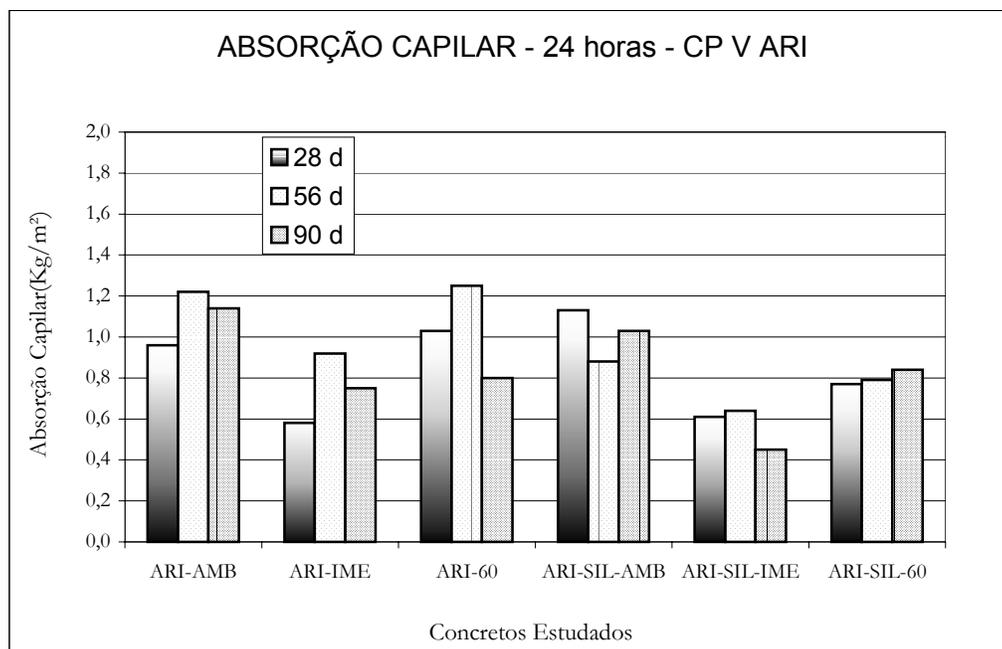


Figura 6.7 - Absorção capilar em concretos com CP V ARI com e sem sílica ativa.

Na cura imersa ocorrem os melhores resultados devido às condições de umidade e temperatura proporcionada pela presença da água durante a cura do concreto, evitando perda de água de hidratação e proporcionando o preenchimento dos espaços vazios da matriz da pasta pelos produtos de hidratação do cimento (CAMARINI, 1999).

Os concretos com sílica ativa apresentaram melhor desempenho em relação aos concretos sem a sílica ativa. Observando-se, dessa forma, o efeito benéfico da sílica ativa na absorção por capilaridade. Isso ocorre, pois cada grama de sílica ativa produz cerca de 3 vezes mais produtos hidratados do que os produzidos por uma grama de cimento, conseqüentemente a porosidade capilar é reduzida (COHEN & KLITSIKAS, 1986).

Assim, os menores resultados obtidos para a absorção capilar nos concretos com sílica ativa são devidos à formação do C-S-H adicional liberado pela reação pozolânica da hidratação da sílica ativa, que preenche os espaços vazios na matriz da pasta resultando em uma microestrutura

mais densa e compacta (COHEN & KLITSIKAS, 1986; DA SILVA, 1995; COLAK, 2003; RAO, 2003; ALMUSALLAM et al., 2004).

#### 6.1.4 - Ascensão Capilar

A Figura 6.8 apresenta os valores obtidos para a ascensão capilar nos concretos produzidos com e sem sílica ativa. Os menores valores de ascensão capilar foram obtidos para os concretos submetidos à cura imersa; portanto, esses valores destacam a importância da aplicação de procedimentos adequados de cura no concreto.

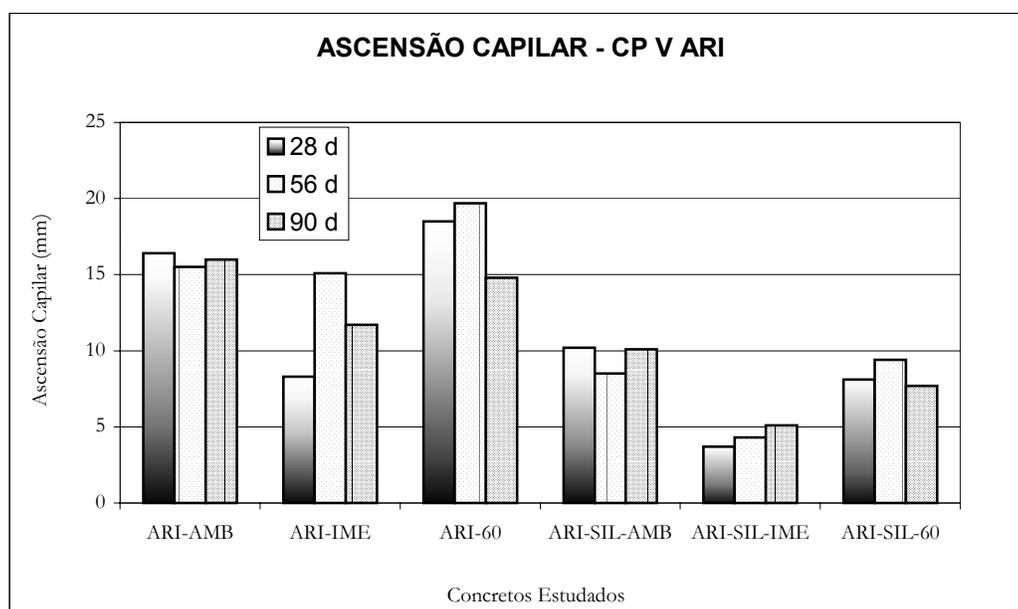


Figura 6.8 - Valores de ascensão capilar para concretos produzidos com CP V ARI, com e sem sílica ativa.

Embora os concretos sem sílica ativa submetidos à cura ambiente apresentaram valores de absorção capilar similares aos obtidos para a cura térmica (Figura 6.7), os concretos submetidos à cura térmica apresentaram uma ascensão capilar maior do que a obtida nos concretos submetidos à cura ambiente (Figura 6.8). Isso ocorre, pois o movimento da água no interior do concreto não é função apenas do número de poros, mas também do diâmetro, da distribuição e da interconexão entre eles.

McCartier et al. (1992) relataram que um procedimento de cura que propicie uma estrutura porosa grosseira pode apresentar quantidade de água absorvida semelhante a outras amostras,

embora possa apresentar maior altura de penetração de água. Isso acontece, pois a água absorvida pelo concreto preenche primeiro os poros capilares de dimensões maiores que se concentram na região da camada de cobrimento do concreto e somente depois que os poros capilares maiores estão preenchidos é que a água absorvida irá preencher os poros capilares menores que se encontram no interior do concreto. Dessa forma, pode-se ter concretos com a mesma quantidade de água absorvida com valores de ascensão capilar diferentes.

Da Figura 6.8 observa-se que os valores da ascensão capilar para os concretos com sílica ativa são menores do que os obtidos para concretos sem sílica ativa (valores são estatisticamente significativos). Constatou-se o efeito benéfico da sílica ativa na ascensão capilar dos concretos em todos os tipos de cura utilizados; isso é atribuído à formação do C-S-H adicional liberado pela reação pozolânica da hidratação da sílica ativa.

Fica evidenciado que os concretos produzidos com sílica ativa apresentam uma menor quantidade de poros capilares no seu interior se comparado aos concretos sem sílica ativa, pois os espaços vazios da pasta são preenchidos pelos produtos de hidratação da sílica ativa.

Os dados obtidos para a ascensão capilar de concretos sem sílica ativa estão de acordo com os obtidos por Martins (2001) e Ferreira Junior (2003).

### **6.1.5 – Absorção Total e Índice de Vazios**

Os ensaios de absorção total e índice de vazios foram realizados de acordo com o descrito no item 5.7.6 do Capítulo 5. Os ensaios de absorção total e índice de vazios tiveram como objetivo avaliar qualitativamente a estrutura porosa do concreto. A absorção total avalia a quantidade de água que o material absorve (em porcentagem) durante um determinado período de tempo no qual o concreto permanece totalmente imerso na água e o índice de vazios avalia a quantidade de espaços vazios internos existente nesses concretos (em porcentagem).

As Figuras 6.9 a 6.12 apresentam os valores obtidos para a absorção total e índice de vazios nos concretos produzidos com e sem sílica ativa.

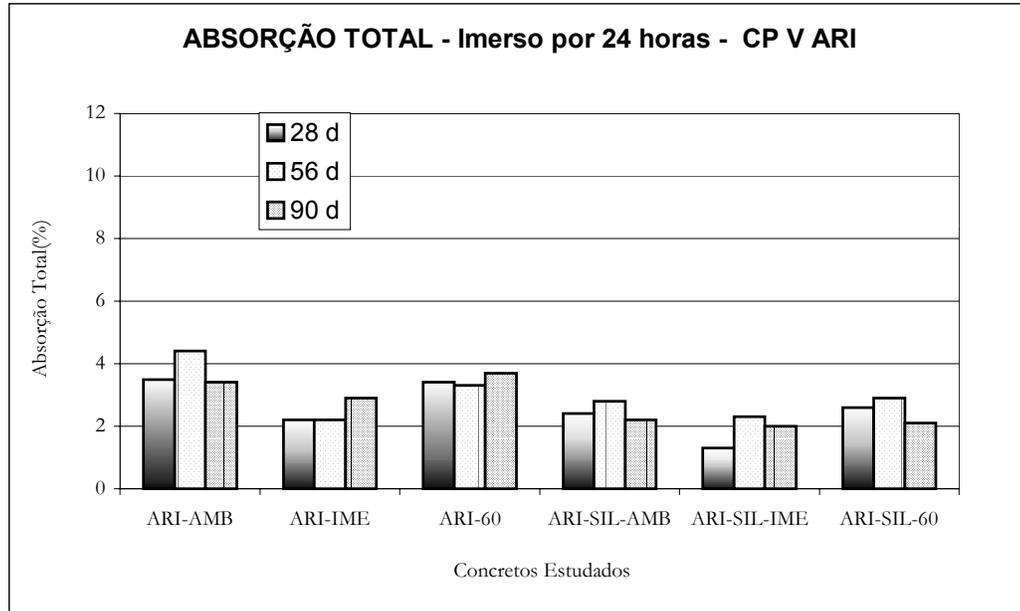


Figura 6.9 - Absorção total - CP V ARI, com e sem sílica ativa, imersos em água por 24 horas.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a absorção total dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa estão apresentados nos apêndices A6 e A7 e para o índice de vazios nos apêndices A8 e A9.

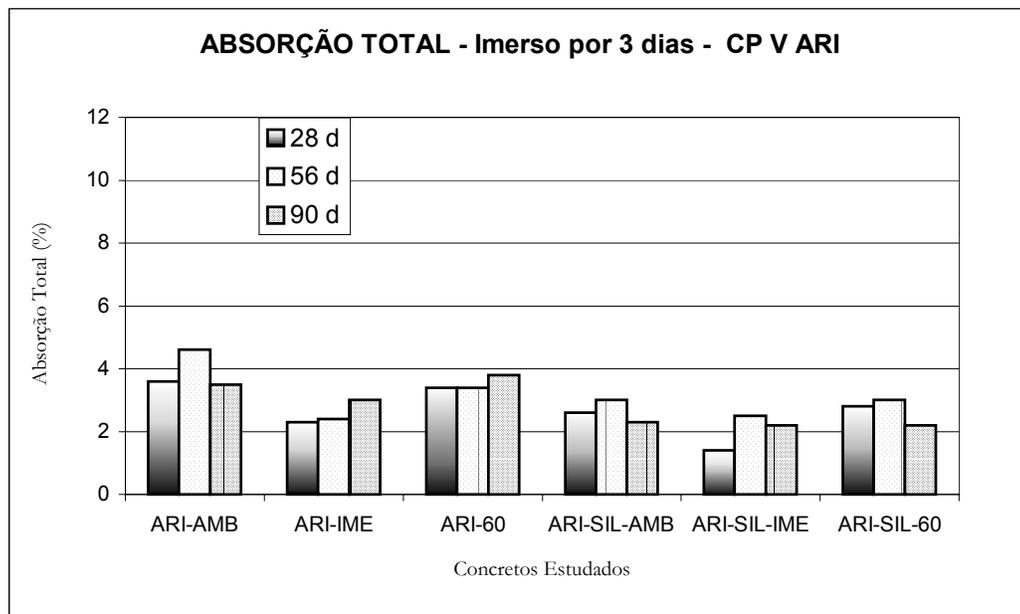


Figura 6.10 - Absorção total - CP V ARI, com e sem sílica ativa, imersos em água por 3 dias.

A absorção de água obtida nos concretos imersos em água por 24 horas e imersos por 3 dias, não apresentaram diferenças significativas em seus valores, apresentando praticamente os mesmos valores de absorção total (em porcentagem) quando comparando-se concretos iguais, na mesma idade e submetidos ao mesmo tipo de cura (Figuras 6.9 e 6.10).

Nas figuras 6.9 e 6.10 observaram-se que os concretos submetidos à cura imersa apresentaram uma menor quantidade de água absorvida em comparação aos concretos submetidos às curas ambiente e térmica. Entretanto, os concretos com sílica ativa apresentaram um melhor desempenho em comparação aos concretos sem sílica ativa. Esses resultados estão de acordo com valores obtidos por Couto et al. (2003) em estudo realizado sobre curas de concreto com utilização de sílica ativa.

O melhor desempenho para os concretos com sílica ativa é atribuído à formação do C-S-H adicional liberado pela reação pozolânica da hidratação da sílica ativa que preenche os espaços vazios da matriz da pasta diminuindo a porosidade do concreto (COHEN & KLITSIKAS, 1986; DA SILVA, 1995; COLAK, 2003; RAO, 2003; ALMUSALLAM et al., 2004).

O índice de vazios obtido nos concretos imersos em água por 24 horas e imersos por 3 dias não apresentaram diferenças significativas em seus valores, apresentando praticamente os mesmos valores (em porcentagem) quando comparando-se concretos iguais, submetidos aos mesmos procedimentos de cura nas mesmas idades. (Figuras 6.11 e 6.12).

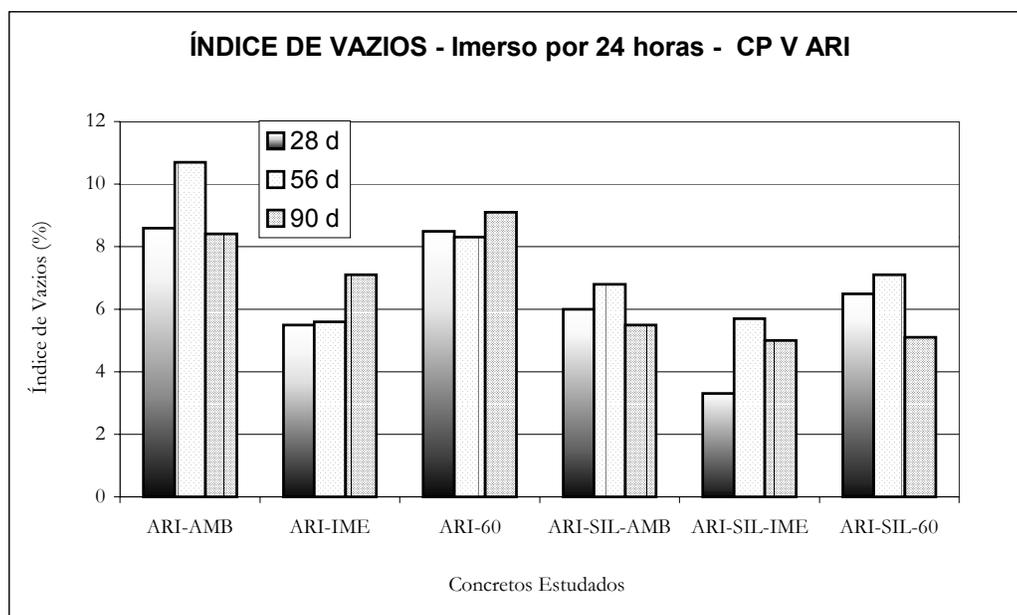


Figura 6.11 – Índice de vazios - CP V ARI, com e sem sílica ativa, imersos em água 24 horas.

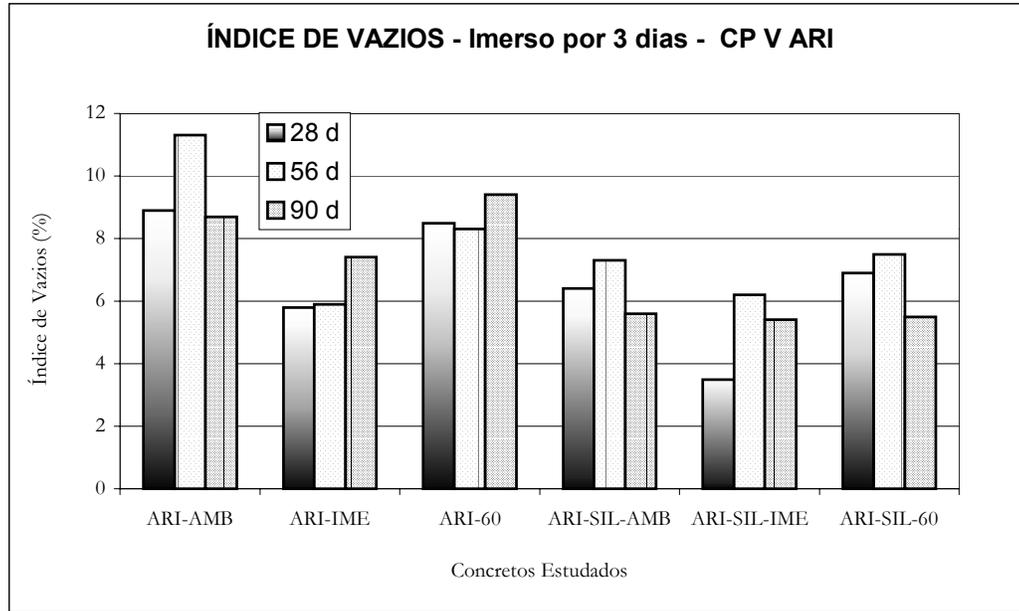


Figura 6.12 – Índice de vazios - CP V ARI, com e sem sílica ativa, imersos em água por 3 dias.

Para os concretos produzidos com sílica ativa, observou-se que o tipo de cura não influenciou significativamente no índice de vazios, apresentando para a idade de 90 dias valores idênticos para os três tipos de cura empregados.

Entretanto, nos concretos sem sílica ativa, observou-se que a cura imersa apresentou valores menores para o índice de vazios do que os obtidos pelos concretos submetidos às curas ambiente e térmica. Em geral, os índices de vazios obtidos pelos concretos submetidos às curas ambiente e térmica apresentaram valores similares entre si.

Deve-se observar que os valores obtidos para a absorção total e índice de vazios nos concretos com sílica ativa submetidos à cura térmica, na idade de 90 dias, apresentaram um desempenho melhor do que os concretos submetidos à cura térmica sem sílica ativa, diferentemente dos valores obtidos para a absorção capilar em concretos com sílica ativa e submetidos à cura térmica aos 90 dias (Figura 6.7). Isso é atribuído à diferença dos procedimentos de realização dos ensaios (itens 5.7.4 e 5.7.6 - Capítulo 5).

### 6.1.6 – Carbonatação Natural

Os ensaios de carbonatação natural foram realizados de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 5, item 5.7.3.

A carbonatação natural dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa estão apresentados na Figura 6.13.

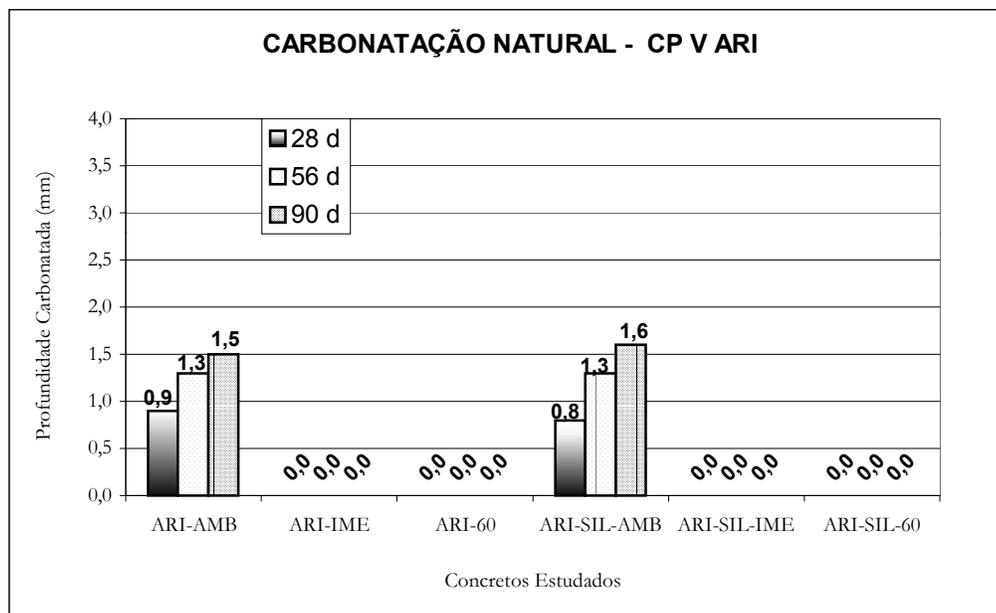


Figura 6.13 - Carbonatação natural - CP V ARI, com e sem sílica ativa.

Observou-se que os valores de profundidade de carbonatação foram pouco expressivos, pois os resultados foram obtidos até a idade de 90 dias. Para obter resultados mais significativos, deve-se realizar ensaios em idades mais avançadas (acima de 360 dias), o que não foi o objeto desse trabalho.

Foi observado que os maiores valores para a carbonatação natural foram obtidos nas amostras submetidas à cura ambiente. Deve-se observar que os valores de carbonatação estão apresentados em milímetros e, mesmo com todo cuidado na obtenção desses valores, a leitura é dificultada por serem valores baixos. Dessa forma, embora as diferenças entre os resultados obtidos sejam percentualmente elevadas, em termos numéricos, essa diferença é pouco significativa.

Da análise dos resultados obtidos observa-se a importância do tipo de cura na carbonatação do concreto até a idade de 90 dias, pois somente os concretos submetidos à cura ambiente apresentaram carbonatação. Os concretos submetidos às curas imersa e térmica não apresentaram carbonatação.

Os valores da carbonatação para os concretos ARI-AMB (1,5 mm) e ARI-SIL-AMB (1,6 mm) foram baixos, na idade de 90 dias o concreto ARI-SIL-AMB apresentou uma carbonatação maior do que o ARI-AMB. Entretanto, essa diferença não é significativa.

De acordo com Seidler & Dal Molin (2003) o uso da sílica ativa como adição mineral aos concretos não tem influência direta na corrosão das armaduras, pois mesmo com a utilização da sílica ativa ainda se mantém um meio alcalino elevado de proteção às armaduras.

### **6.1.7 – Massa Específica**

A massa específica dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa apresentaram valores médios de 2480 Kg/m<sup>3</sup>.

O tipo de cura, a idade dos concretos e a utilização de sílica ativa em substituição ao cimento na proporção de 10% em massa não influenciaram o valor obtido para as massas específicas. Todos os concretos estudados apresentaram valores de massa específica similares entre si.

## **6.2 – Concretos Produzidos com Cimento Portland CP III**

### **6.2.1 – Resistência Mecânica**

As resistências à compressão e à tração por compressão diametral foram medidas nos concretos estudados, de acordo com a metodologia descrita nos itens 5.7.1 e 5.7.2 do Capítulo 5.

#### **a) Resistência à Compressão Axial**

A Figura 6.14 apresenta os resultados de resistência à compressão axial obtidos com os concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa em substituição ao cimento na proporção de 10%. Os concretos foram submetidos a diferentes procedimentos de cura: cura em ambiente de laboratório (denominada simplesmente por cura ambiente - AMB), cura térmica (denominada simplesmente por cura térmica e representada pela sigla 60) e cura por imersão em água até a idade de 7 dias (denominada simplesmente por cura imersa - IME).

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a resistência à compressão dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa estão apresentados no apêndice B1. Os gráficos apresentando a análise de regressão (curvas de tendência) para a resistência à compressão estão apresentados no apêndice C3.

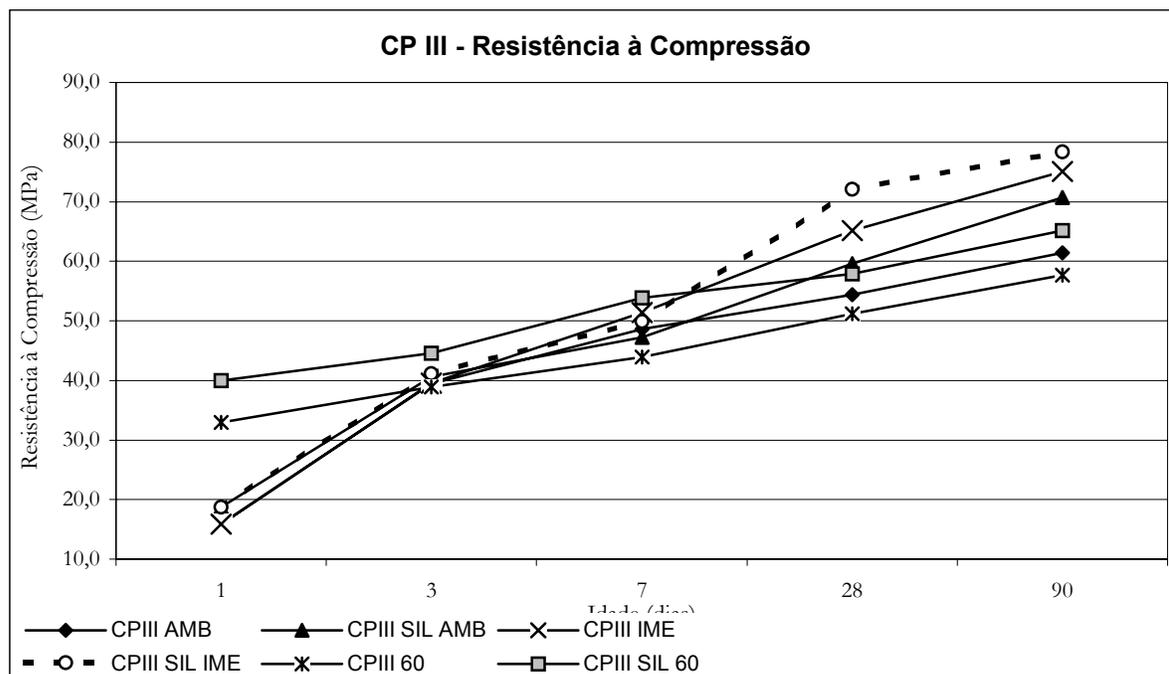


Figura 6.14 – Resistências à compressão de concretos produzidos com CP III com e sem sílica ativa.

### a.1) Cura Ambiente

Nos concretos com o cimento substituído por sílica ativa na proporção de 10% em massa ocorreu um aumento de resistência estatisticamente significativo em comparação ao concreto sem utilização de sílica ativa na idade de 1 dia e a partir de 28 dias. Na idade de 1 dia o concreto com sílica ativa apresentou resistência 18% maior do que o concreto sem sílica ativa, aos 28 dias o concreto com sílica ativa apresentou resistência 10% maior do que o concreto sem sílica ativa e aos 90 dias, o concreto CIII-SIL-AMB apresentou valores de resistência 15% superiores ao CIII-AMB.

Entretanto nas idades de 3 e 7 dias os concretos CIII-SIL-AMB e CIII-AMB apresentaram resistências à compressão similares. O concreto com sílica ativa apresentou nessas duas idades resistências da ordem de 3% acima às obtidas pelo concreto sem sílica ativa.

## **a.2) Cura Térmica**

O concreto CPIII-SIL-60 apresentou valores estatisticamente superiores aos obtidos pelo CPIII-60 em todas as idades ensaiadas, sendo da ordem de 22% nas idades de 1 e 7 dias e 15% na idade de 3 dias, aos 28 dias o concreto com sílica ativa apresentou resistência 17% maior do que o concreto sem sílica ativa, e aos 90 dias o concreto CPIII-SIL-60 apresentou valores de resistência 13% superiores ao CPIII-60.

A partir de 3 dias os concretos CPIII-AMB e CPIII-IME apresentaram resistências maiores do que o CPIII-60. O CPIII-IME apresentou resistências estatisticamente significativas em comparação ao CPIII-60 a partir da idade de 7 dias; entretanto, o concreto CPIII-AMB apesar de apresentar resistências maiores do que o CPIII-60 desde a idade de 3 dias não apresentou resistências estatisticamente significativas em comparação ao CPIII-60 até a idade de 90 dias. Nos concretos com sílica ativa somente a partir da idade de 28 dias foi observada resistência maior para os concretos CPIII-SIL-AMB e CPIII-SIL-IME. A partir dos 28 dias somente o CPIII-SIL-IME apresentou resistência estatisticamente significativa em comparação ao CPIII-SIL-60. Aos 90 dias ambos os concretos (CPIII-SIL-AMB e CPIII-SIL-IME) apresentaram resistências estatisticamente significativas em comparação ao CPIII-SIL-60.

## **a.3) Cura Imersa**

Na idade de 1 dia o concreto CPIII-SIL-IME teve um ganho estatisticamente significativo de resistência à compressão em comparação ao CPIII-IME, sendo 17% superior. Entretanto aos 3 e 7 dias as resistências à compressão do CPIII-SIL-IME não foram significativas em comparação ao CPIII-IME, apresentando diferenças entre às resistências a compressão dos concretos com sílica ativa e sem sílica ativa de 3% aos 3 dias e 4% aos 7 dias.

Aos 28 dias o concreto com sílica ativa apresentou resistência 11% maior do que o concreto sem sílica ativa (diferença estatisticamente significativa), e aos 90 dias o concreto CPIII-SIL-IME apresentou valores de resistência à compressão 4% superiores ao CPIII-IME (diferença não é estatisticamente significativa).

Os resultados obtidos pelos concretos submetidos à cura imersa apresentaram as maiores resistências à compressão em comparação com os demais tipos de cura. Isso acontece, pois

quando o concreto é curado em condições de umidade satisfatória, tem-se um tempo suficientemente adequado para a melhor distribuição e precipitação dos compostos hidratados.

#### **a.4) Resistência à Compressão Axial – Observações Gerais – CP III**

Com relação à resistência à compressão, os concretos submetidos à cura térmica apresentaram resistências duas vezes maiores na idade de 1 dia do que às resistências obtidas pelos concretos submetidos aos demais tipos de cura (cura ambiente e cura imersa), tanto para concretos com sílica ativa quanto para concretos sem sílica ativa, sendo esses valores, portanto, estatisticamente significativos.

Na idade de 3 dias, as resistências obtidas com a cura térmica nos concretos sem sílica ativa apresentaram valores similares aos demais tipos de cura, nos concretos com sílica ativa, o CPIII-SIL-60 apresentou valores estatisticamente significativos em comparação aos demais tipos de cura, sendo da ordem de 10% acima do obtido para o CPIII-SIL-AMB e 9% acima do apresentado para o CPIII-SIL-IME.

Na idade de 7 dias o concreto CPIII-SIL-60 apresentou resistência superior a todos os demais concretos submetidos a diferentes tipos de cura, sendo da ordem de 14% acima do CPIII-SIL-AMB, 8% acima do CPIII-SIL-IME, 11% acima do CPIII-AMB, 5% acima do CPIII-IME e 23% acima do CPIII-60. Para os concretos sem sílica ativa a melhor resistência foi obtida pelo CPIII-IME, sendo da ordem de 17% acima do CPIII-60 e 6% acima do CPIII-AMB. O concreto CPIII-AMB apresentou resistência da ordem de 11% acima do CPIII-60.

Na idade de 28 dias os concretos submetidos à cura térmica apresentaram resistências menores do que os concretos submetidos aos demais tipos de cura. Para o concreto com sílica ativa, submetido à cura térmica, obteve-se resistência 3% menor se comparado à cura ambiente e 25% menor se comparado à cura imersa. Para o concreto sem sílica ativa, obteve-se resistência 6% menor se comparado à cura ambiente e 27% menor se comparado à cura imersa.

Isso acontece, pois quando a hidratação é acelerada pelo aumento da temperatura de cura, ocorre uma concentração de compostos hidratados ao redor do grão de cimento (uma espécie de carapaça hidratada). Essa carapaça hidratada dificulta a difusão de íons e, conseqüentemente, o prosseguimento da hidratação (CAMARINI, 1995; KJELLENSEN et *al.*, 1991; KJELLENSEN; DETWILER, 1992; CAMARINI, 1995 *apud* SILVA, 1998).

Na idade de 90 dias mantiveram-se as mesmas proporções de resistências obtidas na idade de 28 dias. A cura térmica apresentou valores mais baixos de resistência à compressão em comparação às curas ambiente e imersa, sendo esses valores da ordem de 9% e 21% respectivamente, para concretos com sílica ativa e da ordem de 7% e 30%, respectivamente para concretos sem sílica ativa.

A partir da idade de 28 dias os concretos submetidos à cura imersa (CPIII-IME e CPIII-SIL-IME) apresentaram resistências à compressão maiores do que as obtidas pelos demais concretos, sendo essa diferença estatisticamente significativa, tanto para concretos com sílica ativa quanto para concretos sem sílica ativa.

Observou-se que os concretos produzidos com sílica ativa apresentaram um melhor desempenho para a resistência a compressão em comparação aos concretos sem sílica ativa submetidos ao mesmo tipo de cura. Isso ocorre, pois concretos produzidos com adições de escória granulada de alto-forno e adições pozolânicas tais como a sílica ativa, apresentam estruturas de pasta mais compacta. Isso é explicado pelo melhor preenchimento dos vazios fornecido pela sílica ativa (efeito *filler*) e também ao fato da sílica ativa diminuir a espessura da zona de transição, acrescentando-se a isso, o C-S-H gerado pela hidratação da escória de alto-forno, pois além de preencher os espaços vazios da pasta, adere a escória ao agregado melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto (COHEN & KLITSIKAS, 1986; GLASSER, 1991; PAULON, 1996; CASCUDO, 1997; ISAIA *et al.*, 2003; RAO, 2003).

## **b) Resistência à Tração por Compressão Diametral**

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral obtidos para concretos com utilização de cimento Portland CP III com e sem sílica ativa estão apresentados na Figura 6.15.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa estão apresentados no apêndice B2. Os gráficos apresentando a análise de regressão (curvas de tendência) para a resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no apêndice C4.

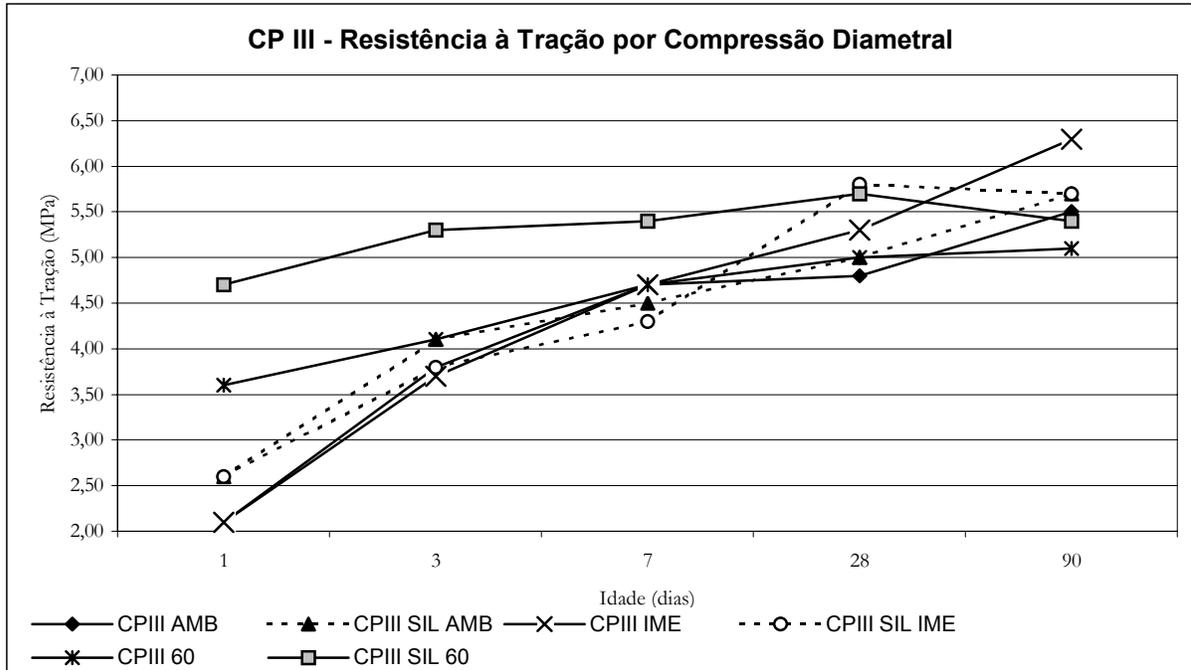


Figura 6.15 – Resistências à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com CP III com e sem sílica ativa.

Os resultados observados mostram que as resistências à tração por compressão diametral dos concretos estudados apresentaram valores próximos entre eles (apresentando variação entre resultados de 0,7 MPa a 2,6 MPa). Assim, dentre todos os concretos estudados a diferença máxima entre o menor valor (CPIII-AMB) e o maior valor (CPIII-SIL-60) foi de 2,4 MPa na idade de 1 dia. Os concretos submetidos à cura térmica (com e sem sílica ativa) apresentaram resultados estatisticamente significativos nas idades iniciais em comparação às curas ambiente e imersa.

Nas idades de 3 e 7 dias observou-se que o concreto CPIII-SIL-60 apresentou a maior resistência dentre todos os concretos analisados, com resistências da ordem de 29% (3 dias) e 15% (7 dias) acima da resistência do CPIII-60 (diferença estatisticamente significativa). O concreto submetido à cura térmica sem sílica ativa não apresentou resistência estatisticamente significativa em comparação aos demais concretos submetidos a outros tipos de cura.

Na idade de 28 dias observou-se que os concretos CPIII-SIL-60 e CPIII-SIL-IME apresentaram valores similares entre si (5,7 MPa e 5,8 MPa respectivamente), na análise estatística observou-se que na comparação dos resultados dos demais concretos com os CPIII-SIL-60 e CPIII-SIL-IME a diferença dos resultados obtidos são estatisticamente significativas (com

exceção do CPIII-IME). Nessa idade, na comparação dos resultados dos demais tipos de concreto entre si, observaram-se resultados próximos entre si com uma variação máxima de 10% entre os valores obtidos. Entretanto, essa diferença máxima de 10% entre os resultados obtidos, demonstrou não ser estatisticamente significativa.

Na idade de 90 dias, a maior resistência foi obtida para o concreto CPIII-IME (apresentando diferença estatisticamente significativa em comparação aos CPIII-AMB, CPIII-60 e CPIII-SIL-60), sendo a resistência do CPIII-IME da ordem de 11% acima do CPIII-SIL-IME, o qual, por sua vez, apresentou resistência da ordem de 11% acima do CPIII-SIL-60. Os demais tipos de concreto apresentaram valores próximos entre si com uma variação máxima de 10% entre os resultados não apresentando diferenças estatisticamente significativas para análise comparativa entre si.

Foi observado que em termos percentuais os valores das resistências à tração em relação às resistências à compressão, foram da ordem de 10% a 14% nas idades iniciais (até a idade de 7 dias), da ordem de 8% a 10% (28 dias) e 7% a 9% (90 dias). Essa variação percentual é devida às diferenças de resistências à compressão obtidas pela aplicação de diferentes tipos de cura nos concretos.

### **6.2.2 – Permeabilidade ao ar**

O ensaio de permeabilidade ao ar teve como objetivo avaliar qualitativamente a estrutura porosa interna do concreto, medindo-se o tempo no qual o fluxo de ar sob pressão atmosférica passava através da amostra. Os ensaios foram feitos usando o permeâmetro descrito no Capítulo 5 – item 5.7.5.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a permeabilidade ao ar dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa estão apresentados no apêndice B3.

Nos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa, os melhores resultados quanto à permeabilidade ao ar foram obtidos pelos concretos submetidos à cura imersa.

Nos concretos produzidos com cimento Portland CP III sem sílica ativa, os valores de permeabilidade ao ar, foram piores para a cura ambiente O concreto submetido à cura térmica

apresentou resultados com valores intermediários entre a cura ambiente e a cura imersa (Figura 6.16).

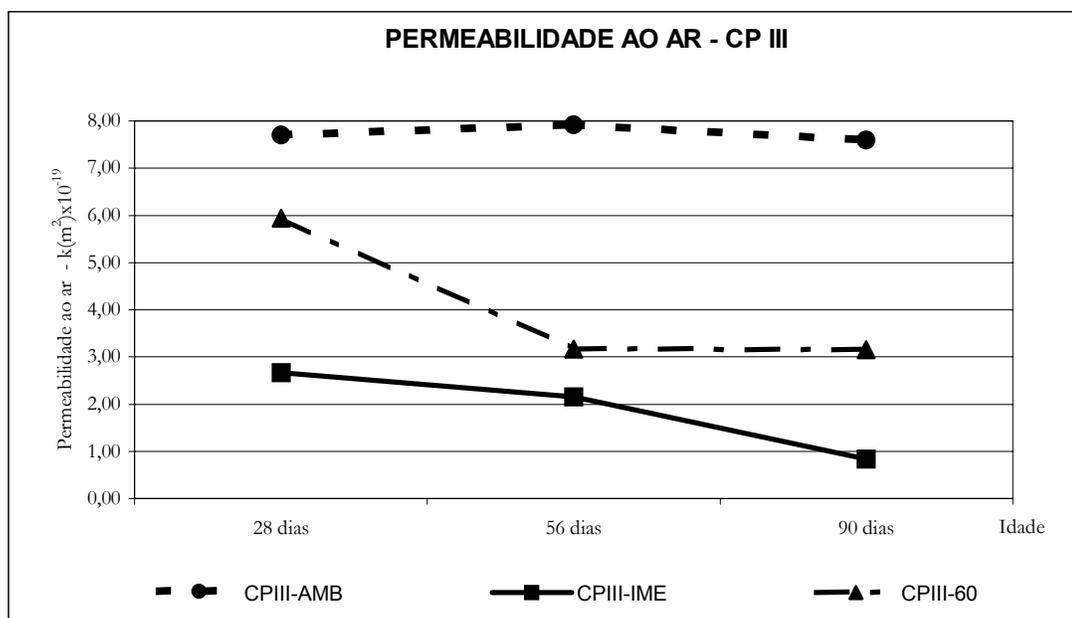


Figura 6.16 - Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP III.

Observa-se, nos resultados obtidos, para a permeabilidade em concretos utilizando-se o cimento Portland de alto-forno a importância que a cura ou a ausência dela influencia nos concretos. No caso da cura ambiente a permeabilidade manteve-se alta em todas as idades verificadas, demonstrando que esse tipo de cura não é eficiente com relação à durabilidade do concreto. As reações de hidratação do cimento não ocorrem de maneira adequada acarretando o não preenchimento dos espaços vazios da matriz da pasta.

No concreto submetido à cura imersa observou-se que com condições de umidade satisfatória além de permitir uma melhor hidratação do clínquer do cimento, também ocorreu um benefício na hidratação da escória de alto forno contida no cimento Portland CP III, pois com o aumento da idade do concreto os produtos de hidratação da escória preenchem os espaços vazios da matriz da pasta deixando o concreto menos permeável (BATTAGIN & ESPER, 1988; MENÉNDEZ *et al.*, 2003).

Nas idades de 56 e 90 dias observou-se o efeito que a cura térmica teve na escória contida no cimento Portland de alto-forno, pois através da ativação térmica ocorreu uma aceleração dos compostos hidratados. Entretanto, a partir de um determinado ponto, ocorre uma estabilização

não ocorrendo mais nenhuma melhora da permeabilidade com o passar do tempo (foi observado um valor constante para a permeabilidade desde a idade de 56 dias até a idade de 90 dias). Isso pode ser atribuído ao mecanismo de hidratação do cimento submetido à cura térmica, pois com o aumento da temperatura de cura ocorre uma concentração de compostos hidratados ao redor do grão de cimento, dificultando a difusão de íons e o prosseguimento da hidratação (CAMARINI, 1995; KJELLENSEN *et al.*, 1991; KJELLENSEN; DETWILER, 1992; CAMARINI, 1995 *apud* SILVA, 1998).

Nos concretos produzidos com cimento Portland CP III com sílica ativa, os valores de permeabilidade foram piores para a cura térmica na idade final. O fato de na idade de 90 dias o CPIII-SIL-60 apresentar um aumento da permeabilidade pode ser atribuído ao efeito da cura térmica na aceleração da cinética das reações de hidratação dos aglomerantes, pois com o impedimento da difusão não ocorre a hidratação esperada dos aglomerantes ao longo do tempo.

Entretanto, na idade de 28 dias, o concreto CPIII-SIL-60 submetido à cura térmica apresentou resultado melhor do que o concreto CPIII-SIL-AMB, ocorrendo uma inversão dos resultados obtidos na idade de 90 dias em comparação com a cura ambiente. O concreto submetido à cura imersa apresentou o melhor resultado para a permeabilidade ao ar dentre os concretos submetidos aos demais tipos de cura (Figura 6.17).

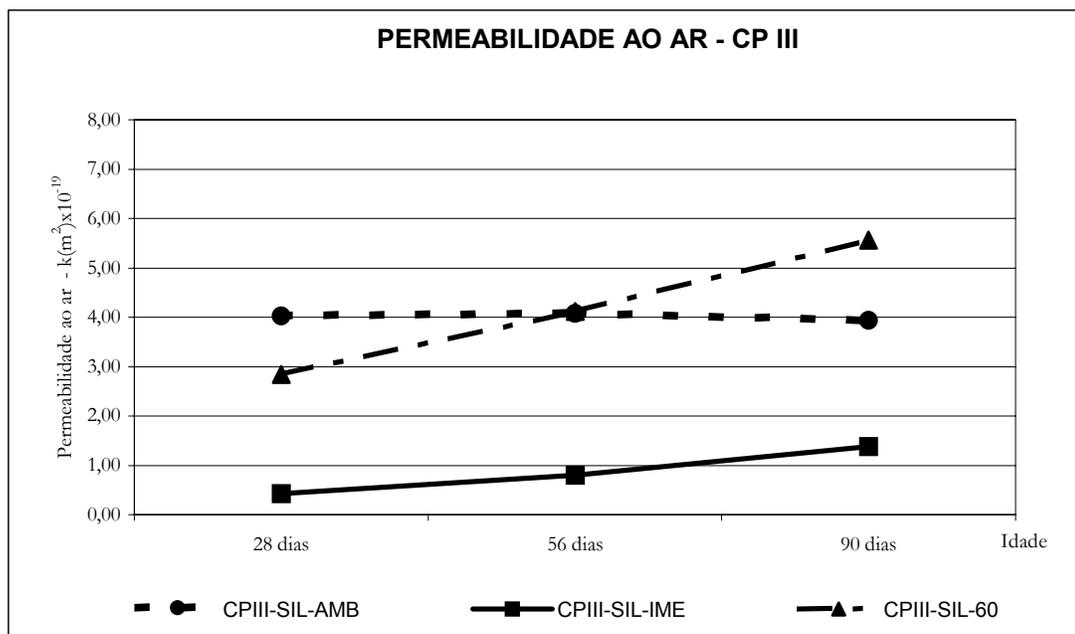


Figura 6.17 - Valores de permeabilidade ao ar para concretos produzidos com cimento Portland CP III com sílica ativa.

Observa-se, nas Figuras 6.16 e 6.17, que os resultados obtidos para a permeabilidade em concretos com sílica ativa submetidos à cura ambiente apresentaram a metade dos valores de permeabilidade obtidos para concretos com CP III sem sílica ativa (diferença estatisticamente significativa). Para o concreto submetido à cura imersa, a sílica ativa permitiu uma menor permeabilidade desde a idade de 28 dias, o que não ocorreu com o concreto sem sílica ativa (com a sílica ativa o concreto obteve já na idade de 28 dias uma permeabilidade similar àquela obtida para o concreto sem sílica ativa na idade de 90 dias).

Assim, fica evidenciado o melhor comportamento dos concretos com sílica ativa com relação à permeabilidade o que vai influenciar na durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.

Isso acontece, pois, utilizando-se a sílica ativa ocorre a formação do C-S-H adicional liberado pela reação pozolânica da hidratação da sílica ativa, preenchendo os espaços vazios na matriz da pasta, acrescentando-se a isso, o C-S-H gerado pela hidratação da escória de alto-forno o que resulta em uma microestrutura mais densa e compacta (COHEN & KLITSIKAS, 1986; DA SILVA, 1995; COLAK, 2003; RAO, 2003; ALMUSALLAM *et al.*, 2004).

### **6.2.3 - Absorção Capilar**

Os ensaios de absorção capilar e a determinação do coeficiente de absorção capilar (coeficiente de absorção inicial) foram realizados de acordo com o descrito no item 5.7.4 do Capítulo 5.

As Figuras 6.18 a 6.20 apresentam, respectivamente, os resultados de absorção inicial, coeficiente de absorção inicial e absorção capilar após 24 horas dos concretos produzidos com cimento Portland CP III (com e sem sílica ativa) nas idades de 28, 56 e 90 dias.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a absorção inicial dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa estão apresentados no apêndice B4 e para a absorção capilar no apêndice B5.

O ensaio de absorção capilar teve como objetivo avaliar qualitativamente a estrutura porosa do concreto na camada de cobrimento. Esse ensaio avalia a quantidade de água que o material absorve por unidade de área (absorção capilar), a quantidade de água por unidade de área em um determinado tempo (coeficiente de absorção capilar) e a altura de penetração da água pelos poros capilares (ascensão capilar).

A Figura 6.18 apresenta os valores obtidos para a absorção inicial nos concretos produzidos com cimento Portland CP III, com e sem sílica ativa.

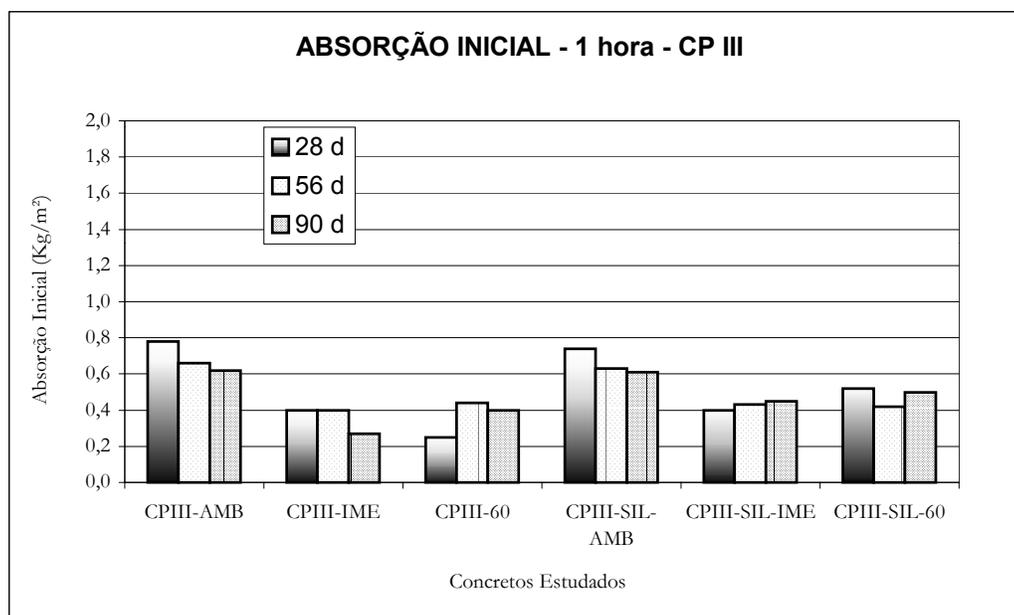


Figura 6.18 - Absorção inicial em concretos com CP III com e sem sílica ativa.

Na Figura 6.18 observa-se que nos concretos de cimento Portland CP III com e sem sílica ativa os valores da absorção inicial foram bem superiores para a cura ambiente em todas as idades ensaiadas em comparação aos demais tipos de cura. Entretanto, observa-se que nos concretos submetidos à cura ambiente com e sem sílica ativa, os resultados para a absorção inicial foram iguais.

Nos concretos sem sílica ativa submetidos à cura térmica o melhor desempenho obtido foi na idade de 28 dias, apresentando na idade de 56 dias valor similar ao da cura imersa. Entretanto, para a idade de 90 dias o melhor desempenho foi apresentado pela cura imersa. Nos concretos com sílica ativa submetidos às curas térmica e imersa os valores de absorção inicial foram similares entre si.

Assim, fica evidenciada a importância do tipo de cura utilizada com relação à absorção inicial do concreto, pois foi observado que a porosidade do concreto aumenta significativamente caso não seja realizada uma cura adequada.

Dessa forma, observou-se que os resultados obtidos para a absorção inicial, de concretos submetidos ao mesmo tipo de cura, não apresentaram diferenças expressivas de valores para concretos com sílica ativa em comparação aos concretos sem sílica ativa.

Esse fato pode ser atribuído às condições de exposição do concreto, pois a umidade e a porosidade do concreto variam em condições diferentes de exposição e em geral, o concreto de pele tem o prosseguimento das reações de hidratação prejudicado pela perda facilitada de sua umidade natural, resultando numa superfície mais porosa e de poros mais interconectados que nas regiões mais internas do concreto (MARTINS, 2001; PETRY *et al.*, 2004).

Na Figura 6.19 são apresentados os valores do coeficiente de absorção inicial dos concretos produzidos com cimento Portland CP III .

Observa-se que o comportamento do coeficiente de absorção inicial (Figura 6.19) é semelhante ao apresentado pela absorção inicial (Figura 6.18). Os valores elevados apresentados pelos concretos com sílica ativa indicam uma quantidade de poros maiores do que  $10\mu\text{m}$  na região correspondente ao concreto de pele (BALAYSSAC, 1993).

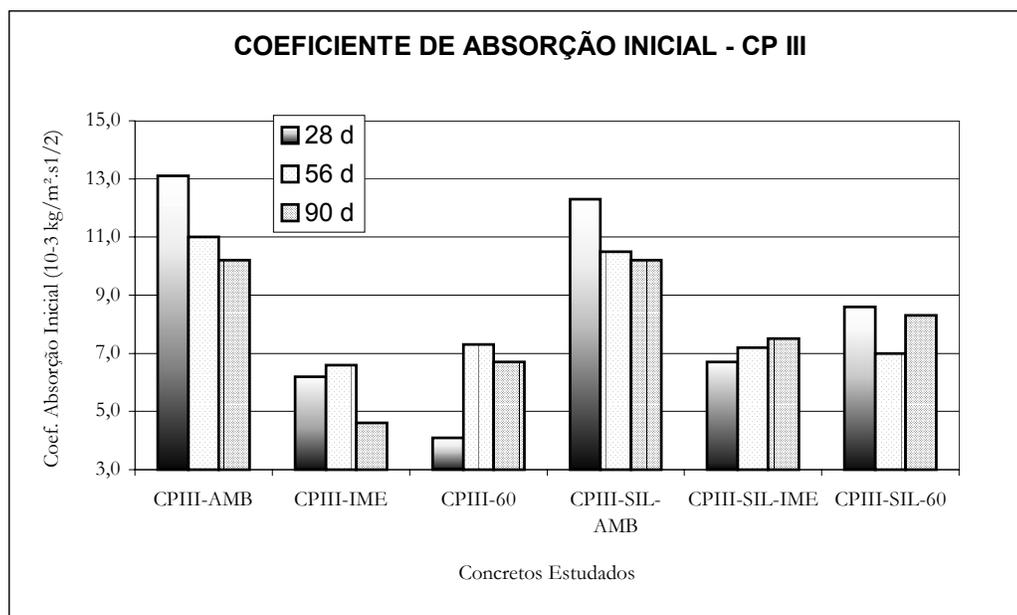


Figura 6.19 – Coeficiente de absorção inicial em concretos com CP III com e sem sílica ativa.

A Figura 6.20 apresenta os valores obtidos para a absorção capilar, em 24 horas, nos concretos produzidos com cimento Portland CP III, com e sem sílica ativa.

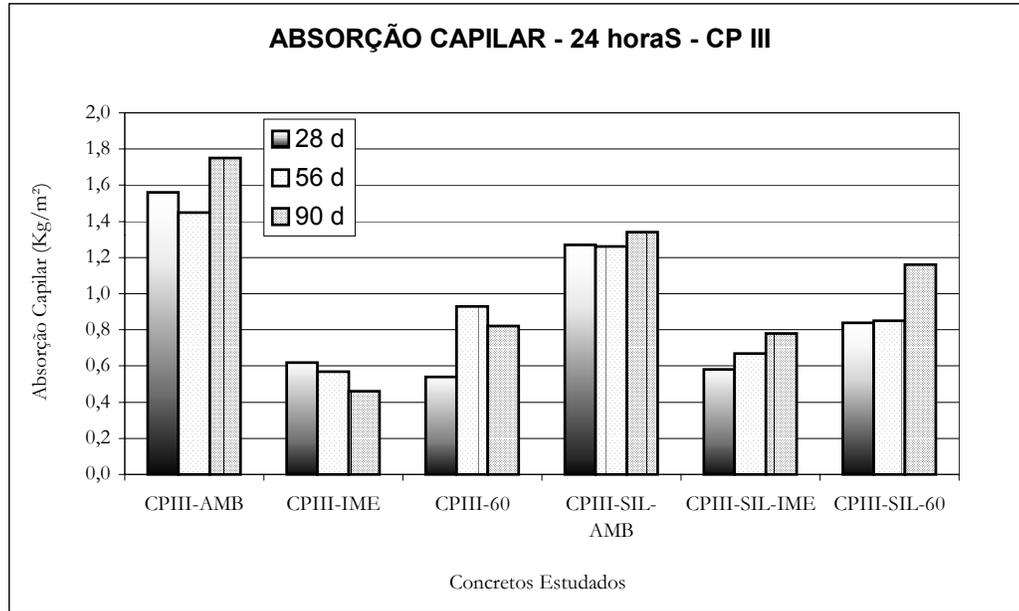


Figura 6.20 - Absorção capilar em concretos com CP III com e sem sílica ativa.

Os valores da absorção capilar em 24 horas nos concretos sem sílica ativa submetidos à cura ambiente foram bem superiores em todas as idades ensaiadas. O concreto submetido à cura térmica apresentou o melhor desempenho na idade de 28 dias; entretanto, para as idades de 56 e 90 dias o melhor desempenho foi apresentado pela cura imersa.

Os concretos com sílica ativa mantiveram o mesmo comportamento apresentado pelo concreto sem sílica ativa, apresentando, para a cura ambiente, o pior desempenho. O melhor desempenho foi observado para a cura imersa, tendo a cura térmica valores intermediários entre a cura imersa e a cura ambiente. Portanto, sendo os poros menores que  $10\mu\text{m}$  os responsáveis pela absorção capilar após o período inicial de uma hora (BALAYSSAC, 1993), foi observado que os concretos submetidos à cura ambiente (CPIII-AMB e CPIII-SIL-AMB) apresentam uma maior quantidade de pequenos capilares no seu interior, demonstrando a importância do tipo de cura para o desenvolvimento dos produtos de hidratação dos aglomerantes utilizados na produção dos concretos.

Na Figura 6.20 observa-se que a utilização da sílica ativa juntamente com a escória de alto-forno do cimento não apresentou um efeito sinérgico como era esperado, pois os concretos com sílica ativa não apresentaram absorções menores quando submetidos às curas térmica e imersa quanto comparados aos concretos produzidos sem sílica ativa submetidos a essas mesmas condições de cura. Esperavam-se valores mais baixos para os concretos com sílica ativa, pois

devido à formação do C-S-H adicional obtido da reação pozolânica da sílica ativa juntamente com os produtos de hidratação da escória de alto forno. A expectativa era de um melhor preenchimento dos espaços vazios na matriz da pasta resultando em uma microestrutura mais densa e compacta o que não ocorreu (COHEN & KLITSIKAS, 1986; DA SILVA, 1995; COLAK, 2003; RAO, 2003; ALMUSALLAM *et al.*, 2004).

#### 6.2.4 - Ascensão Capilar

A Figura 6.21 apresenta os valores obtidos para a ascensão capilar nos concretos produzidos com e sem sílica ativa. Os maiores resultados de ascensão capilar foram obtidos para os concretos submetidos à cura ambiente sem sílica ativa. Nos concretos com utilização da sílica ativa o maior valor da ascensão capilar foi para concretos submetidos à cura térmica.

Foi observado o efeito benéfico da sílica ativa na ascensão capilar dos concretos submetidos à cura ambiente, para concretos submetidos à cura imersa, concretos com e sem sílica ativa apresentaram valores similares. Entretanto, foi observado que os valores da ascensão capilar nos concretos produzidos com sílica ativa foram maiores do que os obtidos para concretos sem sílica ativa quando submetidos à cura térmica nas idades de 56 e 90 dias.

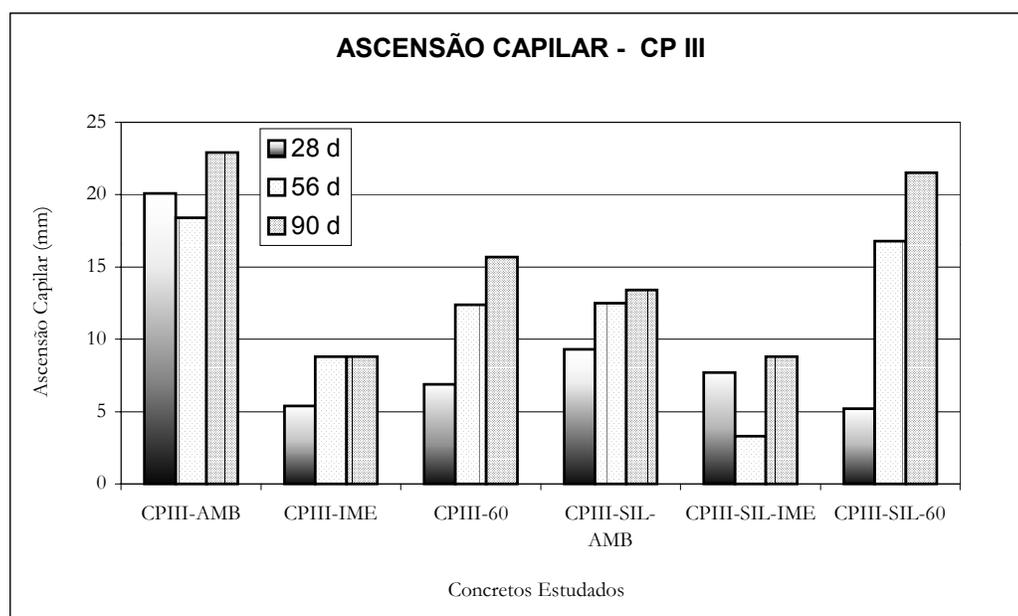


Figura 6.21 - Valores de ascensão capilar para concretos produzidos com CP III com e sem sílica ativa.

Deve-se observar que o movimento da água no interior do concreto não é função apenas da quantidade de poros, mas também do diâmetro, da distribuição e da interconexão entre eles. Os concretos submetidos a procedimentos de cura que propiciem uma estrutura porosa grosseira podem apresentar quantidades de água absorvida semelhante a outras amostras que apresentam uma melhor estrutura porosa, embora possa apresentar maior altura de penetração de água (MCCARTIER *et. al.*, 1992).

Os dados obtidos para a ascensão capilar de concretos sem sílica ativa estão de acordo com os obtidos por Martins (2001) e Ferreira Junior (2003).

### **6.2.5 – Absorção Total e Índice de Vazios**

Os ensaios de absorção total e índice de vazios foram realizados de acordo com o descrito no item 5.7.6 do Capítulo 5, e tiveram como objetivo avaliar qualitativamente a estrutura porosa do concreto. A absorção total avalia a quantidade de água que o material absorve (em porcentagem) durante um determinado período de tempo no qual o concreto permanece totalmente imerso na água. O índice de vazios avalia a quantidade de espaços vazios internos existente nesses concretos (em porcentagem).

As Figuras 6.22 a 6.25 apresentam os valores obtidos para a absorção total e índice de vazios nos concretos produzidos com e sem sílica ativa.

Os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA), para a absorção total dos concretos produzidos com cimento Portland CP V ARI com e sem sílica ativa estão apresentados nos apêndices B6 e B7 e para o índice de vazios nos apêndices B8 e B9.

A absorção de água obtida nos concretos imersos em água por 24 horas e imersos por 3 dias, não apresentaram diferenças significativas em seus valores, apresentando praticamente os mesmos valores de absorção total (em porcentagem) quando comparando-se concretos iguais, na mesma idade e submetidos ao mesmo tipo de cura (Figuras 6.22 e 6.23).

Nas figuras 6.22 e 6.23 observaram-se que os concretos submetidos à cura imersa apresentaram uma menor quantidade de água absorvida em comparação aos concretos submetidos às curas ambiente e térmica. Entretanto, os concretos com sílica ativa apresentaram um melhor desempenho em comparação aos concretos sem sílica ativa. Esses resultados estão de acordo com valores obtidos por Couto *et. al.* (2003) em estudo realizado sobre curas de concreto com utilização de sílica ativa.

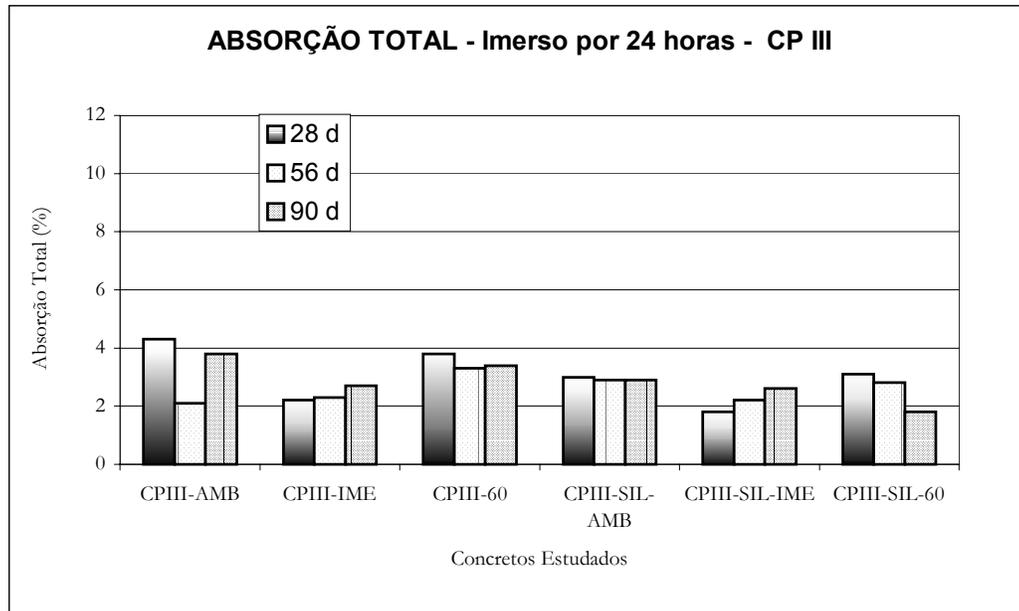


Figura 6.22 - Absorção total - CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 24 horas.

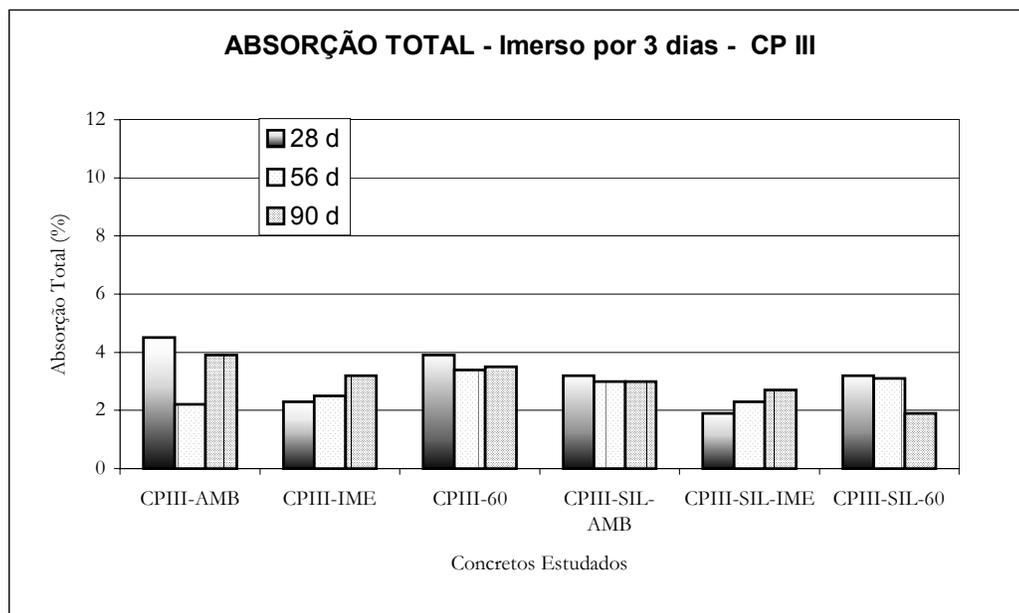


Figura 6.23 - Absorção total - CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 3 dias.

O melhor desempenho para os concretos com sílica ativa é atribuído à formação do C-S-H adicional liberado pela reação pozolânica da hidratação da sílica ativa que preenche os espaços vazios da matriz da pasta diminuindo a porosidade do concreto (COHEN & KLITSIKAS, 1986; DA SILVA, 1995; COLAK, 2003; RAO, 2003; ALMUSALLAM *et al.*, 2004).

As Figuras 6.24 e 6.25 apresentam os valores obtidos para o índice de vazios nos concretos produzidos com e sem sílica ativa.

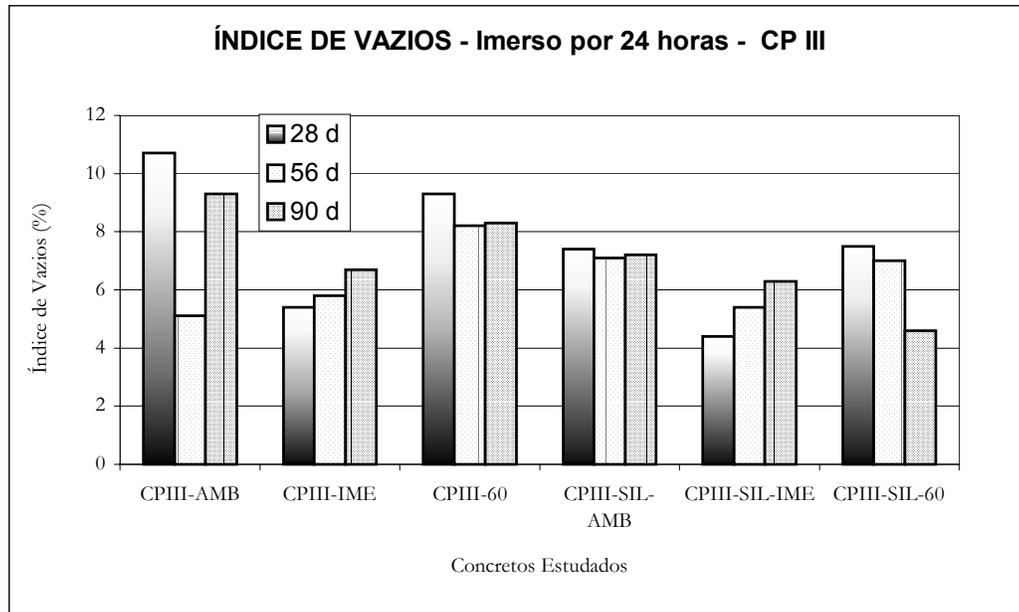


Figura 6.24 – Índice de vazios - CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 24 horas.

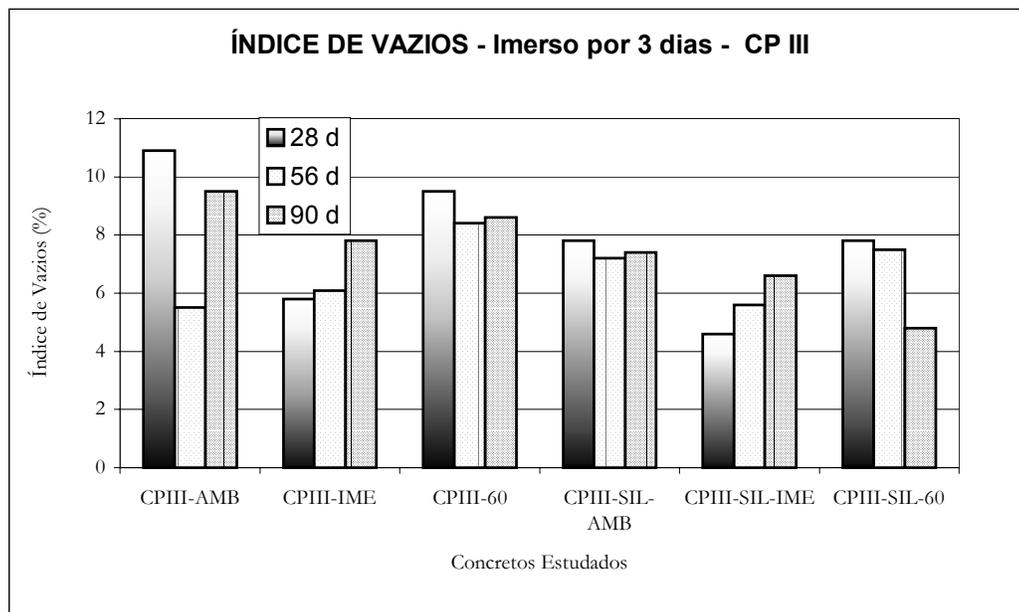


Figura 6.25 – Índice de vazios - CP III, com e sem sílica ativa, imersos em água por 3 dias.

Nos concretos com e sem sílica ativa submetidos à cura imersa obteve-se um índice de vazios menor do que nos concretos submetidos às curas ambiente e térmica as quais apresentaram valores similares entre si. Foi observado que concretos produzidos com sílica ativa apresentaram um melhor desempenho em comparação aos concretos sem sílica ativa submetidos ao mesmo tipo de cura (Figuras 6.24 e 6.25).

Não houve diferenças significativas no índice de vazios nos concretos imersos em água por 24 horas e imersos por 3 dias, quando comparados com concretos iguais, na mesma idade e submetidos ao mesmo tipo de cura.

### **6.2.6 – Carbonatação Natural**

Os ensaios de carbonatação natural foram realizados de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 5, item 5.7.3.

Os valores de profundidade de carbonatação foram pouco expressivos, pois se obteve resultados até a idade de 90 dias. Para obter resultados mais significativos, deve-se realizar ensaios em idades mais avançadas (acima de 360 dias), o que não foi o objetivo desse trabalho.

Os maiores valores de carbonatação natural foram obtidos nas amostras submetidas à cura ambiente. Deve-se observar que os valores de carbonatação estão apresentados em milímetros e, mesmo com todo cuidado na obtenção desses valores, a leitura é dificultada por serem valores baixos. Dessa forma, embora a diferença entre os resultados obtidos seja percentualmente elevada, em termos numéricos, essa diferença é pouco significativa.

A carbonatação natural dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa estão apresentados na Figura 6.26.

Da análise dos resultados obtidos na Figura 6.26 observa-se a importância do tipo de cura na carbonatação do concreto até a idade de 90 dias. Os concretos submetidos à cura ambiente foram os que apresentaram maior profundidade de carbonatação. Na cura térmica, os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos nos concretos submetidos à cura imersa.

Figueiredo & Nepormuceno (2004), em estudo sobre absorção de água por absorção total realizado em concretos extraídos de pilares de edificações com idade variando entre 8 e 35 anos, observaram que concretos com menor volume de poros comunicáveis (avaliado de maneira indireta pela absorção total) apresenta uma menor profundidade carbonatada.

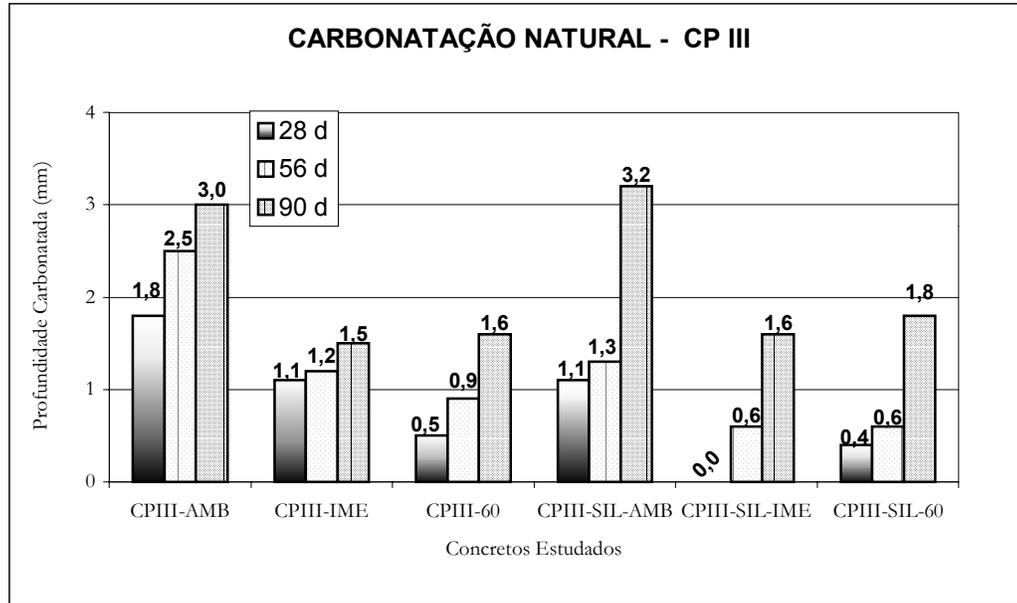


Figura 6.26 - Carbonatação natural - CP III, com e sem sílica ativa.

Os concretos sem sílica ativa apresentaram o dobro da profundidade de carbonatação apresentada pelos concretos com sílica ativa para os três tipos de cura utilizados (ambiente, térmica e imersa) nas idades de 28 e 56 dias. Na idade de 90 dias, para cada tipo de cura em que o concreto foi submetido, a comparação entre os valores obtidos para concretos com e sem sílica ativa demonstrou que a profundidade de carbonatação foi semelhante, não apresentando diferenças significativas entre os resultados.

De acordo com Seidler & Dal Molin (2003) o uso da sílica ativa como adição mineral aos concretos não tem influência direta na corrosão das armaduras, pois mesmo com a utilização da sílica ativa ainda se mantém um meio alcalino elevado de proteção às armaduras.

### 6.2.7 – Massa Específica

As massas específicas dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa apresentaram valores iguais a  $2470 \text{ kg/m}^3$ .

Observou-se que o tipo de cura, a idade dos concretos e a utilização de sílica ativa em substituição ao cimento na proporção de 10% em massa não alteraram o valor obtido para as massas específicas. Todos os concretos estudados apresentaram valores de massa específica similares entre si.

## CONCLUSÕES

Essa pesquisa investigou a influência da aplicação de sistemas de cura no comportamento mecânico e na durabilidade do concreto produzido com dois tipos de cimento Portland: o de Alto-Forno (CP III) e o de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), com e sem substituição de parte do cimento por sílica ativa na proporção de 10% em massa.

No desenvolvimento da fase experimental da pesquisa, procurou-se realizar o maior número possível de ensaios. Assim, determinou-se a influência de três diferentes tipos de cura estudados nesse trabalho experimental nas propriedades mecânicas (resistências à compressão axial e a tração por compressão diametral) e na durabilidade do concreto, observando-se as propriedades de transferência, por meio de ensaios de permeabilidade ao ar, absorção capilar, absorção total, índice de vazios e carbonatação natural.

Em princípio, a preocupação foi usar a técnica de cura térmica como ferramenta para produção do concreto, aliando versatilidade e economia para a indústria de pré-moldados, sem descuidar dos aspectos de durabilidade do concreto. No entanto, foram empregados também outros procedimentos de cura do concreto para tornar o estudo mais abrangente, sem, contudo, deixar de levar em consideração o enfoque principal que era a cura térmica e a influência da sílica ativa nos concretos submetidos a este tipo de cura.

Outra preocupação foi tentar aliar o comportamento dos concretos produzidos com cimento Portland CP III apresentados na literatura, em relação à durabilidade, observando o seu comportamento com e sem sílica ativa. Neste sentido, possibilita seu emprego na fabricação de estruturas pré-moldadas de concreto, aproveitando os resultados de pesquisas anteriores que indicaram que a cura térmica era benéfica para este tipo de cimento.

Assim, a partir dos resultados obtidos, foi possível estabelecer uma orientação quanto ao desempenho dos concretos produzidos com cimento Portland CP III com e sem sílica ativa.

Com a análise dos resultados obtidos durante a etapa experimental, observou-se que a utilização de concretos produzidos com cimentos de alto-forno (CP III) com sílica ativa, submetidos à cura térmica, é uma alternativa interessante e viável para a fabricação de estruturas pré-moldadas de concreto. Dessa forma, a indústria de pré-moldados tem uma opção economicamente possível e ecologicamente mais adequada para produção de concretos a serem utilizados em sua linha de produção.

Para efeito de ter uma base de dados mais ampla, os mesmos ensaios foram realizados com o cimento Portland CP V ARI porque é o cimento usualmente empregado na indústria de pré-moldados.

Os resultados obtidos demonstram que os concretos produzidos com CP V ARI não reagem de maneira tão expressiva quanto o CP III quando submetido à cura térmica nas idades iniciais. Os valores obtidos para as resistências à compressão na idade de 1 dia demonstram que a utilização do CP V ARI pelas indústrias de pré-moldados, fundamentada na obtenção de resistências iniciais elevadas para retirada dos elementos pré-moldados das formas, não apresenta uma necessidade expressiva de aplicação de cura térmica. Isto porque o CP V ARI, por apresentar uma maior finura e uma quantidade maior de clínquer do que o CP III, desenvolve resistências iniciais elevadas o suficiente para permitir uma desforma prematura dos elementos estruturais mesmo sem aplicação de cura térmica.

Assim, como resultado final das análises chegou-se às seguintes conclusões.

## **7.1 – Resistência Mecânica dos Concretos**

Os resultados obtidos confirmam que a utilização de sílica ativa (em substituição ao cimento na proporção de 10% em massa) melhorou a resistência à compressão dos concretos em todas as condições de cura utilizadas (curas ambiente, imersa até a idade de 7 dias e térmica a 60° C).

Ficou evidenciado, também, que a cura térmica melhora significativamente a resistência à compressão nas idades iniciais dos concretos obtendo maiores resistências à compressão e a utilização da sílica ativa apresentou resultados ainda maiores para esses concretos, principalmente nos concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno. Assim, os resultados obtidos

nesse trabalho experimental confirmam as informações obtidas pela literatura que trata do assunto.

Isto é um importante resultado para a indústria de pré-moldados que necessita reutilizar as fôrmas rapidamente. Esses concretos continuam a ganhar resistência com a evolução da idade.

De acordo com os resultados obtidos, a cura imersa forneceu os melhores resultados para todos os concretos dessa pesquisa, tanto para a resistência mecânica quanto para a durabilidade. Da mesma forma os piores resultados foram obtidos para os concretos submetidos à cura ambiente. Logo, fica evidenciada a importância da aplicação de procedimentos corretos de cura para a obtenção de resistência mecânica e durabilidade das estruturas de concreto.

Os concretos com sílica ativa apresentaram, na idade de 90 dias, resultados de resistência à compressão em geral da ordem de 10% maiores do que os concretos sem sílica ativa (comparando-se concretos submetidos ao mesmo tipo de cura e com utilização do mesmo tipo de cimento).

Com relação à resistência à tração, observou-se que ela não é proporcional ao desenvolvimento da resistência à compressão.

## **7.2 – Durabilidade dos Concretos**

Durante a pesquisa observou-se que os sistemas de cura empregados produziram variações nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos, principalmente no que diz respeito à sua estrutura porosa, havendo uma grande dependência da cura em água, pelo menos até os sete primeiros dias. Dessa forma, a cura ambiente mostrou-se prejudicial para os concretos, tanto com CP V ARI quanto com CP III, sendo esse último o mais prejudicado. Concretos submetidos à cura térmica apresentaram valores intermediários entre a pior situação (cura ambiente) e a melhor situação (cura imersa).

Quanto à permeabilidade ao ar, os concretos produzidos com sílica ativa apresentaram melhores resultados do que os concretos produzidos sem sílica ativa, tanto para o CP V ARI quanto para o CP III.

Concretos produzidos com sílica ativa não apresentaram melhora para a absorção inicial de água. Os valores obtidos foram similares para todos os concretos. Isto quer dizer que a diferença da velocidade de reações de hidratação do cimento não mudou a condição da

porosidade na camada de cobrimento do concreto (concreto de pele), conforme medido pela absorção inicial.

A absorção capilar após 24 horas nos concretos produzidos com CP V ARI utilizando-se sílica ativa apresentou um melhor desempenho em relação aos concretos sem a sílica ativa, evidenciando, assim, o efeito benéfico da sílica ativa na absorção por capilaridade. Para o concreto produzido com o CP III, observou-se para a absorção capilar após 24 horas a influência benéfica da sílica ativa nos concretos submetidos à cura ambiente. Ao utilizar a sílica ativa nestes concretos, nas curas térmica e imersa, os valores obtidos foram similares aos valores obtidos para concretos sem sílica ativa submetidos aos mesmos tipos de cura.

Foi observado que a cura térmica e a cura ambiente apresentaram valores similares na absorção total e no índice de vazios; entretanto concretos submetidos à cura imersa apresentaram o melhor desempenho dentre todos os concretos. Deve-se observar que todos os concretos com sílica ativa demonstraram um melhor desempenho em comparação aos concretos sem sílica ativa.

Observou-se, também, que a absorção total de água em todos os concretos ocorreu principalmente nas primeiras 24 horas, após esse período o aumento na absorção não foi significativo, apresentando aos 3 dias de imersão valores semelhantes aos obtidos com 24 horas de imersão.

Com relação a carbonatação dos concretos, deve-se observar que os valores de profundidade de carbonatação foram pouco expressivos, pois os resultados foram obtidos até a idade de 90 dias. Para obter resultados mais significativos, deve-se realizar ensaios em idades mais avançadas (acima de 360 dias), o que não foi o objetivo deste trabalho.

Os concretos submetidos à cura ambiente foram os que apresentaram maior carbonatação, tanto com utilização de cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) quanto com utilização de cimento Portland de Alto-Forno (CP III). No CP V ARI submetidos às curas imersa e térmica não foi observado nenhuma profundidade de carbonatação até a idade de 90 dias.

Os resultados obtidos nessa pesquisa até a idade de 90 dias não apresentaram diferenças significativas para a carbonatação entre o concreto produzido com CP III com e sem sílica ativa (para concretos submetidos ao mesmo tipo de cura). Os valores obtidos para a carbonatação natural nos concretos foram diferenciados de acordo com o tipo de cura aplicada em cada concreto estudado, dessa forma fica evidenciado a importância da cura na carbonatação.

Finalmente, com base nos resultados obtidos para os concretos estudados e nas condições de cura adotadas neste trabalho, observou-se que concretos produzidos com utilização de 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland (tanto o CP V ARI quanto o CP III) apresentam melhor desempenho para as propriedades de durabilidade das estruturas de concreto pré-moldadas.

Deve-se observar que a durabilidade das estruturas de concreto está vinculada à situação à que o concreto está exposto, e essa exposição deve ser considerada como condição fundamental na concepção do projeto e escolha dos materiais utilizados na execução e fabricação dessa estrutura.

### **7.3 – Sugestões para o Prosseguimento da Pesquisa**

A seguir apresentam-se algumas sugestões para o prosseguimento dessa pesquisa e realização de trabalhos futuros:

- Avaliar concretos com outros tipos de adições minerais (cinza de casca de arroz, cinza pozzolânica, etc) submetidos à cura térmica e em teores diferenciados, pois com o emprego de adições minerais no concreto obtém-se melhorias na resistência mecânica e na durabilidade das estruturas. A utilização de outros tipos de adições minerais nos concretos, além da escória de alto-forno e da sílica ativa, também apresenta custo reduzido e benefícios ambientais para a sociedade, pois são subprodutos industriais.
- Realizar análise dos efeitos da cura térmica sob pressão atmosférica em temperaturas mais elevadas das utilizadas nesse trabalho experimental, por serem mais eficazes em cimentos Portland de Alto-Forno no ganho da resistência mecânica nas idades iniciais.
- Observar o comportamento de concretos com cimentos Portland de Alto-Forno contendo maior porcentagem de escória de alto-forno submetidos à cura térmica inclusive com temperaturas de cura térmica diferentes da utilizada nesse trabalho experimental, com relação às resistências mecânicas e durabilidade.

- Utilizar cura térmica com ciclos diferentes dos utilizados nesse trabalho experimental. Ciclos de cura com isotermas maiores e menores do que 4 horas (a que foi utilizada neste trabalho), observando a sua influência nas propriedades mecânicas e na durabilidade já que o tempo de duração do ciclo de cura influencia o desempenho do concreto. Isso é necessário para se ter mais alternativas durante o processo de produção dos elementos pré-moldados, visando à otimização da linha de produção.
- Observar a resistência mecânica dos concretos submetidos à cura térmica em idades menores do que 1 dia, pois as empresas de pré-moldados em alguns casos necessitam realizar a desforma dos elementos estruturais em períodos menores do que 1 dia após a concretagem, para um maior aproveitamento das formas e do ciclo de produção industrial.
- Verificar e comparar os desempenhos de concretos utilizando-se CP III e CP V ARI, com e sem substituição de sílica ativa nas mesmas condições de cura utilizadas nesse trabalho experimental, em concretos dosados para atingirem resistências entre 20 e 35 MPa (considerados concretos convencionais) comparando-se esses valores com os valores obtidos nos concretos aqui apresentados (resistência acima de 40 MPa – concretos de alta resistência). Deve-se realizar também nesse caso ensaios para idades mais avançadas (acima de 90 dias). Isso é necessário, pois as empresas de pré-moldados utilizam também na produção de seus elementos estruturais concretos convencionais.
- Avaliar a carbonatação natural nos concretos em idades mais avançadas das que foram analisadas nesse trabalho experimental. Para obter resultados mais significativos, deve-se realizar ensaios em idades acima de 360 dias.
- Estudar a durabilidade com relação à penetração de íons cloretos nos concretos submetidos a diferentes tipos de cura, com e sem sílica ativa e também com utilização de outros tipos de adições minerais (cinza de casca de arroz, cinza pozzolânica, etc) utilizando-se cimentos Portland diferentes, pois o ataque de estruturas de concreto (armado e protendido) por cloretos é um dos elementos patológicos responsáveis pela deterioração das estruturas de concreto, principalmente quando expostas a ambientes marítimos.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1978.
- \_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- \_\_\_\_. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado – Procedimento. Rio de Janeiro. ABNT, 1985.
- \_\_\_\_. **NBR 7216**: Amostragem de agregados – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- \_\_\_\_. **NBR 7217**: Agregados: Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987b.
- \_\_\_\_. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro: ABNT, 1991a.
- \_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991b
- \_\_\_\_. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro: ABNT, 1991c
- \_\_\_\_. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991d
- \_\_\_\_. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1994a.
- \_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1994b.
- \_\_\_\_. **NBR 7222**: Argamassas e concretos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio Rio de Janeiro: ABNT, 1994c.
- \_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C403/C403M**: Time of setting of concrete mixtures by penetration resistance – Philadelphia, 1995.

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo, Editora Pini, 2000. 666 p.

AITCIN, P. The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 4-5, p. 409 – 420, may/july 2003.

ALDEA, C. M.; YOUNG, F. B.; SHAH, S. P. Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 3, p. 465 – 472, march 2000.

ALEXANDER, M. G. & MAGEE, B. J. Durability performance of concrete containing condensed silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 6, p. 917 – 922, june 1999.

ALMUSALLAM, A. A.; BESHAR, H.; MASLEHUDDIN M.; AL-AMOUDI, O. S. B. Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, n. 7, p. 891 – 900, october 2004.

**ABCI – Associação Brasileira da Construção Industrializada**. <http://www.abcic.com.br>, Artigos março 2004.

BALAYSSAC, J. P. **Relations entre performances mecaniques, microstructure et durabilité des bétons**. INSA-UPS Génie Civil. Tese doutorado, Toulouse, 1992, France.

BANTHIA, N. & MINDESS, S. Water permeability of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 5, p. 727 – 736, sep. 1989.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D.J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2/3, p. 93 – 103, mar/apr. 2001.

BAOJU, L.; YOUJUN, X.; SHIQIONG, L. J. Some factors affecting compressive strength of steam-curing concrete with ultrafine fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1455 – 1458, october 2001.

BATTAGIN, A. F & ESPER, M. **Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno**. Publicação Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo, 1988. 111 p.

BATTAGIN, A. F. Influence of degree of hydration of slag on slag cements. In: **9<sup>a</sup> International congress of chemical cement**, p. 166 – 172, Nova Delhi, 1992.

BOURGUIGNON, K. M. B G.; SILVA, M. G.; LORDÉLLO, F. S. S.; ZANDONADE, E. Influência da resistência na profundidade de carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno. In: **X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 18-21 JULHO 2004, Anais em CD. São Paulo, ENTAC' 04.

CAMARINI, G. **Desempenho de misturas de cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Tese de doutorado, São Paulo, 1995. 252 p.

CAMARINI, G. & CINCOTTO, M.A. Cura térmica: características do início de hidratação dos cimentos com escória. In: **4<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Cimento**, v. 1, p. 21-36, São Paulo, 1995.

CAMARINI, G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: **41<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD. Salvador, IBRACON, 1999.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1<sup>a</sup> ed., Goiânia: UFG, São Paulo: Pini, ed. UFG, 1997. 237 p.

CASTRO, A.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; LOPES, A. N. M. Avaliação da carbonatação no concreto de cobrimento com adições minerais e diferentes relações água/aglomerante. In: **45<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD. Vitória, IBRACON, 2003.

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; MARINGOLO, V.; MUNHOZ, F. A. C. Avaliação do grau de mineralização do clínquer Portland. In: **5<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Cimento**, Anais em CD. São Paulo, 1999.

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. Publicação Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) – Boletim 65, São Paulo, 1992. 35 p.

COHEN, M. D. & KLITSIKAS, M. Mechanisms of hydration and strength developments in Portland cement composites containing silica fume particles. **Indian Concrete Journal**, v. 60, n. 11, p 296 – 300, November, 1986.

COLAK, A. Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 4, p 585 – 593, april 2003.

COUTO, A. B. P.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; LOPES, A. N. M. Influência das condições de cura na absorção e permeabilidade de diferentes concretos. In: **V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO**, Anais em CD, São Paulo, 2003.

CONAMA – Conselho Nacional do meio Ambiente. **Resolução nº 307, 5 de Julho de 2002**. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>. Acesso em 18/10/2004.

CHAPPUIS, J. A new model for a better understanding of the cohesion of hardened hydraulic materials. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. v. 156, p. 223 – 241, 1999.

DA SILVA, R. J. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Tese de doutorado, Campinas, 1994. 246 p.

DA SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC/USP. Tese de doutorado, São Carlos, 1995. 279 p.

DE MILITO, J. A. **Avaliação do comportamento de pastas de gesso com cimento Portland e sílica ativa para revestimento**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Dissertação de mestrado, Campinas, 2001. 228 p.

DUMET, T. B. & PINHEIRO, L. M. A evolução do concreto: uma viagem no tempo. In: **42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD. Fortaleza, IBRACON, 2000.

EL DEBS, M.K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**, Publicação Ed. USP – EESC, 2000. 441 p.

ERDEM, T. K.; TURANLI, L.; ERDOGAN, T. Y. Setting time: An important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 741 – 745, may 2003.

FERREIRA JUNIOR, E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Dissertação de mestrado, Campinas, 2003. 141 p.

FIGUEIREDO, C. R. & NEPOMUCENO, A. A. Influência da absorção na carbonatação de estruturas de concreto in loco. In: **46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD. Florianópolis, IBRACON, 2004.

FU, X.; HOU, W.; YANG, C.; LI, D.; WU, X. Studies on Portland cement with large amount of slag. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 4, p 645 – 649, april 2000.

GLASSER, F. P. Chemical, mineralogical and microstructural changes occurring in hydrated slag-cement blends. In: SKALNY, J. & MINDESS, S., Ed. **Materials science of concrete II**. Westerville: The American Ceramic Society, Inc., 1991. 277 p.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. Editora Pini/IPT. São Paulo, 1986. 45 p.

HO, D. W. S.; CHUA, C. W.; TAM, C. T. Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 4, p. 595 – 601, abril 2003.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Tese de doutorado, São Paulo, 1995. 280 p.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 69 – 76, january 2003.

ICP 1001/1993. **Especificações técnicas para produção de elementos pré-fabricados de concreto**. Instituto do Concreto Pré-Fabricado. São Paulo, 1993. 70 p.

JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J. F. Hydration of Portland cement. In: BARNES, P. Ed. **Structure and performance of cements**. Appl. Sci. New York, London, 1983. 563 p.

JOHANSEN, V. Cement production and cement quality. In: SKALNY, J. & MINDESS, S., Ed. **Materials science of concrete I**. Westerville: The American Ceramic Society, Inc., 1989. 332 p.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Tese de doutorado, São Paulo, 1995. 189 p.

KATTAR, J. E. & ALMEIDA, N. J. **Cimento Portland**. Publicação Holdercin do Brasil. 3ª edição. Santo André. Editora Holdercin Brasil SA. 1999. 44 p.

KERTON, C. P. & MURRAY, R. J. Portland cement production. In: BARNES, P. Ed. **Structure and performance of cements**. Appl. Sci. New York, London, 1983. 563 p.

KLEMM, W. A. Cementitious materials: historical notes. In: SKALNY, J. & MINDESS, S., Ed. **Materials science of concrete I**. Westerville: The American Ceramic Society, Inc., 1989. 332 p.

KONSTA-GDOUTOS, M. S. & SHAH, S. P. Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1269 – 1276, august 2003.

KULAKOWSKI, V. F. M. P.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F. Adição de sílica ativa ao concreto: efeito benéfico ou prejudicial na corrosão das armaduras desencadeada por carbonatação. In: **45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD. Vitória, IBRACON, 2003.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. Chemical Publishing Company, Inc. New York, 1971. 727 p.

LEVY, S. M. & HELENE, P. R. L. Cura. Como, quando e por quê. **Téchne**. n 20, p. 18 – 21, jan/fev 1996.

LEVY, S. M. & HELENE, P. R. L. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção**. BT/PCC/318, São Paulo, 2002.

MARTINS, A. R. **Efeito da cura térmica e de cimentos com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobrimento**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Dissertação de mestrado, Campinas, 2001. 166 p.

MARTYS, N. S. & FERRARIS, C. F. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, v 27, n 5, p. 747 – 760, may 1997.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. Editora Pini, São Paulo, 1994. 573 p.

MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, E. F.; IRASSAR, E. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p 61 – 67, january 2003.

MELO, A. B. **Estudo da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré-moldados**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Dissertação de Mestrado, São Carlos, 1996. 223 p.

MELO, A. B.; LIBÓRIO, B. L.; SILVA, I. J. Evidências da perda de resistência mecânica final devido à cura térmica observadas através de imagens de microscopia eletrônica de varredura. In: **42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD. Fortaleza, IBRACON, 2000.

MELO, C. E. E. **Manual Munte de projetos em pré-fabricados de concreteto**. Munte Construções Industrializadas. Editora Pini, São Paulo, 2004. 492 p.

MIER, J. M. V. **Fracture processes of concrete: assessment of material parameters for fracture models**. CRC Press, New York, 1997. 448 p.

MINDESS, S. & YOUNG, J. F. **Concrete**. Prentice-Hall. New Jersey, 1981. 671 p.

MINDESS, S. Interfaces of concrete. In: SKALNY, J. & MINDESS, S., Ed.. **Materials science of concrete I**. Westerville: The American Ceramic Society, Inc., 1989. 332 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Editora Pini. São Paulo, 1982. 738 p.

OLIVEIRA, L. A. **Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para emprego em fachadas de edifícios**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Dissertação de mestrado, São Paulo, 2002. 175 p.

- PAULON, V. A. Interface entre pasta de cimento e agregado: A influência na durabilidade dos concretos. **Téchne**. n 25, p. 29 – 31, nov/dez 1996.
- PARROTT, L. J. Water absorption of cover concrete. **Materials and Structure**, v. 25, n. 149, p. 284 – 292, jun. 1992.
- PINTO, R. C. A & HOVER, K. C. Superplasticizer and silica fume addition effects on heat of hydration of mortar mixtures with low water-cementitious materials ratio. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, p 600 – 604, September-October, 1999.
- PINHEIRO, G. F. **O gerenciamento da construção civil e o desenvolvimento sustentável: um enfoque sobre os profissionais da área de edificações**. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Dissertação de mestrado, Campinas, 2002. 159 p.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Curing of concrete**. Concrete Information, 1968.
- RAO, G. A . Investigations on the performance of sílica fume-incorporated cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p 1765 – 1770, november 2003.
- ROSENBERG, A.; HANSSON, C. M.; ANDRADE, C. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In: SKALNY, J. & MINDESS, S., Ed. **Materials science of concrete I**. Westerville: The American Ceramic Society, Inc., 1989. 332 p.
- ROSTAM, S. High performance concrete cover – why it is needed and how to achieve it in practice. **Construction and Building Materials**. v. 10, n 5, p. 407 – 421, july 1996.
- SATO, N. M. N. & AGOPYAN, V. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. BT/PCC/EPUSP, São Paulo, 2003.
- SEIDLER, N., DAL MOLIN, D. Efeito da sílica ativa na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento. In: **V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO**, Anais em CD, São Paulo, 2003..
- SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Tese de doutorado, São Paulo, 1998. **232 p.**
- SILVA, V. M. & LIBÓRIO, J. B. L. A carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa. In: **44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD. Foz do Iguaçu, IBRACON, 2002.
- SIMPLICIO, M. A S. Concreto de alto desempenho suas vantagens e aplicações. World Tec Net – Tecnologia do Concreto, Universidade Federal da Paraíba. In: **Concreto de Alto Desempenho – CD IBRACON**, 1999.

SCANDIUZZI, L. & BATTAGIN, A. F. **A utilização da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo.** Publicação Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo, 1990. 35 p.

SCHIESSI, P. Durability of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 289 – 295, jul. 1996.

SCRIVENER, K. L. The microstructure of concrete. In: SKALNY, J. & MINDESS, S., Ed. **Materials science of concrete I.** Westerville: The American Ceramic Society, Inc., 1989. 332 p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** Academic Press Ltda. London, 1992. 475 p.

**TÉCHNE.** Desempenho à toda prova. n 63, ° p. 36 – 43, junho 2002.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil – Recordes – Realizações -História.** Volume 1. Editora Pini, São Paulo, 1992. 277 p.

YAJUN, J. & CAHYADI, J. H. Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p 1543 – 1548, october 2003.

# A

## APÊNDICE A

No APÊNDICE A estão apresentados os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA) em concretos produzidos com cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), os resultados se apresentam em um intervalo de confiança de 95%. Através da análise de variância (ANOVA) apresentam-se as diferenças estatisticamente significativas entre os resultados obtidos em laboratório durante a pesquisa experimental. A análise de variância foi realizada utilizando-se o Método de Tukey utilizando-se como ferramenta auxiliar no processamento dos dados o software STATGRAPHICS PLUS versão 4.1.

Os resultados dos ensaios de resistências mecânicas e durabilidade dos concretos são apresentados comparando-se concretos com e sem utilização de sílica ativa. Nos gráficos os resultados são apresentados observando se são ou não estatisticamente significativos quando comparados entre si (diferenças estatisticamente significativas são representadas por um asterisco ao lado da sigla dos dois resultados comparados, quando não se coloca o asterisco é porque a diferença não é estatisticamente significativa). A análise foi realizada nas seguintes propriedades:

- Resistência à compressão.
- Resistência à tração por compressão diametral.
- Permeabilidade ao ar.
- Absorção inicial – 1 hora.
- Absorção capilar – 24 horas.
- Absorção total – imerso 24 horas.
- Absorção total – imerso 3 dias.
- Índice de vazios – imerso 24 horas.
- Índice de vazios – imerso 3 dias.

# A1

## APÊNDICE A1

### ARI X ARI-SIL

#### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

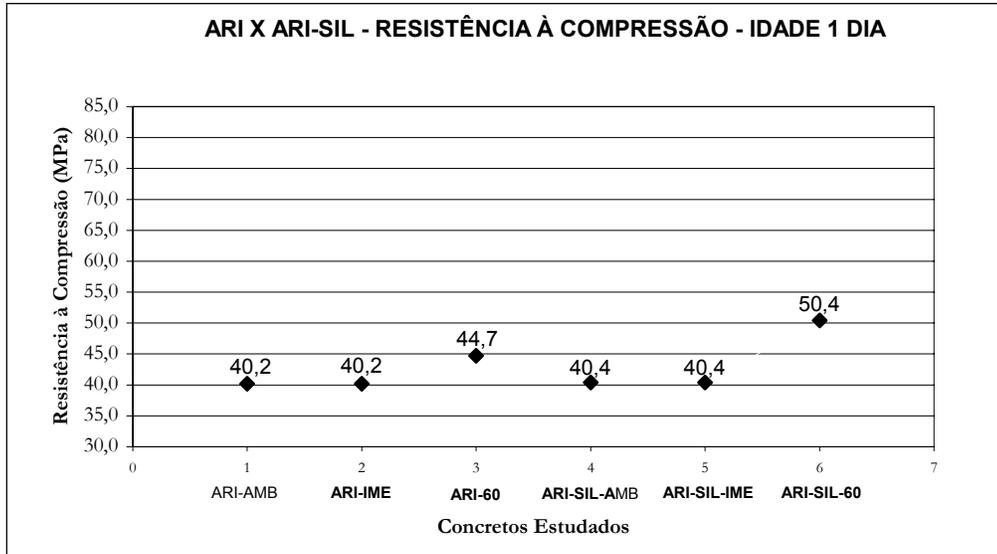


Figura A1.1 – Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 1 dia.

<b>1 – 2</b>	<b>1 – 3 *</b>	<b>1 – 4</b>	<b>1 – 5</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4</b>	<b>2 – 5</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5</b>	<b>4 – 6 *</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

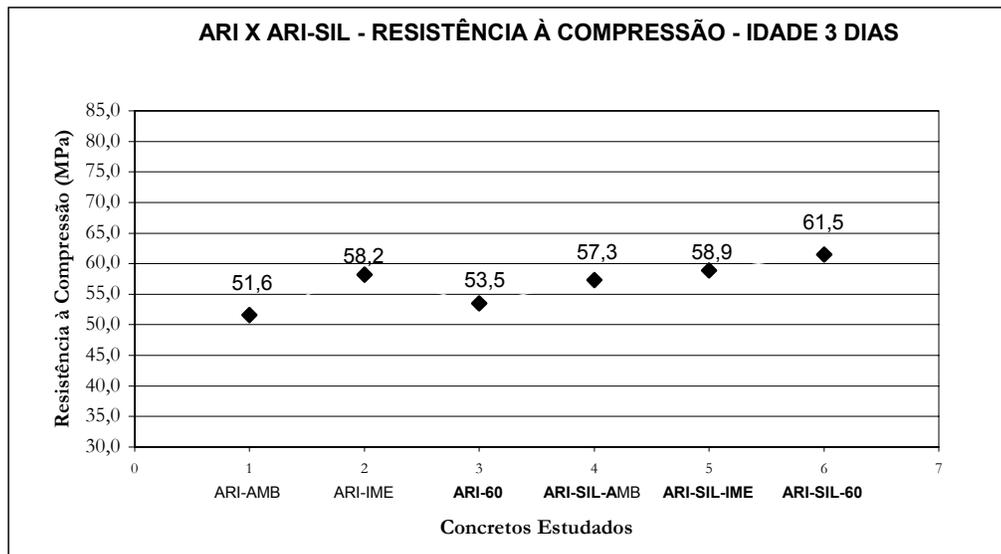


Figura A1.2 – Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 3 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4</b>	<b>2 – 5</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5</b>	<b>4 – 6 *</b>			
<b>5 – 6</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

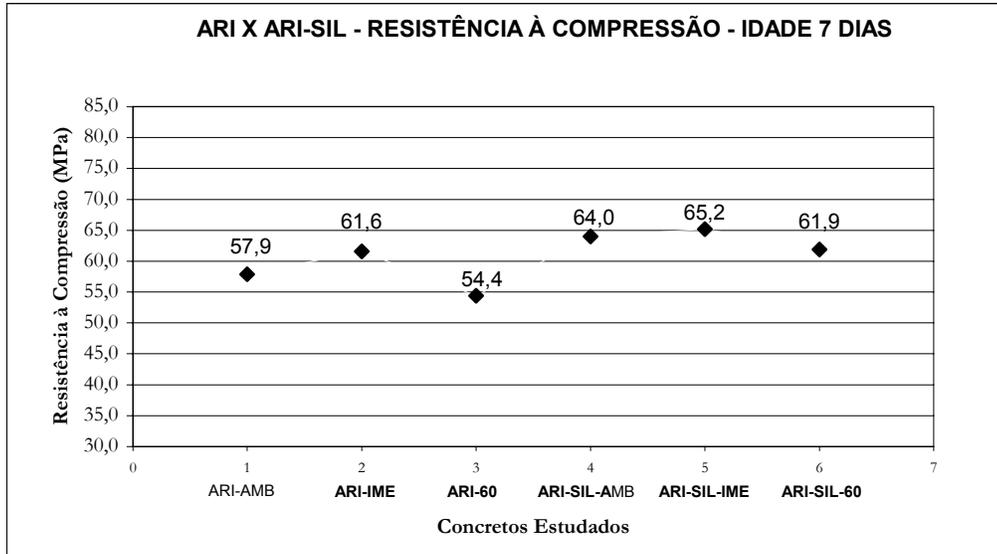


Figura A1.3 – Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 7 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4</b>	<b>2 – 5</b>	<b>2 – 6</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5</b>	<b>4 – 6</b>			
<b>5 – 6</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

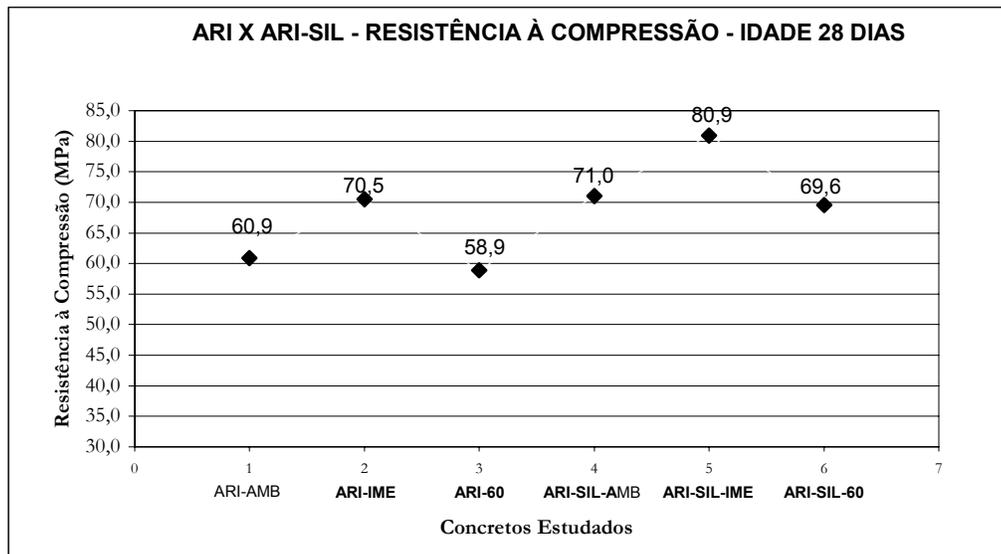


Figura A1.4 – Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4</b>	<b>2 – 5 *</b>	<b>2 – 6</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5 *</b>	<b>4 – 6</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

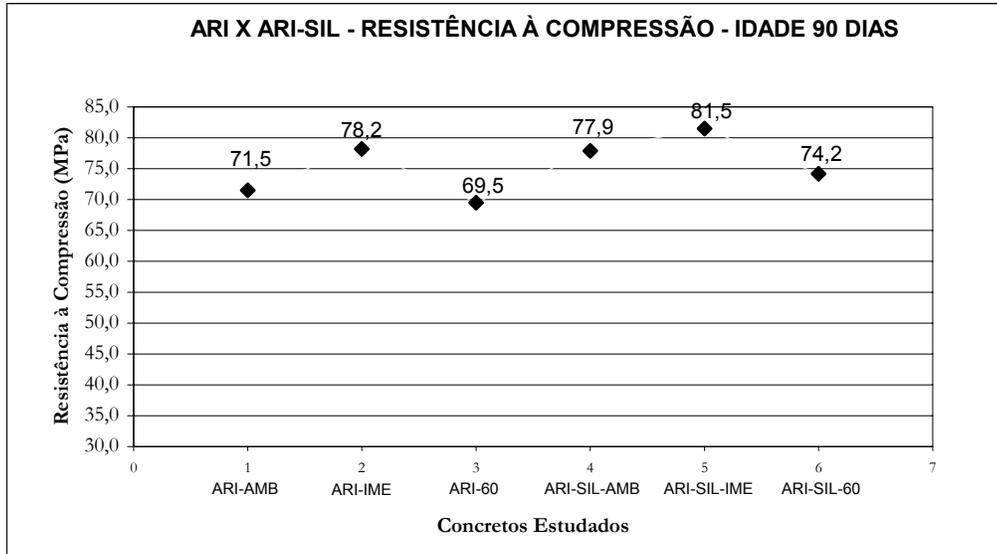


Figura A1.5 – Resistência à compressão – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6

2 – 3 \*

2 – 4

2 – 5

2 – 6

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6

4 – 5

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# A2

## APÊNDICE A2

### ARI X ARI-SIL

#### RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

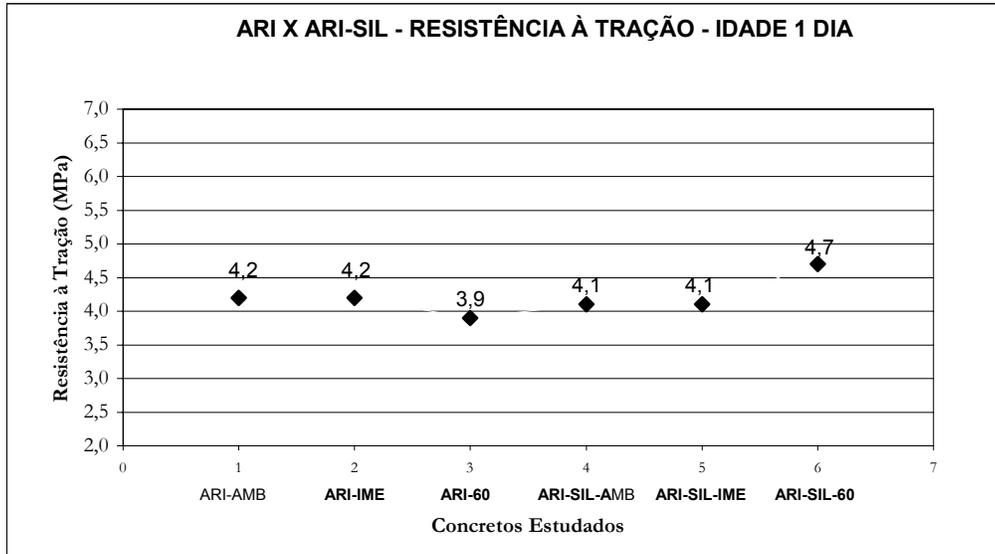


Figura A2.1 – Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 1 dia.

1 – 2	1 – 3	1 – 4	1 – 5	1 – 6 *
2 – 3	2 – 4	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4	3 – 5	3 – 6 *		
4 – 5	4 – 6 *			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

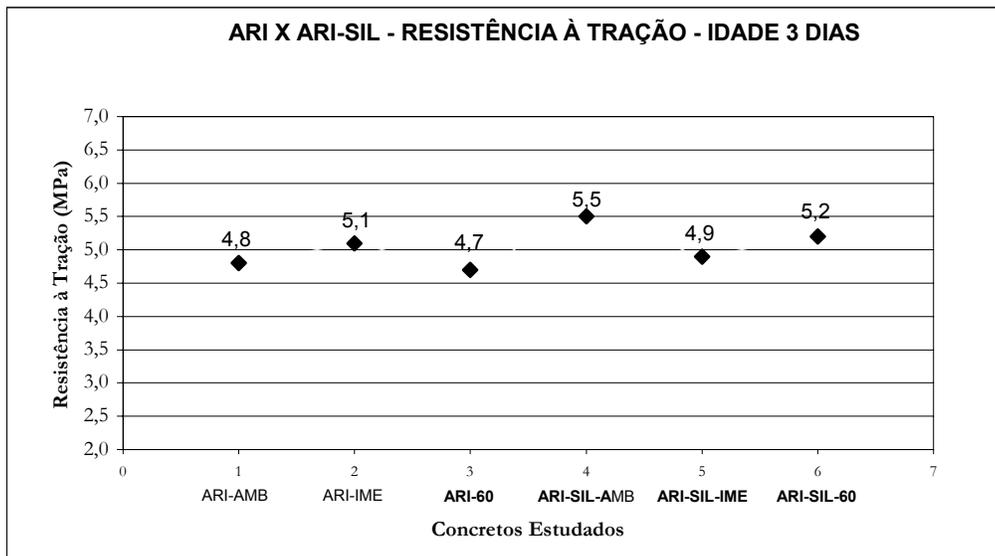


Figura A2.2 – Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 3 dias.

1 – 2	1 – 3	1 – 4 *	1 – 5	1 – 6
2 – 3	2 – 4	2 – 5	2 – 6	
3 – 4 *	3 – 5	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			
5 – 6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

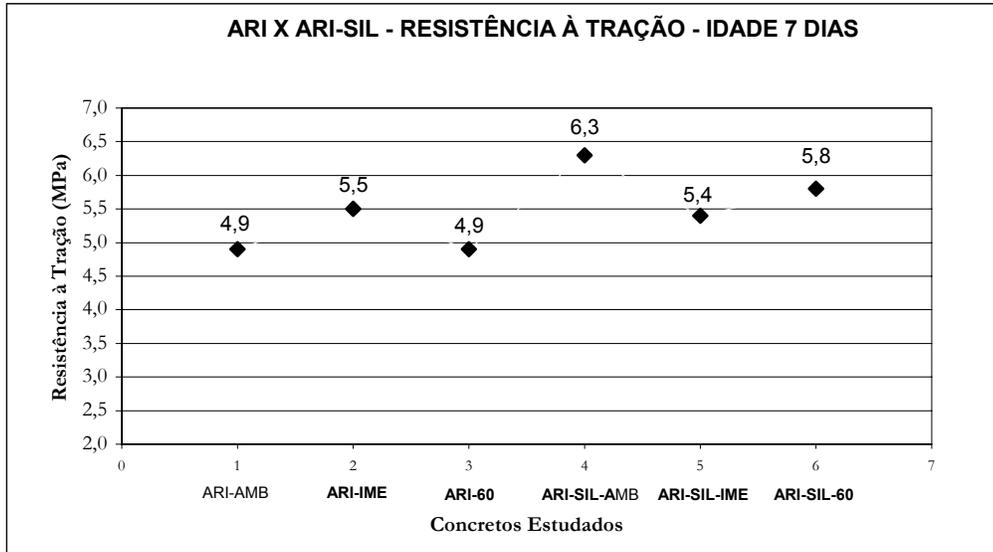


Figura A2.3 – Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 7 dias.

1 – 2 *	1 – 3	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			
5 – 6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

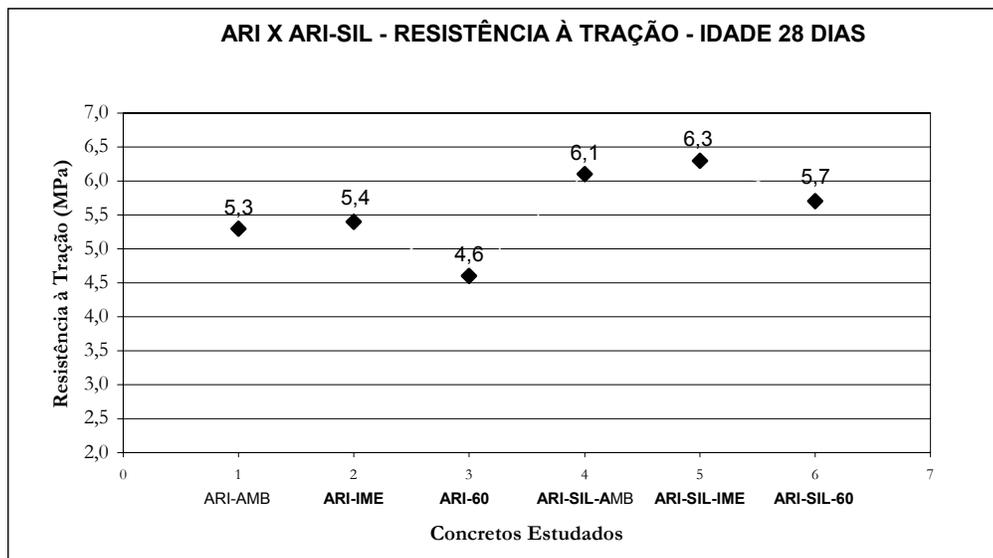


Figura A2.4 – Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5 *	2 – 6	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5	4 – 6			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

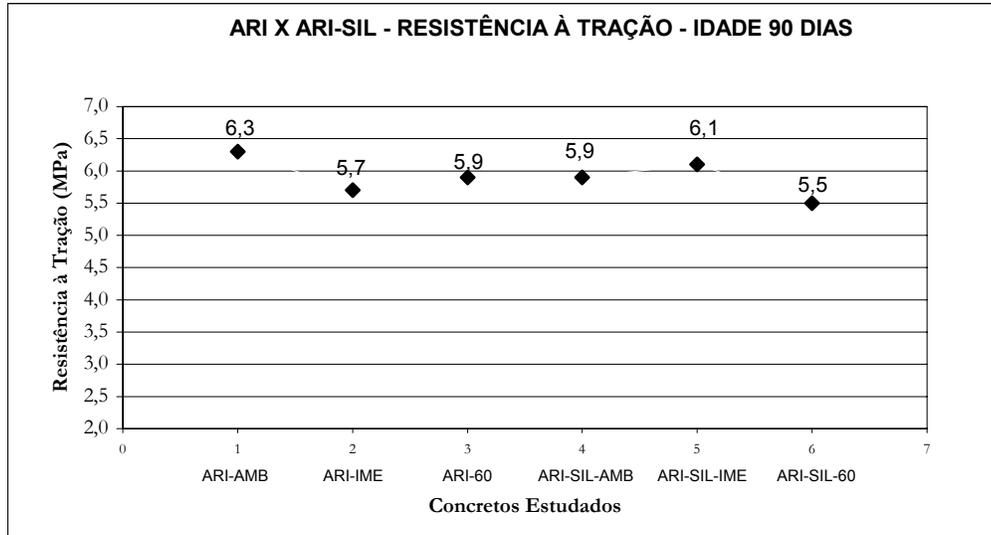


Figura A2.5 – Resistência à tração – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

**1 – 2 \***

**1 – 3**

**1 – 4**

**1 – 5**

**1 – 6**

**2 – 3**

**2 – 4**

**2 – 5**

**2 – 6**

**3 – 4**

**3 – 5**

**3 – 6**

**4 – 5**

**4 – 6**

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

**5 – 6 \***

# A3

## APÊNDICE A3

### ARI X ARI-SIL

#### PERMEABILIDADE AO AR - $k(m^2) \times 10^{-19}$

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

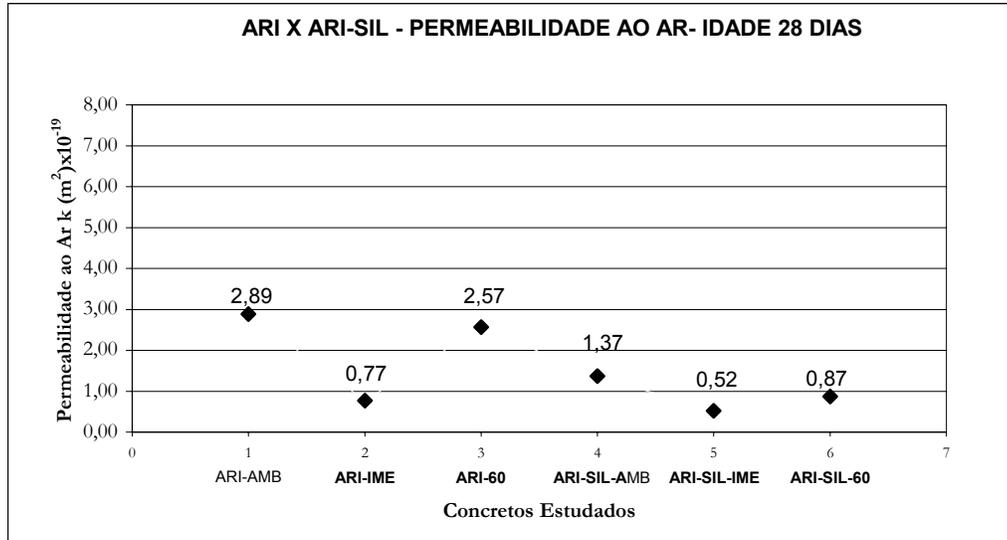


Figura A3.1 – Permeabilidade ao ar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

- |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>1 – 2 *</b> | <b>1 – 3 *</b> | <b>1 – 4 *</b> | <b>1 – 5 *</b> | <b>1 – 6 *</b> |
| <b>2 – 3 *</b> | <b>2 – 4 *</b> | <b>2 – 5 *</b> | <b>2 – 6 *</b> |                |
| <b>3 – 4 *</b> | <b>3 – 5 *</b> | <b>3 – 6 *</b> |                |                |
| <b>4 – 5 *</b> | <b>4 – 6 *</b> |                |                |                |
| <b>5 – 6 *</b> |                |                |                |                |
- \* Diferença Estatisticamente Significativa**

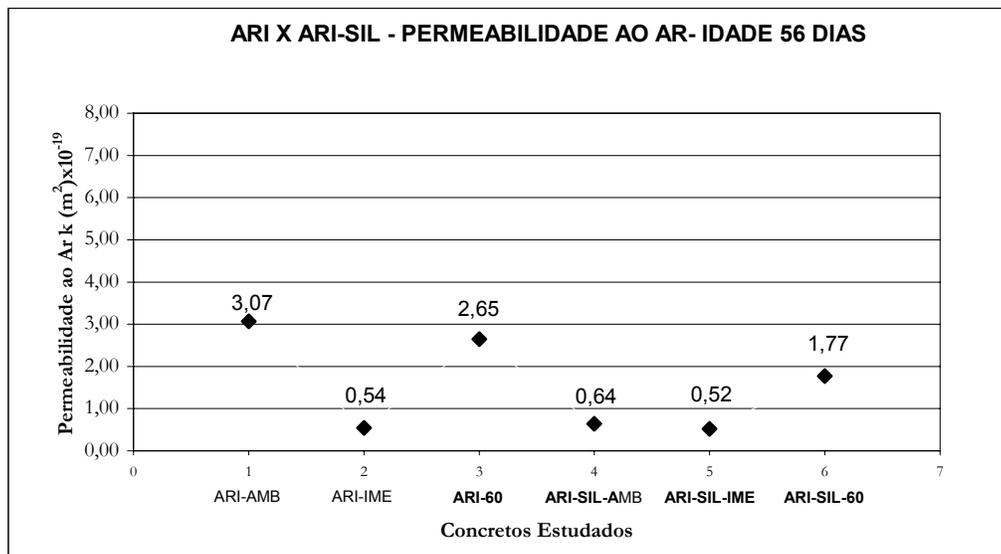


Figura A3.2 – Permeabilidade ao ar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.

- |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>1 – 2 *</b> | <b>1 – 3 *</b> | <b>1 – 4 *</b> | <b>1 – 5 *</b> | <b>1 – 6 *</b> |
| <b>2 – 3 *</b> | <b>2 – 4 *</b> | <b>2 – 5</b>   | <b>2 – 6 *</b> |                |
| <b>3 – 4 *</b> | <b>3 – 5 *</b> | <b>3 – 6 *</b> |                |                |
| <b>4 – 5 *</b> | <b>4 – 6 *</b> |                |                |                |
| <b>5 – 6 *</b> |                |                |                |                |
- \* Diferença Estatisticamente Significativa**

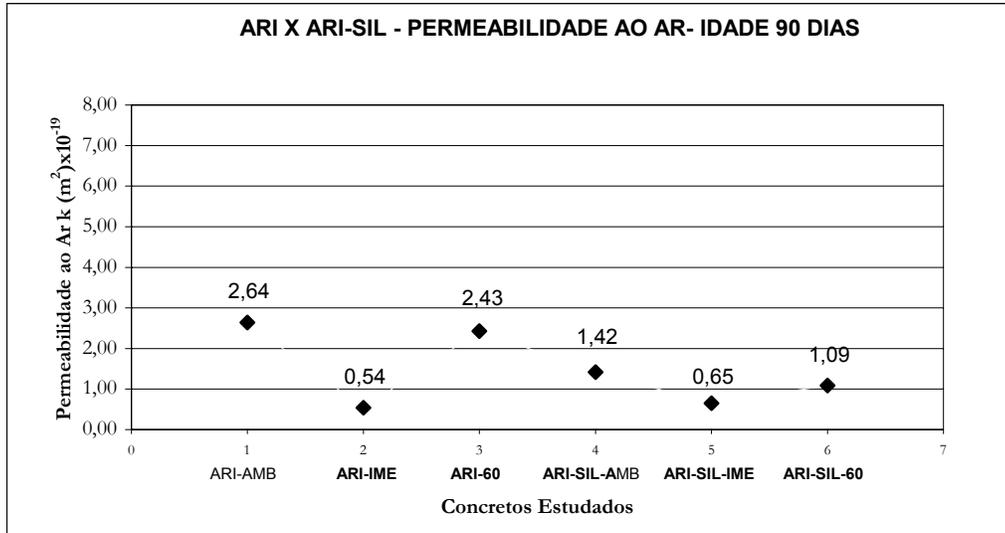


Figura A3.3 – Permeabilidade ao ar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# A4

## APÊNDICE A4

### ARI X ARI-SIL

#### ABSORÇÃO INICIAL – 1 HORA (Kg/m<sup>2</sup>)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

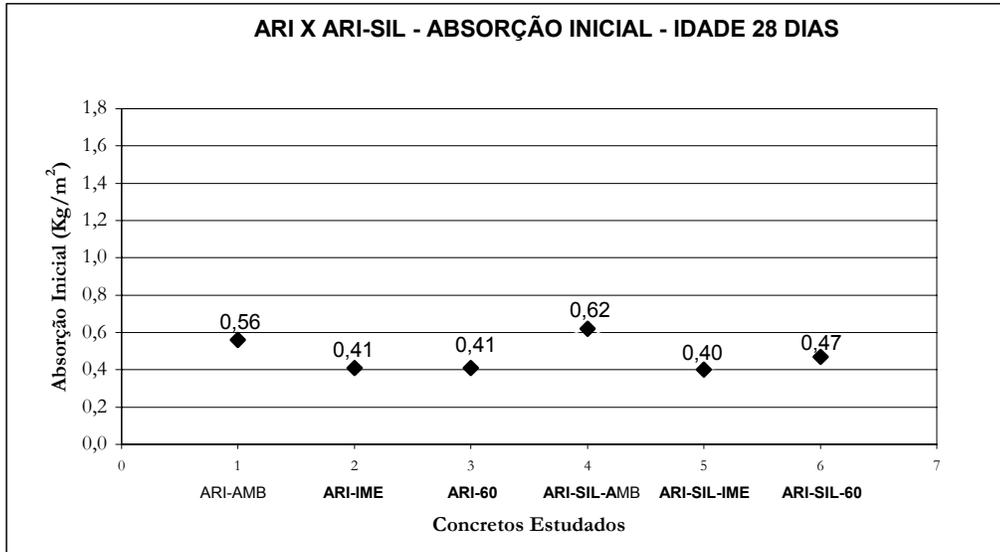


Figura A4.1 – Absorção inicial – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6 *			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

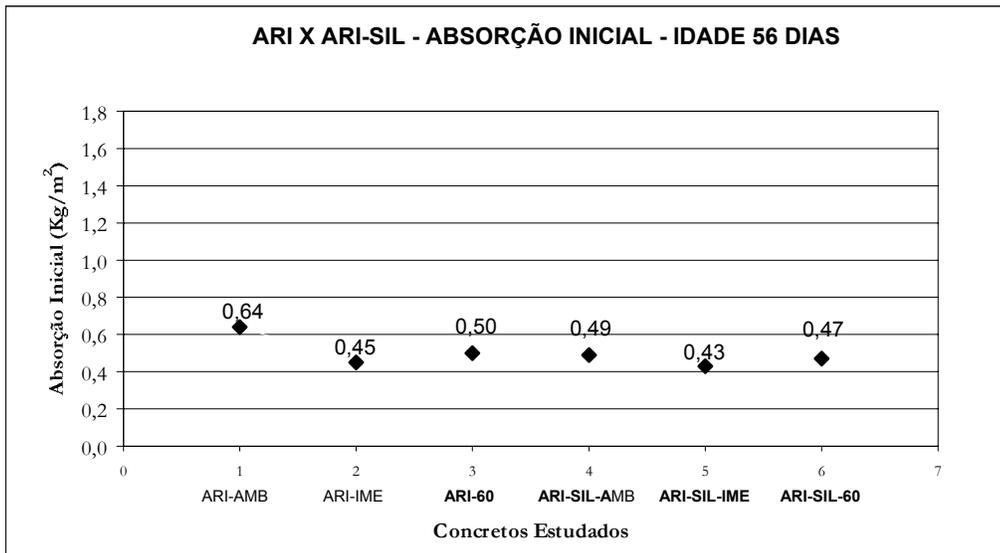


Figura A4.2 – Absorção inicial – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6	
3 – 4	3 – 5 *	3 – 6		
4 – 5 *	4 – 6			
5 – 6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

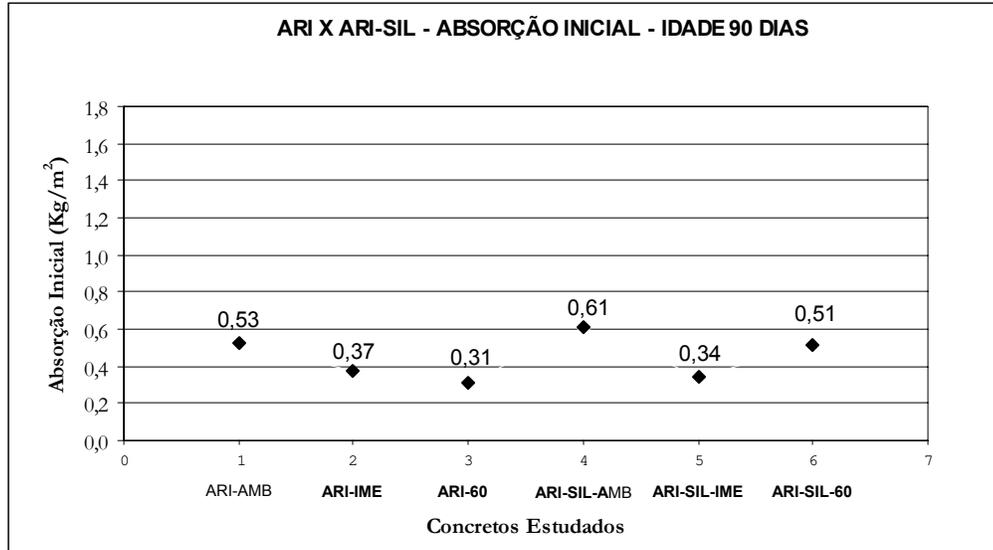


Figura A4.3 – Absorção inicial – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* **Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

# A5

## APÊNDICE A5

### ARI X ARI-SIL

#### ABSORÇÃO CAPILAR – 24 HORAS (Kg/m<sup>2</sup>)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

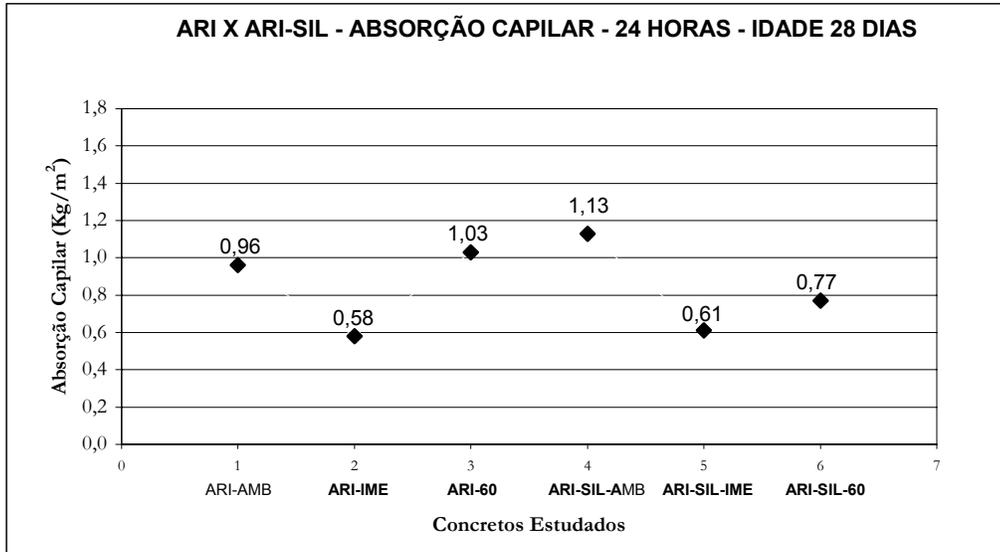


Figura A5.1 – Absorção capilar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6 *			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

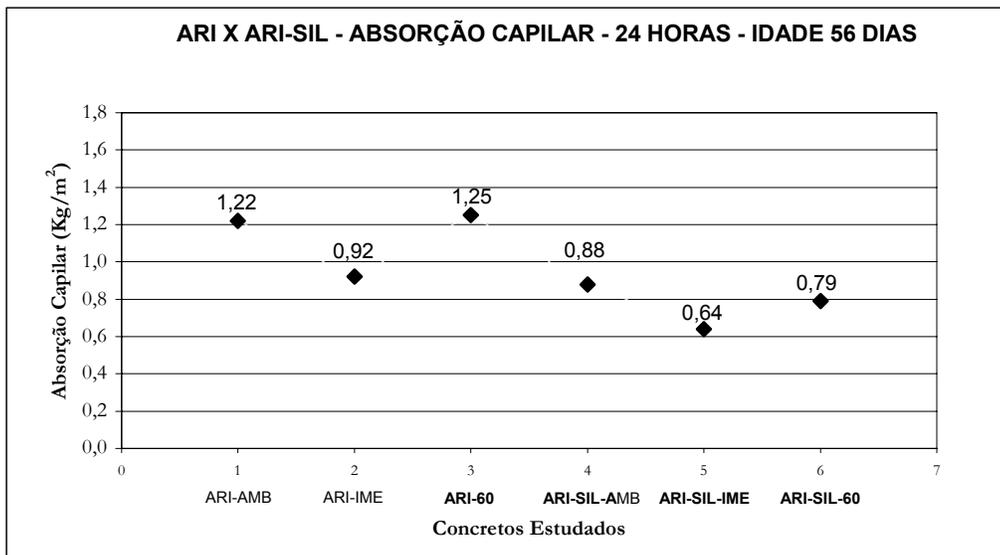


Figura A5.2 – Absorção capilar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 *	1 – 3	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4	2 – 5 *	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6 *			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

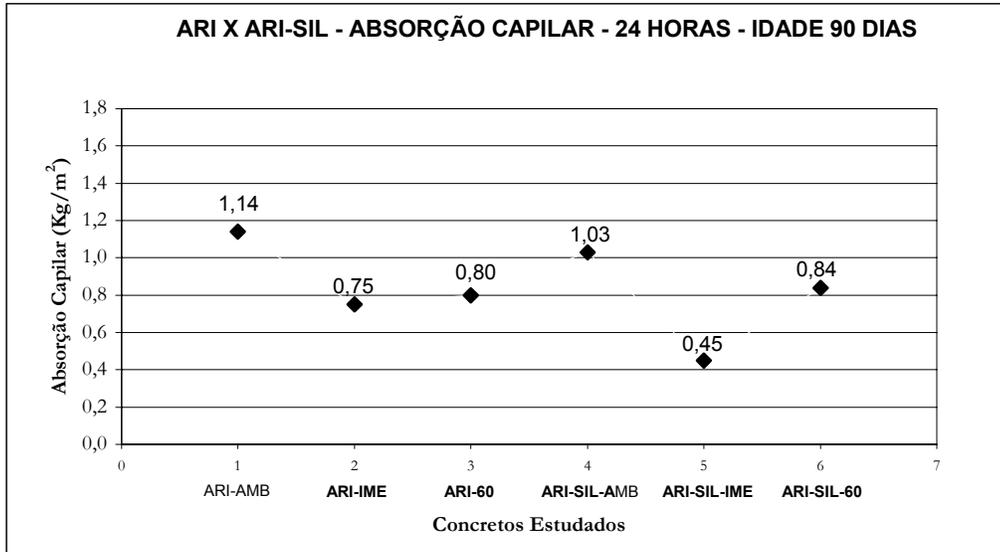


Figura A5.3 – Absorção capilar – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6

4 – 5 \*

4 – 6 \*

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

# A6

## APÊNDICE A6

### ARI X ARI-SIL

#### ABSORÇÃO TOTAL – IMERSO 24 HORAS (%)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

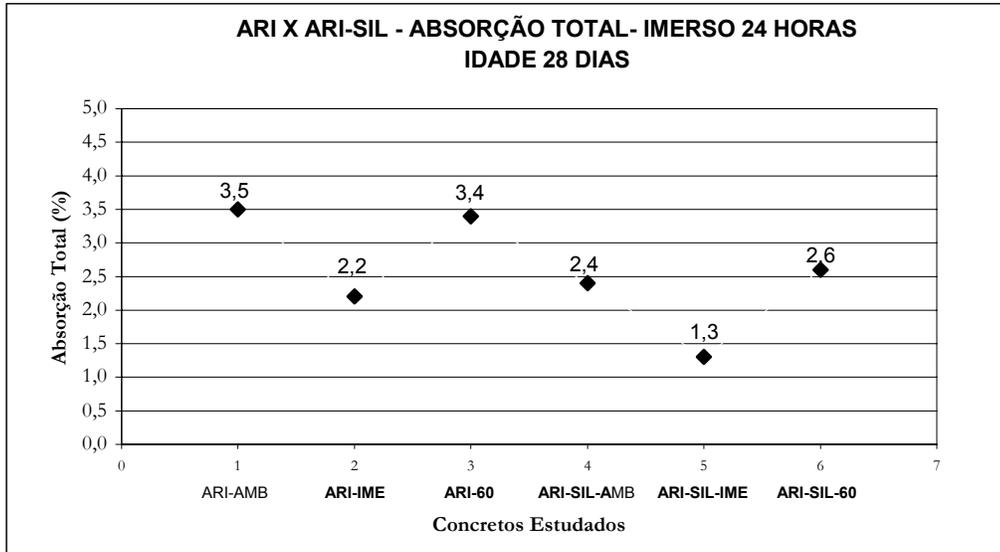


Figura A6.1 – Absorção total – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4	2 – 5 *	2 – 6	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

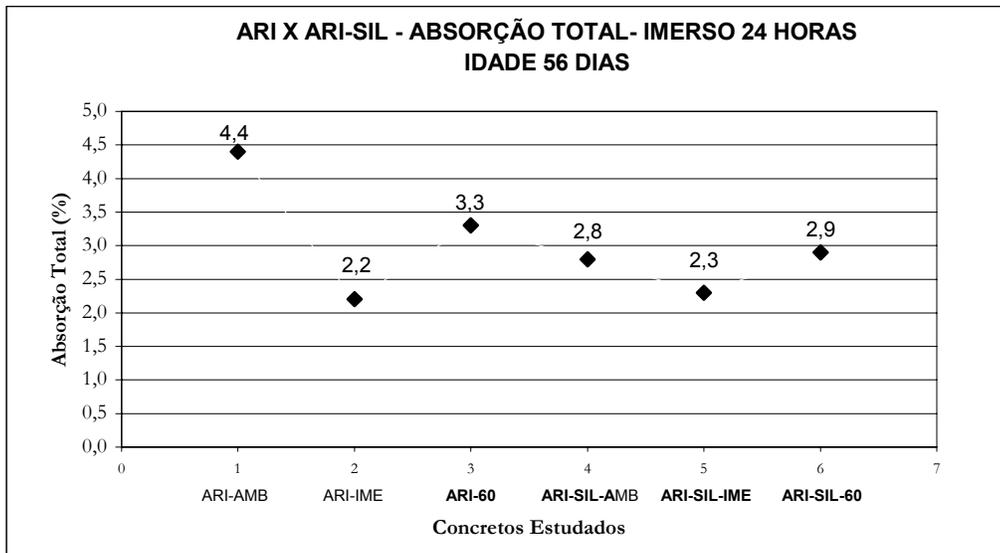


Figura A6.2 – Absorção total – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

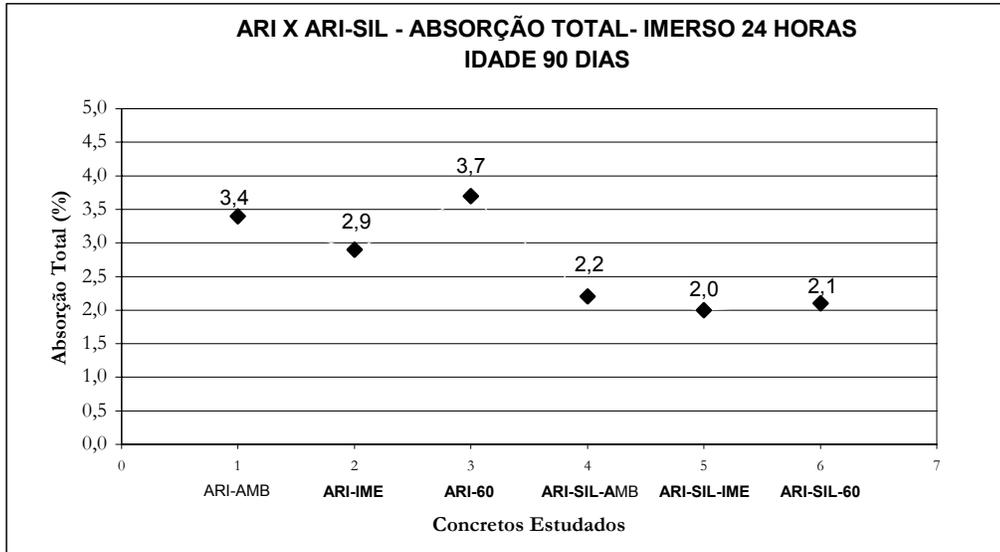


Figura A6.3 – Absorção total – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2\*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6

# A7

## APÊNDICE A7

### ARI X ARI-SIL

#### ABSORÇÃO TOTAL – IMERSO 3 DIAS (%)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

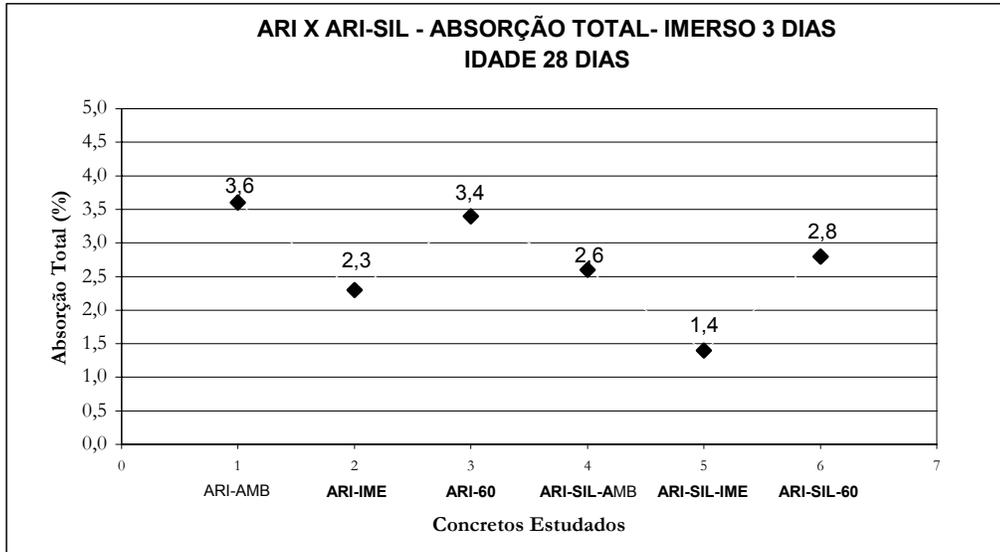


Figura A7.1 – Absorção total – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

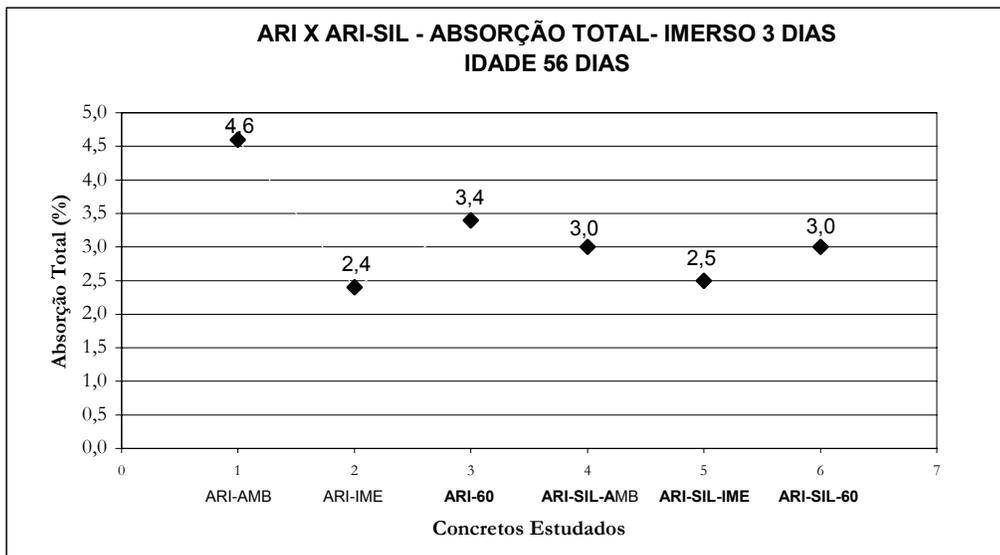


Figura A7.2 – Absorção total – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

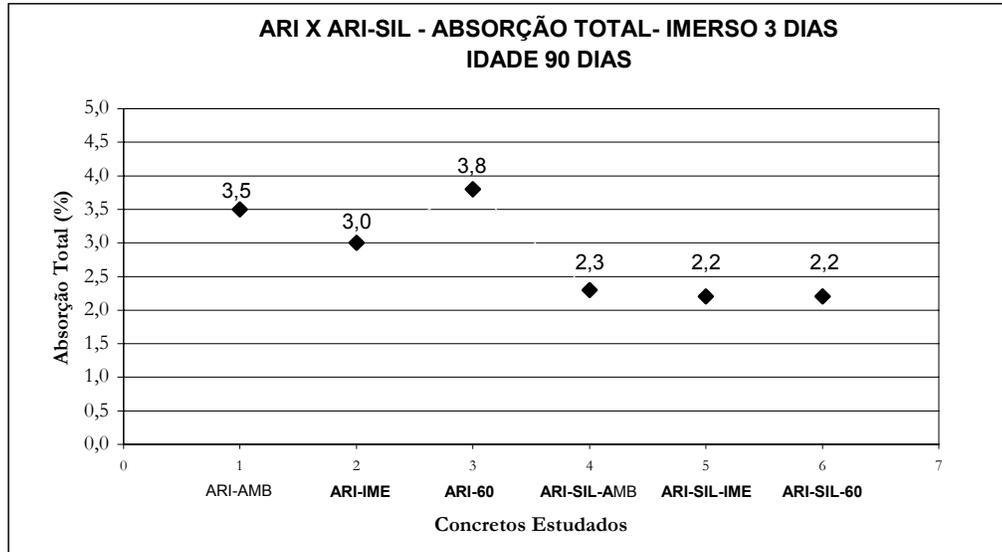


Figura A7.3 – Absorção total – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6

# A8

## APÊNDICE A8

### ARI X ARI-SIL

#### ÍNDICE DE VAZIOS – IMERSO 24 HORAS (%)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

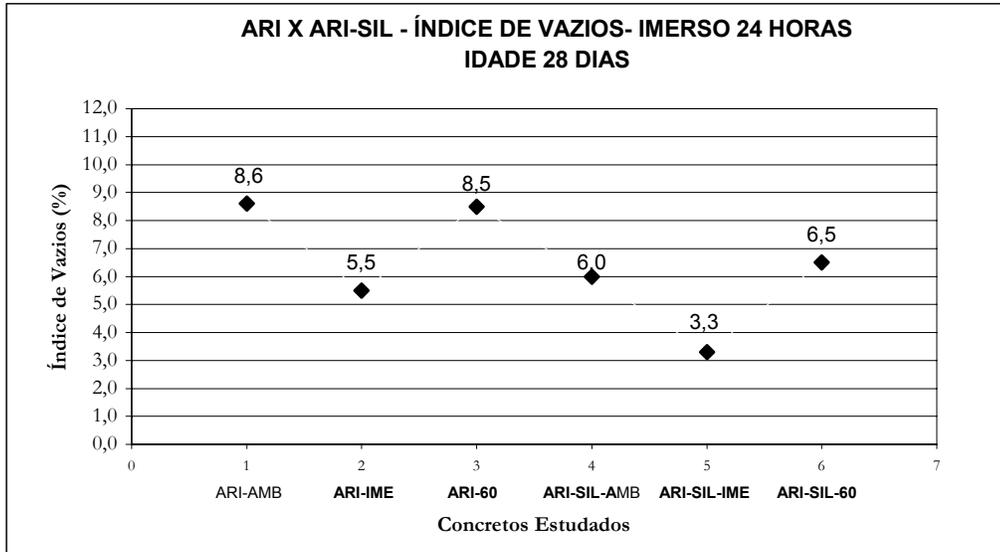


Figura A8.1 – Índice de vazios – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4</b>	<b>2 – 5 *</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5 *</b>	<b>4 – 6</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

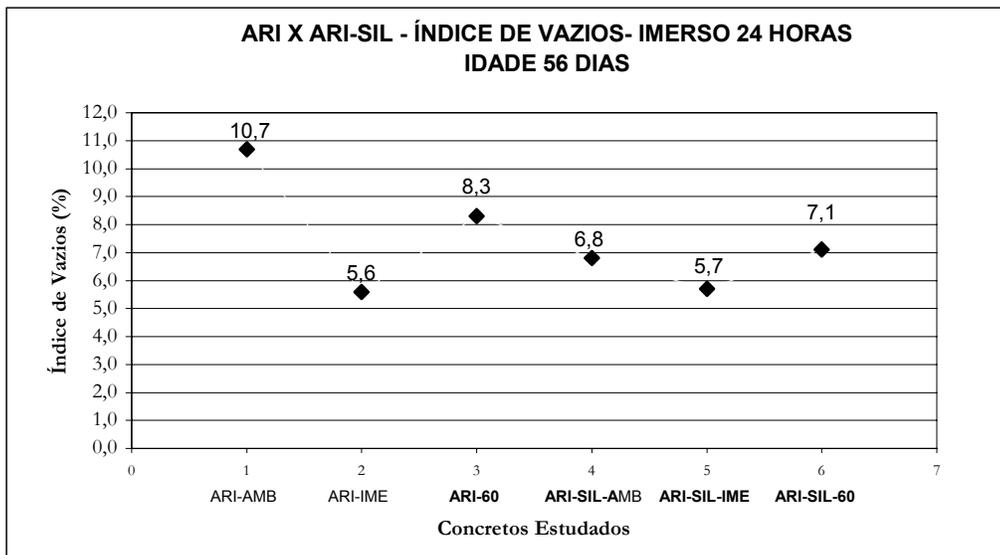


Figura A8.2 – Índice de vazios – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3 *</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4 *</b>	<b>2 – 5</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5 *</b>	<b>4 – 6</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

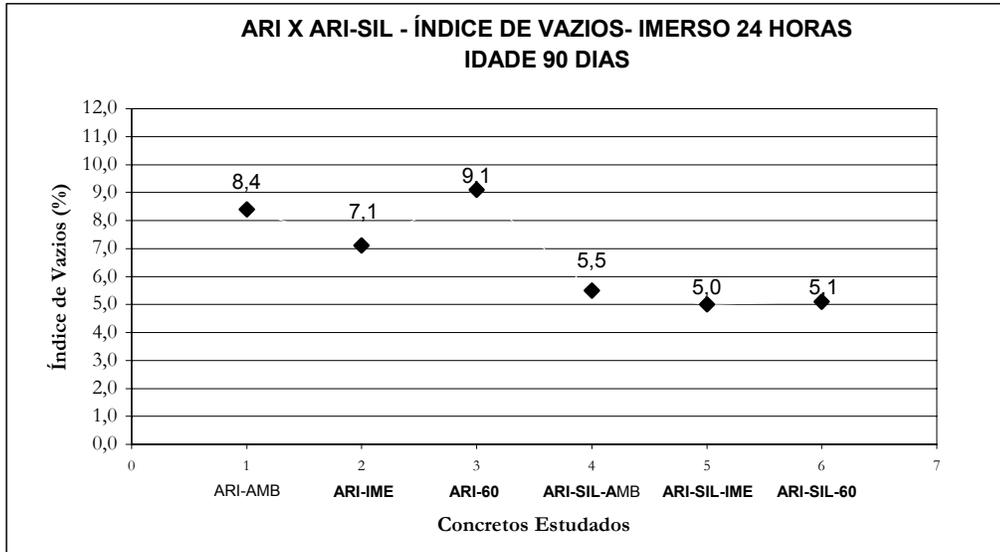


Figura A8.3 – Índice de vazios – imerso 24 horas – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6

# A9

## APÊNDICE A9

### ARI X ARI-SIL

#### ÍNDICE DE VAZIOS – IMERSO 3 DIAS (%)

1 – ARI-AMB

2 – ARI-IME

3 – ARI-60

4 – ARI-SIL-AMB

5 – ARI-SIL-IME

6 – ARI-SIL-60

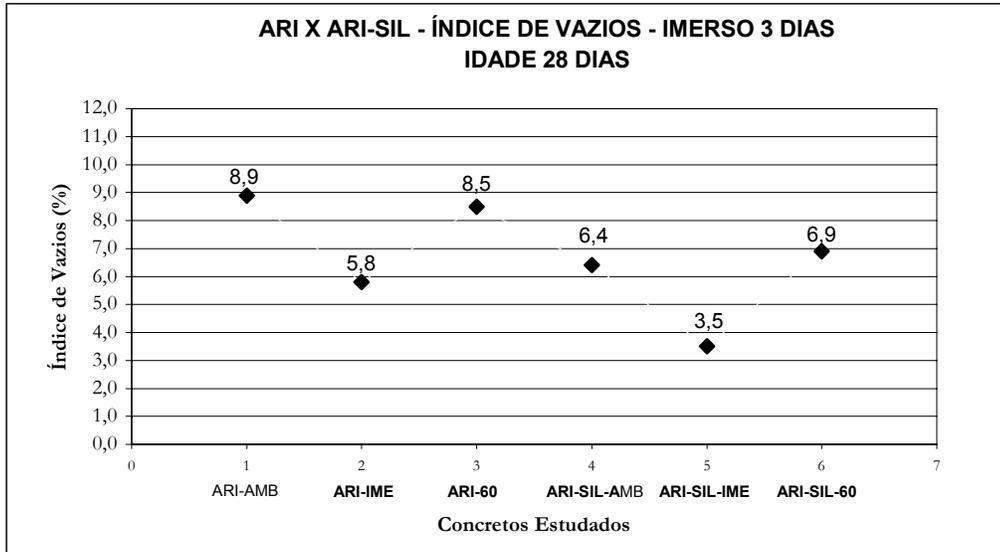


Figura A9.1 – Índice de vazios – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

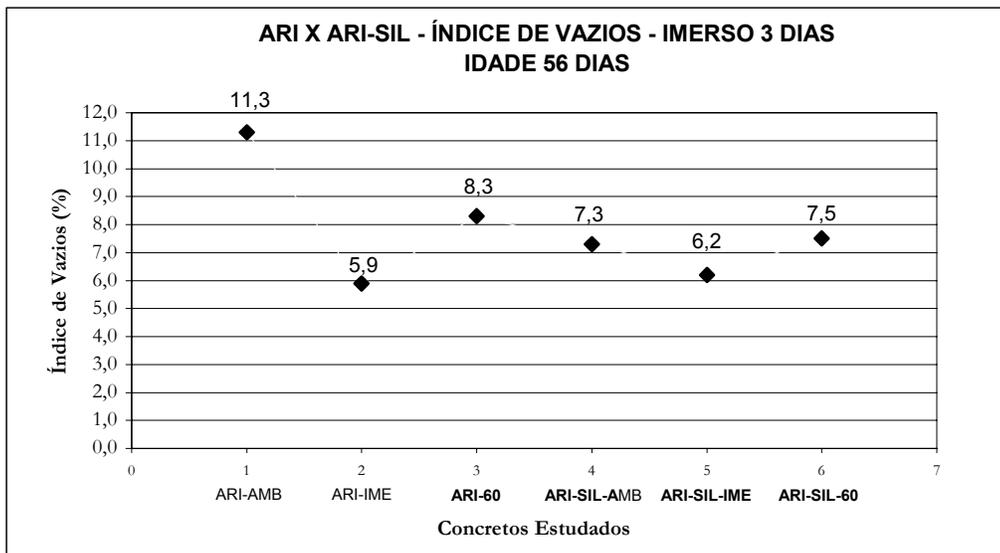


Figura A9.2 – Índice de vazios – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

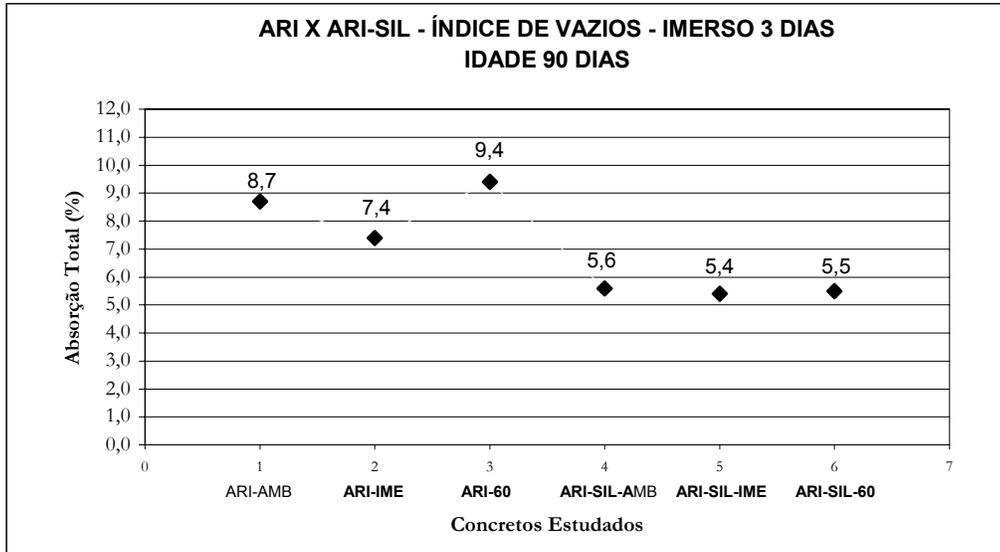


Figura A9.3 – Índice de vazios – imerso 3 dias – CP V ARI – ARI X ARI-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6

# B

## APÊNDICE B

No APÊNDICE B estão apresentados os gráficos obtidos na análise estatística realizada por análise de variância (ANOVA) em concretos produzidos com cimento Portland de Alto-Forno (CP III), os resultados se apresentam em um intervalo de confiança de 95%. Através da análise de variância (ANOVA) apresentam-se as diferenças estatisticamente significativas entre os resultados obtidos em laboratório durante a pesquisa experimental. A análise de variância foi realizada utilizando-se o Método de Tukey utilizando-se como ferramenta auxiliar no processamento dos dados o software STATGRAPHICS PLUS versão 4.1.

Os resultados dos ensaios de resistências mecânicas e durabilidade dos concretos são apresentados comparando-se concretos com e sem utilização de sílica ativa. Nos gráficos os resultados são apresentados observando se são ou não estatisticamente significativos quando comparados entre si (diferenças estatisticamente significativas são representadas por um asterisco ao lado da sigla dos dois resultados comparados, quando não se coloca o asterisco é porque a diferença não é estatisticamente significativa). A análise foi realizada nas seguintes propriedades:

- Resistência à compressão.
- Resistência à tração por compressão diametral.
- Permeabilidade ao ar.
- Absorção inicial – 1 hora.
- Absorção capilar – 24 horas.
- Absorção total – imerso 24 horas.
- Absorção total – imerso 3 dias.
- Índice de vazios – imerso 24 horas.
- Índice de vazios – imerso 3 dias.

# B1

## APÊNDICE B1

### CPIII X CPIII-SIL

#### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

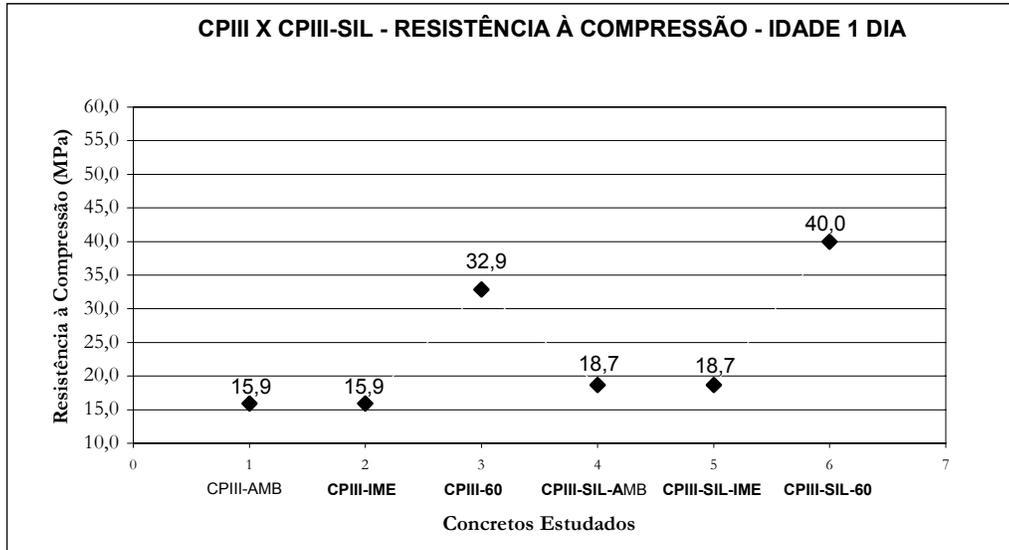


Figura B1.1 – Resistência à compressão – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 1 dia.

<b>1 – 2</b>	<b>1 – 3 *</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4 *</b>	<b>2 – 5 *</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5</b>	<b>4 – 6 *</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

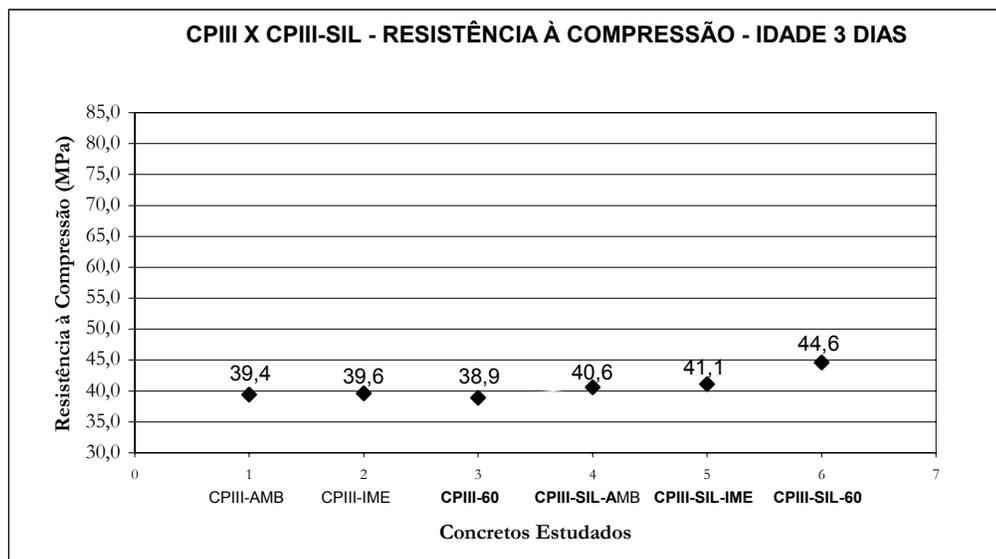


Figura B1.2 – Resistência à compressão – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 3 dias.

<b>1 – 2</b>	<b>1 – 3</b>	<b>1 – 4</b>	<b>1 – 5</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3</b>	<b>2 – 4</b>	<b>2 – 5</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4</b>	<b>3 – 5</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5</b>	<b>4 – 6 *</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

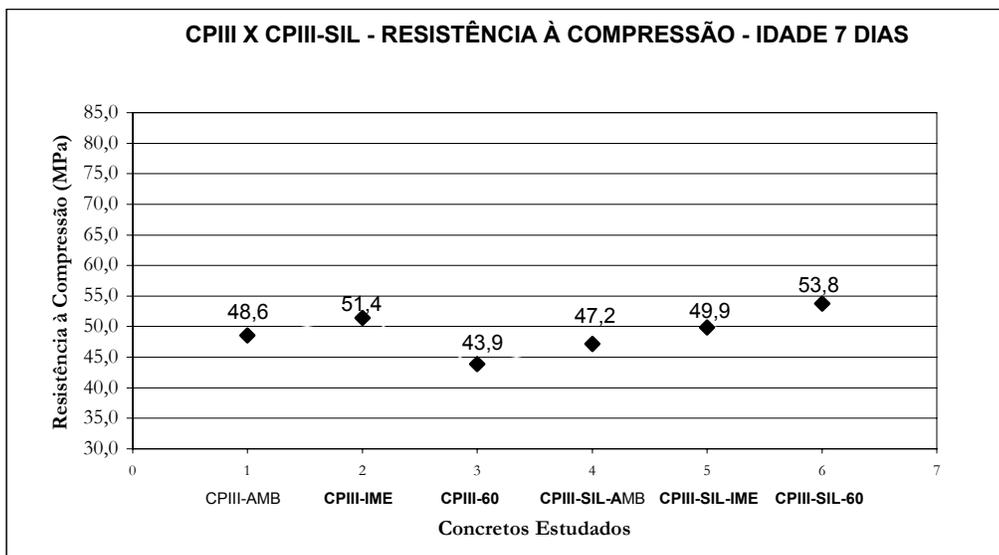


Figura B1.3 – Resistência à compressão – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 7 dias.

<b>1 – 2</b>	<b>1 – 3</b>	<b>1 – 4</b>	<b>1 – 5</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4</b>	<b>2 – 5</b>	<b>2 – 6</b>	
<b>3 – 4</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5</b>	<b>4 – 6 *</b>			
<b>5 – 6</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

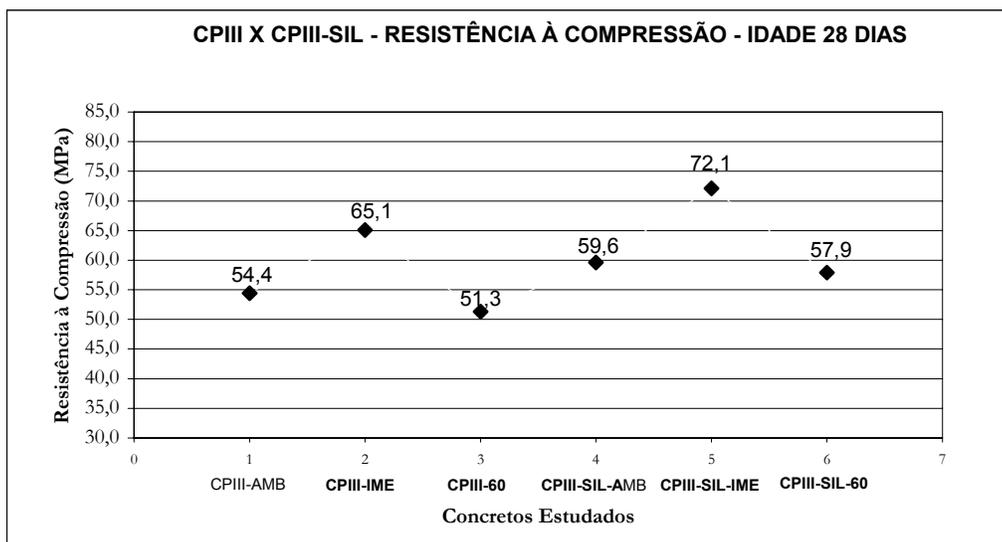


Figura B1.4 – Resistência à compressão – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 28 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4 *</b>	<b>2 – 5 *</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5 *</b>	<b>4 – 6</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

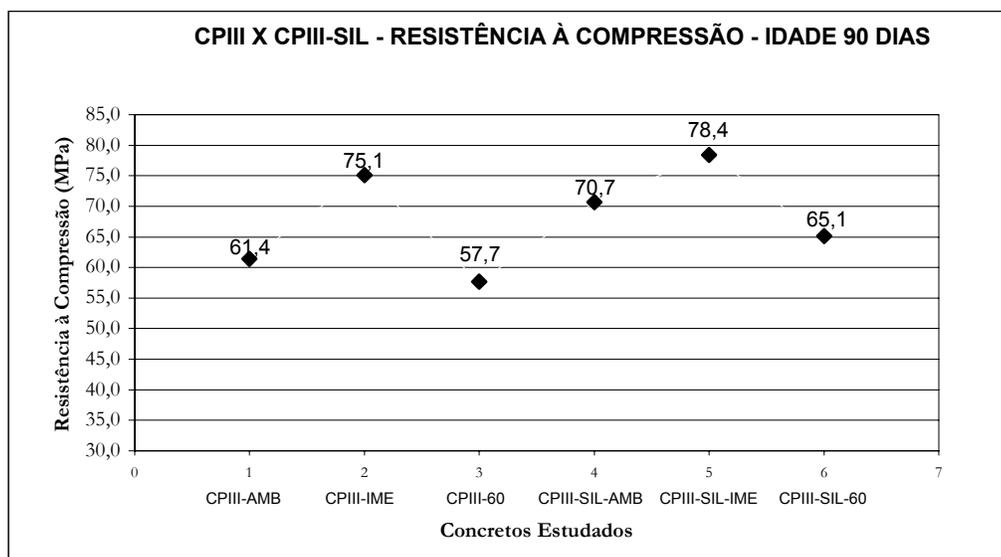


Figura B1.5 – Resistência à compressão – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# B2

## APÊNDICE B2

### CPIII X CPIII-SIL

#### RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

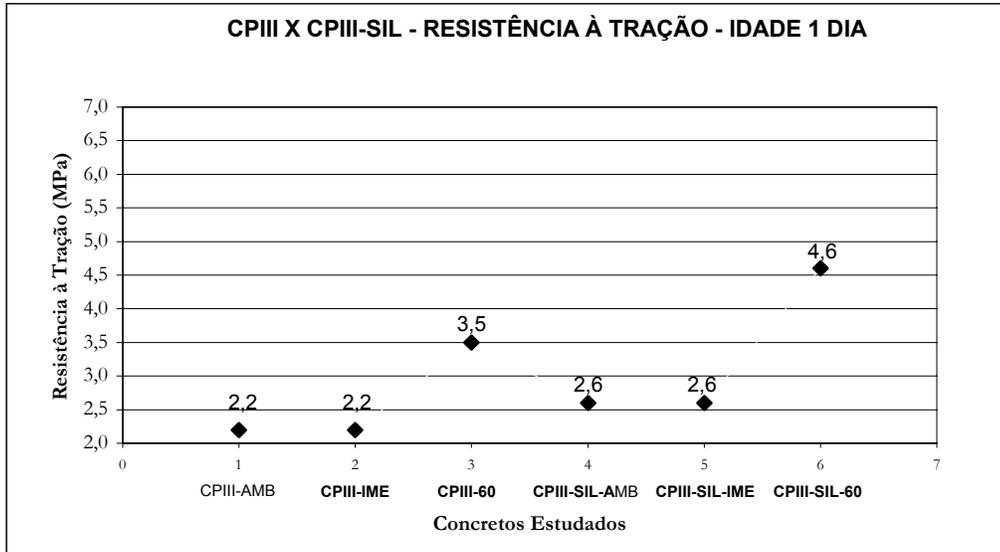


Figura B2.1 – Resistência à tração – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 1 dia.

1 – 2

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5

4 – 6 \*

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

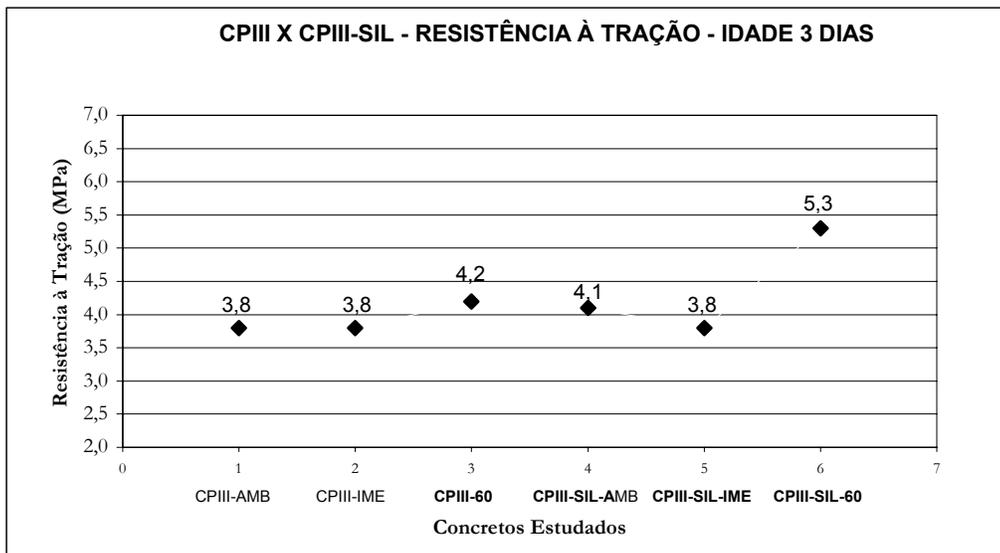


Figura B2.2 – Resistência à tração – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 3 dias.

1 – 2

1 – 3

1 – 4

1 – 5

1 – 6 \*

2 – 3

2 – 4

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4

3 – 5

3 – 6 \*

4 – 5

4 – 6 \*

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

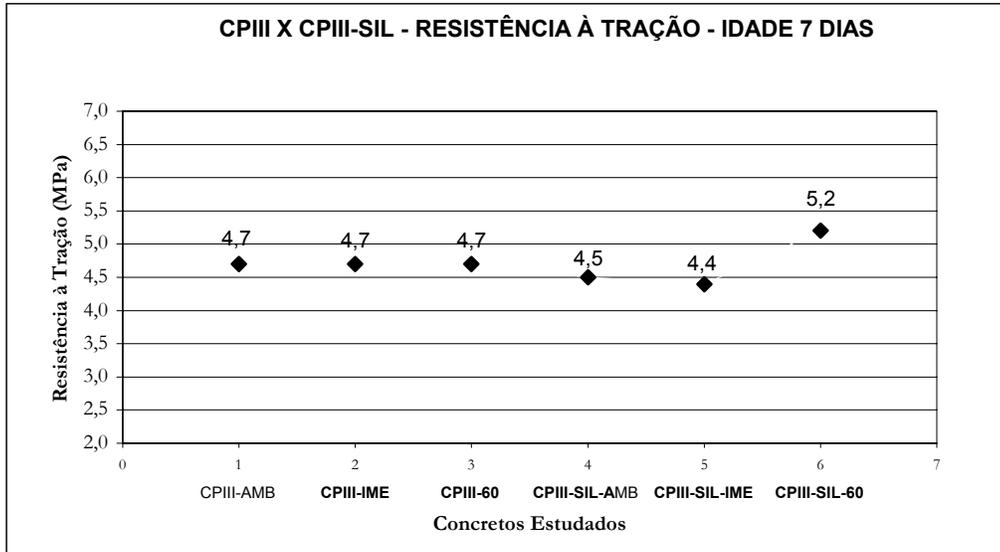


Figura B2.3 – Resistência à tração – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 7 dias.

1 – 2

1 – 3

1 – 4

1 – 5

1 – 6 \*

2 – 3

2 – 4

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4

3 – 5

3 – 6 \*

4 – 5

4 – 6 \*

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

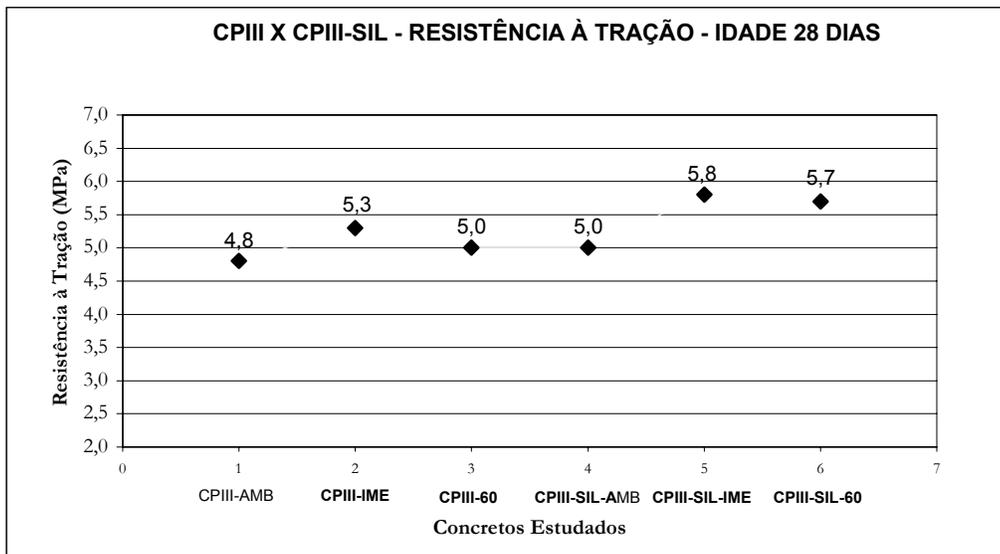


Figura B2.4 – Resistência à tração – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2

1 – 3

1 – 4

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3

2 – 4

2 – 5

2 – 6

3 – 4

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6

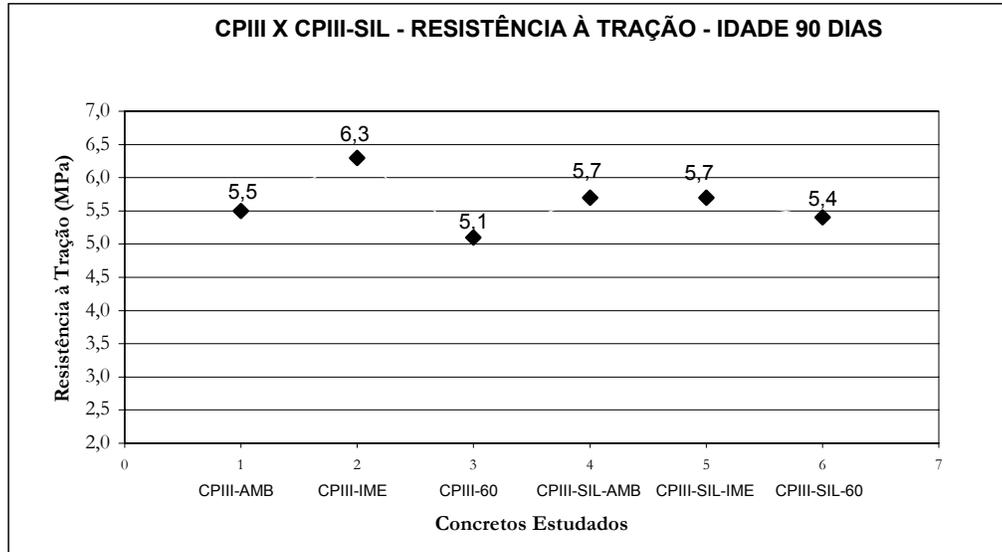


Figura B2.5 – Resistência à tração – CP III – CP III X CP III-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3

1 – 4

1 – 5

1 – 6

2 – 3 \*

2 – 4

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4

3 – 5

3 – 6

4 – 5

4 – 6

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6

# B3

## APÊNDICE B3

### CPIII X CPIII-SIL

#### PERMEABILIDADE AO AR - $k(m^2) \times 10^{-19}$

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

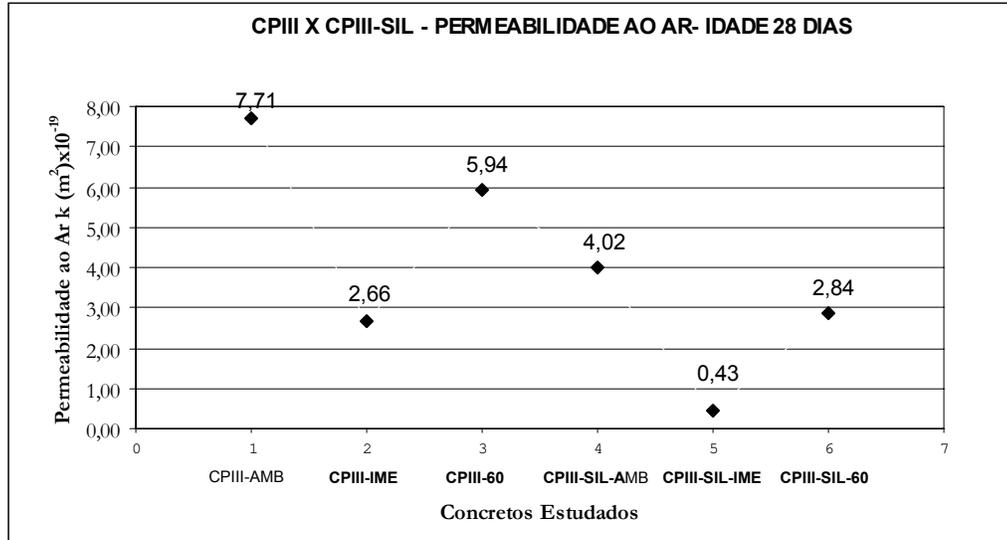


Figura B3.1 – Permeabilidade ao ar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.

- |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 – 2 * | 1 – 3 * | 1 – 4 * | 1 – 5 * | 1 – 6 * |
| 2 – 3 * | 2 – 4 * | 2 – 5 * | 2 – 6   |         |
| 3 – 4 * | 3 – 5 * | 3 – 6 * |         |         |
| 4 – 5 * | 4 – 6 * |         |         |         |
| 5 – 6 * |         |         |         |         |
- \* Diferença Estatisticamente Significativa**

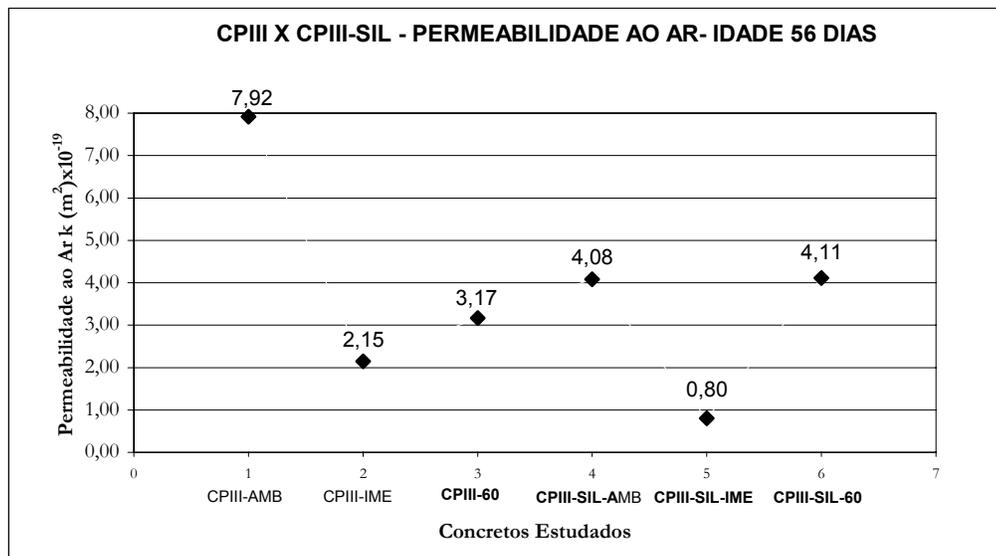


Figura B3.2 – Permeabilidade ao ar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.

- |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 – 2 * | 1 – 3 * | 1 – 4 * | 1 – 5 * | 1 – 6 * |
| 2 – 3 * | 2 – 4 * | 2 – 5 * | 2 – 6 * |         |
| 3 – 4 * | 3 – 5 * | 3 – 6 * |         |         |
| 4 – 5 * | 4 – 6   |         |         |         |
| 5 – 6 * |         |         |         |         |
- \* Diferença Estatisticamente Significativa**

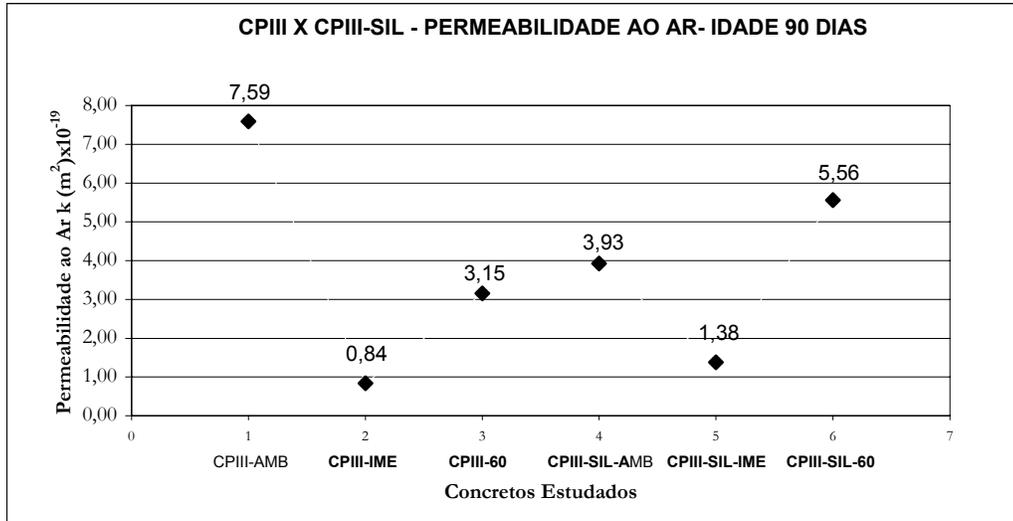


Figura B3.3 – Permeabilidade ao ar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# B4

## APÊNDICE B4

### CPIII X CPIII-SIL

#### ABSORÇÃO INICIAL – 1 HORA (Kg/m<sup>2</sup>)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

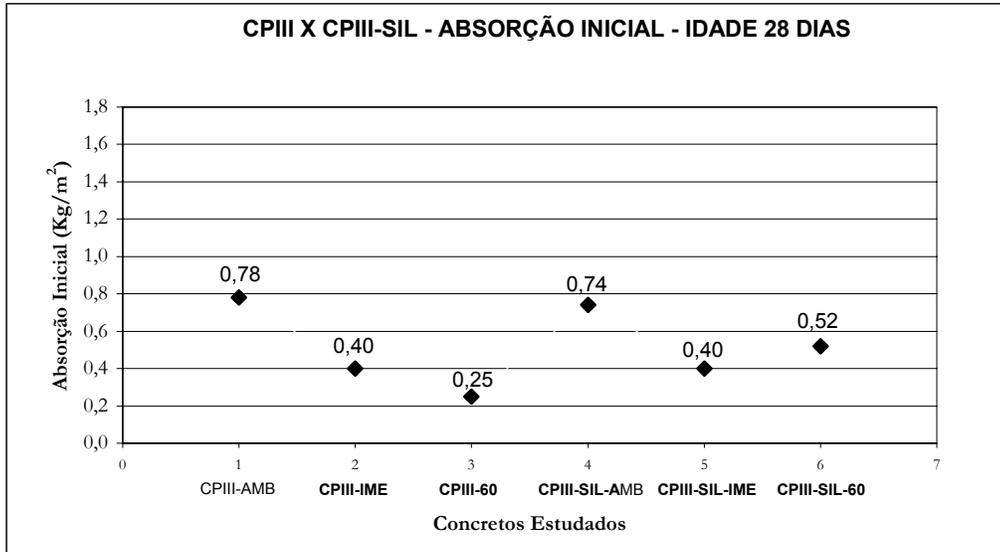


Figura B4.1 – Absorção inicial – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6 *			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

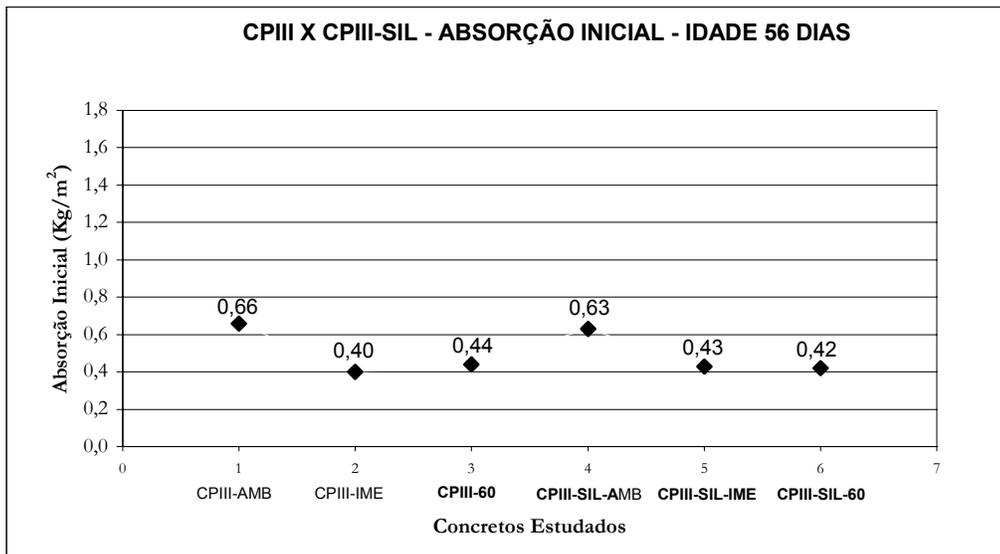


Figura B4.2 – Absorção inicial – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6	
3 – 4 *	3 – 5	3 – 6		
4 – 5 *	4 – 6 *			
5 – 6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

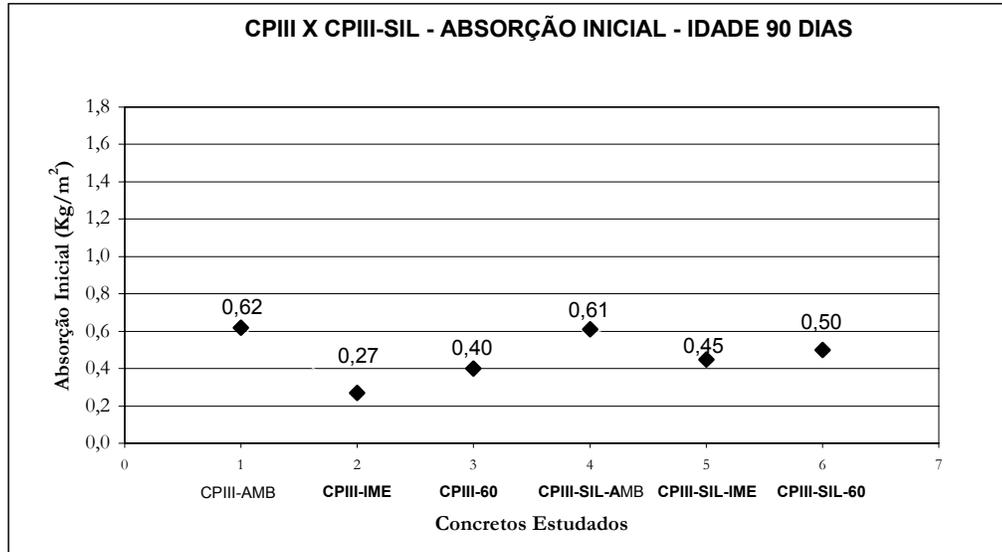


Figura B4.3 – Absorção inicial – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# B5

## APÊNDICE B5

### CPIII X CPIII-SIL

#### ABSORÇÃO CAPILAR – 24 HORAS (Kg/m<sup>2</sup>)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

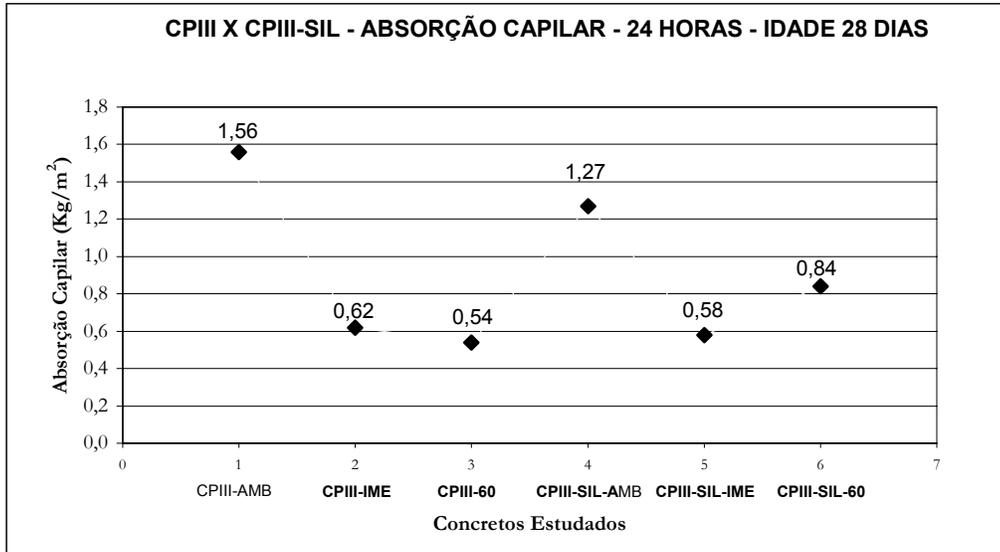


Figura B5.1 – Absorção capilar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6 *			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

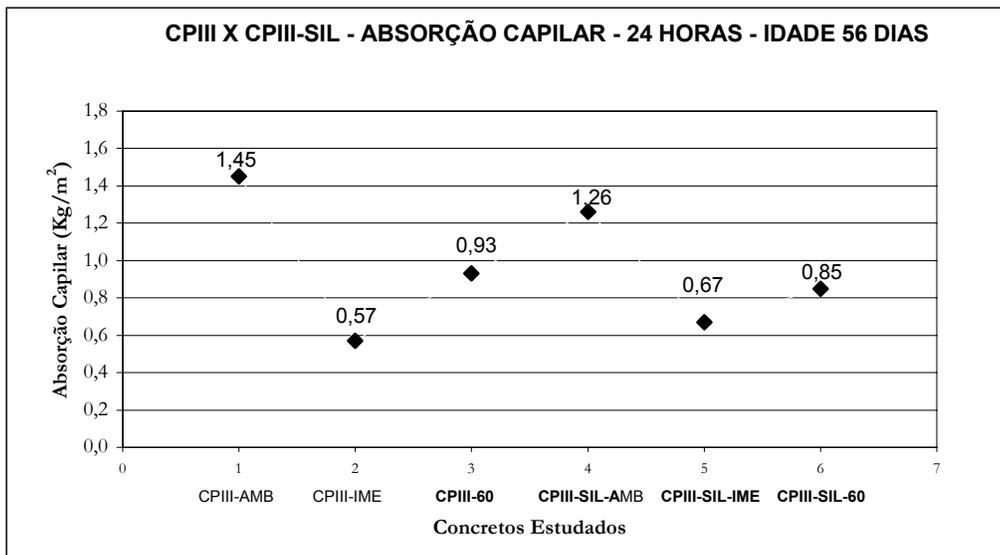


Figura B5.2 – Absorção capilar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5 *	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6 *			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

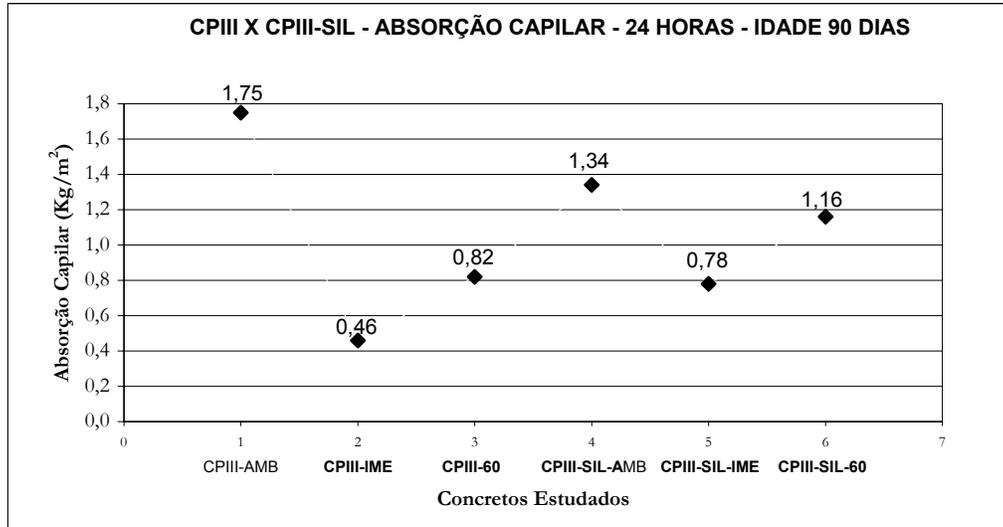


Figura B5.3 – Absorção capilar – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4 \*

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# B6

## APÊNDICE B6

### CPIII X CPIII-SIL

#### ABSORÇÃO TOTAL – IMERSO 24 HORAS (%)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

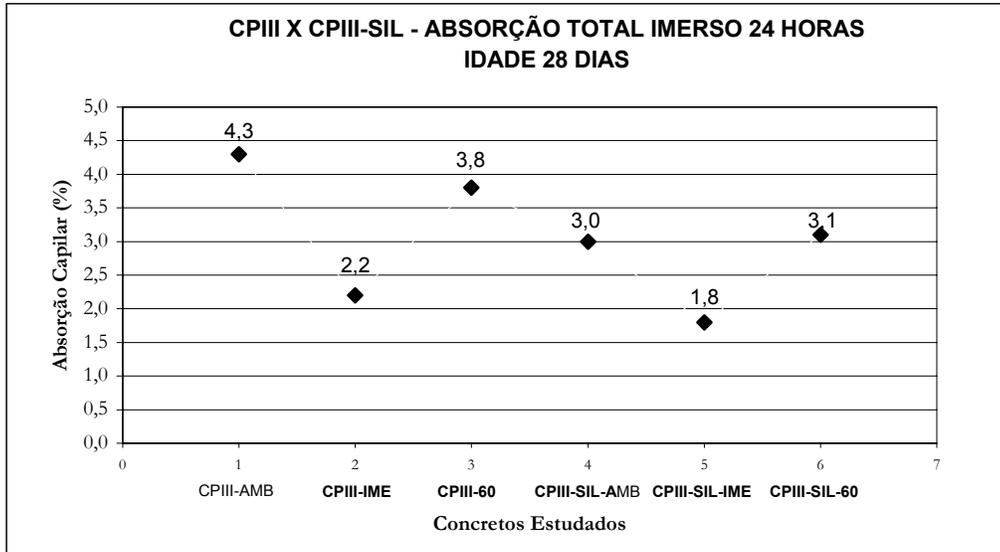


Figura B6.1 – Absorção total – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5 *	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

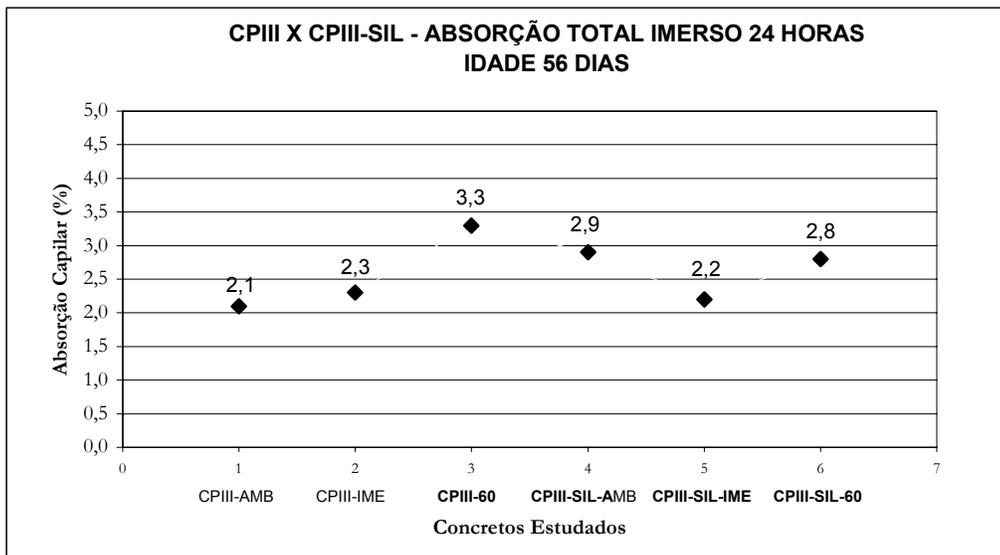


Figura B6.2 – Absorção total – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			
5 – 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

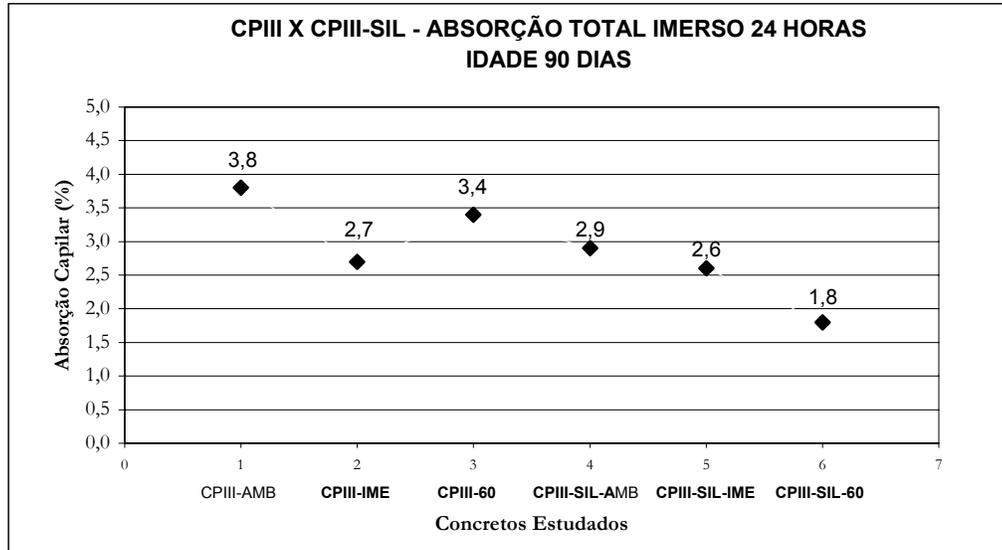


Figura B6.3 – Absorção total – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* **Diferença Estatisticamente Significativa**

5 – 6 \*

# B7

## APÊNDICE B7

### CPIII X CPIII-SIL

#### ABSORÇÃO TOTAL – IMERSO 3 DIAS (%)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

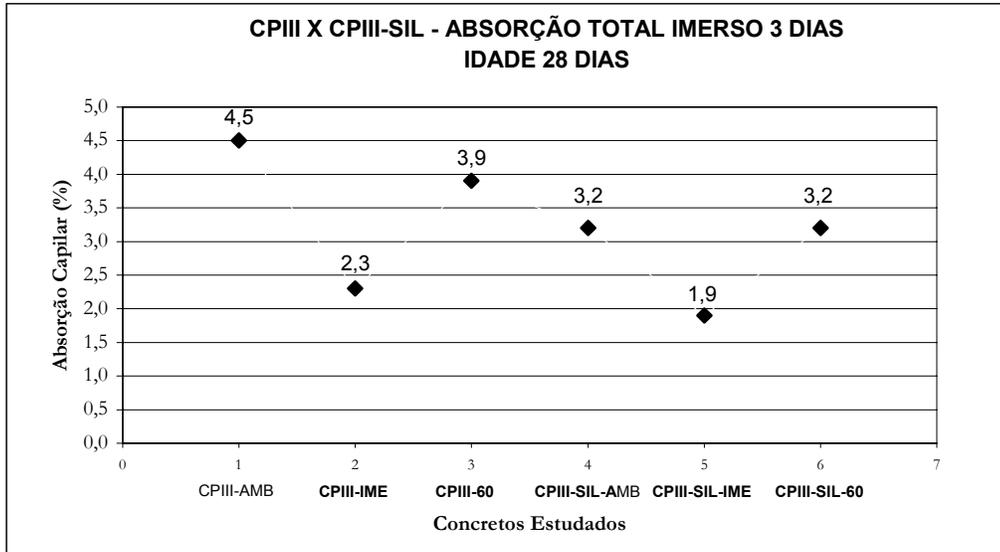


Figura B7.1 – Absorção total – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3 *</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5 *</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4 *</b>	<b>2 – 5 *</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6 *</b>		
<b>4 – 5 *</b>	<b>4 – 6</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

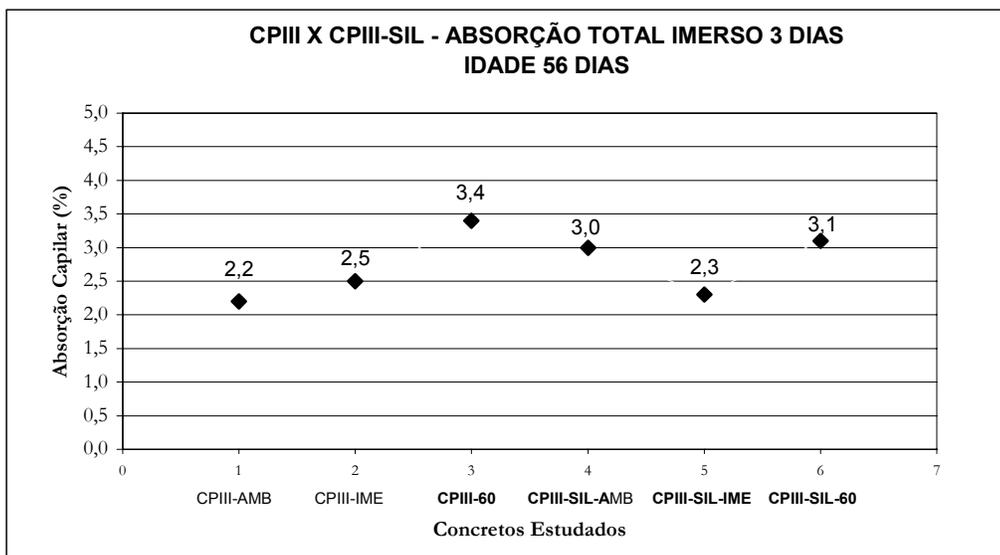


Figura B7.2 – Absorção total – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.

<b>1 – 2 *</b>	<b>1 – 3 *</b>	<b>1 – 4 *</b>	<b>1 – 5</b>	<b>1 – 6 *</b>
<b>2 – 3 *</b>	<b>2 – 4 *</b>	<b>2 – 5</b>	<b>2 – 6 *</b>	
<b>3 – 4 *</b>	<b>3 – 5 *</b>	<b>3 – 6</b>		
<b>4 – 5 *</b>	<b>4 – 6</b>			
<b>5 – 6 *</b>				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

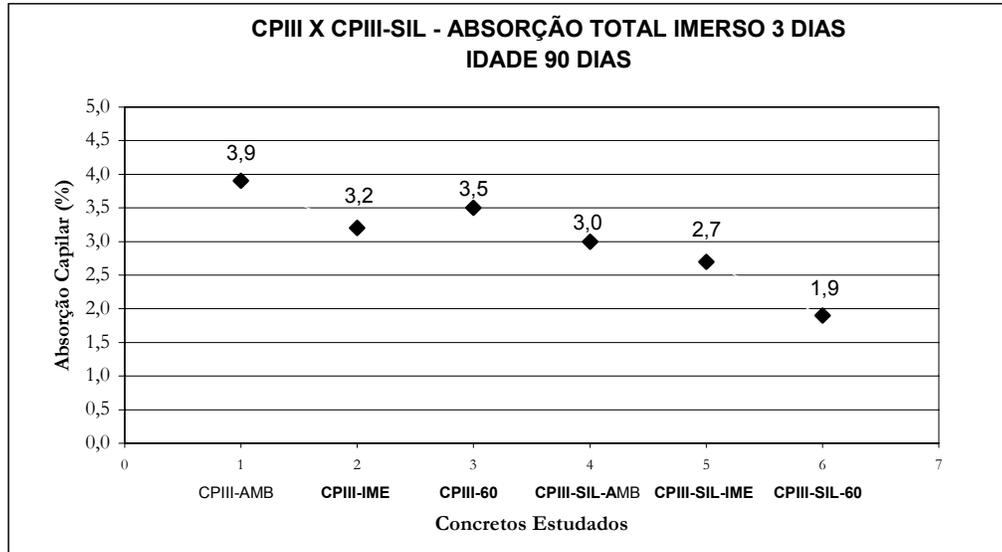


Figura B7.3 – Absorção total – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.

**1 – 2 \***

**1 – 3 \***

**1 – 4 \***

**1 – 5 \***

**1 – 6 \***

**2 – 3**

**2 – 4**

**2 – 5 \***

**2 – 6 \***

**3 – 4 \***

**3 – 5 \***

**3 – 6 \***

**4 – 5 \***

**4 – 6 \***

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

**5 – 6 \***

# B8

## APÊNDICE B8

### CPIII X CPIII-SIL

#### ÍNDICE DE VAZIOS – IMERSO 24 HORAS (%)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

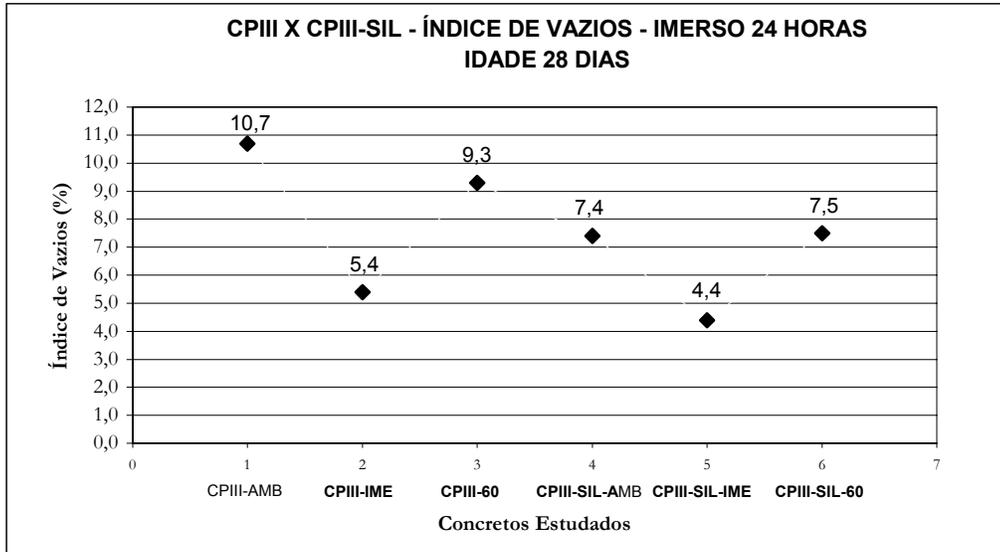


Figura B8.1 – Índice de vazios – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5 *	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			* <u>Diferença Estatisticamente Significativa</u>
5 – 6 *				

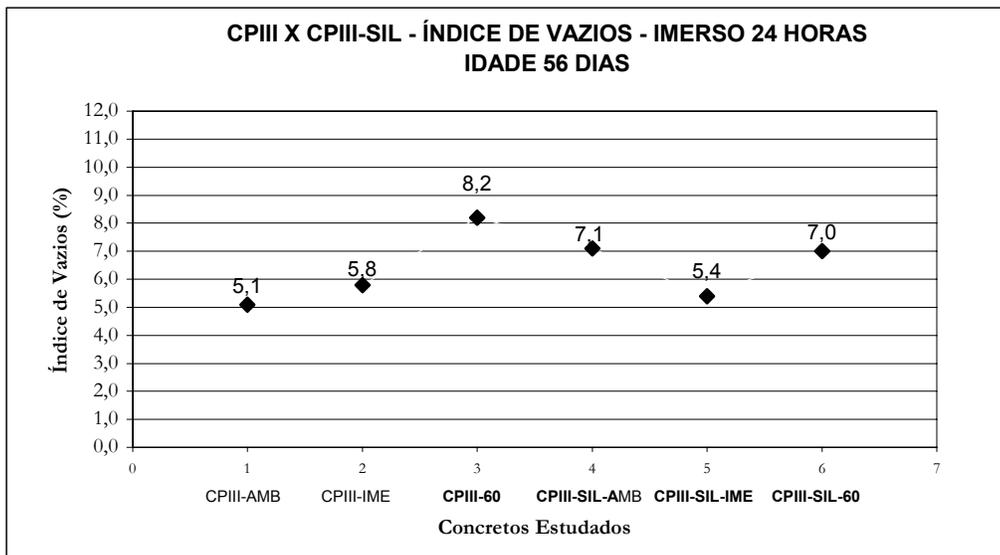


Figura B8.2 – Índice de vazios – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			* <u>Diferença Estatisticamente Significativa</u>
5 – 6 *				

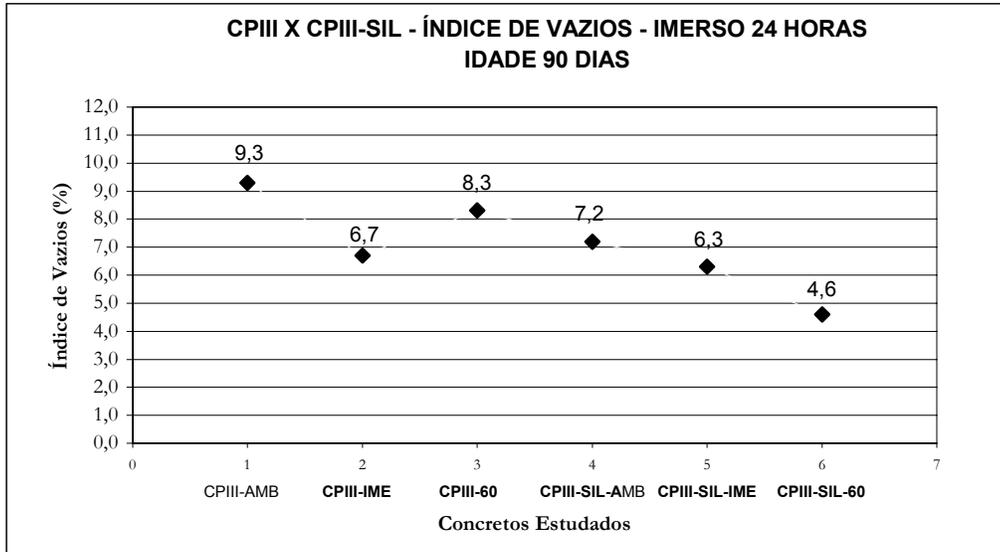


Figura B8.3 – Índice de vazios – imerso 24 horas – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4

2 – 5

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# B9

## APÊNDICE B9

### CPIII X CPIII-SIL

#### ÍNDICE DE VAZIOS – IMERSO 3 DIAS (%)

1 – CPIII-AMB

2 – CPIII-IME

3 – CPIII-60

4 – CPIII-SIL-AMB

5 – CPIII-SIL-IME

6 – CPIII-SIL-60

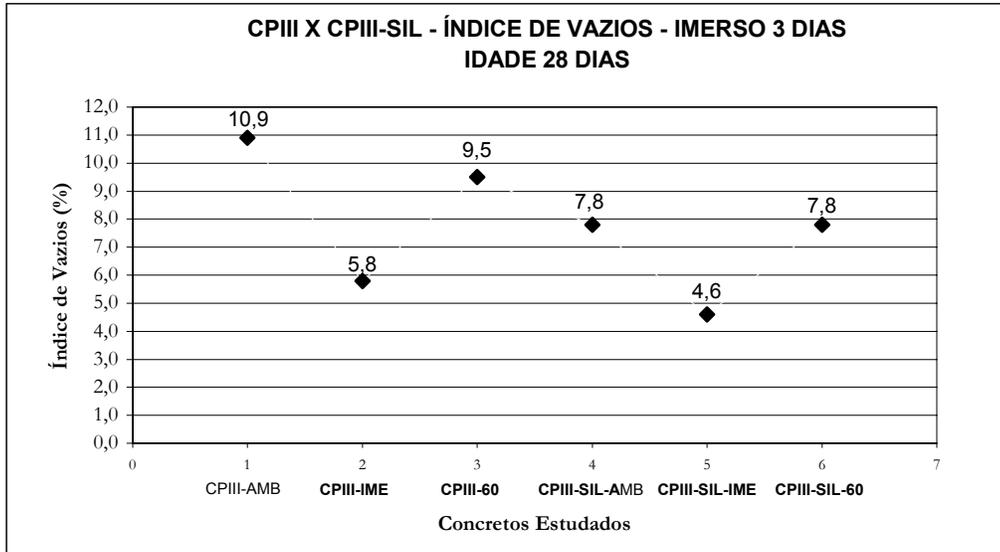


Figura B9.1 – Índice de vazios – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 28 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5 *	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5 *	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			* <u>Diferença Estatisticamente Significativa</u>
5 – 6 *				

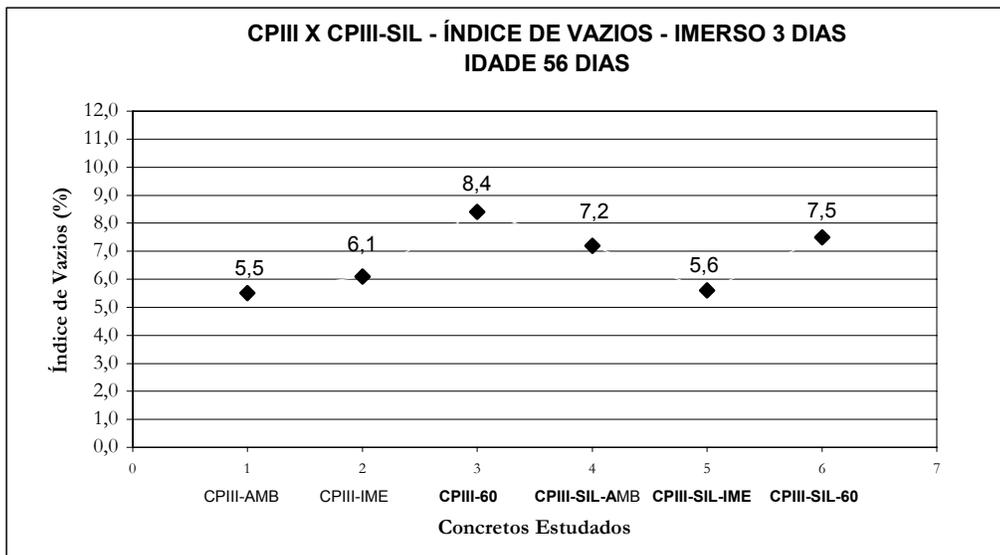


Figura B9.2 – Índice de vazios – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 56 dias.

1 – 2 *	1 – 3 *	1 – 4 *	1 – 5	1 – 6 *
2 – 3 *	2 – 4 *	2 – 5 *	2 – 6 *	
3 – 4 *	3 – 5 *	3 – 6 *		
4 – 5 *	4 – 6			* <u>Diferença Estatisticamente Significativa</u>
5 – 6 *				

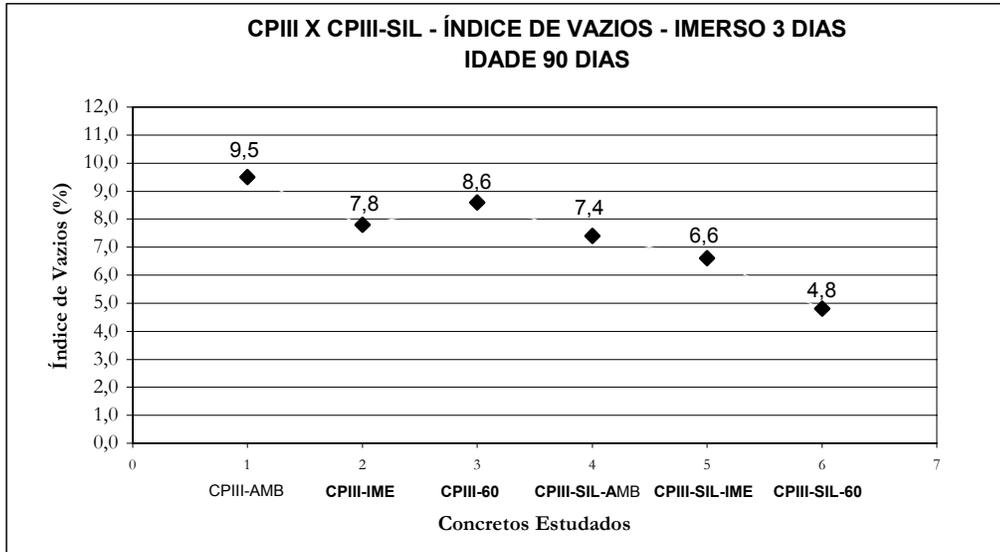


Figura B9.3 – Índice de vazios – imerso 3 dias – CP III – CPIII X CPIII-SIL – Idade 90 dias.

1 – 2 \*

1 – 3 \*

1 – 4 \*

1 – 5 \*

1 – 6 \*

2 – 3 \*

2 – 4

2 – 5 \*

2 – 6 \*

3 – 4 \*

3 – 5 \*

3 – 6 \*

4 – 5 \*

4 – 6 \*

\* Diferença Estatisticamente Significativa

5 – 6 \*

# C

## APÊNDICE C

No APÊNDICE C estão apresentados os gráficos da análise de regressão (linhas de tendência) para os resultados de resistência à compressão e resistência a tração por compressão diametral. Foi utilizado como ferramenta auxiliar na obtenção das curvas de tendência o software MICROSOFT EXCEL versão 2000.

A análise de regressão é um método estatístico utilizado para o estabelecimento de fórmulas empíricas entre duas ou mais variáveis, relacionando essas variáveis por leis estatísticas. Dessa forma, a análise de regressão teve como objetivo obter fórmulas de funções matemáticas que representassem o comportamento das resistências mecânicas dos concretos ao longo do tempo.

Os gráficos com as linhas de tendência para concretos produzidos com cimento Portland de Alta Resistência Inicial estão apresentados nos anexos C1 (resistência à compressão) e C2 (resistência à tração por compressão diametral), e para concretos produzidos com cimento Portland de Alto-Forno nos anexos C3 (resistência à compressão) e C4 (resistência à tração por compressão diametral).

# C1

## APÊNDICE C1

### ANÁLISE DE REGRESSÃO – CP V ARI

#### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)

ARI-AMB

CURA AMBIENTE

ARI-SIL-AMB

ARI-IME

CURA IMERSA

ARI-SIL-IME

ARI-60

CURA TÉRMICA

ARI-SIL-60

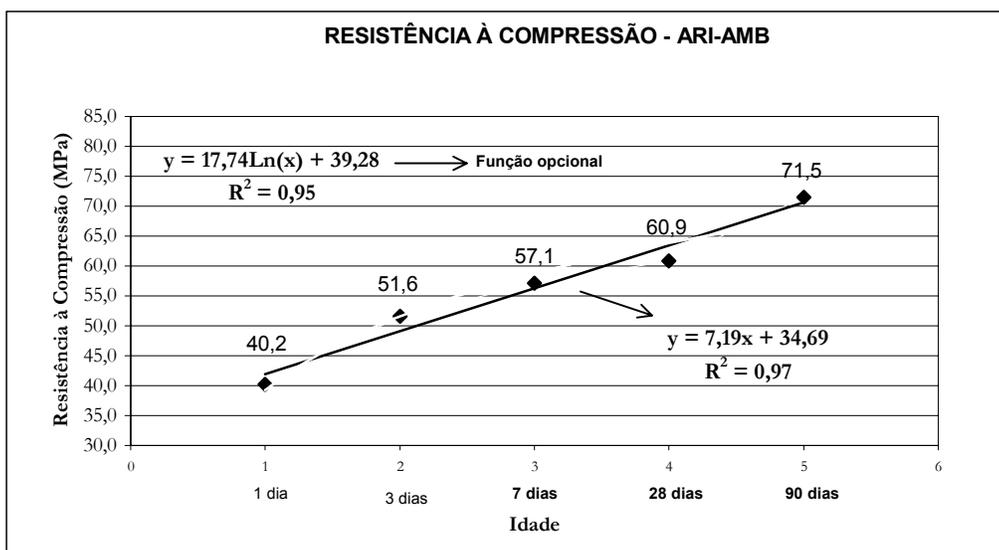


Figura C1.1 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI submetido à cura ambiente.

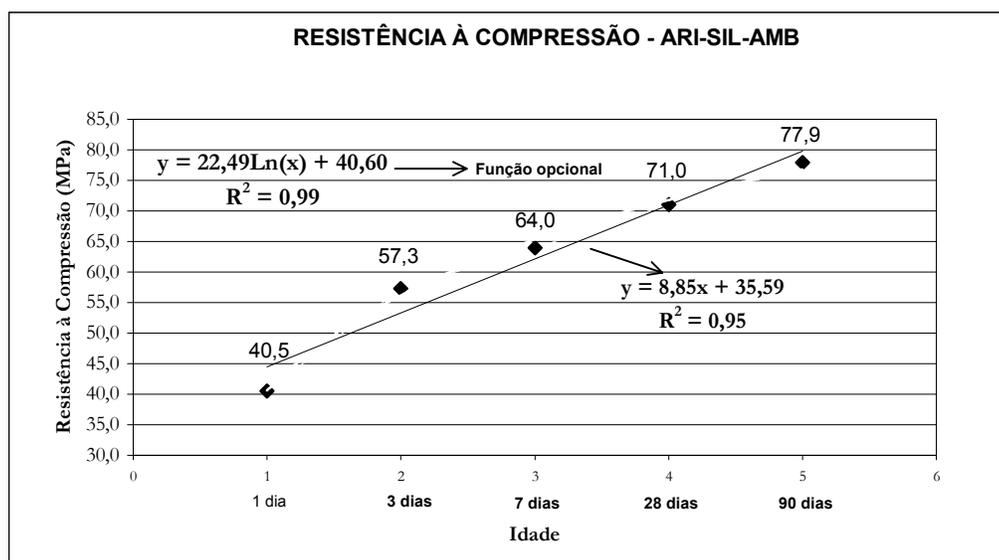


Figura C1.2– Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura ambiente.

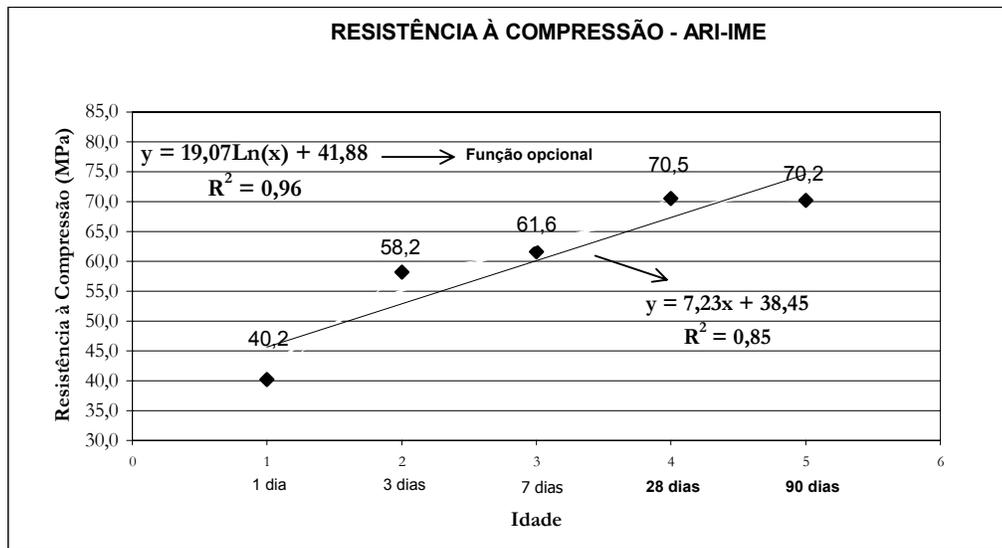


Figura C1.3 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

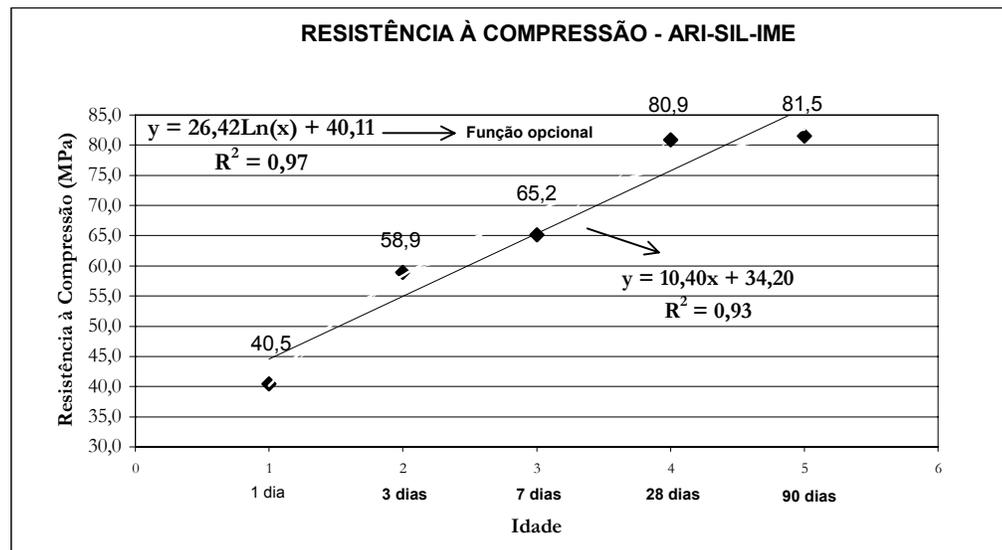


Figura C1.4 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

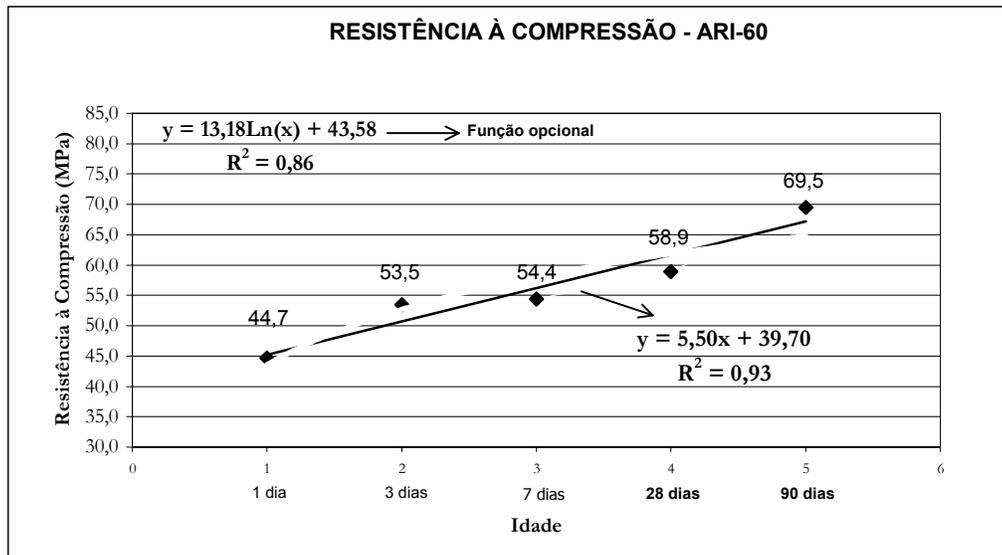


Figura C1.5 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI submetido à cura térmica a 60 °C.

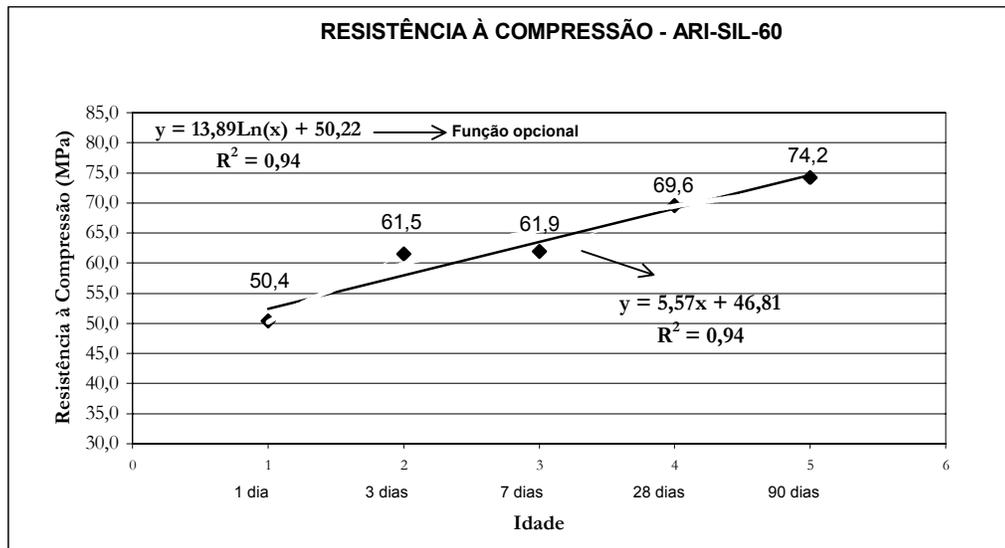


Figura C1.6 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.

# C2

## APÊNDICE C2

### ANÁLISE DE REGRESSÃO – CP V ARI

#### RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

ARI-AMB

CURA AMBIENTE

ARI-SIL-AMB

ARI-IME

CURA IMERSA

ARI-SIL-IME

ARI-60

CURA TÉRMICA

ARI-SIL-60

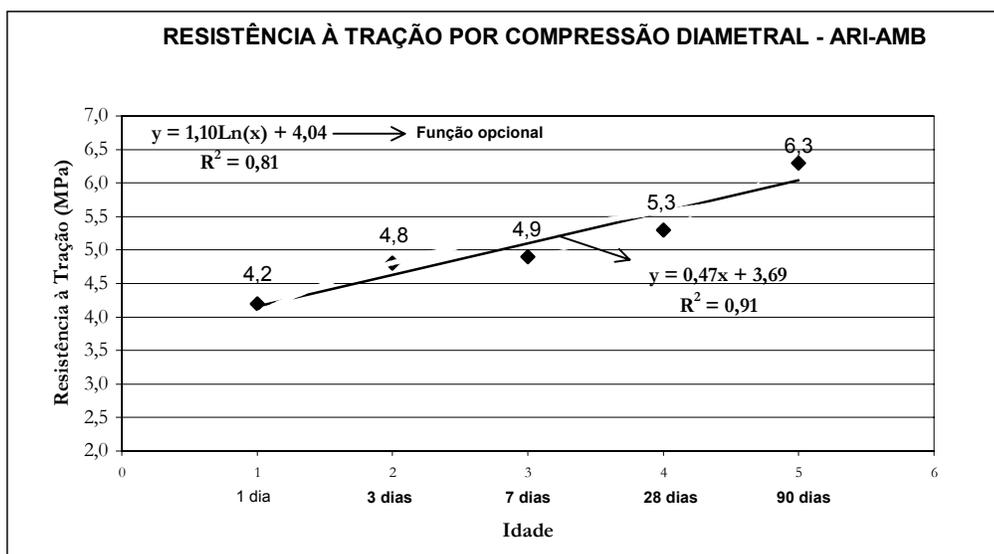


Figura C2.1 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI submetido à cura ambiente.

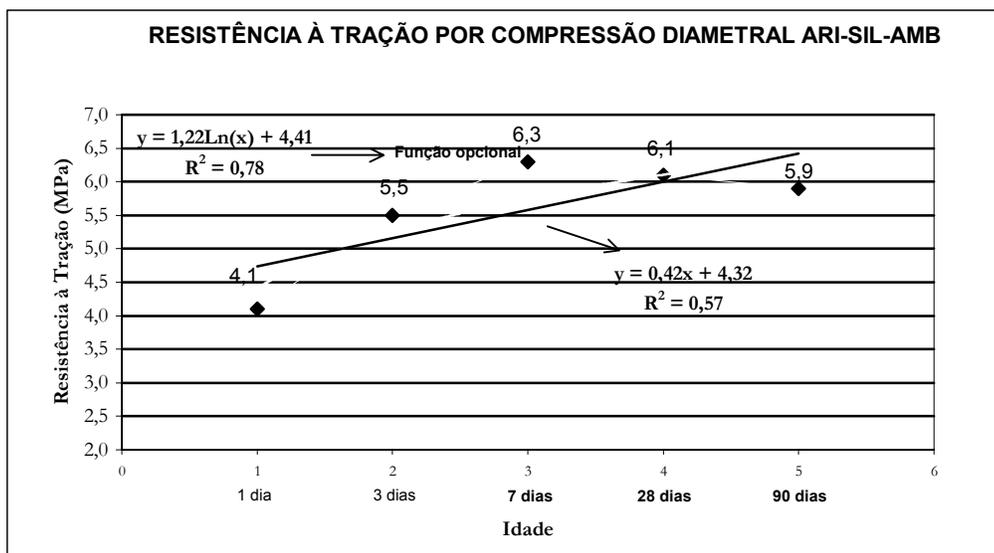


Figura C2.2 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura ambiente.

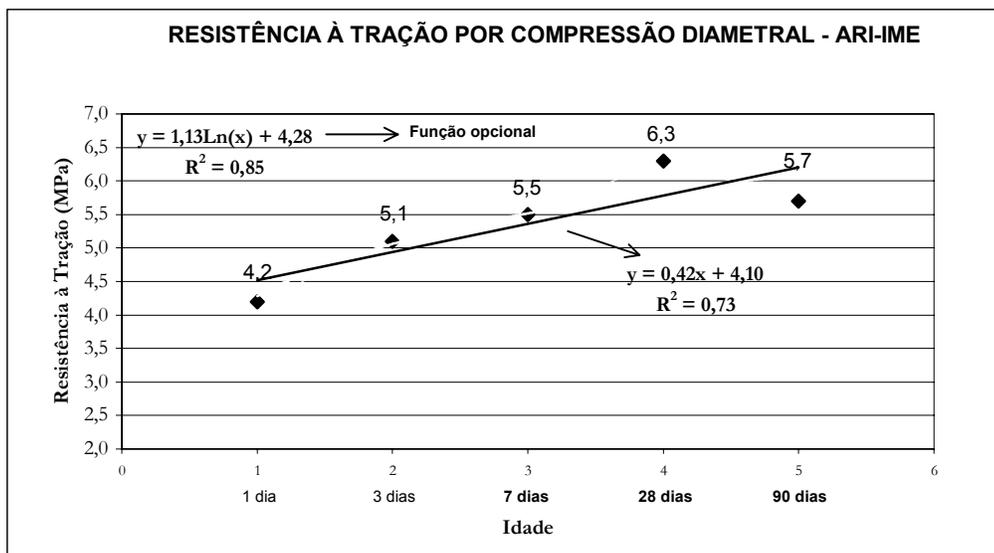


Figura C2.3 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

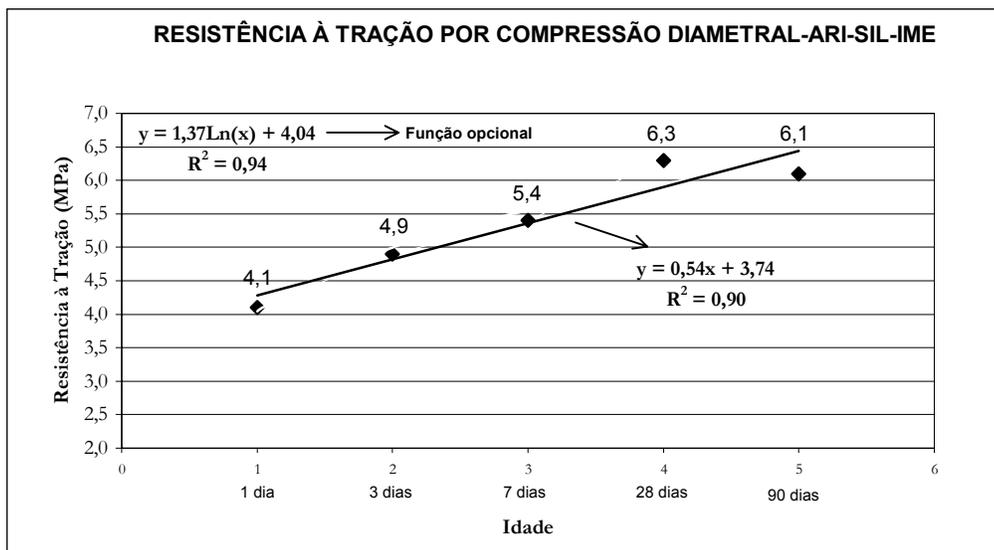


Figura C2.4 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

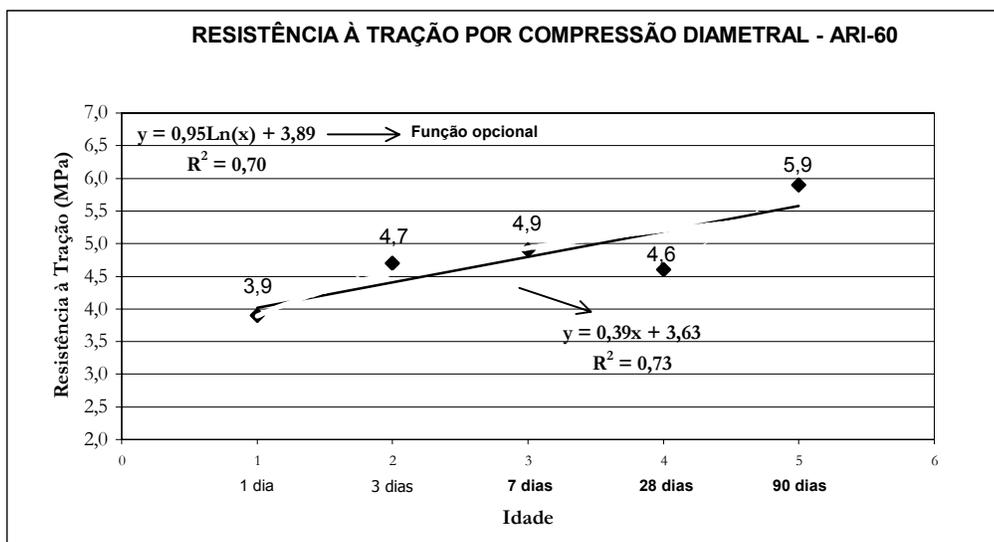


Figura C2.5 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI submetido à cura térmica a 60 °C.

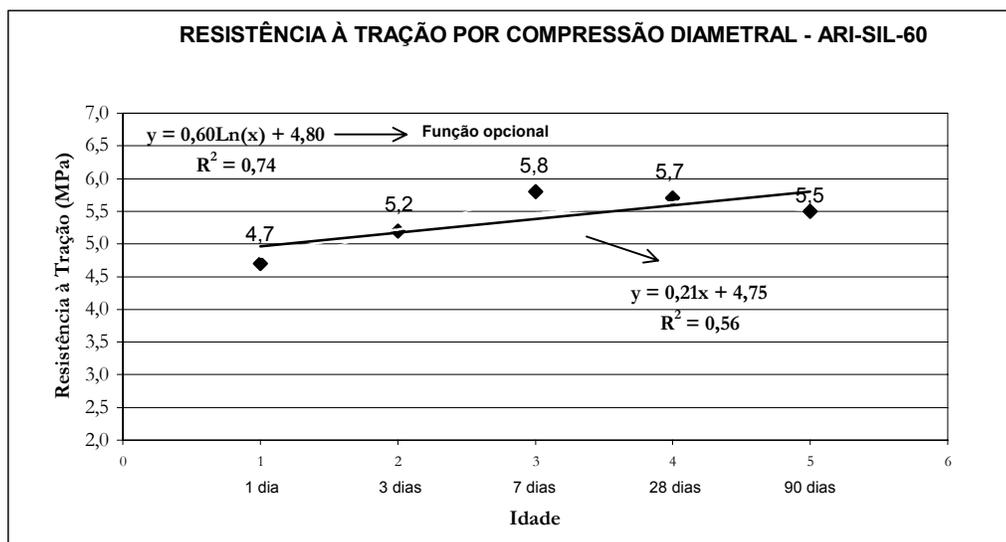


Figura C2.6 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP V ARI com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.

# C3

## APÊNDICE C3

### ANÁLISE DE REGRESSÃO – CP III

### RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)

CPIII-AMB

CURA AMBIENTE

CPIII-SIL-AMB

CPIII-IME

CURA IMERSA

CPIII-SIL-IME

CPIII-60

CURA TÉRMICA

CPIII-SIL-60

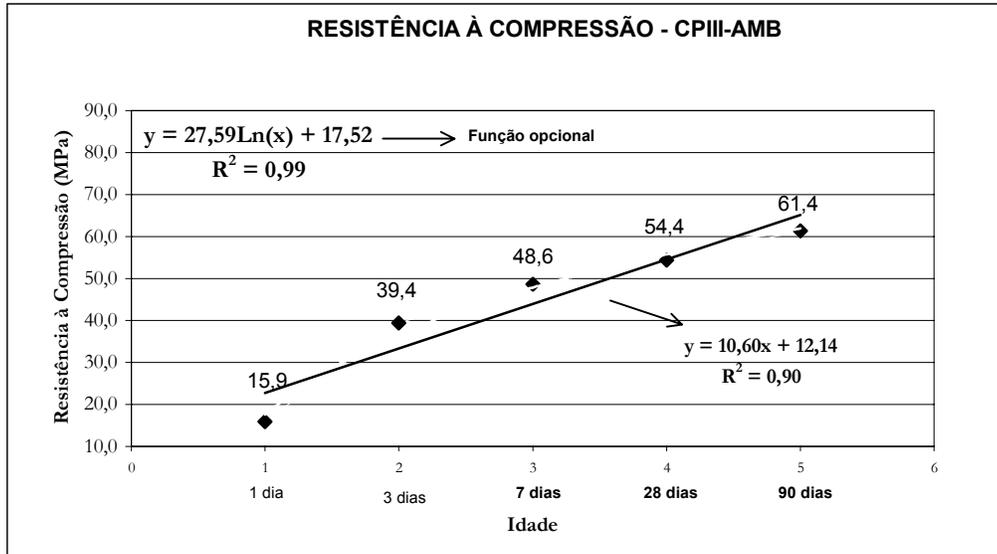


Figura C3.1 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III submetido à cura ambiente.

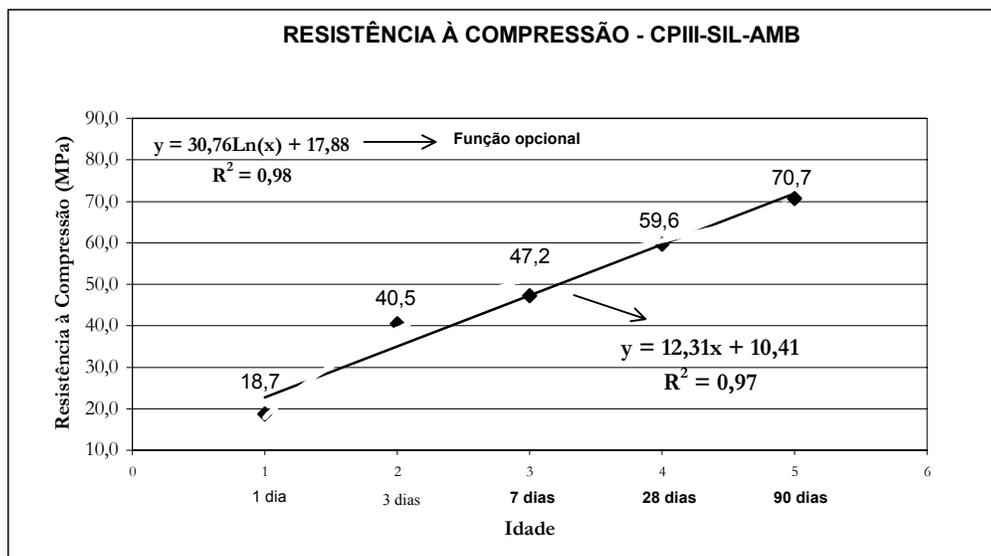


Figura C3.2 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III com sílica ativa submetido à cura ambiente.

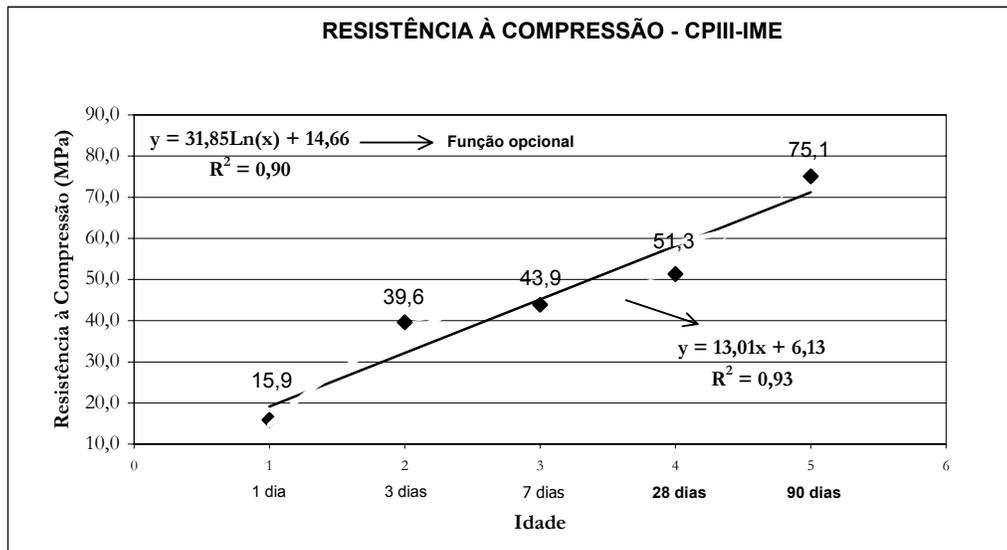


Figura C3.3 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

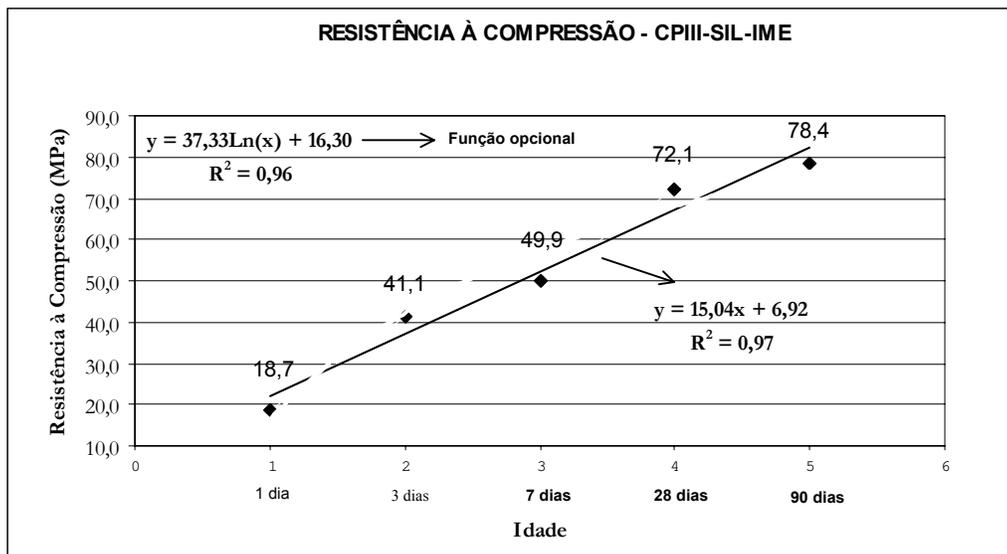


Figura C3.4 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III com sílica ativa submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

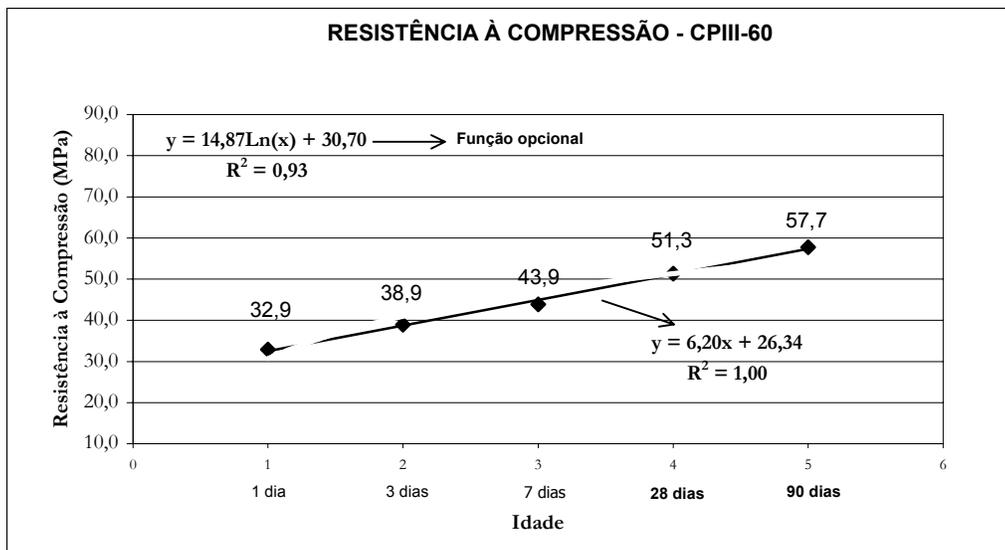


Figura C3.5 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III submetido à cura térmica a 60 °C.

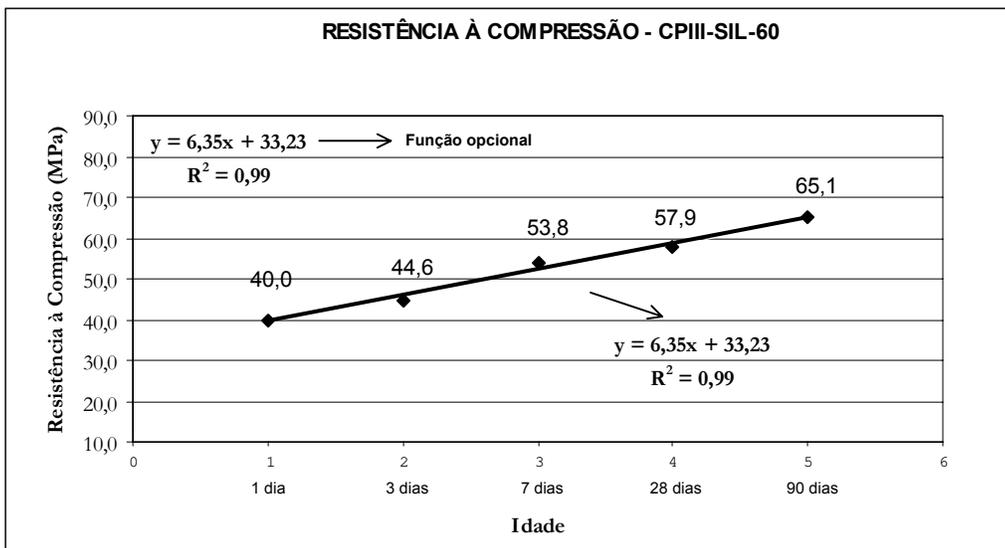


Figura C3.6 – Análise de regressão - Resistência à compressão – CP III com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.

# C4

## APÊNDICE C4

### ANÁLISE DE REGRESSÃO – CP III

#### RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

CPIII-AMB

CURA AMBIENTE

CPIII-SIL-AMB

CPIII-IME

CURA IMERSA

CPIII-SIL-IME

CPIII-60

CURA TÉRMICA

CPIII-SIL-60

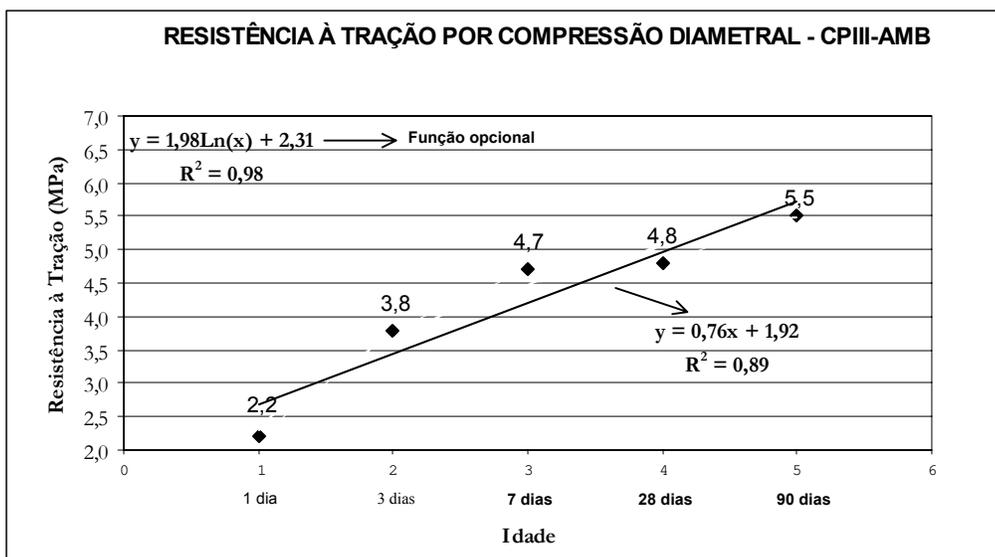


Figura C4.1 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III submetido à cura ambiente.

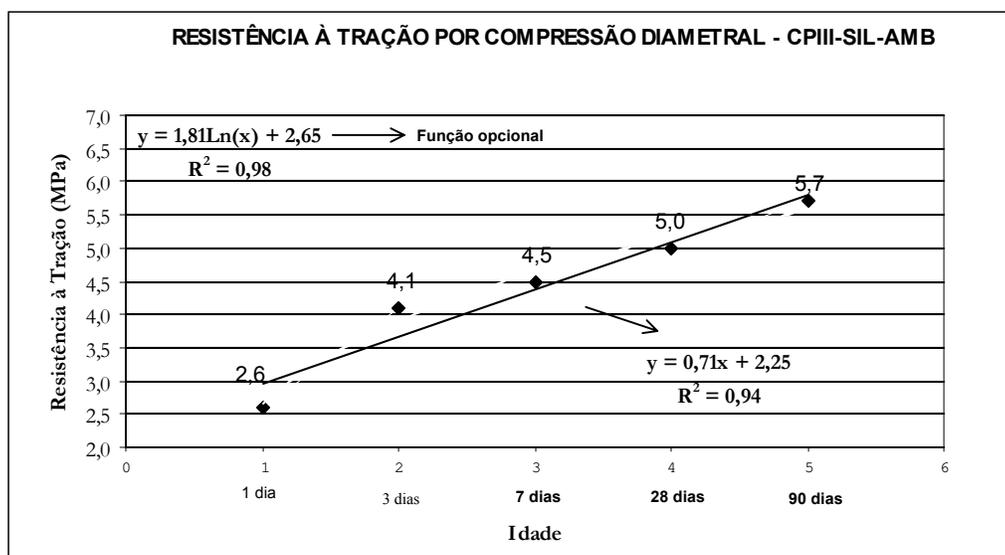


Figura C4.2 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III com sílica ativa submetido à cura ambiente.

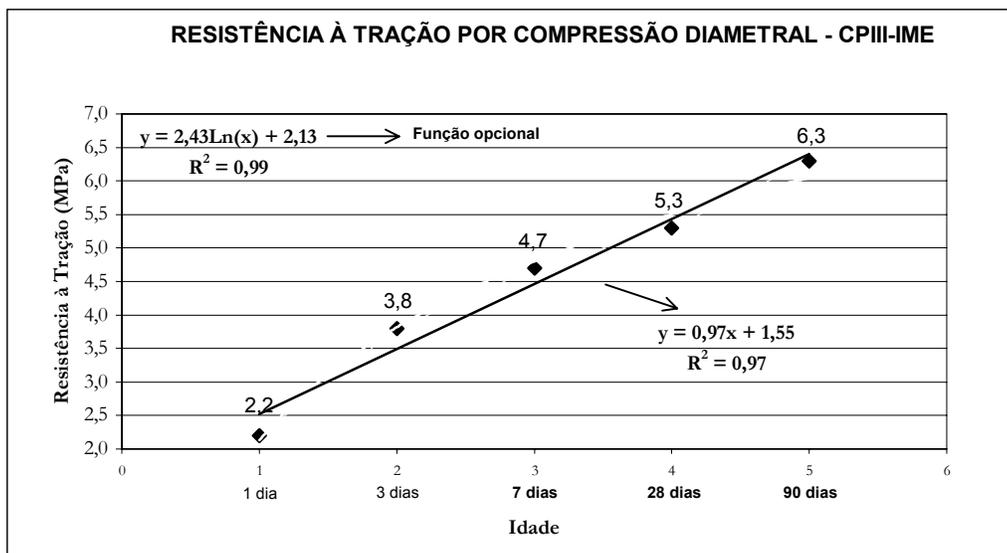


Figura C4.3 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral– CP III submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

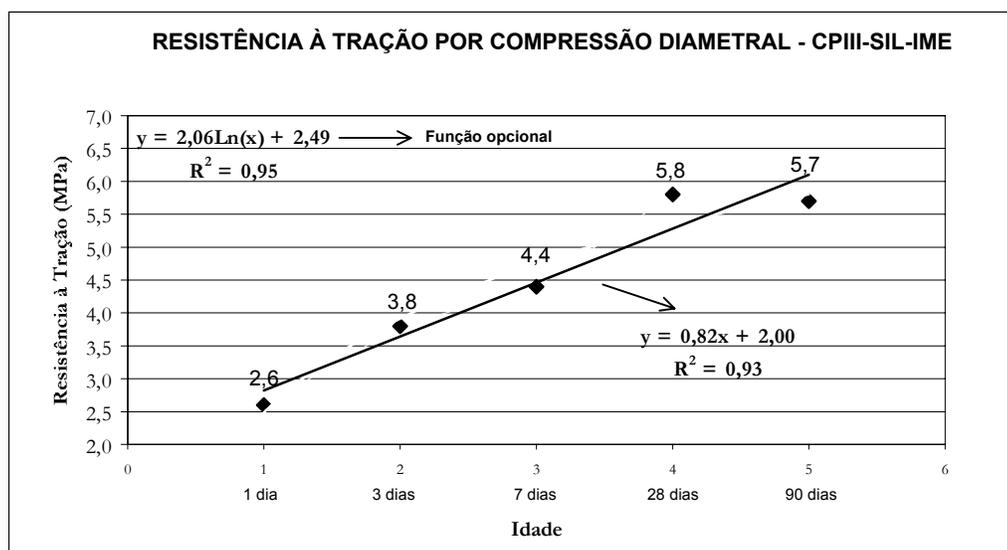


Figura C4.4 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III com sílica ativa – submetido à cura imersa até a idade de 7 dias.

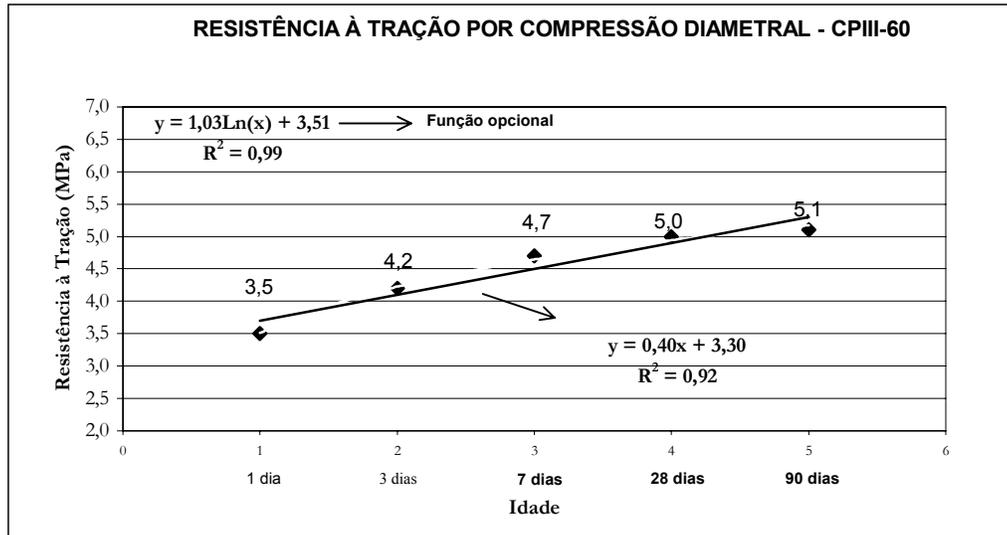


Figura C4.5 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III submetido à cura térmica a 60 °C.

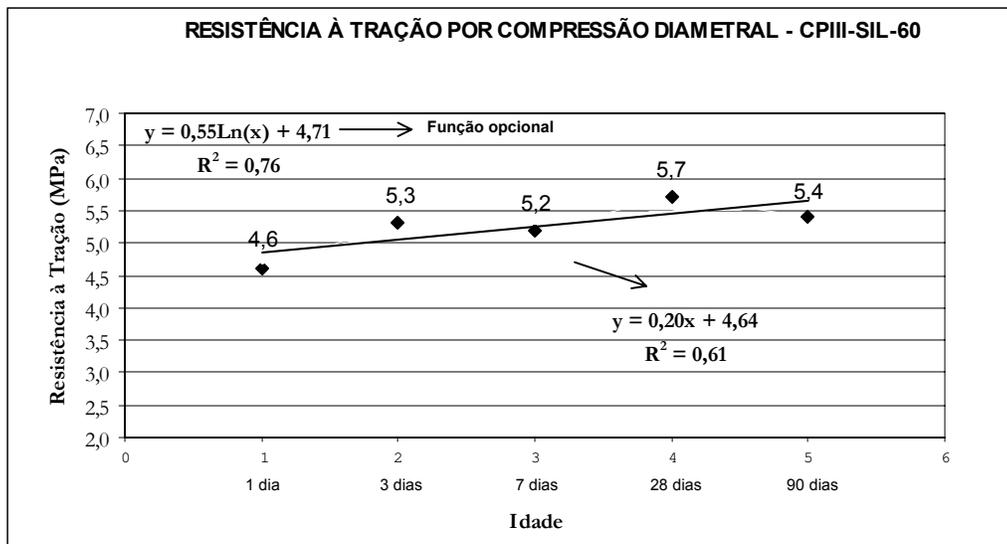


Figura C4.6 – Análise de regressão - Resistência à tração por compressão diametral – CP III com sílica ativa submetido à cura térmica a 60 °C.