

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAURICIO BIANCHINI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS TEORES DE SÍLICA ATIVA NA  
PRODUÇÃO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA EM  
CENTRAL DOSADORA DE CONCRETO

CURITIBA

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAURICIO BIANCHINI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS TEORES DE SÍLICA ATIVA NA  
PRODUÇÃO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA EM  
CENTRAL DOSADORA DE CONCRETO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

CURITIBA

2010

# TERMO DE APROVAÇÃO

MAURICIO BIANCHINI

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS TEORES DE SÍLICA ATIVA NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA EM CENTRAL DOSADORA DE CONCRETO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador:

---

Prof. Dr. José Marques Filho

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da UFPR

Examinadores:

---

Prof. Dr. Vladimir Antônio Paulon

Departamento de Recursos Hídricos - UNICAMP

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Laila Valduga Artigas

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da UFPR

Curitiba, 09 de abril de 2010.

## DEDICATÓRIA

*À minha esposa Karla, a meu pai Tito,  
minha mãe Marlene, meus familiares e a  
todos aqueles que trabalham com a  
produção de concreto todos os dias com  
dedicação, qualidade e honestidade.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus por todas as oportunidades e graças que recebi ao longo de toda minha vida.

Ao meu pai Tito Bianchini, que mesmo não presente fisicamente, com certeza está comigo em todos os momentos da minha vida.

À minha amada esposa Karla, pelo amor, companheirismo e apoio completo e irrestrito durante todo o curso de mestrado e em todos os anos desde que nos conhecemos.

À minha mais que querida e amiga mãe Marlene, que sempre priorizou minhas necessidades mesmo em relação às suas, sempre fez o possível e o impossível para transformar meus sonhos em realidade e é sempre meu guia e porto seguro.

Aos meus familiares: meus irmãos Marcio e Marcelo, que além de irmãos foram verdadeiros pais ao longo da minha vida, a meu sobrinho Lucas e minhas cunhadas Cristina e Rosângela pelo apoio e atenção recebidos.

Ao professor Dr. José Marques Filho, que além de professor, orientador e grande amigo, é meu grande mestre como profissional e pessoa. Pelo apoio e compreensão recebidos, que mesmo com as adversidades ocorridas durante o período do mestrado sempre esteve presente com tranquilidade, guiando o objetivo a ser alcançado e pela infinita paciência com minhas diversas atividades profissionais, com meu pouco tempo disponível, com minhas viagens profissionais constantes e com o fato de meu trabalho estar sempre próximo ao final dos limites dos prazos de entrega.

Ao amigo engenheiro Sandro Mendes, grande parceiro de pesquisas que me incentivou e me deu a primeira oportunidade de atuar como professor, além de ter me apresentado ao mundo dos concretos de alta resistência.

Aos engenheiros Everson Luiz d' Aquino e João Ricardo Antochevi Braga da Engemix, grandes pessoas e profissionais que permitiram meu ingresso no mestrado, sempre me apoiando, mesmo quando minhas atividades profissionais conflitavam com as acadêmicas.

Ao engenheiro Jorge Luiz Christófolli da Concrebras, grande amigo e companheiro durante todo o mestrado, que viabilizou a execução deste trabalho, permitindo a ruptura de todos os corpos de prova deste estudo em seu laboratório.

Ao engenheiro Patrick Matieu Dalmolin e ao químico Guilherme Alquat; da empresa Grace, pelo apoio no desenvolvimento dos ensaios.

Aos engenheiros Austen José Salvador e Marcelo Rosalinski da Supermix que permitiram a realização deste trabalho, além de fornecer instalações, materiais e irrestrito apoio.

À equipe do CETESUL da Supermix: engenheira Luana, Patrycia, Ataíde, Gerson e Alan pelo apoio durante toda a realização dos experimentos.

E por último, mas com certeza não menos importantes, agradeço ao laboratorista Rodrigo da Supermix que preparou os topos de todos os corpos de prova, sempre buscando o melhor desempenho. Aos amigos do laboratório da Supermix, Adalberto e Samuel, que atuaram intensivamente durante toda a execução do experimento e se dedicaram com tamanho comprometimento que este trabalho se tornou o “nosso” mestrado.

## RESUMO

A evolução da tecnologia do concreto nos anos 70, em especial com a disponibilização dos aditivos superplastificantes, tornou possível a produção de concretos com relação água/aglomerante baixa e, conseqüentemente, resistências características iguais ou superiores a 50 MPa (sendo estes concretos então chamados de CAR). A aplicação de adições de sílica-ativa (subproduto da fabricação do silício metálico) deixou os CAR ainda mais eficientes em termos de consumo de energia, por facilitar a obtenção de resistências maiores com menores consumos de cimento.

A crescente pressão pelo acréscimo da infra-estrutura existente, aliada à necessidade de desenvolvimento de processos visando sustentabilidade, impelem a indústria de construção civil a desenvolver novos concretos. A utilização de CAR permite a produção de estruturas de concreto mais econômicas e mais sustentáveis, visto a grande durabilidade deste material e menor emissão de CO<sub>2</sub> para a produção das estruturas. Para a difusão do uso deste material, além do constante desenvolvimento tecnológico é também necessária a redução dos custos de matéria prima.

Este trabalho busca identificar a influência de diferentes teores de adição de sílica ativa na produção de diferentes classes de resistência de CAR em central dosadora de concreto. Todo o estudo experimental foi efetuado em laboratórios de centrais dosadoras de concreto, dentro de condições industriais de ensaio e produção, com o auxílio de técnicos das empresas que foram treinados para realização dos trabalhos. Analisou-se a resistência à compressão obtida aos 3, 7 e 28 dias de idade para os teores de sílica ativa de 3%, 6%, 9% e 12% em substituição ao cimento em 5 diferentes relações água/aglomerante. Também foram estudados a influência dos diferentes teores de sílica ativa nos processos produtivos de CAR em central dosadora de concreto, calor de hidratação, aspectos econômicos, características do concreto e aspectos de sustentabilidade.

## ABSTRACT

The development of concrete technology in the 70's, especially with the availability of superplasticizer admixtures, made possible the production of concrete with low water/agglomerates and, consequently, strength characteristics higher or equal to 50 MPa (these are real then called HPC). The additions of silica active (by-product of silicon metal) made the HPC more efficient in energy consumption, to facilitate the achievement of greater resistance with lower consumption of cement.

Increased pressure by the addition of the existing infrastructure, coupled with the need of developing processes to maintain sustainability, push the construction industry to develop a new concrete. The use of HPC make possible the production of more economical and more sustainable concrete structures, because the durability of this material and emit less CO<sub>2</sub> for the production of structures. To spread the use of this material, plus the constant technological development is also necessary to reduce the cost of raw materials.

This paper seeks to identify the influence of the levels of addition of silica fume to produce different classes of resistance of HPC in ready mixed concrete plant. All the experimental study was performed in ready mixed concrete plant laboratories, in terms of testing and industrial production, with the help of technicians that were trained to carry out the work.

We analyzed the compressive strength obtained at 3, 7 and 28 days old on the content of silica fume to 3%, 6%, 9% and 12% for cement mortars in 5 different ratios of water/agglomerates. We also studied the influence of different levels of silica fume in the production processes of HPC in ready mixed concrete plant, economic, and characteristics of the concrete aspects of sustainability.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – comparação de uma estrutura para um mesmo edifício: a) estrutura em concreto convencional e b) estrutura em CAR – fonte CD ROM – ABCP. (1999) __   | 19 |
| Figura 2.1 – a) Confederation Bridge b) Petronas Towers (fonte: pixdaus.com. Disponível em < <a href="http://pixdaus.com/single.php?id=17365">http://pixdaus.com/single.php?id=17365</a> > < <a href="http://pixdaus.com/single.php?id=40898">http://pixdaus.com/single.php?id=40898</a> >. Acesso em: 01/02/2010.) _____ | 23 |
| Figura 2.2 – Edifício E-Tower, São Paulo (fonte: foto cedida pela Eng <sup>a</sup> Carine Hartmann) _____   | 24 |
| Figura 2.3 – valores históricos e projeção da concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera (MALHOTRA & MEHTA, 2008) _____   | 26 |
| Figura 3.1 – micrografia eletrônica de varredura de sílica ativa (MEHTA & MONTEIRO, 2008) _____   | 32 |
| Figura 3.2 – comparativo de diâmetro de partículas (MEHTA & MONTEIRO, 2008). _____  | 33 |
| Figura 3.3 – microfotografia em mesma escala de grãos de Cimento Portland (esquerda) e sílica ativa (direita) (SÍLICA FUME USER'S GUIDE, 2005). _____   | 34 |
| Figura 3.4 – sílica em estado natural ou não densificada (SÍLICA FUME USER'S GUIDE, 2005). _____  | 34 |
| Figura 3.5 – microscopia de varredura de cristais de monossulfato hidratado e etringita (MEHTA & MONTEIRO, 2008). _____   | 41 |
| Figura 3.6 – Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados (MEHTA & MONTEIRO, 2008). _____   | 42 |
| Figura 3.7 – a) representação do fenômeno da exsudação interna b) falha de aderência por cisalhamento em CP ensaiado à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 2008). _____   | 44 |
| Figura 3.8 – representação da microestrutura do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008). _____  | 46 |
| Figura 3.9 – C-S-H denso na interface com o agregado, observa-se ausência de zona de transição (AITCIN, 2000). _____  | 47 |
| Figura 4.1 – distribuição percentual dos custos de matéria prima (FREITAS, 2005). _____   | 50 |
| Figura 4.2 – relação a/a x R28 método Aitcin (AITCIN, 2000). _____  | 55 |
| Figura 4.3 – ábaco para determinação da quantidade de água método Aitcin (AITCIN, 2000). _____  | 56 |
| Figura 4.4 – ábaco para determinação da quantidade de agregado graúdo método Aitcin (AITCIN, 2000). _____   | 57 |
| Figura 5.1 – fluxograma de operações de uma central dosadora de concreto (fonte: ABESC). _____  | 60 |
| Figura 5.2 – a) sistema de facas b) representação do caminhão betoneira (fonte: catálogo Liebherr). _____   | 61 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.3 – influência da adição de sílica ativa no tempo de mistura do concreto (CHOPIN, LARRARD e CAZALIU, 2004).           | 64  |
| Figura 6.1- resultados de ensaio de granulometria areia natural.   | 71  |
| Figura 6.2 - resultados de ensaio de granulometria areia industrial  | 73  |
| Figura 6.3 - resultados de ensaio de granulometria mescla 60% areia industrial e 40% de areia natural.                         | 74  |
| Figura 6.4 - resultados de ensaio de granulometria da brita classificação 0 (4,74/12,5).                                       | 76  |
| Figura 6.5 - verificação do ponto de saturação do aditivo, método do Funil de Marsh.   | 77  |
| Figura 6.6 - curva de calor de hidratação x tempo (BENINI, 2008).  | 85  |
| Figura 6.7 - calorímetro semi-adiabático.  | 86  |
| Figura 6.8 - tanque de cura.   | 88  |
| Figuras 6.9 e 6.10 - torno mecânico adaptado para a preparação de topos dos CPs (fonte: Mendes, 2002).                         | 88  |
| Figura 6.11 - disco de corte empregado na preparação de topos dos CPs (fonte: Freitas, 2005).                                  | 89  |
| Figura 6.12 - retífica empregada para preparação de topos de CPs.  | 89  |
| Figura 6.13 - retífica empregada para preparação de topos de CPs.  | 90  |
| Figura 6.14 - extensômetro usado para verificação do topo dos CPs.   | 90  |
| Figura 6.15 - verificação do topo dos CPs.   | 91  |
| Figura 6.16 - prensa utilizada para ruptura dos CPs.   | 92  |
| Figura 6.17 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 3%.           | 96  |
| Figura 6.18 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 9%.           | 96  |
| Figura 6.19 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 9%.           | 97  |
| Figura 6.20 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 12%.          | 97  |
| Figura 7.1 - CPs com ruptura cônica e com ruptura cisalhada.   | 100 |
| Figura 7.2 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 3%.  | 102 |
| Figura 7.3 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 6%.  | 103 |
| Figura 7.4 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 9%.  | 103 |
| Figura 7.5 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 12%. | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 7.6 - equações das curvas de tendência para resultados de resistência à compressão aos 7 de idade. _____ | 107 |
| Figura 7.7 - evolução dos resultados de resistência à compressão. _____   | 108 |
| Figura 7.8 - curvas de ajuste para os resultados de 3 dias de idade. _____                                      | 109 |
| Figura 7.9 - evolução dos resultados de resistência à compressão. _____   | 111 |
| Figura 7.10 - evolução dos resultados de resistência à compressão (BHANJA & SENGUPTA, 2004). _____              | 112 |
| Figura 7.11 - curvas de ajuste para os resultados de 28 dias de idade. _____                                    | 112 |
| Figura 7.12 - gráfico de valores observados x valores calculados. _____   | 114 |
| Figura 7.13 - curvas de ajuste para os resultados de 28 dias de idade. _____                                    | 115 |
| Figura 7.14 - matriz de correlações entre as variáveis. _____   | 115 |
| Figura 7.15 - distribuição de freqüência dos resíduos. _____  | 116 |
| Figura 7.16 – Custos de matéria prima x resistência à compressão. _____   | 120 |
| Figura 7.17 - R\$/MPa x fator a/a dos concretos produzidos. _____   | 121 |
| Figura 7.18 - gráfico de $f_{c28}$ x R\$/MPa. _____   | 122 |
| Figura 7.19 - evolução do kg/MPa. _____   | 124 |
| Figura 7.20 - gráfico de $f_{c28}$ x Kg/MPa. _____  | 125 |
| figura 7.21 – kg de emissão de $CO_2$ por MPa de resistência à compressão. _____                                | 127 |
| Figura 7.22 - gráfico de $f_{c28}$ x $CO_2$ /MPa. _____   | 129 |
| Figura 7.23 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,458. ____                               | 130 |
| Figura 7.24 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,382. ____                               | 130 |
| Figura 7.25 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,318. ____                               | 131 |
| Figura 7.26 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,265. ____                               | 132 |
| Figura 7.27 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,230. ____                               | 132 |
| Figura 7.28 – descarga do aditivo no funil do caminhão (CHRISTÓFOLLI, INOUE & FREITAS, 2007). _____             | 137 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 4.1 – consumo de água por m <sup>3</sup> (MEHTA & AITCIN, 1990; FREITAS, 2005).                     | 51  |
| Tabela 4.2 – relação volumétrica dos agregados miúdos / graúdos (MEHTA & AITCIN, 1990; FREITAS, 2005).     | 52  |
| Tabela 6.1- características do cimento empregado (fonte: fabricante).                                      | 70  |
| Tabela 6.2 - resultados de ensaio de granulometria da areia natural.                                       | 71  |
| Tabela 6.3 - resultados de ensaios de areia natural.   | 72  |
| Tabela 6.4 - resultados de ensaio areia industrial.  | 72  |
| Tabela 6.5 - resultados de ensaio de granulometria da areia industrial.                                    | 72  |
| Tabela 6.6 - análise do índice de vazios da composição de areia.   | 73  |
| Tabela 6.7 - resultados de ensaio de granulometria composição 60% areia industrial e 40% de areia natural. | 74  |
| Tabela 6.8 - resultados do ensaio de granulometria da brita 0 (4,75/12,5).                                 | 75  |
| Tabela 6.9 - resultados de ensaio brita 0 (4,75/12,5).   | 76  |
| Tabela 6.10 - características sílica ativa (fonte: fabricante).  | 77  |
| Tabela 6.11 - faixas de resistência esperada método (MEHTA & AITCIN, 1990; FREITAS, 2005).                 | 79  |
| Tabela 6.12 - definição dos CPs a serem moldados.  | 79  |
| Tabela 6.13 - experimento fatorial com dois fatores (MONTGOMERY, 2005).                                    | 80  |
| Tabela 6.14 – tabela Anova para experimento fatorial com dois fatores (MONTGOMERY, 2005).                  | 81  |
| Tabela 6.15 - dia da elaboração dos traços.  | 82  |
| Tabela 6.16 - quantitativos dos concretos produzidos em Kg.  | 83  |
| Tabela 6.17 - relação a/a adotados.  | 84  |
| Tabela 6.18 - resultados de resistência à compressão aos 3 dias de idade.                                  | 93  |
| Tabela 6.19 - resultados de resistência à compressão aos 7 dias de idade.                                  | 94  |
| Tabela 6.20 - resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade.                                 | 95  |
| Tabela 7.1 - desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de 3 dias de idade.                    | 98  |
| Tabela 7.2 - desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de 7 dias de idade.                    | 98  |
| Tabela 7.3 - desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de 28 dias de idade.                   | 99  |
| Tabela 7.4 – comparativo de valores de coeficiente de variação.  | 99  |
| Tabela 7.5 - equações de regressão e R <sup>2</sup> para valores médios de resistência à compressão.       | 100 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 7.6 - máxima resistência potencial à compressão aos 3 dias de idade (MPa).   | 102 |
| Tabela 7.7 - máxima resistência potencial à compressão aos 7 dias de idade (MPa).   | 102 |
| Tabela 7.8 - máxima resistência potencial à compressão aos 28 dias de idade (MPa).  | 102 |
| Tabela 7.9 - equações das curvas de tendência e R <sup>2</sup> para valores de máxima resistência à compressão potencial.   | 104 |
| Tabela 7.10 – relação percentual resistência à compressão média / resistência à compressão máxima potencial                 | 105 |
| Tabela 7.11 - análise de variância para resultados de resistência à compressão de 3 dias de idade.                          | 105 |
| Tabela 7.12 - análise de variância para resultados de resistência à compressão de 7 dias de idade.                          | 106 |
| Tabela 7.13 - análise de variância para resultados de resistência à compressão de 28 dias de idade.                         | 107 |
| Tabela 7.14 - resultados médios de resistência à compressão.  | 108 |
| Tabela 7.15 - diferença percentual entre os resultados obtidos para o teor de sílica ativa de 12% e demais teores.          | 109 |
| Tabela 7.16 - diferença percentual entre os resultados obtidos para o teor de adição de sílica ativa de 3% e demais teores. | 110 |
| Tabela 7.17 - resultados estatísticos da equação de regressão determinada.  | 114 |
| Tabela 7.18 - normalidade dos resíduos.   | 116 |
| Tabela 7.19 - dados dos agregados empregados para determinação do valor de R\$/kg.  | 117 |
| Tabela 7.20 - custo das matérias primas empregadas.   | 117 |
| Tabela 7.21 - custos dos concretos produzidos em reais.   | 118 |
| Tabela 7.22 - teor de consumo de superplastificante em teores de sólidos em relação à massa de aglomerante.                 | 119 |
| Tabela 7.23 - custos de matéria prima e R\$/MPa para concretos usuais (fonte: centrais dosadoras de concreto de Curitiba).  | 122 |
| Tabela 7.24 - evolução do kg/MPa em função do tipo de concreto produzido e da relação a/a.                                  | 123 |
| Tabela 7.25 - kg/MPa para concretos convencionais (fonte:centrais dosadoras de concreto de Curitiba – PR).                  | 125 |
| Tabela 7.26 – kg CO <sub>2</sub> /MPa para concretos usuais (fonte:centrais dosadoras de concreto de Curitiba – PR).        | 127 |
| Tabela 7.27 - emissão de CO <sub>2</sub> por MPa de resistência à compressão.   | 128 |
| Tabela 7.28 - relação a/a x tempos de mistura.  | 135 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|                         |  |
|-------------------------|--|
| ABCP                    | - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND        |
| ABNT                    | - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS         |
| ARI                     | - ALTA RESISTÊNCIA INICIAL                         |
| CAD                     | - CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO                      |
| CAR                     | - CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA                     |
| cm <sup>3</sup>         | - CENTÍMETRO CÚBICO                                |
| CO <sub>2</sub>         | - DIÓXIDO DE CARBONO                               |
| CP                      | - CORPO DE PROVA                                   |
| CPs                     | - CORPOS DE PROVA                                  |
| CV                      | - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO                          |
| Kg CO <sub>2</sub> /MPa | - KILOGRAMAS DE DIÓXIDO DE CARBONO POR MEGA        |
| PASCAL                  |  |
| EPUSP                   | - ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  |
| f <sub>ck</sub>         | - RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO          |
| HPC                     | - HIGH PERFORMANCE CONCRETE                        |
| IPT                     | - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS              |
| Kg                      | - KILOGRAMA  |
| kg/MPa                  | - KILOGRAMA POR MEGAPASCAL                         |
| m <sup>3</sup>          | - METRO CÚBICO                                     |
| m <sup>2</sup>          | - METROQUADRADO                                    |
| mm                      | - MILÍMETROS                                       |
| MJ                      | - MEGAJOULE  |
| MPa                     | - MEGAPASCAL                                       |
| PPGCC<br>CIVIL          | - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO<br>CIVIL |
| R\$/MPa                 | - REAIS POR MEGAPASCAL                             |
| RELAÇÃO A/A             | - RELAÇÃO ÁGUA / AGLOMERANTE                       |
| R <sup>2</sup>          | - COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO                      |
| SD                      | - DESVIO PADRÃO                                    |
| UFPR                    | - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ                   |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1) INTRODUÇÃO</b>   | <b>17</b> |
| <b>1.1) Importância da Pesquisa</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>1.2) Objetivo da Pesquisa</b>                                     | <b>20</b> |
| <b>1.3) Estrutura da Dissertação</b>                                 | <b>20</b> |
| <b>1.4) Limitações da Pesquisa</b>                                   | <b>21</b> |
| <b>2) CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA</b>                               | <b>22</b> |
| <b>3) MATERIAIS E MICROESTRUTURA DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA</b> | <b>28</b> |
| <b>3.1) Materiais</b>  | <b>28</b> |
| 3.1.1) Cimento   | 28        |
| 3.1.2) Agregados   | 29        |
| 3.1.3) Sílica Ativa  | 31        |
| 3.1.4) Aditivo Superplastificante                                    | 37        |
| <b>3.2) Microestrutura do CAR</b>                                    | <b>40</b> |
| 3.2.1) Fase pasta de cimento   | 40        |
| 3.2.2) Fase Agregado   | 44        |
| 3.2.3) Zona de Transição   | 45        |
| <b>4) MÉTODOS DE DOSAGEM DE CAR</b>                                  | <b>48</b> |
| <b>4.1) Método Simplificado de Mehta &amp; Aitcin (1990)</b>         | <b>51</b> |
| <b>4.2) Método IPT/EPUSP Modificado (CREMONINI, 2001)</b>            | <b>53</b> |
| <b>4.3) Método Aitcin (2000)</b>                                     | <b>55</b> |
| <b>5) PRODUÇÃO E CONTROLE DE CAR</b>                                 | <b>58</b> |
| <b>5.1) Processos Produtivos</b>                                     | <b>58</b> |
| <b>5.2) Controle de Qualidade dos Materiais</b>                      | <b>59</b> |
| <b>5.3) Carregamento e mistura dos materiais</b>                     | <b>60</b> |
| <b>6) ESTUDO EXPERIMENTAL</b>  | <b>69</b> |
| <b>6.1) Materiais Empregados</b>                                     | <b>69</b> |
| 6.1.1) Cimento   | 69        |
| 6.1.2) Agregados   | 70        |
| 6.1.3) Sílica Ativa  | 76        |
| 6.1.4) Aditivo Super-plastificante                                   | 77        |
| <b>6.2) Planejamento de Experimento</b>                              | <b>78</b> |
| 6.2.1) Definição do Experimento                                      | 78        |
| 6.2.2) Projeto de Experimento  | 80        |
| 6.2.3) Dosagem dos Concretos   | 83        |
| 6.2.4) Preparação da equipe e pré-testes                             | 84        |
| 6.2.5) Calorimetria  | 85        |
| <b>6.3) Execução do Experimento</b>                                  | <b>87</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>7) ANÁLISE DE RESULTADOS</b>  | <b>98</b>  |
| <b>7.1) Validação dos resultados</b>                                       | <b>98</b>  |
| 7.1.1) Desvio padrão e coeficiente de variação                             | 98         |
| 7.1.2) Equações das curvas de tendência                                    | 100        |
| 7.1.3) Máxima resistência potencial  | 101        |
| 7.1.4) Análise de variância  | 105        |
| <b>7.2) Análise dos resultados de resistência à compressão</b>             | <b>107</b> |
| <b>7.3) Análise do Experimento Fatorial Cruzado de 2 Fatores</b>           | <b>113</b> |
| <b>7.4) Análise de Custos</b>  | <b>117</b> |
| <b>7.5) Análise Quanto ao Consumo de Cimento</b>                           | <b>123</b> |
| <b>7.6) Análise de Calorimetria</b>  | <b>129</b> |
| <b>7.7) Análise Qualitativa Quanto à Produção Industrial dos Concretos</b> | <b>135</b> |
| <b>8) CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>   | <b>139</b> |
| <b>8.1) Sugestões para Pesquisas Futuras</b>                               | <b>141</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>143</b> |



## 1) INTRODUÇÃO

### 1.1) Importância da Pesquisa

Ao utilizar-se o concreto de alta resistência ao invés do concreto usual, o cimento Portland é empregado de maneira mais eficiente, explorando-se todo seu potencial. O consumo de água mais elevado, maior que o estritamente necessário para hidratar o cimento completamente, empregado no concreto usual, resulta em uma microestrutura mais fraca e porosa. Uma vez que a produção de cimento Portland demanda muita energia, preparar concreto usual pode ser considerado um desperdício parcial de energia (AITCIN, 2000).

Para demonstrar o fato pode-se observar que um concreto com  $f_{ck}$  de 30 MPa consome em média 10 kg de cimento por MPa de resistência à compressão, enquanto um concreto com  $f_{ck}$  de 100 MPa consome em média 4,0 kg de cimento por MPa (fonte: Supermix Concretos S/A).

Freitas (2005) aponta que a extração de minerais em grandes jazidas, como o calcário para a produção de cimento ou o minério de ferro para a produção do aço, sempre gerou um grande impacto sobre o meio ambiente. Também a industrialização do minério, seja nas cimenteiras ou nas siderúrgicas, é uma atividade de intenso consumo de recursos naturais e energia, com a inevitável geração de resíduos. O concreto de alta resistência permite um melhor aproveitamento dos recursos naturais devido à maior durabilidade das estruturas e a minimização do consumo de matérias primas nobres, com o menor consumo de concreto e aço empregados na confecção das estruturas, dada a sua maior resistência mecânica e o emprego de resíduos industriais como adições.

A diminuição do consumo de cimento por unidade de resistência resulta na possibilidade de redução da emissão de  $CO_2$  na atmosfera e conseqüentemente minimiza os efeitos no meio ambiente do uso de cimento na construção civil.

Kreijer (1987) *apud* Levy (2005) afirma que para cada MPa de resistência, o aço consome 983 MJ de energia em sua fabricação enquanto o concreto consome 444 MJ, cerca de 55% a menos. Deve-se fazer aqui a ponderação quanto ao uso de estruturas metálicas comparativamente às estruturas de concreto armado, que também usa o aço em sua constituição, porém com menor participação quando aumentada a resistência do concreto.

Além da possibilidade de produção de estruturas de concreto com menor impacto ambiental, o uso de CAR possibilita uma série de vantagens sob a ótica da engenharia.

Para Dal Molin (1995), as principais vantagens do CAR em relação ao concreto convencional e outros materiais são:

- a) diminuição das dimensões das peças estruturais, principalmente pilares de edifícios altos, fato que aumenta e melhora os espaços livres, principalmente nos andares mais baixos e mais sobrecarregados;
- b) vigas mais esbeltas e de maior comprimento, reduzindo a quantidade total de vigas necessárias em cada pavimento;
- c) redução do peso total das estruturas, com a conseqüente redução das cargas nas fundações;
- d) redução das deformações imediatas como conseqüência de um maior módulo de deformação;
- e) minimização das deformações lentas, com a redução da fluência devido a menor quantidade de vazios na pasta de cimento;
- f) aumento da durabilidade das estruturas, pelo fato dos CAR serem menos porosos e permeáveis, estando assim menos expostos aos ataques dos agentes agressivos presentes no meio ambiente;
- g) redução nos custos devido à redução do volume de concreto necessário;
- h) maior rapidez de execução.

Passados 15 anos destas conclusões, o desenvolvimento dos aditivos e técnicas de dosagem indicam vantagens econômicas devidas à utilização de CAR. Como destacado por Freitas (2005), o concreto de alta resistência é um material extremamente indicado para otimizar alguns dos problemas da engenharia, como:

- a) retorno do investimento financeiro mais rápido, pois devido a sua alta resistência nas primeiras idades, permite o encurtamento do cronograma das obras;
- b) menor custo de manutenção, devido à maior durabilidade das estruturas;
- c) melhor aproveitamento dos espaços internos, otimizando os projetos arquitetônicos e aumentando a área útil e o conseqüente retorno financeiro;
- d) menor consumo de aço em peças submetidas à flexo-compressão;
- e) menor área de formas e menor mão-de-obra na execução;

f) redução nos custos da obra devido à redução do volume de concreto necessário e a maior rapidez de execução.

As conclusões acima já haviam sido obtidas por Serra (1997), que mostrou que uma das principais vantagens do CAR é possibilitar a redução da dimensão dos elementos estruturais, principalmente dos pilares, detalhe que amplia as áreas úteis, com efeitos notáveis para subsolos com garagens, como pode ser observado na figura 1.1.

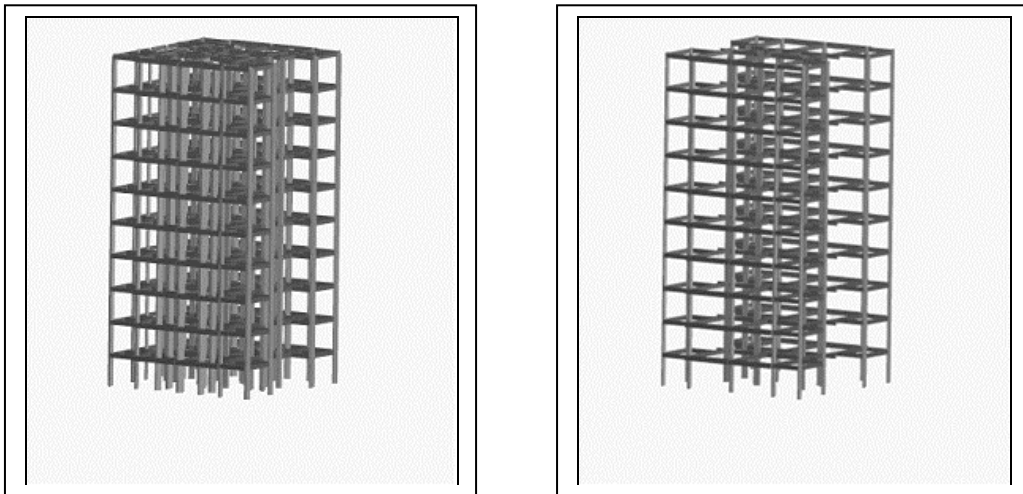


Figura 1.1 – comparação de uma estrutura para um mesmo edifício: a) estrutura em concreto convencional e b) estrutura em CAR – fonte CD ROM – ABCP. (1999)

Como vantagem adicional do CAR tem-se o fato que os materiais empregados para sua confecção são de relativa facilidade e rapidez de obtenção, sendo em geral os mesmos empregados na produção do concreto usual. Técnicas e equipamentos de produção também são os mesmos empregados pelas centrais dosadoras de concreto na produção de concretos usuais (ALMEIDA, 2005).

## 1.2) Objetivo da Pesquisa

O objetivo desta pesquisa é analisar a influência dos diferentes teores de sílica ativa, adicionados em substituição ao cimento, na produção de CAR em central dosadora de concreto. Para a obtenção deste objetivo produziram-se concretos de alta resistência com 5 relações a/a e 4 diferentes teores de sílica ativa. Com base nestas misturas experimentais foram estudados a influência dos diferentes teores de sílica ativa na resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade, nos processos produtivos de CAR em central dosadora de concreto, aspectos econômicos e características do concreto.

Apesar da necessidade de melhoria da infra-estrutura, cada vez mais é fundamental aliá-la à preservação dos recursos ambientais existentes, sob a perspectiva sócio-ambiental. Cabe a indústria da construção civil e particularmente do concreto, fornecer novos produtos a sociedade, visando diminuir seu impacto, e para tal, há a necessidade de se medir este impacto de modo a verificar se a evolução técnica caminha na direção da sustentabilidade. Diante do exposto, neste trabalho foram efetuadas análises quanto ao consumo de cimento dos concretos produzidos, relacionando-as com as emissões de CO<sub>2</sub> efetuadas na produção do cimento.

Este trabalho tem também como objetivo dar continuidade aos estudos efetuados por Mendes (2002) e Freitas (2005) no PPGCC da UFPR, procurando fornecer ferramenta real para utilização na indústria da construção. Todo o estudo experimental foi efetuado em laboratórios de centrais dosadoras de concreto, dentro de condições industriais de ensaio e produção, com o auxílio de técnicos das empresas, que foram treinados para realização dos trabalhos.

## 1.3) Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é dividida em 08 capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se a introdução, indicando a importância da pesquisa, seu objetivo, sua estrutura e suas limitações.

No Capítulo 2 discorre-se sobre concretos de alta resistência apresentando histórico, características, principais aplicações, benefícios e particularidades.

As características dos materiais constituintes e da microestrutura do CAR são expostas no Capítulo 3.

No Capítulo 4 apresenta-se uma discussão sobre os métodos de dosagem de CAR.

Abordam-se no Capítulo 5 as condições de produção de CAR, focando o processo de controle de qualidade de materiais, processos de carregamento, mistura, transporte e controle de qualidade de CAR.

No Capítulo 6 descreve-se o estudo experimental desenvolvido e seus resultados.

No Capítulo 7 efetua-se a análise dos resultados obtidos.

As considerações finais e sugestões de novas pesquisas são apresentadas no capítulo 8.

#### 1.4) Limitações da Pesquisa

Nesta pesquisa empregaram-se materiais utilizados corriqueiramente nas centrais dosadoras de concreto da cidade de Curitiba - PR. Apesar de ser possível o emprego em laboratório de materiais que possivelmente aumentariam os resultados de resistência à compressão obtidos, o caráter prático que se objetivou neste estudo seria reduzido.

Diante do objetivo deste trabalho empregou-se apenas a sílica ativa como adição e focou-se a pesquisa nas características deste material e dos concretos produzidos com ele.

Definiram-se quatro teores de sílica ativa a serem estudados, de modo que o emprego dos concretos produzidos fosse, a princípio, viável comercialmente. Os teores foram definidos a partir de informações da literatura e dos teores empregados em uso comercial.

Todos os trabalhos foram executados em condições normais de centrais produtoras de concreto. Os concretos obtidos foram analisados sob a ótica de possível comercialização, avaliando-se de maneira expedita a capacidade de produção e de aplicação em obra.

## 2) CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

### 2.1) Definições

Uma definição de concreto de alta resistência (CAR) aceita por todos é praticamente impossível de ser obtida. Até a década de 70, antes da difusão do uso de superplastificantes, eram considerados concretos de alta resistência os concretos com resistência superior a 40 MPa. Em 2002, o *ACI Committee on High Strength Concrete* revisou suas definições considerando concretos de alta resistência os materiais com resistência de projeto especificada superior a 55 MPa (MEHTA & MONTEIRO, 2008). A NBR 8953/2009 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, classe de resistência e consistência classifica os concretos como pertencentes ao grupo I para resistências até 55 MPa, sendo os concretos acima deste limite considerados de alta resistência.

O *CEB-FIB - Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale du Béton* considera concretos de alta resistência como concretos com resistência à compressão aos 28 dias de idade superior a 60 MPa (SHANNAG, 2000).

Alguns pesquisadores consideram também que o conceito de alta resistência é relativo, sendo que um concreto pode ser considerado de alta resistência se apresentar resistência superior à média atual ou possua especificações que não podem ser usualmente alcançadas (DAL MOLIN et al, 1997; LARRARD & SEDRAN, 2002).

Ainda muitos profissionais consideram CAR como sinônimo de concreto de alto desempenho (CAD), no entanto o conceito de alto desempenho pode estar associado a outras características do concreto além da resistência à compressão, como tempo de pega, massa específica, acabamento superficial e estabilidade volumétrica. A definição do presidente do *American Concrete Institute* no ano de 1999, Jo Coke, define bem o conceito de alto desempenho (ALMEIDA, 2005):

“CAD é o concreto otimizado para um determinado uso.”

O CAR é uma classe particular de CAD, mas não se pode afirmar que todo CAD é um CAR, pode-se produzir CAD com resistências baixíssimas, se esta característica for a que garanta o alto desempenho do concreto.

## 2.2) Histórico

O advento da utilização de CAR deu-se a partir da utilização dos superplastificantes no final da década de 60 na Alemanha e Japão, quase que simultaneamente. Durante os anos 80, foi-se aumentando pouco a pouco as dosagens de superplastificante e percebeu-se que estes poderiam ser utilizados como poderosos redutores de água, viabilizando a obtenção de concretos com relação água/cimento mais baixa. Também na década de 80, com início do uso da sílica ativa como adição, encontrou-se um meio de obter resistências mais elevadas com menores consumos de cimento (AITCIN, 2000).

Com a evolução da tecnologia do concreto, o uso de CAR tornou-se mais freqüente. Hoje existe uma série de obras no mundo executadas com CAR, dentre as mais famosas têm-se as *Petronas Towers*, em Kuala Lumpur, na Malásia, e a *Confederetion Bridge* no Canadá, que podem ser observadas na figura 2.1.



Figura 2.1 – a) *Confederation Bridge* b) *Petronas Towers* (fonte: pixdaus.com. Disponível em <<http://pixdaus.com/single.php?id=17365>> <<http://pixdaus.com/single.php?id=40898>>. Acesso em: 01/02/2010.)

A obra emblemática no Brasil com a utilização de CAR foi a construção do Edifício E-Tower (figura 2.2) na cidade de São Paulo. Devido a uma exigência da Prefeitura Municipal de São Paulo quanto ao número de vagas de estacionamento mínimas para aprovação do projeto, foi empregada a solução de se aumentar o  $f_{ck}$  dos pilares para 80 MPa, reduzindo assim sua seção. Com esta medida foi possível aumentar em 16 o número de vagas de garagem. Este aumento do número de vagas de garagem, além de solucionar o impasse com a Prefeitura Municipal de São Paulo trouxe consideráveis ganhos financeiros para o empreendedor. O concreto produzido atingiu resistências na ordem de 125 MPa (HARTMANN & HELENE, 2004).



Figura 2.2 – Edifício E-Tower, São Paulo (fonte: foto cedida pela Eng<sup>a</sup> Carine Hartmann)

Em Curitiba, têm-se como experiências recentes com concretos de alta resistência e resistência acima da empregada usualmente no mercado, conhecidas por este autor, a construção do Museu Oscar Niemeyer, que em 2000 empregou concretos com resistência à compressão de 35 MPa aos três dias de idade. Ainda



em 2000, na construção do Edifício Evolution Towers foi empregado concreto com  $f_{ck}$  de 60 MPa na construção de parte dos blocos de fundação e alguns pilares. Em 2007, foi empregado concreto com  $f_{ck}$  de 50 MPa na concretagem de parte dos blocos e pilares do Edifício Buenos Aires. No ano de 2010, iniciou a obra do Edifício Palazzo Lumini que também empregará concreto com  $f_{ck}$  de 50 MPa na construção de parte dos blocos de fundação e de pilares.

No ano de 2008, na cidade de Ponta Grossa–PR, na construção do Edifício Antarctica, foi empregado concreto com  $f_{ck}$  especificado de 90 MPa, sendo esta a maior resistência à compressão especificada em um projeto estrutural realizado no Brasil até o presente momento (CHRISTÓFOLLI, INOUE & FREITAS, 2007).

### 2.3) Considerações quanto aos custos

Em virtude dos altos consumos de cimento, uso de adições e superplastificantes, o CAR possui um custo por  $m^3$  de concreto muito superior ao dos concretos usuais. Entretanto, quando se analisa o custo total da estrutura, se percebe a economia proporcionada pelo uso do material. Também é possível perceber a vantagem financeira do uso do CAR quando se analisa o custo de matéria prima por  $m^3$  de concreto para cada MPa de resistência à compressão (R\$/MPa).

Na obra do edifício E-Tower com o emprego de CAR foi possível uma redução de 52% no volume de concreto dos pilares, o que acarretou em uma economia de aproximadamente 7% quando comparada a solução analisada com o uso de concreto com  $f_{ck}$  de 40 MPa (HARTMANN & HELENE, 2004). O aumento do número de vagas de garagem também proporcionou considerável ganho ao empreendedor.

Em Belém-PA, Ferreira *et al* (2001) analisaram a estrutura de um edifício de 33 andares e obtiveram uma economia de 6,7% com o emprego de concretos com  $f_{ck}$  de 45 MPa e 60 MPa na concretagem dos pilares e economia de 10,37% para o uso de concretos com os mesmos  $f_{cks}$  na concretagem de pilares vigas e lajes, quando comparadas estas soluções ao uso de um concreto com  $f_{ck}$  de 30 MPa para a execução da estrutura.

Freitas (2005) efetuou um estudo de caso referente à concretagem dos pilares dos seis primeiros pavimentos do Edifício Corporate do Edifício Evolution Towers em Curitiba-PR. O autor observou uma economia de 5,8% com o emprego de concreto com  $f_{ck}$  de 60 MPa em comparação ao uso de concreto com  $f_{ck}$  de 40 MPa.

A economia com o uso do CAR não se restringe exclusivamente aos custos de produção das estruturas, em virtude da baixa relação água/aglomerante obtida somada ao efeito do uso de adições a permeabilidade dos concretos é significativamente reduzida, assim, a durabilidade das estruturas é consideravelmente aumentada. Estruturas altamente duráveis possuem baixos custos de manutenção em seu ciclo de vida, porém até hoje a análise deste tipo de redução de custo com o emprego de CAR ainda é pouco discutida na literatura.

#### 2.4) Considerações quanto à sustentabilidade

O crescimento da população mundial, o desenvolvimento da economia globalizada e a produção industrial projetam um grande aumento na concentração de  $CO_2$  na atmosfera até o ano de 2100, como pode ser observado na figura 2.3 (MALHOTRA & MEHTA, 2008).

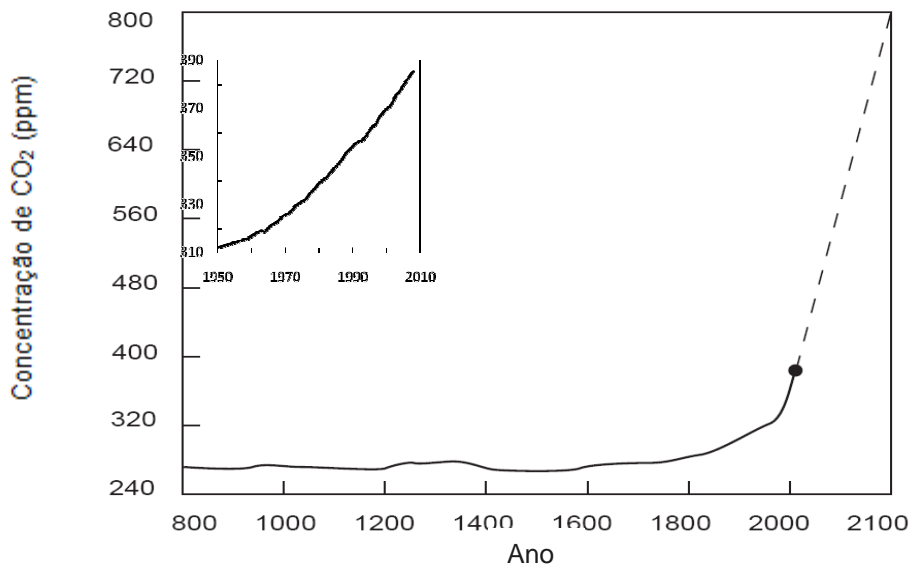


Figura 2.3 – valores históricos e projeção da concentração de  $CO_2$  na atmosfera (MALHOTRA & MEHTA, 2008)

A produção de cimento emite na atmosfera cerca de 900 kg de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de clínquer produzida, sendo uma das indústrias que mais contribui para o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (MALHOTRA & MEHTA, 2008).

A redução do consumo de cimento mundial é fator de senso comum e dentre as diferentes alternativas possíveis para se alcançar este objetivo está o uso de CAR. Em uma primeira análise pode parecer ilógico que concretos com altos consumos de cimento possam ser uma alternativa para a redução do consumo de cimento mundial, porém em comparação a concretos usuais o CAR consome uma quantidade bastante inferior de cimento para se obter cada MPa de resistência à compressão (kg/MPa).

O uso de CAR permite também a redução do volume total de concreto empregado na estrutura, o que acarreta na redução da quantidade total de consumo de agregados, de consumo de energia e de emissão de CO<sub>2</sub> para produção, transporte e aplicação do concreto na estrutura. O consumo de aço da estrutura também é reduzido com o uso de CAR sendo que o aço em comparação ao concreto consome cerca de 55% mais energia em sua produção (LEVY, 2005).

Nos estudos realizados quanto à redução de emissão de CO<sub>2</sub> com o uso de CAR dificilmente são consideradas as reduções de emissão de CO<sub>2</sub> devido à maior durabilidade das estruturas e conseqüentemente menor necessidade de manutenção e substituição precoce ao término de sua vida útil.

### **3) MATERIAIS E MICROESTRUTURA DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA**

#### **3.1) Materiais**

Na produção de CAR, a escolha dos materiais tem significativa influência nas propriedades dos concretos, assim como em seus custos. A escolha do tipo e dosagem de cimento, de superplastificante e de adição podem provocar custos de matéria-prima excessivos que inviabilizam o uso comercial dos CAR ou produzir concretos que não atendam às especificações necessárias.

A escolha dos materiais deve ser efetuada diante das opções disponíveis no local e proximidades onde será produzido o concreto, visto que o grande volume de matérias primas necessárias para a produção de concreto em larga escala inviabiliza longas distâncias de transporte.

##### **3.1.1) Cimento**

O primeiro material a ser selecionado para a produção de CAR é o cimento. À medida que se aumenta a resistência à compressão, o cimento empregado passa ter sua influência aumentada quanto à reologia e resistência dos concretos produzidos. Quanto mais fino o cimento, maior velocidade de ganho de resistência será obtida, pois a fase silicato entrará em contato com a água de maneira mais rápida e eficaz. Entretanto, do ponto de vista reológico, quanto mais fino for o cimento, mais etringita será formada e mais C-S-H se desenvolverá rapidamente na superfície das fases silicato (AITCIN, 2000).

A natureza do cimento também influencia a quantidade de água necessária para a obtenção de uma dada trabalhabilidade. Alguns cimentos apresentam grande dificuldade em manter a trabalhabilidade para aplicação em obra, mas bons resultados quanto à resistência à compressão. Em contrapartida, outros cimentos apresentam bom desempenho quanto à manutenção da trabalhabilidade e baixa eficiência quanto à resistência à compressão (AITCIN, 2000; ALMEIDA, 2005).

Um fator de grande importância na escolha do tipo e marca do cimento a ser empregado para a produção de CAR é a variação de suas características. O CAR é muito mais sensível às alterações das características do cimento que os concretos usuais, os lotes de cimento usados para a produção de CAR devem possuir variações pouco significativas de suas características. Caso ocorram grandes variações, os concretos produzidos podem não apresentar as mesmas características dos concretos confeccionados em laboratório.

A compatibilidade cimento x aditivo também é de grande importância na produção de CAR, entretanto há uma gama maior de superplastificantes que cimentos disponíveis em uma mesma região. Como a quantidade empregada e os custos de transporte do aditivo são reduzidos, é possível com facilidade adaptar-se o aditivo ao cimento e não vice-versa. Raeder Filho (2005) estudou a aplicação de cimento aluminoso na produção de CAR e demonstrou o comentado acima. Em seu trabalho, aditivos à base de polinaftalenos sulfonados não apresentaram compatibilidade com o cimento aluminoso, sendo compatíveis com este cimento apenas, dentre os aditivos empregados no estudo, os aditivos à base de policarboxilato.

### 3.1.2) Agregados

A escolha dos agregados tem grande influência na produção de CAR. À medida que se aumenta a resistência à compressão, estes se tornam a fase de menor resistência. A resistência do agregado é crítica quando se produz CAR, entretanto quando é necessária uma alta resistência inicial, como por exemplo 40 MPa aos 2 dias de idade, a resistência do agregado não é um fator preponderante. A resistência de aderência ou da zona de transição, pode ser também um fator limitante. Partículas aproximadamente equidimensionais garantem uma boa aderência entre a pasta de cimento e o agregado graúdo. A forma das partículas depende, além da natureza da rocha, do processo de britagem (NEVILLE, 1997).

Mendes (2002) efetuou estudo comparativo entre agregados graúdos provenientes de diferentes rochas disponíveis na região metropolitana de Curitiba para a produção de CAR e obteve resultados significativamente diferentes entre os materiais. O pesquisador obteve os maiores resultados de resistência à compressão com concretos produzidos com granito, seguido pelo calcário e o diabásio, denotando assim que a origem da rocha é fator de influência na resistência à compressão do CAR.

O controle de qualidade dos agregados empregados em CAR tem maior relevância que nos concretos usuais, principalmente quanto à granulometria e diâmetro máximo, visto a necessidade fundamental do CAR de que a demanda de água seja tão baixa quanto possível (AITCIN, 2000).

O uso de areias grossas é indicado para a produção de CAR. O módulo de finura recomendado por alguns pesquisadores varia entre 2,7 e 3,2 (NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000). Esta recomendação deve-se aos seguintes motivos (MEHTA & MONTEIRO, 2008):

- a) o CAR possui alto teor de finos, não sendo necessária a presença de finos no agregado para melhorar a trabalhabilidade;
- b) agregado miúdo de maior dimensão requer menor quantidade de água para se atingir a trabalhabilidade desejada;
- c) as partículas mais graúdas, durante o processo de mistura, geram tensões de cisalhamento que ajudam a evitar a floculação dos grãos de cimento.

Para agregados graúdos com dimensão superior a 38,1 mm o aumento de resistência provocado pela menor demanda de água é superado pelo efeito negativo da menor área de contato entre as fases. O concreto também se apresenta mais heterogêneo quando se empregam misturas ricas e agregados de grande dimensão. A dimensão máxima ótima está vinculada à dosagem de cimento da mistura. Para misturas pobres observa-se bom desempenho de agregados com dimensão máxima de aproximadamente 150 mm, entretanto para os concretos usuais não se observa vantagem no uso de agregados com dimensão máxima superior a 25 mm e para CAR existem estudos onde se obteve bons resultados com agregados com dimensão máxima característica entre 9,52 mm e 25 mm (ALMEIDA, 2005).

Com a redução da dimensão máxima do agregado graúdo, para uma dada relação a/a de CAR, a resistência à compressão pode ser aumentada significativamente. A redução da dimensão máxima do agregado graúdo tem um efeito benéfico na zona de transição e diminui a possibilidade de falhas e microfissuras nos grãos do agregado.

Quanto mais alta a resistência à compressão menor deve ser a dimensão máxima do agregado graúdo. Concretos com resistência à compressão de até 70 MPa podem ser confeccionados com agregados graúdos com dimensão máxima entre 20 mm e 25 mm. Para se alcançar uma resistência à compressão de aproximadamente 100 MPa a dimensão máxima dos agregados deve situar-se entre 14 e 20 mm. Já os concretos com resistências na ordem de 125 MPa tem sido produzidos com agregados com dimensão máxima entre 10 e 14 mm (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

### 3.1.3) Sílica Ativa

A sílica ativa, conhecida também como sílica volatilizada, microsílica, ou fumo de sílica é um resíduo das indústrias de silício metálico e ligas de ferro metálico, produzidas em grandes fornos elétricos de fusão do tipo arco-voltaico, que operam a temperaturas acima de 2000°C. A redução do quartzo silício produz vapores de monóxido de silício gasoso (SiO), que se oxidam em contato com o ar e condensam na zona de baixa temperatura do forno (parte superior) em partículas esféricas minúsculas, compostas basicamente por dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), que são removidas através da filtragem dos gases expelidos, por filtros manga (DAL MOLIN, 2005, MEHTA & MONTEIRO, 2008), figura 3.1.

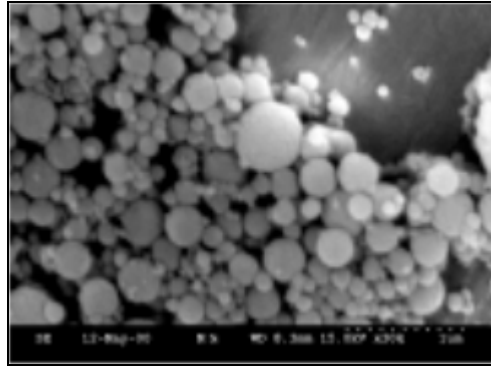


Figura 3.1 – micrografia eletrônica de varredura de sílica ativa (MEHTA & MONTEIRO, 2008)

Os ferro silícios usuais tem um teor nominal de sílica de 50%, 75% e 90%. Com 48% o produto é denominado metal silício. Os subprodutos das indústrias de silício metálico e liga ferro-silício produzem ligas com 75% ou maior teor de silício, contendo de 85% a 95% de sílica não cristalina. Os subprodutos da liga de ferro-silício com 50% de silício contêm um teor muito menor de sílica e é inadequado para o uso como material pozolânico. Quanto mais alto o teor de sílica na liga maior o teor de sílica ativa (NEVILLE, 1997; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Conforme as matérias primas utilizadas, o tipo do forno, os procedimentos operacionais empregados, o tipo de liga produzido, dentre outros, se obtêm diferentes quantidades de sílica ativa por tonelada de liga metálica produzida. Na tabela 3.1 se apresentam alguns valores médios indicados por Dastol (1984) *apud* Dal Molin (2005).

Tabela 3.1 – quantidade de sílica ativa obtida por tonelada de liga metálica produzida. (DAL MOLIN, 2005)

| Liga Metálica                | Sílica Ativa |
|------------------------------|--------------|
| 1000 kg de silício metálico  | 550 kg       |
| 1000 kg de ferro-silício 75% | 350 kg       |
| 1000 kg de ferro-silício 50% | 90 kg        |



Em geral, a massa específica da sílica ativa é  $2,20 \text{ g/cm}^3$ , sendo que este valor pode ser um pouco maior para materiais com menores teores de sílica. As partículas do fumo de sílica são extremamente pequenas, com um diâmetro médio de  $0,01 \mu\text{m}$ . Comparadas ao cimento Portland e à cinza volante observa-se que o diâmetro da sílica ativa é bastante inferior. A área específica da sílica ativa é tão pequena que não pode ser determinada pelo Blaine. Utilizando-se a técnica de adsorção de hidrogênio obtêm-se índices entre  $15$  e  $25 \text{ m}^2/\text{kg}$ , que representa um valor 13 a 20 vezes maior que a área específica de outros materiais pozzolânicos, quando se determina o índice pelo mesmo método, conforme apresentado nas figuras 3.2 e 3.3 (NEVILLE, 1997; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

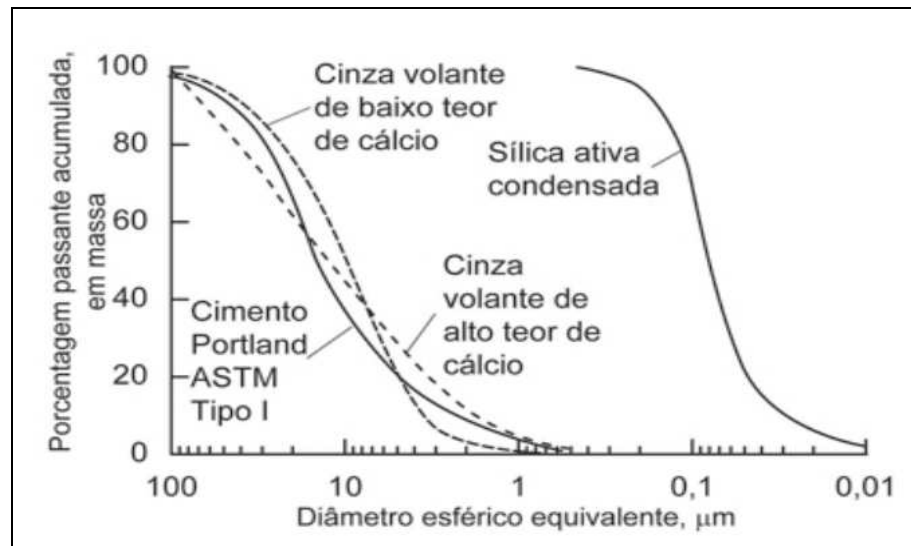


Figura 3.2 – comparativo de diâmetro de partículas (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

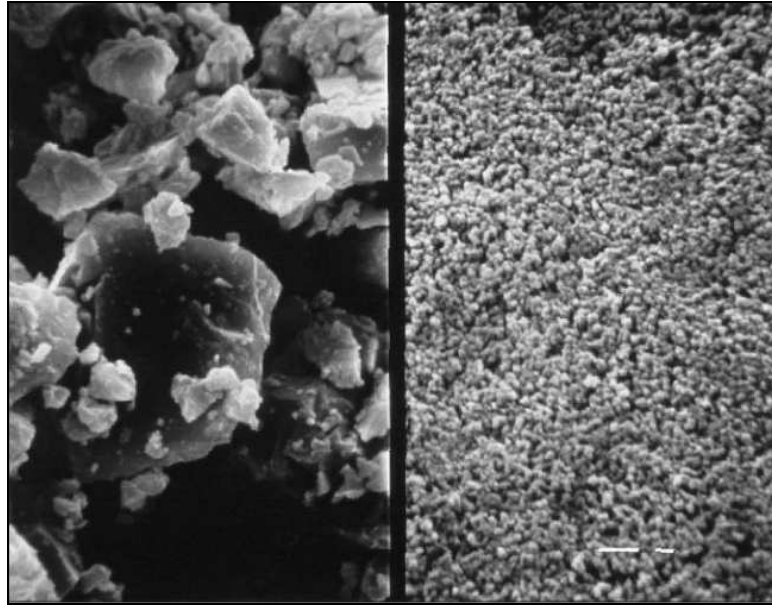


Figura 3.3 – microfotografia em mesma escala de grãos de Cimento Portland (esquerda) e sílica ativa (direita) (SÍLICA FUME USER'S GUIDE, 2005).

Comercialmente no Brasil a sílica ativa pode ser encontrada de três formas: natural ou não densificada, densificada ou em formato de lama (figura 3.4). Em outros países encontramos cimentos compostos com sílica ativa.

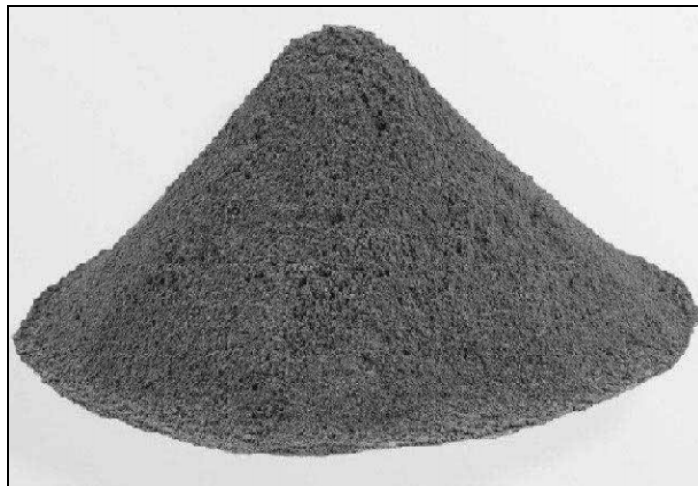


Figura 3.4 – sílica em estado natural ou não densificada (SÍLICA FUME USER'S GUIDE, 2005).

A sílica ativa contribui de duas maneiras para o aumento da resistência do concreto: através da ação física e da ação química. A primeira deve-se ao efeito microfiller causado pela grande finura do material, que produz um melhor empacotamento dos sólidos, preenchendo os vazios entre os grãos de cimento. A sílica ativa também contribui para o crescimento dos produtos de hidratação do

cimento, pois suas partículas atuam como pontos de nucleação. Desta maneira, o crescimento dos cristais ocorrerá a partir dos grãos de cimento e dos grãos de sílica ativa. Este efeito produz uma microestrutura do concreto mais densa, pois acelera-se o desenvolvimento dos produtos de hidratação e como com a presença da sílica ativa os espaços para o crescimento dos produtos de hidratação são menores, serão produzidos um número maior de pequenos cristais ao invés de um menor número de grandes cristais (DAL MOLIN, 1995).

A segunda deve-se à reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, (C-H) produzido pela reação do cimento, que gera silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, bastante semelhante ao produzido pela reação do cimento (NEVILLE, 1997).

A sílica ativa possui baixa densidade e massa unitária bastante reduzida o que causa dificuldades no transporte e manuseio. Para superar este fato alguns fabricantes densificam a sílica ativa. Quando a sílica ativa é densificada sua reatividade química com o C-H diminui.

As partículas aglomeradas de sílica ativa apresentam dificuldade de serem separadas, pois há uma grande força inter-partículas, existindo assim partículas aglomeradas de sílica ativa de grande diâmetro (YAJUM & CAHYADI, 2003).

As propriedades e trabalhabilidade dos concretos são melhoradas quando se adiciona sílica ativa nos mesmos, aumentando sua coesão e integridade, reduzindo-se também a porosidade capilar e a permeabilidade. O refinamento dos poros causa substancial redução da exsudação interna, provocando a redução da zona de transição (CASTRO, 2007).

O uso de sílica ativa resulta em significativos aumentos na resistência à tração do concreto conjuntamente com o aumento da resistência à compressão, também se observa aumentos consideráveis na resistência à flexão (BHANJA & SENGUPTA, 2004).

Neville (1997) indica que teores de sílica ativa inferiores a 5% não produzem resultados significativos quanto a ganhos de resistência à compressão e teores superiores a 10% produzem resultados de resistência à compressão ligeiramente superiores aos obtidos com o teor de 10%. Para Gutierrez e Cánovas (1996) e Duval & Kadri (1998) teores de sílica ativa superiores a 15% apresentam ganhos de resistência pouco significativos e aumentos expressivos dos custos de matéria prima

do concreto. O ACI 363R-92 – *State-of-the-art report on high strength concrete* (2005) cita que usualmente empregam-se teores de sílica ativa entre 5% e 15%.

Segundo Aitcin (2000), teoricamente, para se empregar todo o potencial de cal liberada pela hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$  seriam necessários teores de sílica ativa entre 25% e 30%. Entretanto, observa-se em aplicações industriais teores entre 3% e 10%. O emprego de teores superiores a estes valores são utilizados, em geral, apenas em estudos de laboratório, devido à elevada quantidade de superplastificante necessária para se obter o abatimento desejado, o que inviabiliza financeiramente o uso de concretos produzidos com estes teores. O autor sugere o uso de dosagens entre 8% e 10% em relação à massa de aglomerante, entretanto destaca que este não é um número definitivo e que com estudos para o material utilizado podem-se encontrar dosagens mais eficientes quanto a R\$/MPa.

Mazloom, Ramerzaniapour & Brooks (2004) efetuaram estudo comparativo entre um concreto de referência sem o emprego de sílica ativa e concretos com teores de sílica ativa de 5%, 10% e 15%. Nota-se neste trabalho que o teor ótimo de sílica ativa, quanto à resistência à compressão, situa-se entre 5% e 10%.

Segundo Bhanja & Sengupta (2004) os teores ótimos de sílica ativa quanto à resistência à tração situam-se entre 5% e 10%. Quanto à resistência à flexão o teor ótimo situa-se entre 15% e 25%. Acima de 15% de teor de sílica ativa não se percebe aumentos significativos da resistência à tração e o mesmo ocorre para a resistência à flexão com teores de sílica ativa acima de 25%.

Silva (1997) *apud* Mendes (2002) destaca que na década de oitenta era comum a utilização de teores de sílica ativa na ordem de 15%, na década de 90 passou-se a empregar teores na ordem de 10% e que no final da década de 90 era comum o emprego de teores entre 6% e 8%. Este autor destaca que em sua atuação na produção de concretos tem recebido especificações de concretos com teores de sílica ativa entre 6% e 8%, o que denota a continuidade da tendência descrita no final da década de 90.

A retração total não é influenciada pela adição de sílica ativa, entretanto a medida que se aumenta o teor do material a retração por secagem diminui consideravelmente e há um aumento na retração autógena. Em concretos sem a adição de sílica ativa observa-se um aumento da retração autógena à medida que se reduz a relação a/a e um aumento da retração total à medida que se aumenta a

relação a/a (HEWLETT, 1998; PERSON, 1998, JIANYONG & YAN, 2001; MAZLOOM, RAMERZANIANPOUR & BROOKS, 2004;).

Concretos produzidos com sílica ativa apresentam maior coesão, reduzindo significativamente a exsudação e a segregação. O uso de sílica ativa para a produção de concretos fluidos é bastante eficaz. A sílica ativa, quando adicionada à um concreto, aparentemente apresenta uma menor trabalhabilidade que se comparado a concretos de mesmo abatimento, pois a mistura com sílica ativa apresenta maior coesão. Para se equiparar a trabalhabilidade aparente é necessário aumentar o abatimento da mistura com adição de sílica ativa cerca de 50 mm (ACI 234R-96, 2005). Entretanto esta diferença de trabalhabilidade é apenas aparente, quando se aplica energia ao concreto para misturá-lo, bombeá-lo ou vibrá-lo, os grãos de pequenas dimensões da sílica ativa passam a fazer parte da solução de água do poro e atuam como esferas rolantes, que lubrificam a mistura, aumentando sua fluidez. Uma dosagem de 10% de sílica ativa em relação ao peso de cimento adiciona entre 50.000 e 100.000 partículas para cada grão de cimento.

Mesmo aparentando aspecto pegajoso nota-se que os concretos produzidos com sílica ativa apresentam maior fluidez quando comparados com outros concretos (HEWLETT, 1988).

#### 3.1.4) Aditivo Superplastificante

Os superplastificantes são uma categoria especial dos aditivos redutores de água que permitem grandes reduções na quantidade da água da mistura para se obter um dado abatimento ou permitem o aumento considerável da trabalhabilidade da mistura. Aditivos plastificantes comuns produzem uma redução da quantidade de água de mistura necessária entre 5% a 10%, aditivos superplastificantes produzem reduções entre 20% e 30% (HARTMANN, 2003; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Concretos confeccionados com superplastificante apresentam resistências à compressão maiores se comparados com concretos de referência sem adição de superplastificante, pois há uma maior velocidade de hidratação do cimento, as partículas deste são dispersas de maneira mais eficaz sob a ação dos superplastificantes. Estes aditivos podem causar efeitos colaterais de incorporar ar ao concreto ou retardar a pega reduzindo a resistência à compressão nas primeiras idades, sendo necessário estudo prévio do teor de dosagem e do tipo de

superplastificante a ser empregado. Em comparação aos plastificantes comuns, os superplastificantes podem ser adicionados em teores mais elevados sem causar exsudação excessiva e retardamento de pega, apesar do concreto produzido atingir valor de abatimento na ordem de 200 a 250 mm (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os aditivos à base de lignofulfonatos são conhecidos como plastificantes de primeira geração, sendo utilizados como plastificantes e em alguns casos como superplastificante. Proporcionam uma redução na quantidade de água de mistura entre 8% e 12% e quando usados em altas dosagens podem causar excessivos retardamentos de pega e incorporação de ar. Aditivos produzidos com produtos a base de melanina sulfonada e naftaleno sulfonado são conhecidos como superplastificantes de segunda geração e reduzem a quantidade de água de mistura em até 25% (HARTMANN, 2003).

Estes produtos mantêm o abatimento do concreto por curtos espaços de tempo e devem ser adicionados no momento de sua aplicação. Causam alterações pouco significativas nos tempos de início e fim de pega.

Hoje os principais aditivos empregados para a produção de CAR são os aditivos a base de policarboxilatos, conhecidos como de terceira geração ou hiperplastificantes. Este aditivos possuem maior capacidade de redução de água, sendo esta superior a 25% e também mantêm a trabalhabilidade por um maior período de tempo em comparação aos aditivos superplastificantes de segunda geração. Alguns destes aditivos causam retardamento de pega conforme a dose empregada, entretanto existem também produtos que não afetam significativamente o tempo de início de pega mesmo com altas doses de aditivo. Hartmann (2003) observou que aditivos à base policarboxilatos produzem aumentos significativos no tempo de fim de pega.

A adição de sílica ativa no concreto não influencia significativamente a perda de abatimento, entretanto a combinação com o aditivo superplastificante pode alterar as características de perda de abatimento do concreto, devendo ser efetuados estudos para avaliar estas características e procurar minimizar as perdas de abatimento (ACI 234R-96, 2005).

A compatibilidade entre o cimento e o aditivo é de fundamental importância na produção de CAR. Pode-se verificar esta através de dois ensaios bastante simples: o método do mini abatimento (KANTRO, 1990) e o método do funil de Marsh (NBR 7682/1983), ensaios estes já consagrados por diversos pesquisadores (DALM MOLIN, 1995; SPONHOLZ, PRUDÊNCIO JÚNIOR E STEIL, 1998; GAVA *et al.*, 2001).

O método do mini abatimento de Kantro consiste na execução de um ensaio de abatimento da pasta de cimento com uma relação a/a entre 0,35 e 0,45. São empregados 200 gramas de cimento para realização do ensaio, sendo o mesmo efetuado sobre uma placa de vidro, onde se mede o diâmetro da pasta espalhada em duas dimensões perpendiculares e em seguida calcula-se a média. Este ensaio permite que seja avaliado o aditivo quanto à sua fluidez, à perda de abatimento ao longo do tempo, à compatibilidade cimento x aditivo e também pode ser empregado para a verificação das características de cimentos e aditivos, quando se efetua ensaio comparativo em relação a um material de referência. Este ensaio tem como vantagem a pequena quantidade de material a ser empregada, entretanto não indica o ponto de saturação do aditivo (AITCIN, 2000).

No método do funil de Marsh (NBR 7682, 1983) mede-se o tempo de escoamento da pasta de cimento por um funil padronizado. São ensaiadas pastas com diferentes teores de aditivo, expressos em teor de sólidos contidos no superplastificante em relação à massa de cimento, 5 minutos após a mistura e 60 minutos após a mistura. Após a realização dos testes obtêm-se um gráfico, onde o ponto de interseção entre os dados de escoamento aos 5 minutos após a mistura e aos 60 minutos após a mistura corresponde ao ponto de saturação. Recomenda-se que o tempo de escoamento aos cinco minutos esteja entre 60 e 90 segundos com uma relação a/a entre 0,35 e 0,40. Caso seja necessário aumentar a relação a/a para se obter o escoamento indicado, deve-se buscar outras opções de superplastificante (AITCIN, 2000)

### 3.2) Microestrutura do CAR

A microestrutura do concreto é composta por três fases: a fase pasta de cimento, a fase agregado e a zona de transição que é a região situada entre a fase pasta de cimento e a fase agregado, que nos concretos usuais é o elemento de menor resistência.

O CAR apresenta algumas particularidades que o diferem dos concretos usuais, como por exemplo uma zona de transição bastante resistente e em alguns casos até mesmo ausente.

#### 3.2.1) Fase pasta de cimento

A fase pasta de cimento compõe-se de cimento e água. Quando da utilização de adições de materiais cimentícios adicionais estes se somam ao cimento e à água na fase pasta de cimento, podendo esta ser chamada de fase aglomerante.

A pasta de cimento hidratado é uma união relativamente heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados por uma massa porosa, contendo espaços com soluções e poros (PAULON, 2005).

O cimento Portland é composto por principalmente 4 compostos, que representam cerca de 90% de sua massa:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ . Quando o cimento é disperso em água os compostos anidros formam compostos hidratados. Após o contato do cimento com a água há a dissolução do gesso e o início precoce de hidratação dos silicatos de cálcio e dos aluminatos de cálcio. Após alguns minutos da hidratação surgem cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita. Estes cristais são gerados através da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas. Algumas horas mais tarde, grandes cristais prismáticos de C-H e pequenos cristais fibrosos de C-S-H começam a preencher os espaços anteriormente ocupados pela água e partículas de cimento em dissolução. A etringita pode se tornar instável dentro de alguns dias e se decompõe formando monossulfoaluminato hidratado (TAYLOR, 1997; ISAIA, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008), exibindo-se na figura 3.5 uma microscopia destes materiais



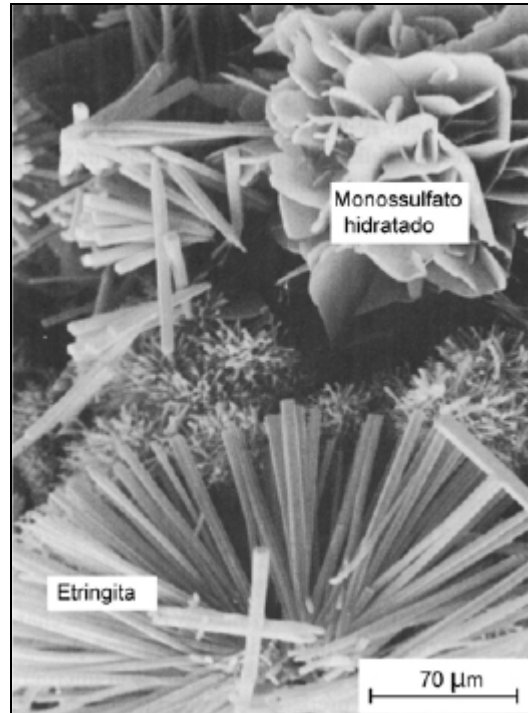


Figura 3.5 – microscopia de varredura de cristais de monossulfato hidratado e etringita (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Com o desenvolvimento da hidratação, o C-S-H e uma segunda geração de cristais menores de etringita e C-H preenchem os espaços vazios existentes entre os grandes cristais de etringita e C-H, aumentando assim a densidade e conseqüentemente a resistência (AITCIN, 2000).

Segundo Mehta & Monteiro (2008) a fase pasta de cimento possui quatro principais fases sólidas:

a) Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H): ocupa 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratada, determinando as propriedades da pasta. É o composto que mais contribui com a resistência da pasta;

b) Hidróxido de Cálcio (C-H): ocupa 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, também é conhecido como Portlandita. Em relação ao C-S-H o hidróxido de cálcio contribui pouco com a resistência da pasta, pois possui área superficial consideravelmente mais baixa. É um material bastante solúvel;

c) Sulfoaluminatos de cálcio (etringita e monossulfato hidratado): ocupam 15 a 20% do volume sólido da pasta de cimento hidratada e possuem um papel secundário nas relações microestrutura-propriedades;

d) Grãos de clínquer não hidratados: alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura do concreto. Os grãos de menores dimensões dissolvem-se primeiro, então as partículas maiores se tornam menores através da dissolução pela água. Devido ao limitado espaço disponível os produtos de hidratação tendem a se cristalizar bem junto às partículas de clínquer em hidratação, o que faz parecer que um revestimento se forma em torno delas.

A pasta de cimento hidratada contém uma série de vazios que influenciam significativamente suas propriedades. Os diferentes tipos de vazio são:

- a) espaço interlamelar no C-S-H;
- b) vazios capilares;
- c) ar incorporado.

Dependendo da umidade ambiente e de sua porosidade, a pasta de cimento pode reter água das seguintes formas (figura 3.6):

- a) água capilar;
- b) água adsorvida;
- c) água interlamelar;
- d) água quimicamente combinada:

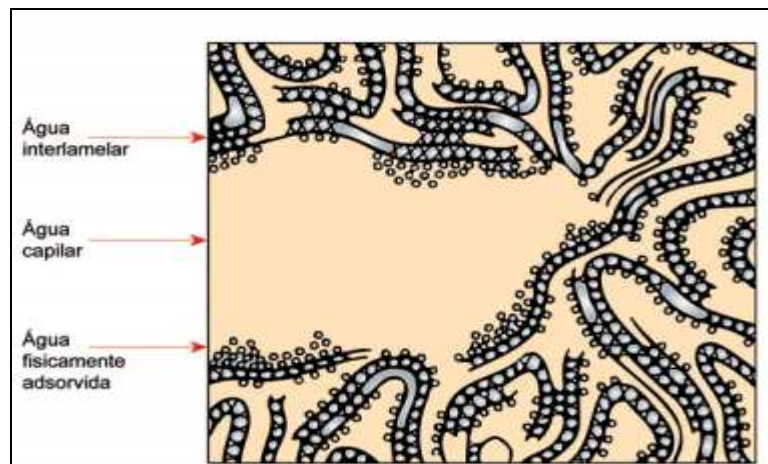


Figura 3.6 – Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A resistência das pastas de cimento hidratado pode ser melhorada atuando sobre a pasta em três frentes: reduzindo a porosidade, diminuindo o tamanho dos grãos dos produtos de hidratação e reduzindo heterogeneidades (AITCIN, 2000).

O volume de água disponível, o volume da fase de silicato não hidratado e a quantidade de ar incorporado na mistura são os principais fatores que afetam a porosidade da pasta de cimento. Reduzindo-se a relação a/a as partículas de cimento ficam mais próximas, reduzindo-se a porosidade capilar e disponibilizando menos espaço para crescimento dos chamados produtos externos, que compreendem os produtos iniciais de hidratação, formados quando existe muita água e espaços vazios. São flocos de grandes cristais que geram considerável volume de vazios e formam-se fora dos limites originais da partícula em hidratação (AITCIN, 2000; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Com a redução da relação a/a incrementa-se a formação de cristais de C-S-H com uma textura fina e altamente compactos. Também se observa a redução da quantidade de plaquetas hexagonais de C-H, de longas agulhas de etringita e longos filamentos pilosos de C-S-H, que são característicos em pastas de alta relação a/a (AITCIN, 2000).

As heterogeneidades na pasta de cimento podem ser compreendidas como as bolhas de ar e a tendência natural das partículas de cimento flocularem de modo folgado.

O superplastificante empregado para se obter concretos de baixa relação a/a melhoram a dispersão das partículas de cimento nas pastas recém-misturadas, e também tem papel importante na redução do ar aprisionado no concreto, sendo este fator também influenciado pelos materiais, dosagem e processos de mistura (AITCIN, 2000).

Nota-se diante do exposto, que em virtude das baixas relações a/a necessárias para se produzir CAR as três condições para se aumentar a resistência da pasta de cimento são satisfeitas, aumentando assim significativamente a resistência da pasta. Somado a este fator, as adições empregadas na produção de CAR contribuem também neste processo. A adição de sílica ativa gera uma reação com os cristais de C-H que gera cristais de C-S-H bastante semelhantes aos gerados no processo de hidratação do cimento. Outro aspecto é o efeito filler provocado pela adição de sílica ativa, as partículas de dimensão diversas vezes inferiores à do cimento preenchem os vazios entre os grãos do mesmo, reduzindo a porosidade. A sílica ativa também gera pontos de nucleação para o desenvolvimento dos produtos de hidratação reduzindo o espaço disponível para a formação dos produtos externos. A soma de todos estes fatores produz pastas de cimento de

elevada resistência (HEWLETT, 1988; TAYLOR, 1997; AITCIN, 2000; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

### 3.2.2) Fase Agregado

A fase agregado é a principal responsável pela densidade, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto, dependendo estas principalmente da densidade e resistência do agregado (MEHTA & MONTEIRO, 2008). As características dos agregados que mais influenciam as características dos concretos produzidos são a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a granulometria, a dimensão máxima, o módulo de finura, a forma, a textura superficial, a natureza mineralógica e a absorção (SBRIGHI NETO, 2005).

Em concretos usuais, salvo exceções de agregados altamente porosos ou quebradiços, a resistência dos agregados em geral não influencia a resistência dos concretos produzidos. Entretanto a dimensão e a forma do agregado graúdo podem afetar de maneira indireta a resistência à compressão do concreto. Há uma tendência de acúmulo de água junto à superfície do agregado que reduz a resistência da zona de transição. Este fenômeno é conhecido como exsudação interna (figura 3.7). Quanto maior a dimensão do agregado e quanto mais alongado for o seu formato maior será o acúmulo de água (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

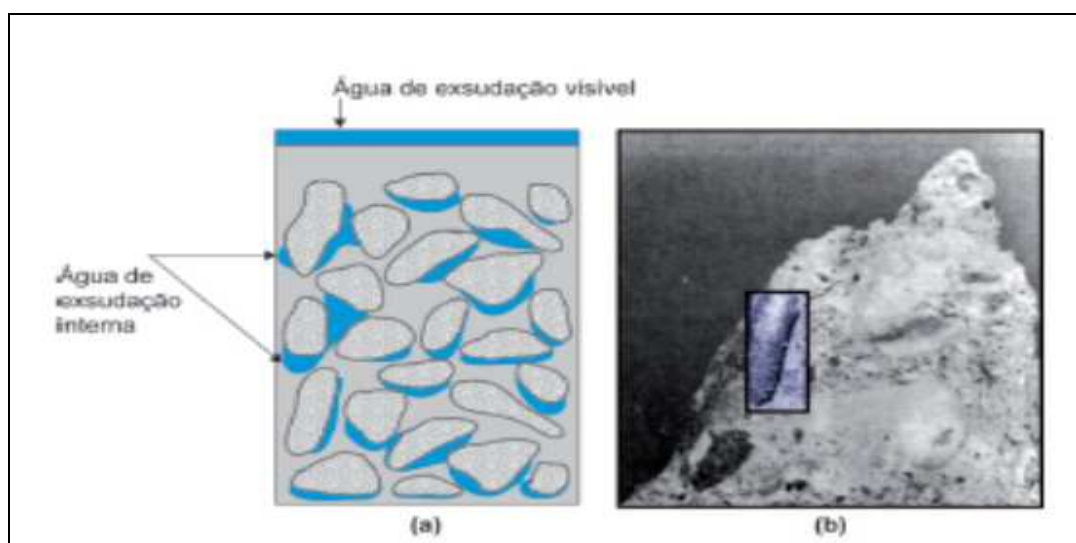


Figura 3.7 – a) representação do fenômeno da exsudação interna b) falha de aderência por cisalhamento em CP ensaiado à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

No CAR, a pasta de cimento e a zona de transição podem ter resistências tão elevadas que a fase agregado pode ser a fase menos resistente da microestrutura do concreto.

Não é possível aumentar a resistência de agregados naturais e artificiais, pois esta depende das características da rocha matriz. A influência do agregado na microestrutura do CAR é provocada principalmente pelas características da brita. Recomenda-se empregar partículas individuais com a menor concentração possível de elementos fracos. Deve ser selecionada uma rocha resistente que possa ser britada de maneira que os grãos possuam a menor quantidade possível de microfissuras. O uso de agregado graúdo de menores dimensões favorece a obtenção de grãos com menor quantidade de microfissuras e a redução do processo de exsudação interna. Rochas com planos de clivagem fracos ou expostas às intempéries devem ser evitadas.

Calcário, calcário dolomítico, sienito, diabásio, granito e basalto são exemplos de rochas que apresentam bons resultados quando aplicados na produção de CAR (AITCIN, 2000; MENDES, 2002).

### 3.2.3) Zona de Transição

A microestrutura da pasta de cimento hidratada próxima às partículas de agregado graúdo difere do restante da pasta de cimento hidratado. O principal causador desta situação é o fato que as partículas de cimento não se arranjam densamente junto às partículas relativamente grandes do agregado graúdo, ocorrendo algo semelhante ao efeito parede observado no concreto em contato com as formas. Existe nesta região menos cimento para se hidratar e para preencher os vazios iniciais, provocando o surgimento de uma região mais porosa se comparada com pasta de cimento hidratada situada em regiões mais distantes do agregado graúdo. O fenômeno da exsudação interna também eleva a relação a/a na região da interface pasta agregado (NEVILLE, 1997).

Há uma maior concentração de cristais de C-H, distribuídos perpendicularmente à superfície dos agregados na região da zona de transição, no restante da pasta os cristais de C-H possuem menores dimensões e distribuem-se aleatoriamente. As maiores quantidades e dimensões dos cristais de C-H na zona de transição devem-se à maior disponibilidade de água nesta região. Estes cristais

possuem forças de atração inter-cristalina menores se comparadas às existentes entre os cristais de C-S-H da pasta, conforme apresentado na figura 3.8 (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

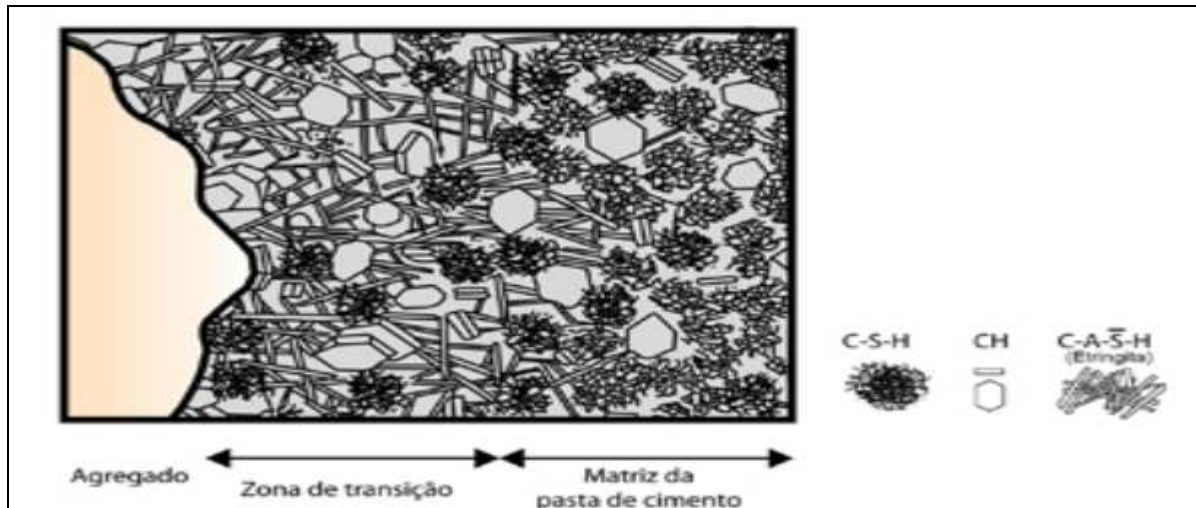


Figura 3.8 – representação da microestrutura do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A utilização de certas adições como substituição ao cimento produzem alterações na zona de transição. Cinzas volantes e sílica ativa reduzem a relação a/a da pasta nas regiões próximas ao agregado. A sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio existente na zona de transição produzindo C-S-H, em consequência a zona rica em C-H fica reduzida (figura 3.9). Em CAR, com uso de superplastificantes observa-se que na zona de transição há uma fina camada rica em hidróxido de cálcio nas primeiras idades. Após significativa hidratação a pasta torna-se completamente densa não sendo encontrado C-H, etringita ou espaços vazios (ALMEIDA, 2005).

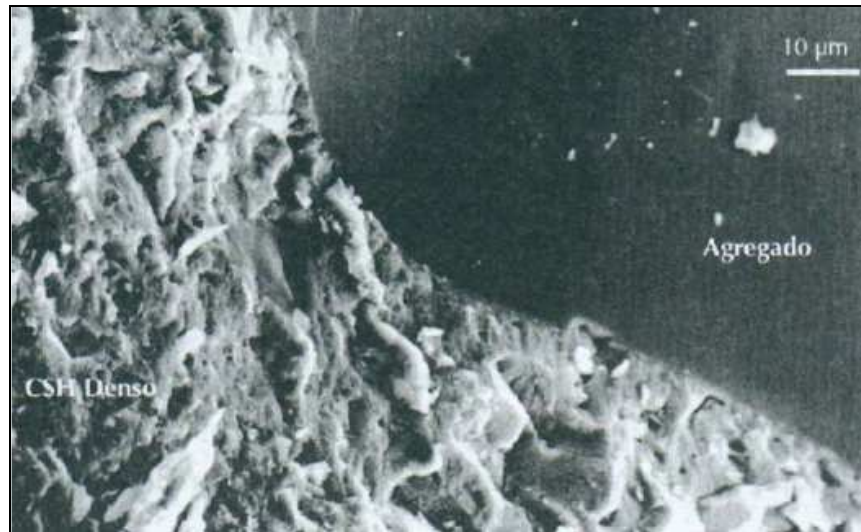


Figura 3.9 – C-S-H denso na interface com o agregado, observa-se ausência de zona de transição (AITCIN, 2000).

#### 4) MÉTODOS DE DOSAGEM DE CAR

Segundo De Larrad e Sedran (2002) a dosagem de concretos tem se tornado cada vez mais difícil, em função primeiramente do surgimento de novos materiais como aditivos, materiais cimentícios complementares e fibras. Em segundo lugar, o número de características do concreto enfatizadas na dosagem tem crescido constantemente, desde as propriedades reológicas do concreto fresco até a durabilidade do concreto. E por último, a grandeza das propriedades dos concretos possíveis de serem atingidas.

A dosagem de concretos de alta resistência pode ser considerada como uma área de extrema complexidade dentro da dosagem do concreto. Aitcin (2000) compara a dosagem de concretos com a culinária, onde os concretos convencionais seriam a cozinha tradicional e a dosagem de concretos de alta resistência equivaleria, dentro deste raciocínio, à alta cozinha. O autor comenta ainda que o concreto cada vez se torna mais que uma mistura de cimento, água e agregados, e que é mais difícil predizer teoricamente suas propriedades, mesmo hoje com o uso de computadores e avanços cada vez mais freqüentes na informática.

Existem diversos métodos para a dosagem de concretos de alta resistência desenvolvidos nos últimos anos, alguns deles baseados em cálculos computacionais e uma gama cada vez maior de propriedades dos concretos e seus materiais, dentre eles:

- a) Mehta e Aitcin (MEHTA & AITCIN, 1990);
- b) De Larrard (DE LARRARD, 1990)
- c) Domone e Soutsos (DAMONE & SOUTSOS, 1994);
- d) Nawy, (NAWY, 1996);
- e) Torrales-Carbonari, (TORALLES-CARBONARI, 1996);
- f) O'Reilly Diaz (O'REILLY DIAZ, 1998).
- g) Aitcin, (AITCIN, 2000);
- h) IPT/EPUSP Modificado (CREMONINI et al. 2001);
- i) Brahatkumar et al (2001);
- j) De Larrad e Sedran (DE LARRARD & SEDRAN, 2002);
- k) DMDA (CHANG, 2003);



Alves (2000) e Freitas (2005) efetuaram estudos comparativos entre os métodos de dosagem Mehta & Aitcin (1990), IPT/EPUSP Modificado (2001) e Aitcin (2000), sendo que Alves (2000) utilizou em seu estudo ainda o método Torrales Carbonari (1996).

Freitas (2005) obteve os menores custos de matéria prima com o emprego do método Mehta & Aitcin (1990). O autor traça ainda um paralelo com a pesquisa de Alves (2000) onde os custos de matéria prima foram inferiores nos concretos com resistência entre 57 e 72 MPa quando dosados pelo método Mehta & Aitcin (1990), e nos concretos com resistência acima desta faixa obteve-se os custos de produção mais baixos com os concretos dosados com o método Aitcin (2000). Alves (2000) empregou em sua pesquisa aditivos à base de naftaleno de segunda geração e Freitas (2005) empregou aditivos à base de policarboxilato de terceira geração. Deste modo, explica-se as diferenças entre os resultados das duas pesquisas.

Hoje a produção de concretos de alta resistência emprega, na grande maioria dos casos, superplastificantes à base de policarboxilato, visto as características superiores destes aos aditivos à base de melanina sulfonada e naftaleno sulfonado, principalmente quanto à manutenção do abatimento do concreto e poder de dispersão. Diante do exposto reforçam-se os resultados de Freitas (2005), que para a produção de concretos de alta resistência o método Mehta & Aitcin (1990) produz concretos com menor custo de matéria prima em comparação com os outros métodos estudados.

Pode-se observar que o método Aitcin (2000) minimiza o consumo de cimento dos traços e o método Mehta & Aitcin (1990) otimiza o consumo de superplastificante, item este que representa significativa parcela do custo de matéria prima dos concretos de alta resistência. Quanto maior a resistência do concreto maior será o percentual do custo de superplastificante em relação ao custo total de matéria prima do concreto, conforme apresentado na figura 4.1 (FREITAS, 2005).

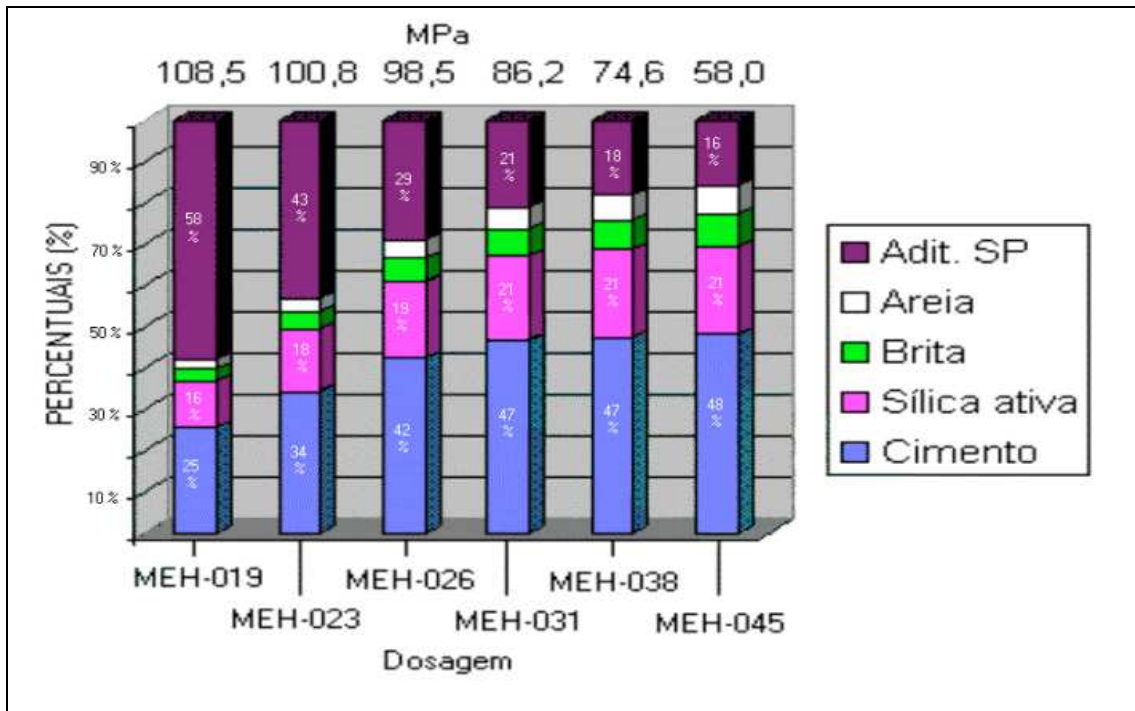


Figura 4.1 – distribuição percentual dos custos de matéria prima (FREITAS, 2005).

Alves *et al* (2003) também chegaram a mesma conclusão de Freitas (2005), obtendo os menores consumos de cimento com os concretos dosados através do método Aitcin (2000).

Apesar de produzir concretos com menor consumo de cimento, o método Aitcin (2000), conforme os materiais empregados pode proporcionar concretos altamente coesos e até mesmo pegajosos em todas as faixas de resistência devido ao baixo teor de água empregado. O método Mehta & Aitcin (1990) utiliza diferentes quantidades de água conforme as faixas de resistência, produzindo assim, misturas bastante coesas, em geral, apenas nos concretos de menor teor de água.

Neville (1997) recomenda que, para se evitar uma mistura muito pegajosa, o teor de água não seja inferior a 150 litros/m<sup>3</sup> para misturas com agregado miúdo anguloso e não inferior a 130 litros / m<sup>3</sup> para misturas com agregado miúdo arredondado.

Apresenta-se a seguir a seqüência de cálculo dos métodos estudados por Alves (2000) e Freitas (2005). Excluiu-se o método Torrales-Carbonari, em virtude dos resultados apresentados em Alves (2000) e por o mesmo não ter sido estudado por Freitas (2005).

#### 4.1) Método Simplificado de Mehta & Aitcin (1990)

Mehta & Aitcin (1990) desenvolveram um método de dosagem simplificado para concretos com resistência à compressão entre 60 MPa e 120 MPa, aplicável para concretos com densidade normal. O método é sugerido para o uso em concretos dosados com agregados graúdos com diâmetro máximo entre 10 mm e 25 mm, e abatimento entre 200 mm e 250 mm.

O método considera que os concretos de alta resistência possuem um teor de ar aprisionado de 2% e sugere um volume de agregado de 65%.

A provável resistência à compressão aos 28 dias de idade é dividida entre 60 MPa e 120 MPa em 5 níveis A (65 MPa), B (75 MPa), C (90 MPa), D (105 MPa) e E (120 MPa). Freitas (2005) em seu trabalho extrapolou o método criando o nível A1 com resistência estimada de 50 MPa.

No volume de pasta de 0,35 m<sup>3</sup> estão compreendidas as quantidades de cimento, água, ar aprisionado e material cimentício complementar. Desconta-se do volume de pasta o volume de água e 20 litros de ar aprisionado, obtendo-se assim o volume de aglomerante. O teor do material cimentício complementar é adicionado em substituição ao cimento.

O diâmetro máximo do agregado graúdo e os valores do abatimento não são considerados para determinar o teor de água, pois o diâmetro máximo do agregado empregado situa-se apenas entre 10 e 25 mm e o abatimento desejado pode ser obtido por alterações na dosagem de superplastificante. Estima-se os máximos consumos de água entre 120 e 175 litros conforme apresentado na tabela 4.1. Para o nível A1 considerou-se o consumo de água de 190 litros (FREITAS, 2005).

Tabela 4.1 – consumo de água por m<sup>3</sup> (MEHTA & AITCIN, 1990; FREITAS, 2005).

| Nível | Consumo de Água (litros/m <sup>3</sup> ) |
|-------|--|
| A1    | 190                                      |
| A     | 175                                      |
| B     | 160                                      |
| C     | 145                                      |
| D     | 135                                      |
| E     | 120                                      |

Estima-se as quantidades de agregados considerando-se seu volume total como 0,65 m<sup>3</sup> por metro cúbico de concreto produzido. O método determina relações entre os agregados graúdos e miúdos conforme a faixa de resistência, variando em virtude do decréscimo no consumo de água e o aumento de consumo de cimento, conforme a tabela 4.2. Novamente apresenta-se para o nível A1 as extrapolações efetuadas por Freitas (2005):

Tabela 4.2 – relação volumétrica dos agregados miúdos / graúdos (MEHTA & AITCIN, 1990; FREITAS, 2005).

| Nível | Relação volumétrica dos agregados miúdos / graúdos |
|-------|--|
| A1    | 2,05 : 2,95  |
| A     | 2,00 : 3,00  |
| B     | 1,95 : 3,05  |
| C     | 1,90 : 3,10  |
| D     | 1,85 : 3,15  |
| E     | 1,80 : 3,20  |

A definição do consumo em massa dos materiais é obtido multiplicando-se o consumo destes em volume por sua massa específica, esta sendo obtida com os grãos da areia e brita na condição saturado superfície seca.

Para a primeira mistura experimental recomenda-se o teor de superplastificante de 1% de sólidos sobre a massa de aglomerante ou 1% de material ativo, conforme as características do material empregado.

A massa e o volume de superplastificante são então calculados, levando-se em conta a porcentagem de sólidos e a massa específica do superplastificante.

Deve-se corrigir a umidade dos agregados quando da execução dos concretos e a quantidade de água presente no superplastificante também deve ser subtraída da quantidade máxima de água da mistura.

Devido às muitas estimativas efetuadas pelo método, geralmente a primeira mistura experimental terá que ser ajustada para atingir a trabalhabilidade e demais critérios desejados. O tipo de agregado, as proporções de areia no agregado total, o tipo e a dosagem do superplastificante, o tipo e a combinação das adições e o teor de ar do concreto podem ser ajustados numa série de misturas experimentais para otimizar a dosagem.

#### 4.2) Método IPT/EPUSP Modificado (CREMONINI, 2001)

Cremonini *et al* (2001) adaptaram o método de dosagem IPT/EPUSP de concretos convencionais para a dosagem de CAR, objetivando alcançar altas resistências com baixos consumos de cimento.

O método de dosagem utiliza os seguintes pressupostos:

- a) fixação de uma baixa relação de água/materiais secos (H);
- b) determinação do teor de argamassa ( $\alpha$ );
- c) utilização de material pozzolânico (sílica ativa, cinza volante e outros) como substituição de parte do volume de cimento.

A baixa relação água/materiais secos garante uma baixa relação água/aglomerante, o que é condição fundamental para a produção de CAR. Em concretos convencionais têm-se comumente valores relação água/materiais secos (H) superiores a 8,5%. Cremonini *et al* (2001) empregaram valores de H inferiores a 6,7%, sendo comum valores entre 5% e 6%. Os autores do método recomendam um valor fixo de H de 6%.

Utilizando-se o valor de H fixado anteriormente pode-se determinar a relação água/material aglomerante empregando-se a Lei de Lyse (equações 1 e 2).

$$H\% = (\text{água/aglomerante}) / (1 + m) \quad (1)$$

$$\text{água/aglomerante} = H\% \times (1 + m) \quad (2)$$

Sendo m o teor de agregados secos totais:

$$m = p + a \quad (3)$$

p = pedra

a = areia

Para diferentes relações 1:m calculam-se as relações água/materiais aglomerantes. Os autores do método recomendam que os valores de m sejam inferiores a 6 e superiores a 2. No trabalho publicado os autores empregaram os valores de m de 2; 3,5 e 5.

Através do procedimento recomendado por Helen e Terzian (1992), determina-se o teor de argamassa ( $\alpha$ ). Com base em estudos experimentais e observações práticas, em um traço referência 1:m escolhe-se o teor mínimo de argamassa que produz o traço mais homogêneo.

Determinam-se diferentes traços 1:m com base no teor de argamassa  $\alpha$ , conforme as equações:

$$a = \alpha * (1+m) - 1 \quad (4)$$

$$p = m - a \quad (5)$$

Através da substituição volumétrica é determinada a quantidade de material pozolânico e de cimento com base no volume total de aglomerante, empregando as equações:

$$m_A = \{(A * \gamma_A) / [A * \gamma_A + B * \gamma_B + (1 - A - B) * \gamma_C]\} * m_{agl} \quad (6)$$

$$m_B = \{(B * \gamma_B) / [A * \gamma_A + B * \gamma_B + (1 - A - B) * \gamma_C]\} * m_{agl} \quad (7)$$

sendo:

$m_A$  = massa do material pozolânico "A", correspondente à porcentagem de substituição sobre o volume de aglomerante (kg);

A = porcentagem de substituição do material pozolânico "A", em relação ao volume de aglomerante;

$\gamma_A$  = massa específica do material pozolânico "A" (kg/dm<sup>3</sup>);

$\gamma_C$  = massa específica do cimento (kg/dm<sup>3</sup>);

$m_{agl}$  = massa do material aglomerante (kg);

$m_B$  = massa do material pozolânico "B", correspondente à porcentagem de substituição sobre o volume de aglomerante (kg);

B = porcentagem de substituição do material pozolânico "B", em relação ao volume de aglomerante;

$\gamma_B$  = massa específica do material pozolânico "B" (kg/dm<sup>3</sup>).

O processo de dosagem recomenda que a dosagem de aditivo superplastificante seja a mínima possível para se obter o abatimento desejado. A escolha do superplastificante a ser empregado deve basear-se em custos, disponibilidade e compatibilidade com os materiais empregados.

Após concluído o programa experimental podem-se determinar as curvas de dosagem como no método original de Helene & Terzian (1992).

#### 4.3) Método Aitcin (2000)

O método de Aitcin (2000) para dosagem de concretos de alta resistência baseia-se na abordagem da norma ACI 211-1 *Standart Practice for Seelcting Propotions for Normal, Heavy-weight and Mass Concrete* e leva em conta cinco características diferentes:

- a) relação água/aglomerante;
- b) teor de água;
- c) dosagem de superplastificante;
- d) teor de agregado graúdo;
- e) teor de ar incorporado.

As relações água/aglomerante x resistência à compressão aos 28 dias de idade sugeridas podem ser observadas na figura 4.2.

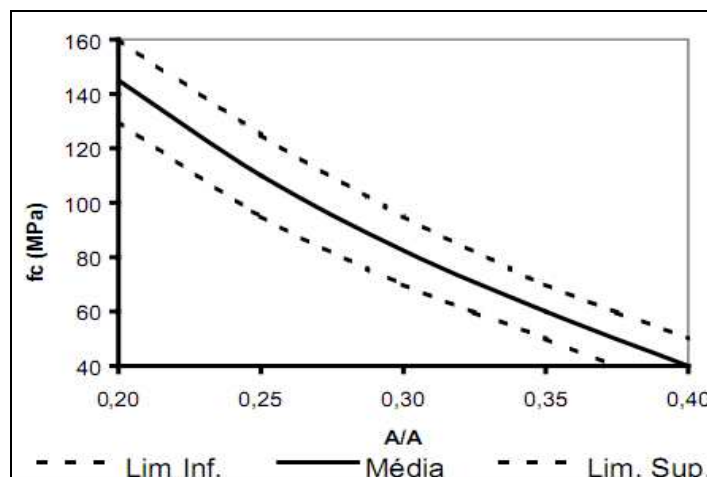


Figura 4.2 – relação a/a x R28 método Aitcin (AITCIN, 2000).

Observa-se na figura a determinação de intervalos de resistência para cada relação água/aglomerante. Este fato deve-se às variações na eficiência da resistência de diferentes cimentos e adições. O autor sugere que caso não se conheça a relação água/aglomerante x resistência à compressão de estudos anteriores que se empregue o valor médio.

Segundo Aitcin (2000) a dosagem de água da mistura de concretos de alta resistência apresenta-se como uma etapa de grande dificuldade. O método sugere um abatimento de 200 mm, que para ser atingido com baixo teor de água será necessário o emprego de um alto teor de superplastificante. A medida que se aumenta o teor de água diminui-se o teor de superplastificante e conseqüentemente a resistência à compressão.

Teores muito baixos de água podem produzir misturas pegajosas e teores muito altos de superplastificante, o que pode causar retardamentos de pega. A combinação ideal entre o teor de água e o teor de superplastificante pode ser obtido através de experimentos de projeto fatorial (ROUGERON & AITICIN, 1994 *apud* AITICIN, 2000).

Aitcin (2000) sugere uma abordagem simplificada baseada no ponto de saturação do aditivo (figura 4.3). Caso o ponto de saturação não seja conhecido o autor sugere iniciar os estudos com um teor de água de 145 litros/m<sup>3</sup> e ponto de saturação de 1%.

| Ponto de saturação | 0.6          | 0.8          | 1.0          | 1.2          | 1.4          | porcentual de sólidos |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|
| Dosagem de água    | 120 a<br>125 | 125 a<br>135 | 135 a<br>145 | 145 a<br>155 | 155 a<br>165 | litros/m <sup>3</sup> |

Figura 4.3 – ábaco para determinação da quantidade de água método Aitcin (AITICIN, 2000).

O teor de agregado graúdo é determinado com base na forma do mesmo, conforme a figura 4.4. Caso se tenham dúvidas quanto à forma do agregado ou a mesma não seja conhecida o autor sugere inicialmente o emprego de 1000 kg/m<sup>3</sup> de agregado graúdo.



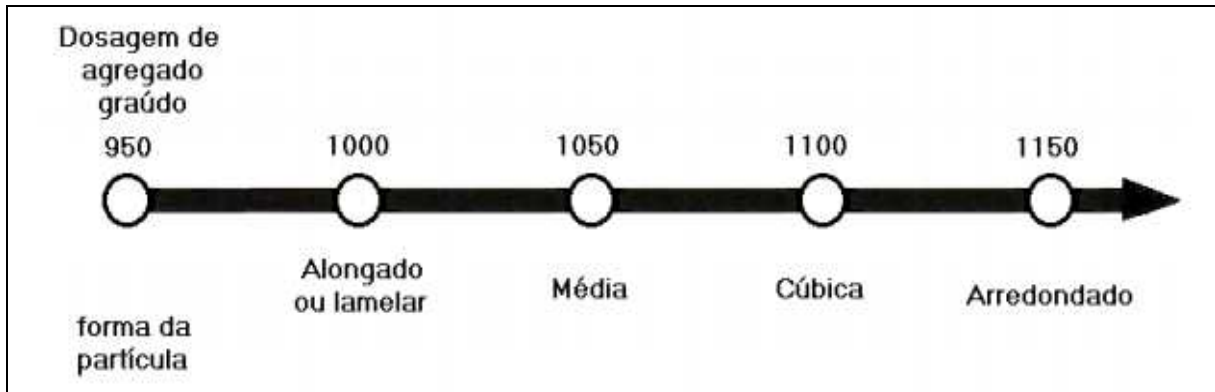


Figura 4.4 – ábaco para determinação da quantidade de agregado graúdo método Aitcin (AITCIN, 2000).

Aitcin (2000) sugere o emprego de um teor inicial de ar aprisionado de 1,5% que deve ser ajustado posteriormente através de ensaios realizados nas misturas experimentais. Não será discutido o emprego de ar incorporado para concretos sujeitos a ciclos de congelamento e descongelamento por esta situação não ocorrer corriqueiramente dentro das condições brasileiras.

O autor apresenta uma planilha para realização de todos os cálculos da mistura. Nesta são preenchidas as características dos materiais, correções de umidade, informações preliminares do traço e composição do concreto para  $1\text{m}^3$  e para a mistura experimental.

## 5) PRODUÇÃO E CONTROLE DE CAR

### 5.1) Processos Produtivos

A produção, transporte e lançamento de concretos de alta resistência são efetuados da mesma maneira que os concretos usuais. A baixa produção destes concretos nas centrais dosadoras de concreto ainda não justifica o uso de equipamentos específicos sob a ótica comercial.

Os materiais empregados para a produção de CAR também podem ser os mesmos empregados na produção dos concretos usuais pela central dosadora de concreto, à exceção de casos específicos.

O uso de cimentos diferentes dos empregados normalmente deve ser analisado em função do número de silos disponíveis na central. No caso de central com dois ou mais silos deve ser priorizado o resfriamento do cimento ao uso de cimentos diferentes.

Segundo Aitcin (2000) a temperatura do concreto é de grande importância para produção de CAR, pois tem grande influência na reologia do material. Misturas muito quentes, com temperatura acima de 25°C podem apresentar dificuldade em manter a trabalhabilidade e terão sua hidratação acelerada. Misturas muito frias, com temperatura abaixo de 10°C terão sua hidratação retardada e o poder de dispersão do superplastificante será reduzido, pois o mesmo se tornará mais viscoso. O autor destaca que a temperatura do concreto fresco deve situar-se entre 15°C e 20°C, devendo ser tomadas medidas corretivas no caso de a temperatura do concreto fresco não situar-se dentro deste intervalo.

O uso de agregados diferentes torna-se cada vez mais viável à medida que se aumenta a área de operação da central dosadora de concreto. Em centrais tipo *tow-go*, onde os agregados são carregados na balança diretamente pela pá carregadeira o uso de diferentes agregados é bastante fácil. Em centrais tipo P4, P5 ou P6, os agregados são armazenados em caixas (o número ao lado da letra P indica a quantidade de caixas de agregados) sobre a balança de agregados e através destas é efetuado o carregamento da balança de produção, faz-se necessário o uso completo dos agregados depositados nas caixas das balanças de agregado para a posterior substituição do agregado em uso, o que pode causar

atrasos na produção do concreto ou até mesmo o uso de agregados não específicos para a produção de CAR, no caso de erros na troca de materiais.

## 5.2) Controle de Qualidade dos Materiais

Os processos produtivos de concreto não iniciam com a pesagem e mistura dos materiais e sim com o controle de qualidade destes. Apesar de ser de grande importância um bom controle de qualidade dos materiais na produção de concretos usuais, na produção de CAR o controle de qualidade dos materiais é fator crucial. Quanto mais baixa a relação a/a e quanto mais alta a resistência à compressão, mais sensível a alterações nas características dos materiais torna-se o desempenho do concreto, e mais importante torna-se o controle de qualidade dos materiais (AITCIN, 2000).

Pode-se resumir o processo de controle de qualidade dos materiais para produção de CAR como o conjunto de operações que garantam que se empreguem na produção dos concretos os mesmos materiais utilizados nos estudos de dosagem.

Sugere-se a execução de ensaios rápidos como granulometria, teor de material pulverulento, índice de forma e massa específica no momento da chegada dos caminhões de agregado. Caso os materiais não se enquadrem nas faixas de variação definidas previamente o material não deve ser aceito.

O controle das propriedades dos aditivos pode ser efetuado através de ensaios como fluidez no funil de Marsh ou espalhamento pelo Cone de Kantro, efetuados com cimentos de referência armazenados e em comparação com aditivos de referência, além da determinação de seu PH e sua densidade.

Um grande desafio no controle de qualidade dos materiais para a produção de CAR é o controle das características do cimento, pois variações nas propriedades físicas e químicas do mesmo podem acarretar em grandes variações nas propriedades e reologia dos concretos produzidos. Os ensaios de controle das propriedades do cimento em geral demandam maior tempo e dificilmente são efetuados na chegada das cargas do material. Aitcin (2000) cita que um produtor de concreto no Canadá realiza ensaios de reologia antes da descarga dos caminhões que transportam cimento recebidos, sendo os testes efetuados em menos de dez minutos. Os ensaios de fluidez no funil de Marsh e espalhamento pelo Cone de

Kantro podem indicar diferenças nas propriedades do cimento, quando os resultados são comparados com cimentos e aditivos de referência.

### 5.3) Carregamento e mistura dos materiais

O carregamento dos materiais deve ser efetuado de modo a reproduzir fielmente a dosagem determinada em laboratório. As balanças de produção devem ser aferidas em intervalos regulares de tempo e/ou produção e devem apresentar desvios não significativos.

O carregamento dos materiais em uma central dosadora de concreto é efetuado através da pesagem dos agregados em balança específica, sendo estes transportados das baias de armazenamento até a balança através de pá carregadeira. O transporte dos agregados até o caminhão betoneira é efetuado através de esteiras transportadoras. O cimento, a água e os aditivos são pesados em balanças específicas para cada material. A água e o aditivo são transportados até o interior do caminhão betoneira por meio de bombas hidráulicas e o cimento é descarregado por gravidade, visto a balança de cimento situar-se sobre o ponto de carregamento do caminhão ou através de um sistema de rosca sem fim. O cimento é transportado em caminhões próprios e levado até o interior do silo através de um compressor de ar. O ar, ao sair do silo, é filtrado através de filtros manga ou outros tipos de filtros. Os equipamentos da central dosadora de concreto tem acionamento pneumático. Na figura 5.1 é apresentado um fluxograma das operações de uma central dosadora de concreto.

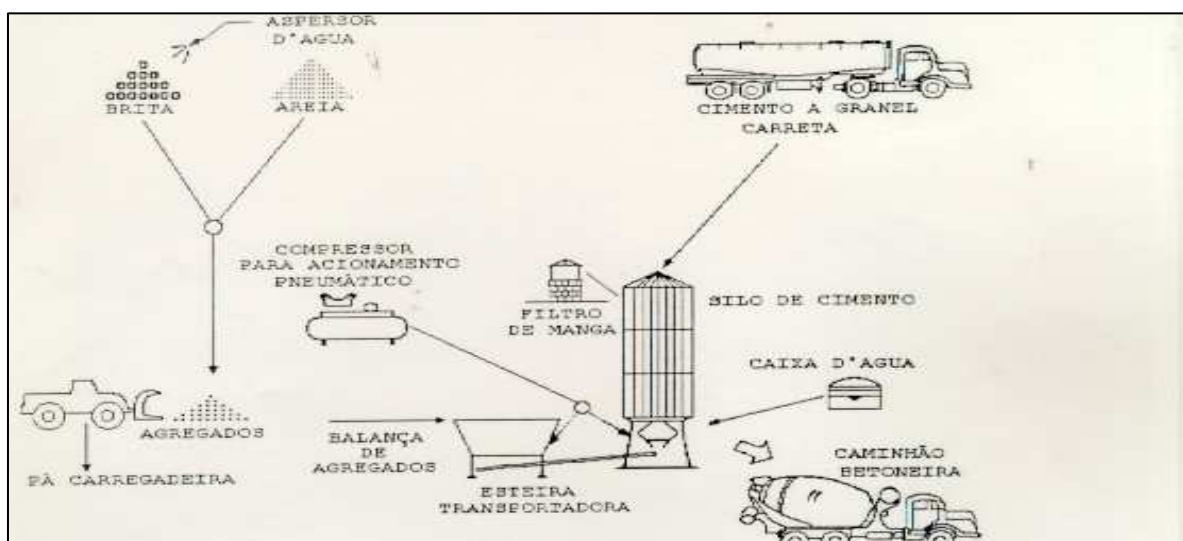


Figura 5.1 – fluxograma de operações de uma central dosadora de concreto (fonte: ABESC).

Os caminhões betoneira são caminhões de médio porte adaptados por empresas especializadas, onde é instalado um sistema de mistura de concreto. A betoneira do caminhão é chamada de balão. No topo deste há um funil para carregamento do material e em seu interior existe um sistema de rosca sem fim, conhecido por facas, que efetua a descarga e a mistura do concreto conforme o sentido de rotação do balão. Os caminhões possuem um equipamento chamado de redutor que faz com que a força do motor promova a rotação do motor. O caminhão possui ainda um medidor de abatimento do concreto e um hidrômetro para medição da quantidade de água adicionada no interior do balão. Na figura 5.2 é apresentada uma representação do caminhão betoneira.



Figura 5.2 – a) sistema de facas b) representação do caminhão betoneira (fonte: catálogo Liebherr).

Os caminhões betoneira devem apresentar bom funcionamento, pois em comparação aos concretos usuais o CAR apresenta maior dificuldade de homogeneização, pois possuem pequena quantidade de água de mistura e alto consumo de aglomerantes em sua composição. O processo de mistura é de grande importância na produção de CAR. Concretos mal misturados não só apresentam problemas quanto à trabalhabilidade, mas também terão suas propriedades afetadas (CHANG & PENG, 2000; ACI 363R-92, 2005; ALMEIDA, 2005).

Os caminhões betoneira no Brasil usualmente tem capacidade para  $8\text{m}^3$  de concreto. Em concretos usuais facilmente consegue-se homogeneizar cargas carregadas com  $8\text{m}^3$ , entretanto o processo de mistura de CAR é dificultado quando se carrega um caminhão betoneira com  $8\text{ m}^3$  concreto.

Este autor, em sua atuação profissional, observou que usualmente as centrais dosadoras de concreto do Brasil, quando produzem CAR, efetuam o carregamento dos caminhões com no máximo 6 m<sup>3</sup> de concreto.

Ao se efetuar o carregamento dos caminhões betoneira, deve-se empregar especial cuidado quanto à umidade dos agregados, principalmente nos agregados miúdos. A manutenção da relação a/a é a premissa básica para que os concretos produzidos obtenham características semelhantes aos desenvolvidos em laboratório.

Hoje no Brasil, este autor tem notícia de apenas uma central dosadora do concreto com controle automático da umidade dos agregados, sendo o controle da umidade dos agregados nas centrais dosadoras de concreto efetuado através de ensaios efetuados em laboratório através de amostras coletadas. A coleta destas amostras é determinante para a manutenção da relação a/a, caso se colete uma amostra não representativa da empregada no carregamento do caminhão betoneira poderão ocorrer alterações significativas da relação a/a. Recomenda-se que a amostra de agregado para a realização do ensaio de umidade seja obtida diretamente do material a ser empregado no carregamento de cada caminhão.

A ASTM C94 – *Specification for Ready-Mixed Concrete* contém um guia para a produção de concretos usuais em larga escala, onde inicialmente adiciona-se parte da água e em seguida os materiais sólidos. Os aditivos líquidos são adicionados em conjunto com a parte final da água, que é adicionada após o carregamento de todos os materiais sólidos. Esta seqüência é adotada em grande parte das centrais dosadoras de concreto do Brasil. Para concretos com alta relação a/a e quantidade de água de mistura de aproximadamente 200 kg/m<sup>3</sup> a seqüência de colocação de materiais e o tipo de misturador exercem pouca influência nas características do concreto e no tempo de mistura. Entretanto, para concretos com baixa relação a/a e pequena quantidade de água de mistura estes fatores apresentam grande influência (CHANG & PENG, 2000). Existem estudos os quais indicam a melhor seqüência de colocação de materiais no misturador para se obter maiores resistências à compressão. Porém, a quase totalidade destes é inviável em produção em larga escala, devido aos elevados tempos de mistura necessários. A seqüência de colocação dos materiais no caminhão betoneira deve ser estudada para cada tipo de equipamento e materiais empregados, de modo que se assegure a velocidade ideal de produção e a qualidade e homogeneidade do material produzido (ALMEIDA, 2005).

A adição de superplastificante é uma etapa de grande importância na produção de CAR, segundo Aitcin (2000) existem três correntes de pensamento para o momento da adição do superplastificante:

a) Todo o superplastificante é adicionado de uma só vez na mistura. O controle sobre a quantidade de superplastificante adicionado é maior deste modo, e reduz-se o tempo de mistura. Entretanto a dosagem de superplastificante para se obter o abatimento desejado é ligeiramente maior que em outros métodos.

b) Dois terços do superplastificante são adicionados à mistura no seu início e o último terço no período final de mistura. Este método possivelmente reduz a quantidade total de superplastificante a ser empregado.

c) Parte do superplastificante é adicionada durante a mistura, de modo que o concreto atinja um abatimento de 100 mm na central dosadora de concreto e chegue à obra com pelo menos 50 mm de abatimento. O restante do superplastificante é então adicionado na obra.

Para os dois primeiros métodos, é necessária a redosagem de superplastificante na obra para correção de perdas de abatimento durante o trajeto. Crê-se que o terceiro método seja o mais indicado para a produção de CAR, pois devido ao alto abatimento do concreto, se este for alcançado na central dosadora de concreto possivelmente ocorrerão derramamentos durante o transporte, além de se aumentar o risco da operação de transporte, principalmente quando o caminhão transitar por terrenos irregulares.

Uma das principais dificuldades na produção de CAR é o alto tempo de mistura necessário. Chopin, Larrard e Cazacliu (2004) apontam como o principal causador desta situação as baixas relações a/a. Os autores observaram que quanto menor a relação a/a maior o tempo de mistura necessário. Os pesquisadores observaram que a adição de sílica ativa nos concretos resultou em uma redução na ordem de 40% no tempo de mistura em comparação a concretos sem adição de sílica ativa. Concretos produzidos com sílica ativa pré-misturada ao cimento apresentaram tempos de mistura ligeiramente superiores aos concretos em que foi adicionada a sílica ativa separadamente (figura 5.3).

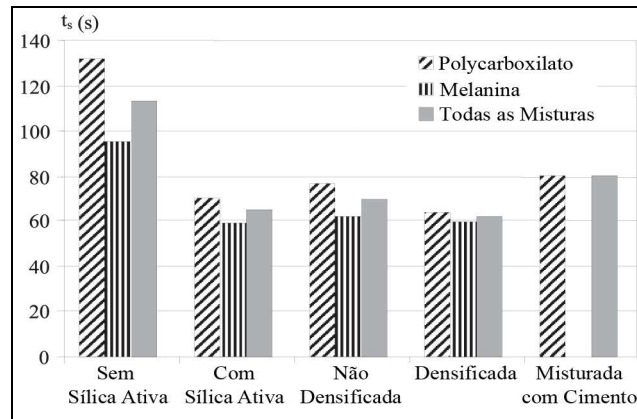


Figura 5.3 – influência da adição de sílica ativa no tempo de mistura do concreto (CHOPIN, LARRARD e CAZALIU, 2004).

Também se percebeu que quanto maior o teor de finos menor o tempo de mistura. Concretos produzidos com melhor empacotamento granulométrico, que obtiveram o maior conteúdo de sólidos para um teor constante de agregados, também apresentaram menores tempos de mistura.

#### 5.4) Transporte e Bombeamento de CAR

O CAR é transportado até as obras nos mesmos equipamentos que os concretos usuais.

Algumas vezes, o CAR produzido em laboratório apresenta aspecto viscoso ou seco que leva ao julgamento precipitado que estes concretos serão inviáveis de serem misturados, e que não há a possibilidade de bombeamento. Porém existem diversos casos bem sucedidos de aplicação de CAR, inclusive com o emprego de bombeamento. O teor de finos de um concreto compõe uma parcela substancial da superfície específica da mistura e da resistência ao atrito. Deste modo, se o teor de finos ultrapassar certos limites, o atrito pode ser de uma grandeza tal que a pressão da bomba de concreto não seja suficiente para impulsionar o concreto na tubulação, causando entupimentos ou sendo necessário o aumento da pressão de bombeamento, o que pode causar danos ao equipamento ou mesmo inviabilizar o bombeamento (ALMEIDA, 2005). A adição de uma pequena quantidade de sílica ativa suplementar entre 1% e 5% da massa de cimento melhora a bombeabilidade do CAR e de concretos usuais (HEWLETT, 1998; AITCIN, 2000).



### 5.5) Controle de Qualidade do Concreto

Os principais parâmetros de controle de qualidade do concreto são a resistência à compressão e a medida de consistência. Apesar de outras características serem críticas conforme a aplicação do material, boa parte das características do concreto estão interligadas à resistência à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Os ensaios de resistência à compressão determinam a conformidade com a especificação e medem a variabilidade do concreto. Como o concreto é um material heterogêneo, suas características estão sujeitas à influência de uma série de variáveis inerentes aos materiais, processos de dosagem e produção. Além destas, os processos de ensaio podem gerar variações nos resultados de resistência à compressão por ocasião da confecção e cura dos CPs, tratamento dos topos e ensaio dos CPs (BOLETIM 25 ABCP, 1990).

Se os ensaios não oferecem segurança quanto aos resultados, não há sentido em se especificar CAR. É essencial para o uso de CAR que os ensaios sejam executados adequadamente (BICLEY, REYELL & READ, 1990 *apud* AITCIN, 2000).

Os processos de ensaio de concretos usuais não se adaptam completamente ao CAR e devem ser adequados para este fim. A preparação dos topos dos CPs tem particular importância nos ensaios de resistência à compressão. O uso de capeamento com pasta de enxofre é extremamente eficaz para concretos usuais, pois devido à alta resistência do enxofre ocorre a ruptura do concreto antes da ruptura do enxofre. Entretanto, para CAR ocorre a ruptura da pasta de enxofre antes da ruptura do concreto (AITCIN, 2000).

A prática mais usual e aparentemente mais precisa para a preparação dos topos de CPs de CAR é hoje a retificação destes através de abrasão mecânica (ALMEIDA, 2005). Aitcin (2000) destaca que na engenharia de rochas o problema de preparação dos topos já foi estudado e resolvido com o processo citado.

Observa-se, no presente trabalho e em estudos efetuados por Mendes (2002) e Freitas (2005), que o processo de retificação de topos apresentou resultados bastante satisfatórios. Comparando-se os trabalhos percebe-se que o equipamento empregado tem grande influência na variabilidade dos resultados obtidos.

Ainda existem outros processos de preparação dos topos possíveis de serem empregados em CAR, como o uso de almofadas de neoprene, o processo da caixa de areia e o uso de capeamento de alta resistência.

O uso de almofadas de neoprene se mostra pouco prático devido ao fato de o uso de cada almofada de neoprene ser limitado a 5 a 10 usos e pela grande dificuldade de resolver problemas de excentricidade. O processo da caixa de areia apresenta resultados bastante semelhantes ao de polimento do topo dos CPs e possui baixo custo de execução (AITCIN, 2000). A empresa de serviços de concretagem responsável pelo fornecimento do concreto para a obra do Edifício Antarctica (Ponta Grossa-PR) empregou este processo obtendo resultados bastante satisfatórios na preparação dos topos de CPs de CAR, sendo o valor de coeficiente de variação médio obtido de 5,8% (CHRISTÓFOLLI, INOUE & FREITAS, 2007).

Compostos de capeamento de alta resistência também podem ser empregados para ensaiar concretos de resistência à compressão de até 130 MPa, desde que os capeamentos tenham espessura inferior a 2 mm e que sejam perfeitamente paralelos. Contudo, o desvio padrão deste processo é significativamente superior ao obtido com o polimento dos topos dos CPs (LASSARD, 1990 *apud* AITCIN, 2000).

Há ainda o processo onde os CPs são confinados em anéis de aço que podem ser reutilizados (AITCIN, 2000), porém este processo ainda é muito pouco utilizado e não será abordado neste trabalho.

Segundo Neville (1997), uma excentricidade entre os eixos dos CPs e da prensa de até 6 mm não afeta a resistência à compressão de concretos usuais. Lassard (1990) *apud* Aitcin (2000) determinou que para CAR a excentricidade máxima para que não se influencie os resultados de resistência à compressão é de 4 mm. Diante do exposto observa-se a grande importância do correto posicionamento do CP na prensa e da perpendicularidade entre as faces dos CPs. A marcação do posicionamento do CP no prato inferior da prensa através de processo de precisão e constante inspeção dos moldes de CPs traz redução significativa de possíveis desvios nos resultados devido à excentricidade, sendo esta prática comum em laboratórios de centrais dosadoras de concreto.

Outro fator de grande importância na determinação da resistência à compressão de CAR é a prensa a ser utilizada no ensaio. A cabeça esférica da prensa deve corrigir, através dos pratos do equipamento, pequenas diferenças entre o paralelismo das faces dos CPs fazendo uma pequena rotação. A cabeça esférica da prensa deve ser própria para as dimensões do CP a ser ensaiado, caso isto não ocorra os valores de resistência à compressão serão afetados. Aitcin (2000) cita uma série de estudos que comprovaram a redução da resistência à compressão quando utilizada prensa com cabeça esférica não própria para a dimensão dos CPs. Nestes ocorreram também alterações no modo de ruptura dos CPs, de ruptura cônica, quando empregada prensa própria para a dimensão do CP, o tipo de ruptura alterou para ruptura através de fissuras verticais quando empregada prensa não adequada. O autor ainda destaca que diferenças significativas observadas nos resultados de resistência à compressão encontradas na literatura podem ser atribuídos ao uso de cabeça esférica incorreta.

A rigidez da prensa também é um ponto de grande atenção, pois uma grande quantidade de energia é instantaneamente liberada no momento da ruptura dos CPs de CAR, devendo a prensa possuir grande massa e estar fortemente ancorada para absorver a energia liberada. O constante uso do equipamento para o ensaio de CAR pode danificá-lo e deixá-lo fora de aferição (AITCIN, 2000).

Os CPs de CAR, na grande maioria das rupturas estilhaçam-se, sendo necessárias medidas de proteção para contenção destes estilhaços.

O procedimento de cura dos CPs de CAR seguem os mesmos empregados para concretos convencionais. Aitcin (2000) indica que há necessidade de se estudar se os processos de cura de CPs de concretos usuais são adequados para CAR. Devido às diferentes características do CAR, o autor sugere que se analise a possibilidade de que os CPs de CAR passem por cura úmida até o momento que se encerra a cura úmida na obra, sendo em seguida envoltos em um envelope fino impermeável e retirados da cura úmida, representando assim mais fielmente a resistência obtida na estrutura. Este procedimento ganha mais relevância quando se empregam idades de dosagem superiores a 28 dias, como por exemplo 91 dias.

O controle tecnológico *in situ* é de grande importância para o ajuste dos estudos de dosagem e da verificação do atendimento às especificações de projeto (ALMEIDA, 2005). O ensaio de abatimento do tronco de cone empregado em concretos usuais é também utilizado para caracterizar o CAR. O uso do *slump test* apresenta algumas dificuldades quando empregado em CAR, pois concretos com relação a/a muito baixa tendem a ser muito coesivos e pegajosos, dificultando até mesmo a retirada do cone. Nestes concretos o cone entra em colapso progressivo e não para de ruir, espalhando-se até mesmo para fora da chapa metálica de base do ensaio. Para estes concretos crê-se que seja possível adaptar métodos de medida de escoamento empregados em concretos usuais ou o uso de ensaios que avaliem as propriedades reológicas do concreto como o ensaio de tronco de cone modificado e o reômetro. Hoje, ainda o ensaio de abatimento do tronco de cone é o método mais empregado (AITCIN, 2000; CASTRO, 2007).

É necessário que os processos de controle tecnológico dos concretos produzidos e aplicados em obra sejam tão eficazes quanto os processos de ensaio em laboratórios de primeira linha, para que assim seja possível utilizar todo o potencial do concreto dosado, e verificar com segurança as características dos concretos produzidos. Os laboratórios das centrais dosadoras de concreto e as empresas de controle tecnológico devem estar completamente preparados para efetuar ensaios em CAR e os processos de ensaio e equipamentos também, não podendo ser admitidas em nenhuma hipótese o uso de equipamentos e/ou práticas não adequadas ou adaptadas.

## 6) ESTUDO EXPERIMENTAL

Apresenta-se neste capítulo a metodologia para a execução do trabalho, as características dos materiais empregados, o planejamento de experimento, os ensaios realizados no concreto e os resultados obtidos.

### 6.1) Materiais Empregados

Para a realização do estudo experimental optou-se pela utilização de materiais empregados pelas empresas de serviço de concretagem da cidade de Curitiba, com o intuito de aplicação prática dos resultados obtidos.

#### 6.1.1) Cimento

Para a confecção dos concretos do estudo escolheu-se o cimento CPV-ARI RS. A grande maioria das empresas de serviço de concretagem da cidade de Curitiba utiliza os cimentos CPIV-RS e CPII-F para a produção de concretos usuais. Entretanto, as empresas que produziram concretos de alta resistência, empregaram na produção destes o cimento CPV-ARI, visto sua maior resistência em comparação com os outros cimentos e sua característica de alta resistência inicial, fator este de grande importância na produção de diversos CAR. O uso deste cimento também minimiza retardamentos de pega, quando do emprego de altas dosagens de aditivo.

Na tabela 6.1, são apresentadas as características do cimento empregado, disponibilizadas pelo fabricante do mesmo. Os resultados correspondem à média do mês de novembro de 2009, quando foi coletado o material empregado. O cimento foi coletado diretamente do silo de uma empresa de serviços de concretagem de Curitiba.

Tabela 6.1- características do cimento empregado (fonte: fabricante).

| ENSAIOS QUÍMICOS - CIMENTO POZOLÂNICO DE ALTA RESIST INICIAL NBR5736/91- 5733/91             |              |                    |       |                                 |               |                     |
|--|--------------|--------------------|-------|---------------------------------|---------------|---------------------|
| ENSAIO QUÍMICOS -RX -MÉTODO DE ENSAIO NBR 14656/01   | NORMA Nº     | UNIDADE            | MÉDIA | Máximo                          | Mínimo        | ESPECIFICAÇÃO NORMA |
| Perda ao Fogo - PF   | NM18/04      | %                  | 3,62  | 3,93                            | 3,39          | <ou=4,5             |
| Óxido de Magnésio - MgO  | NM14/04      | %                  | 5,84  | 6,05                            | 5,47          | <ou=6,5             |
| Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>   | NM16/04      | %                  | 3,12  | 3,33                            | 2,63          | <ou=4,5             |
| Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>   | NM20/04      | %                  | 2,47  | 2,59                            | 2,33          | <ou=3,0             |
| Resíduo Insolúvel - RI   | NM22/05      | %                  | 12,5  | 14,05                           | 10,07         | não aplicável       |
| Equivalente Alcalino em Na <sub>2</sub> O - (0,658 x K <sub>2</sub> O% + Na <sub>2</sub> O%) |              | %                  | 0,74  |                                 |               | não aplicável       |
| ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS  |              |                    |       |                                 |               |                     |
| ENSAIO   | NORMA Nº     | UNIDADE            | MÉDIA | Máximo                          | Mínimo        | ESPECIFICAÇÃO NORMA |
| Área Específica (Blaine)   | NM76/98      | m <sup>2</sup> /Kg | 511   | 530                             | 486           | >OU=300             |
| Massa Específica   | NM23/01      | g/cm <sup>3</sup>  | 3,02  | -                               | -             | não aplicável       |
| Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)  | NBR 11579/91 | %                  | 0,2   | 0,20                            | 0,10          | <ou=6,0             |
| Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)  | NBR 12826/93 | %                  | 1,8   | 2,40                            | 1,30          | não aplicável       |
| Água da Pasta de Consistência Normal   | NM43/02      | %                  | 29,0  | 29,80                           | 28,40         | não aplicável       |
| Início de Pega   | NM65/03      | min                | 194   | 215                             | 180           | >ou=60minut         |
| Fim de Pega  | NM65/03      | min                | 266   | 290                             | 245           | <ou=480minut        |
| Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente   | NBR 11582/91 | mm                 | 0,63  | 1,00                            | 0,50          | <ou=5,0             |
| RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)   |              |                    |       | ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 7215/69 |               |                     |
| Idade (Dias)   | Mínimo       | Máximo             | Média | Desvio                          |               |                     |
| 1  | 22,1         | 24,7               | 23,3  | 0,7                             | >ou=11        |                     |
| 3  | 31,4         | 34,1               | 32,7  | 0,5                             | >ou=24        |                     |
| 7  | 36,3         | 38,8               | 37,3  | 0,6                             | >ou=34        |                     |
| 28   | 46,2         | 48,7               | 48,1  | 0,6                             | não aplicável |                     |

### 6.1.2) Agregados

Optou-se pelo uso de duas areias, uma areia natural proveniente da cidade de Balsa Nova, retirada de cavas, cujas características são apresentadas nas tabelas 6.2 e 6.3 e na figura 6.1, e uma areia industrial obtida pela britagem de calcário, sendo as características deste material apresentadas nas tabelas 6.4 e 6.5 e na figura 6.2.

A mescla de areias foi empregada, pois a maioria das empresas de serviços de concretagem de Curitiba emprega a mescla de areia natural e industrial. Esta composição de areias apresenta desempenho superior em relação ao uso de apenas areia natural quanto ao consumo de cimento em concretos usuais.

Também se destaca o fato de que ocorreram restrições dos órgãos ambientais na região de Curitiba, nos últimos anos, que reduziram significativamente a produção de areias de rio, inviabilizando seu uso em centrais dosadoras de concreto, devido à alta demanda destas por areia.

Tabela 6.2 - resultados de ensaio de granulometria da areia natural.

| PENEIRA<br>( mm ) | PERCENTUAL     |                   |
|-------------------|----------------|-------------------|
|                   | % RETIDO MÉDIO | % ACUMULADO MÉDIO |
| 76                | -              | 0,0               |
| 64                | -              | 0,0               |
| 50                | -              | 0,0               |
| 38                | -              | 0,0               |
| 32                | -              | 0,0               |
| 25                | -              | 0,0               |
| 19                | -              | 0,0               |
| 12,5              | -              | 0,0               |
| 9,5               | -              | 0,0               |
| 6,3               | 0,10           | 0,10              |
| 4,8               | 0,10           | 0,20              |
| 2,4               | 0,60           | 0,80              |
| 1,2               | 7,60           | 8,40              |
| 0,6               | 16,60          | 25,00             |
| 0,3               | 33,90          | 58,90             |
| 0,15              | 32,90          | 91,80             |
| FUNDO             | 8,20           | <b>100%</b>       |
| TOTAL             | 100            |                   |

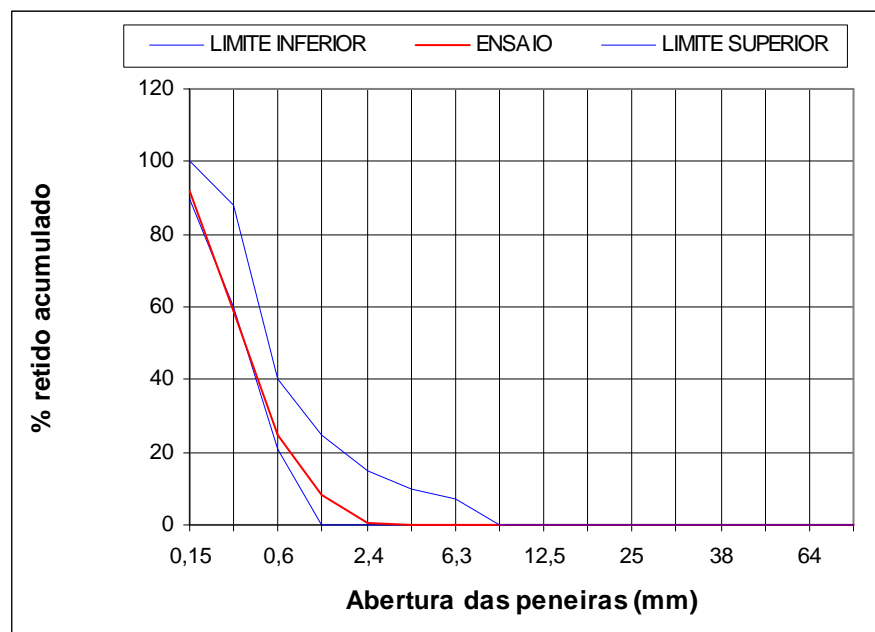


Figura 6.1- resultados de ensaio de granulometria areia natural.

Tabela 6.3 - resultados de ensaios de areia natural.

| Ensaio   | Resultado | Método de Ensaio |
|--|-----------|------------------|
| Dimensão Máxima (mm)                           | 2,4       | NM 248/2001      |
| Módulo de Finura                               | 1,851     | NM 248/2001      |
| Material Pulverulento (%)                      | 2,00      | NM 46/2001       |
| Massa Específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )      | 2,62      | NM 52/2002       |
| Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,61      | NM 52/2002       |
| Massa Unitária Solta (g/cm <sup>3</sup> )      | 1,445     | NM 45/2006       |
| Absorção (%)                                   | 0,37      | NBR 9777/82      |
| Impureza Orgânica (ppm)                        | < 300     | NM 49/2001       |
| Torrões de Argila (1%)                         | 0,1       | NBR 7218/87      |

Tabela 6.4 - resultados de ensaio areia industrial.

| Ensaio   | Resultado | Método de Ensaio |
|--|-----------|------------------|
| Diâmetro Máximo (mm)                           | 4,8       | NM 248/2001      |
| Módulo de Finura                               | 3,084     | NM 248/2001      |
| Material Pulverulento (%)                      | 11,80     | NM 46/2001       |
| Massa Específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )      | 2,73      | NM 52/2002       |
| Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,71      | NM 52/2002       |
| Massa Unitária Solta (g/cm <sup>3</sup> )      | 1,62      | NM 45/2006       |
| Absorção (%)                                   | 0,74      | NBR 9777/82      |

Tabela 6.5 - resultados de ensaio de granulometria da areia industrial.

| PENEIRA<br>( mm ) | PERCENTUAL        |                      |
|-------------------|-------------------|----------------------|
|                   | % RETIDO<br>MÉDIO | % ACUMULADO<br>MÉDIO |
| 76                | -                 | 0,0                  |
| 64                | -                 | 0,0                  |
| 50                | -                 | 0,0                  |
| 38                | -                 | 0,0                  |
| 32                | -                 | 0,0                  |
| 25                | -                 | 0,0                  |
| 19                | -                 | 0,0                  |
| 12,5              | -                 | 0,0                  |
| 9,5               | -                 | 0,0                  |
| 6,3               | -                 | 0,0                  |
| 4,8               | 1,20              | 1,20                 |
| 2,4               | 19,80             | 21,00                |
| 1,2               | 32,30             | 53,30                |
| 0,6               | 15,30             | 68,60                |
| 0,3               | 10,40             | 79,00                |
| 0,15              | 6,30              | 85,30                |
| FUNDO             | 14,70             | <b>100%</b>          |
| TOTAL             | 100               |                      |



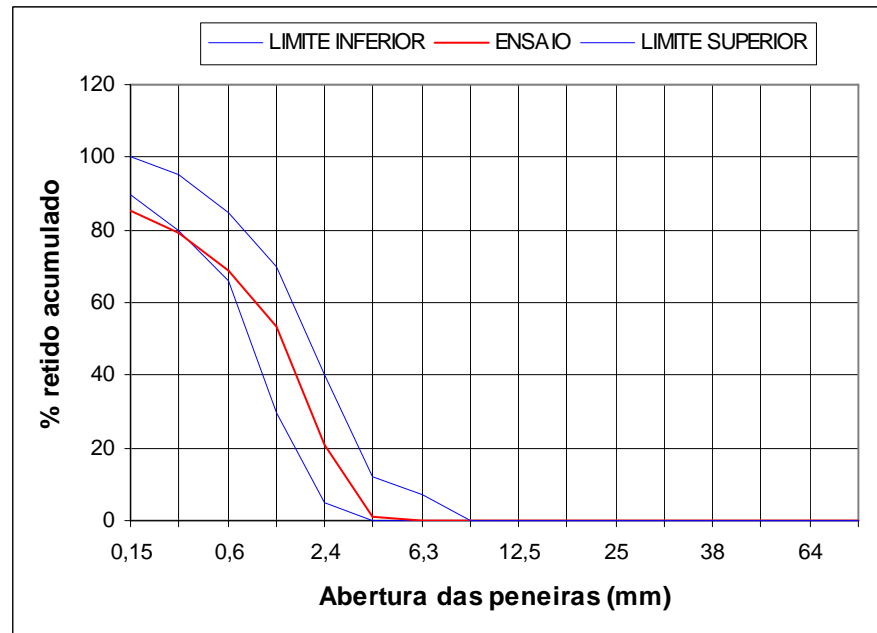


Figura 6.2 - resultados de ensaio de granulometria areia industrial

Ambas as areias enquadram-se na classificação de zona utilizável conforme a NBR 7211/2005 – Agregados para Concreto – Especificação. Para se encontrar a composição ideal das areias, efetuou-se a determinação do índice de vazios para diferentes composições, optando-se pela mistura que produziu o menor índice de vazios. Devido à diferença de massa específica entre as areias não é possível determinar a melhor composição pela massa unitária máxima, fazendo-se necessária a determinação do menor índice de vazios, conforme apresentado na tabela 6.6.

Tabela 6.6 - análise do índice de vazios da composição de areia.

| Teores %         |               | Índice de Vazios Médio |
|------------------|---------------|------------------------|
| Areia Industrial | Areia Natural |                        |
| 100              | 0             | 17,6%                  |
| 90               | 10            | 17,1%                  |
| 80               | 20            | 16,8%                  |
| 70               | 30            | 16,6%                  |
| 60               | 40            | 16,4%                  |
| 50               | 50            | 16,9%                  |
| 40               | 60            | 17,6%                  |
| 30               | 70            | 18,6%                  |
| 20               | 80            | 19,8%                  |
| 10               | 90            | 21,0%                  |
| 0                | 100           | 22,2%                  |

Diante dos resultados expostos adotou-se a composição de 60% de areia artificial e 40% de areia natural. O módulo de finura da composição das areias é de 2,344 e o diâmetro máximo característico é de 4,8 mm. Classifica-se a mescla das areias segundo a NBR 7211/2005 – Agregados para Concreto – Especificação como zona ótima, a granulometria da mescla de areias é apresentada na tabela 6.7 e na figura 6.3.

Tabela 6.7 - resultados de ensaio de granulometria composição 60% areia industrial e 40% de areia natural.

| PENEIRA<br>( mm ) | PERCENTUAL     |                   |
|-------------------|----------------|-------------------|
|                   | % RETIDO MÉDIO | % ACUMULADO MÉDIO |
| 76                | -              | 0,0               |
| 64                | -              | 0,0               |
| 50                | -              | 0,0               |
| 38                | -              | 0,0               |
| 32                | -              | 0,0               |
| 25                | -              | 0,0               |
| 19                | -              | 0,0               |
| 12,5              | -              | 0,0               |
| 9,5               | -              | 0,0               |
| 6,3               | 0,06           | 6,30              |
| 4,8               | 0,54           | 11,10             |
| 2,4               | 8,28           | 13,50             |
| 1,2               | 17,48          | 14,70             |
| 0,6               | 16,08          | 15,30             |
| 0,3               | 24,50          | 15,60             |
| 0,15              | 22,26          | 15,75             |
| FUNDO             | 10,80          | <b>100%</b>       |
| TOTAL             | 100            |                   |

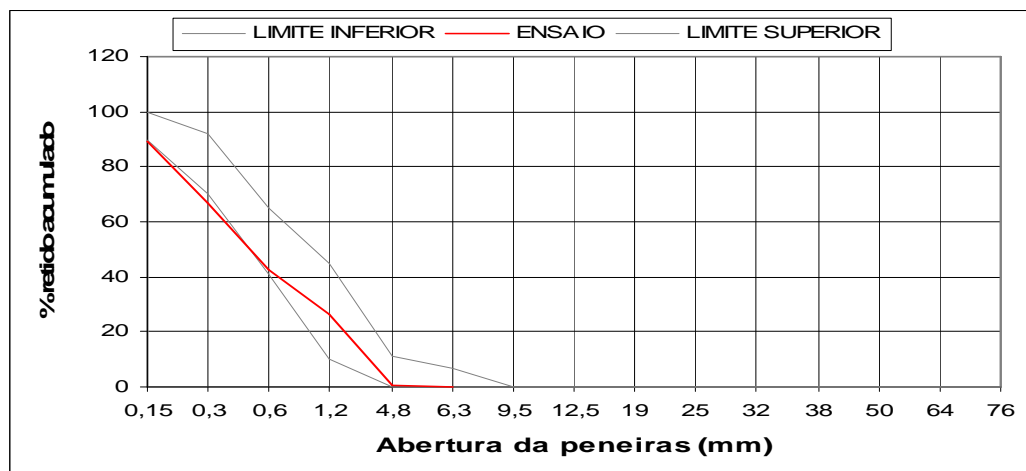


Figura 6.3 - resultados de ensaio de granulometria mescla 60% areia industrial e 40% de areia natural.

Empregou-se para a produção dos concretos brita 0 (4,75/12,5) oriunda da britagem de calcário, cujas características são apresentadas nas tabelas 6.8 e 6.9 e na figura 6.4. Esta escolha deveu-se ao fato de grande parte das concreteiras locais empregarem hoje este tipo de material. Mendes (2002) obteve melhores resultados para a produção de concretos de alta resistência com amostras de granito, sendo também este material empregado por Freitas (2005). Apesar dos melhores resultados obtidos com granito, considerou-se que é de extrema dificuldade uma empresa de serviços de concretagem alterar o tipo de brita empregado na produção de concretos usuais para a produção de concretos especiais, pelas dificuldades logísticas e produtivas. Caso o autor empregasse granito com o intuito de obter melhores resultados, reduziria o caráter prático deste trabalho.

Diferente do estudado por Mendes (2002) e Freitas (2005), o autor utilizou brita 0 (4,75/12,5) ao invés de brita 1 (9,5/25). Esta escolha deveu-se ao fato de que em CAR obtêm-se concretos onde, em alguns casos, a ruptura se dá no agregado ao invés da zona de transição. Quanto menor o agregado menor a possibilidade de ocorrer a ruptura devido a menor existência de defeitos no agregado (AITCIN, 2000).

Tabela 6.8 - resultados do ensaio de granulometria da brita 0 (4,75/12,5).

| PENEIRA<br>( mm ) | PERCENTUAL        |                      |
|-------------------|-------------------|----------------------|
|                   | % RETIDO<br>MÉDIO | % ACUMULADO<br>MÉDIO |
| 76                | -                 | 0,0                  |
| 64                | -                 | 0,0                  |
| 50                | -                 | 0,0                  |
| 38                | -                 | 0,0                  |
| 32                | -                 | 0,0                  |
| 25                | -                 | 0,0                  |
| 19                | -                 | 0,0                  |
| 12,5              | -                 | 0,0                  |
| 9,5               | 5,1               | 5,1                  |
| 6,3               | 46,2              | 51,3                 |
| 4,8               | 29,28             | 80,56                |
| 2,4               | 16,64             | 97,20                |
| 1,2               | 0,44              | 97,64                |
| 0,6               | 0,06              | 97,70                |
| 0,3               | 0,08              | 97,78                |
| 0,15              | 0,14              | 97,92                |
| FUNDO             | 2,08              | <b>100%</b>          |
| TOTAL             | 100               |                      |

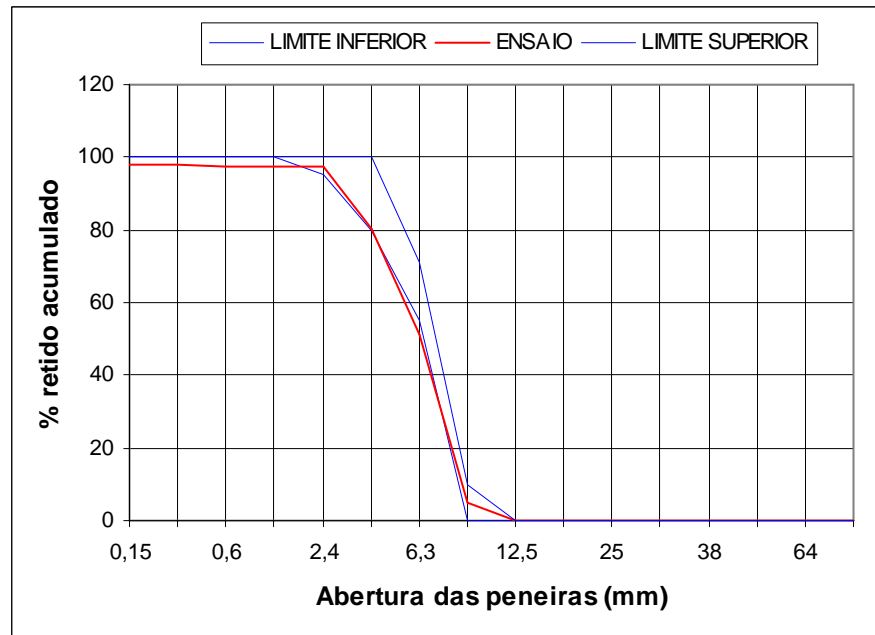


Figura 6.4 - resultados de ensaio de granulometria da brita classificação 0 (4,74/12,5).

Tabela 6.9 - resultados de ensaio brita 0 (4,75/12,5).

| Ensaio                                     | Resultado | Método de Ensaio |
|--|-----------|------------------|
| Diâmetro Máximo (mm)                       | 12,5      | NM 248/2001      |
| Módulo de Finura                           | 5,739     | NM 248/2001      |
| Material Pulverulento (%)                  | 2,50      | NM 46/2001       |
| Massa Específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )  | 2,73      | NM 53/2009       |
| Massa Específica Seca (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,74      | NM 53/2009       |
| Massa Unitária Solta (g/cm <sup>3</sup> )  | 1,49      | NM 45/2006       |
| Absorção (%)                               | 0,37      | NM 53/2009       |

### 6.1.3) Sílica Ativa

Dentre as opções de adições minerais disponíveis para a produção de concretos de alta resistência, optou-se pelo uso da sílica ativa devido a vários fatores: fácil obtenção deste material em caráter de produção industrial, pelas indicações constantes na literatura e pelo fato das dissertações anteriores efetuadas no PPGCC da UFPR por Mendes (2002) e Freitas (2005) terem empregado este material, podendo-se assim efetuar comparações entre os resultados obtidos e os descritos nos citados trabalhos. As características do material empregado fornecidas pelo fabricante são apresentadas na tabela 6.10.

Tabela 6.10 - características sílica ativa (fonte: fabricante).

| <b>Características Físicas e Químicas</b> |                            |
|---|----------------------------|
| Massa específica                          | 2.220 kg/m <sup>3</sup>    |
| Teor de SiO <sub>2</sub>                  | > 90%                      |
| Superfície específica (B.E.T.)            | ~19.000 m <sup>2</sup> /kg |
| Formato da partícula                      | Esférico                   |
| Diâmetro médio da partícula               | 0,20 µm                    |
| <b>Massa Unitária</b>                     |                            |
| Não densificado                           | < 350 kg/m <sup>3</sup>    |
| Densificada                               | > 350 kg/m <sup>3</sup>    |

#### 6.1.4) Aditivo Super-plastificante

Para a realização do experimento, foi utilizado um aditivo superplastificante de terceira geração à base de policarboxilato. Este aditivo possui uma formulação específica para minimizar retardamentos de pega quando empregado em altas dosagens.

Com o emprego do método do Funil de Marsh, determinou-se o ponto de saturação do aditivo e verificou-se a compatibilidade cimento/aditivo. Empregou-se um único teor de sílica ativa e uma única relação água/aglomerante na execução do ensaio.

Observou-se que há compatibilidade entre o cimento e o aditivo e determinou-se o ponto de saturação do aditivo como 0,4% em teor de sólidos do aditivo em relação à massa de aglomerante, conforme mostrado na figura 6.5.

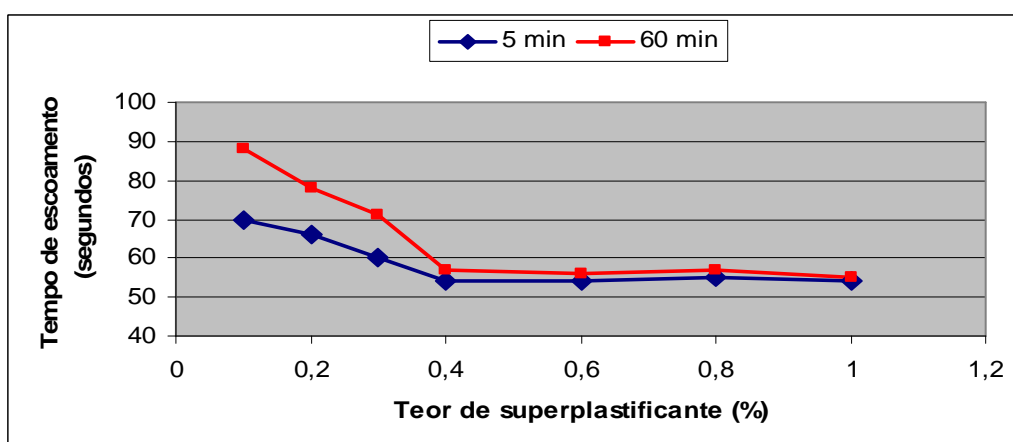


Figura 6.5 - verificação do ponto de saturação do aditivo, método do Funil de Marsh.

## 6.2) Planejamento de Experimento

### 6.2.1) Definição do Experimento

O experimento foi projetado buscando-se analisar a influência de diferentes teores de sílica ativa em substituição ao cimento, na produção de CAR em centrais dosadoras de concreto. Os elementos de estudo foram definidos de maneira que as conclusões obtidas fossem relacionadas todas à produção industrial de CAR, mantendo-se assim o caráter de aplicação prática dos resultados.

Definiu-se inicialmente que seriam elaborados concretos em seis níveis de resistência com quatro teores distintos de sílica ativa, em substituição ao cimento: 3%, 6%, 9% e 12%.

Os teores indicados foram escolhidos, pois compreendem-se dentro ou próximos ao intervalo de valores que proporcionam os resultados mais significantes quanto ao ganho de resistência à compressão e situam-se dentro das faixas empregadas em produção industrial.

Em virtude de o método de dosagem de Mehta & Aitcin (1990) ter apresentado custos menores de matéria-prima nos trabalhos de Freitas (2005) e Alves (2000), pela grande facilidade de aplicação do método com resultados bastante significativos e por experiências anteriores do autor com este método, optou-se por seu emprego nos trabalhos desta dissertação. Apesar do método Aitcin (2000) produzir concretos com menores consumos de cimento, não se optou pelo uso deste, pois na fase de pré-testes os concretos produzidos apresentaram elevada coesão o que considerou-se dificultar substancialmente a sua aplicação.

Inicialmente, definiu-se o emprego de cinco faixas de resistência como prescrito pelo método Mehta & Aitcin (1990), mais a faixa A1 adaptada e empregada por Freitas (2005), conforme a tabela 6.11:

Tabela 6.11 - faixas de resistência esperada método (MEHTA &amp; AITCIN,1990; FREITAS, 2005).

| Classe | Faixa de Resistência Esperada (MPa) |
|--------|-------------------------------------|
| A1     | 50                                  |
| A      | 65                                  |
| B      | 75                                  |
| C      | 90                                  |
| D      | 105                                 |
| E      | 120                                 |

Durante a realização dos trabalhos, observou-se que os concretos produzidos na classe E não apresentaram diferenças de resistência à compressão entre as misturas com diferentes teores de sílica ativa. Crê-se que estes concretos apresentaram uma zona de transição com resistência superior à resistência do agregado, ocorrendo a ruptura dos concretos na fase agregado. Deste modo, descartou-se a mesma, pois não contribuiria de maneira integral ao objetivo deste trabalho.

Para cada faixa de resistência e teor de sílica ativa decidiu-se moldar nove corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm para ruptura em 3, 7 e 28 dias de idade, conforme tabela 6.12:

Tabela 6.12 - definição dos CPs a serem moldados.

| Faixa de Resistência | TEOR DE SÍLICA ATIVA |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 3%                   |       |       | 6%    |       |       | 9%    |       |       | 12%   |       |       |
|                      | Idade                |       |       | Idade |       |       | Idade |       |       | Idade |       |       |
|                      | 3D                   | 7D    | 28D   | 3D    | 7D    | 28D   | 3D    | 7D    | 28D   | 3D    | 7D    | 28D   |
| A1                   | 3 CPs                | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs |
| A                    | 3 CPs                | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs |
| B                    | 3 CPs                | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs |
| C                    | 3 CPs                | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs |
| D                    | 3 CPs                | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs | 3 CPs |

Para validação dos resultados obtidos optou-se por efetuar o experimento e mais uma repetição do mesmo, moldando-se no total 360 corpos-de-prova.

### 6.2.2) Projeto de Experimento

Devido a suas características o experimento trata-se de um projeto tipo fatorial de dois fatores cruzados 5x4.

Quando um experimento envolve dois ou mais fatores, se todas as combinações de níveis de fatores são investigadas então se tem um projeto fatorial. O efeito de um fator é determinado com a sua alteração e análise da variável de resposta. Quando se analisa todas as combinações dos fatores, pode-se determinar a interação entre os mesmos e tem-se um projeto fatorial cruzado. Os experimentos fatoriais de dois fatores envolvem “a” níveis para o fator A e “b” níveis para o fator B, cada repetição completa envolve “ab” testes, distribuídos conforme a tabela 6.13 (RIBEIRO & CATEN, 2001).

Tabela 6.13 - experimento fatorial com dois fatores (MONTGOMERY, 2005).

|            |   | FATOR B             |                     |     |                     |
|------------|---|---------------------|---------------------|-----|---------------------|
|            |   | 1                   | 2                   | ... | b                   |
| FATOR<br>A | 1 | Y111, Y112,<br>Y11n | Y121, Y122,<br>Y12n | ... | Y1b1, Y1b2,<br>Y1bn |
|            | 2 | Y211, Y212,<br>Y21n | Y221, Y222,<br>Y22n |     | :                   |
|            | : | :                   |                     |     | :                   |
|            | a | Ya11, Ya12,<br>Ya1n | ...                 | ... | Yab1, Yab2,<br>Yabn |

O modelo de regressão de um experimento tipo fatorial de dois fatores pode ser representado pela equação:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (1)$$

Onde  $y$  é a variável de resposta, os parâmetros  $\beta$  são determinados conforme os dados do modelo,  $x_1$  é a variável que representa o fator A,  $x_2$  é a variável que representa o fator B,  $x_1 x_2$  representa a interação entre os fatores A e B e  $\epsilon$  representa o erro aleatório (MONTGOMERY, 2005).

As hipóteses a serem testadas em um projeto fatorial de dois fatores são (RIBEIRO & CATEN, 2001):



Para o fator A:  $H_0: \beta_1 = 0$   
 $H_1: \beta_1 \neq 0$  para algum i

Para o fator B:  $H_0: \beta_2 = 0$   
 $H_1: \beta_2 \neq 0$  para algum j

Para interação AB:  $H_0: \beta_1\beta_2 = 0$   
 $H_1: \beta_1\beta_2 \neq 0$  para algum ij

A verificação das hipóteses é efetuada através da análise de variância com o uso da tabela ANOVA, conforme a tabela 6.14.

Tabela 6.14 – tabela Anova para experimento fatorial com dois fatores (MONTGOMERY, 2005).

| Fonte de variação | Somas de quadrados  | $gl$         | Quadrados médios                          | Razão f                         |
|-------------------|---|--------------|---|---------------------------------|
| Fator A           | $SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{N}$                    | $a-1$        | $QM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}$                | $f = \frac{QM_A}{QM_{Erro}}$    |
| Fator B           | $SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{N}$                    | $b-1$        | $QM_B = \frac{SQ_B}{gl_B}$                | $f = \frac{QM_B}{QM_{Erro}}$    |
| Interação A*B     | $SQ_{AB} = SQ_{Subtot} - SQ_A - SQ_B$   | $(a-1)(b-1)$ | $QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{gl_{AB}}$       | $f = \frac{QM_{AB}}{QM_{Erro}}$ |
| Erro              | $SQ_{Erro} = SQ_{Tot} - SQ_{Subtot}$  | $ab(n-1)$    | $QM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{gl_{Erro}}$ |                                 |
| Total             | $SQ_{Tot} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{N}$ | $N-1$        |   |                                 |

Verifica-se a significância dos fatores ou de sua interação dividindo a média quadrada do grupo em análise pela média quadrada dos erros, deste modo se obtêm o fator F que é comparado ao fator F tabelado pela distribuição de Fischer-Snedcor, que é determinado usando:

$$F_{\alpha, k-1, N-K}$$

Onde:

$\alpha$  = nível de significância

$k-1$  = graus de liberdade do numerador

$N-K$  = graus de liberdade do denominador

A hipótese nula será rejeitada sempre que F calculado for maior que o valor tabelado  $F_{\alpha, k-1, N-K}$ , havendo assim diferença significativa entre os grupos (RIBEIRO & CATEN, 2001).

Devido à grande quantidade de traços a serem rodados, tornou-se impossível efetuar todo o experimento em apenas um dia, logo foi necessário fracioná-lo. Para evitar a influência de possíveis fatores externos entre os traços com diferentes teores de sílica ativa a serem comparados, optou-se por rodar sempre no mesmo dia quatro traços, de mesma classe de resistência, sendo necessários dez dias para se completar o experimento. Definiu-se aleatoriamente a seqüência de traços a serem rodados (tabela 6.15).

Tabela 6.15 - dia da elaboração dos traços.

| <b>FAIXA DE RESISTÊNCIA</b> | <b>3%</b> | <b>6%</b> | <b>9%</b> | <b>12%</b> |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>A1</b>                   | 3 – 6     | 3 – 6     | 3 – 6     | 3 – 6      |
| <b>A</b>                    | 2 – 7     | 2 – 7     | 2 – 7     | 2 – 7      |
| <b>B</b>                    | 4 – 9     | 4 – 9     | 4 – 9     | 4 – 9      |
| <b>C</b>                    | 5 – 10    | 5 – 10    | 5 – 10    | 5 – 10     |
| <b>D</b>                    | 1 - 8     | 1 - 8     | 1 - 8     | 1 - 8      |

Para o experimento definiu-se os seguintes fatores controláveis:

- a) Faixa de resistência;
- b) Teor de sílica ativa;
- c) Tipo de preparação de topo dos CPs;
- d) Tipo de molde;
- e) Idade dos CPs;
- f) Dosagem dos concretos.

A variável de resposta foi a resistência à compressão em três idades distintas 3, 7 e 28 dias.

Identificaram-se também possíveis fatores de ruído do experimento:

- a) Cansaço da equipe;
- b) Desvios na moldagem dos CPs;
- c) Efeitos da preparação dos topos dos CPs;
- d) Alterações nas características dos materiais;
- e) Temperatura ambiente.

### 6.2.3) Dosagem dos Concretos

Através do método Mehta & Aitcin (1990), efetuaram-se os cálculos de dosagem dos concretos a serem produzidos, conforme apresentado na tabela 6.16. A sílica ativa foi adicionada em substituição em peso à quantidade de cimento.

As quantidades de superplastificante foram determinadas experimentalmente durante a produção dos concretos. Adicionou-se superplastificante até que o concreto atingisse o abatimento desejado de  $200 \pm 30$  mm.

Tabela 6.16 - quantitativos dos concretos produzidos em Kg.

| Traço | Teor de Sílica Ativa | Relação água / aglomerante | CPV RS | Sílica Ativa | Areia Natural | Areia Artificial | Brita 0 | Aditivo | Água | Densidade |
|-------|----------------------|----------------------------|--------|--------------|---------------|------------------|---------|---------|------|-----------|
| A1    | 3%                   | 0,452                      | 407    | 13           | 279           | 437              | 1047    | 2,94    | 190  | 2374      |
|       | 6%                   | 0,457                      | 391    | 25           | 279           | 437              | 1047    | 2,91    | 190  | 2370      |
|       | 9%                   | 0,460                      | 376    | 37           | 279           | 437              | 1047    | 2,89    | 190  | 2367      |
|       | 12%                  | 0,465                      | 360    | 49           | 279           | 437              | 1047    | 3,07    | 190  | 2363      |
| A     | 3%                   | 0,377                      | 450    | 14           | 272           | 426              | 1065    | 4,64    | 175  | 2403      |
|       | 6%                   | 0,380                      | 433    | 28           | 272           | 426              | 1065    | 4,61    | 175  | 2400      |
|       | 9%                   | 0,383                      | 416    | 41           | 272           | 426              | 1065    | 4,80    | 175  | 2397      |
|       | 12%                  | 0,386                      | 399    | 54           | 272           | 426              | 1065    | 4,98    | 175  | 2392      |
| B     | 3%                   | 0,314                      | 494    | 15           | 266           | 415              | 1082    | 6,11    | 160  | 2434      |
|       | 6%                   | 0,317                      | 475    | 30           | 266           | 415              | 1082    | 6,57    | 160  | 2431      |
|       | 9%                   | 0,319                      | 456    | 45           | 266           | 415              | 1082    | 7,01    | 160  | 2427      |
|       | 12%                  | 0,322                      | 437    | 60           | 266           | 415              | 1082    | 7,46    | 160  | 2423      |
| C     | 3%                   | 0,262                      | 537    | 16           | 259           | 405              | 1100    | 11,06   | 145  | 2466      |
|       | 6%                   | 0,264                      | 517    | 33           | 259           | 405              | 1100    | 11,55   | 145  | 2463      |
|       | 9%                   | 0,266                      | 496    | 49           | 259           | 405              | 1100    | 11,99   | 145  | 2458      |
|       | 12%                  | 0,268                      | 476    | 65           | 259           | 405              | 1100    | 12,98   | 145  | 2454      |
| D     | 3%                   | 0,232                      | 566    | 17           | 252           | 394              | 1118    | 17,49   | 135  | 2488      |
|       | 6%                   | 0,234                      | 544    | 34           | 252           | 394              | 1118    | 17,92   | 135  | 2483      |
|       | 9%                   | 0,235                      | 524    | 51           | 252           | 394              | 1118    | 18,98   | 135  | 2480      |
|       | 12%                  | 0,237                      | 501    | 68           | 252           | 394              | 1118    | 19,92   | 135  | 2475      |

Devido a arredondamentos efetuados durante os cálculos de dosagem e a diferenças na massa total de aglomerante dos traços, a relação a/a dos traços de mesmo padrão (A1, A, B, C e D) apresentou pequenas diferenças. As diferentes quantidades de sílica ativa empregadas nos concretos de mesmo padrão fazem com que a massa total de aglomerante seja inferior nos traços com maior quantidade de sílica ativa para que o volume total de pasta permaneça o mesmo, pois a sílica ativa possui menor massa específica que o cimento.

Com o intuito de facilitar os processos de cálculo e de representação gráfica dos resultados, adotou-se uma relação a/a única para cada tipo de traço, sendo esta a média das relações a/a de cada padrão de concreto (A1, A, B, C e D). As diferenças entre as relações a/a obtidas e as adotadas (tabela 6.17) foram inferiores a 0,005 na quase totalidade das misturas, somado ao fato que a relação a/a em volume permanece a mesma para todos os traços de mesmo padrão, pode-se afirmar que a simplificação empregada não influencia as análises efetuadas.

Tabela 6.17 - relação a/a adotados.

| Traço | Relação<br>água /<br>aglomerante<br>média |
|-------|---|
| A1    | 0,458                                     |
| A     | 0,382                                     |
| B     | 0,318                                     |
| C     | 0,265                                     |
| D     | 0,234                                     |

#### 6.2.4) Preparação da equipe e pré-testes

Antes da realização do experimento principal se efetuou um treinamento com os técnicos de laboratório que atuaram na realização do experimento, devido às particularidades dos concretos de alta resistência, que os diferenciam dos concretos usuais.

Após a instrução teórica da equipe, foram realizados pré-testes, onde se produziu concretos de alta resistência para familiarizar a equipe de laboratório com os processos de mistura, moldagem, preparação de topos e ruptura de concretos de alta resistência.

Com os pré-testes efetuados pode-se verificar ainda os desvios obtidos com os processos de moldagem e retificação dos CPs e corrigir eventuais falhas.

Esta etapa do trabalho foi de grande importância para a obtenção de resultados consistentes.

### 6.2.5) Calorimetria

A hidratação dos materiais cimentícios no concreto é resultado de uma soma de reações químicas exotérmicas. O acompanhamento da hidratação pode ser medido pela variação de temperatura. A hidratação do cimento Portland pode ser definida em cinco estágios descritos a seguir e apresentados na figura 6.6 (BENINI, 2008).

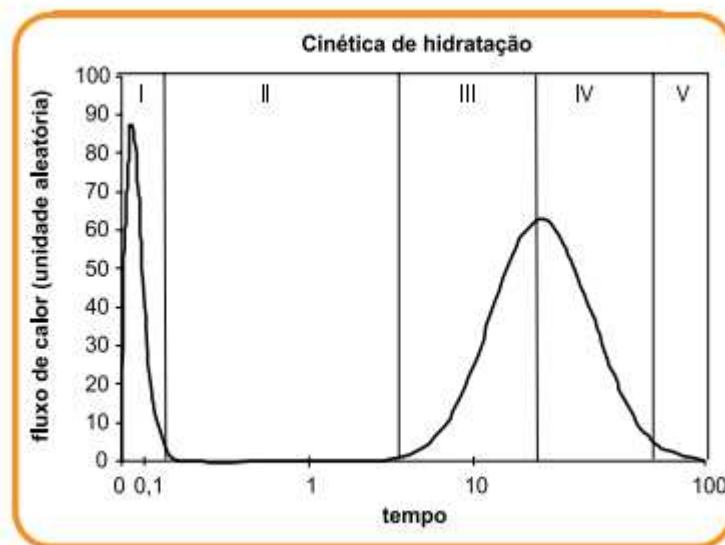


Figura 6.6 - curva de calor de hidratação x tempo (BENINI, 2008).

a) Estágio I Pré-indução: este estágio dificilmente é medido por calorimetria, pois ocorre em um período muito curto, imediatamente após o contato do cimento com a água. Uma rápida dissolução iônica de íons de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  presente no cimento solubiliza completamente nos primeiros segundos com formação conjunta dos primeiros hidratos. O cimento é dissolvido e reage com os íons de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  presentes na fase líquida, formando etringita, que também se precipita na superfície da partícula do cimento, observa-se assim uma rápida elevação da temperatura;

b) Estágio II Período de indução / dormência: este estágio corresponde ao estado fresco do concreto e a curva de liberação é praticamente nula. A dissolução de íons continua com o tempo e à medida que a concentração de  $\text{C}_3\text{S}$  aumenta, vai-se encerrando o período de dormência e iniciando o estágio III;

c) Estágio III Período de Aceleração: neste período vários hidratos atingem a condição de supersaturação, o progresso da hidratação é acelerado e torna-se controlado pela nucleação e crescimento dos produtos de hidratação. Ocorre a rápida formação de C-H e C-S-H. O ponto de liberação máxima de calor corresponde aproximadamente ao término da pega.

d) Estágios IV e V Período de pós-aceleração: nestes estágios a taxa de hidratação diminui gradualmente, reduzindo assim o fluxo de calor gradualmente.

Estes estágios podem ser monitorados através do fluxo de calor em testes de calorimetria. Os testes podem ser efetuados de maneira isotérmica, onde o fluxo de calor é medido enquanto a amostra e o ambiente permanecem em temperatura controlada, ou de maneira adiabática onde a amostra é mantida em um ambiente em condição de isolamento térmico, onde as perdas de calor para o ambiente são mínimas. Obter-se um equipamento perfeitamente adiabático é bastante trabalhoso e de alto custo inviabilizando seu uso comercial, sendo o emprego de calorímetros semi-adiabáticos (figura 6.7) bastante usual em testes de laboratório e campo com resultados bastante eficazes (LANGAN, WANG & WARD 2002, PRUDENCIO JR, 2006; BENINI, 2008).



Figura 6.7 - calorímetro semi-adiabático.

Com o intuito de analisar os tempos de pega e calor de hidratação dos concretos estudados optou-se em efetuar o ensaio de calorimetria em calorímetro semi adiabático. Estes estudos subsidiam análises térmicas, pois devido aos grandes consumos de cimento, estas são importantes para evitar fissuração que diminui a durabilidade e também servem de orientação para os processos de cura.

Como a dissertação discorre sobre a aplicação real deste tipo de material, esta análise torna-se importante.

No total, deveriam ser ensaiados 20 traços de concreto. Devido à disponibilidade e características do equipamento e devido ao grande número de concretos a serem produzidos e ao tempo de execução dos ensaios, tornou-se inviável efetuar os estudos em concreto.

Optou-se em efetuar o ensaio em pasta de aglomerante para que fosse possível ensaiar todas as misturas estudadas, dentro do tempo de disponibilidade do equipamento. As pastas foram confeccionadas com a mesma relação a/a, teores de sílica ativa e teor de aditivo superplastificante empregados nos concretos produzidos. Apesar da dispersão de calor na presença de agregados ser diferente em relação à observada na pasta de cimento, o estudo em pasta apresenta boa correlação aos concretos produzidos.

### 6.3) Execução do Experimento

Concluída a fase de preparação, iniciou-se a execução do experimento. Para todos os concretos produzidos foram seguidos os seguintes procedimentos durante sua confecção:

- a) descontou-se a água presente nos agregados miúdos e graúdos e no aditivo da quantidade total de água do traço;
- b) a betoneira foi imprimada antes do início da execução dos concretos para evitar a perda de materiais por aderência às paredes internas da mesma;
- c) para cada betonada foram moldados nove corpos de prova, sendo empregados 3 CPs para cada idade de rompimento;
- d) o abatimento final do concreto foi sempre de 200 mm  $\pm$  30 mm;
- e) o tempo de mistura mínimo foi de 10 minutos. Quando o concreto não atingiu o abatimento esperado em 10 minutos o material permaneceu em processo de mistura até que atingisse o abatimento desejado;
- f) em cada dia de trabalho foram rodados quatro traços.

Utilizaram-se moldes com tampa para a confecção dos CPs que auxiliaram na redução da evaporação da água.

Após moldagem os CPs foram colocados em cura em um tanque (figura 6.8) com água saturada com cal à temperatura constante e controlada de 23° C. Para evitar regiões com diferença de temperatura no tanque, bombas fazem a circulação da água.



Figura 6.8 - tanque de cura.

Mendes (2002) adaptou um torno mecânico para efetuar a preparação dos topos dos CPs de seu estudo, como apresentado nas figuras 6.9 e 6.10.



Figuras 6.9 e 6.10 - torno mecânico adaptado para a preparação de topos dos CPs (fonte: Mendes, 2002).

Quando da realização do estudo de Freitas (2005) este equipamento não estava disponível e foi empregado um disco de corte (figura 6.11) com posterior capeamento dos CPs com uma camada de enxofre de no máximo 2 mm de espessura.





Figura 6.11 - disco de corte empregado na preparação de topos dos CPs (fonte: Freitas, 2005).

Observa-se que Mendes (2002) obteve resultados melhores que Freitas (2005) quanto aos desvios de ensaio. O presente trabalho apresentou processo de preparação de topos que mais se assemelhou ao empregado por Mendes (2002).

Empregou-se uma retífica de CPs (figuras 6.12 e 6.13), desenvolvida exclusivamente para este uso, a qual é usada na preparação do topo de CPs de uma central dosadora de concreto da cidade de Curitiba. O equipamento antes do início do experimento foi ajustado e aferido. Coincidentemente pouco antes do início da realização do experimento o disco de retífica do equipamento foi substituído por um novo.



Figura 6.12 - retífica empregada para preparação de topos de CPs.



Figura 6.13 - retífica empregada para preparação de topos de CPs.

Após a preparação do topo dos CPs, verificou-se a ocorrência de possíveis desvios de nível dos mesmos através do uso de um nível de bolha e desvios de perpendicularidade através do uso de um esquadro.

Com o auxílio de um extensômetro verificamos os desvios nos corpos de prova. Zerou-se o extensômetro em um ponto central do corpo de prova e em seguida movimentou-se o mesmo ao longo do topo do CP, observando se ocorria algum desvio superior à 2 mm, conforme apresentado na figura 6.14. Não foram encontrados desvios superiores ao indicado.



Figura 6.14 - extensômetro usado para verificação do topo dos CPs.

Como complemento às verificações efetuadas, realizou-se um teste bastante simples, mas de resultado bastante eficiente. Colocou-se uma régua metálica sobre o topo do CP e atrás da mesma posicionou-se uma lanterna de um *led*. Caso houvesse desvios no topo do CP a luz apareceria sob a régua, como apresentado na figura 6.15. Novamente nenhum CP apresentou defeito significativo neste teste.

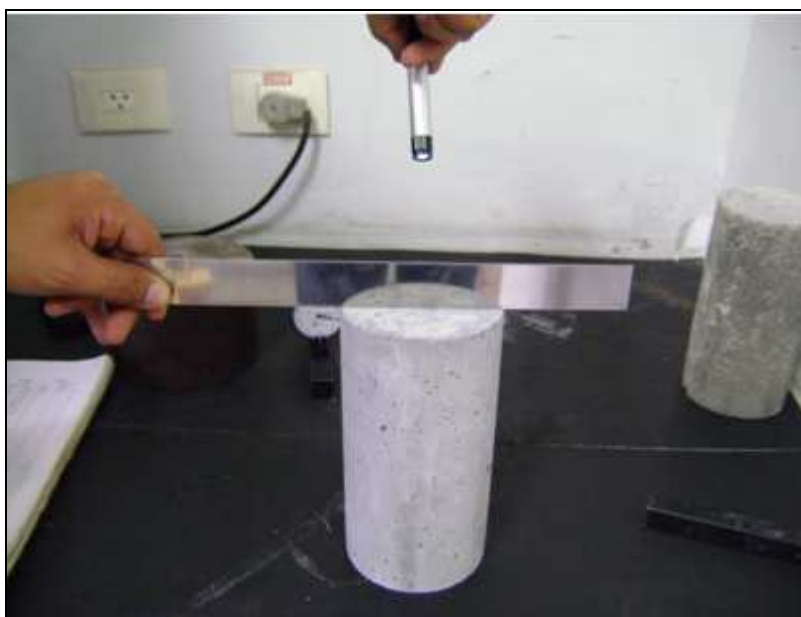


Figura 6.15 - verificação do topo dos CPs.

Os quatro testes foram efetuados nos dois topos de todos os CPs e serviram como aprovação do processo de preparação dos topos, mostrando serem eficazes para a aplicação em larga escala quando da produção industrial de concreto. O profissional que efetuou a verificação não foi o responsável pela retificação dos CPs. A ruptura dos CPs foi efetuada em prensa hidráulica com capacidade para 200 tf de carga (figura 6.16). Por medida de segurança os CPs foram envoltos em uma camada de filme plástico e foi utilizada uma proteção de borracha em torno dos mesmos para evitar que possíveis estilhaços ferissem alguma pessoa ou danificassem o equipamento. Estes processos não restringiram deformações dos CPs, não influenciado assim os resultados obtidos.



Figura 6.16 - prensa utilizada para ruptura dos CPs.

#### 6.4) Resultados

A seguir nas tabelas 6.18, 6.19 e 6.20 são apresentados os resultados de resistência à compressão, em MPa, obtidos aos 3, 7 e 28 dias de idade no estudo experimental. Calcularam-se os valores médios dos resultados de cada repetição assim como o desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos resultados, apresenta-se também os valores de média, DP e CV para os resultados das duas repetições em conjunto.

Tabela 6.18 - resultados de resistência à compressão aos 3 dias de idade.

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Traço A1             | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |               |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média         |
|                      | 40,41        | 45,00        | <b>43,10</b> | 37,36        | 43,03        | <b>41,36</b> | 35,91        | 41,78        | <b>38,16</b> | 33,49        | 39,50        | <b>36,67</b>  |
|                      | 42,18        | 46,32        |              | 41,74        | 43,60        |              | 34,42        | 40,48        |              | 30,91        | 41,01        |               |
|                      | 39,12        | 45,54        |              | 38,92        | 43,53        |              | 34,38        | 42,00        |              | 34,82        | 40,27        |               |
| <b>Média</b>         | <b>40,57</b> | <b>45,62</b> |              | <b>39,34</b> | <b>43,39</b> |              | <b>34,90</b> | <b>41,42</b> |              | <b>33,07</b> | <b>40,26</b> |               |
| <b>DP</b>            | <b>1,54</b>  | <b>0,66</b>  | <b>2,96</b>  | <b>2,22</b>  | <b>0,31</b>  | <b>2,63</b>  | <b>0,87</b>  | <b>0,82</b>  | <b>3,65</b>  | <b>1,99</b>  | <b>0,76</b>  | <b>4,16</b>   |
| <b>CV</b>            | <b>3,79%</b> | <b>1,45%</b> | <b>6,87%</b> | <b>5,64%</b> | <b>0,72%</b> | <b>6,36%</b> | <b>2,50%</b> | <b>1,98%</b> | <b>9,56%</b> | <b>6,01%</b> | <b>1,88%</b> | <b>11,34%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço A              | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 54,92        | 58,82        | <b>56,36</b> | 47,88        | 52,42        | <b>52,58</b> | 50,84        | 52,40        | <b>51,91</b> | 48,23        | 47,30        | <b>49,58</b> |
|                      | 54,02        | 58,39        |              | 53,76        | 54,96        |              | 48,14        | 56,02        |              | 50,84        | 52,10        |              |
|                      | 53,95        | 58,03        |              | 49,83        | 56,61        |              | 51,02        | 53,01        |              | 47,68        | 51,30        |              |
| <b>Média</b>         | <b>54,30</b> | <b>58,41</b> |              | <b>50,49</b> | <b>54,66</b> |              | <b>50,00</b> | <b>53,81</b> |              | <b>48,92</b> | <b>50,23</b> |              |
| <b>DP</b>            | <b>0,54</b>  | <b>0,40</b>  | <b>2,29</b>  | <b>3,00</b>  | <b>2,11</b>  | <b>3,26</b>  | <b>1,61</b>  | <b>1,94</b>  | <b>2,63</b>  | <b>1,69</b>  | <b>2,57</b>  | <b>2,07</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>1,00%</b> | <b>0,68%</b> | <b>4,07%</b> | <b>5,93%</b> | <b>3,86%</b> | <b>6,19%</b> | <b>3,23%</b> | <b>3,60%</b> | <b>5,06%</b> | <b>3,45%</b> | <b>5,12%</b> | <b>4,19%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço B              | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 68,22        | 66,17        | <b>69,28</b> | 71,05        | 72,95        | <b>68,99</b> | 67,23        | 69,73        | <b>66,19</b> | 57,08        | 67,03        | <b>64,76</b> |
|                      | 66,87        | 70,40        |              | 64,21        | 73,80        |              | 60,64        | 67,01        |              | 66,22        | 64,61        |              |
|                      | 70,66        | 73,35        |              | 69,85        | 62,05        |              | 63,51        | 69,03        |              | 66,72        | 66,91        |              |
| <b>Média</b>         | <b>68,58</b> | <b>69,97</b> |              | <b>68,37</b> | <b>69,60</b> |              | <b>63,79</b> | <b>68,59</b> |              | <b>63,34</b> | <b>66,18</b> |              |
| <b>DP</b>            | <b>1,92</b>  | <b>3,61</b>  | <b>2,70</b>  | <b>3,65</b>  | <b>6,55</b>  | <b>4,79</b>  | <b>3,30</b>  | <b>1,41</b>  | <b>3,47</b>  | <b>5,43</b>  | <b>1,36</b>  | <b>3,87</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>2,80%</b> | <b>5,16%</b> | <b>3,89%</b> | <b>5,34%</b> | <b>9,41%</b> | <b>6,95%</b> | <b>5,18%</b> | <b>2,06%</b> | <b>5,25%</b> | <b>8,57%</b> | <b>2,06%</b> | <b>5,97%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |               |              |              |               |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço C              | 3%           |              |              | 6%            |              |              | 9%            |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1            | R2           | Média        | R1            | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 74,48        | 79,10        | <b>78,04</b> | 81,14         | 73,85        | <b>73,48</b> | 78,62         | 68,98        | <b>72,33</b> | 72,25        | 68,61        | <b>71,12</b> |
|                      | 80,17        | 77,70        |              | 72,52         | 73,46        |              | 78,96         | 71,55        |              | 64,23        | 72,56        |              |
|                      | 83,22        | 73,54        |              | 64,37         | 75,56        |              | 61,70         | 74,16        |              | 75,26        | 73,78        |              |
| <b>Média</b>         | <b>79,29</b> | <b>76,78</b> |              | <b>72,68</b>  | <b>74,29</b> |              | <b>73,09</b>  | <b>71,56</b> |              | <b>70,58</b> | <b>71,65</b> |              |
| <b>DP</b>            | <b>4,44</b>  | <b>2,89</b>  | <b>3,62</b>  | <b>8,39</b>   | <b>1,12</b>  | <b>5,42</b>  | <b>9,87</b>   | <b>2,59</b>  | <b>6,51</b>  | <b>5,70</b>  | <b>2,70</b>  | <b>4,03</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>5,59%</b> | <b>3,77%</b> | <b>4,64%</b> | <b>11,54%</b> | <b>1,50%</b> | <b>7,38%</b> | <b>13,50%</b> | <b>3,62%</b> | <b>9,00%</b> | <b>8,08%</b> | <b>3,77%</b> | <b>5,67%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço D              | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 85,40        | 88,42        | <b>83,95</b> | 79,10        | 78,42        | <b>81,48</b> | 73,70        | 80,07        | <b>80,01</b> | 81,20        | 80,76        | <b>79,64</b> |
|                      | 81,20        | 87,34        |              | 85,30        | 85,72        |              | 78,00        | 83,47        |              | 76,20        | 84,70        |              |
|                      | 83,00        | 78,32        |              | 74,90        | 85,44        |              | 81,70        | 83,14        |              | 72,30        | 82,68        |              |
| <b>Média</b>         | <b>83,20</b> | <b>84,69</b> |              | <b>79,77</b> | <b>83,19</b> |              | <b>77,80</b> | <b>82,23</b> |              | <b>76,57</b> | <b>82,71</b> |              |
| <b>DP</b>            | <b>2,11</b>  | <b>5,55</b>  | <b>3,84</b>  | <b>5,23</b>  | <b>4,14</b>  | <b>4,62</b>  | <b>4,00</b>  | <b>1,88</b>  | <b>3,70</b>  | <b>4,46</b>  | <b>1,97</b>  | <b>4,57</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>2,53%</b> | <b>6,55%</b> | <b>4,57%</b> | <b>6,56%</b> | <b>4,97%</b> | <b>5,67%</b> | <b>5,15%</b> | <b>2,28%</b> | <b>4,63%</b> | <b>5,83%</b> | <b>2,38%</b> | <b>5,73%</b> |

Tabela 6.19 - resultados de resistência à compressão aos 7 dias de idade.

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Traço A1             | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |               |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média         |
|                      | 52,00        | 47,93        | 49,91        | 45,64        | 53,17        | 49,08        | 47,59        | 55,48        | 50,35        | 42,36        | 54,74        | 48,04         |
|                      | 50,14        | 46,02        |              | 46,04        | 53,44        |              | 49,80        | 52,46        |              | 44,33        | 50,63        |               |
| 52,34                | 51,04        | 46,29        |              | 49,89        | 48,00        |              | 48,78        | 42,51        |              | 53,66        |              |               |
| <b>Média</b>         | <b>51,49</b> | <b>48,33</b> | <b>45,99</b> | <b>52,17</b> |              | <b>48,46</b> | <b>52,24</b> |              | <b>43,07</b> | <b>53,01</b> |              |               |
| <b>DP</b>            | <b>1,18</b>  | <b>2,53</b>  | <b>2,48</b>  | <b>0,33</b>  | <b>1,98</b>  | <b>3,61</b>  | <b>1,18</b>  | <b>3,36</b>  | <b>3,06</b>  | <b>1,10</b>  | <b>2,13</b>  | <b>5,65</b>   |
| <b>CV</b>            | <b>2,30%</b> | <b>5,24%</b> | <b>4,96%</b> | <b>0,71%</b> | <b>3,79%</b> | <b>7,36%</b> | <b>2,43%</b> | <b>6,42%</b> | <b>6,07%</b> | <b>2,55%</b> | <b>4,02%</b> | <b>11,77%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço A              | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 57,09        | 60,12        | 59,43        | 59,38        | 68,02        | 62,46        | 56,28        | 69,16        | 62,99        | 67,00        | 69,17        | 65,88        |
|                      | 56,91        | 61,40        |              | 59,59        | 66,71        |              | 55,85        | 63,80        |              | 62,48        | 69,47        |              |
| 59,74                | 61,29        | 54,80        |              | 66,28        | 64,74        |              | 68,08        | 59,45        |              | 67,68        |              |              |
| <b>Média</b>         | <b>57,91</b> | <b>60,94</b> | <b>57,92</b> | <b>67,00</b> |              | <b>58,96</b> | <b>67,01</b> |              | <b>62,98</b> | <b>68,77</b> |              |              |
| <b>DP</b>            | <b>1,58</b>  | <b>0,71</b>  | <b>1,99</b>  | <b>2,71</b>  | <b>0,91</b>  | <b>5,29</b>  | <b>5,01</b>  | <b>2,83</b>  | <b>5,72</b>  | <b>3,80</b>  | <b>0,96</b>  | <b>4,03</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>2,74%</b> | <b>1,16%</b> | <b>3,34%</b> | <b>4,67%</b> | <b>1,35%</b> | <b>8,47%</b> | <b>8,50%</b> | <b>4,23%</b> | <b>9,08%</b> | <b>6,03%</b> | <b>1,39%</b> | <b>6,11%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |               |               |               |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço B              | 3%           |               |               | 6%            |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2            | Média         | R1            | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 90,10        | 60,75         | 76,67         | 85,16         | 84,06        | 80,20        | 83,18        | 83,84        | 80,87        | 92,56        | 81,32        | 82,47        |
|                      | 74,12        | 78,06         |               | 68,55         | 78,82        |              | 74,72        | 79,84        |              | 85,03        | 74,11        |              |
| 80,40                | 76,61        | 85,06         |               | 79,54         | 78,55        |              | 85,11        | 83,99        |              | 77,80        |              |              |
| <b>Média</b>         | <b>81,54</b> | <b>71,81</b>  | <b>79,59</b>  | <b>80,81</b>  |              | <b>78,82</b> | <b>82,93</b> |              | <b>87,19</b> | <b>77,74</b> |              |              |
| <b>DP</b>            | <b>8,05</b>  | <b>9,60</b>   | <b>9,55</b>   | <b>9,56</b>   | <b>2,84</b>  | <b>6,34</b>  | <b>4,24</b>  | <b>2,75</b>  | <b>3,91</b>  | <b>4,68</b>  | <b>3,61</b>  | <b>6,38</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>9,87%</b> | <b>13,37%</b> | <b>12,46%</b> | <b>12,01%</b> | <b>3,52%</b> | <b>7,91%</b> | <b>5,37%</b> | <b>3,32%</b> | <b>4,83%</b> | <b>5,36%</b> | <b>4,64%</b> | <b>7,74%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço C              | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 93,51        | 93,10        | 92,47        | 89,20        | 98,30        | 94,17        | 83,52        | 96,80        | 92,20        | 90,68        | 91,20        | 93,05        |
|                      | 93,41        | 92,13        |              | 91,03        | 98,40        |              | 92,01        | 87,00        |              | 99,20        | 89,10        |              |
| 91,07                | 91,60        | 90,41        |              | 97,70        | 96,67        |              | 97,20        | 95,02        |              | 93,10        |              |              |
| <b>Média</b>         | <b>92,66</b> | <b>92,28</b> | <b>90,21</b> | <b>98,13</b> |              | <b>90,73</b> | <b>93,67</b> |              | <b>94,97</b> | <b>91,13</b> |              |              |
| <b>DP</b>            | <b>1,38</b>  | <b>0,76</b>  | <b>1,02</b>  | <b>0,93</b>  | <b>0,38</b>  | <b>4,38</b>  | <b>6,67</b>  | <b>5,78</b>  | <b>5,81</b>  | <b>4,26</b>  | <b>2,00</b>  | <b>3,64</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>1,49%</b> | <b>0,82%</b> | <b>1,10%</b> | <b>1,03%</b> | <b>0,39%</b> | <b>4,66%</b> | <b>7,35%</b> | <b>6,17%</b> | <b>6,30%</b> | <b>4,49%</b> | <b>2,20%</b> | <b>3,91%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |               |               |              |              |              |               |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| Traço D              | 3%           |              |              | 6%           |               |               | 9%           |              |              | 12%           |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2            | Média         | R1           | R2           | Média        | R1            | R2           | Média        |
|                      | 90,62        | 93,44        | 93,19        | 98,67        | 74,76         | 95,42         | 88,23        | 91,80        | 93,11        | 91,70         | 97,36        | 96,84        |
|                      | 96,40        | 96,36        |              | 95,71        | 101,08        |               | 89,95        | 96,04        |              | 96,00         | 100,00       |              |
| 91,98                | 90,35        | 102,44       |              | 99,88        | 100,00        |               | 92,63        | 92,24        |              | 103,73        |              |              |
| <b>Média</b>         | <b>93,00</b> | <b>93,38</b> | <b>98,94</b> | <b>91,91</b> |               | <b>92,73</b>  | <b>93,49</b> |              | <b>93,31</b> | <b>100,36</b> |              |              |
| <b>DP</b>            | <b>3,02</b>  | <b>3,01</b>  | <b>2,70</b>  | <b>3,37</b>  | <b>14,86</b>  | <b>10,38</b>  | <b>6,36</b>  | <b>2,25</b>  | <b>4,28</b>  | <b>2,34</b>   | <b>3,20</b>  | <b>4,60</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>3,25%</b> | <b>3,22%</b> | <b>2,90%</b> | <b>3,41%</b> | <b>16,17%</b> | <b>10,88%</b> | <b>6,86%</b> | <b>2,40%</b> | <b>4,60%</b> | <b>2,51%</b>  | <b>3,19%</b> | <b>4,75%</b> |

Tabela 6.20 - resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço A1             | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 62,84        | 64,17        | <b>64,55</b> | 64,95        | 69,49        | <b>65,80</b> | 65,75        | 67,92        | <b>66,59</b> | 66,23        | 71,68        | <b>67,95</b> |
|                      | 62,30        | 65,82        |              | 63,80        | 67,35        |              | 68,02        | 69,55        |              | 66,94        | 71,16        |              |
|                      | 65,03        | 67,15        |              | 64,37        | 64,81        |              | 63,63        | 64,65        |              | 63,47        | 68,21        |              |
| <b>Média</b>         | <b>63,39</b> | <b>65,71</b> |              | <b>64,37</b> | <b>67,22</b> |              | <b>65,80</b> | <b>67,37</b> |              | <b>65,55</b> | <b>70,35</b> |              |
| <b>DP</b>            | <b>1,45</b>  | <b>1,49</b>  | <b>1,83</b>  | <b>0,58</b>  | <b>2,34</b>  | <b>2,18</b>  | <b>2,20</b>  | <b>2,50</b>  | <b>2,27</b>  | <b>1,83</b>  | <b>1,87</b>  | <b>3,11</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>2,28%</b> | <b>2,27%</b> | <b>2,83%</b> | <b>0,89%</b> | <b>3,49%</b> | <b>3,31%</b> | <b>3,34%</b> | <b>3,70%</b> | <b>3,41%</b> | <b>2,80%</b> | <b>2,66%</b> | <b>4,58%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Traço A              | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |              |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        |
|                      | 70,51        | 75,90        | <b>73,86</b> | 87,01        | 80,73        | <b>83,57</b> | 84,12        | 87,21        | <b>84,59</b> | 87,46        | 86,90        | <b>87,31</b> |
|                      | 67,26        | 75,49        |              | 83,24        | 81,76        |              | 86,40        | 82,16        |              | 86,40        | 81,25        |              |
|                      | 77,92        | 76,09        |              | 87,70        | 81,00        |              | 83,67        | 83,99        |              | 95,47        | 86,35        |              |
| <b>Média</b>         | <b>71,90</b> | <b>75,83</b> |              | <b>85,98</b> | <b>81,16</b> |              | <b>84,73</b> | <b>84,45</b> |              | <b>89,78</b> | <b>84,83</b> |              |
| <b>DP</b>            | <b>5,46</b>  | <b>0,31</b>  | <b>4,08</b>  | <b>2,40</b>  | <b>0,53</b>  | <b>3,06</b>  | <b>1,46</b>  | <b>2,56</b>  | <b>1,87</b>  | <b>4,96</b>  | <b>3,12</b>  | <b>4,59</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>7,60%</b> | <b>0,40%</b> | <b>5,52%</b> | <b>2,79%</b> | <b>0,66%</b> | <b>3,67%</b> | <b>1,73%</b> | <b>3,03%</b> | <b>2,21%</b> | <b>5,52%</b> | <b>3,67%</b> | <b>5,26%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |              |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Traço B              | 3%           |              |              | 6%           |              |              | 9%           |              |              | 12%          |               |              |
|                      | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2           | Média        | R1           | R2            | Média        |
|                      | 82,47        | 85,15        | <b>86,42</b> | 96,25        | 98,45        | <b>95,61</b> | 89,33        | 99,17        | <b>96,24</b> | 100,66       | 100,59        | <b>99,97</b> |
|                      | 86,08        | 95,46        |              | 100,15       | 95,98        |              | 103,86       | 96,54        |              | 98,52        | 103,65        |              |
|                      | 74,32        | 95,04        |              | 88,42        | 94,41        |              | 89,33        | 99,23        |              | 91,69        | 104,68        |              |
| <b>Média</b>         | <b>80,96</b> | <b>91,88</b> |              | <b>94,94</b> | <b>96,28</b> |              | <b>94,17</b> | <b>98,31</b> |              | <b>96,96</b> | <b>102,97</b> |              |
| <b>DP</b>            | <b>6,02</b>  | <b>5,84</b>  | <b>8,00</b>  | <b>5,97</b>  | <b>2,04</b>  | <b>4,06</b>  | <b>8,39</b>  | <b>1,54</b>  | <b>5,85</b>  | <b>4,68</b>  | <b>2,13</b>   | <b>4,63</b>  |
| <b>CV</b>            | <b>7,44%</b> | <b>6,35%</b> | <b>9,25%</b> | <b>6,29%</b> | <b>2,12%</b> | <b>4,24%</b> | <b>8,91%</b> | <b>1,56%</b> | <b>6,08%</b> | <b>4,83%</b> | <b>2,07%</b>  | <b>4,63%</b> |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Traço C              | 3%            |               |               | 6%            |               |               | 9%            |               |               | 12%           |               |               |
|                      | R1            | R2            | Média         | R1            | R2            | Média         | R1            | R2            | Média         | R1            | R2            | Média         |
|                      | 110,57        | 99,20         | <b>105,13</b> | 111,04        | 118,99        | <b>114,80</b> | 120,13        | 120,72        | <b>116,40</b> | 112,00        | 127,71        | <b>121,14</b> |
|                      | 94,95         | 112,72        |               | 105,72        | 116,50        |               | 115,01        | 119,82        |               | 121,44        | 122,42        |               |
|                      | 97,28         | 116,05        |               | 120,74        | 115,83        |               | 111,15        | 111,56        |               | 123,04        | 120,20        |               |
| <b>Média</b>         | <b>100,93</b> | <b>109,32</b> |               | <b>112,50</b> | <b>117,11</b> |               | <b>115,43</b> | <b>117,37</b> |               | <b>118,83</b> | <b>123,44</b> |               |
| <b>DP</b>            | <b>8,43</b>   | <b>8,92</b>   | <b>9,02</b>   | <b>7,62</b>   | <b>1,67</b>   | <b>5,54</b>   | <b>4,50</b>   | <b>5,05</b>   | <b>4,41</b>   | <b>5,97</b>   | <b>3,86</b>   | <b>5,16</b>   |
| <b>CV</b>            | <b>8,35%</b>  | <b>8,16%</b>  | <b>8,58%</b>  | <b>6,77%</b>  | <b>1,42%</b>  | <b>4,82%</b>  | <b>3,90%</b>  | <b>4,30%</b>  | <b>3,79%</b>  | <b>5,02%</b>  | <b>3,13%</b>  | <b>4,26%</b>  |

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Traço D              | 3%            |               |               | 6%            |               |               | 9%            |               |               | 12%           |               |               |
|                      | R1            | R2            | Média         | R1            | R2            | Média         | R1            | R2            | Média         | R1            | R2            | Média         |
|                      | 115,56        | 106,90        | <b>112,03</b> | 109,95        | 125,40        | <b>115,95</b> | 120,50        | 121,70        | <b>118,95</b> | 123,05        | 130,00        | <b>124,53</b> |
|                      | 107,68        | 122,70        |               | 115,85        | 120,40        |               | 117,51        | 125,90        |               | 118,83        | 126,00        |               |
|                      | 100,54        | 118,80        |               | 112,82        | 111,30        |               | 108,07        | 120,00        |               | 119,41        | 129,90        |               |
| <b>Média</b>         | <b>107,93</b> | <b>116,13</b> |               | <b>112,87</b> | <b>119,03</b> |               | <b>115,36</b> | <b>122,53</b> |               | <b>120,43</b> | <b>128,63</b> |               |
| <b>DP</b>            | <b>7,51</b>   | <b>8,23</b>   | <b>8,36</b>   | <b>2,95</b>   | <b>7,15</b>   | <b>5,94</b>   | <b>6,49</b>   | <b>3,04</b>   | <b>6,00</b>   | <b>2,29</b>   | <b>2,28</b>   | <b>4,94</b>   |
| <b>CV</b>            | <b>6,96%</b>  | <b>7,09%</b>  | <b>7,46%</b>  | <b>2,61%</b>  | <b>6,01%</b>  | <b>5,12%</b>  | <b>5,62%</b>  | <b>2,48%</b>  | <b>5,04%</b>  | <b>1,90%</b>  | <b>1,77%</b>  | <b>3,96%</b>  |

De posse de todos os resultados de resistência à compressão elaboraram-se os gráficos de resultados de resistência à compressão versus relação a/a para cada idade de ruptura e para cada teor de sílica ativa, que são apresentados nas figuras 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20.

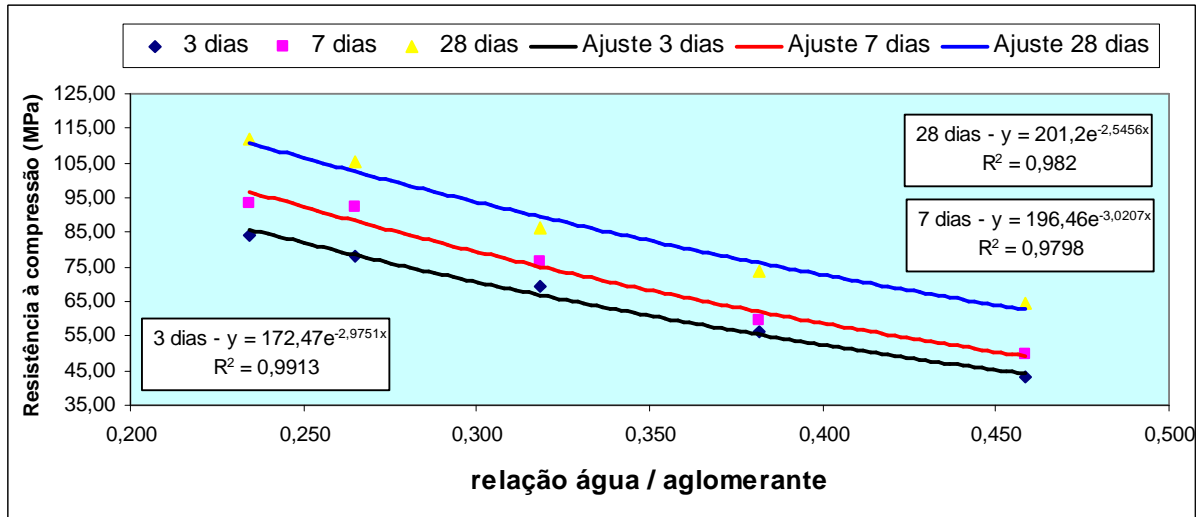


Figura 6.17 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 3%.

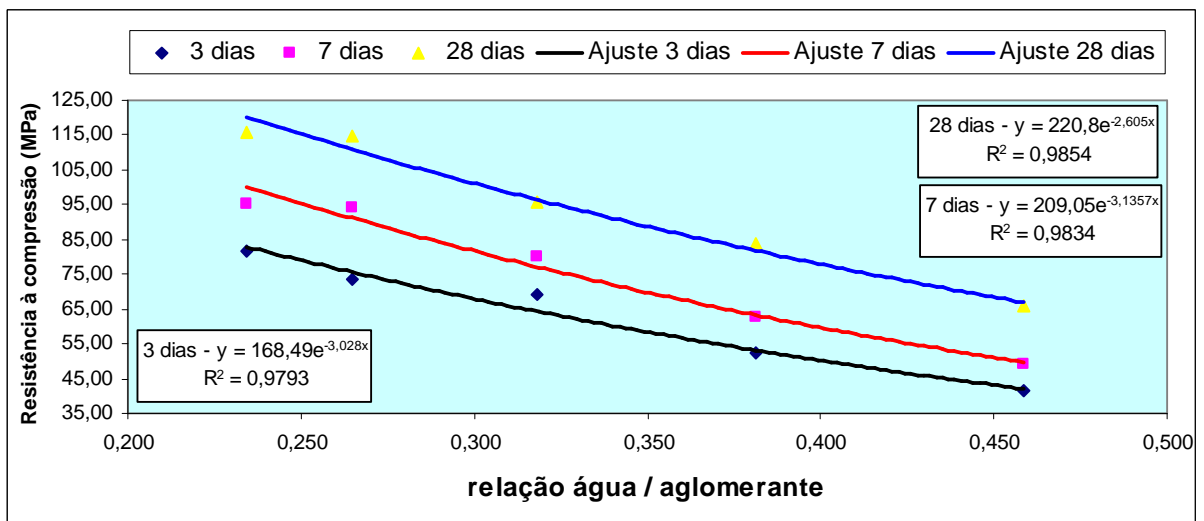


Figura 6.18 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 9%.



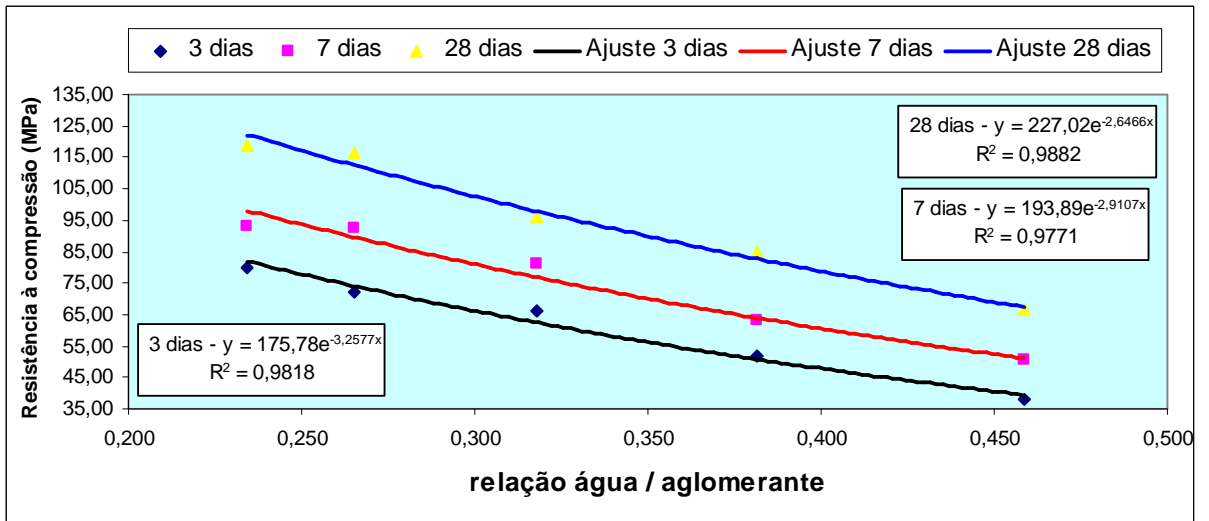


Figura 6.19 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 9%.

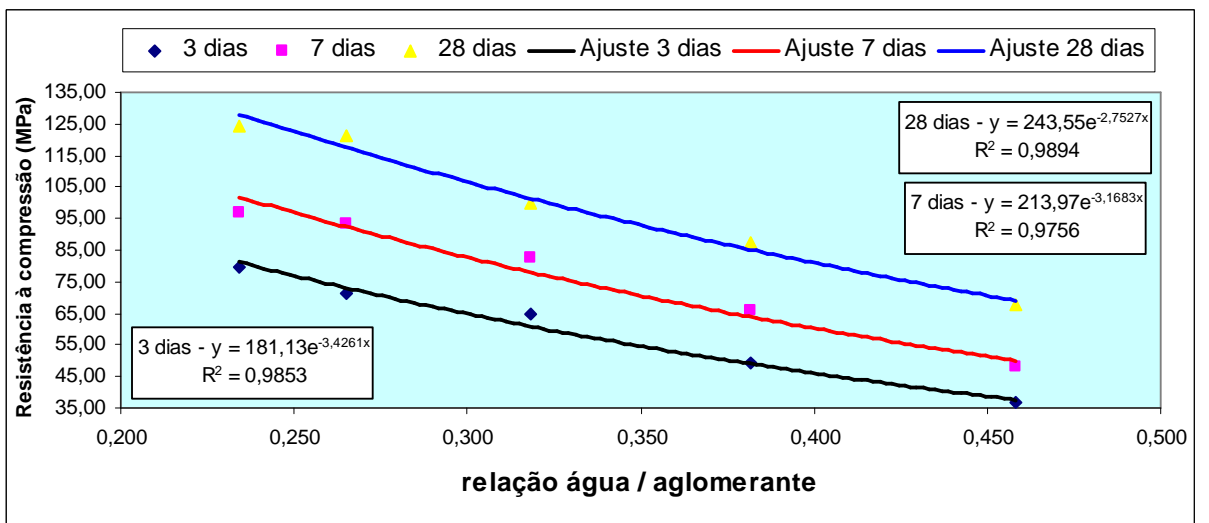


Figura 6.20 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão médios para o teor de sílica ativa de 12%.

## 7) ANÁLISE DE RESULTADOS

### 7.1) Validação dos resultados

Antes de se efetuar a análise dos resultados obtidos, procedeu-se à validação dos mesmos, para garantir a confiabilidade e validade deste trabalho. A validação dos resultados foi efetuada com base em estudos estatísticos e comparação com trabalhos elaborados anteriormente.

#### 7.1.1) Desvio padrão e coeficiente de variação

Nas tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 apresenta-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação obtidos durante a execução dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 7.1 - desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de 3 dias de idade.

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |               |                         |               |                         |               |                         |               |                         |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Traço                | 3%            |                         | 6%            |                         | 9%            |                         | 12%           |                         |
|                      | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação |
| A1                   | 2,96          | 6,87%                   | 2,63          | 6,36%                   | 3,65          | 9,56%                   | 4,16          | 11,34%                  |
| A                    | 2,29          | 4,07%                   | 3,26          | 6,19%                   | 2,63          | 5,06%                   | 2,07          | 4,19%                   |
| B                    | 2,70          | 3,89%                   | 4,79          | 6,95%                   | 3,47          | 5,25%                   | 3,87          | 5,97%                   |
| C                    | 3,62          | 4,64%                   | 5,42          | 7,38%                   | 6,51          | 9,00%                   | 4,03          | 5,67%                   |
| D                    | 3,84          | 4,57%                   | 4,62          | 5,67%                   | 3,70          | 4,63%                   | 4,57          | 5,73%                   |

Tabela 7.2 - desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de 7 dias de idade.

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |               |                         |               |                         |               |                         |               |                         |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Traço                | 3%            |                         | 6%            |                         | 9%            |                         | 12%           |                         |
|                      | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação |
| A1                   | 2,48          | 4,96%                   | 3,61          | 7,36%                   | 3,06          | 6,07%                   | 5,65          | 11,77%                  |
| A                    | 1,99          | 3,34%                   | 5,29          | 8,47%                   | 5,72          | 9,08%                   | 4,03          | 6,11%                   |
| B                    | 9,55          | 12,46%                  | 6,34          | 7,91%                   | 3,91          | 4,83%                   | 6,38          | 7,74%                   |
| C                    | 1,02          | 1,10%                   | 4,38          | 4,66%                   | 5,81          | 6,30%                   | 3,64          | 3,91%                   |
| D                    | 2,70          | 2,90%                   | 10,38         | 10,88%                  | 4,28          | 4,60%                   | 4,60          | 4,75%                   |

Tabela 7.3 - desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de 28 dias de idade.

| TEOR DE SÍLICA ATIVA |               |                         |               |                         |               |                         |               |                         |
|----------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Traço                | 3%            |                         | 6%            |                         | 9%            |                         | 12%           |                         |
|                      | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação | Desvio Padrão | Coeficiente de Variação |
| A1                   | 1,83          | 2,83%                   | 2,18          | 3,31%                   | 2,27          | 3,41%                   | 3,11          | 4,58%                   |
| A                    | 4,08          | 5,52%                   | 3,06          | 3,67%                   | 1,87          | 2,21%                   | 4,59          | 5,26%                   |
| B                    | 8,00          | 9,25%                   | 4,06          | 4,24%                   | 5,85          | 6,08%                   | 4,63          | 4,63%                   |
| C                    | 9,02          | 8,58%                   | 5,54          | 4,82%                   | 4,41          | 3,79%                   | 5,16          | 4,26%                   |
| D                    | 8,36          | 7,46%                   | 5,94          | 5,12%                   | 6,00          | 5,04%                   | 4,94          | 3,96%                   |

Os índices obtidos são bastante próximos aos obtidos em outros trabalhos, sendo semelhantes aos apresentados por Mendes (2002) e Freitas (2005). Os valores situam-se aproximadamente entre os obtidos pelo autores citados acima, denotando a eficácia do equipamento e processo de preparação dos topos dos CPs empregado no estudo, conforme apresentado na tabela 7.4

Tabela 7.4 – comparativo de valores de coeficiente de variação.

| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%) | MENDES (2002) |        |         | FREITAS (2005) |        |         | ESTUDO EXPERIMENTAL |        |         |
|-----------------------------|---------------|--------|---------|----------------|--------|---------|---------------------|--------|---------|
|                             | 3 DIAS        | 7 DIAS | 28 DIAS | 3 DIAS         | 7 DIAS | 28 DIAS | 3 DIAS              | 7 DIAS | 28 DIAS |
| MÉDIO                       | 3,88          | 3,99   | 3,99    | 7,70           | 6,59   | 6,20    | 6,15                | 6,63   | 4,78    |
| MÍNIMO                      | 1,80          | 2,10   | 1,80    | 4,20           | 1,10   | 2,50    | 3,89                | 1,10   | 2,21    |
| MÁXIMO                      | 6,20          | 7,40   | 6,30    | 13,20          | 10,50  | 13,20   | 11,34               | 12,46  | 9,35    |

Em parte dos CPs que apresentaram resultados de maior desvio, observamos que o modo de ruptura do mesmo ocorreu de maneira diferenciada dos demais, o que pode indicar possíveis falhas de moldagem ou processo de ruptura, não sendo possível considerar os desvios como unicamente provocados pelo processo de preparação dos topos dos CPs.



Figura 7.1 - CPs com ruptura cônica e com ruptura cisalhada.

### 7.1.2) Equações das curvas de tendência

Através dos resultados de resistência à compressão médios obtidos aos 3, 7 e 28 dias de idade para cada tipo de traço (A1, A, B, C e D) para cada teor de sílica ativa, determinou-se as equações de regressão das curvas que representaram a tendência dos resultados para cada teor de sílica ativa. Calculou-se também o coeficiente de determinação de cada equação das curvas de tendência. Um resumo dos valores obtidos é apresentado na tabela 7.5.

Tabela 7.5 - equações de regressão e  $R^2$  para valores médios de resistência à compressão.

| Teor de Sílica | Idade | Equação das Curvas de Tendência | $R^2$  |
|----------------|-------|---------------------------------|--------|
| 3%             | 3D    | $y = 172,47 e^{-2,9751x}$       | 0,9913 |
| 6%             | 3D    | $y = 168,49 e^{-3,0280x}$       | 0,9793 |
| 9%             | 3D    | $y = 175,78 e^{-3,2577x}$       | 0,9818 |
| 12%            | 3D    | $y = 181,13 e^{-3,4261x}$       | 0,9853 |
| 3%             | 7D    | $y = 196,46 e^{-3,0207x}$       | 0,9798 |
| 6%             | 7D    | $y = 209,05 e^{-3,1357x}$       | 0,9834 |
| 9%             | 7D    | $y = 193,89 e^{-2,9107x}$       | 0,9771 |
| 12%            | 7D    | $y = 213,97 e^{-3,1683x}$       | 0,9756 |
| 3%             | 28D   | $y = 201,2 e^{-2,5456x}$        | 0,9820 |
| 6%             | 28D   | $y = 220,80 e^{-2,6050x}$       | 0,9854 |
| 9%             | 28D   | $y = 2227,02 e^{-2,6466x}$      | 0,9882 |
| 12%            | 28D   | $y = 243,55 e^{-2,7527x}$       | 0,9894 |

Os resultados de coeficiente de determinação obtidos neste trabalho denotam bom ajuste das curvas. Destaca-se que os resultados são bastante semelhantes aos obtidos em outros trabalhos: Mendes (2002) obteve valores de coeficiente de determinação entre 0,8377 e 0,9997 e Freitas (2005) obteve valores entre 0,9492 e 0,9964.

### 7.1.3) Máxima resistência potencial

Concretos de alta resistência apresentam maiores variações entre os resultados obtidos com CPs moldados de um mesmo concreto que CPs moldados com concretos usuais. Este fato deve-se à grande influência dos processos de ensaio, principalmente na preparação dos topos dos CPs. Pequenas variações nos processos de ensaio provocam grandes variações nos resultados de resistência à compressão, sendo de grande dificuldade a repetição dos máximos valores obtidos.

É de opinião deste autor que a média de resultados de resistência à compressão seja melhor representação da resistência dos CAR que o máximo valor obtido, devendo no caso de desvios significativos entre os três resultados dos CPs serem efetuadas outras investigações quanto à resistência do CAR.

Destaca-se também que é senso comum nos produtores de concreto a necessidade de moldagem de pelo menos 3 CPs para cada idade de ruptura de CAR. Em obras como dos edifícios E-Tower (SP), Evolution Towers (PR) e Antarctica (PR) o controle do concreto foi efetuado com a moldagem de mais CPs que os dois CPs preconizados nas normas técnicas brasileiras (HARTMANN & HELENE, 2004; CHRISTÓFOLLI, INOUE & FREITAS, 2007).

Analisando-se a máxima resistência potencial dos concretos produzidos neste trabalho, indicada nas tabelas 7.6, 7.7 e 7.8 e as curvas de ajustes apresentadas nas figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5, percebe-se a coerência destes com os resultados dos valores médios de resistência à compressão, podendo-se observar a mesma tendência em ambos.

Tabela 7.6 - máxima resistência potencial à compressão aos 3 dias de idade (MPa).

| Relação a/a | 3%    | 6%    | 9%    | 12%   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 0,458       | 46,32 | 43,60 | 42,00 | 41,01 |
| 0,382       | 58,82 | 56,61 | 56,02 | 52,10 |
| 0,318       | 73,35 | 73,80 | 69,73 | 67,03 |
| 0,265       | 83,22 | 81,14 | 78,96 | 75,26 |
| 0,234       | 88,42 | 85,72 | 83,47 | 84,70 |

Tabela 7.7 - máxima resistência potencial à compressão aos 7 dias de idade (MPa).

| Relação a/a | 3%    | 6%     | 9%     | 12%    |
|-------------|-------|--------|--------|--------|
| 0,458       | 52,34 | 53,44  | 55,48  | 54,74  |
| 0,382       | 61,40 | 68,02  | 69,16  | 69,47  |
| 0,318       | 90,10 | 85,16  | 85,11  | 92,56  |
| 0,265       | 93,51 | 98,40  | 97,20  | 99,20  |
| 0,234       | 96,40 | 102,44 | 100,00 | 103,73 |

Tabela 7.8 - máxima resistência potencial à compressão aos 28 dias de idade (MPa).

| Relação a/a | 3%     | 6%     | 9%     | 12%    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 0,458       | 67,15  | 69,49  | 69,55  | 71,68  |
| 0,382       | 77,92  | 87,70  | 87,21  | 95,47  |
| 0,318       | 95,46  | 100,15 | 103,86 | 104,68 |
| 0,265       | 116,05 | 120,74 | 120,72 | 127,71 |
| 0,234       | 122,70 | 125,40 | 125,90 | 130,00 |

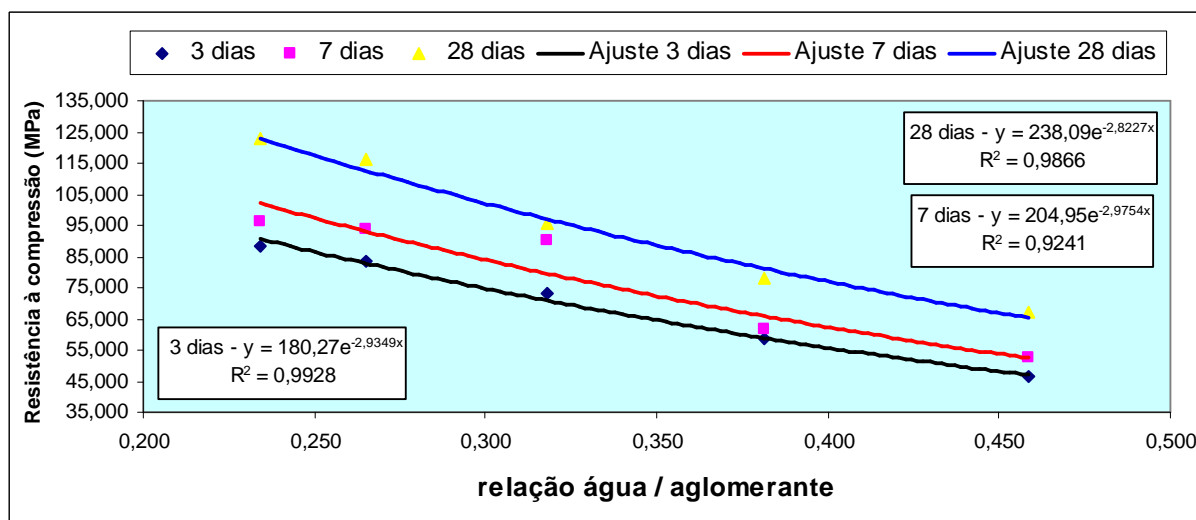


Figura 7.2 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 3%.

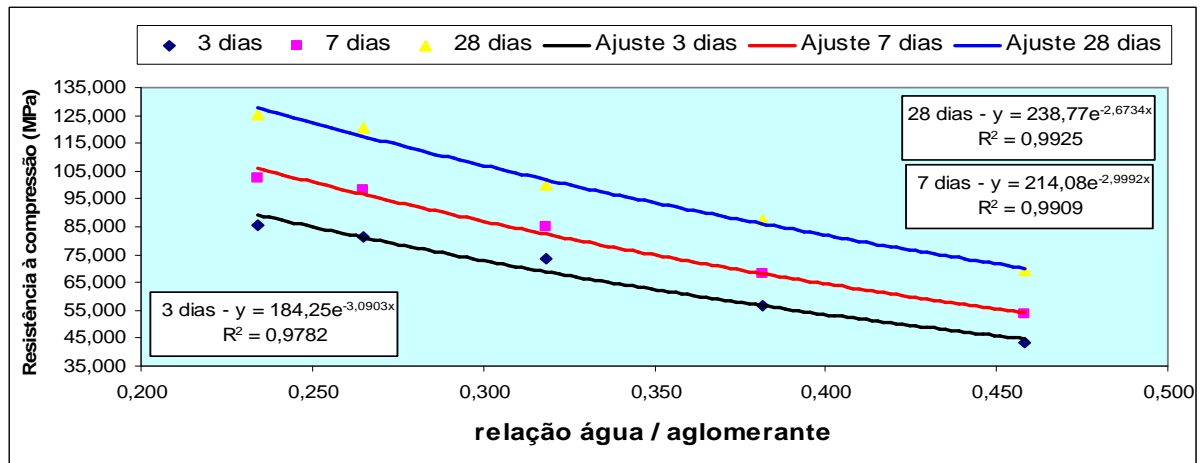


Figura 7.3 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 6%.

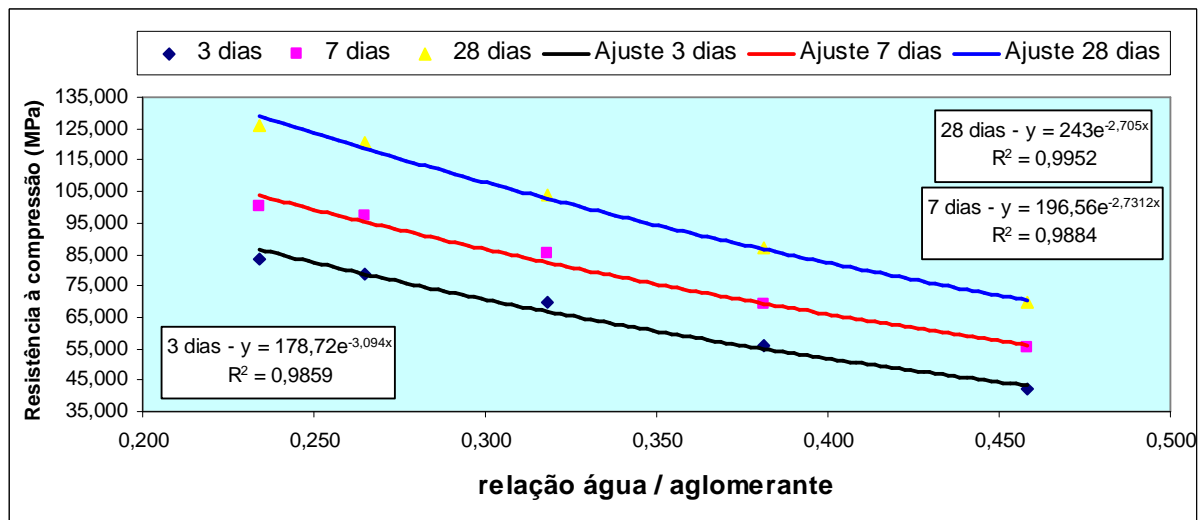


Figura 7.4 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 9%.

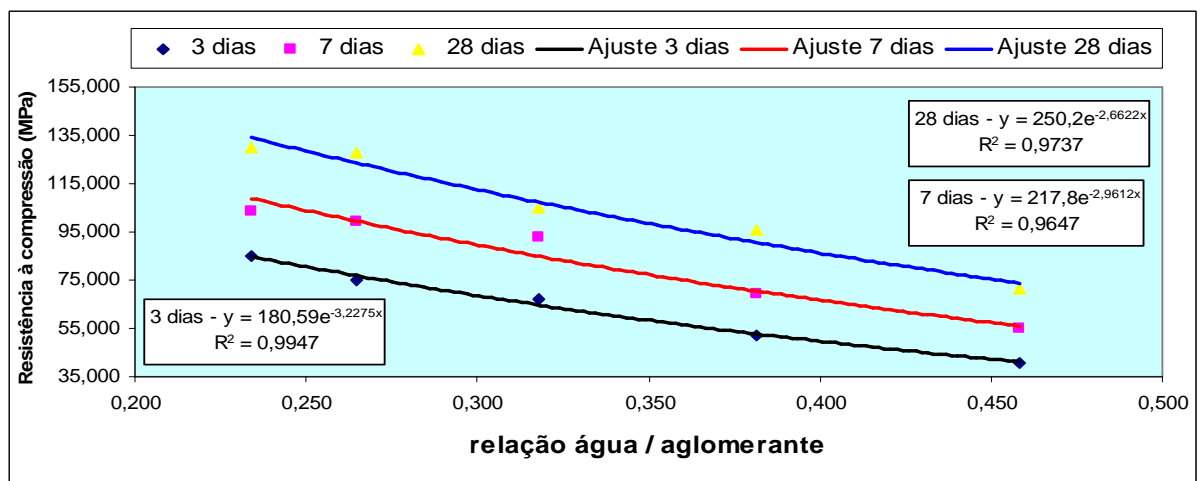


Figura 7.5 – curvas de ajuste para resultados de resistência à compressão máxima potencial para o teor de sílica ativa de 12%.

As equações de regressão determinadas para os máximos valores potenciais obtidos apresentadas na tabela 7.9, apresentaram resultados consistentes e altos coeficientes de determinação, semelhantes aos obtidos para os valores médios de resistência à compressão e aos obtidos em outros trabalhos.

Tabela 7.9 - equações das curvas de tendência e  $R^2$  para valores de máxima resistência à compressão potencial.

| Teor de Sílica | Idade | Equação de Ajuste        | $R^2$  |
|----------------|-------|--------------------------|--------|
| 3%             | 3D    | $y = 180,27e^{-2,9349x}$ | 0,9928 |
| 6%             | 3D    | $y = 184,25e^{-3,0903x}$ | 0,9782 |
| 9%             | 3D    | $y = 178,72e^{-3,094x}$  | 0,9859 |
| 12%            | 3D    | $y = 180,59e^{-3,2275x}$ | 0,9947 |
| 3%             | 7D    | $y = 204,95e^{-2,9754x}$ | 0,9241 |
| 6%             | 7D    | $y = 214,08e^{-2,9992x}$ | 0,9909 |
| 9%             | 7D    | $y = 196,56e^{-2,7312x}$ | 0,9884 |
| 12%            | 7D    | $y = 217,80e^{-2,9612x}$ | 0,9647 |
| 3%             | 28D   | $y = 238,09e^{-2,8227x}$ | 0,9866 |
| 6%             | 28D   | $y = 238,77e^{-2,6734x}$ | 0,9925 |
| 9%             | 28D   | $y = 243,00e^{-2,7050x}$ | 0,9952 |
| 12%            | 28D   | $y = 250,2e^{-2,6622x}$  | 0,9737 |

Comparando os resultados médios de resistência à compressão e os resultados da máxima resistência potencial (tabela 7.10), observa-se uma relação média entre os mesmos de aproximadamente 94%



Tabela 7.10 – relação percentual resistência à compressão média / resistência à compressão máxima potencial

| IDADE   | TRAÇO | 3%     | 6%     | 9%     | 12%    |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 3 DIAS  | A1    | 93,04% | 94,87% | 90,86% | 89,41% |
|         | A1    | 95,81% | 92,88% | 92,65% | 95,15% |
|         | B     | 94,45% | 93,48% | 94,93% | 96,62% |
|         | C     | 93,77% | 90,56% | 91,60% | 94,49% |
|         | D     | 94,94% | 95,05% | 95,86% | 94,03% |
| 7 DIAS  | A1    | 95,36% | 91,84% | 90,76% | 87,76% |
|         | A1    | 96,78% | 91,83% | 91,07% | 94,83% |
|         | B     | 85,10% | 94,17% | 95,02% | 89,10% |
|         | C     | 98,89% | 95,70% | 94,86% | 93,80% |
|         | D     | 96,67% | 93,15% | 93,11% | 93,36% |
| 28 DIAS | A1    | 96,13% | 94,68% | 95,74% | 94,79% |
|         | A1    | 94,79% | 95,29% | 97,00% | 91,45% |
|         | B     | 90,53% | 95,47% | 92,67% | 95,50% |
|         | C     | 90,59% | 95,08% | 96,42% | 94,85% |
|         | D     | 91,30% | 92,47% | 94,48% | 95,79% |

#### 7.1.4) Análise de variância

A fim de verificar a significância dos resultados obtidos efetuamos a análise de variância através o uso da Tabela ANOVA.

Observamos que aos 3 dias de idade são significantes as diferenças obtidas nos resultados de resistência à compressão entre as diferentes relações a/a e entre os teores de sílica ativa, não sendo significativa a interação entre estes fatores (tabela 7.11).

Tabela 7.11 - análise de variância para resultados de resistência à compressão de 3 dias de idade.

| <i>Fonte da variação</i>   | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> | <i>Significante</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|---------------------|
| Relação água / aglomerante | 26711,93  | 4         | 6677,984  | 441,7456 | 1,34E-62       | 2,462615         | Sim                 |
| Teor de sílica ativa       | 565,404   | 3         | 188,468   | 12,46707 | 5,42E-07       | 2,695534         | Sim                 |
| Interações                 | 51,39433  | 12        | 4,282861  | 0,283309 | 0,990771       | 1,850255         | Não                 |
| Dentro                     | 1511,726  | 100       | 15,11726  |          |                |                  |                     |
| Total                      | 28840,46  | 119       |           |          |                |                  |                     |

Aos 7 dias de idade é significativa a diferença entre os resultados de resistência à compressão para as relações a/a analisadas. Não é significativa a diferença entre os resultados obtidos para os teores de sílica ativa analisados, também não é significativa a interação entre a relação a/a e teor de sílica ativa (tabela 7.12).

Crê-se que não há significância entre os resultados de resistência à compressão alcançados para os diferentes teores de sílica ativa aos 7 dias de idade, pois aos 3 dias de idade os concretos produzidos com os menores teores de sílica ativa apresentaram maiores resultados de resistência à compressão e aos 28 dias os concretos que apresentaram os maiores resultados foram os produzidos com maior teor de sílica ativa. Aos 3 dias de idade os ganhos de resistência provocados pela sílica ativa devem-se em maior parte ao efeito filler, sendo o efeito do ganho de resistência provocado pelo cimento provavelmente superior ao provocado pelo possível início das reações pozolânicas da sílica ativa. Aos 7 dias de idade supõe-se que os ganhos de resistência devido às reações pozolânicas aproximem os valores de resistência à compressão entre os diferentes traços, pois os concretos produzidos com maiores teores de sílica ativa tiveram um ganho maior de resistência, entretanto como os concretos produzidos com menores teores alcançaram maiores resultados aos 3 dias de idade, assim os resultados aproximadamente se igualaram.

Tabela 7.12 - análise de variância para resultados de resistência à compressão de 7 dias de idade.

| <i>Fonte da variação</i>      | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> | <i>Significante</i> |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|---------------------|
| Relação água /<br>aglomerante | 36952,64  | 4         | 9238,16   | 335,4942 | 5,36E-57       | 2,462615         | Sim                 |
| Teor de sílica ativa          | 132,3969  | 3         | 44,13229  | 1,602714 | 0,193534       | 2,695534         | Não                 |
| Interações                    | 192,7615  | 12        | 16,06346  | 0,583363 | 0,851014       | 1,850255         | Não                 |
| Dentro                        | 2753,597  | 100       | 27,53597  |          |                |                  |                     |
| Total                         | 40031,4   | 119       |           |          |                |                  |                     |

As curvas das equações de tendência aos 7 dias de idade para os diferentes teores de sílica ativa são bastante próximas, denotando o citado acima (figura 7.6).

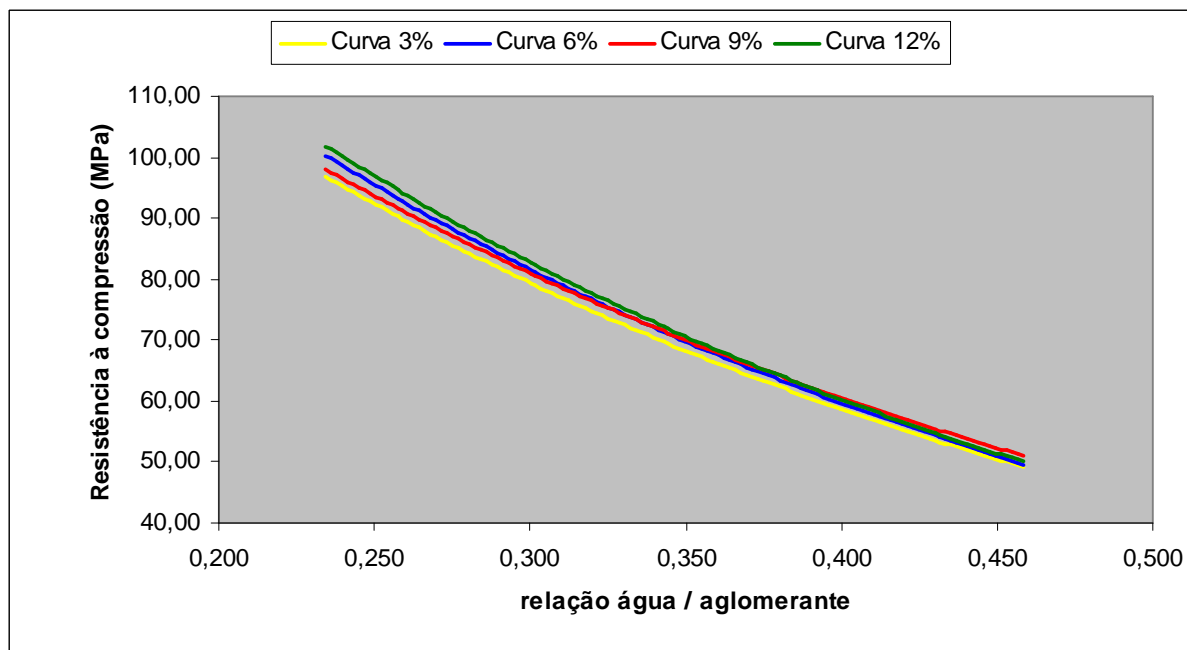


Figura 7.6 - equações das curvas de tendência para resultados de resistência à compressão aos 7 de idade.

Aos 28 dias de idade observa-se a significância dos resultados de resistência à compressão obtidos para as diferentes relações a/a e para os diferentes teores de adição de sílica ativa. Não há significância para os resultados de interação entre a relação a/a e o teor de sílica ativa (figura 7.13).

Tabela 7.13 - análise de variância para resultados de resistência à compressão de 28 dias de idade.

| Fonte da variação          | SQ       | gl  | MQ       | F        | valor-P  | F crítico | Significante |
|----------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|-----------|--------------|
| Relação água / aglomerante | 45282,45 | 4   | 11320,61 | 424,6539 | 8,64E-62 | 2,462615  | Sim          |
| Teor de sílica ativa       | 2183,964 | 3   | 727,9879 | 27,30797 | 5,53E-13 | 2,695534  | Sim          |
| Interações                 | 380,5034 | 12  | 31,70862 | 1,18944  | 0,301057 | 1,850255  | Não          |
| Dentro                     | 2665,844 | 100 | 26,65844 |          |          |           |              |
| Total                      | 50512,76 | 119 |          |          |          |           |              |

## 7.2) Análise dos resultados de resistência à compressão

A partir dos resultados de resistência à compressão médios, apresentados na tabela 7.14, procedeu-se à análise da influência dos teores de sílica ativa.

Tabela 7.14 - resultados médios de resistência à compressão.

| Idade | A/A   | Resistência à Compressão (MPa) |        |        |        |
|-------|-------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|       |       | Teor de Sílica Ativa           |        |        |        |
|       |       | 3%                             | 6%     | 9%     | 12%    |
| 3D    | 0,458 | 43,10                          | 41,36  | 38,16  | 36,67  |
|       | 0,382 | 56,36                          | 52,58  | 51,91  | 49,58  |
|       | 0,318 | 69,28                          | 68,99  | 66,19  | 64,76  |
|       | 0,265 | 78,04                          | 73,48  | 72,33  | 71,12  |
|       | 0,234 | 83,95                          | 81,48  | 80,01  | 79,64  |
| 7D    | 0,458 | 49,91                          | 49,08  | 50,35  | 48,04  |
|       | 0,382 | 59,43                          | 62,46  | 62,99  | 65,88  |
|       | 0,318 | 76,67                          | 80,20  | 80,87  | 82,47  |
|       | 0,265 | 92,47                          | 94,17  | 92,20  | 93,05  |
|       | 0,234 | 93,19                          | 95,42  | 93,11  | 96,84  |
| 28D   | 0,458 | 64,55                          | 65,80  | 66,59  | 67,95  |
|       | 0,382 | 73,86                          | 83,57  | 84,59  | 87,31  |
|       | 0,318 | 86,42                          | 95,61  | 96,24  | 99,97  |
|       | 0,265 | 105,13                         | 114,80 | 116,40 | 121,14 |
|       | 0,234 | 112,03                         | 115,95 | 118,95 | 124,53 |

Aos 3 dias de idade observou-se que quanto menor o teor de sílica ativa maior a resistência à compressão alcançada. Percebe-se que quanto maior a relação a/a maior a diferença entre os valores de resistência á compressão obtidos, conforme apresentado na figura 7.7 e tabela 7.15.

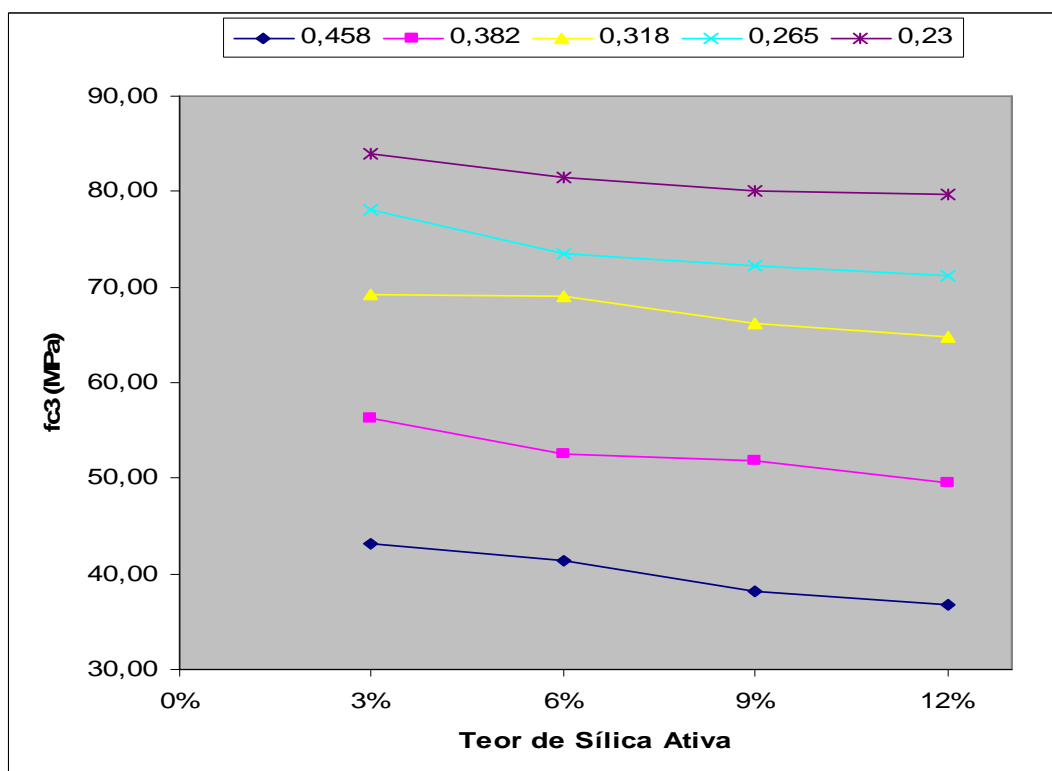


Figura 7.7 - evolução dos resultados de resistência à compressão.

Tabela 7.15 - diferença percentual entre os resultados obtidos para o teor de sílica ativa de 12% e demais teores.

| A/A / %SA | 3%     | 6%     | 9%    |
|-----------|--------|--------|-------|
| 0,458     | 17,53% | 12,81% | 4,08% |
| 0,382     | 13,68% | 6,05%  | 4,70% |
| 0,318     | 6,97%  | 6,52%  | 2,21% |
| 0,265     | 9,73%  | 3,33%  | 1,71% |
| 0,234     | 5,41%  | 2,31%  | 0,47% |

Segundo Neville (1997) as partículas extremamente finas da sílica ativa se posicionam junto às partículas de agregados, na região de interface agregado-pasta, reduzindo a exsudação interna e conseqüentemente a quantidade de água aprisionada sob as partículas maiores de agregado graúdo, reduzindo assim a porosidade da zona de transição e aumentando a resistência à compressão.

Assim a redução na diferença entre os resultados de resistência à compressão dos diferentes teores de sílica à medida que se diminui a relação a/a provavelmente deve-se ao fato que, quanto menor a relação a/a, menos porosa é a zona de transição e conseqüentemente

Com a representação gráfica das curvas de ajuste dos resultados de resistência à compressão aos 3 dias de idade observam-se maiores valores de resistência à compressão para os concretos produzidos com menores teores de sílica ativa (figura 7.8).

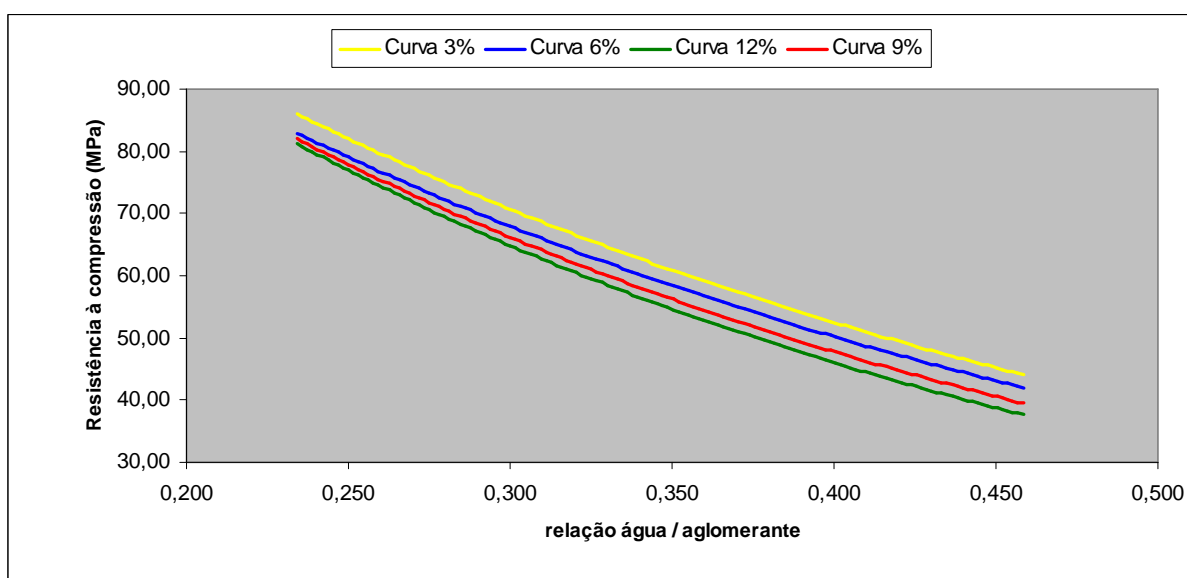


Figura 7.8 - curvas de ajuste para os resultados de 3 dias de idade.

Aos 28 dias de idade os resultados de resistência à compressão foram maiores quanto maior o teor de sílica ativa empregado. À medida que se diminui a relação água/aglomerante os ganhos percentuais de resistência também diminuiram. Para a relação 0,458 as diferenças entre os resultados de resistência à compressão foram significativamente inferiores as demais relações a/a, conforme apresentado na tabela 7.16.

Tabela 7.16 - diferença percentual entre os resultados obtidos para o teor de adição de sílica ativa de 3% e demais teores.

| A/A / %SA | 6%     | 9%     | 12%    |
|-----------|--------|--------|--------|
| 0,458     | 1,93%  | 3,15%  | 5,26%  |
| 0,382     | 13,15% | 14,53% | 18,20% |
| 0,318     | 10,63% | 11,37% | 15,67% |
| 0,265     | 9,20%  | 10,72% | 15,23% |
| 0,234     | 3,50%  | 6,17%  | 11,16% |

As menores diferenças entre os resultados de resistência à compressão para o relação a/a 0,458 possivelmente devem-se às menores quantidades de sílica ativa empregadas nos concretos produzidos, acarretando assim em menores ganhos de resistência devido ao efeito pozolânico. Também se imagina que a maior relação a/a tenha minimizado as diferenças entre os teores de sílica ativa.

Crê-se que os resultados inferiores de ganho de resistência dos concretos produzidos com relação a/a 0,234 devam-se ao fato de os concretos com este relação a/a possuírem uma zona de transição menos porosa que reduz significativamente sua porosidade com a adição de pequenos teores de sílica ativa. Também notamos que os resultados obtidos com o teor de sílica ativa de 12% aproximaram-se consideravelmente da possível máxima resistência esperada com os concretos produzidos.

Deve-se destacar que a interação entre o efeito da relação a/a e o teor de sílica ativa não apresentou resultados significativos na análise de variância efetuada. Apesar de se observar diferenças de maior ordem de grandeza no ganho de resistência das relações a/a extremas em relação às relações a/a intermediárias entre si para as idades de 3 e 28 dias.

Crê-se para que para determinar a possível existência de interação relação a/a x teor de sílica ativa seja necessário um estudo com um intervalo menor de relação a/a, pois na amplitude de relações a/a deste estudo não é possível observar padrão significativo de interação.

Em estudo efetuado por Bhanja & Sengupta (2004) os ganhos de resistência obtidos em virtude da alteração do teor de sílica ativa nas relações a/a extremas (0,26 e 0,42) diferiram dos ganhos obtidos nas relações a/a intermediárias (0,30, 0,34 e 0,38), que apresentaram resultados próximos de ganho de resistência entre si, no presente estudo ocorreu a mesma situação (figuras 7.9 e 7.10).

Comparando-se os resultados do estudo experimental para ganhos de resistência aos 28 dias de idade para concretos com teor de sílica ativa de 3% em relação a concretos com teores de 9% com os obtidos por Bhanja & Sengupta (2004) para concretos com teor de sílica ativa de 5% em relação a concretos com teores de sílica ativa de 10%, considerando-se as diferenças das relações água/cimento e dos teores de sílica ativa, observa-se valores de aproximadamente mesma ordem de grandeza e mesma tendência, à exceção da relação a/a mais alta que neste estudo apresentou menor ganho de resistência e no citado trabalho apresentou os maiores ganhos de resistência.

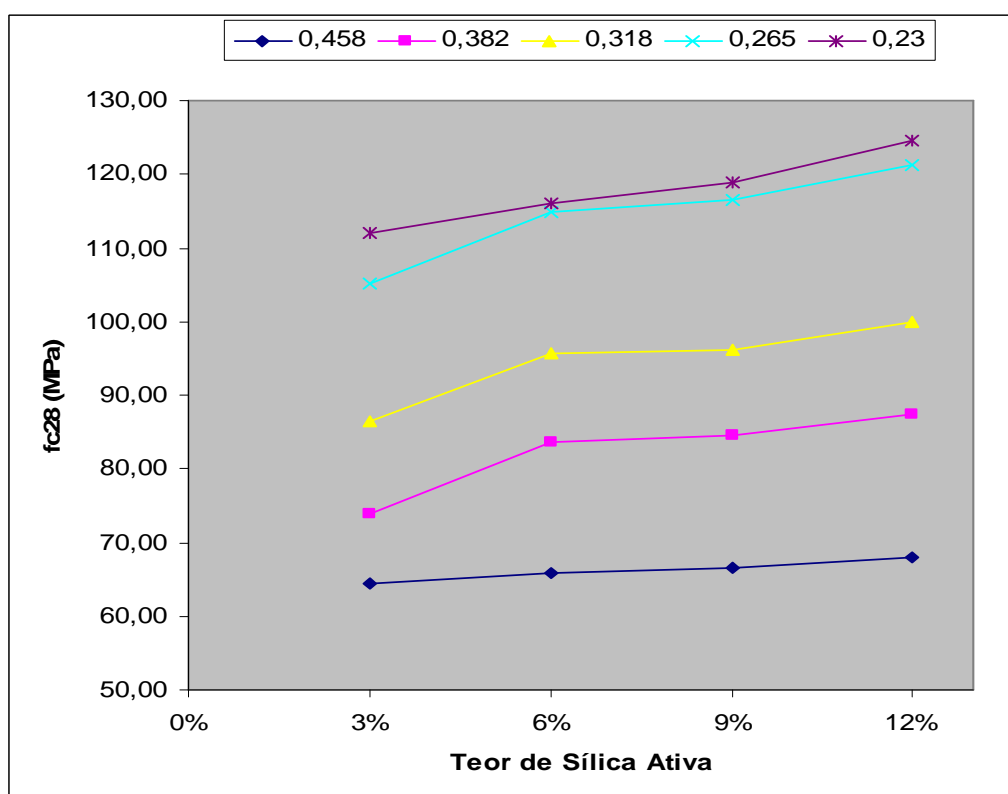


Figura 7.9 - evolução dos resultados de resistência à compressão.

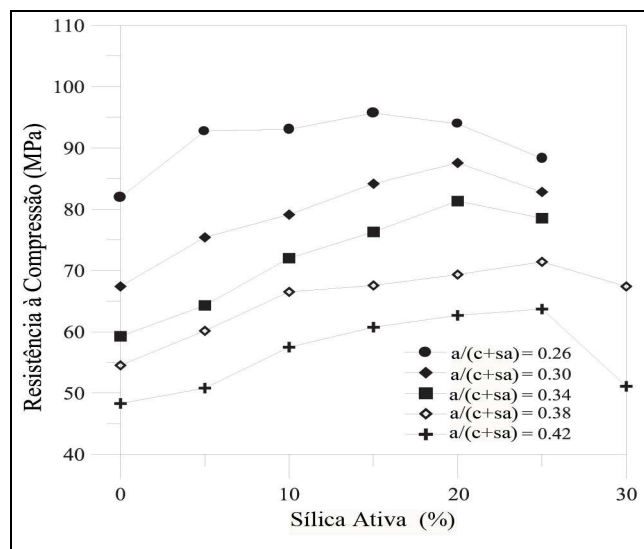


Figura 7.10 - evolução dos resultados de resistência à compressão (BHANJA & SENGUPTA, 2004).

Na figura 7.11, observando-se as curvas de ajuste dos resultados de resistência compressão aos 28 dias de idade, nota-se uma diferença significativa entre os resultados de resistência à compressão obtidos nos concretos dosados com a adição de 3% de sílica ativa e os dosados com adição de 6%. Entre os concretos produzidos com 6% e 9% de sílica ativa se observou diferenças pouco significativas, entre os concretos produzidos com 9% e 12% de teor de adição de sílica ativa a diferença entre os valores de resistência à compressão torna-se mais pronunciada à medida que se reduz a relação a/a.

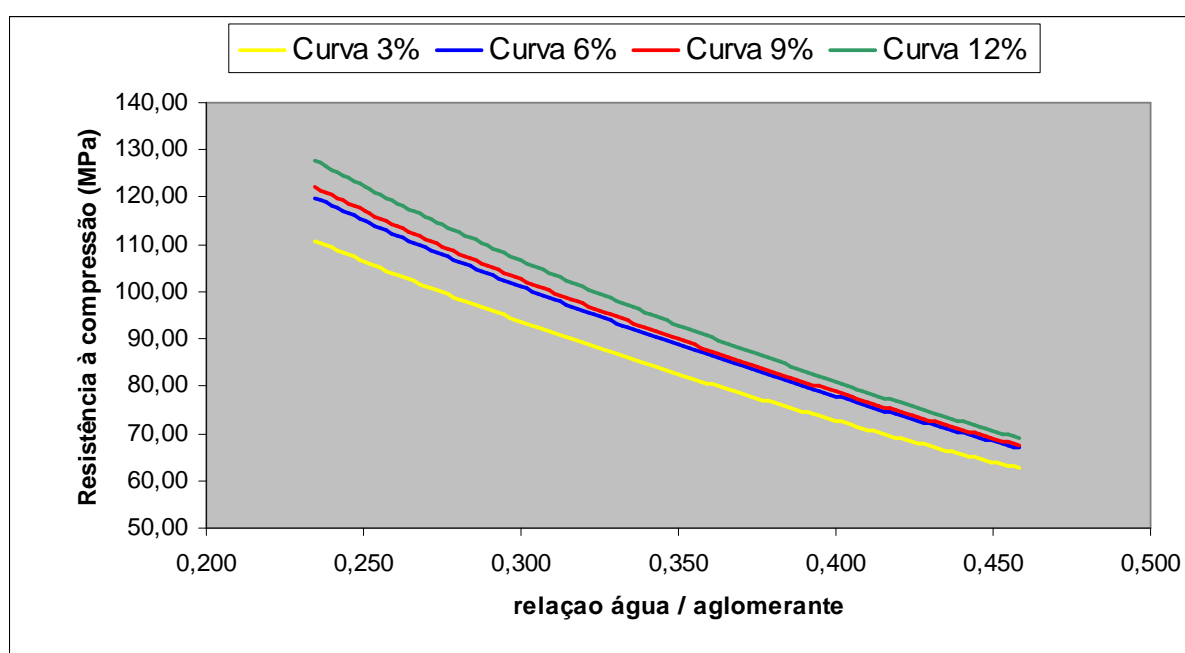


Figura 7.11 - curvas de ajuste para os resultados de 28 dias de idade.



Os resultados obtidos neste trabalho assemelharam-se bastante aos obtidos por Freitas (2005) com o uso de granito e como agregado graúdo. Freitas (2005) empregou em seu estudo cimento CPV ARI, no presente estudo se utilizou cimento CPV ARI RS. O primeiro cimento não possui adição de pozolana e o segundo cimento possui adição de aproximadamente 10% de pozolana. Em estudo efetuado por Shannag (2000) combinou-se pozolanas naturais empregadas na produção de cimentos pozolânicos com o uso de sílica ativa para a produção de CAR. O autor concluiu que o uso combinado destes materiais produz concretos com maiores valores de resistência à compressão que concretos produzidos com estes materiais empregados de maneira isolada. Crê-se que os valores próximos de resistência à compressão entre este estudo e o efetuado por Freitas (2005), quando se compara teores de adição de sílica ativa semelhantes sejam explicados por este fator, visto Mendes (2002) ter obtidos maiores resultados de resistência à compressão com concretos produzidos com agregado graúdo de granito. Este fato também explica os valores maiores de resistência à compressão obtidos neste trabalho quando comparados com os obtidos por Mendes (2002) para a produção de CAR com agregado graúdo de calcário.

### 7.3) Análise do Experimento Fatorial Cruzado de 2 Fatores

Através do uso de regressão linear múltipla determinou-se a equação de regressão que representa o resultado do experimento fatorial cruzado de 2 fatores realizado, obtendo-se a equação apresentada abaixo:

$$R_{28} = 194,570729 * e^{(-2,570221 * \text{RELAÇÃO A/A})} * e^{(0,014315 * \text{TEOR DE SÍLICA})}$$

(1)

O gráfico de valores observados x valores calculados apresentado na figura 7.12 confirma a aderência do modelo desenvolvido com os dados do experimento.

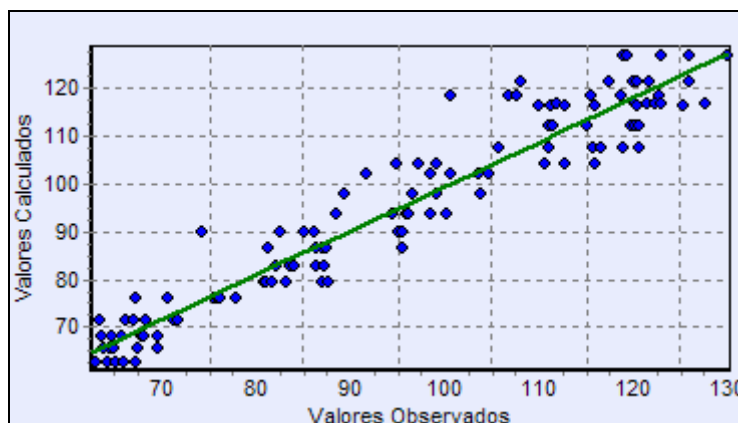


Figura 7.12 - gráfico de valores observados x valores calculados.

Os resultados estatísticos obtidos, apresentados na tabela 7.17, denotam a consistência da equação determinada: foi atingido alto coeficiente de determinação e resultados estatísticos bastante significativos.

Tabela 7.17 - resultados estatísticos da equação de regressão determinada.

**Informações complementares:**

- Número de variáveis: 3
- Número de variáveis consideradas: 3
- Número de dados: 120
- Número de dados considerados: 120

**Resultados Estatísticos:**

Linear

- Coeficiente de correlação: 0,965826
- Coeficiente de determinação: 0,932820
- Coeficiente de determinação ajustado: 0,931672
- Fisher-Snedecor: 812,29
- Significância: 0,01

Não-Linear

- Coeficiente de correlação: 0,960432
- Coeficiente de determinação: 0,922429

**Outliers do modelo: 4**

**Equação**

| Regressores      | Equação | T-Observado | Significância |
|------------------|---------|-------------|---------------|
| • FATOR A/A      | x       | -39,50      | 0,01          |
| • TEOR DE SÍLICA | x       | 8,93        | 0,01          |
| • R28            | ln(y)   |             |               |

A verificação da adequação da equação de ajuste determinada é efetuada plotando os resíduos padronizados em função da variável de resposta ajustada. Se o ajuste for bom, os resíduos seguirão um padrão aleatório. A suposição de homogeneidade da variância  $\sigma^2$  também pode ser verificada analisando o gráfico de

resíduos x variável de resposta (FONSECA, MARTINS, & TOLEDO, 1995; RIBEIRO & CATEN, 2001).

Observando o gráfico de resíduos x variável de resposta ajustada do modelo desenvolvido (figura 7.13) percebe-se a aleatoriedade dos resíduos. Nota-se a presença de outliers no modelo. A ocorrência destes deve-se a desvios nos ensaios efetuados.

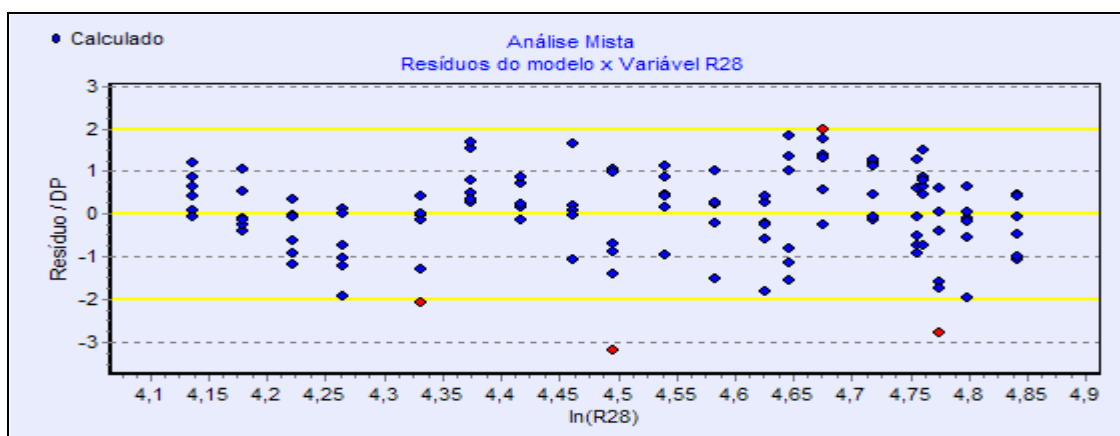


Figura 7.13 - curvas de ajuste para os resultados de 28 dias de idade.

Através da matriz de correlações (figura 7.14) pode-se detectar a ocorrência de multicolineariedade entre as variáveis independentes. Caso ocorra multicolineariedade há uma dependência entre as variáveis independentes. Sempre que há ocorrência de multicolineariedade, ou seja, quando os coeficientes entre as variáveis independentes aproxima-se de 100 há uma forte dependência entre as variáveis e não consegue-se distinguir se o efeito sobre a variável de resposta se deve a uma variável de resposta ou a outra, pois as variáveis correlacionadas sempre variam conjuntamente. No modelo desenvolvido observa-se a ausência de multicolineariedade (RIBEIRO & CATEN, 2001; TIROLA, 2005; GUJARATI, 2005).

| < Variável     | Forma Linear | RELAÇÃO A/A | TEOR DE SÍLICA | R28 |
|----------------|--------------|-------------|----------------|-----|
| RELAÇÃO A/A    | x            |             | 62             | 96  |
| TEOR DE SÍLICA | x            | 2           |                | 64  |
| R28            | ln(y)        | -94         | 19             |     |

Figura 7.14 - matriz de correlações entre as variáveis.

A verificação da normalidade dos resíduos pode ser realizada, dentre vários métodos, através de um dos métodos citados a seguir (GONÇALVES, 2002; TRIROLA, 2005; GUJARATI, 2005; NBR 14653-2, ANEXO A).

a) pelo exame do histograma dos resíduos amostrais padronizados, com o objetivo de verificar se sua forma guarda semelhança com a da curva normal;

b) pela análise do gráfico de resíduos padronizados versus valores ajustados, que deve apresentar pontos dispostos aleatoriamente, com a grande maioria situados no intervalo  $[-2;+2]$ ;

c) pela comparação da freqüência relativa dos resíduos padronizados nos intervalos de  $[-1;+1]$ ,  $[1,64;+1,64]$ ,  $[-1,96;+1,96]$  com as probabilidades da distribuição normal nos mesmo intervalos, ou seja, 68%, 90% e 95%.

No modelo desenvolvido observa-se a normalidade dos resíduos através dos três métodos citados, confirmando assim a validade do modelo desenvolvido (tabela 7.18 e figura 7.15).

Tabela 7.18 - normalidade dos resíduos.

- 67% dos resíduos situados entre -1 e +1 s
- 90% dos resíduos situados entre -1,64 e +1,64 s
- 95% dos resíduos situados entre -1,96 e +1,96 s

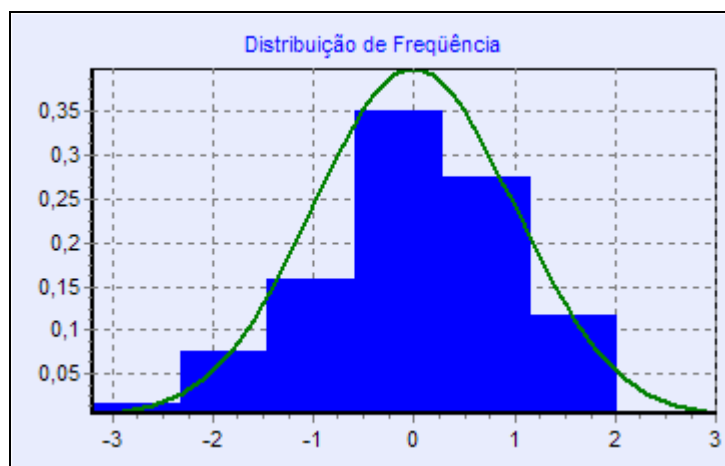


Figura 7.15 - distribuição de freqüência dos resíduos.

A equação desenvolvida pode ser empregada como equação de dosagem que complementa o método de dosagem de Mehta & Aitcin (1990) para os materiais empregados neste estudo, prevendo com grande aproximação os resultados de resistência à compressão a serem obtidos em função da relação a/a e do teor de sílica ativa empregado.

#### 7.4) Análise de Custos

Levantou-se junto aos fornecedores das matérias-primas empregadas neste estudo os custos médios das mesmas, praticados junto às centrais dosadoras de concreto da cidade de Curitiba e procedeu-se à análise de custos dos concretos produzidos. Os custos dos agregados foram transformados para R\$/kg através da massa unitária. Nas areias considerou-se o coeficiente de inchamento para a umidade média de recebimento, conforme apresentado nas tabelas 7.19 e 7.20.

Tabela 7.19 - dados dos agregados empregados para determinação do valor de R\$/kg.

| Areia Natural             |       |
|---------------------------|-------|
| Umidade de recebimento    | 6%    |
| Coeficiente de inchamento | 23%   |
| Massa unitária            | 1,445 |
| Areia Industrial          |       |
| Umidade de recebimento    | 1,5%  |
| Coeficiente de inchamento | 10%   |
| Massa unitária            | 1,62  |
| Brita 0                   |       |
| Massa unitária            | 1,49  |

Tabela 7.20 - custo das matérias primas empregadas.

| Material         | Valor        | Unidade de venda | R\$/kg |
|------------------|--------------|------------------|--------|
| Cimento          | R\$ 290,00   | Tonelada         | 0,290  |
| Sílica ativa     | R\$ 1.300,00 | Tonelada         | 1,300  |
| Brita 0          | R\$ 39,00    | m <sup>3</sup>   | 0,0261 |
| Areia Natural    | R\$ 45,00    | m <sup>3</sup>   | 0,0383 |
| Areia Artificial | R\$ 46,00    | m <sup>3</sup>   | 0,0312 |
| Aditivo          | R\$ 11,30    | kg               | 11,300 |

Quanto maior a resistência alcançada maior o custo total de matéria prima. Entretanto o valor de R\$/MPa apresenta pontos ótimos. Percebe-se que quando se utiliza consumos de sílica ativa de 9% e 12% o valor de R\$/MPa destes é superior aos valores obtidos para as dosagens de 3% e 6%, mesmo com as maiores resistências à compressão obtidas com o aumento com consumo de sílica ativa. Para o traço D com relação a/a de 0,234 o valor de R\$/MPa foi superior para a dosagem de 6% em relação à dosagem de 3%, conforme pode ser observado na tabela 7.21.

Tabela 7.21 - custos dos concretos produzidos em reais.

| Traço | Teor de Sílica Ativa | CPV RS | Sílica Ativa | Areia Natural | Areia Artificial | Brita 0 | Aditivo | Valor Total (m <sup>3</sup> ) | Resistência Média 28D (MPa) | R\$/MPa |
|-------|----------------------|--------|--------------|---------------|------------------|---------|---------|-------------------------------|-----------------------------|---------|
| A1    | 3%                   | 118,03 | 16,90        | 10,69         | 13,63            | 27,33   | 33,22   | 219,80                        | 64,55                       | 3,40    |
|       | 6%                   | 113,39 | 32,50        | 10,70         | 13,62            | 27,33   | 32,91   | 230,44                        | 65,80                       | 3,50    |
|       | 9%                   | 109,04 | 48,10        | 10,70         | 13,62            | 27,33   | 32,67   | 241,45                        | 66,59                       | 3,63    |
|       | 12%                  | 104,40 | 63,70        | 10,70         | 13,62            | 27,33   | 34,66   | 254,40                        | 67,95                       | 3,74    |
| A     | 3%                   | 130,50 | 18,20        | 10,42         | 13,29            | 27,79   | 52,43   | 252,63                        | 73,86                       | 3,42    |
|       | 6%                   | 125,57 | 36,40        | 10,42         | 13,29            | 27,79   | 52,09   | 265,56                        | 83,57                       | 3,18    |
|       | 9%                   | 120,64 | 53,30        | 10,44         | 13,29            | 27,79   | 54,22   | 279,68                        | 84,59                       | 3,31    |
|       | 12%                  | 115,71 | 70,20        | 10,42         | 13,29            | 27,79   | 56,31   | 293,72                        | 87,31                       | 3,36    |
| B     | 3%                   | 143,26 | 19,50        | 10,19         | 12,95            | 28,25   | 69,02   | 283,17                        | 86,42                       | 3,28    |
|       | 6%                   | 137,75 | 39,00        | 10,18         | 12,96            | 28,25   | 74,18   | 302,32                        | 95,61                       | 3,16    |
|       | 9%                   | 132,24 | 58,50        | 10,18         | 12,96            | 28,25   | 79,26   | 321,38                        | 96,24                       | 3,34    |
|       | 12%                  | 126,73 | 78,00        | 10,19         | 12,95            | 28,25   | 84,24   | 340,36                        | 99,97                       | 3,40    |
| C     | 3%                   | 155,73 | 20,80        | 9,92          | 12,64            | 28,71   | 124,98  | 352,77                        | 105,13                      | 3,36    |
|       | 6%                   | 149,93 | 42,90        | 9,92          | 12,64            | 28,71   | 130,52  | 374,62                        | 114,80                      | 3,26    |
|       | 9%                   | 143,84 | 63,70        | 9,91          | 12,62            | 28,71   | 135,49  | 394,28                        | 116,40                      | 3,39    |
|       | 12%                  | 138,04 | 84,50        | 9,92          | 12,64            | 28,71   | 146,72  | 420,53                        | 121,14                      | 3,47    |
| D     | 3%                   | 164,14 | 22,10        | 9,65          | 12,29            | 29,18   | 197,64  | 435,00                        | 112,03                      | 3,88    |
|       | 6%                   | 157,76 | 44,20        | 9,65          | 12,29            | 29,18   | 202,47  | 455,56                        | 115,95                      | 3,93    |
|       | 9%                   | 151,96 | 66,30        | 9,65          | 12,29            | 29,18   | 214,42  | 483,80                        | 118,95                      | 4,07    |
|       | 12%                  | 145,29 | 88,40        | 9,65          | 12,29            | 29,18   | 225,04  | 509,85                        | 124,53                      | 4,09    |

Este aumento de valor de R\$/MPa para dosagens maiores de sílica ativa deve-se ao fato de os custos de sílica ativa serem uma parcela considerável do custo total dos concretos produzidos. Outro índice de considerável influência nos custos totais dos concretos é o superplastificante: à medida que se aumentou o teor de sílica ativa observou-se também experimentalmente um aumento no consumo de superplastificante, para a obtenção do abatimento desejado, sendo este mais significativo para as menores relações a/a.

Os altos teores de superplastificante na produção de CAR são encontrados em grande parte dos estudos desenvolvidos, muitas vezes em teores superiores ao ponto de saturação. Altas quantidades de sílica ativa tendem a consumir altas dosagens de superplastificante. Este fato é provocado pela alta finura das partículas de sílica ativa que adsorvem superplastificante em sua superfície e pela maior coesão encontrada nas misturas (KHATRI & SIRIVIVATNANON, 1995 *apud* MAZLOOM, RAMEZANIANPOU & BROOKS, 2004).

Na tabela 7.22 apresenta-se o teor de consumo de superplastificante para o estudo experimental desenvolvido.

Tabela 7.22 - teor de consumo de superplastificante em teores de sólidos em relação à massa de aglomerante.

| Traço | Teor de Sílica Ativa | Consumo de superplastificante |
|-------|----------------------|-------------------------------|
| A1    | 3%                   | 0,193%                        |
|       | 6%                   | 0,193%                        |
|       | 9%                   | 0,193%                        |
|       | 12%                  | 0,207%                        |
| A     | 3%                   | 0,276%                        |
|       | 6%                   | 0,276%                        |
|       | 9%                   | 0,290%                        |
|       | 12%                  | 0,304%                        |
| B     | 3%                   | 0,331%                        |
|       | 6%                   | 0,359%                        |
|       | 9%                   | 0,386%                        |
|       | 12%                  | 0,414%                        |
| C     | 3%                   | 0,552%                        |
|       | 6%                   | 0,580%                        |
|       | 9%                   | 0,607%                        |
|       | 12%                  | 0,662%                        |
| D     | 3%                   | 0,828%                        |
|       | 6%                   | 0,856%                        |
|       | 9%                   | 0,911%                        |
|       | 12%                  | 0,966%                        |

Na figura 7.16 observa-se a relação entre os custos de matéria prima e a resistência à compressão, nota-se que os concretos produzidos com teor de sílica ativa de 12% não seguem o padrão dos demais concretos produzidos, apresentando custos de matéria prima bastante superiores aos produzidos com menores teores.

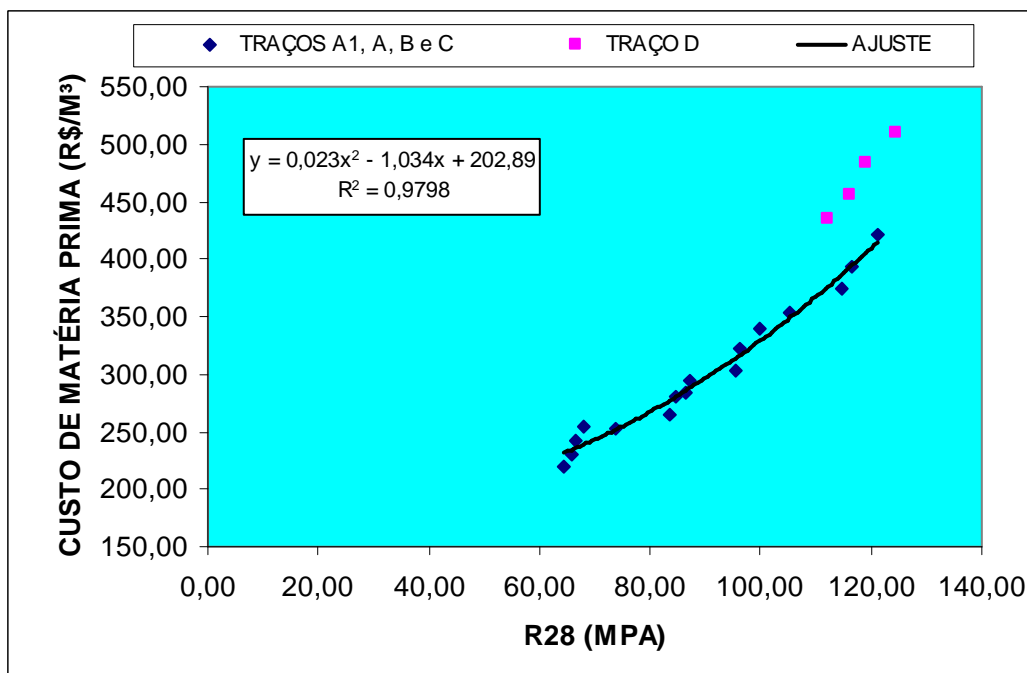


Figura 7.16 – Custos de matéria prima x resistência à compressão.

Oluokum (2003) *apud* Bhanja & Sengupta (2004) inferiu que o teor de sílica ativa ótimo, que conjuga fatores técnicos e econômicos, é uma função da relação a/a. Bhanja & Sengupta (2004) e Toutanji & El-Korchi (1995) também chegaram à mesma conclusão em seus estudos.

Neste trabalho observou-se que o teor de adição de sílica ativa que produziu o menor índice de R\$/MPa foi o de 6% para as relações a/a de 0,382, 0,318 e 0,265. Para as relações a/a de 0,458 e 0,230 o teor de sílica ativa que produziu o menor índice de R\$/MPa foi o de 3%. Esta situação deve-se ao fato de que para a relação a/a de 0,458, os ganhos de resistência com o aumento de consumo de sílica ativa são menos expressivos. Para a relação a/a de 0,23 o menor valor de R\$/MPa obtido com o teor de sílica ativa de 3% deve-se aos altos consumos de superplastificante que aumentam consideravelmente os custos de produção dos concretos.

Observa-se que para as relações a/a 0,382, 0,318 e 0,265 os valores da relação R\$/MPa foram inferiores que os obtidos para as relações a/a 0,458 e 0,230, sendo a relação R\$/MPa da relação a/a 0,230 o maior dentre todos os estudados (figura 7.17). Os fatos citados no parágrafo anterior também são a causa deste ocorrido, influenciando também na relação a/a 0,458 as menores resistências obtidas.



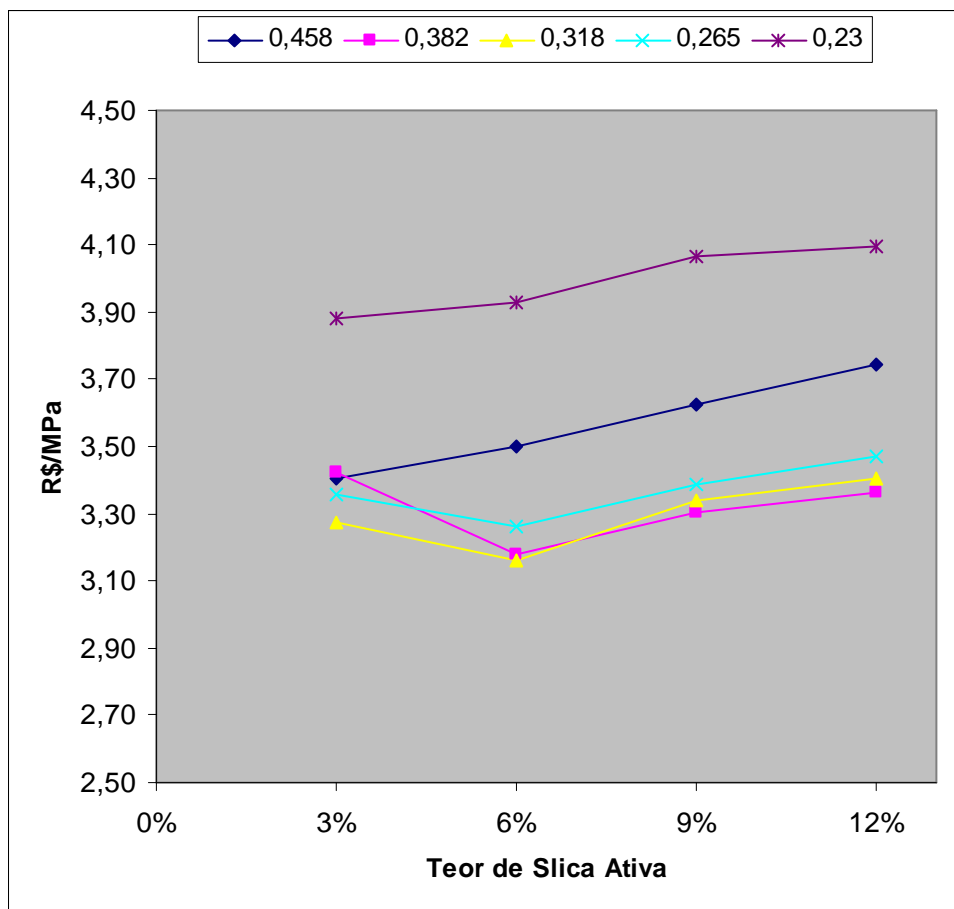


Figura 7.17 - R\$/MPa x fator a/a dos concretos produzidos.

Comparando-se os valores da relação R\$/MPa obtidos neste estudo com dosagens de concretos usuais observa-se que os valores dos CAR são significativamente inferiores aos obtidos para os concretos usuais. À medida que se aumenta a resistência dos concretos usuais a diferença da relação R\$/MPa em relação aos traços de CAR reduz-se.

Os custos de matéria-prima de concretos usuais apresentados na tabela 7.23, foram obtidos através de estudos de dosagem efetuados por produtores de concreto locais e referem-se aos valores de  $f_{c28}$ .

Tabela 7.23 - custos de matéria prima e R\$/MPa para concretos usuais (fonte: centrais dosadoras de concreto de Curitiba).

| Resistência Média 28D (MPa) | CPV RS | Areia Natural | Areia Artificial | Brita 0 | Aditivo | Valor Total | R\$ / MPA |
|-----------------------------|--------|---------------|------------------|---------|---------|-------------|-----------|
| 15                          | 53,65  | 21,91         | 17,85            | 22,34   | 3,70    | 119,45      | 7,96      |
| 18                          | 58,87  | 21,45         | 17,47            | 22,60   | 18,35   | 138,74      | 7,71      |
| 20                          | 62,35  | 21,10         | 17,19            | 22,76   | 19,44   | 142,84      | 7,14      |
| 25                          | 71,34  | 20,30         | 16,54            | 23,15   | 22,24   | 153,56      | 6,14      |
| 30                          | 80,62  | 19,46         | 15,85            | 23,57   | 25,13   | 164,63      | 5,49      |
| 35                          | 91,06  | 18,58         | 15,13            | 23,99   | 28,39   | 177,14      | 5,06      |
| 40                          | 102,37 | 17,58         | 14,32            | 24,40   | 31,91   | 190,59      | 4,76      |
| 45                          | 114,84 | 16,55         | 13,48            | 24,82   | 35,80   | 205,48      | 4,57      |

Na figura 7.18 observa-se a considerável redução da relação R\$/MPa quando se analisa concretos usuais em relação ao CAR.

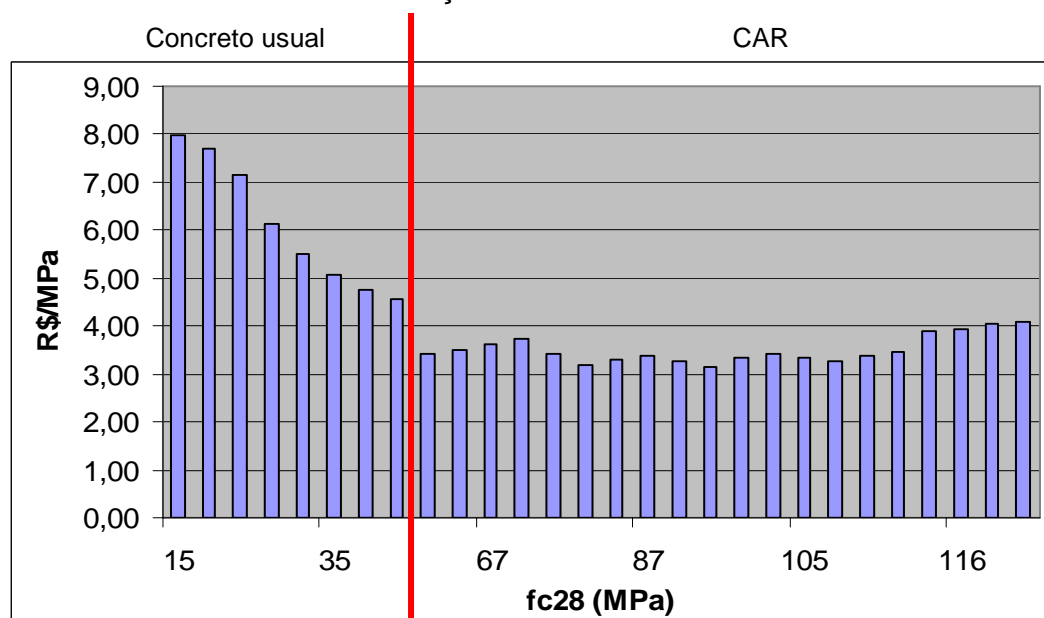


Figura 7.18 - gráfico de fc28 x R\$/MPa.

Quando efetuada a análise de viabilidade de emprego de CAR em estruturas deve ser considerada além da otimização do índice de R\$/MPa, a redução do volume total de concreto empregado e ganhos de área útil.

### 7.5) Análise Quanto ao Consumo de Cimento

Quando se utiliza CAR o potencial do cimento é melhor aproveitado, pois se emprega uma quantidade de água mais próxima à necessária para reagir com o cimento. Em concretos usuais emprega-se uma significativa quantidade de água para se obter o abatimento desejado, além da necessária para hidratar o cimento (AITCIN, 2000).

A adição de sílica ativa, que é um resíduo industrial, reduz também a quantidade de cimento necessária para se obter 1 MPa de resistência à compressão. Estes fatos podem ser observados claramente nos resultados obtidos no presente estudo.

Com base nos resultados experimentais pode-se afirmar que quanto menor a relação  $a/a$  e quanto maior o teor de sílica ativa empregado menor a quantidade de cimento necessária para se obter 1 MPa de resistência à compressão, como apresentado na tabela 7.24 e na figura 7.19.

Tabela 7.24 - evolução do kg/MPa em função do tipo de concreto produzido e da relação  $a/a$ .

| Traço | Teor de Sílica Ativa | Kg/MPa |
|-------|----------------------|--------|
| A1    | 3%                   | 6,305  |
|       | 6%                   | 5,943  |
|       | 9%                   | 5,647  |
|       | 12%                  | 5,298  |
| A     | 3%                   | 6,092  |
|       | 6%                   | 5,181  |
|       | 9%                   | 4,918  |
|       | 12%                  | 4,570  |
| B     | 3%                   | 5,716  |
|       | 6%                   | 4,968  |
|       | 9%                   | 4,738  |
|       | 12%                  | 4,372  |
| C     | 3%                   | 5,108  |
|       | 6%                   | 4,503  |
|       | 9%                   | 4,261  |
|       | 12%                  | 3,930  |
| D     | 3%                   | 5,052  |
|       | 6%                   | 4,692  |
|       | 9%                   | 4,405  |
|       | 12%                  | 4,023  |

Os valores de kg/MPa obtidos para a relação a/a 0,265 foram inferiores aos obtidos para a relação a/a de 0,230. Esta situação deve-se ao fato de as diferenças de resistência à compressão entre estas relações a/a serem de pequena amplitude, mesmo com o maior consumo de cimento dos traços com relação a/a de 0,230. Crê-se que esta pequena amplitude entre os resultados de resistência à compressão deve-se ao fato que os traços confeccionados com estas relações a/a apresentarem resultados de resistência à compressão bastante próximos à possível resistência máxima possível de ser obtida com os materiais empregados.

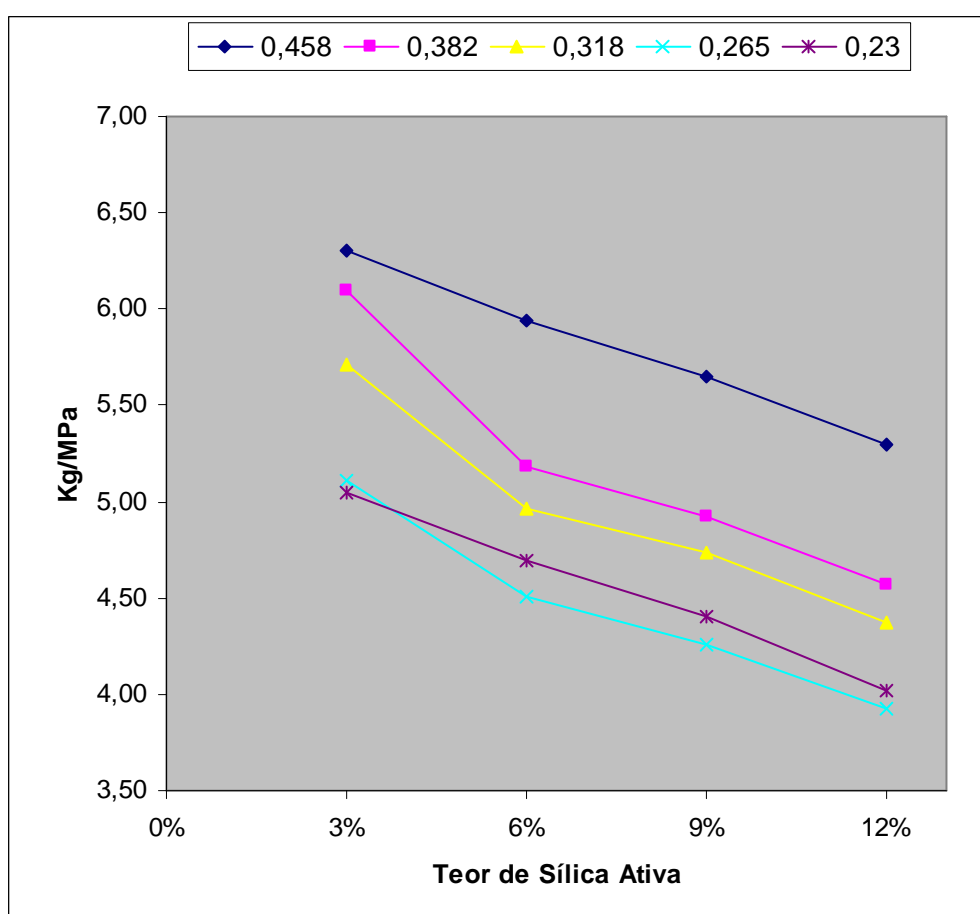


Figura 7.19 - evolução do kg/MPa.

Concretos usuais apresentam altos valores de kg/MPa conforme pode ser observado na tabela 7.25.

Tabela 7.25 - kg/MPa para concretos convencionais (fonte:centrais dosadoras de concreto de Curitiba – PR).

| Resistência Média 28D (MPa) | Kg/MPa |
|-----------------------------|--------|
| 15                          | 12,33  |
| 18                          | 11,28  |
| 20                          | 10,75  |
| 25                          | 9,84   |
| 30                          | 9,27   |
| 35                          | 8,97   |
| 40                          | 8,83   |
| 45                          | 8,80   |

Quando se compara os valores de kg/MPa entre CAR e concretos usuais observa-se diferenças significativas: quanto maior a resistência à compressão dos concretos usuais menor a amplitude desta diferença (figura 7.20).

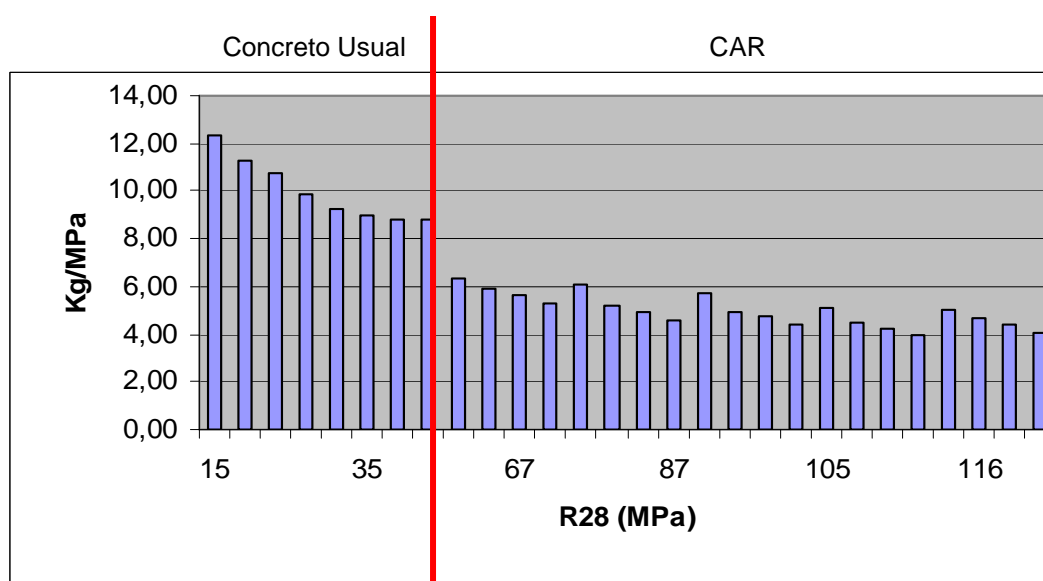


Figura 7.20 - gráfico de  $f_{c28}$  x Kg/MPa.

Com uma redução do consumo de cimento tem-se uma redução da quantidade de CO<sub>2</sub> necessária para a produção dos concretos. Observa-se que os concretos produzidos apresentam maior consumo de cimento total à medida que se aumenta a resistência à compressão e conseqüentemente tem-se uma maior quantidade de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup>. Entretanto ao se analisar a quantidade de kg de CO<sub>2</sub>/MPa de resistência alcançada observa-se que quanto maior a resistência à compressão e maior o teor de sílica ativa empregado menor a quantidade de CO<sub>2</sub> necessária para se obter 1 MPa de resistência.

A análise que está sendo feita é simplista, pois leva em conta somente a emissão de CO<sub>2</sub> na fabricação de cimento. Uma análise mais completa deve considerar a produção de agregado, mistura, energia gasta no processo de concretagem, os impactos devidos à produção de aditivos e o impacto positivo do uso da sílica como adição. Porém, algumas considerações podem ser feitas:

- a) o método de dosagem apresenta quantidades de agregado por unidade de volume semelhantes;
- b) como a quantidade de aditivo aplicada comparativamente ao volume de concreto é pequena, o efeito das emissões também é;
- c) os concretos obtidos tem a mesma consistência e mesmo sendo em alguns casos com características pegajosas têm energias semelhantes e são trabalháveis nas condições usuais de campo.

Portanto, para um processo inicial de análise o procedimento adotado fornece um primeiro balizamento importante.

Segundo informações do fabricante de cimento, uma tonelada de cimento CPV-ARI RS emite durante sua fabricação aproximadamente 600 kg de CO<sub>2</sub>. Calculamos os teores de CO<sub>2</sub> necessários para a produção de cada traço do presente estudo em função de seu consumo de cimento, obtendo os resultados apresentados na tabela 7.27 e figura 7.21.

Na tabela 7.26 são apresentados os valores de kg CO<sub>2</sub>/MPa para concretos usuais.

Tabela 7.26 – kg CO<sub>2</sub>/MPa para concretos usuais (fonte:centrais dosadoras de concreto de Curitiba – PR).

| Resistência Média 28D (MPa) | Kg CO <sub>2</sub> / MPa |
|-----------------------------|--------------------------|
| 15                          | 7,40                     |
| 18                          | 6,77                     |
| 20                          | 6,45                     |
| 25                          | 5,90                     |
| 30                          | 5,56                     |
| 35                          | 5,38                     |
| 40                          | 5,30                     |
| 45                          | 5,28                     |

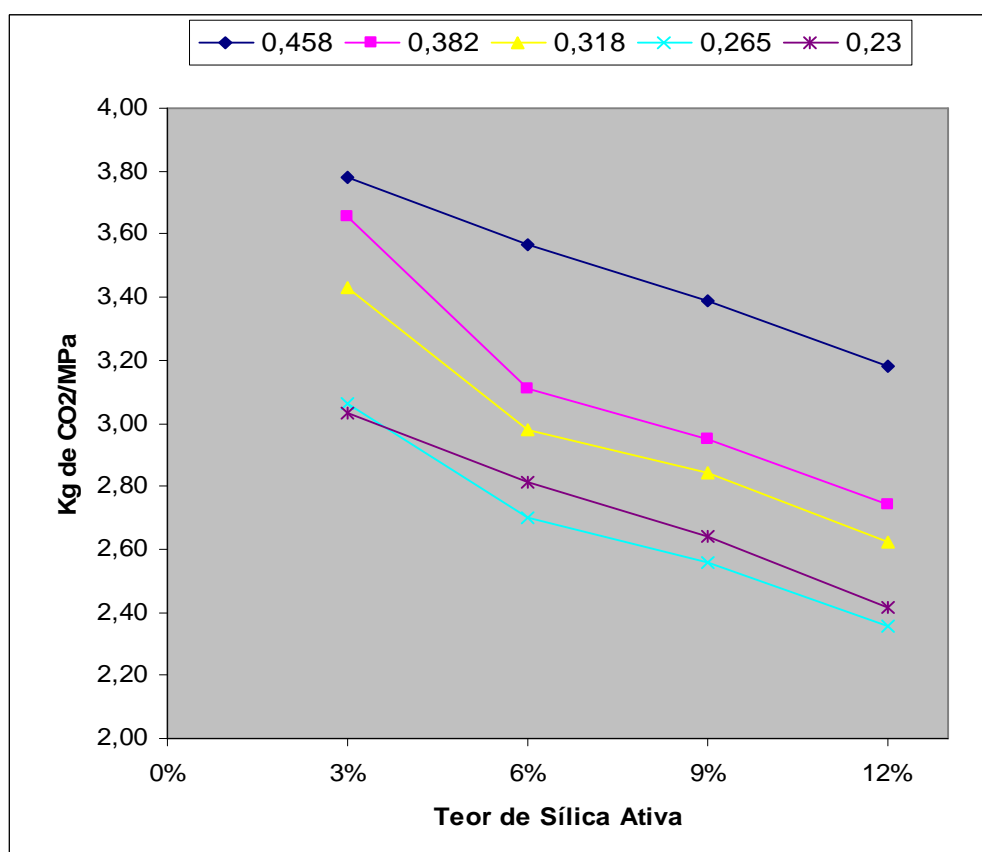


figura 7.21 – kg de emissão de CO<sub>2</sub> por MPa de resistência à compressão.

Tabela 7.27 - emissão de CO<sub>2</sub> por MPa de resistência à compressão.

| Traço | Teor de Sílica Ativa | Kg CO <sub>2</sub> /MPa |
|-------|----------------------|-------------------------|
| A1    | 3%                   | 3,783                   |
|       | 6%                   | 3,566                   |
|       | 9%                   | 3,388                   |
|       | 12%                  | 3,179                   |
| A     | 3%                   | 3,655                   |
|       | 6%                   | 3,109                   |
|       | 9%                   | 2,951                   |
|       | 12%                  | 2,742                   |
| B     | 3%                   | 3,430                   |
|       | 6%                   | 2,981                   |
|       | 9%                   | 2,843                   |
|       | 12%                  | 2,623                   |
| C     | 3%                   | 3,065                   |
|       | 6%                   | 2,702                   |
|       | 9%                   | 2,557                   |
|       | 12%                  | 2,358                   |
| D     | 3%                   | 3,031                   |
|       | 6%                   | 2,815                   |
|       | 9%                   | 2,643                   |
|       | 12%                  | 2,414                   |

Como o índice kg de CO<sub>2</sub>/MPa é função do indicador de Kg/MPa os resultados seguem a mesma tendência apresentada para o kg/MPa, ou seja, quanto menor a relação a/a e quanto maior o teor de sílica ativa empregado menor a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida para se obter 1 MPa de resistência à compressão. As conclusões quanto aos valores encontrados para os traços C e D também são iguais em ambos os índices.

Comparando-se os valores de emissão de CO<sub>2</sub> para concretos usuais, como no indicador kg/MPa, observam-se diferenças significativas quando compara-se os valores de CAR e concretos usuais (figura 7.22).



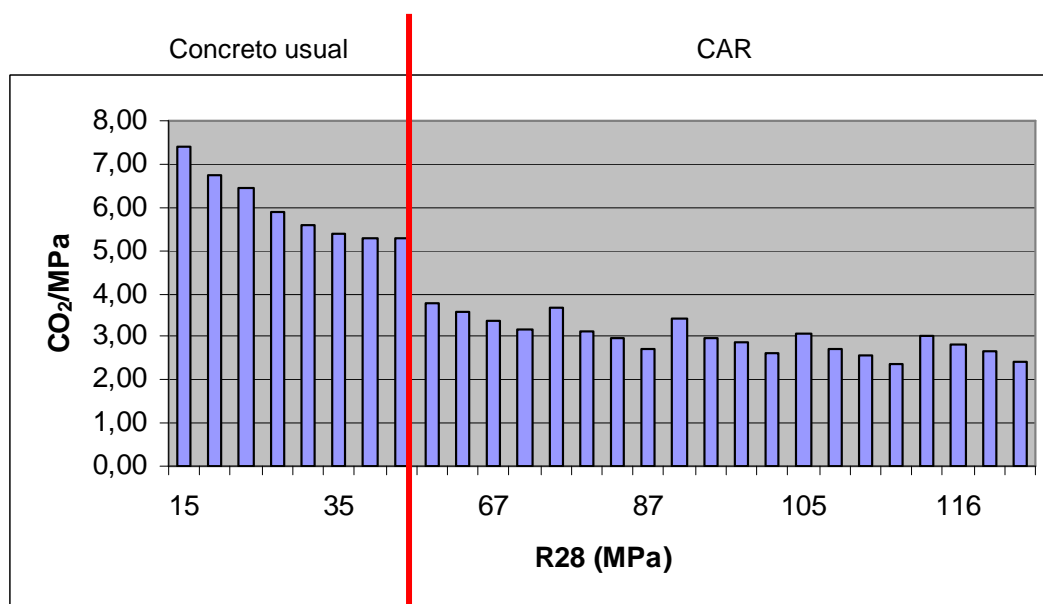


Figura 7.22 - gráfico de  $f_{c28}$  x  $CO_2/MPa$ .

#### 7.6) Análise de Calorimetria

Para a relação  $a/a$  de 0,458 (figura 7.23) observou-se um período de dormência de aproximadamente 5 horas e valor máximo de calor de hidratação com aproximadamente 10 horas de ensaio. Na pasta produzida com 3% de teor de sílica ativa observou-se o maior valor de temperatura, 70°C. As pastas com teores de 6% e 9% de sílica ativa apresentaram resultados equivalentes, e a pasta com teor de 12% de sílica ativa apresentou o menor valor de calor de hidratação. Esta era a tendência prevista visto que quanto maior o teor de sílica ativa menor a quantidade de cimento empregada.

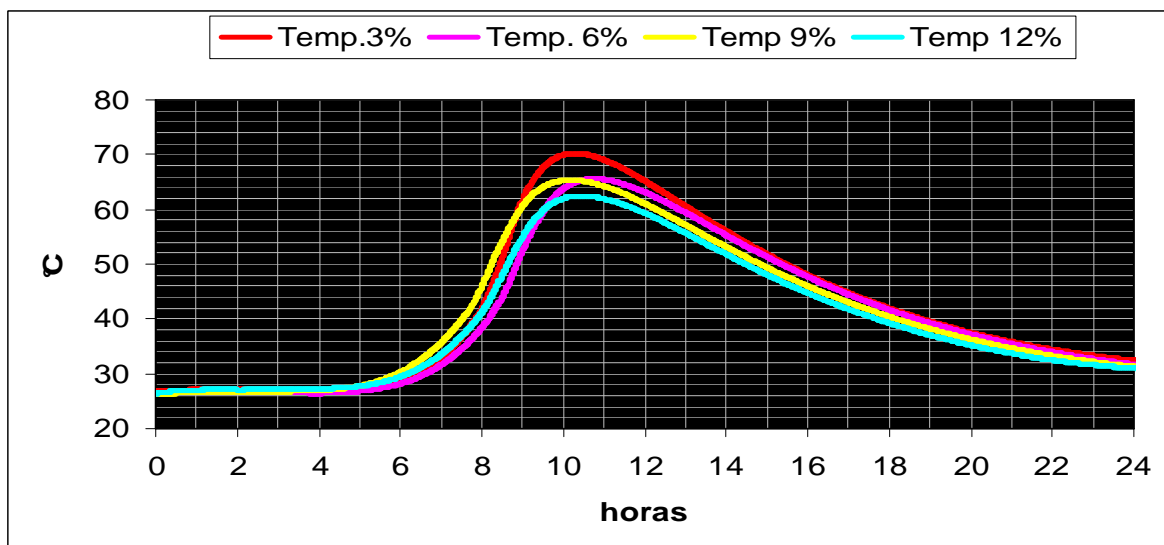


Figura 7.23 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,458.

Para a relação a/a de 0,382 (figura 7.24) observou-se um período de dormência de aproximadamente 6 horas e valor máximo de calor de hidratação com aproximadamente 11 horas de ensaio. Como descrito anteriormente, quanto maior o teor de sílica ativa menor o calor de hidratação, sendo os valores para 6% e 9% de sílica ativa equivalentes. O pico de temperatura no teor de sílica ativa de 3% foi de 73°C.

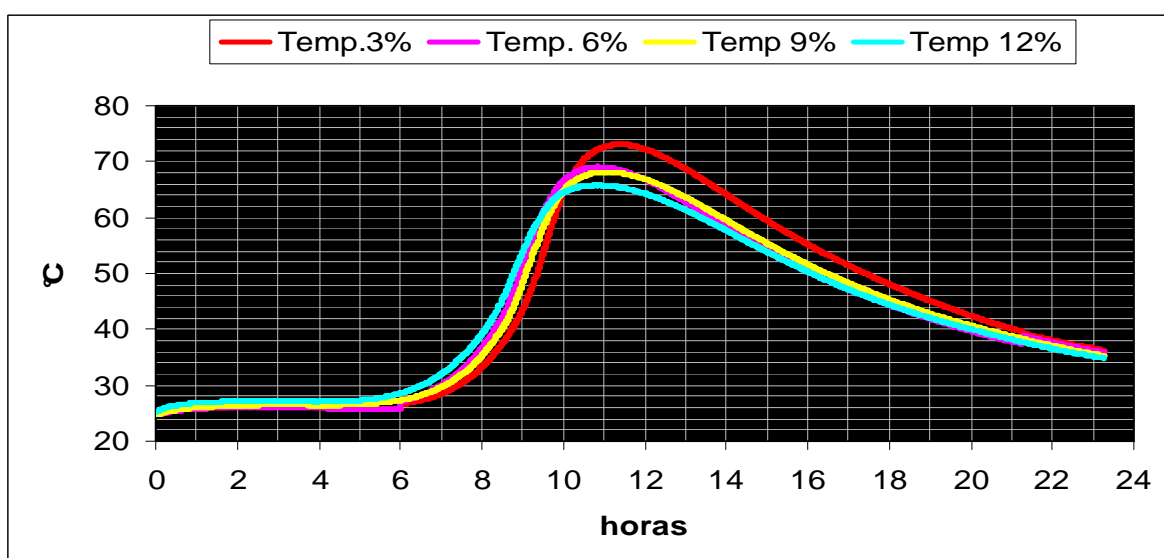


Figura 7.24 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,382.

Para a relação a/a de 0,318 (figura 7.25) observou-se um período de dormência de aproximadamente 7 horas e valor máximo de calor de hidratação com aproximadamente 12 horas de ensaio. O pico de temperatura no teor de sílica ativa de 3% foi de 76,4°C. Quanto maior o teor de sílica ativa menor o calor de hidratação, com os valores de 6% e 9% de teor de sílica ativa bastante próximos.

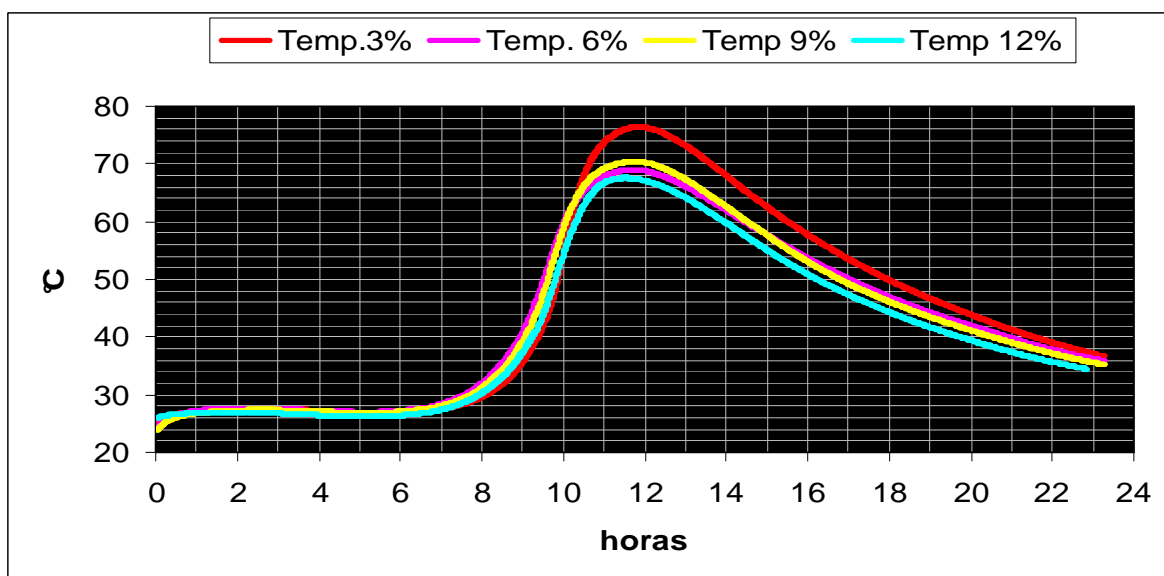


Figura 7.25 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,318.

Para a relação a/a de 0,265 (figura 7.26) observou-se um período de dormência de aproximadamente 9 horas e valor máximo de calor de hidratação com aproximadamente 14 horas de ensaio. O pico de temperatura no teor de sílica ativa de 3% foi de 74,8°C. Neste ensaio observou-se valores de calor de hidratação equivalentes para os teores de sílica ativa de 6% e 9% e menor valor para o teor de 12%.

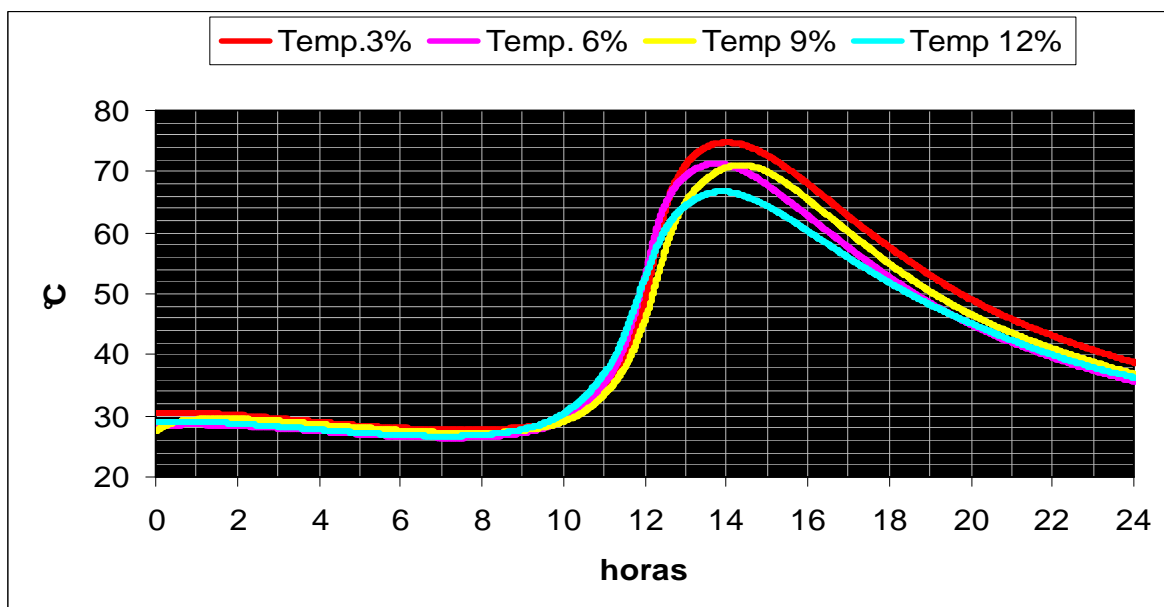


Figura 7.26 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,265.

Para a relação a/a de 0,230 (figura 7.27) observou-se um período de dormência de aproximadamente 12 horas e valor máximo de calor de hidratação com aproximadamente 17 horas de ensaio. O pico de temperatura no teor de sílica ativa de 3% foi de 74°C. Neste ensaio observou-se valores de calor de hidratação equivalentes para os teores de sílica ativa de 6%, 9% e 12%.

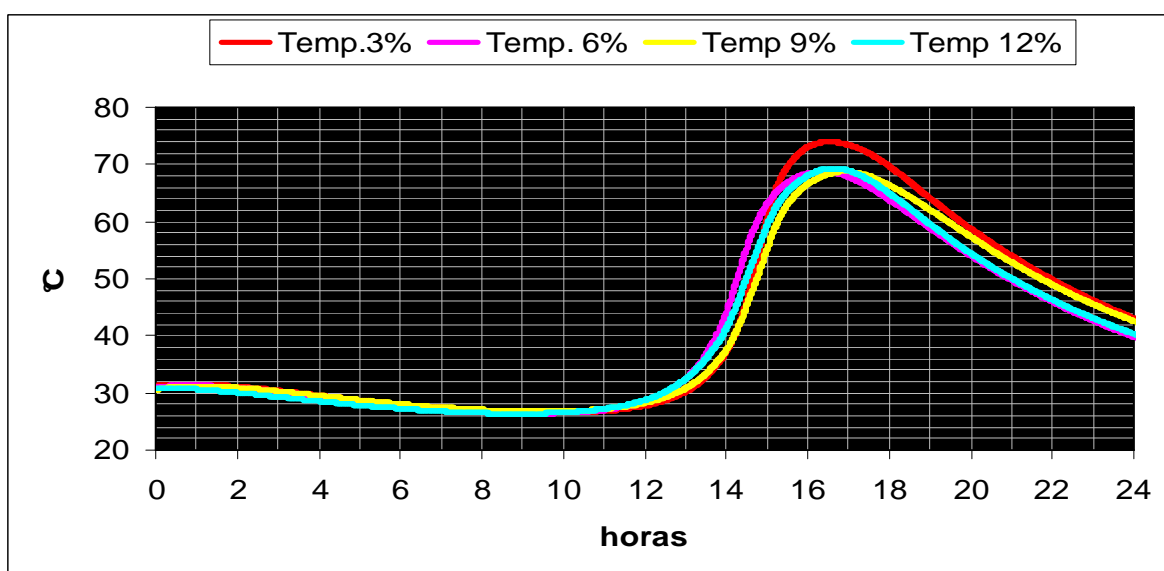


Figura 7.27 - curva de calor de hidratação x tempo para a relação a/a 0,230.

Percebeu-se que quanto maior o teor de sílica ativa menor o calor de hidratação gerado, o que já era esperado em função das menores quantidades de cimento empregadas, substituídas por sílica ativa. Notou-se que a redução de calor de hidratação é bastante significativa quando se aumenta o teor de sílica ativa de 3% para 6%, quando se aumenta o teor de sílica ativa de 6% para 9% os valores de calor de hidratação permaneceram aproximadamente iguais, ao se aumentar o teor de sílica ativa de 9% para 12% há uma ligeira redução no calor de hidratação.

À medida que se reduz a relação a/a é necessária uma maior dose de superplastificante para se obter o abatimento desejado. Este aumento na dose provocou um maior tempo de dormência do concreto, retardando o início de pega. O tempo entre o início e fim de pega não foi influenciado significativamente pelo aumento na dose do aditivo.

Langan, Wang & Ward (2002) observaram que quando se adiciona sílica ativa em concretos com baixa relação a/a a hidratação do cimento é retardada e o período de dormência do concreto é aumentado. Estes pesquisadores identificaram também que quando se adiciona cinza volante no concreto aumenta-se a hidratação inicial do cimento, porém a hidratação é retardada no período de dormência e aceleração, sendo a hidratação acelerada após o período de aceleração. Quando se combinam os dois materiais a hidratação do cimento é consideravelmente retardada.

O aumento do teor de sílica ativa promoveu também um aumento no consumo de superplastificante, além de aumentar o período de dormência do concreto. Para concretos com necessidade de alta resistência inicial é mais vantajoso optar por concretos com menores teores de sílica ativa.

Os ensaios realizados foram efetuados com materiais com temperatura controlada em condições laboratoriais, sendo observado nas análises térmicas temperaturas de pico na ordem de 70°C. Crê-se que em condições de produção industrial a temperatura obtida poderá ser superior à obtida no experimento, principalmente se empregado cimento quente. Diante deste fato e do já exposto neste trabalho pode-se afirmar que o controle de temperatura dos materiais e do concreto produzido é de vital importância na produção de CAR em central dosadora de concreto.

A temperatura do concreto fresco pode ser calculada a partir da temperatura das matérias primas pela equação:

$$T = [0,22(T_m M_m + T_c M_c) + T_a M_a] / [0,22(M_m + M_c) + M_a] \quad (2)$$

Na fórmula T representa a temperatura das matérias primas e M a massa das matérias primas por m<sup>3</sup> de concreto. Os índices m, c e a referem-se aos agregados, ao cimento e à água respectivamente. O valor de 0,22 refere-se à relação aproximada entre o calor específico das matérias primas secas e da água. A temperatura do concreto recém misturado será ligeiramente superior à temperatura calculada, devido ao ligeiro aquecimento do concreto no interior da betoneira provocado pelo processo de mistura (NEVILLE, 1997).

Materiais empregados com altas temperaturas, somados ao alto calor de hidratação produzido pelas altas quantidades de cimento empregadas na produção do CAR podem provocar tensões térmicas que gerarão fissuração no concreto, reduzindo a durabilidade da estrutura.

Além dos ensaios tradicionalmente efetuados durante a produção de CAR percebe-se que é necessário o acompanhamento da temperatura das matérias primas e do concreto aplicado *in loco*. Aitcin (2000) relata que é comum em obras no Canadá e Estados Unidos ser especificada a temperatura de recebimento do CAR, sendo este procedimento altamente recomendável.

O uso de gelo em substituição a parte da água na produção de CAR permite o controle de temperatura do concreto, sendo este processo de fácil execução e obtenção do material. O uso de água gelada permite a adequação da temperatura do concreto apenas se o mesmo estiver com a temperatura ligeiramente superior a 20° C. É possível também controlar a temperatura do concreto com a adição de pequenas quantidades de nitrogênio líquido. A redução da temperatura do concreto também melhora a trabalhabilidade do concreto, aumenta o tempo de manutenção do abatimento e melhora a bombeabilidade do concreto. Porém a temperatura não deve ser reduzida a temperaturas inferiores a 10° C (AITCIN, 2000).

O uso de pequenas quantidades de aditivo inibidor de hidratação também tem sido realizado freqüentemente na produção de CAR em centrais dosadoras de concreto do Brasil com o intuito de reduzir o pico de temperatura e aumentar o tempo de manutenção do abatimento (HARTMANN & HELENE, 2004; CHRISTÓFOLLI, INOUE & FREITAS, 2007).

#### 7.7) Análise Qualitativa Quanto á Produção Industrial dos Concretos

Durante a realização do experimento, à medida que se reduziu a relação a/a o tempo de mistura necessário para se obter o abatimento determinado aumentou, conforme apresentado na tabela 7.28. Os tempos apresentados referem-se ao tempo de mistura em betoneira.

Crê-se que os tempos de mistura quando se produz os concretos em caminhão betoneira serão inferiores aos apresentados, visto a maior eficiência de mistura dos concretos no caminhão betoneira em relação ao misturador empregado na realização do experimento.

Tabela 7.28 - relação a/a x tempos de mistura.

| Tipo do concreto / relação a/a | Tempo de mistura (min.) |
|--------------------------------|-------------------------|
| A1 / 0,458                     | 10                      |
| A / 0,382                      | 12                      |
| B / 0,318                      | 18                      |
| C / 0,265                      | 20                      |
| D / 0,230                      | 25                      |

Quanto menor a relação a/a maior o tempo de mistura necessário, sendo este fato também observado no presente trabalho. O aumento no teor de sílica ativa para uma mesma relação a/a não acarretou em alterações significativas no tempo de mistura dentro das condições de observação que o experimento permitiu. Também não se percebeu alterações no tempo de mistura com o aumento dos teores de sílica ativa, pois a amplitude de teores é relativamente pequena e não foi produzido concreto sem a adição de sílica ativa.

Deste modo fica claro que à medida que se produzem concretos de maior resistência, maiores serão os ciclos de produção na central dosadora de concreto, não podendo ser considerados os tempos de ciclos de produção para concretos usuais na definição da programação da concretagem. É de grande importância o conhecimento dos tempos de ciclo de produção antes do início das concretagens, para que se determine a capacidade de produção horária da central, permitindo a correta programação da concretagem e evitando assim atrasos nas entregas e conseqüente aumento no tempo total das concretagens.

Percebeu-se que à medida que se aumentou o teor de sílica ativa os concretos reduziram sua coesão, apresentando maior facilidade para moldagem dos CPs, denotando uma melhora da trabalhabilidade. Os concretos de classe A1 não se apresentaram pegajosos, onde, se analisada apenas sua trabalhabilidade poderiam ser produzidos com qualquer um dos quatro teores de sílica ativa estudados. Os concretos classe A, B e C quando produzidos com teor de sílica ativa de 3% apresentaram-se muito pegajosos e imagina-se que sua aplicação em obra seria muito difícil, os demais teores de sílica ativa apresentaram facilidade de manuseio e moldagem. Os concretos classe D produzidos com teores de sílica ativa de 3% e 6% apresentaram-se excessivamente coesos e possivelmente sua aplicação em obra seja inviável. Para os concretos com teores de sílica ativa de 9% e 12% os concretos produzidos apresentaram-se muito pegajosos, mas crê-se que seja possível sua aplicação em obra.

Para a produção de concretos em central dosadora de concreto é interessante que a empresa de serviços de concretagem tenha concretos desenvolvidos com diversos teores de sílica ativa, pois um concreto pode ser bombeável até certa altura ou certa distância horizontal e à medida que se aumenta o comprimento da tubulação de bombeamento este concreto deixa de ser bombeável. O incremento do teor de sílica ativa produzirá concretos com maior facilidade de bombeabilidade. Recomenda-se que a melhora nas condições de bombeabilidade para CAR seja efetuada com o aumento do teor de sílica ativa, pois caso se aumente o teor de argamassa haverá um aumento no teor de finos e provavelmente o concreto se tornará ainda mais coeso e mais pegajoso, dificultando a operação de bombeamento. Dificuldades de aplicação em obra, em alguns casos, podem também ser solucionadas através de aumento do teor de sílica ativa, pois com este haverá uma melhora na trabalhabilidade do concreto.



Na produção de CAR um fator de grande importância, senão o de maior importância, é reproduzir na produção industrial a relação a/a obtida em laboratório. Além da correção da umidade dos agregados é necessário que seja retida uma quantidade de água durante o carregamento dos materiais para que, após o carregamento do caminhão, seja possível a lavagem do funil, facas do equipamento e para lavagem do recipiente empregado para adição do superplastificante em obra. A retenção de 60 litros de água do total da carga é suficiente para todas as citadas operações.

Deve-se priorizar o uso de aditivos superplastificantes que mantenham o abatimento por um período de tempo adequado à descarga do concreto. Também não devem ocorrer atrasos na descarga do concreto devendo a equipe de obra ser dimensionada adequadamente. No caso de redosagem de superplastificante para correção do abatimento, caso tenha sido adicionado todo o superplastificante previsto na dosagem, haverá um aumento da relação a/a, caso o produto tenha água como parte considerável de sua formulação.

A água contida no superplastificante deve ser descontada da água total a ser empregada na produção de cada carga.

A adição de superplastificante no interior do caminhão betoneira pode ocorrer de três maneiras:

- a) durante o carregamento do concreto, através de tubulação instalada no ponto de carga;
- b) por meio de descarga direta no funil do caminhão (figura 7.28);



Figura 7.28 – descarga do aditivo no funil do caminhão (CHRISTÓFOLLI, INOUE & FREITAS, 2007).

c) através de tubulação que lança o aditivo no centro da massa de concreto no caminhão betoneira.

Esta tubulação é de execução bastante fácil, monta-se um tubo de PVC de 100 ou 150 mm horizontalmente, uma curva de 90° e um tubo de mesmo diâmetro verticalmente, formando um “L”. O tubo horizontal é inserido no interior do balão do caminhão betoneira e o aditivo superplastificante é vertido no tubo vertical, sendo assim lançado sobre a massa de concreto aproximadamente no centro do caminhão betoneira. Após o lançamento do aditivo é lançada água na tubulação para lavagem da mesma, evitando perdas de aditivo. Este procedimento facilita a homogeneização do superplastificante no concreto e evita possíveis perdas de superplastificante decorrentes do lançamento diretamente sobre o funil do caminhão.

A realização de um “caminhão teste” antes do início de produção de CAR é recomendada por Aitcin (2000). O autor relata que a reprodução dos traços determinados em laboratório na central dosadora de concreto, concretando-se uma peça teste de 2,0 m<sup>3</sup> de concreto produz uma série de vantagens como:

- a) verificação dos tempos de ciclo de produção;
- b) comparação dos resultados de resistência à compressão e demais características obtidos industrialmente com os obtidos em laboratório;
- c) adequação da equipe de obra às características de aplicação do CAR;
- d) treinamento da equipe da central dosadora de concreto na produção de CAR e suas particularidades;
- e) verificação da dosagem de superplastificante necessária em virtude do tempo de transporte até a obra;
- f) possibilidade de concretagem de uma peça de teste onde serão efetuadas extrações de testemunhos para determinação da correlação entre resultados de CPs e de testemunhos;
- g) todos os testes e necessários ajustes são efetuados em uma peça não pertencente à estrutura.

## 8) CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se com o presente trabalho que o projeto fatorial realizado gerou dados que permitiram a otimização dos traços e conseqüentemente dos custos de produção do CAR. Estudos semelhantes ao realizado conjugados com um projeto fatorial para a otimização do consumo de superplastificante em função do teor de água empregado provavelmente gerarão significativa redução dos custos de produção de CAR, aumentando consideravelmente a viabilidade de aplicação deste material.

Para empresas de serviço de concretagem a realização dos projetos fatoriais citados constitui-se em grande vantagem competitiva, pois permitirá a produção de CAR com menores custos de matéria prima e definição de uma gama maior de dosagens. O emprego destes projetos fatoriais no meio industrial, apesar do grande volume de traços a serem elaborados e ensaios a serem realizados, é viável e bastante útil, pois os resultados serão empregados por longos períodos tempo, visto que os materiais empregados pelas centrais dosadoras de concreto, em geral, não são alterados por longos períodos de tempo.

O presente trabalho demonstrou que é completamente possível a produção e ensaio de CAR em laboratórios industriais, sendo de grande importância a qualidade dos equipamentos empregados e a capacitação da mão de obra envolvida. Os resultados obtidos neste experimento apresentaram valores semelhantes aos estudos realizados em laboratórios de caráter acadêmico, como efetuado por Mendes (2002) e Freitas (2005).

Conclui-se com base nos resultados deste trabalho que é de suma importância a especificação da temperatura de recebimento do CAR, devendo esta ser considerada como parâmetro de aceitação do concreto em obra.

É de opinião deste autor que a realização de um “caminhão teste”, conforme indicado por Aitcin, (2000) antes do início da produção de CAR poderá gerar uma série de benefícios ao produtor de concreto, podendo-se verificar uma série de propriedades do concreto como condição de bombeabilidade, calor de hidratação e tempo de ciclo de produção.

A citada prática também permite ao executor da obra verificar as condições e resultados obtidos na produção industrial em comparação aos resultados de laboratório e atestar a capacidade produtiva do fornecedor de concreto.

Diante dos resultados obtidos nos experimentos realizados pode-se afirmar que para a produção de CAR com alta resistência inicial é recomendável o uso do menor teor de sílica ativa possível, pois conforme a resistência à compressão desejada serão necessários maiores teores de sílica ativa para se aumentar a trabalhabilidade do concreto.

Para a produção de concretos com especificação de resistência à compressão aos 28 dias de idade ou superior o aumento dos teores de sílica ativa empregados, dentro da faixa estudada, permite aumentos na resistência à compressão obtida.

O teor ótimo de sílica ativa que conjuga fatores técnicos e econômicos, quando se analisa a resistência à compressão aos 28 dias de idade é função da relação água/aglomerante. No presente experimento para as relações água/aglomerante de 0,382; 0,318; 0,265 o teor ótimo de sílica ativa foi de 6%. Para a relação água/aglomerante de 0,458 o teor ótimo foi de 3%. Quando se analisou a relação água/aglomerante de 0,234 observou que o teor de 3% apresentou os menores valores de R\$/MPa.

Observou-se que o CAR apresenta um consumo de cimento para a produção de 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade e conseqüentemente a quantidade de kg de CO<sub>2</sub> para cada MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade bastante inferior aos índices calculados para concretos usais. À medida que se aumenta o teor de sílica ativa e reduz-se a relação água/aglomerante ocorre a redução destes índices.

Percebeu-se durante a realização do experimento que o aumento dos teores de sílica ativa na produção de CAR permitiu um aumento da trabalhabilidade do concreto, reduzindo a coesão e facilitando sua aplicação. Crê-se que o ligeiro aumento dos teores de sílica ativa também irá proporcionar uma melhora nas condições de bombeamento do CAR. Também se deve destacar que quanto menor a relação água/aglomerante maior deverá ser o teor de sílica ativa empregado para que os concretos produzidos tenham trabalhabilidade adequada e condições de aplicação em obra.

Quanto menor a relação água/aglomerante maior será o tempo necessário para mistura do concreto e conseqüentemente maior o ciclo de produção do concreto, reduzindo assim a capacidade de produção horária da central dosadora de concreto.

Para a produção de CAR em central dosadora de concreto os processos de controle de qualidade de matérias primas, concreto e de produção devem ser significativamente mais rigorosos que os empregados na produção de concretos usuais.

Crê-se que a redução dos custos de matéria prima dos CAR aliada ao continuo desenvolvimento tecnológico que ocorreu nos últimos anos e ainda continua acontecendo, tanto no ambiente acadêmico quanto no industrial permitirá o maior emprego do CAR nos próximos anos.

O aumento na utilização de CAR permitirá a redução do consumo de cimento empregado na construção de estruturas de concreto e conseqüentemente haverá uma redução nos teores de CO<sub>2</sub> emitidos tanto na produção quanto na manutenção das estruturas, visto a elevada durabilidade do CAR, tornando assim as estruturas de concreto mais sustentáveis.

#### 8.1) Sugestões para Pesquisas Futuras

Sugerem-se como temas para novas pesquisas, a fim de complementar o estudo desenvolvido, os seguintes assuntos:

- a) Otimização dos teores de superplastificante em função do consumo de água;
- b) Análise da influência do empacotamento granulométrico dos agregados na produção de CAR;
- c) Análise da influência de adição de retardadores de pega e inibidores de hidratação na produção de CAR;
- d) Análise da influência de adição de gelo na produção de CAR;
- e) Estudo da capacidade de bombeamento de CAR;
- f) Avaliação do impacto ambiental de toda cadeia de produção de CAR;
- g) Produção de CAR com o emprego único de areia industrial como agregado miúdo;
- h) Análise comparativa de resultados de resistência à compressão de CPs de CAR moldados e obtidos através de extração de testemunhos;

- i) Análise de variabilidade de resultados de resistência à compressão devido ao período de cura úmida dos CPs e processo de cura empregado em peças moldadas;
- j) Análise da influência dos processos de carregamento e mistura de CAR em centrais dosadoras de concreto no desenvolvimento das propriedades de CAR;
- k) Análise da influência de utilização de combinação de diferentes tipos de materiais cimentícios complementares na produção de CAR;
- l) Produção de CAR auto-adensável;
- m) Análise da influência dos processos de execução de CAR em obras no desenvolvimento da resistência à compressão;
- n) Análise da redução de custos e emissão de CO<sub>2</sub> em virtude do aumento de durabilidade das estruturas com o uso de CAR.

## REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P.-C. **Concreto de alto desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo – Editora Pini, 2000.
- ALMEIDA, I.R. **Concreto de alto desempenho**. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações V2** / ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2005.
- ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. Dissertação de mestrado, UFRGS-PPGEC, 2000.
- ALVES, M. F. CREMONINI, R. A., DAL MOLIN, D.C.; A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete. **Cement & Concrete Composites**, 2003.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211-1-91: Standart practice for sselcting proportions for normal, heavy-weight and mass concrete. **ACI Manual of Concrete Practice 2005**. ACI, Detroit (USA), 2005. 38 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 234R-96. Guide for the use of silica fume in concrete. **ACI Manual of Concrete Practice 2005**. ACI, Detroit (USA), 2001. 51 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 363R-92 (Reapproved 1997) State-of-the-art report on high strength concrete. **ACI Manual of Concrete Practice 2005**. ACI, Detroit (USA), 2005. 55 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados - determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7682**: Método do funil de Marsh. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9777**: Agregados - determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira 75 micrometros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12826**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.653 /2**: Avaliação de Imóveis Urbanos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-14**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-20**: Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 22**: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-43**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NM-45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NM-46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA **NM-49**: Agregados - Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA **NM-52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NM-53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NM-65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

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



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND –ABCP: **Concreto de alto desempenho. CD ROM** – Versão I . São Paulo: VIDEOLAR, 1999.

BASILIO, E.S. **Controle estatístico do concreto ACI 214 - Estudo técnico – nº 25** , Associação brasileira de cimento Portland –ABCP: . São Paulo, 2001.

BHANJA, S., SENGUPTA,B. Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. **Cement & Concrete Composites**, V 35, 2005, P743-747.

BHARATKUMAR, B. H.; NARAYANAN, R.; RAGHUPRASAD, B. K.; RAMACHANDRAMURTHY, D. S. Mix proportioning of high performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, V 23, 2001. p 71-80.

CASTRO, A.L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, 302 p. São Carlos, 2007.

CHANG, P.K., PENG, Y.N. Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete. **Cement & Concrete Composites**, V 31, 2001, p 87-95.

CHANG, P.K. An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, V 34, 2004, p 623-629.

CHOPING, D. DE LARRARD, F. CAZACLIU,B. Why do HPC and SCC require a longer mixing time? **Cement & Concrete Composites**, V 34, 2004, p 2237-2243.

CHRISTOFOLLI, J.L, ENOUE, M.H, FREITAS, J.A. **Recorde nacional de concreto de alto desempenho em pilares, Centro Empresarial Antarctica, IBRACON, 2007.**

CREMONINI, R. A.; DAL MOLIN, D.C.C.; CECCATO, D. M.; MANCIO M.; GOULART, J. **Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento, IBRACON, 2001.**

DAL MOLIN, D. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. Tese de doutorado, DCC/EPUSP, 1995.

DAL MOLIN, D. C.; VIEIRA, F.M.P.; WOLF, J. **Concreto de alta resistência**. CDROM: Concreto de Alto Desempenho, Versão 1.0. Produzido por NUTAU/USP.1997.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações V1** / ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2005.

DE LARRARD, F., A method for proportioning high-strength concrete mixtures. **Cement, Concrete and Aggregates**. V. 12, n. 2, 1990. p. 47-52.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, V 32, 2002. 6 p.

DOMONE, P.; SOUTSOS, M. An approach to the proportioning of high-strength concrete mixes. **Concrete International**. V. 16, 1994. p. 26 a 31.

DUVAL, R., KADRI, E.H. Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes. **Cement and Concrete Research** V. 28, 1998.

FERREIRA, M. M. F.; FONTE, A. O. C. F.; ATHAIDE, A. C. N. **Estudo comparativo entre a utilização de concretos convencionais e de alto desempenho em estruturas de edifícios altos**, Ibracon, 2001.16p.

FREITAS, J. A. Jr. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação de Mestrado – PPGCC - UFPR, 131 f . Curitiba, 2005.

FONSECA, J.S, MARTINS, G.A, TOLEDO, G.L. **Estatística aplicada**, Editora Atlas, 2ª ed., São Paulo, 1995.

GAVA, G.P. et al. **Concreto de normal e alta resistência – definição do teor de aditivo de água e dosagem para materiais da região oeste do Paraná**. IBRACON, 2001.

GONÇALVES, C.F.F. **Estatística**, Editora UEL, 2ª ed., Londrina, 2002.

GUJARATI, D.N. **Econometria básica**, Pearson Makron Books, 3ª ed., São Paulo, 2005.

GUTIÉRRES, P. A., CÁNOVAS, M. F. High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning. **ACI Materials Journal**, may/june, 1996.

HARTMAN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**, Boletim Técnico da USP BT/PCC/330, 2003.

HARTMAN, C. T., HELENE, P. R. L. **Pilares com 125 MPa: recorde mundial em concreto de alto desempenho colorido**, 2004.

HELENE, P. R. L., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto** - São Paulo – Editora Pini-1992.

HEWLETT, PETER C. **Chemistry of cement and concrete**. Arnold, London, 1998.

KANTRO, D. L., Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test, **Cement, Concrete and Aggregates**. V. 2, n. 2, 1980. p. 95-102.

JIANYONG, L., YAN, Y. A study on creep and drying shrinkage of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research** V. 31, 2001, p 1203-1206.

LANGAN, B.W, WENG, K., WARD, M.A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland Cement. **Cement and Concrete Research** V. 32, 2002, p. 1045-1051.

LEVY, S. **Sustentabilidade na construção civil: a contribuição do concreto**. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações V2** / ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2005.

MALHOTRA V.M & MEHTA, P. K. &. **High-performance high volume fly ash concrete**. Ottawa, 3<sup>th</sup> edition, 2008.

MAZLOOM, M., RAMEZANIAPOUR, A.A., BROOKS, J.J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. **Cement & Concrete Composites**, V. 26, 2004, p 347-357.

MEHTA, P.K; AİTCIN, P.C. Principles underlying production for high strength performance concrete. **Cement, Concrete & Aggregates** v. 12, p. 70-78. 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, S. E. da S. M., **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação de Mestrado, PPGCC - UFPR, 2002.

MONTGOMERY, D.C, **Design and analysis of experiments**. 5<sup>th</sup> Edition. New York, 2005.

NAWY, E.G. **Fundamentals of high strength high performance concrete**. London (UK). Longman Group Limited, 1996. 340p.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. Tradução de GIAMMUSSO, Salvador E. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: PINI, 1997.

O`REILLY DIAZ, V. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo, Editora Pini, 1998

PAULON, V.A. **A microestrutura do concreto convencional**. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações V1** / ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2005.

PERSSON, B. Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete, **Cement and Concrete Research**, V. 28, 2004 – 1023-1036.

PRUDENCIO JÚNIOR, L. R. **Aprimoramento da capacitação laboratorial do corpo técnico – material de apoio**, UFSC, Florianópolis, 2007.

RAEDER FILHO, M. **Caracterização do cimento aluminoso e sua aplicação em concretos de alta resistência (CAR)**. Dissertação de Mestrado – PPGCC - UFPR, 174 f. Curitiba, 2005.

RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos**, FEENG/ UFRGS, Porto Alegre, 2001.

SANDBERG, P., BENINI, H. **O uso da calorimetria como uma técnica de controle tecnológico de materiais**, Revista Concreto e Construções V 58, 2008, p 36-40.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para concreto**. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações V1** / ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2005.

SERRA, G. G. **Concreto de alto desempenho e a nova arquitetura**, Universidade de São Paulo, CD-ROM: Concreto de Alto Desempenho, Versão 1.0. Produzido por NUTAU / USP.1997.

SHANNAG, M. J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. **Cement & Concrete Composites**, V. 22, 2000, p 399-406.

SPONHOLZ, I., PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R, STEIL, R. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para a seleção de aditivos de água para o concreto de alto desempenho**. IBRACON, 1998.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. Thomas Telford, New York, 1997.

TORALLES CARBONARI, B. M. **Estúdio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones**. Barcelona, 1996, 174p. Tese de doutorado – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

TOUTANJI, H.A, EL-KORCHI, T. The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research** V. 25, 1995, p 1591-1602.

TRIOLA, MARIO F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro, Ltc,2005.

YAJUN, J., CAHYADI, J.H. Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes. **Cement & Concrete Composites**, V. 33, 2003, p 1543-1548.