

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS DE  
CONCRETOS COMPOSTOS COM CCA DE DIFERENTES  
TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MONIQUE PAFIADACHE DA SILVA**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**



# **RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CCA DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

**Monique Pafiadache da Silva**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pafiadache da Silva, Monique  
RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS DE CONCRETOS  
COMPOSTOS COM CCA DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO  
GRAFÍTICO / Monique Pafiadache da Silva.-2012.  
150 p.; 30cm

Orientador: Antônio Luiz Guerra Gastaldini  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2012

1. Concreto 2. Retração 3. Cinza de casca de arroz 4.  
Cloretos 5. Durabilidade I. Guerra Gastaldini, Antônio  
Luiz II. Título.

---

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Monique Pafiadache da Silva. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito da autora. Endereço eletrônico: [moniquepafi@yahoo.com.br](mailto:moniquepafi@yahoo.com.br)

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS DE  
CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CCA DE DIFERENTES  
TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

elaborada por  
**Monique Pafiadache da Silva**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)**

**Ênio José Pazini Figueiredo, Dr. (UFG)**

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2012.



## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta pesquisa aos meus pais, Eduardo e Gina,  
e a minha irmã Carol, pela dedicação incondicional,  
estímulo, amor, ajudas e companhias.



## AGRADECIMENTOS

Evidencio a minha gratidão a todos que contribuíram de alguma maneira, no processo de realização desta pesquisa, inclusive, aos que se limitaram apenas à compreensão.

Em especial, ao meu orientador Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pelos conhecimentos transmitidos, pela orientação e oportunidade de realização desta pesquisa.

Ao professor Geraldo Cechella Isaía, pelos ensinamentos e pelo empréstimo de material.

Aos familiares e amigos que compreenderam minha ausência neste período.

Ao Douglas, pela parceria, paciência, apoio e ajuda em todos os momentos.

Agradeço aos colegas Camila Crauss e Fabrício Zamberlan, pelas dicas, ajuda e incentivo para realização deste trabalho.

Ao meu guia espiritual, pela proteção e orientação.

Ao Dimmy pela fidelidade e companhia de sempre.

À colega Karina Kozoroski, pela parceria, conversas, demonstração de auxílio para o andamento deste trabalho e pela companhia na ida a Alegrete.

À colega e amiga Daiana de Souza Cezar, pelas companhias infindáveis, conversas confortantes, incentivo nos momentos difíceis, ajuda e apoio incondicional durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos bolsistas de iniciação científica e voluntários integrantes do GEPECON, em especial, ao Lucas Lamberti, Henrique Bolacel, Maurício Silveira, Patrícia Osmari e Pedro Orlando, pela incansável ajuda nos trabalhos de laboratório, pela amizade e companhia que tornaram o período experimental menos árduo.

Aos funcionários do LMCC pela ajuda concedida.

À empresa Pilecco Nobre, pela cessão de materiais para esta pesquisa.



## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS DE CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CCA DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

AUTORA: MONIQUE PAFIADACHE DA SILVA

ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2012.

A utilização de subprodutos agroindustriais com características pozolânicas tem sido uma das alternativas encontradas diante do crescente consumo de cimento, visando à racionalidade e à sustentabilidade das jazidas fornecedoras de matérias-primas para produção do clínquer e à maior vida útil das estruturas de concreto. Nesta pesquisa, investiga-se a influência do período de cura e da utilização de cinza de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico na resistência à compressão axial, retração total e penetração de íons cloreto de concretos com cimento Portland de alta resistência inicial. Os teores de substituição ao cimento Portland adotados foram de 0%, 5%, 10%, 20% e 30%, as relações água/aglomerante de 0.35, 0.50 e 0.65 e os períodos de cura úmida de 3 e 7 dias. Uma mistura com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland foi empregada como parâmetro de comparação. A resistência à compressão axial foi avaliada em corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing$  100 mm x 200 mm) segundo as normas NBR 5738 e 5739, para as idades de 28 e 91 dias. A determinação da retração foi feita conforme recomendações da ASTM C-157 (ASTM, 2006) e ASTM C-490 (ASTM, 2004) em corpos de prova de dimensões 100 mm x 100 mm x 285 mm avaliados nas idades de 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91 e 182 dias. A avaliação de penetração de íons cloreto (imersão em solução salina) foi realizada nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Antes de serem imersos em solução salina, os corpos de prova foram submetidos a um período de secagem de 91 dias. Dos resultados obtidos, constatou-se, para todas as misturas investigadas, que o aumento do período de cura úmida resultou em maiores valores de resistência à compressão, menores valores de retração e menor penetração de íons cloreto para as misturas investigadas. Comportamento contrário foi observado com o aumento da relação a/ag. As misturas compostas com CCA de menor teor de carbono grafítico (clara) apresentaram os maiores valores de resistência à compressão, contudo, quando se analisa em igualdade de teor de substituição, esse comportamento varia em função da relação a/agl, idade de ensaio e prazo de cura, não apresentando uma tendência geral. Esse comportamento também é válido quando se analisa as misturas com CCA e SA. No ensaio de retração e de penetração de cloretos após retração, as misturas compostas com CCA de menor teor de carbono grafítico apresentaram, no geral, melhor desempenho com menores valores de retração e de penetração de cloretos.

**Palavras-chave:** concreto, retração, cca, sílica ativa, cura e cloretos



## **ABSTRACT**

Master's Thesis  
Program of Post-Graduation in Civil Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil

### **TOTAL SHRINKAGE AND CHLORIDE PENETRATION OF CONCRETES MADE WITH RICE HUSK ASH WITH DIFFERENT CONTENTS OF GRAPHITIC CARBON**

AUTHOR: MONIQUE PAFIADACHE DA SILVA  
THESIS ADVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI  
Location and defense's date: Santa Maria, February 27<sup>th</sup>, 2012.

The use of agro-industrial by-products with pozzolanic properties has become an alternative in the cement industry because of the increasing consumption of cement, aiming at the rational use and sustainability of the mines that produce raw materials for the production of clinker and longer life of concrete structures. This research investigates the influence of the curing period and of the use of rice husk ash with different contents of graphitic carbon on the compressive strength, total shrinkage and chloride penetration of concretes with high early age strength cement. The levels of replacement of Portland cement adopted were 0%, 5%, 10%, 20% and 30%, the water/binder ratios of 0.35, 0.50 e 0.65 and the wet curing periods of 3 and 7 days. A mixture containing 10% of silica fume to replace Portland cement was used as benchmark. Compressive strength was obtained by a compressive test using cylindrical specimens ( $\varnothing$  100 mm x 200 mm) according to NBR 5738 and 5739 standards for the ages of 28 and 91 days. The determination of shrinkage was made according to the recommendations of ASTM C-157 (ASTM, 2006) and ASTM C-490 (ASTM, 2004) in test specimens with 100 mm x 100 mm x 285 mm evaluated at the ages of 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91 and 182 days. Before being immersed in saline, the test specimens were dried for 91 days. Based on the findings, it has been found, for all mixtures investigated, that the increase in the wet cure period led to higher compressive strength values, lower shrinkage values and reduced chloride penetration for the investigated mixtures. The opposite behavior was observed with the increase of w/b ratio. The mixtures containing rice husk ash of lower contents of graphitic carbon (light-colored) showed the highest values of compressive strength. However, analysis at equal content of replacement shows that this behavior varies according to the a/agl ratio, age at test and curing period, not indicating a general tendency. This behavior is also valid for analysis of mixtures with rice husk ash and silica fume. In the test of shrinkage and chloride penetration following shrinkage, the mixtures of rice husk ash of lower contents of graphitic carbon have shown, in general, better performance, with lower shrinkage values and reduced chloride penetration.

**Keywords:** concrete, shrinkage, rice husk ash, silica fume, curing, chlorides.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Representação esquemática das formas cristalina e amorfa da sílica – (a) cristalina; (b) amorfa.....  | 38 |
| Figura 2.2 - Divisão geral do grão de arroz.....   | 39 |
| Figura 2.3 - Micrografia da casca de arroz.....  | 40 |
| Figura 2.4 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz demonstrando a porosidade da estrutura.....  | 43 |
| Figura 2.5 - DRX da CCA obtida com o controle de temperatura (amorfa).   | 45 |
| Figura 2.6 - DRX da CCA obtida sem o controle de temperatura (cristalina).....   | 45 |
| Figura 2.7 - Micrografia da CCA: (a) 15 minutos de moagem; (b) 20 horas de moagem.....   | 46 |
| Figura 2.8 - Variação do índice de atividade pozolânica pelo tempo de moagem.....  | 47 |
| Figura 2.9 - Demanda de água nos decorridos tempos de moagem.....  | 48 |
| Figura 2.10 - Ilustração esquemática do processo de obtenção da sílica ativa.....  | 49 |
| Figura 2.11 - Morfologia da sílica ativa demonstrando as partículas de forma esférica.....   | 50 |
| Figura 3.1 - Representação esquemática da estrutura da pasta. Os pontos cheios representam as partículas de gel; os espaços intersticiais os poros de gel; os espaços marcados com C são os poros capilares..... | 57 |
| Figura 3.2 - Relação entre a perda de água na pasta e umidade relativa..   | 60 |
| Figura 3.3 - Irreversibilidade da retração hidráulica.....   | 61 |
| Figura 3.4 - Fatores que influenciam a retração hidráulica.....  | 62 |
| Figura 3.5 - Efeito da relação água/cimento na retração hidráulica na pasta de cimento.....  | 63 |
| Figura 3.6 - Retração hidráulica em amostra de 50x50x400mm.....  | 64 |
| Figura 3.7 - Efeito do volume do agregado na retração hidráulica.....  | 66 |
| Figura 3.8 - Retração hidráulica dos concretos.....  | 68 |
| Figura 3.9 - Desenvolvimento da retração com tempo em dias.....  | 69 |
| Figura 3.10 - Retração hidráulica em concretos contendo sílica ativa e relação a/agl = 0,4.....  | 70 |
| Figura 3.11 - Valores de retração em diferentes idades a) 7 dias de cura úmida, b) cura ao ar.....   | 72 |
| Figura 3.12 - Retração hidráulica nas misturas de concreto estudadas.....  | 73 |
| Figura 3.13 - Efeito do teor de SRA na retração hidráulica das argamassas estudadas.....   | 75 |



|  |            |
|--|------------|
| Figura 3.14 - Correlação entre o teor de aditivo SRA e a retração hidráulica das argamassas estudadas com 1, 3, 7, 14 e 28 dias.....       | <b>75</b>  |
| Figura 3.15 - Efeito das condições de cura na retração hidráulica.....   | <b>78</b>  |
| Figura 3.16 – Efeito da umidade relativa na retração hidráulica.....   | <b>79</b>  |
| Figura 3.17 - Ilustração da fissuração e destacamento do concreto devido à corrosão da armadura.....                                       | <b>82</b>  |
| Figura 3.18 - Formação de uma pilha de corrosão.....   | <b>83</b>  |
| Figura 3.19 - Representação esquemática da corrosão eletroquímica na armadura pela penetração do agentes agressivos como íons cloreto..... | <b>86</b>  |
| Figura 3.20 - Representação esquemática do teor de umidade dos poros de concreto em função da umidade relativa.....                        | <b>89</b>  |
| Figura 3.21 - Influência dos ciclos de cura na penetração de íons cloreto.   | <b>90</b>  |
| Figura 4.1 - Difratoograma da amostra de cimento (CPV - ARI).....  | <b>96</b>  |
| Figura 4.2 - Difratoograma da amostra de cinza de casca clara (C).....   | <b>97</b>  |
| Figura 4.3 - Difratoograma da amostra de cinza de casca escura (E).....  | <b>97</b>  |
| Figura 4.4 - Difratoograma da amostra de sílica ativa (SA).....  | <b>98</b>  |
| Figura 4.5 -Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI).....  | <b>98</b>  |
| Figura 4.6 - Amostras dos aglomerantes utilizados nesta pesquisa.....  | <b>99</b>  |
| Figura 4.7- Curva granulométrica da areia.....   | <b>100</b> |
| Figura 4.8 - Curva granulométrica da brita.....  | <b>100</b> |
| Figura 4.9 - Equipamento utilizado no ensaio de retração total - comparador de expansibilidade.....  | <b>104</b> |
| Figura 4.10 - Representação esquemática da metodologia do ensaio de penetração de íons cloreto.....  | <b>106</b> |
| Figura 4.11 - Gráfico para obtenção dos coeficientes k.....  | <b>107</b> |
| Figura 5.1 - Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade nas misturas investigadas.....  | <b>108</b> |
| Figura 5.2 - Resistência à compressão axial aos 91 dias de idade nas misturas investigadas.....  | <b>109</b> |
| Figura 5.3 - Retração total das misturas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/agl.....   | <b>116</b> |
| Figura 5.4 - Retração total das misturas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/agl.....   | <b>117</b> |
| Figura 5.5 - Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação a/agl e período de cura.....                                   | <b>125</b> |



## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 3.1 - Regressões utilizadas para correlacionar o efeito do teor de aditivo SRA na retração hidráulica.....  | 76  |
| Tabela 4.1 - Proporcionamento das adições minerais em cada mistura de aglomerante.....   | 93  |
| Tabela 4.2 - Características físico-químicas e mecânicas do cimento.....   | 96  |
| Tabela 4.3 - Características físico-químicas das adições minerais.....   | 97  |
| Tabela 4.4 - Características físicas dos agregados.....  | 100 |
| Tabela 4.5 - Traços unitários utilizados na dosagem dos concretos de referência.....   | 101 |
| Tabela 4.6 - Consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto correspondente a cada mistura aglomerante.....  | 102 |
| Tabela 5.1 - Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 3 dias..... | 109 |
| Tabela 5.2 Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 7 dias.....   | 110 |
| Tabela 5.3 - Retração final das misturas.....  | 115 |
| Tabela 5.4 - Coeficiente de penetração k das misturas investigadas em cada período de cura.....  | 123 |
| Tabela 5.5 - Índices de penetração de íons cloreto das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 3 e 7 dias.....   | 126 |
| Tabela 5.6 - Custo dos materiais em reais utilizados para cálculo do custo das misturas.....   | 129 |
| Tabela 5.7 - Consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto correspondente a cada mistura aglomerante.....  | 130 |
| Tabela 5.8 - Coeficientes A, B e R <sup>2</sup> das equações do tipo $F_c=A/B^{a/agl}$ das misturas investigadas aos 28 dias.....  | 131 |
| Tabela 5.9 - Coeficientes C, D e R <sup>2</sup> das equações do tipo $Custo = C/D^{a/agl}$ das misturas investigadas.....  | 133 |
| Tabela 5.10 - Custo de cada mistura em igualdade de resistência à compressão - 40MPa e 50MPa e suas respectivas relações a/agl.....                                      | 134 |



## LISTA DE QUADROS

|   |           |
|---|-----------|
| Quadro 2.1 - Produção brasileira de arroz e casca - safra 2010/2011.....                                      | <b>42</b> |
| Quadro 2.2 - Efeito das condições de combustão na estrutura da sílica contida na cinza de casca de arroz..... | <b>44</b> |



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>ABNT</b>                        | Associação Brasileira de Normas Técnicas                       |
| <b>ACI</b>                         | American Concrete Institute                                    |
| <b>Art.</b>                        | Artigo   |
| <b>ASTM</b>                        | American Society for Testing and Materials                     |
| <b>AgNO<sub>3</sub></b>            | Nitrato de prata   |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | Óxido de alumínio  |
| <b>a/agl</b>                       | Relação água/aglomerante em massa                              |
| <b>alg</b>                         | Aglomerante  |
| <b>°C</b>                          | Graus Celsius  |
| <b>C<sub>3</sub>A</b>              | Aluminato tricálcico   |
| <b>C<sub>4</sub>AF</b>             | Ferroaluminato tetracálcico                                    |
| <b>CaCl<sub>2</sub></b>            | Cloreto de cálcio  |
| <b>CA</b>                          | Casca de arroz   |
| <b>CaCO<sub>3</sub></b>            | Carbonato de cálcio  |
| <b>CaO</b>                         | Óxido de cálcio  |
| <b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>          | Hidróxido de cálcio  |
| <b>Cl<sup>-</sup></b>              | Íons cloreto   |
| <b>CCA</b>                         | Cinza de casca de arroz  |
| <b>CCAC</b>                        | Cinza de casca de arroz de cor clara                           |
| <b>CCAE</b>                        | Cinza de casca de arroz de cor escura                          |
| <b>cm</b>                          | Centímetro(s)  |
| <b>CO<sub>2</sub></b>              | Dióxido de carbono   |
| <b>CONAMA</b>                      | Conselho Nacional do Meio Ambiente                             |
| <b>CP</b>                          | Cimento Portland   |
| <b>CPV - ARI</b>                   | Cimento Portland de alta resistência inicial                   |
| <b>CSI</b>                         | <i>Cement Sustainability Initiative</i>                        |
| <b>C-S-H</b>                       | Silicato de cálcio hidratado                                   |
| <b>e<sup>-</sup></b>               | Elétron  |
| <b>EMBRAPA</b>                     | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                    |
| <b>FAO</b>                         | <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> |
| <b>Fe</b>                          | Ferro  |
| <b>Fe<sup>++</sup></b>             | Íons ferro   |
| <b>g</b>                           | Grama(s)   |
| <b>GEEA</b>                        | Indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete                |
| <b>GEPECON</b>                     | Grupo de Pesquisa em Concreto                                  |
| <b>h</b>                           | Hora(s)  |



|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>HCl</b>              | Ácido clorídrico   |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>   | Molécula de água   |
| <b>H<sub>2</sub>S</b>   | Gás sulfídrico   |
| <b>IBGE</b>             | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                              |
| <b>LMCC</b>             | Laboratório de Materiais de Construção Civil                                 |
| <b>kg</b>               | Quilogramas  |
| <b>m</b>                | Metro(s)   |
| <b>MgCl<sub>2</sub></b> | Cloreto de magnésio  |
| <b>m<sup>2</sup>/g</b>  | Metro(s) quadrado(s) por grama   |
| <b>mg</b>               | Miligrama(s)   |
| <b>mm</b>               | Milímetro(s)   |
| <b>MPa</b>              | Mega-Pascal  |
| <b>mm</b>               | Micrômetro(s)  |
| <b>n°</b>               | Número   |
| <b>Na</b>               | Sódio  |
| <b>NaCl</b>             | Cloreto de sódio   |
| <b>NBR</b>              | Norma Brasileira Regulamentada   |
| <b>NH<sup>4+</sup></b>  | Cátion amônio  |
| <b>nm</b>               | Nanômetro  |
| <b>NO<sup>3-</sup></b>  | Nitritos   |
| <b>O<sub>2</sub></b>    | Gás oxigênio   |
| <b>OH<sup>-</sup></b>   | Íons hidroxila ou hidroxila  |
| <b>pH</b>               | Potencial de hidrogênio  |
| <b>REF</b>              | Mistura de referência, composta somente de cimento Portland como aglomerante |
| <b>S<sup>2-</sup></b>   | Íons sulfeto   |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>  | Dióxido de silício   |
| <b>SA</b>               | Sílica ativa   |
| <b>Snic</b>             | Sindicato Nacional da Indústria de Cimento                                   |
| <b>SO<sub>2</sub></b>   | Dióxido de enxofre   |
| <b>SO<sub>3</sub></b>   | Trióxido de enxofre  |
| <b>UR</b>               | Umidade relativa do ar   |
| <b>WBCSD</b>            | <i>World Business Council for Sustainable Development</i>                    |
| <b>3d</b>               | Cura de 3 dias   |
| <b>7d</b>               | Cura de 7 dias   |
| <b>5C</b>               | Mistura composta de 5% de cinza de casca de arroz clara e 95% de CPV-ARI     |
| <b>10C</b>              | Mistura composta de 10% de cinza de casca de arroz clara e 90% de CPV - ARI  |



|             |  |
|-------------|--|
| <b>20C</b>  | Mistura composta de 20% de cinza de casca de arroz clara e 80% de CPV - ARI  |
| <b>30C</b>  | Mistura composta de 30% de cinza de casca de arroz clara e 70% de CPV - ARI  |
| <b>5E</b>   | Mistura composta de 5% de cinza de casca de arroz escura e 95% de CPV-ARI    |
| <b>10E</b>  | Mistura composta de 10% de cinza de casca de arroz escura e 90% de CPV - ARI |
| <b>20E</b>  | Mistura composta de 20% de cinza de casca de arroz escura e 80% de CPV - ARI |
| <b>30E</b>  | Mistura composta de 30% de cinza de casca de arroz escura e 70% de CPV - ARI |
| <b>5SA</b>  | Mistura composta de 5% de sílica ativa e 95% de CPV-ARI                      |
| <b>10SA</b> | Mistura composta de 10% de sílica ativa e 90% de CPV - ARI                   |
| <b>Ø</b>    | Diâmetro   |
| <b>#</b>    | Abertura da malha de uma peneira padronizada                                 |
| <b>%</b>    | Porcentagem  |



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>LISTA DE QUADROS.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>                        | <b>21</b> |
| <br>  |           |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>31</b> |
| <b>1.1 Definição temática.....</b>  | <b>34</b> |
| 1.1.1 Apresentação do tema.....   | 34        |
| <b>1.2 Objetivos.....</b>   | <b>34</b> |
| 1.2.1 Objetivo geral.....   | 34        |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....  | 34        |
| <b>1.3 Estrutura da dissertação.....</b>                                    | <b>35</b> |
| <br>  |           |
| <b>2 ADIÇÕES MINERAIS.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>2.1 Introdução.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>2.2 Dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>).....</b>                        | <b>37</b> |
| <b>2.3 Casca de arroz (CA).....</b>   | <b>38</b> |
| <b>2.4 Cinza de casca de arroz (CCA).....</b>                               | <b>42</b> |
| <b>2.5 Sílica ativa (SA).....</b>   | <b>48</b> |
| <b>2.6 Características do concreto com adições.....</b>                     | <b>51</b> |
| <br>  |           |
| <b>3 DURABILIDADE DO CONCRETO: DEFINIÇÕES GERAIS.....</b>                   | <b>54</b> |
| <b>3.1 Retração do concreto.....</b>  | <b>55</b> |
| 3.1.1 Introdução.....   | 55        |
| 3.1.2 Conceito de retração.....   | 55        |
| 3.1.3 Mecanismo e tipos.....  | 56        |
| 3.1.4 Retração hidráulica.....  | 59        |
| 3.1.5 Influência da composição do concreto na retração.....                 | 61        |
| 3.1.5.1 Influência do conteúdo de água e de cimento .....                   | 62        |
| 3.1.5.2 Influência do tipo de cimento e sua finura.....                     | 64        |
| 3.1.5.3 Efeito do agregado.....   | 65        |
| 3.1.5.4 Influência de adições minerais.....                                 | 66        |
| 3.1.5.4.1 Sílica ativa.....   | 67        |
| 3.1.5.4.2 Cinza de casca de arroz.....                                      | 71        |
| 3.1.6 Influência de aditivos químicos.....                                  | 73        |
| 3.1.7 Influência da cura.....   | 76        |
| 3.1.8 Influência das condições ambientais, tamanho e forma do concreto..... | 78        |
| <b>3.2 Ação de íons cloreto.....</b>  | <b>81</b> |



|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.2.1      | Introdução.....  | 81         |
| 3.2.2      | Corrosão das armaduras.....  | 81         |
| 3.2.3      | Penetração de íons cloreto.....  | 85         |
| <b>4</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>  | <b>91</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Introdução.....</b>   | <b>91</b>  |
| <b>4.2</b> | <b>Materiais.....</b>  | <b>92</b>  |
| 4.2.1      | Caracterização dos materiais.....  | 95         |
| 4.2.1.1    | Aglomerantes.....  | 95         |
| 4.2.1.2    | Agregados.....   | 99         |
| <b>4.3</b> | <b>Dosagem do concreto.....</b>  | <b>101</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Ensaaios experimentais.....</b>   | <b>103</b> |
| 4.4.1      | Resistência à compressão axial.....  | 103        |
| 4.4.2      | Retração total.....  | 104        |
| 4.4.3      | Penetração de íons cloreto por imersão.....                                  | 105        |
| <b>5</b>   | <b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>                               | <b>108</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Introdução.....</b>   | <b>108</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Análise dos resultados de resistência à compressão axial.....</b>         | <b>108</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Análise dos resultados de resistência à retração total.....</b>           | <b>115</b> |
| 5.3.1      | Comparação entre os períodos de cura.....                                    | 118        |
| 5.3.2      | Comparação entre as adições minerais.....                                    | 118        |
| 5.3.3      | Comparação entre os diferentes teores de substituição.....                   | 119        |
| 5.3.3.1    | Cinza de casca de arroz clara.....   | 119        |
| 5.3.3.2    | Cinza de casca de arroz escura.....  | 119        |
| 5.3.3.3    | Sílica Ativa.....  | 120        |
| 5.3.4      | Discussão dos resultados.....  | 120        |
| <b>5.4</b> | <b>Análise dos resultados de penetração de íons cloreto por imersão.....</b> | <b>123</b> |
| <b>5.5</b> | <b>Análise econômica.....</b>  | <b>129</b> |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                | <b>136</b> |
| 6.1        | Sugestões para pesquisas futuras.....  | 138        |
|            | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....</b>  | <b>139</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea tem apresentado preocupações talvez inéditas na trajetória histórica do homem: o aumento e descontrole da poluição ambiental e a diminuição ou esgotamento dos recursos naturais. Tais preocupações são um problema global, associado ao crescimento populacional e à urbanização do planeta.

Este aumento da população exige uma grande demanda de produtos e serviços. Logo, amplia-se a produção de agentes poluidores que contribuem para os problemas ambientais e para as catástrofes naturais.

A construção civil é um dos setores da economia que afeta de maneira considerável o meio ambiente, tanto pelo consumo de recursos naturais, quanto pela produção de resíduos (SOUZA et al, 2004).

O concreto, segundo Mehta e Monteiro (2008), é o material mais utilizado nas construções, por fornecer, a custo baixo relativo, excelentes características de durabilidade e propriedades mecânicas quando bem dosado e executado.

Porém, o concreto tem como seu principal constituinte o cimento Portland, responsável por grande emissão de gás carbônico. Um levantamento realizado pelo *Cement Sustainability Initiative* (CSI), do *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) mostra que, no ano de 2009, no Brasil, para cada tonelada de cimento produzido, há a geração de aproximadamente 600 quilos de CO<sub>2</sub> liberados na atmosfera durante seu processo de fabricação.

Conforme o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (Snic), dados preliminares da indústria e estimativas de mercado indicam que as vendas de cimento para o mercado interno brasileiro, para o ano de 2011, atingiram 63,5 milhões de toneladas, apresentando crescimento de 7,3% sobre o ano de 2010. Alguns dos fatores que impulsionam o aumento no consumo de cimento são os programas do governo, como por exemplo, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), o Programa Minha Casa, Minha Vida, além da Copa do Mundo de 2014 e Olimpíadas de 2016 que estão previstas para ocorrerem no Brasil.

Diante desse crescente consumo de cimento e visando à racionalidade, à sustentabilidade das jazidas fornecedoras de matérias-primas para produção do clínquer e à maior vida útil das estruturas de concreto, tem-se procurado soluções

que contribuam para aumento da durabilidade e minimizem o impacto ambiental gerado na produção do concreto.

Diversos pesquisadores constataram que uma das alternativas encontradas, visando à redução da emissão de gases poluentes sem que haja prejuízo na resistência, nem na durabilidade, é o uso de subprodutos agroindustriais com características cimentícias e pozolânicas (adições minerais) na substituição parcial do cimento nas misturas de concreto. Segundo Neville (1997), o uso de adições minerais justifica-se, além da diminuição do impacto ambiental, pelo aprimoramento das propriedades do concreto e pelos menores custos de manutenção.

Os subprodutos agroindustriais geralmente contêm metais tóxicos e, quando descartados em locais impróprios, assumem o papel de resíduos poluentes, danosos ao solo e ao lençol freático. Dentre as adições minerais úteis ao concreto, podem-se citar a cinza volante, o metacaulim e a sílica ativa, constituídos essencialmente de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Este composto químico reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) remanescente da reação de hidratação do cimento Portland, denominada de reação pozolânica, formando produtos resistentes.

Outro material com característica pozolânica é a cinza de casca de arroz (CCA), proveniente da queima da casca de arroz, subproduto das indústrias de beneficiamento do arroz.

O arroz, segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), é considerado o cereal mais cultivado no mundo e contém, em média, 95 a 98% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), principalmente em sua casca (HOUSTON, 1972). Por possuir uma superfície irregular e abrasiva, com resistência à degradação natural, e um alto poder calorífico, esse resíduo é amplamente utilizado por diversas indústrias como fonte de energia através da queima, gerando grandes quantidades de cinzas de casca de arroz.

No Brasil, a produção de arroz para o ano de 2011 foi de pouco mais de 13 milhões de toneladas (IBGE, 2011). O estado do Rio Grande do Sul é responsável por grande parte dessa produção, sendo um potencial fornecedor do resíduo proveniente dessa produção. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que cada tonelada de arroz gera 200kg de casca e, após a queima, resulta em 40kg de cinza, ou seja, 20% da casca de arroz são convertidos em cinza.

Diante disso, o emprego da cinza de casca de arroz tem sido investigado por diversos pesquisadores do Brasil e do exterior. Desde a década de 70, a CCA vem

sendo estudada, principalmente, na Índia, Estados Unidos, Tailândia, Polinésia, entre outros. O uso da CCA foi expandido pelo mundo graças aos estudos de pesquisadores como: P. C. Kapur (Instituto Tecnológico Kanpur – Índia), P. K. Metha (Universidade de Berkeley – Califórnia) e J. Sallas Serrano (Instituto Eduardo Torroja – Madri), além de outros que visaram à utilização desse produto em diversos setores industriais e, de maneira especial, na indústria da Construção Civil (POUEY, 2006).

Como material adicionado conjuntamente ao cimento Portland, muitas propriedades únicas apresentadas pela cinza de casca de arroz são citadas. No concreto fresco, por exemplo, adições de misturas pozolânicas, tais como a CCA, têm a capacidade de reduzir a segregação e a exsudação, e isto acarreta em grande melhoria da trabalhabilidade (PRUDÊNCIO JR. et al, 2003).

No Brasil, vários trabalhos estão sendo desenvolvidos a fim de aproveitar a CCA no aprimoramento das propriedades do concreto. E isso se dá, principalmente, em regiões produtoras de arroz, tais como: Rio Grande do Sul (ISAIA, 1995; ISAIA, GASTALDINI e MORAES, 2001; SILVEIRA, 2007), Santa Catarina (GUEDERT, 1989; DELLA, 2005, entre outros) e Distrito Federal (RÊGO, 2004).

O uso da sílica ativa (SA) como material pozolânico também vem sendo estudado por vários pesquisadores (HOFFMANN, 2001; VIEIRA, 2003; CARMO, 2006, entre outros), e todos são unânimes nas melhorias do desempenho dos concretos e argamassas com essa adição. Dessa forma, o uso desse material é proposto nesta pesquisa, a fim de estabelecer um parâmetro de comparação com a cinza de casca de arroz.

A substituição parcial do cimento do concreto por subprodutos pozolânicos gera benefícios de ordens técnica, econômica e ambiental. Porém, para o melhor aproveitamento desses materiais, aspirando à garantia da durabilidade das estruturas, faz-se necessário que as técnicas e as práticas construtivas sejam adequadas a seus usos. Desse modo, o estudo do comportamento dessas adições minerais, frente aos agentes de degradação do concreto, torna-se proeminente, para evitar ou minimizar falhas no emprego desses materiais.

## **1.1 Definição temática**

### **1.1.1 Apresentação do tema**

O tema da pesquisa consiste no estudo de concretos com diversas adições minerais: cinzas de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico (cinza de casca de arroz clara e cinza de casca de arroz escura) e sílica ativa.

Tem-se como premissa avaliar o desempenho das adições minerais, comparando os concretos frente à resistência à compressão axial, à retração total, à penetração de íons cloreto, além de uma análise de custo das misturas pesquisadas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Esta pesquisa tem como objetivo principal analisar o desempenho de concretos de cimento Portland com alta resistência inicial (CPV-ARI), com e sem adição de cinza de casca de arroz clara e escura e sílica ativa aplicadas em substituição ao cimento nos teores de 5%, 10%, 20% e 30%, frente à resistência à compressão axial, à retração total e à penetração de íons cloreto.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Com a finalidade de atender ao objetivo geral da pesquisa, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Averiguar a influência das adições minerais (cinza de casca de arroz clara, cinza de casca de arroz escura e sílica ativa) e dos teores de substituição no desempenho dos concretos, frente à resistência à compressão axial, à retração total e à penetração de íons cloreto em corpos-de-prova de diferentes idades;
- Observar e comparar a influência dos diferentes prazos de cura úmida e das diferentes relações água/aglomerante (a/agl) frente à resistência à compressão axial, à retração total e à penetração de íons cloreto em concretos com e sem cinza de casca de arroz clara e escura e sílica ativa;
- Definir a viabilidade econômica (custo) das misturas pesquisadas;
- Comparar os desempenhos dos concretos com cinza de casca de arroz clara e escura e sílica ativa entre si, com relação às propriedades pesquisadas.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está estruturada em 8 capítulos, definidos a seguir:

No capítulo 1, realiza-se a introdução ao tema proposto, expondo a importância da pesquisa e os objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 apresenta a definição das adições minerais pertinentes a esta pesquisa, relatando as formas de obtenção, principais características e os benefícios da utilização dessas adições no concreto, mencionando pesquisas anteriores relevantes ao tema.

O capítulo 3 trata das definições gerais para o conceito durabilidade no concreto.

O capítulo 4 descreve parâmetros relacionados ao fenômeno da retração no concreto, abordando os fatores relevantes para o estudo, como conceitos e classificações dos tipos de retrações, enfatizando o fenômeno da retração hidráulica.

O capítulo 5 aborda a ação dos íons cloreto no concreto armado, relatando os mecanismos de penetração dos íons e o processo de corrosão de armadura.

O capítulo 6 faz menção aos materiais empregados na produção dos concretos avaliados na pesquisa, expondo suas características físicas e químicas. Também são mencionados, nesse capítulo, os métodos de ensaio realizados.

O capítulo 7 apresenta os resultados obtidos juntamente com a análise teórica e a comparação entre grandezas pertinentes.

O capítulo 8 finaliza a dissertação com as conclusões e considerações finais a partir da análise dos resultados, esclarecendo as questões levantadas nos objetivos da pesquisa. Apresenta também sugestões para pesquisas futuras.

## **2 ADIÇÕES MINERAIS**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo, são revistos temas como: o dióxido de silício; a casca de arroz, suas características e usos; a cinza de casca de arroz, abordando o método de obtenção, características e usos, além da sua aplicação como pozolana, e a sílica ativa, forma de obtenção, características e usos, citando estudos com essas adições minerais pertinentes à pesquisa.

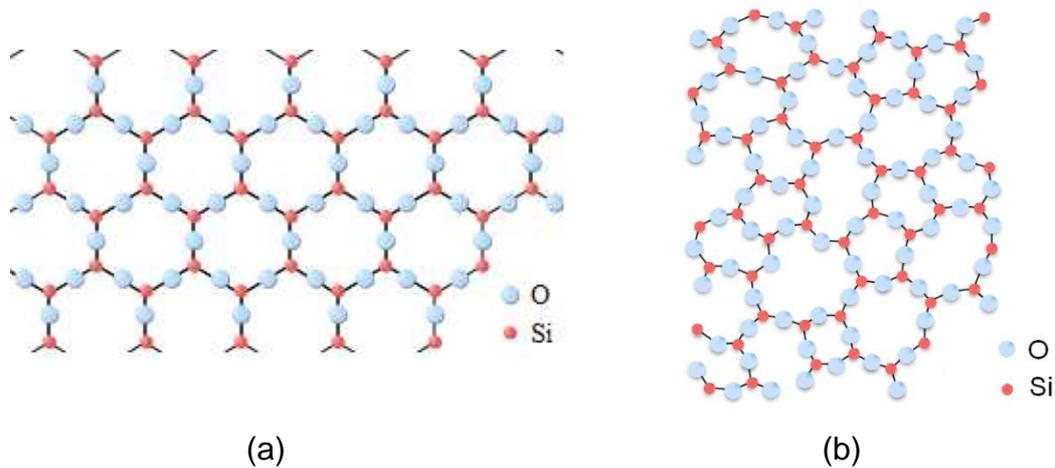
### **2.2 Dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>)**

O composto químico dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), comumente conhecido por sílica, pode ser encontrado na natureza de diferentes formas: puro, hidratado e mineral. A forma pura é encontrada em rochas de quartzo, areia, arenitos e quartzitos. A sílica, na forma hidratada, é encontrada no mineraloide opala. Na forma mineral, a sílica apresenta-se em diferentes associações que dão origem a feldspatos, silicatos, dentre outros (DELLA, 2005).

Algumas das características da sílica são: elevada refratariedade, resistência a ataques químicos e a choque térmico, baixa condutividade térmica e resistência mecânica. Tais características fazem com que a sílica possua uma ampla utilização na indústria, sendo matéria-prima de refratários, vidros, isolantes térmicos, etc (DELLA, 2005).

Na indústria da construção civil, como componente em cimentos, concretos e argamassas, os compostos da sílica com cálcio (C-S-H) têm fundamentais importâncias, pois são responsáveis pela resistência mecânica, viscosidade e tempo de endurecimento. Devido a sua vasta aplicabilidade, o conhecimento de suas características é, até hoje, interesse de estudos para muitos pesquisadores.

Quanto à sua estrutura, a sílica pode ser cristalina ou amorfa (não cristalina). A Figura 2.1 representa, esquematicamente, a estrutura dos átomos da forma cristalina (a) e do arranjo atômico aleatório da forma amorfa (b).



**Figura 2.1 - Representação esquemática das formas cristalina e amorfa da sílica – (a) cristalina; (b) amorfa - adaptado (KINGERY et al., 1976)**

A sílica pode ser encontrada na natureza na forma cristalina em mais de uma forma (polimorfismo), dependendo da orientação e da posição do tetraedro (isto é, a unidade básica tridimensional de todas as formas da sílica cristalina). As formas cristalinas naturais mais comumente encontradas são o quartzo, tridimita e a cristobalita, nas quais os átomos adotam arranjos ordenados e repetitivos, formando estruturas tridimensionais periódicas. Por outro lado, a sílica amorfa é uma estrutura formada de átomos com orientação somente a curta distância, de fácil moagem e altamente reativa (OHLWEILER, 1971; IARC, 1997; DELLA 2005)

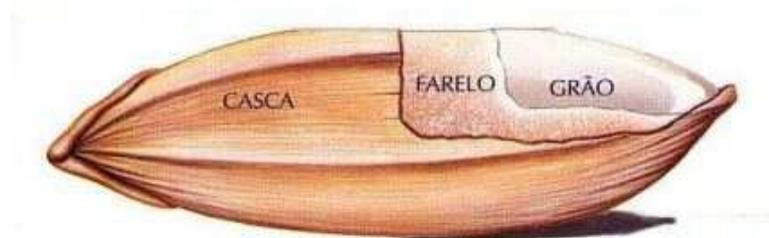
Neste trabalho, a sílica amorfa utilizada foi proveniente da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.

### **2.3 Casca de arroz (CA)**

O arroz representa a base alimentar de mais de metade da população mundial. O grão de arroz é a semente de uma planta do gênero das ervas semi-aquáticas (*Oryza sativa*), e a planta pode ter entre 40 cm a 1m de altura com crescimento que varia entre 3 a 6 meses, dependendo da variedade e das condições

do cultivo. As maiores riquezas nutricionais do grão de arroz estão no alto teor de amido, nas proteínas e nas suas vitaminas, dependendo do processamento a que ele foi submetido. A colheita apanha os grãos de arroz na sua casca, conhecido por arroz em casca. Dentro da casca, encontra-se o grão, protegido pela película (um conjunto de finas camadas de células diferenciadas de cor acastanhada). Cada grão pesa de 10mg a 45mg (peso seco), sendo a casca 20% do peso (SOUSA, 2005).

A casca de arroz (CA) é uma cobertura protetora, formada durante o crescimento do grão, constituída por camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas (HOUSTON, 1972). A Figura 2.2 demonstra a divisão, de forma geral, do grão de arroz.



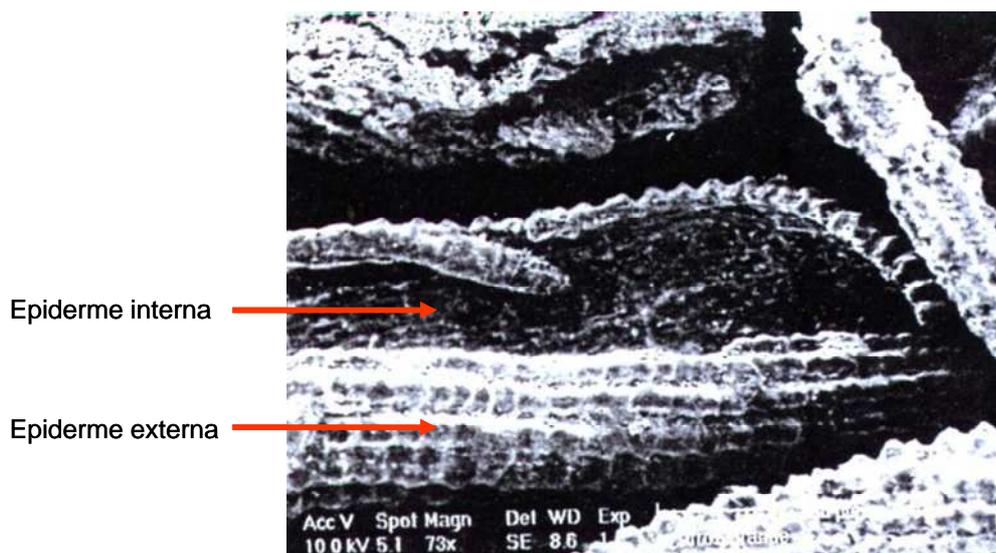
**Figura 2.2 - Divisão geral do grão de arroz**  
([http://www.ufrgs.br/alimentus/terraearroz/grao/gr\\_divisao.htm](http://www.ufrgs.br/alimentus/terraearroz/grao/gr_divisao.htm))

O processo industrial básico de processamento do arroz em casca é constituído, segundo Sousa (2005), por duas etapas: o descasque, em que é removido cerca de 20% da casca, obtendo-se o arroz em película, conhecido como arroz integral, e o branqueamento, em que se retira a película por fricção entre rolos. Esse processo retira mais 10% do peso do grão.

Segundo Amick (1982), a casca de arroz é composta de, aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de resíduos inorgânicos. O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98% em peso de sílica na forma amorfa hidratada (HOUSTON, 1972). Essa variação do percentual de sílica presente na casca de arroz depende da safra, ou seja, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da localização geográfica (AMICK, 1982).

A remoção da casca de arroz, durante o refino, possui baixo valor comercial, pois a sílica e as fibras contidas não têm valor nutritivo na alimentação humana ou animal (REAL et al, 1996).

A casca de arroz é composta, segundo Houston (1972), por quatro camadas estruturais: epiderme externa, coberta com uma espessa cutícula de células silificadas; esclerênquima ou fibra hipoderme, com parede lignificada; célula parênquima esponjosa e epiderme interna. A Figura 2.3 mostra a micrografia da casca de arroz, em que se pode observar a epiderme interna e a epiderme externa.



**Figura 2.3 - Micrografia da casca de arroz - adaptado (REAL et al, 1996)**

A diversidade de usos admitidos à casca de arroz vem sendo estudados por vários autores (POUEY, 2006). A seguir, são citadas algumas utilizações da casca de arroz, segundo Isaia (1987), Houston (1972), Nitzke e Biedrzycki (2004).

- Na agropecuária, a casca de arroz é muito utilizada como cobertura morta, agindo como condicionador físico do solo. Também é empregada no tratamento dos solos como fertilizante e corretivo, embora tenha um baixo teor de nutrientes. Na criação de animais, a casca de arroz é empregada usualmente como cama que, mais adiante, será misturada ao solo com alto valor fertilizante devido à incorporação de nutrientes provenientes dos dejetos dos animais.
- Na construção civil: associada à argila, é utilizada na produção de tijolos, painéis, telhas e em concretos pré-moldados. Como possui um baixo

coeficiente de transferência de calor, a casca de arroz pode ser utilizada como isolante térmico.

- Na obtenção de sílica: a obtenção de sílica, com alto grau de pureza, a partir da casca de arroz tratada com banhos químicos, é realizada para aplicação na indústria cerâmica e para a fabricação de fotocélulas, próteses dentárias, entre outras.
- Na geração de energia: devido ao alto poder calorífico da casca de arroz, seu uso como combustível alternativo é amplamente utilizado.

O Brasil está entre os dez principais produtores mundiais de arroz, com média de 11 milhões de toneladas por safra. Essa produção é oriunda de dois sistemas de cultivo: irrigado e sequeiro.

O cultivo do arroz irrigado, presente em todas as regiões brasileiras, destaca-se na Região Sul, que é responsável, atualmente, por 60% da produção total desse cereal (EMBRAPA, 2005).

Há, no país, centenas de usinas de beneficiamento de arroz, 300 delas localizadas no Rio Grande do Sul, onde há a produção de mais de 1 milhão de toneladas de casca de arroz, que é classificada como resíduo sólido, conforme definição instituída pela NBR 10004/2004. A Resolução do CONAMA nº 005 de 1993, em seu Art. 7º, determina que os resíduos sólidos sejam destinados segundo normas estabelecidas pela ABNT. O Quadro 2.1 mostra a produção brasileira de arroz e casca na safra 2010/2011, evidenciando a produção da região Sul.

Os resíduos sólidos são separados em três classes, conforme Resolução do CONAMA nº 23 de 1996: Classe I, resíduos perigosos; Classe II, resíduos não perigosos e não inertes; e Classe III, resíduos inertes. A mesma legislação ainda define “outros resíduos” que representam os resíduos domésticos ou o resultado da incineração dos mesmos. De acordo com essa classificação, a casca de arroz é considerada um resíduo sólido pertencente à Classe II. Estes resíduos, segundo a NBR 10004/2004, possuem algumas propriedades como: biodegradabilidade e combustibilidade (WALTER E ROSSATO, 2010).

| Região            | Produção de arroz | Produção de casca* |
|-------------------|-------------------|--------------------|
|                   | Mil toneladas     | Mil toneladas      |
| Norte             | 1103,9            | 220,8              |
| Nordeste          | 1136,6            | 227,3              |
| Centro-Oeste      | 1010,1            | 202,0              |
| Sudeste           | 175,3             | 35,1               |
| Sul               | 10035,5           | 2007,1             |
| Paraná            | 158,2             | 31,6               |
| Santa Catarina    | 1045,3            | 209,1              |
| Rio Grande do Sul | 8832,0            | 1766,4             |
| <b>Brasil</b>     | <b>13461,40</b>   | <b>2692,3</b>      |

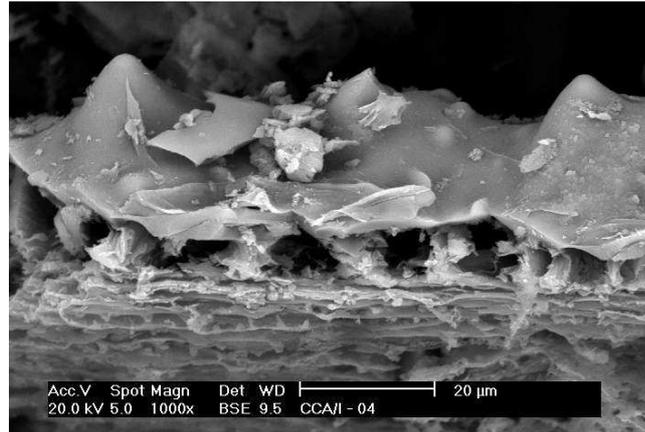
Quadro 2.1 - Produção brasileira de arroz e casca - safra 2010/2011 (ANUÁRIO BRASILEIRO DO ARROZ, 2011)

\*Cálculo segundo Mehta e Monteiro (2008): cada tonelada de arroz gera 200 kg de casca.

## 2.4 Cinza de casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz (CCA) é um subproduto resultante da queima da casca de arroz para a produção de energia calorífica empregada, por exemplo, no processo de secagem e na parboilização dos grãos, junto às beneficiadoras do cereal. Pode ser resultante também do processo de geração de outras formas de energia, como energia elétrica, em usinas termelétricas, ou ainda, de processos de calcinação para obtenção de sílica com alto teor de pureza.

No processo de combustão da casca de arroz, a lignina e a celulose (matéria orgânica) podem ser removidas, restando, principalmente, sílica e algumas impurezas como: carbono, potássio, cálcio e sódio, resultando em uma estrutura porosa (mostrada na Figura 2.4). Quando finamente moída (diâmetro médio das partículas inferior a 0,1 $\mu$ m), a cinza de casca de arroz adquire propriedade pozolânica, segundo Mehta e Monteiro (2008). Assim, sua utilização como adição, para produção de concretos, influencia beneficemente nos aspectos relacionados à resistência mecânica e durabilidade.



**Figura 2.4 - Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz mostrando a porosidade da estrutura. (DAFICO, 2001)**

A cinza de casca de arroz equivale a cerca de 20% da casca queimada e é um material leve, volumoso e altamente poroso. A sua composição química e sua atividade pozolânica estão ligadas ao processo de combustão.

As diferentes tonalidades possíveis à cinza de casca de arroz estão associadas à presença de impurezas, ao processo de combustão e às transformações estruturais ocorridas no material, decorrentes da variação da temperatura de queima. Quando parcialmente queimada, a casca de arroz gera uma cinza com maior teor de carbono, possuindo uma cor escura, indicando a presença de matéria orgânica não queimada. A cor branca, por sua vez, indica a completa oxidação do material, segundo Dafico e Prudêncio Jr. (2002).

Para Bartha (1995, apud Pouey, 2006), a queima da casca de arroz até 500°C gera como resíduo uma cinza escura, rica em carbonos fixos e constituída basicamente de sílica amorfa. A partir de 750°C, a cinza torna-se mais clara, devido à oxidação dos carbonos fixos, e a sílica mais cristalina. A remoção dos carbonos fixos se dá pela presença do oxigênio no ar.

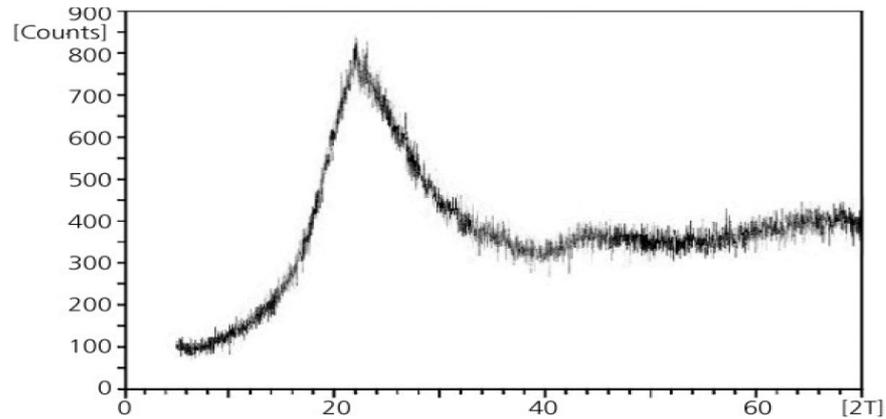
Mehta (1992), em estudos experimentais com a finalidade de obter condições ótimas de queima para produção de cinzas com reatividade pozolânica, indica que, quando a temperatura de queima situa-se na faixa de 500 a 700°C, ou, se o tempo de combustão é menor que 1 minuto em temperaturas entre 700 e 800°C, a sílica residual é mantida em fase amorfa e com alta porosidade interna indicada pela área específica de 50 a 100 m<sup>2</sup>/g medida através do método de adsorção de nitrogênio.

Pouey (2006) afirma que o processo de combustão depende do tipo de equipamento utilizado (céu aberto, fornalhas tipo grelha ou leito fluidizado), da temperatura de queima e do tempo de exposição. Diversos autores citados por Mehta (1992) concluíram que, com o aumento da temperatura além de 870 °C, a sílica presente na CCA transforma-se em sílica cristalina. O Quadro 2.2 mostra os efeitos das condições da combustão da casca de arroz nas diferentes temperaturas segundo Mehta (1992).

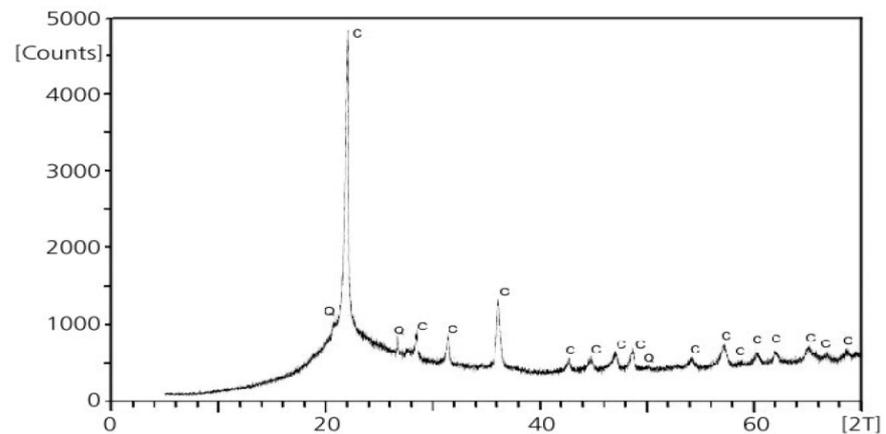
Chandrasekhar et al. (2003) afirmam que a queima sem controle da casca de arroz fornece como produto a CCA rica em sílica, normalmente, na forma cristalina. Se submetida à queima controlada, a sílica pode ser amorfa, caracterizada por uma alta reatividade. As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam os difratogramas de raios-X da cinza de casca de arroz obtida com e sem o controle de temperatura, sendo amorfa na primeira e cristalina na segunda.

| <b>Temperatura de combustão</b> | <b>Tempo de queima</b> | <b>Ambiente</b>         | <b>Propriedade da sílica</b> |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
| <b>500-600°C</b>                | 1 min                  | Moderadamente oxigenado | Amorfa                       |
| <b>500-600°C</b>                | 30 min                 | Moderadamente oxigenado | Amorfa                       |
| <b>500-600°C</b>                | 2 h                    | Moderadamente oxigenado | Amorfa                       |
| <b>700-800°C</b>                | 15min-1h               | Moderadamente oxigenado | Amorfa                       |
| <b>700-800°C</b>                | 15min-1h               | Muito oxigenado         | Parcialmente cristalina      |
| <b>&gt;800°C</b>                | 1h                     | Muito oxigenado         | Cristalina                   |

**Quadro 2.2 - Efeito das condições de combustão na estrutura da sílica contida na cinza de casca de arroz. (MEHTA, 1992)**



**Figura 2.5 - DRX da CCA obtida com o controle de temperatura (amorfa). (PRUDÊNCIO JR. et al, 2003)**



**Figura 2.6 - DRX da CCA obtida sem o controle de temperatura (cristalina). (PRUDÊNCIO JR. et al, 2003)**

Rêgo (2004) afirma que, para diversos autores, a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz é fortemente influenciada tanto pelas condições de queima, quanto pela heterogeneidade das composições físicas (finura) e químicas (teor de  $\text{SiO}_2$ ) da cinza. Os autores pesquisados por ele são unânimes com relação ao aparecimento de fases cristalinas na sílica contida na cinza da casca de arroz queimada a elevadas temperaturas, especialmente, acima de  $700^\circ\text{C}$ .

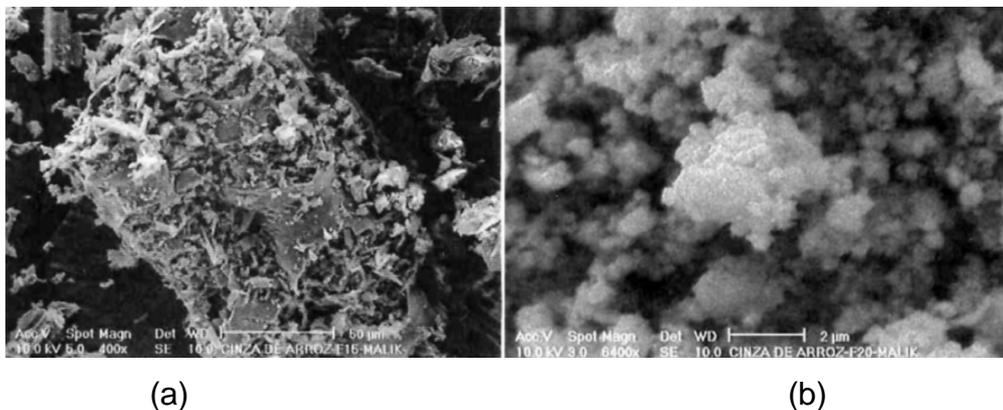
Para Isaia (1995), a cinza de casca de arroz queimada sem controle do processo de queima e com presença de fases cristalinas não pode ser considerada de baixa pozolanicidade sem que tenham sido apresentadas evidências de mau comportamento, quando adicionadas a concretos e argamassas.

Prudêncio Jr. et al (2003) constataram que o desempenho da cinza de casca de arroz obtida de queimas sem um controle efetivo do tempo e da temperatura de

queima foi satisfatório, mesmo para cinzas que exibiam picos cristalinos nos ensaios de difração de raios-X.

Sensale (2006) pesquisou a influência da cinza de casca de arroz na resistência à compressão aos 91 dias. Estudou uma cinza residual (sem controle de temperatura) produzida no Uruguai e uma cinza incinerada com controle de temperatura dos Estados Unidos, para comparação. Os resultados obtidos mostraram que a cinza residual fornece um efeito positivo sobre a resistência à compressão em idades precoces, quando comparados ao concreto de referência (sem cinza), mas o comportamento a longo prazo mostra resultados mais satisfatórios para concretos produzidos com a cinza com controle de temperatura.

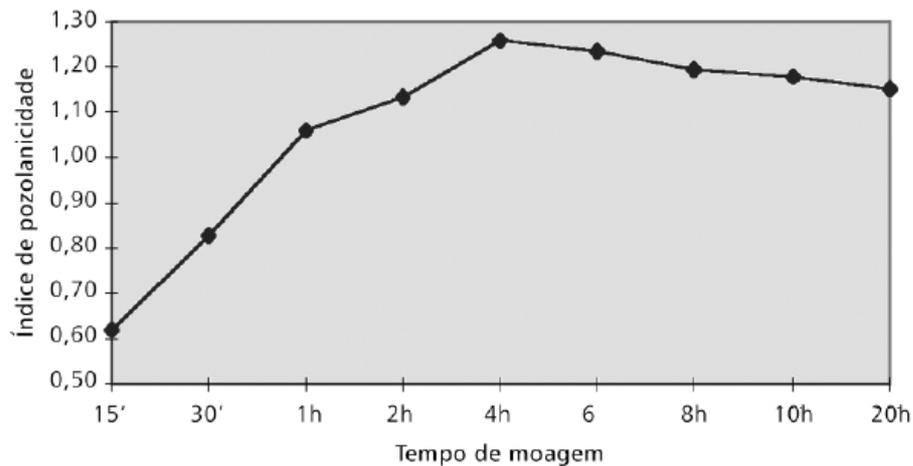
Outro fator importante na atuação da cinza de casca de arroz como adição no concreto é a moagem, pois modifica propriedades físicas da cinza, como a superfície específica e a finura. Estas propriedades estão diretamente ligadas à trabalhabilidade. A moagem consiste da fragmentação de uma estrutura sólida, quando submetida a esforços mecânicos, aplicados por elementos que provocam deformação das partículas a ponto de conferir maior compacidade à mistura, tornando as partículas, inicialmente aciculares, mais próximas da forma esférica, conforme demonstrado na Figura 2.7 (CORDEIRO, 2009).



**Figura 2.7 - Micrografia da CCA: (a) 15 minutos de moagem; (b) 20 horas de moagem (SANTOS, 1997 apud PUDRÊNCIO JR. et al, 2003)**

Diferentes tipos de corpos moedores podem ser utilizados para diminuição das partículas de CCA, dentre os quais estão: o moinho de bolas horizontal e vertical, o agitador, o planetário e o micronizador. O grau de moagem, além de estar diretamente ligado ao tipo e às características de cada moinho, sofre influência significativa da temperatura de queima (CASSAL, 2000; CORDEIRO, 2009).

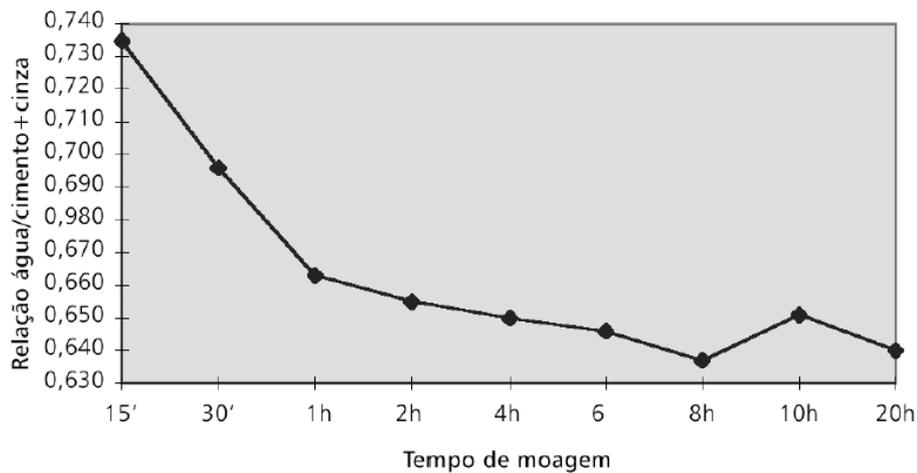
Prudêncio Jr. et al (2003) constataram que, à medida que se aumenta o tempo de moagem, a pozolanicidade também aumenta. No entanto, em moagens prolongadas, esse efeito não se mantém. O autor citado atribui, como causa desse fato, a dificuldade de dispersar partículas muito finas na argamassa, tal qual mostra a Figura 2.8.



**Figura 2.8 - Variação do índice de atividade pozolânica pelo tempo de moagem (SANTOS, 1997 apud PUDRÊNCIO JR. et al, 2003)**

Já Guedert (1989) afirma que o crescimento da área superficial está diretamente ligado ao aumento do tempo de moagem, e este influencia no crescimento da resistência à compressão axial.

Prudêncio Jr. et al (2003) ainda alcançaram outra observação importante: a diminuição da demanda de água das argamassas, com o aumento do grau de moagem, atribuída à destruição progressiva da estrutura esponjosa da cinza (Figura 2.9).



**Figura 2.9 - Demanda de água nos decorridos tempos de moagem. (SANTOS, 1997 apud PUDRÊNCIO JR. et al, 2003)**

## 2.5 Sílica ativa (SA)

A sílica ativa (SA) é um subproduto da fabricação de silício metálico ou de ligas de ferro-silício. Para obtenção, utilizam-se, como matérias-primas, o quartzo e fontes de carbono (carvão). No caso do ferro-silício, utiliza-se também o minério de ferro como fonte de ferro. O processo é realizado em forno elétrico a temperaturas elevadas, de 1600 a 2000°C. O quartzo é reduzido, e o carbono liberado na forma de CO<sub>2</sub>, gerando o dióxido de silício ou sílica amorfa (SiO<sub>2</sub>) como um gás dentro dos fornos. Ao resfriar, o SiO, que se desprende na forma de gás, oxida-se e condensa em um material composto de partículas esféricas extremamente pequenas, com aspecto vítreo e alta reatividade (SILVA E LIBORIO, 2005). O processo de obtenção da sílica ativa está demonstrado esquematicamente na Figura 2.10.

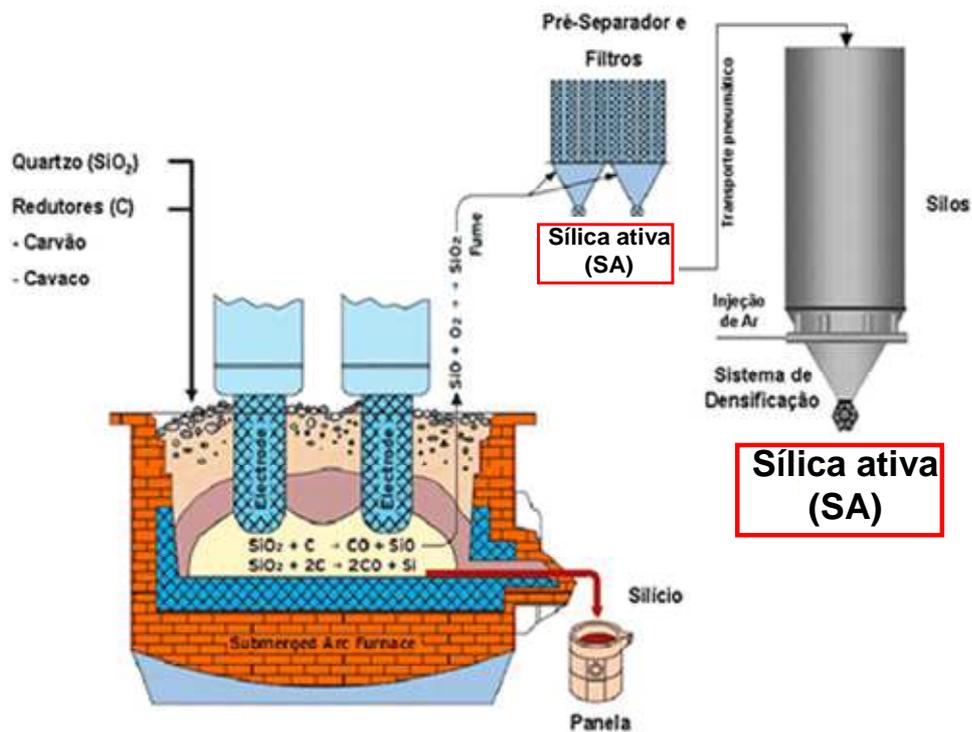
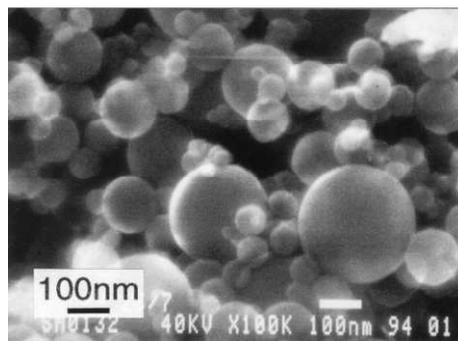


Figura 2.10 - Ilustração esquemática do processo de obtenção da sílica ativa - adaptado (<http://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>)

As principais características da sílica ativa são granulometria, área específica e pozolanicidade, por ser amorfa. Anjos et al (2004) afirmam que as partículas da sílica ativa apresentam uma morfologia de esferas “quase” perfeitas (Figura 2.11), com diâmetros que podem variar de 0,02 a 0,5  $\mu\text{m}$  (com diâmetro médio de 0,1  $\mu\text{m}$ ) e a área superficial em torno de 20  $\text{m}^2/\text{g}$ . Na composição da SA, pode haver uma variação de 85 a 95% de sílica amorfa, com algumas impurezas, como silício metálico (MITCHELL et al, 1998).

Sua composição química varia em função do tipo de fábrica de produção, da origem da matéria-prima e do método de operação da fabricação. Para Aïtcin (1998), quanto maior o teor de silício da liga, maior será o teor de  $\text{SiO}_2$  da sílica ativa. A sílica produzida durante a fabricação do silício metálico geralmente contém mais de 90%  $\text{SiO}_2$ , enquanto a sílica ativa produzida durante a fabricação de uma liga de ferro-silício tem um teor de  $\text{SiO}_2$  que pode variar de 40 a 90% de silício ligado ao ferro.



**Figura 2.11 - Morfologia da sílica ativa mostrando as partículas de forma esférica. (MITCHELL et al, 1998)**

Os primeiros estudos da utilização da sílica ativa iniciaram na década de 50. Porém, seu uso efetivo, em concretos com cimento Portland, iniciou em 1970, na Escandinávia, demorando cerca de dez anos para ser aplicada na América do Norte. Tal demora é devida à implementação de leis ambientais que impediram o descarte desse subproduto em aterros, tornando o seu uso economicamente viável em várias aplicações, particularmente, em concretos e argamassas.

Diversos pesquisadores (MEHTA, 1989; DAL MOLIN, 1995; MITCHELL; HINCKZAK E DAY, 1998; RAO, 1998; SILVA E LIBORIO, 2005; entre outros) estudaram o desempenho dos concretos com a substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa. Os efeitos benéficos nas suas propriedades são unânimes entre os estudiosos, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido das misturas.

A contribuição da sílica ativa para a resistência à compressão do concreto está, segundo Metha e Malhotra (2008), diretamente relacionada a diversos fatores, tais como: teor na mistura, suas características físicas, químicas e mineralógicas, composição do cimento, relação água/aglomerante, tipo e dosagem do aditivo, temperatura, umidade, dosagem e processo de cura úmida. Os autores estudaram o teor ótimo de substituição do cimento por sílica ativa, concluindo que varia de 7 a 10%, podendo chegar, em situações especiais, a 15%. Dal Molin (1995) adotou um teor de substituição de 10% de sílica ativa sobre a massa do cimento, obtendo, aos 28 dias, melhoria média de 16% na resistência à compressão axial, em diferentes relações água/aglomerante, quando comparada ao concreto sem adição. Aïtcin (1998) sugere que os teores ideais são de 8 a 10% da massa de cimento para melhorias nas propriedades mecânicas do concreto.

Para o desempenho citado, a sílica ativa, a ser utilizada em substituição do cimento Portland, deve estar em conformidade com as normas NBR 13.956/1997 e NBR 13.957/1997, possuindo um alto teor de sílica amorfa e quantidades pequenas de alumina, ferro, álcalis, cálcio, carbono, e demais impurezas.

## **2.6 Características do concreto com adições**

Como observado, o uso de adições minerais, geralmente, reflete uma série de benefícios para o concreto. Mehta e Malhotra (2008) citam esses benefícios de forma geral segundo três categorias:

- Tecnológicos: aumento da durabilidade do concreto e a melhoria de suas propriedades mecânicas.
- Econômico: no concreto, o cimento Portland é, geralmente, o material com maior custo e a utilização de pozolanas, via de regra, acarreta diminuições no seu consumo e no da energia utilizada para a sua produção. Assim sendo, a redução do uso do cimento resulta em economia para a produção do concreto.
- Ecológicos: grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais. Na maioria desses resíduos, constata-se a presença de elementos poluentes que podem provocar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana.

A substituição do cimento por pozolanas resulta ao concreto alterações em suas propriedades tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Essas propriedades tendem a refletir a ação física, principalmente, no que se refere ao tamanho das partículas, bem como a ação química resultante da atividade pozolânica e a atuação em conjunto das duas ações.

Para Sensale e Dal Molin (1999), vários são os efeitos das pozolanas altamente reativas (cinza de casca de arroz e sílica ativa) no concreto, devido às características das partículas. O efeito microfíler é aquele associado ao aumento da densidade da mistura pelo tamponamento dos poros promovido pelas minúsculas

partículas das pozolanas. Também ocorre o refinamento da estrutura dos poros e dos produtos da hidratação do cimento, em virtude da atuação das pequenas partículas das adições. Outro efeito é a reação pozolânica, na qual ocorre o consumo do hidróxido de cálcio pela sílica amorfa presente nas pozolanas altamente reativas, levando a uma alteração da microestrutura da zona de transição da pasta com o agregado, resultando uma interface mais uniforme e menos porosa.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que, em concretos frescos que mostram uma tendência à exsudação e à segregação, a incorporação de partículas finamente divididas geralmente melhora a trabalhabilidade, por reduzir o tamanho e o volume de vazios, logo, quanto mais fina for a adição mineral menor a quantidade necessária do material para aumentar a coesão e, conseqüentemente, a trabalhabilidade.

Os autores também alegam que, para uma dada consistência, o uso de materiais de área específica muito elevada, tende a aumentar o consumo de água em argamassas e concretos.

Mehta (1989) constatou o aumento da trabalhabilidade decorrente da forma esférica da sílica ativa em misturas, em que utilizou teores de adição na ordem de 2 a 3% em relação à massa do cimento. Essa melhoria pode ser refletida numa maior facilidade de bombeamento e lançamento do concreto, compensando possíveis diminuições do abatimento da mistura. Com relação à adoção de maiores teores de sílica ativa, Mehta e Malhotra (2008), tendo como base várias pesquisas com o uso de 10% de sílica ativa, constataram que o aumento da necessidade de água por parte da mistura não é constante. Já em concretos com baixo consumo de cimento ( $100 \text{ kg/m}^3$ ), há um decréscimo da demanda de água com a adição de sílica ativa, ao passo que, em concretos com maior consumo ( $>250 \text{ kg/m}^3$ ), a demanda de água aumenta com a adição de sílica ativa.

Outra característica dos concretos com pozolanas de alta reatividade é o melhor desempenho na resistência à compressão devido à ação química e física das adições. Mehta e Monteiro (2008) creditam essa melhoria na resistência, principalmente, ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento hidratada, pois provocam um aumento da resistência na zona de transição.

Para Dal Molin (1995), a melhoria da estrutura interna do concreto proporciona uma estimativa do seu desempenho tanto em termos mecânicos, como,

indiretamente, da durabilidade. A autora estudou concretos com diferentes relações água/aglomerante e substituição de 10% de sílica ativa sobre a massa do cimento. Constatou que, aos 28 dias de idade, os concretos obtiveram uma melhoria média de 13,51% em relação aos concretos que não continham a adição.

Os concretos com adições também se caracterizam por serem mais resistentes a agentes agressivos como: cloretos e sulfatos, devido à diminuição da difusão, já que esses concretos são menos porosos ou têm maior refinamento dos poros, resultando em misturas mais compactas.

Sensale (2010) estudou o efeito da cinza de casca de arroz na penetração de cloretos, expansão álcali-sílica, entre outros aspectos referentes à durabilidade de materiais cimentícios. Foram pesquisadas duas cinzas de casca de arroz, uma amorfa e outra parcialmente cristalina. Os resultados encontrados mostram a eficácia de ambas as cinzas na produção de concretos e argamassas, através de avaliações do desempenho das amostras estudadas.

Chindaprasirt e Rukzon (2007) analisaram os efeitos da cinza de casca de arroz e cinza volante em argamassas de misturas binárias e ternárias com cimento Portland na resistência à compressão, à porosidade e à corrosão. Os pesquisadores concluíram que o uso das adições minerais, tanto em misturas ternárias, quanto binárias, melhoraram os resultados de resistência à compressão e à corrosão, quando comparadas à mistura de referência (sem adição mineral). Porém, as misturas ternárias apresentaram resultados mais consistentes em relação às misturas com uma única adição mineral.

### **3 DURABILIDADE DO CONCRETO: DEFINIÇÕES GERAIS**

Segundo a NBR 6118/2007, a durabilidade do concreto consiste na sua capacidade de resistir às influências ambientais e conservar a segurança, estabilidade e comportamento adequado durante o período correspondente à sua vida útil. A durabilidade das estruturas de concreto requer, segundo Carvalho e Filho (2009), cooperação e esforços coordenados entre os agentes responsáveis pelos projetos (construtora, engenheiros, arquitetos, usuários, etc.).

Neville (1997) afirma que uma estrutura de concreto é durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade que dela se esperam durante um período de vida previsto. O concreto deve suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido.

Quando se objetiva a qualidade das estruturas, é imprescindível a adoção de medidas apropriadas que garantam a sua durabilidade. Muitas dessas medidas constituem critérios a serem observados ainda na fase de projeto de uma estrutura.

Assim, na década de 90 do século passado, houve um forte movimento para introdução e caracterização do conceito de vida útil no projeto das estruturas de concreto.

Os erros de projeto, juntamente com a utilização de materiais inadequados, representam uma parcela relativamente grande das causas de patologias. Para que possam ser elaboradas especificações adequadas, torna-se imprescindível conhecer o comportamento dos materiais que compõem a estrutura, quando submetidas às várias condições de exposição. Outro aspecto de extrema relevância é a avaliação do nível de agressividade do meio ambiente.

A inserção de estruturas de concreto, em ambientes hostis e sujeitos a intempéries, acelera os processos de deterioração e desagregação do concreto, exigindo adequação da produção, de maneira a manter as condições de projeto.

Diante disso, devem-se projetar estruturas de concreto visando ao prolongamento da vida útil, ou seja, projetar em função do desempenho que o concreto deve apresentar frente à durabilidade. Para Isaia (1995), a resistência de projeto deve ser fixada através dos requisitos de durabilidade, e não ao contrário como era proposto no passado, ocasionando um grande número de patologias e diminuição da vida útil das estruturas.

Nesta pesquisa, entende-se por vida útil: o período em que a estrutura conserva os requisitos de projeto (segurança, estabilidade, funcionalidade e estética) sem exigir medidas extras de manutenção e reparo. Nesses requisitos, incluem-se aspectos de durabilidade como: as ações do meio ambiente entre as possíveis solicitações a que a estrutura será submetida. Sendo assim, o tema durabilidade está proposto diante do estudo de dois fatores que contribuem para redução da vida útil: retração do concreto e penetração de íons cloreto, sendo o primeiro um fator intrínseco à ao concreto e o segundo um fator ambiental.

### **3.1 Retração do concreto**

#### **3.1.1 Introdução**

Neste capítulo, serão descritos parâmetros relacionados com o fenômeno da retração no concreto. Além disso, fatores relevantes para o estudo serão abordados, como conceitos e classificações dos tipos de retrações. Contudo, uma maior ênfase será destinada ao fenômeno da retração hidráulica, o qual foi estudado nesta pesquisa. Assim, parâmetros referentes aos mecanismos geradores e fatores intervenientes tanto na ocorrência, quanto na magnitude do fenômeno da retração, também serão abordados.

#### **3.1.2 Conceito de retração**

A retração é o processo de redução de volume que ocorre na massa de concreto, ocasionada, principalmente, pela saída de água por exsudação. Entretanto, existem outros fenômenos no concreto que provocam diferentes tipos de retração (NEVILLE, 1997).

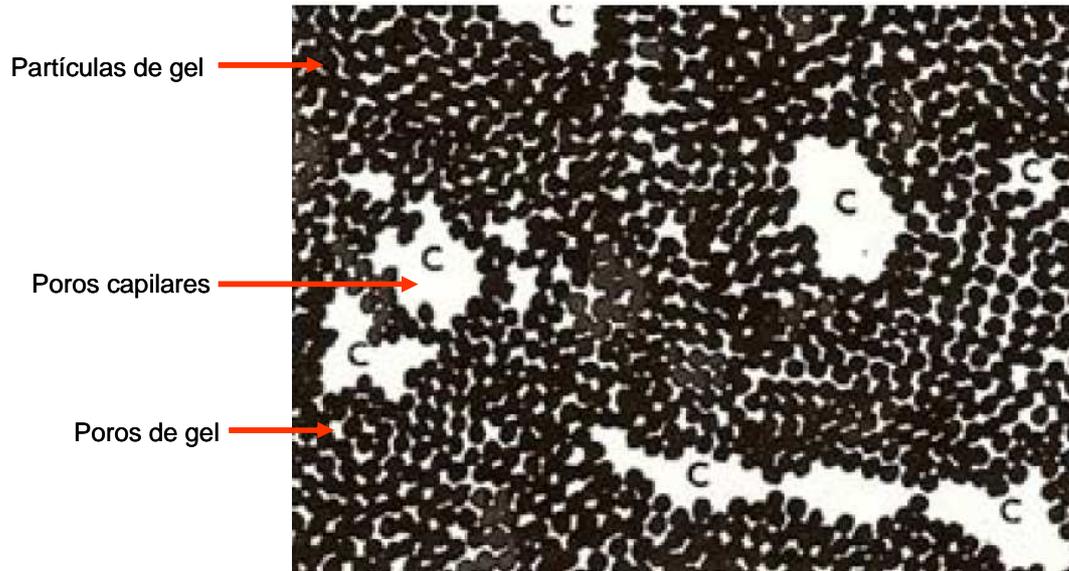
O conhecimento dessa variação de volume do concreto e a compreensão de sua natureza tornam-se necessários na concepção das estruturas (para o controle das fissuras) e útil no planejamento e na análise de obras em concreto.

A retração é uma das propriedades menos desejáveis do concreto. Segundo Alvaredo e Wittmann (1995), o fenômeno da retração é a origem mais frequente da formação de fissuras. Como consequência, essa manifestação patológica permite a entrada de agentes agressivos, os quais contribuem para a aceleração da deterioração da estrutura através de diferentes fenômenos, como, por exemplo, a carbonatação e a corrosão das armaduras, entre outros, reduzindo a vida útil do material.

### 3.1.3 Mecanismos e tipos

A fim de compreender os mecanismos de retração, faz-se necessário definir as condições em que se encontra a água retida na pasta de cimento hidratado, uma vez que seu entendimento é de suma importância para a compreensão dos fenômenos de variação volumétrica do concreto, além do conhecimento dos tipos de poros onde a água pode estar presente.

Segundo Neville (1997), há, na pasta hidratada, duas classes distintas de poros: os poros capilares e os poros de gel, representadas esquematicamente na Figura 3.1. A *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC-1971) classifica os poros em três categorias de acordo com o diâmetro ( $\emptyset$ ): microporos  $\emptyset < 2\text{nm}$ ; mesoporos  $2 < \emptyset < 50\text{nm}$  e macroporos  $\emptyset > 50\text{nm}$ . Os poros capilares representam a parte do volume total não preenchida pelos produtos de hidratação e têm diâmetro compreendido na faixa de mesoporos e macroporos (respectivamente,  $2 < \emptyset < 50\text{nm}$  e  $\emptyset > 50\text{nm}$ ). Logo, conforme se processa a hidratação, ocorre a redução do volume desses poros. Já os poros de gel são os espaços intersticiais interligados entre os produtos de hidratação e têm diâmetro compreendido na faixa denominada dos microporos ( $\emptyset < 2\text{nm}$ ).



**Figura 3.1 - Representação esquemática da estrutura da pasta. Os pontos cheios representam as partículas de gel; os espaços intersticiais, os poros de gel; os espaços marcados com C são os poros capilares - adaptado (NEVILLE, 1997)**

É importante definir também as condições em que se encontra a água na estrutura da pasta de cimento hidratado. Os tipos de água são classificados em função do diâmetro dos poros em que ela se localiza e da sua dificuldade de remoção, sendo classificada em:

- Água quimicamente combinada: é aquela contida nos produtos hidratados do aglomerante, podendo ser removida somente em temperaturas superiores a 100°C;
- Água interlamelar ou intersticial: é a que está nos espaços entre as camadas internas da estrutura do gel, capaz de ser removida quando o ambiente encontra-se com umidade relativa em torno ou abaixo de 11% (TAYLOR, 1997).
- Água adsorvida: é aquela que permanece fisicamente retida na superfície dos produtos sólidos hidratados, sendo geralmente encontrada nos microporos e mesoporos.
- Água capilar: é a que está nos macroporos, também denominada de água livre em razão da baixa tensão superficial.

As deformações ocorridas na matriz cimentícia devem-se aos diferentes tipos de fenômenos, sendo os principais: a retração plástica, a retração química, a

retração autógena, retração ou deformação térmica e a retração hidráulica ou por secagem.

A retração plástica ocorre em um primeiro momento, em que a matriz cimentícia está se transformando de fluido para sólido poroso, contudo, estando em estado plástico, sem ter atingido significativa resistência. (NUNES E FIGUEIREDO, 2007; ALY, SANJAYAN, COLLINS, 2008).

Van Dam et al (2005) afirmam que, como consequência da evaporação inicial da água, é formada uma rede complexa de meniscos, a qual origina pressões negativas, devido ao aumento na tensão superficial dos capilares, assim, levando à contração do volume da pasta de cimento.

A retração química, também denominada de contração de *Le Chatelier*, é definida pela diminuição dimensional que ocorre em decorrência das reações químicas entre os produtos grãos de cimento e as moléculas de água, resultando produtos hidratados de volume menor (NETO, 2002; ZHANG, TAM, LEOW, 2003).

Já a retração autógena pode ser definida como a mudança de volume sob temperatura constante ocorrida sem perda de umidade da mistura cimentícia para ambiente externo. Essa retração é causada pela redução da umidade relativa no interior dos poros em decorrência da evolução da hidratação do cimento. Nesse tipo de retração, ocorre o consumo da água dos capilares em razão das reações de hidratação resultando na retração do material. Esse mecanismo também é conhecido como auto-secagem (HOLT, 2001; SILVA, 2007; MELO NETO, 2008).

A retração térmica, está associada à dissipação do calor gerado nas reações de hidratação do cimento, causando restrições internas ou na contração do elemento devido às variações de temperatura, caracterizado por uma restrição externa (MEHTA E MONTEIRO, 2008; SALES, 2006). Em situações específicas, em que é utilizado calor no processo de cura ou, se o ambiente tem um fluxo de calor intenso, as deformações térmicas podem ser significantes (LAM, 2005).

A retração hidráulica ou por secagem acontece depois do fim da pega do concreto. Durante a transformação da matriz cimentícia de um fluido para um sólido poroso, ocorre a evaporação da água para o ambiente externo, gerando, assim, uma tendência de fissuração no concreto (MEHTA, MONTEIRO, 2008 NUNES, 2006). Tal fenômeno será visto com maiores detalhes no item 3.1.4.

Em estruturas de concreto, a tendência de fissuração presente na matriz cimentícia, ocasionada pelas variações volumétricas provenientes do fenômeno da

retração, é uma manifestação patológica extremamente preocupante. Contudo, esta pesquisa priorizou o estudo das deformações oriundas do fenômeno de retração hidráulica, uma vez que esta é uma grande contribuinte na magnitude da retração total do concreto (HOLT, LEIVO, 2004; MEHTA, MONTEIRO, 2008; NUNES, 2006; SALES, 2006).

#### 3.1.4 Retração hidráulica

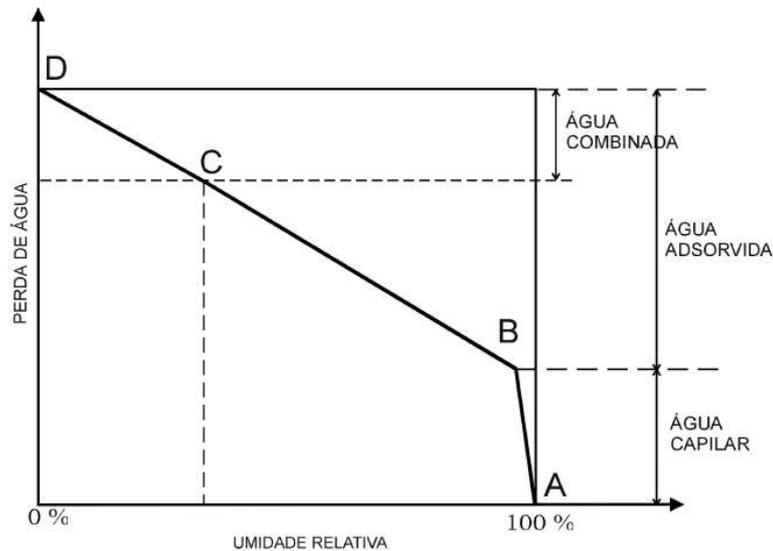
A durabilidade de uma estrutura de concreto está diretamente ligada ao comportamento e à interconexão da rede de poros em seu interior. A porosidade é uma das características que mais interfere nas propriedades do concreto e depende das propriedades físicas e químicas dos materiais constituintes (AÏTCIN, 1998).

Quando o concreto é exposto ao ambiente, tende a atingir um equilíbrio termo-higométrico com ele. Em atmosfera seca, a superfície exposta do concreto perde água por evaporação. Assim, a água presente na mistura que não reage quimicamente tende a evaporar conforme as condições de umidade e temperatura do meio em que o concreto está inserido. Essa evaporação através dos poros pode causar uma retração do concreto, cuja ocorrência e intensidade dependem dos diâmetros dos poros de onde a água é removida. Esse fenômeno (retração hidráulica) ocorre no concreto, submetido ou não a carregamento, devido à perda de umidade, uma vez exposto ao meio ambiente e permitida sua secagem (ACI COMMITTEE 209, 2005).

Segundo Bissonette et al (1999), o fenômeno da retração hidráulica pode ser considerado um dos principais responsáveis pela deterioração das estruturas de concreto. A deformação por retração, quando restringida, pode induzir tensões de tração nos elementos estruturais de concreto. Essas tensões ainda podem provocar fissuras e descontinuidades antes mesmo de a estrutura estar submetida às cargas de serviço, comprometendo precocemente a sua durabilidade e a sua aceitabilidade sensorial (NUNES E FIGUEIREDO, 2007).

A retração hidráulica está relacionada principalmente à remoção da água adsorvida da pasta de cimento, e a água dos vazios capilares provoca uma pequena alteração no volume, conforme demonstrado na Figura 3.2, que mostra a relação

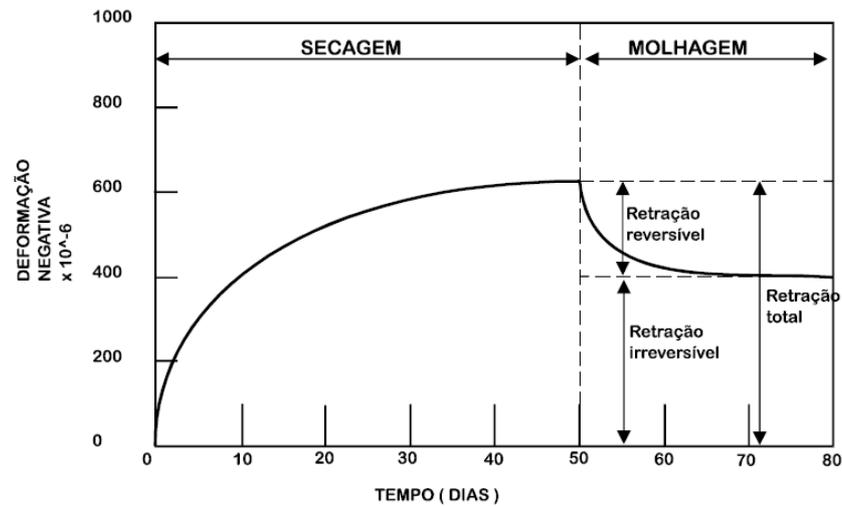
entre a perda de água na pasta e a umidade relativa. O trecho AB corresponde à perda de água capilar, o trecho BC corresponde à perda de água adsorvida fisicamente e o trecho CD corresponde à água quimicamente combinada (L'HERMITE, 1962 apud MEHTA E MONTEIRO, 2008)



**Figura 3.2 - Relação entre a perda de água na pasta e umidade relativa (L'HERMITE, 1962, apud MEHTA E MONTEIRO, 1994)**

Granger et al (1997) afirmam que a retração hidráulica é o momento em que ocorre a primeira mudança macroscópica no material cimentício. A secagem do concreto é um processo lento e ocorre de forma não homogênea na estrutura. Nas camadas superficiais do material cimentício, ocorre o equilíbrio hídrico com a umidade relativa do ambiente externo rapidamente. Porém, no interior do material, o processo é realizado de maneira mais branda, formando um diferencial de secagem.

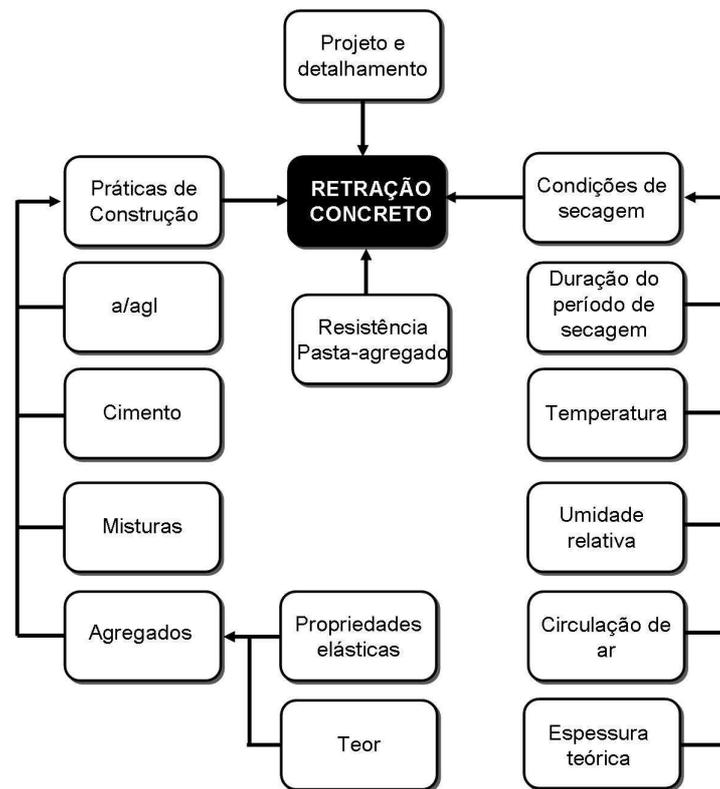
Uma parte da retração hidráulica é irreversível, isto é, após a primeira secagem, o concreto não retorna a dimensão original após a molhagem subsequente (NEVILLE, 1997). A Figura 3.3 apresenta um diagrama que ilustra esse fenômeno. Atribui-se isso ao desenvolvimento de ligações químicas dentro da estrutura do gel (MEHTA E MONTEIRO, 2008).



**Figura 3.3 - Irreversibilidade da retração hidráulica  
(MINDESS E YOUNG, 1981, apud MEHTA, 1994)**

### 3.1.5 Influência da composição do concreto na retração

O fenômeno de retração dos compostos cimentícios é influenciado por uma multiplicidade de fatores relacionados às características intrínsecas do concreto e a fatores externos, como: os materiais constituintes, a dosagem dos concretos, seu teor de água, a relação água/cimento, o tempo e a presença de adições minerais (METHA E MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997). Esses fatores estão representados esquematicamente na Figura 3.4.



**Figura 3.4 - Fatores que influenciam a retração hidráulica - adaptado (CCAA, 2002)**

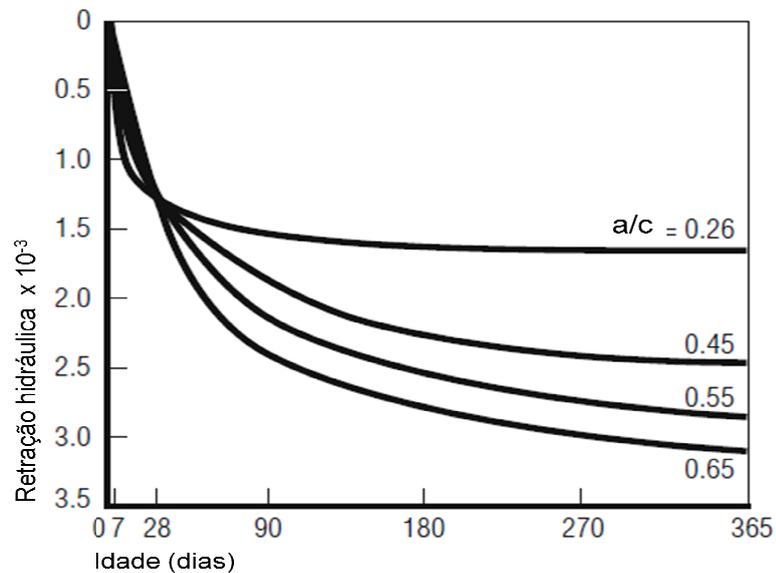
### 3.1.5.1 Influência do conteúdo de água e de cimento

A proporção e os tipos de materiais empregados na mistura de concreto determinam a fração volumétrica de pasta hidratada, a fração volumétrica de vazios e, conseqüentemente, influenciam na deformação de retração hidráulica (NEVILLE, 1997). A relação água/cimento (a/c) influencia diretamente a retração hidráulica, pois esta determina a quantidade de água evaporável na pasta de cimento e a velocidade à qual a água pode se deslocar para a superfície do concreto. Essa relação determina também a estrutura de poros da pasta hidratada e o grau de facilidade de remoção da água.

De acordo com Shoya (1979 apud NEVILLE, 1997), para uma mesma consistência, ou seja, para um mesmo teor de água, a retração não é alterada pelo aumento do teor de cimento ou pode até ser menor, já que é diminuída a relação a/c e, portanto, o concreto será mais capacitado para resistir à retração. O aumento do conteúdo total de água e de cimento na mistura tende à ocorrência de um acréscimo

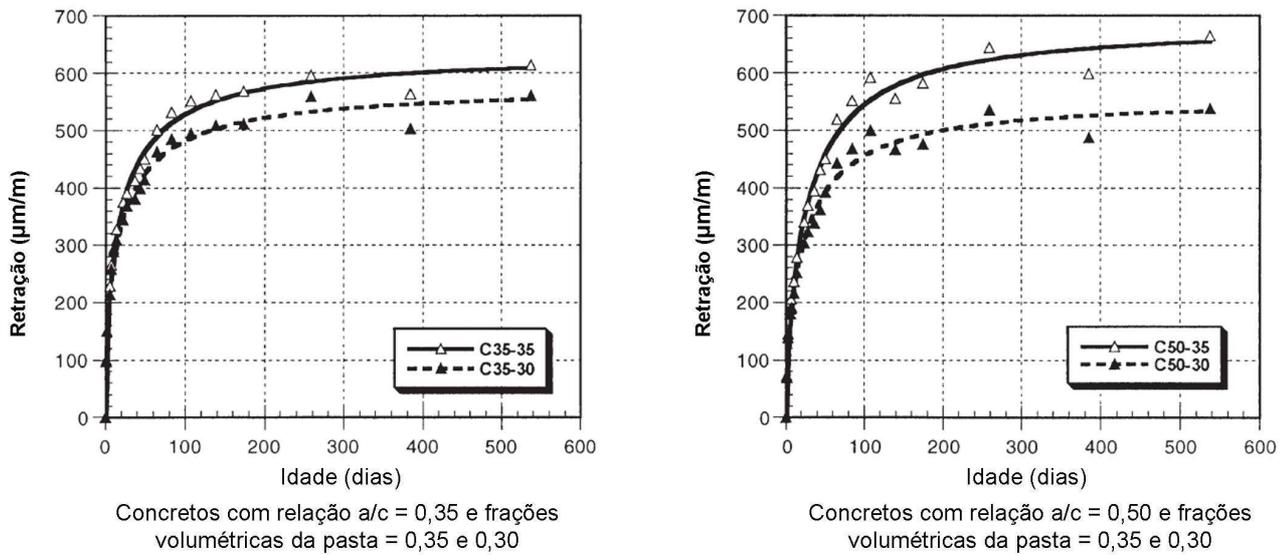
na retração, uma vez que a água ou o cimento adicional diminuem o conteúdo de agregados na mistura. Conforme o ACI Committee 209 (2005), quando o abatimento é aumentado pela adição de água ou do conteúdo de pasta na mistura, ocorre uma tendência de maior retração.

O efeito da relação água/cimento na retração hidráulica é ilustrado na Figura 3.5. Como pode ser observado, após 28 dias, o aumento da relação água/cimento pode elevar significativamente a retração.



**Figura 3.5 – Efeito da relação água/cimento na retração hidráulica na pasta de cimento. (CCAA, 2002)**

Já Bissonnette et al (1999) afirmam que a relação a/c não afeta significativamente a retração. Os autores avaliaram a retração hidráulica em amostras de concreto prismáticas de 50 x 50 x 400 mm, relações a/c 0,35 e 0,50 e frações volumétricas de pastas de 0,30 e 0,35. As amostras foram submetidas à cura em água com cal por 28 dias. Após os períodos de cura, ficaram expostas ao ar a 23°C e umidade relativa de 48%. Os resultados, segundo os autores, mostraram que a relação a/c teve pouca influência na retração final e que a magnitude da retração é diretamente proporcional à fração volumétrica da pasta, como observado na Figura 3.6.



**Figura 3.6 - Retração hidráulica em amostras de 50x50x400 mm (BISSONNETTE et al, 1999)**

### 3.1.5.2 Influência do tipo de cimento e sua finura

Dependendo da composição química e da finura, os diversos tipos de cimento desenvolvem cinéticas de reação diferente, apresentando diferentes graus de hidratação, especialmente a baixas idades, em que a menor resistência leva a maiores deformações (NEVILLE, 1997).

Andrade (1997) afirma que o teor de cimento tem pouca influência na retração. Geralmente, cimentos mais finos, pozolânicos ou com adição de escória têm tendência a aumentar a retração, mas o efeito varia de acordo com o tipo de agregado usado.

Mehta e Monteiro (2008) acreditam que variações na finura e composição do cimento Portland influenciam a taxa de hidratação, mas não o volume e as características dos produtos de hidratação. Muitos pesquisadores têm observado que mudanças normais na composição ou finura do cimento podem afetar a retração hidráulica em corpos de provas pequenos de pasta de cimento ou argamassa, mas têm um efeito desprezível sobre o concreto.

Roper (1974 apud ACI COMMITTEE 209, 2005) estudou os efeitos de várias composições de cimentos na retração e constatou que cimentos com baixa quantidade de sulfatos podem resultar em aumento da retração. Verificou também

que, em concretos com altos teores de alumina, a retração ocorreu mais rapidamente.

### 3.1.5.3 Efeito do agregado

O agregado é o responsável primordial pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Estas são propriedades que dependem da resistência e da densidade do agregado. As características físicas tais como: volume, tamanho e distribuição dos poros do agregado são mais importantes do que a composição química ou mineralógica do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

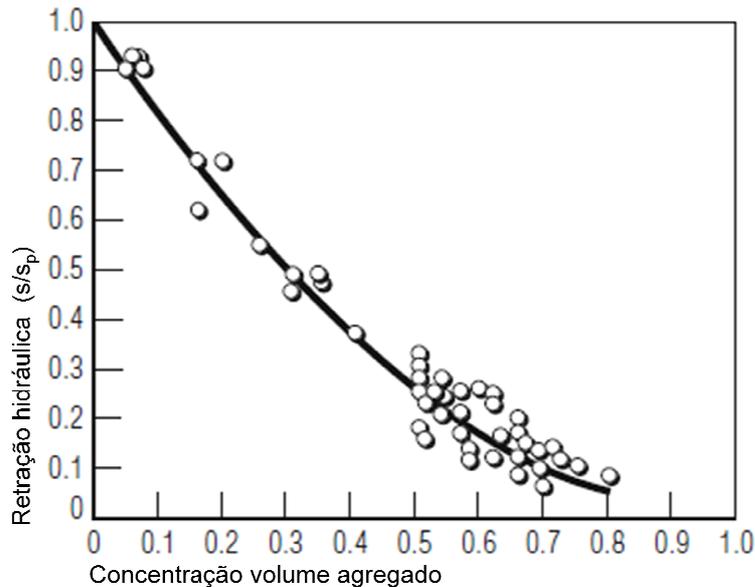
Andrade (1997) acredita que, para concretos em geral, o módulo de elasticidade do agregado está ligado à retração hidráulica. Quanto menor o módulo de elasticidade do agregado, maiores deformações devidas à retração o concreto apresentará. Por consequência, se houver alguma restrição impedindo a descarga das tensões geradas a partir dessa deformação, o concreto estará mais suscetível à fissuração. Estudos realizados por Troxell et al. (1958 apud MEHTA E MONTEIRO, 2008) mostraram que concretos com mesmo traço apresentam deformações por retração hidráulica diferentes, dependendo do tipo de agregado utilizado. Normalmente, concretos contendo agregados de maior módulo de deformação apresentam menor retração.

Segundo os pesquisadores Reinhardt (1992) e Mehta e Monteiro (2008), acredita-se que ocorrem tensões de tração na pasta ao redor do agregado. Essas tensões são decorrentes da retração durante a hidratação e secagem, causando fissuras quando resulta em tensão superior à admissível, dependendo do tamanho do agregado. Agregados com dimensão superior a 8mm estão mais propensos ao fenômeno da segregação pasta/agregado. Isso significa que mais vazios devem ocorrer em misturas que utilizam agregado graúdo.

Um estudo realizado por Andrade (1997) mostra as diferenças da retração do concreto, da argamassa e da pasta de cimento produzidos com o mesmo tipo de cimento e mantido em ambiente com temperatura de 20 °C e 50% de umidade relativa do ar. O autor analisou dois concretos, ambos com a mesma resistência e

mesmo tamanho de agregado, porém, um possui maior quantidade de agregado e o outro possui menor quantidade de agregado. Verificou que o primeiro apresentou menor retração mantendo-se a relação água/cimento constante.

A Figura 3.7 demonstra a influência do volume do agregado na retração hidráulica.



**Figura 3.7 – Efeito do volume do agregado na retração hidráulica - adaptado (CCAA, 2002)**

#### 3.1.5.4 Influência de adições minerais

Isaia (1995) estudou os efeitos da retração em concretos com elevados teores de pozolanas e, segundo o autor, a influência destas, na retração dos concretos, depende da quantidade de água adicionada, do nível de resistência, assim como, do tipo e do teor de pozolanas.

Nunes e Figueiredo (2007) afirmam que a retração está relacionada à perda de água dos capilares mais finos, e as adições minerais nos concretos promovem um refinamento dos poros. Logo, terão maior retração em função das pressões capilares serem maiores em capilares de menor raio. Isso pode acontecer, por exemplo, em concretos com adição de sílica ativa ou metacaulim, os quais promovem um refinamento dos poros capilares da pasta de cimento, tanto pela sua

ação física como pela sua ação química (reação pozolânica). Entretanto, também se deve levar em consideração o aumento da resistência e rigidez da pasta de cimento e a uma menor quantidade de água perdida em função da menor permeabilidade. Esses fatores podem compensar os efeitos do aumento da retração pelo refinamento dos poros.

No entanto, em pesquisa realizada por Güneyisi et al (2008), a adição do metacaulim auxiliou na redução das deformações provenientes da retração hidráulica. Assim, os autores afirmam que concretos com alta resistência e com baixa retração hidráulica podem ser originados a partir da utilização de pozolanas.

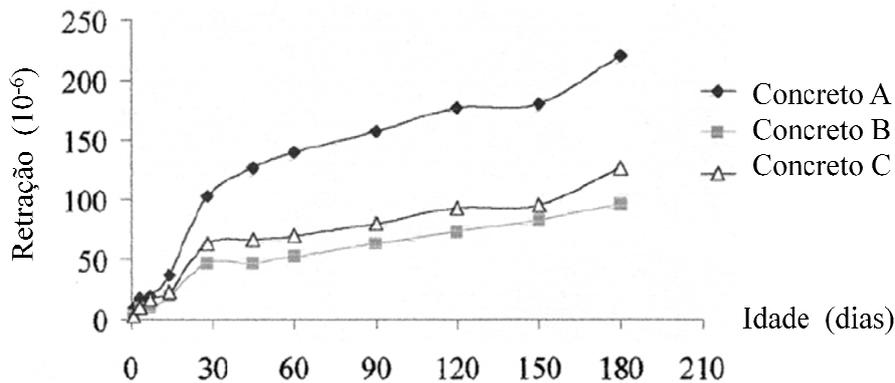
#### 3.1.5.4.1 Sílica Ativa

Akkaya et al (2007) estudaram a retração hidráulica em misturas binárias e ternárias com cimento Portland comum, cinza volante, cinza volante moída e sílica ativa nos seguintes teores: 10% de cinza volante moída; 20% de cinza volante; 20% de cinza volante + 10% de cinza volante moída e 20% de cinza volante + 8% de sílica ativa. Observaram que a retração hidráulica nas misturas ternárias foram maiores, se comparadas com as misturas binárias.

Haque (1996) pesquisou a substituição de cimento Portland comum por sílica ativa, cinza volante e escória granulada de alto forno nas seguintes misturas binárias e ternárias: substituição de 5 e 10% de cimento por sílica ativa; substituição do cimento por 10% de sílica ativa + 20% de cinza volante; substituição do cimento por 10% de sílica ativa + 20% de escória granulada de alto forno. Verificou que as variações das amostras ficaram entre 480 e 640 micrometros aos 91 dias. As amostras com 5 e 10% resultaram numa redução da retração, enquanto as demais amostras aumentaram a retração, quando comparadas à mistura de referência.

Zhang et al (1999) pesquisaram concreto de alto desempenho com substituição de sílica ativa em massa de cimento Portland Tipo I, de resistência à compressão aos 28 dias de 91,1 MPa e relação a/agl igual a 0,3. Os resultados mostram que a substituição de 10% de sílica ativa no concreto proporcionou um aumento na retração hidráulica aos 98 dias.

Jianyong e Yan (2001) estudaram a retração hidráulica em três misturas de concreto de alto desempenho. Nomearam as misturas da seguinte maneira: Concreto A - 100% de cimento; Concreto B - 70% de cimento e 30% de escória granulada de alto forno e Concreto C - 60% de cimento, 30% de escória granulada de alto forno e 10% de sílica ativa. Os resultados da retração hidráulica encontrada pelos autores estão representados na Figura 3.8.

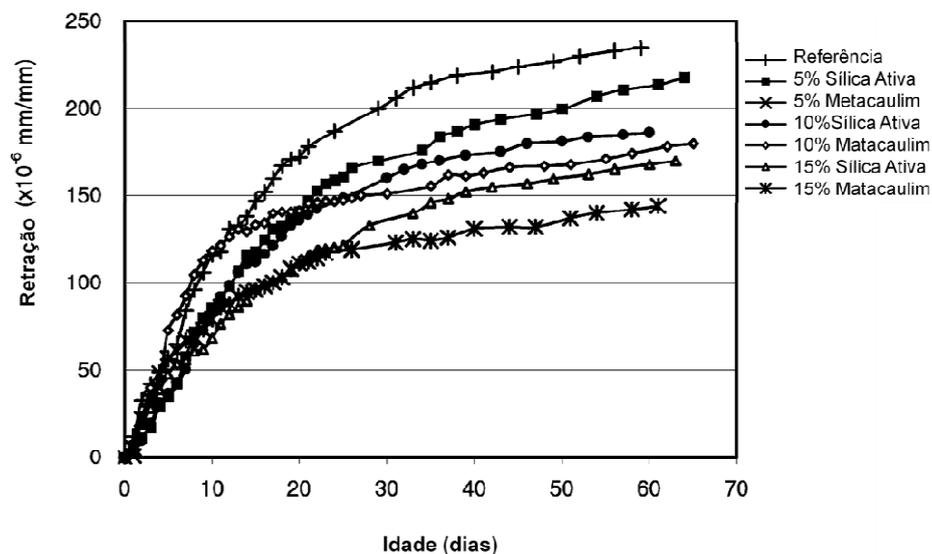


**Figura 3.8 - Retração hidráulica dos concretos. (JIANYONG E YAN, 2001)**

Conforme se observa na figura 4.8, em idade inicial, a diferença entre as três misturas foi pequena. Após 28 dias, o concreto sem adição mineral (concreto A) teve maiores valores de retração, enquanto os concretos B e C mantiveram retrações semelhantes. Aos 180 dias, os valores de retração para os concretos A, B e C foram  $220 \times 10^{-6}$ ,  $96 \times 10^{-6}$  e  $127 \times 10^{-6}$  respectivamente. Neste estudo, constatou-se que o uso de escória granulada de alto forno e da sílica ativa reduziram os valores de retração hidráulica, quando comparados ao concreto sem adição mineral.

Rao (1998) realizou um estudo sobre a influência dos teores de sílica ativa no fenômeno da retração hidráulica na argamassa. A sílica ativa utilizada em seu estudo tinha 85% de  $\text{SiO}_2$ , massa específica de 2,051 e foi substituída nos teores de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30% do peso do cimento para uma relação a/agl de 0,5. A retração hidráulica aos 28 dias da argamassa sem a adição foi de 0,012% e com 30% de sílica ativa foi de 0,088%. Observou-se que, com aumento do teor de substituição da sílica ativa, houve aumento dos valores de retração aos 28 dias. Porém, aos 405 dias, a retração nas barras de argamassa indicou que o efeito da sílica ativa foi praticamente o mesmo para todas as substituições.

Ding e Li (2002) pesquisaram propriedades do concreto com diferentes teores de adições minerais (metacaulim e sílica ativa) em substituição ao cimento. Dentre as propriedades, foi investigada a retração, a qual foi aferida através de corpos de prova tipo anéis, de 35 mm de espessura e 140 mm de altura. Retirados das formas 24 horas após a moldagem, foram curados por um dia a 20°C e umidade relativa de 100%, em seguida, armazenados a 23°C e umidade relativa de 40%. Os teores de substituição usados foram de 5, 10 e 15% e a relação  $a/agl$  adotada para todas as misturas foi de 0,35. Como referência, foram moldados corpos de prova com concreto de cimento Portland comum. Nessa pesquisa, os autores constataram que o uso das adições minerais minimizou a retração em relação ao concreto de referência. O aumento do teor de substituição resultou em menores valores de retração, conforme mostrado na Figura 3.9. Também foi observado que as misturas com sílica ativa tiveram maiores valores de retração, quando comparadas às misturas com metacaulim.



**Figura 3.9 - Desenvolvimento da retração com tempo em dias (DING E LI, 2002)**

De acordo com o ACI Committee 226 (1987), o uso de sílica ativa em substituição parcial do cimento minimiza os efeitos da retração hidráulica independente da relação água/aglomerante, quando as misturas são comparadas ao concreto de referência, conforme ilustra a Figura 3.10

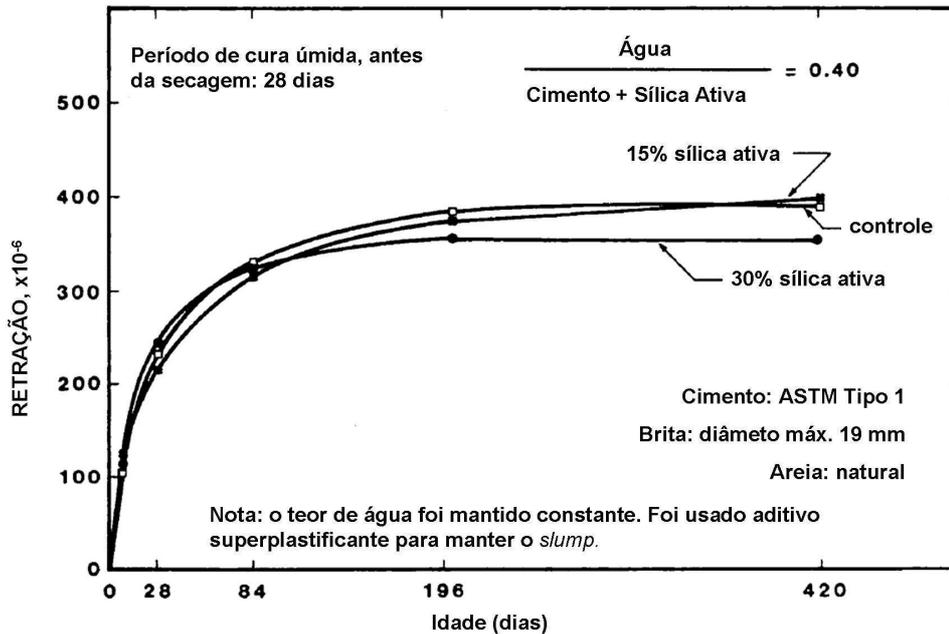


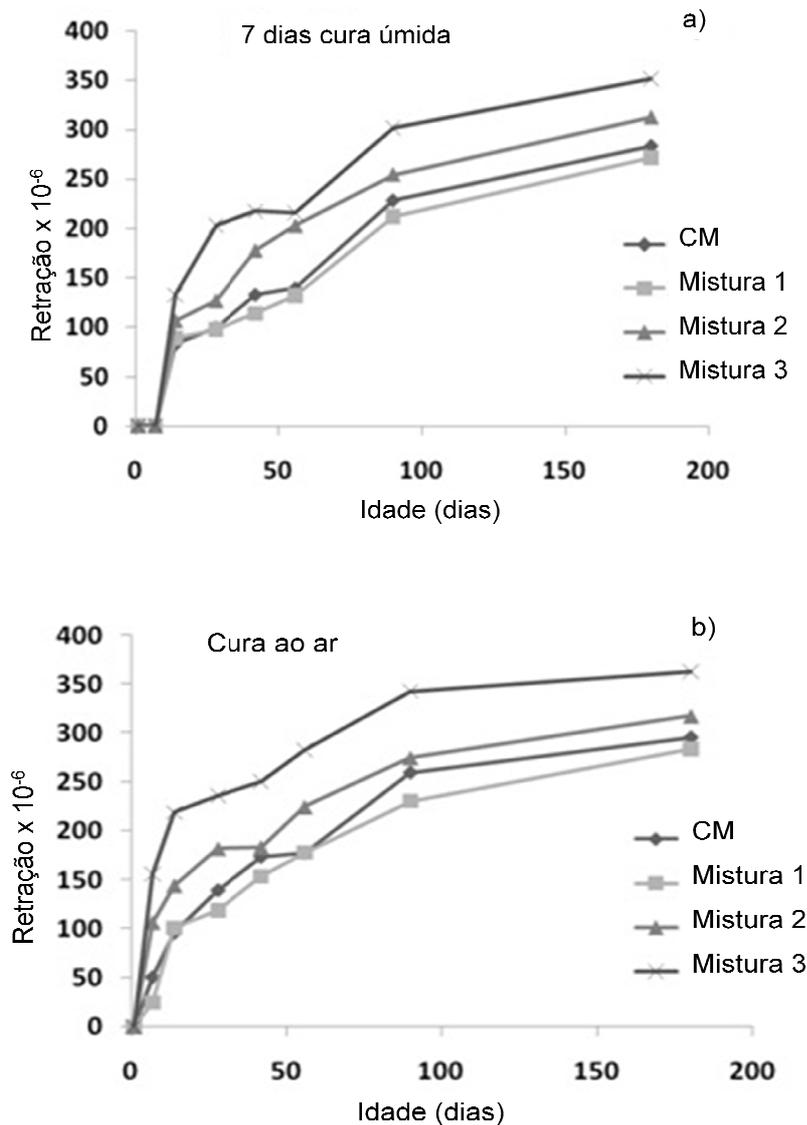
Figura 3.10- Retração hidráulica em concretos contendo sílica ativa e relação a/agl = 0,4 (CANMET, 1984 apud ACI COMMITTEE 226, 1987)

Malathy e Subramanian (2007) estudaram a retração hidráulica em argamassas com substituição do cimento por adições minerais, como: a sílica ativa, o metacaulim e a cinza volante. Os teores de substituição foram de 0, 5, 10 e 15% para cada adição mineral e a relação a/agl de 0,50. A retração hidráulica foi observada em duas séries de misturas, diferenciadas pela granulometria da areia, durante um período de 365 dias. As misturas da primeira série foram produzidas com areia natural, cuja granulometria passou na peneira de 1,18 mm e ficou retida na 0,60 mm. Já as misturas da segunda série foram produzidas com três granulometrias (2,36-1,18; 1,18-0,60; 0,60-0,30 mm). Os autores verificaram que o uso de adições minerais em substituição parcial do cimento teve influência significativa no fenômeno da retração hidráulica a partir dos 28 dias de idade. A retração aumentou conforme o aumento do teor de substituição para as três adições estudadas. Segundo os autores, a reação pozolânica e o refinamento dos poros foram os principais responsáveis para o aumento da retração das argamassas até 180 dias. A partir dessa idade, as misturas com adição mineral tiveram comportamento similar à mistura de referência (sem adição) no fenômeno estudado. A granulometria do agregado influenciou significativamente na retração final das misturas. Aquelas com areia de maior granulometria apresentaram menores retrações quando comparadas às misturas com areia de granulometria maior.

#### 3.1.5.4.2 Cinza de casca de arroz

Meira (2009) estudou a substituição do cimento CP II-F por cinzas de casca de arroz (moída e natural) em concretos, nos teores de 15 e 25%. Observou que todos os concretos com adição mineral desenvolveram retrações inferiores à referência na idade final de 300 dias. O traço de referência (sem adição) apresentou taxas de retração entre 0,061 e 0,092%, ao passo que para os concretos com adição de cinza de casca de arroz moída, a retração máxima foi de 0,076% (para 25% de substituição e relação a/agl 0,65) e entre os traços com cinza de casca de arroz natural a retração máxima foi de 0,059% (para as amostras com 15% de substituição e relação a/agl 0,65 e 25% e relação a/agl 0,45). Essa redução na retração de concretos com adição de cinza de casca de arroz pode ser, segundo a autora, devido ao aumento no volume dos poros de gel e à diminuição no volume de poros capilares, aumentando o refinamento e contribuindo para uma menor permeabilidade.

Habeeb e Fayyadh (2009) pesquisaram os efeitos dos tamanhos médios das partículas da cinza de casca de arroz em concretos de cimento Portland na retração hidráulica. Foram estudadas quatro misturas: CM - mistura de referência com 100% de cimento Portland; Mistura 1 - 20% de CCA com tamanho médio das partículas de 31,3  $\mu\text{m}$ ; Mistura 2 - 20% de CCA com tamanho médio das partículas de 18,3  $\mu\text{m}$  e Mistura 3 - 20% de CCA com tamanho médio das partículas de 11,5  $\mu\text{m}$ . Os diferentes tamanhos médios das partículas foram obtidos devido ao tempo de moagem, sendo 180, 270 e 360 minutos para as misturas 1, 2 e 3 respectivamente. As misturas foram submetidas a dois regimes de cura, ou seja, cura ao ar e cura úmida por 7 dias. Os resultados de retração hidráulica estão representados na Figura 3.11.



**Figura 3.11 - Valores de retração em diferentes idades**  
 a) 7 dias de cura úmida, b) cura ao ar  
 (HABEEB E FAYYADH, 2009)

Os resultados mostram que a cura úmida inicial de 7 dias reduziu os valores de retração em todas as misturas. O tamanho médio das partículas de CCA teve um efeito significativo sobre a retração hidráulica. A mistura 3 apresentou maiores valores de retração que a mistura de referência (CM), já a mistura 2 teve valores próximos à mistura de referência, enquanto a mistura 1 apresentou os menores valores. A redução do tamanho médio das partículas de CCA, segundo os autores, aumentou a atividade pozolânica e contribuiu para o refinamento dos poros no concreto, aumentando a retração hidráulica.

Zhang e Malhotra (1996) estudaram concretos com CCA em substituição parcial do cimento em diferentes propriedades, incluindo a retração hidráulica.

Moldaram corpos de prova prismáticos (102 x 76 x 390 mm) que foram submetidos à cura úmida a  $20 \pm 3$  °C e 100% de umidade relativa por 7 dias. As idades de ensaio foram 7, 14, 28, 56, 112, 224 e 448 dias após a cura úmida. O teor de CCA foi de 10% e a relação a/agl de 0,40. Uma mistura com 10% de sílica ativa e outra com 100% de cimento Portland comum foram usadas como parâmetro de comparação. Os autores verificaram que, aos 448 dias, a retração do concreto com CCA foi similar aos concretos de referência conforme mostra a Figura 3.12.

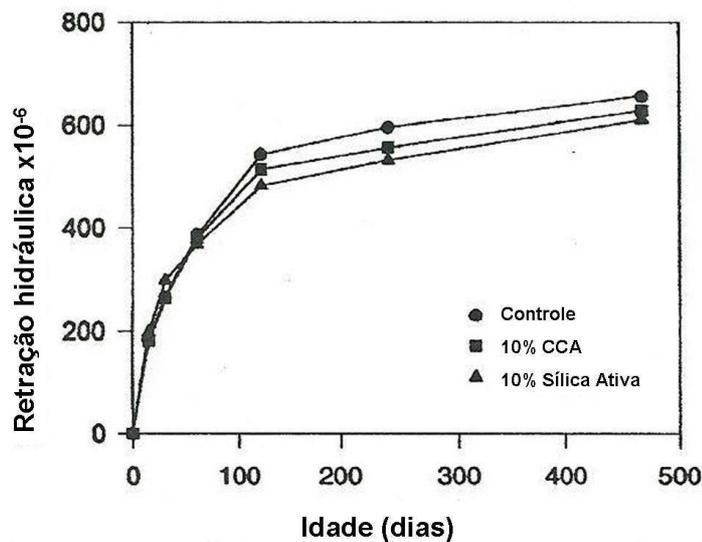


Figura 3.12 - Retração hidráulica nas misturas de concreto estudadas (ZHANG E MALHOTRA, 1996).

### 3.1.6 Influência dos aditivos químicos

A minimização da retração em misturas cimentícias pode ser realizada com ajustes na dosagem, aumento da cura úmida, diminuição da relação água/aglomerante, entre outros métodos. A utilização de aditivos é mais uma contribuição no controle da retração e, basicamente, existem dois tipos: os redutores de retração e os compensadores de retração. Ainda há, segundo Melo Neto et al (2007), certa confusão a respeito da denominação desses tipos de aditivos. Shah et al (1992) afirmam que os aditivos expansores já foram uma solução viável, mas, atualmente, não são muito utilizados. Pode-se dizer que os aditivos redutores são a mais recente tentativa de prevenir a retração de misturas cimentícias. Por ser um

produto novo e em desenvolvimento contínuo, ainda existem poucas publicações a respeito. Assim como, há certa dificuldade por parte dos estudos em diferenciar a composição dos aditivos existentes no mercado, as quais são protegidas pelos fabricantes.

A introdução do uso de aditivos de natureza orgânica para o fim específico de reduzir a retração é atribuída a Sato et al (1983). Os primeiros aditivos redutores de retração apresentavam baixa viscosidade, solubilidade em água e tinham a função de reduzir a tensão capilar que se desenvolve nos poros do concreto com a secagem, segundo Nmai et al (1998). Outra característica citada é a possibilidade de utilizar o aditivo diretamente na superfície do concreto, como uma solução tópica para amenizar a retração. Segundo He et al (2006), a maior parte dos aditivos redutores de retração são líquidos orgânicos com base em derivados do glicol. Atualmente, o propileno glicol ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-OH})_2$ ) e o neopentil glicol ( $(\text{CH}_2)_2\text{-C}(\text{CH}_2\text{-OH})_2$ ) são alguns dos derivados do glicol utilizados para a obtenção dos aditivos redutores de retração, sendo os derivados do propileno os mais utilizados para esse fim (COLLEPARDI et al, 2005).

Melo Neto et al (2007) realizaram um estudo para verificar o efeito de aditivo redutor de retração no desenvolvimento da retração hidráulica em argamassas confeccionadas com cimento Portland de alta resistência inicial. Os corpos de prova foram preparados com a relação água/aglomerante igual a 0,48 e com quatro teores de aditivo redutor de retração: 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% em relação à massa de cimento. Os ensaios de retração hidráulica foram realizados com 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 14, 21 e 28 dias. A Figura 3.13 apresenta o efeito do teor de aditivo redutor na retração hidráulica, assim como o percentual de redução da retração com a utilização do mesmo aos 28 dias. Observa-se que a utilização do aditivo redutor de retração (SRA) obteve êxito para amenizar significativamente a retração hidráulica. O aumento do teor de aditivo incorreu em diminuição proporcional da retração hidráulica, alcançando uma redução de até 42% com a utilização de 2% de aditivo.

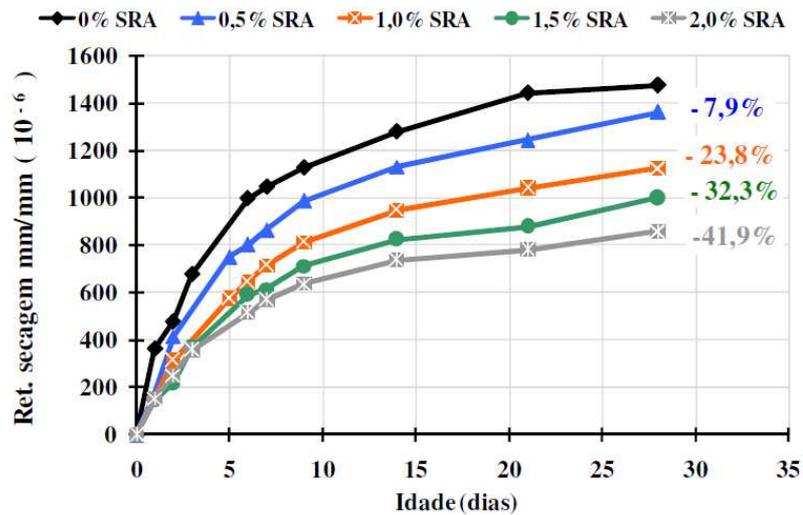


Figura 3.13 - Efeito do teor de SRA na retração hidráulica das argamassas estudadas (MELO NETO et al, 2007)

Na Figura 3.13, observa-se a relação direta entre o teor de aditivo SRA e a retração hidráulica, sendo esta reduzida com o aumento do teor de aditivo. Na Tabela 3.1, são apresentadas as equações utilizadas nas regressões apresentadas na Figura 3.14. Observa-se, nesta figura, a excelente correlação entre o aumento do teor de aditivo SRA e a diminuição da retração hidráulica nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Com 1 dia de idade, a correlação observada não foi satisfatória, indicando que o teor de aditivo SRA não afeta de forma significativa a retração hidráulica nessa idade, independente do teor de aditivo utilizado.

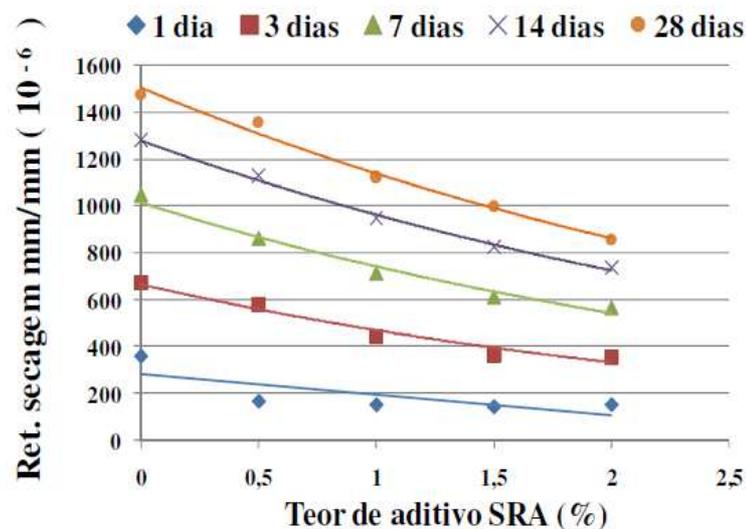


Figura 3.14 - Correlação entre o teor de aditivo SRA e a retração hidráulica das argamassas estudadas com 1, 3, 7, 14 e 28 dias (MELO NETO et al, 2007).

**Tabela 3.1 - Regressões utilizadas para correlacionar o efeito do teor de aditivo SRA na retração hidráulica. (MELO NETO et al, 2007).**

| Idade   | Regressão exponencial |              |
|---------|-----------------------|--------------|
| 1 dia   | $y = 265 e^{-0,37x}$  | $R^2 = 0,59$ |
| 3 dias  | $y = 665 e^{-0,34x}$  | $R^2 = 0,95$ |
| 7 dias  | $y = 1015 e^{-0,31x}$ | $R^2 = 0,98$ |
| 14 dias | $y = 1281 e^{-0,28x}$ | $R^2 = 0,99$ |
| 28 dias | $y = 1508 e^{-0,27x}$ | $R^2 = 0,99$ |

### 3.1.7 Influência da cura

Silva (2007) afirma que as adições minerais normalmente reduzem a exsudação dificultando a ascensão da água até a superfície. Quando essas adições são em teores elevados, e a taxa de evaporação de água é intensa, existe o risco de fissuração em decorrência da retração hidráulica, sendo a cura de extrema importância, quando há a utilização de cimentos com adições minerais.

A cura do concreto se dá pelo conjunto de medidas adotadas para evitar a evaporação da água utilizada no amassamento do concreto e, assim, garantir que os componentes do cimento se hidratem (BATTAGIN, 2002). Para Neville (1997), o objetivo da cura é manter o concreto o mais próximo possível da saturação até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido ocupados pelos produtos da hidratação do cimento até uma condição desejável, uma vez que a velocidade máxima de hidratação pode se desenvolver somente em condições de saturação. A hidratação é bastante reduzida quando a umidade relativa no interior dos poros capilares atinge valores abaixo de 80% (POWERS, 1947 E PATEL et al, 1988 *apud* NEVILLE, 1997).

Os vários tipos de cura já foram motivos de investigação de muitos pesquisadores. Zhang et al. (1999) mencionam que alguns dos métodos conhecidos são a cura por molhagem e a cura por membrana. Neville (1997) comenta que os procedimentos usados em cada método variam muito, dependendo das condições da obra e da forma, tamanho e posição da peça de concreto. A cura por molhagem exige que a superfície do concreto esteja continuamente em contato com a água, durante um período estabelecido. Já o método de cura por membrana consiste em

impedir a perda de água pela superfície do concreto, sem permitir o ingresso da água do meio que o circunda. Conforme o ACI Committee 209 (2005), períodos de cura úmida prolongados acarretam, geralmente, redução de 10 a 20% na retração de uma mistura de concreto. Esta redução varia em concretos com diferentes relações água/cimento.

Perenchio (1997) investigou a influência dos períodos de cura úmida (6 horas, 1 dia, 3 dias, 7 dias, 28 dias e 90 dias) com a retração hidráulica, após um ano de secagem ao ar, para concretos com diferentes relações água/cimento (0,3; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7). O concreto com a menor relação água/cimento (0,3) apresentou maior retração independentemente do período de cura. Quando curado por menos de 7 dias, o concreto com a maior relação água/cimento (0,7) e, portanto, com o menor teor de cimento, obteve a menor retração. Segundo o autor, isso já era esperado, pois esse concreto contém a menor quantia de cimento hidratado, que é responsável pela retração hidráulica, além do maior teor de agregado, o qual restringe a retração. Conforme resultados da pesquisa para concretos com relações água/cimento de 0,3 e 0,4, a maior retração ocorreu nos corpos de prova curados por 3 dias. Já para as relações água/cimento de 0,5 e 0,6, a maior retração foi observada nos concretos curados por 7 dias.

Aïtcin et al (1994) pesquisaram diferentes fatores que influenciam a retração hidráulica em concretos de alto desempenho. Dentre os fatores pesquisados, estão o tempo e condições de cura. Estudaram concretos com 80 MPa e 100 MPa de resistência à compressão axial, aos 91 dias de idade. O concreto de maior resistência continha sílica ativa em sua composição. Parte das amostras foi submetida à cura ao ar, outras foram seladas primeiramente com filme plástico e, posteriormente, em papel alumínio nos períodos de 4, 7 e 28 dias. Finalmente, as últimas ficaram permanentemente seladas até atingir a idade de ensaio.

Os resultados estão demonstrados na Figura 3.15. Quanto maior o tempo de cura selada antes da exposição ao ar, menor a magnitude da retração hidráulica. Observou-se, por exemplo, que o aumento do período de 7 para 28 dias de selagem das amostras reduziu a retração de  $554 \times 10^{-6}$  para  $455 \times 10^{-6}$ , isto é, 18% de redução.

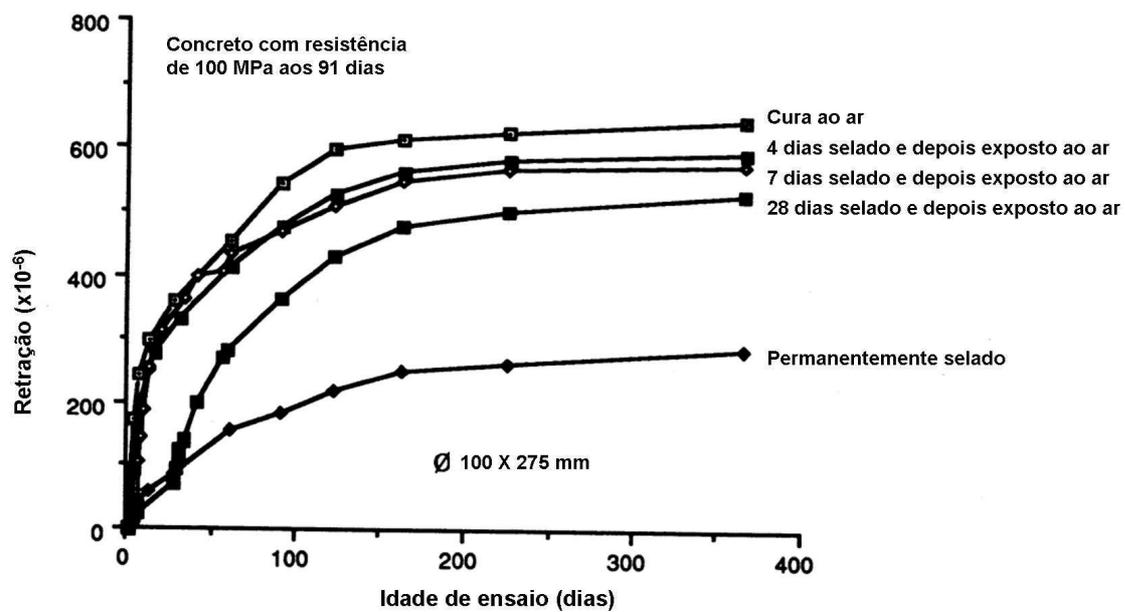
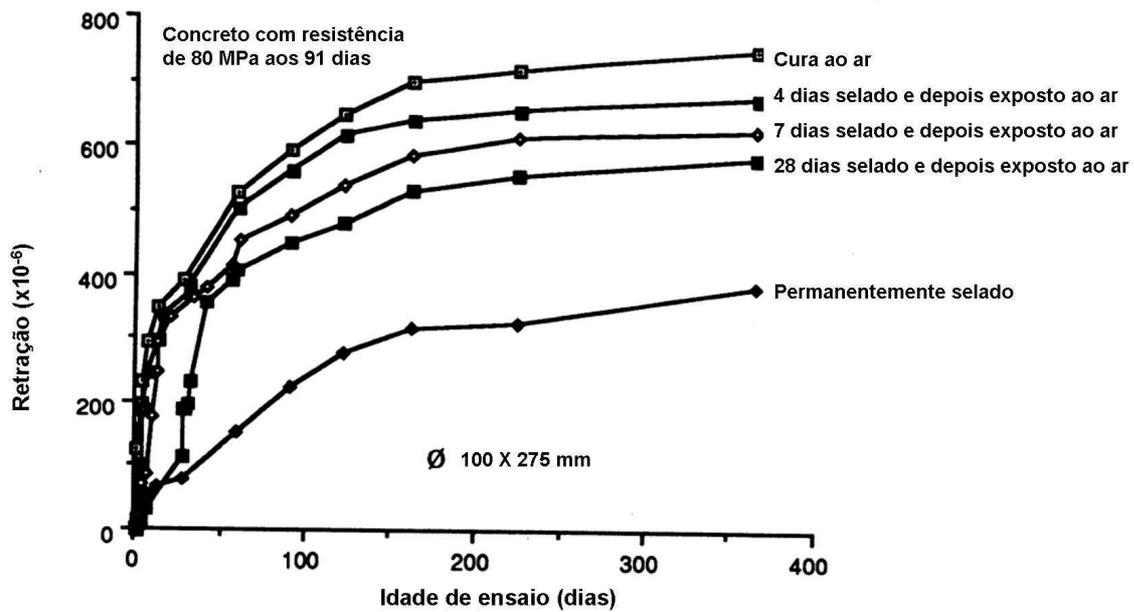


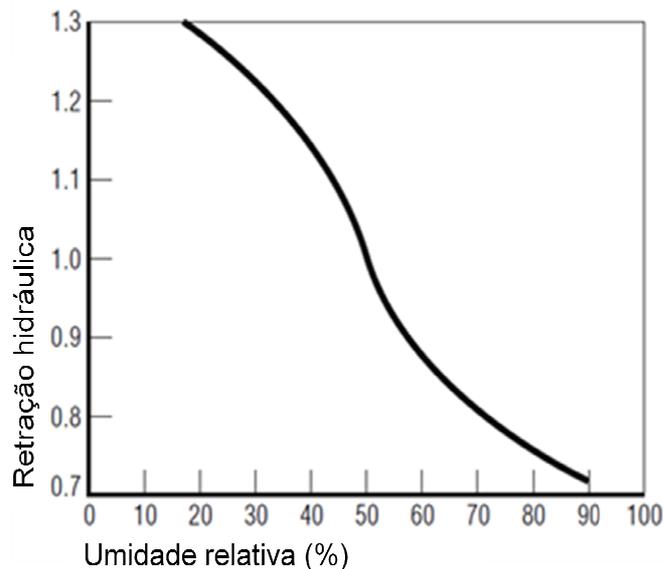
Figura 3.15 - Efeito das condições de cura na retração hidráulica (AÏTCIN et al, 1994).

### 3.1.8 Influência das condições ambientais, tamanho e forma das peças de concreto

Segundo CCAA (2002), os fatores externos que afetam a perda de umidade no concreto são as condições ambientais, tamanho e forma do concreto. O autor

descreve as condições ambientais em umidade relativa, temperatura e velocidade do vento.

A umidade relativa do ambiente que circunda o concreto tem muita influência sobre a retração (NEVILLE, 1997). O pesquisador observou que o concreto se contrai quando permanece em ar seco (não saturado) e se expande, se conservado em água ou a uma umidade relativa 100%. Segundo Kalintzis e Kuperman (2001), a retração hidráulica está associada à perda de umidade para o meio ambiente, o que a torna uma das principais causas de fissuração e faz com que assuma papel importante, pois sua ocorrência pode afetar a durabilidade do concreto. A Figura 3.16 ilustra a influência da umidade relativa na retração hidráulica do concreto.



**Figura 3.16 – Efeito da umidade relativa na retração hidráulica (CCAA, 2002)**

Para exemplificar a influência da umidade relativa na retração hidráulica, Müller e Pristl (1993, *apud* ACI Committee 209, 2005) submeteram concretos, com idade de 8 dias, a uma umidade relativa constante de 65% e a variações cíclicas de umidade, variando de 40 a 90%. Cada ciclo consistiu de dois intervalos de 7 dias a uma umidade constante, sendo um intervalo com umidade relativa de 90% e o outro com umidade relativa de 40%. A alternância de 90% para 40% de umidade relativa e vice-versa foi feita gradualmente durante 12 horas, para evitar a condensação dentro da câmara climática. A temperatura, mantida constante durante os testes, foi de 20°C. Até a idade dos testes, os corpos de prova ficaram imersos em água na

mesma temperatura ambiente dos testes (20°C). O concreto, realizado com cimento Portland de rápido endurecimento, corresponde, aproximadamente, ao cimento ASTM tipo I. As proporções da mistura em peso para cimento: areia: pedra: água foram de 1:2.85:3.15:0.55. O consumo de cimento foi de 310 Kg/m<sup>3</sup>. Aos 28 dias, o corpo de prova (cubo com 150 mm de lado) desse concreto apresentou uma resistência de 40.9 MPa.

Os autores constataram que os corpos de prova de concreto mantidos à constante umidade relativa de 65% apresentaram maior retração hidráulica que os corpos de prova mantidos no ambiente com variação de umidade relativa e anotaram que esse fenômeno pode estar relacionado ao histórico da variação de umidade, que começou com uma umidade relativa de 90%. Dessa forma, para uma conclusão consolidada, segundo os autores, há necessidade de outros experimentos capazes de quantificar esses efeitos.

Conforme o ACI Committee 209 (2005), a temperatura elevada e a velocidade do vento tendem a aumentar a retração hidráulica no concreto, porém, isoladamente, seus efeitos são menos pronunciados no concreto que o efeito da redução da umidade relativa.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que para as mesmas condições ambientais (temperatura e umidade relativa) ocorre um aumento na retração hidráulica, com o aumento do tempo. Para o mesmo intervalo de tempo, o aumento da umidade relativa provoca uma redução no fluxo de umidade do interior do concreto para a superfície e, conseqüentemente, ocorre uma redução na retração hidráulica.

Outro fator externo que influencia a retração é a dimensão (relação área/volume) das peças de concreto. O aumento das dimensões diminui o efeito da secagem e torna mais difícil o transporte da água do interior do concreto para o ambiente, conseqüentemente, a retração hidráulica diminui com o aumento da espessura da peça (NEVILLE, 1997). Helene e Andrade (2007) relataram que a retração hidráulica diminui com o aumento das dimensões. Logo, o tamanho e a forma da peça de concreto determinam a magnitude da retração hidráulica.

## 3.2 Ação de íons cloreto

### 3.2.1 Introdução

Os íons cloreto (Cl<sup>-</sup>) são agentes que causam reações deletérias às estruturas de concreto e também provocam a despassivação da armadura no concreto armado, permitindo o desenvolvimento da reação de corrosão da armadura, que é extremamente prejudicial às estruturas de concreto armado.

Portanto, a fim de compreender a importância do estudo e os mecanismos da penetração de íons cloreto, faz-se necessário abranger as definições e mecanismos do processo de corrosão das armaduras.

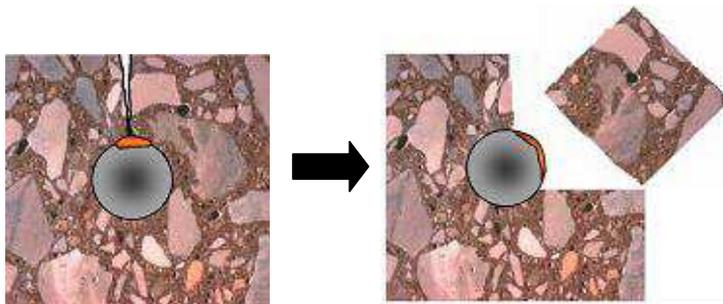
### 3.2.2 Corrosão das armaduras

Entende-se por corrosão a interação destrutiva entre um material e o meio ambiente, seja por reação química, seja por eletroquímica (HELENE, 1988). Gentil (2007) afirma que as armaduras de aço para concreto podem sofrer, basicamente, dois processos de corrosão: corrosão puramente química, chamada de oxidação; e corrosão eletroquímica, que é o tipo de deterioração observada nas estruturas de concreto armado.

O ataque provocado por uma reação gás-metal é chamado de oxidação, na qual é formada uma película de óxido chamada de película passivante, que protege o metal da corrosão. A perda da passividade ocorre quando fatores eletroquímicos, mecânicos ou químicos removem essa película passiva. Esse tipo de corrosão é extremamente lento e não provoca a deterioração substancial da superfície do aço. Já o ataque de natureza, preponderantemente, eletroquímica, que ocorre em meio aquoso, é chamado de corrosão (GENTIL, 2007).

A corrosão acontece como resultado da formação de uma pilha, com eletrólito, constituído a partir da presença de umidade no concreto e da diferença de potencial entre trechos da superfície do aço (CASCUDO, 1997).

Tal corrosão conduz à formação de óxidos e hidróxidos de ferro, cujo volume é muitas vezes maior que o volume original do metal, causando expansão, fissuração e, finalmente, destacamento do cobrimento de concreto (Figura 3.17). Essa corrosão também pode ocasionar dano estrutural à peça devido à perda de aderência entre o aço e o concreto e diminuição da área da seção transversal da armadura (MEHTA E MONTEIRO, 2008).



**Figura 3.17 - Ilustração da fissuração e destacamento do concreto devido à corrosão da armadura (CASCUDO, 1997)**

Para haver corrosão metálica é necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições:

- Haver diferença de potencial: pode ser causada por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão e/ou heterogeneidades no concreto ou no aço (HELENE, 1988; CASCUDO, 1997);
- Existir um eletrólito (ou condutor): normalmente é uma solução aquosa, por onde os íons são transportados, através de uma corrente elétrica. No concreto, dentro dos poros da pasta de cimento endurecida, quase sempre existe água e, geralmente, em quantidade suficiente para possibilitar o contato eletroquímico entre o cátodo e o ânodo. Além disso, certos produtos de hidratação do cimento, como, por exemplo, o  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de cálcio), que é solúvel em água, também formam, nos poros capilares, uma solução saturada que constitui um bom eletrólito. Apresenta-se sob a forma de uma película sobre a superfície do aço e é fornecido pela presença de umidade no concreto (HELENE, 1988; CASCUDO, 1997);
- Existir oxigênio: o acesso do oxigênio é possibilitado pela porosidade do concreto, que promove sua interação com o meio. Sua presença está ligada

ao teor de umidade nos poros do concreto. No processo de corrosão, o oxigênio é necessário para que ocorram as reações de redução. O processo eletroquímico de corrosão do aço é controlado pelo acesso de oxigênio dissolvido no eletrólito às regiões catódicas (CASCUDO, 1997).

Na Figura 3.18, são apresentadas esquematicamente as condições imprescindíveis para formação de uma pilha de corrosão, bem como os fatores que possibilitam o processo corrosivo. Após a formação da pilha, há um ânodo, um cátodo, um condutor metálico e um eletrólito. Qualquer diferença de potencial entre as zonas anódicas e catódicas acarreta o aparecimento de corrente elétrica. Dependendo da magnitude dessa corrente e do acesso de oxigênio, poderá haver corrosão (ANDRADE, 1992).

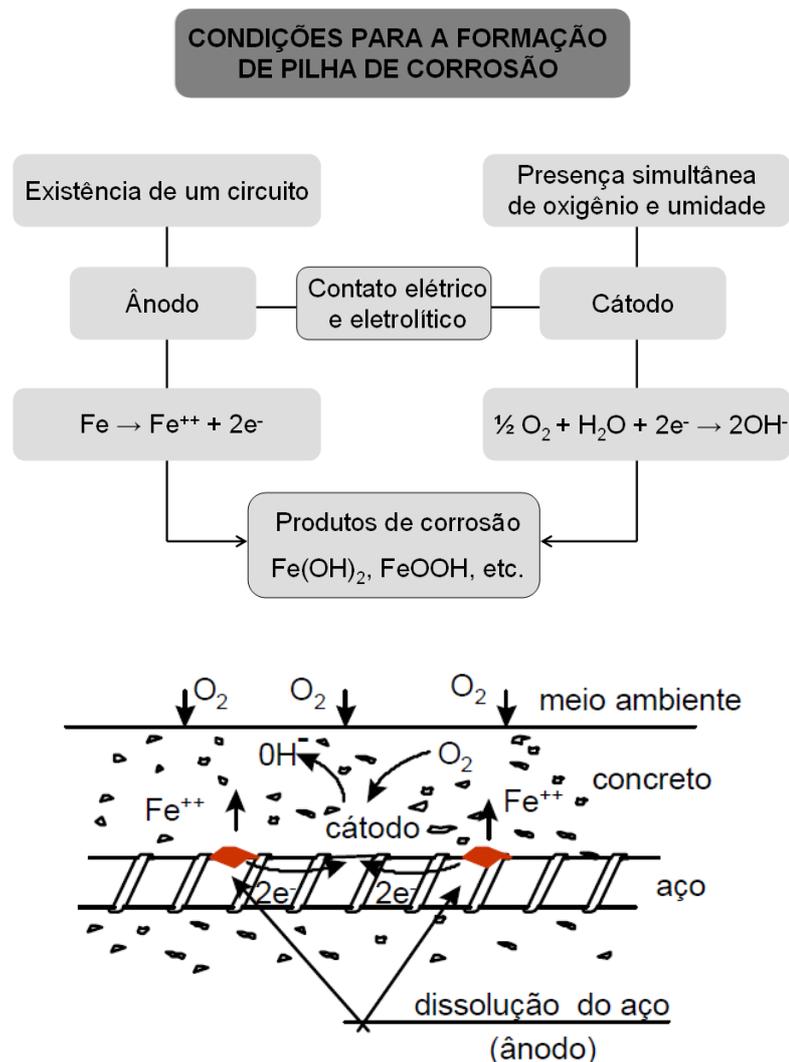
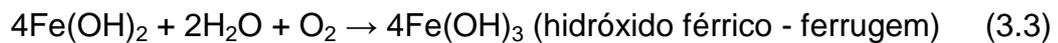


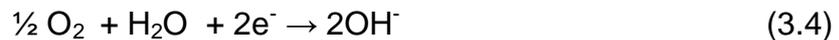
Figura 3.18 - Formação de uma pilha de corrosão - adaptado (ANDRADE, 1992)

As reações que governam o processo corrosivo são bastante numerosas e complexas. No entanto, de maneira simplificada, pode ser equacionado da seguinte forma:

- Nas regiões anódicas (corroídas):



- Nas regiões catódicas (não corroídas):



Cascudo (1997) e Gentil (2007) afirmam que o processo de corrosão pode ser acelerado pela presença de agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, podendo-se citar, entre eles, os íons sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ), cloretos ( $\text{Cl}^{-}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitritos ( $\text{NO}^{3-}$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amônio ( $\text{NH}_4^{+}$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ ), fuligem, etc.

Segundo Andrade (1992), a carbonatação e os íons cloreto são os principais agentes iniciadores do processo de corrosão de armaduras nas estruturas de concreto armado. Neste concreto, a camada de cobrimento, quando bem executada, oferece à armadura uma proteção física, dificultando a entrada de agentes agressivos do meio, além de uma proteção química devido ao pH elevado do meio aquoso (em torno de 12,5), determinante para formação de um filme passivador ao redor da armadura.

A incapacidade do concreto de exercer sua função protetora tem como consequência a corrosão das armaduras. Uma vez que o aço se encontra despassivado (desprotegido) e iniciada a corrosão da armadura, a resistividade elétrica e o acesso de oxigênio até a superfície da armadura são os principais fatores controladores do processo. A resistividade regula a mobilidade dos íons, dificultando a sua circulação, enquanto a ausência de oxigênio próximo à superfície do aço interrompe o processo (ANDRADE, 1992; ABREU, 1998).

### 3.2.3 Penetração de íons cloreto

WEE *et al.* (2000) afirmam que a corrosão das armaduras induzida por íons cloreto é a maior causa de deterioração e degradação prematura de estruturas de concreto construídas em ambientes com presença de sais, sendo, portanto, a penetração aos cloretos reconhecida como uma propriedade intrínseca do concreto.

A presença dos íons cloreto pode ser explicada através da utilização de matérias-primas contaminadas durante a mistura do concreto; a saber: agregados, principalmente em regiões litorâneas, águas salobras ou excessivamente cloradas, aditivos aceleradores de endurecimento ou de pega, que possuem cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) em sua composição, e, até mesmo, cimentos, pois os cloretos melhoram as resistências iniciais deles. Outra origem pode ser a contaminação externa, sendo decorrente da exposição da estrutura à água ou à atmosfera marinha, ou da utilização de tratamento superficial de limpeza com ácido muriático (ácido clorídrico - HCl, comercial), técnica habitual em países de clima tropical e equatorial. Uma prática muito comum e necessária em países de clima frio é o uso de sais descongelantes ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{MgCl}_2$ ), que também são fontes ricas de íons cloreto (HELENE, 1993).

Os íons cloreto podem estar presentes no concreto de maneiras distintas:

- Quimicamente combinados: os íons cloreto combinam com o aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e com o ferroaluminato tetracálcio ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), formando, respectivamente, cloroaluminato de cálcio e cloroferrato de cálcio;
- Fisicamente adsorvidos: os íons cloreto adsorvem na superfície dos silicatos hidratados (C-S-H) ou combinam com o C-S-H;
- Livres na solução dos poros: cloretos efetivamente capazes de influenciar no processo corrosivo, despассивando a armadura.

A penetração de íons cloreto no concreto pode romper a película de passivação proporcionada pelo ambiente alcalino (pasta de cimento), assim como pode diminuir a resistividade do concreto, acelerando diretamente o processo

corrosivo, provocando a formação de pilhas eletroquímicas (Figura 3.19) e deflagrando a corrosão da armadura (GENTIL, 2007).

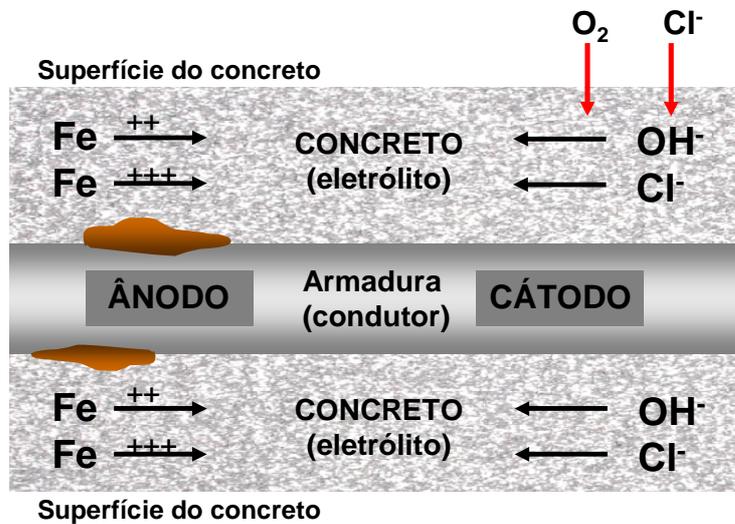


Figura 3.19 - Representação esquemática da corrosão eletroquímica na armadura pela penetração dos agentes agressivos como íons cloreto - adaptado (HELENE, 1988)

Helene (1993) afirma que o ingresso dos íons cloreto no concreto ocorre através dos mecanismos clássicos de penetração de água e transporte de íons, tais como:

- Absorção capilar: a absorção de soluções ricas em íons cloreto oriundos de sais dissolvidos, geralmente, representa o primeiro passo para a contaminação por impregnação externa de peças de concreto. A absorção depende da porosidade da superfície e de características intrínsecas do líquido, como viscosidade e tensão superficial. Pelo processo de absorção, a solução salina (cloretos) pode penetrar vários milímetros em poucas horas.
- Difusão iônica: é quando o cloreto ultrapassa a camada superficial e alcança o interior do concreto. A difusibilidade iônica acontece devido a gradientes de concentração iônica, seja entre o meio externo e o interior do concreto, seja dentro do próprio concreto. Estas diferenças nas concentrações de cloretos suscitam o movimento desses íons em busca de equilíbrio.
- Permeabilidade: a permeabilidade sobre pressão externa é um parâmetro que depende da qualidade e dimensão dos poros, ou seja,

depende, intimamente, da relação água/cimento na mistura do concreto. O transporte iônico de cloretos nas estruturas de concreto, através da permeabilidade de líquidos ocasionada por pressão hidráulica, ocorre, na prática, de uma maneira muito mais restrita, se, por acaso, for comparada com a incidência de contaminação dada por absorção capilar. Segundo Cascudo (1997), apenas em situações especiais, em que haja o acúmulo e/ou a contenção de águas, a contenção de solos, o contato direto com a ação de águas correntes e o caso de estruturas semi-enterradas com a presença de lençol freático, entre outras, é verificado o transporte de substâncias líquidas pela permeabilidade sob pressão.

- Migração iônica: é outro parâmetro existente, que ocorre por afinidade dos íons (carga negativa) a campos elétricos, como o processo de corrosão eletroquímico da armadura (CASCUDO, 1997). Através da corrente elétrica gerada na corrosão ou através de campos elétricos externos, os cloretos podem também ser induzidos a movimentar-se pela rede de poros do concreto.

O ingresso dos íons cloreto no concreto é influenciado por diversos fatores, tais como: relação água/aglomerante, composição química do cimento e adições minerais, temperatura, cura úmida, umidade relativa, agentes ambientais, fissuras, entre outros.

A relação água/aglomerante, segundo Helene (1993), desempenha um papel fundamental nas características físicas do concreto. Influi na permeabilidade e capacidade de absorção de água pelo concreto. Diversos pesquisadores observaram que essa relação água/aglomerante possui relação inversamente proporcional com resistência à penetração de cloretos, ou seja, quanto maior a relação água/aglomerante, menor será a resistência do concreto à penetração de cloretos, devido ao aumento da porosidade da pasta do concreto.

As propriedades do concreto contendo cimento Portland são resultados das reações químicas entre os componentes do cimento e a água. Assim, diferenças existentes na composição do cimento repercutem nas propriedades do concreto. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), essas diferenças existem como uma forma de adequar o concreto às necessidades da indústria da construção. Uma das formas de

obtenção de cimentos diferenciados, como já visto, é através das adições minerais, que misturadas ao clínquer por ocasião da fabricação do cimento ou por ocasião da execução do concreto, contribuem para as alterações de propriedade químicas e físicas do concreto. A composição química do aglomerante pode influenciar de maneira benéfica no processo de diminuição dos cloretos livres na solução dos poros.

Outro fator que exerce grande influência na difusão de íons cloreto no concreto é a temperatura. O aumento da temperatura propicia o aumento da mobilidade iônica (CALÇADA, 2004) e, dessa forma, acelera a formação de C-S-H na fase de cura, gerando uma estrutura mais densa; após a etapa de hidratação, o aumento da temperatura facilita a penetração de íons no concreto por permeabilidade, sucção capilar ou difusão devido à redução da viscosidade dos fluidos.

Segundo Cascudo (1997), a temperatura exerce um papel duplo. Se, por um lado, seu aumento leva a um aumento na velocidade das reações e da mobilidade iônica, sua diminuição pode levar à condensação e produzir aumento na umidade local. O aumento da temperatura aumenta o teor de cloretos livres na água dos poros. Este fato explica a existência de mais concretos deteriorados em regiões litorâneas quentes do que em temperadas.

Já a umidade presente nos poros da estrutura do concreto influi diretamente no mecanismo da corrosão, que é eletroquímico e necessita de um meio aquoso e da presença de oxigênio para que se realize. Para Cascudo (1997), com o aumento da umidade, há o aumento da condutividade do concreto e o desenvolvimento da corrosão é facilitado. Porém, quando os poros são saturados, a resistividade é baixa e, nessas condições, a difusão do oxigênio é reduzida, o que resulta em uma velocidade de corrosão baixa ou moderada, como é o caso das estruturas submersas.

As maiores taxas de corrosão ocorrem quando o teor de umidade do concreto é alto, porém não saturado. O oxigênio chega até a armadura, e a resistividade elétrica é baixa o suficiente para permitir elevadas velocidades de reação. Sendo assim, a umidade relativa do ar ótima para a corrosão está entre 70 e 80% (NEVILLE, 1997).

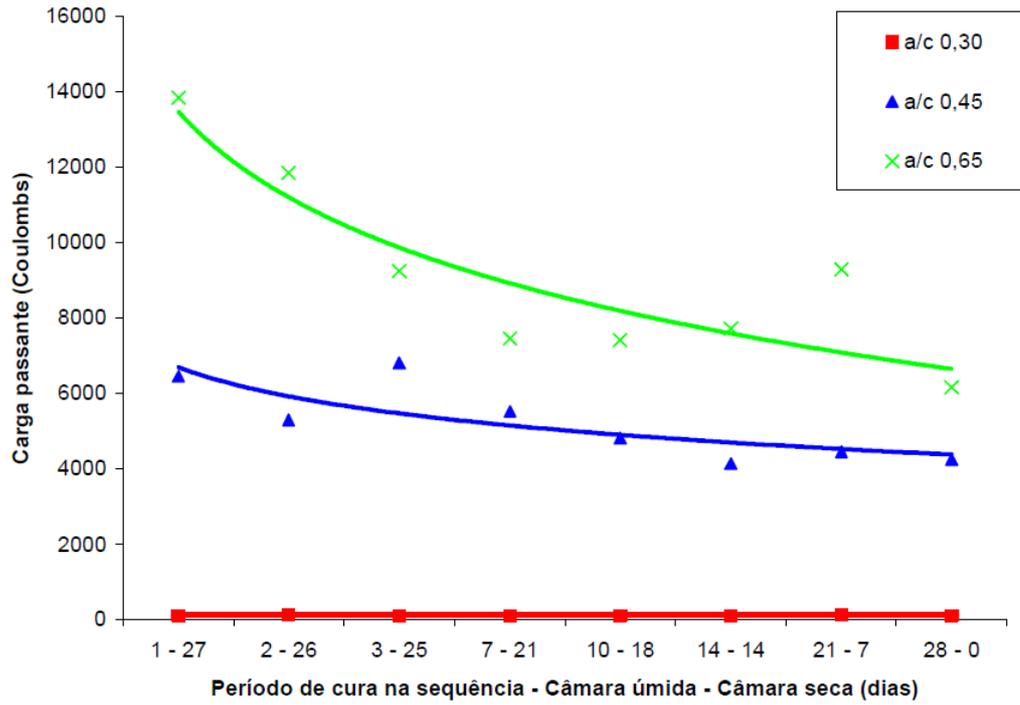
A Figura 3.20 representa esquematicamente a presença de umidade nos poros do concreto em função da umidade relativa.



**Figura 3.20 - Representação esquemática do teor de umidade dos poros de concreto em função da umidade relativa - adaptado (ANDRADE, 1992)**

Aïctin (1998) observou que a falta de uma cura úmida adequada do concreto pode ser um fator crítico para a durabilidade do concreto aos agentes agressivos do meio, entre eles, o cloreto. Isaia (1995) pesquisou a penetração de cloretos em concretos com adições minerais e observou que a cura úmida desempenha função preponderante no desenvolvimento do grau de hidratação, na formação dos poros grandes e pequenos, contínuos e descontínuos. Assim, a penetração de cloretos, através da camada de cobertura, também é governada pelo modo que foi realizada a maturação do concreto, pelo período que esteve em contato com a umidade, nas idades iniciais, especialmente, quando são empregadas adições minerais.

Battagin et al (2002) estudaram a influência do período de cura úmida e seca na penetração de íons cloreto em concretos convencionais e de alto desempenho com três relações água/cimento (0,30; 0,45; 0,65). Os resultados indicaram que quanto maior é o período de cura úmida, maior é a resistência a penetração de íons cloreto no concreto, isto é, menor é a carga passante. Nos concretos com relação água/cimento de 0,30, notou-se que os ciclos de cura não influíram significativamente na permeabilidade aos íons cloretos, sendo muito baixa, conforme pode ser observado na Figura 3.21.



**Figura 3.21 - Influência dos ciclos de cura na penetração de íons cloreto (BATTAGIN et al, 2002)**

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Introdução

A fim de atingir os objetivos pré-estabelecidos, foi analisado, nesta pesquisa, o comportamento de concretos compostos com adições minerais frente à resistência à compressão axial, à retração total e à penetração de íons cloreto por imersão nos períodos de 3 e 7 dias de cura úmida. Para isso, as misturas, contendo cinza de casca de arroz clara e cinza de casca de arroz escura, tiveram seu desempenho comparado ao de misturas contendo sílica ativa e cimento puro (CP-V ARI).

Para facilitar a compreensão, são definidas, a seguir, as variáveis utilizadas nesta pesquisa:

- Variáveis independentes:
  - Relação água/aglomerante (a/agl): 0,35; 0,50 e 0,65;
  - Período de cura úmida: 3 e 7 dias.
  - Idade de ensaio:
    - 28 e 91 dias - Resistência à compressão axial;
    - 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91 e 182 dias - Retração total;
    - 7, 14, 28, 56 e 91 dias - Penetração de íons cloreto.
  - Adições minerais (utilizadas como substituição em massa do cimento): cinza de casca de arroz clara, cinza de casca de arroz escura e sílica ativa;
  - Teores de substituição: 0, 5, 10, 20 e 30% de cinza de casca de arroz clara e escura e 5 e 10% de sílica ativa.
  
- Variáveis dependentes:
  - Resistência à compressão axial;
  - Retração total;
  - Penetração de íons cloreto.

## 4.2 Materiais

A fim de avaliar a influência da substituição do cimento Portland por diferentes teores de cinza de casca de arroz clara e escura frente à resistência à compressão, à retração total e à penetração de íons cloreto, foram analisadas as seguintes misturas:

- Mistura de referência (REF): tendo como aglomerante apenas o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI);
- Mistura com 5% de cinza de casca de arroz clara (5C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 10% de cinza de casca de arroz clara (10C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 20% de cinza de casca de arroz clara (20C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 30% de cinza de casca arroz clara (30C) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 5% de cinza de casca de arroz escura (5E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 10% de cinza de casca de arroz escura (10E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 20% de cinza de casca de arroz escura (20E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 30% de cinza de casca arroz escura (30E) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 5% de sílica ativa (5SA) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI);
- Mistura com 10% de sílica ativa (10SA) em substituição ao cimento Portland (CPV-ARI).

A Tabela 4.1, a seguir, demonstra de maneira resumida todas as misturas analisadas.

Tabela 4.1 - Proporcionalamento das adições minerais em cada mistura de aglomerante

| Nomenclatura das misturas | Proporção dos materiais (% do total de aglomerante) |                               |                                |              |
|---------------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|--------------|
|                           | Cimento (CPV-ARI)                                   | Cinza de casca de arroz clara | Cinza de casca de arroz escura | Sílica ativa |
| REF                       | 100   | -                             | -                              | -            |
| 5C                        | 95  | 5                             | -                              | -            |
| 10C                       | 90  | 10                            | -                              | -            |
| 20C                       | 80  | 20                            | -                              | -            |
| 30C                       | 70  | 30                            | -                              | -            |
| 5E                        | 95  | -                             | 5                              | -            |
| 10E                       | 90  | -                             | 10                             | -            |
| 20E                       | 80  | -                             | 20                             | -            |
| 30E                       | 70  | -                             | 30                             | -            |
| 5SA                       | 95  | -                             | -                              | 5            |
| 10SA                      | 90  | -                             | -                              | 10           |

Para cada mistura, foram estudadas três relações de água/aglomerante (a/agl), sendo elas: 0,35; 0,50 e 0,65. Todas as misturas tiveram amostras com dois períodos de cura úmida (3 e 7 dias) para atender os objetivos propostos por esta pesquisa.

Os materiais utilizados, nesta investigação experimental, foram:

- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) em conformidade com a NBR 5733 (ABNT, 1991);
- Cinza de casca de arroz clara (C): com baixo teor de carbono gráfico, procedente da indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete/RS (GEEA), moída no laboratório de materiais de construção civil (LMCC) da UFSM, através do moinho de bolas;
- Cinza de casca de arroz escura (E): com alto teor de carbono gráfico, também procedente da indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete/RS (GEEA) já moída na indústria;
- Sílica ativa (SA): proveniente de fornecedor nacional;
- Areia: o agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa encontrada na região de Santa Maria/RS, previamente lavada e seca em estufa a 105 - 110°C;
- Brita: o agregado graúdo foi pedra britada originária de rocha diabásica do município de Itaara/RS, previamente lavada e seca;

- Água: a água utilizada na moldagem dos corpos de prova foi proveniente do reservatório da UFSM, alimentado por poços artesianos. A água abastece a maioria dos pontos de consumo na UFSM, tendo sua potabilidade garantida. Para elaboração das soluções de cloreto de sódio e de nitrato de prata, ambas utilizadas no ensaio de penetração de íons cloreto, foi usada água destilada e deionizada, respectivamente;
- Aditivo: com objetivo de manter a igualdade de consistência entre as diversas misturas investigadas, foi utilizado aditivo químico plastificante de pega normal, cuja dosagem recomendada pelo fabricante é de até 1,0% da massa do aglomerante. Quando a dosagem do plastificante não foi suficiente para atingir a consistência desejada (abatimento de  $100 \pm 10$  mm), fez-se necessário o uso de um aditivo superplastificante sintético com base de polímeros policarboxilatos, cuja dosagem recomendada é de até 5,0% do peso do aglomerante.

A fim de igualar a temperatura do concreto fresco para os diferentes traços em 18°C, a partir da temperatura inicial dos agregados e dos aglomerantes, a temperatura da água foi corrigida através da Equação 4.1, proposta por Mehta e Monteiro (2008), que correlaciona a temperatura do concreto com a massa e a temperatura inicial dos materiais constituintes.

$$T = \frac{0,22.(T_m, M_m + T_c.M_c) + T_a.Ma}{0,22.(M_m + M_c)} \quad (4.1)$$

Onde:

**T** é a temperatura da massa de concreto (°F);

**T<sub>m</sub>** é a temperatura dos agregados (°F);

**T<sub>c</sub>** é a temperatura do cimento (°F);

**T<sub>a</sub>** é a temperatura da água (°F);

**M<sub>m</sub>** é a massa de agregados (kg);

**M<sub>c</sub>** é a massa de cimento (kg);

**M<sub>a</sub>** é a massa de água (kg).

## 4.2.1 Caracterização dos materiais

### 4.2.1.1 Aglomerantes

A Tabela 4.2 apresenta as características físicas e mecânicas do cimento utilizado, bem como sua composição química. As características físicas e químicas das adições minerais são apresentadas na Tabela 4.3.

As características dos aglomerantes foram obtidas por ensaios realizados conforme as seguintes normas:

- NBR 11579/1991: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
  - Análise química: NBR NM 10/2004, 11-1/2004, 11-2/2004, 12/2004, 13/2004, 14/2004, 15/2004, 16/2004, 17/2004, 18/2004, 19/2004, 21/2004;
  - Distribuição granulométrica a laser: ABCP/SP;
  - NBR NM 23/2001: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica;
  - NBR NM 43/2002: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal;
  - NBR NM 65/2002: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega;
- NBR NM 76/1998: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).

A Figura 4.1 representa o difratograma da amostra de cimento.

Os difratogramas das adições minerais são apresentados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. A Figura 4.5 apresenta a distribuição granulométrica a laser dos aglomerantes estudados.

Tabela 4.2 - Características físico-químicas e mecânicas do cimento

| Classificação NBR 5733                           | CPV-ARI                      |
|--|------------------------------|
| <b>Resistência à compressão axial (NBR 7215)</b> | <b>(MPa)</b>                 |
| 1 dia  | 14,3                         |
| 3 dias   | 33,0                         |
| 7 dias   | 36,8                         |
| 28 dias  | 49,2                         |
| <b>Características Físicas</b>                   |                              |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )            | 3,13                         |
| Finura #0,075 mm                                 | 0,22                         |
| Superfície específica BET (m <sup>2</sup> /g)    | 1,14                         |
| <b>Composição Química</b>                        | <b>% sobre a massa total</b> |
| Perda ao fogo                                    | 3,39                         |
| SiO <sub>2</sub>                                 | 19,19                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | 5,16                         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | 2,95                         |
| CaO  | 62,64                        |
| MgO  | 2,75                         |
| SO <sub>3</sub>                                  | 2,52                         |
| Na <sub>2</sub> O                                | 0,12                         |
| K <sub>2</sub> O                                 | 0,64                         |
| Carbono grafítico                                | 1,93                         |
| <b>Tempo de Pega</b>                             |                              |
| Início de pega (min.)                            | 180                          |
| Fim de pega (min.)                               | 250                          |

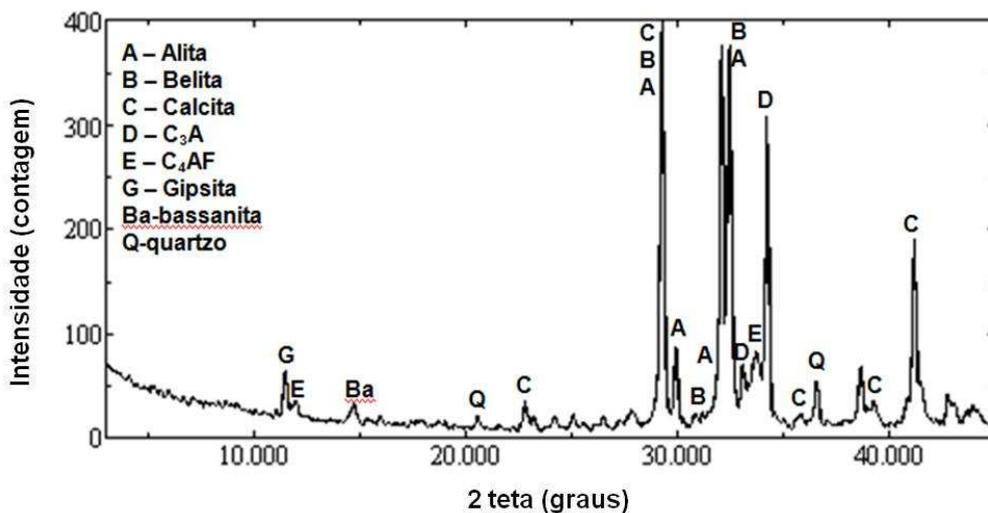


Figura 4.1 - Difratograma da amostra de cimento (CPV - ARI)

Tabela 4.3 - Características físico-químicas das adições minerais

| Características Físicas                       | C                     | E     | SA    |
|---|-----------------------|-------|-------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )         | 2,11                  | 2,12  | 2,20  |
| Superfície específica BET (m <sup>2</sup> /g) | 18,89                 | 20,73 | 18,83 |
| Composição Química                            | % sobre a massa total |       |       |
| SiO <sub>2</sub>                              | 93,54                 | 88,12 | 94,20 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 0,52                  | 0,56  | 0,27  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 0,20                  | 0,15  | 0,15  |
| CaO   | 0,79                  | 0,83  | 0,61  |
| MgO   | 0,49                  | 0,49  | 0,57  |
| SO <sub>3</sub>                               | 0,05                  | 0,10  | 0,11  |
| Na <sub>2</sub> O                             | 0,03                  | 0,21  | 0,15  |
| K <sub>2</sub> O                              | 1,65                  | 1,60  | 0,40  |
| Carbono grafítico                             | 0,41                  | 3,69  | -     |

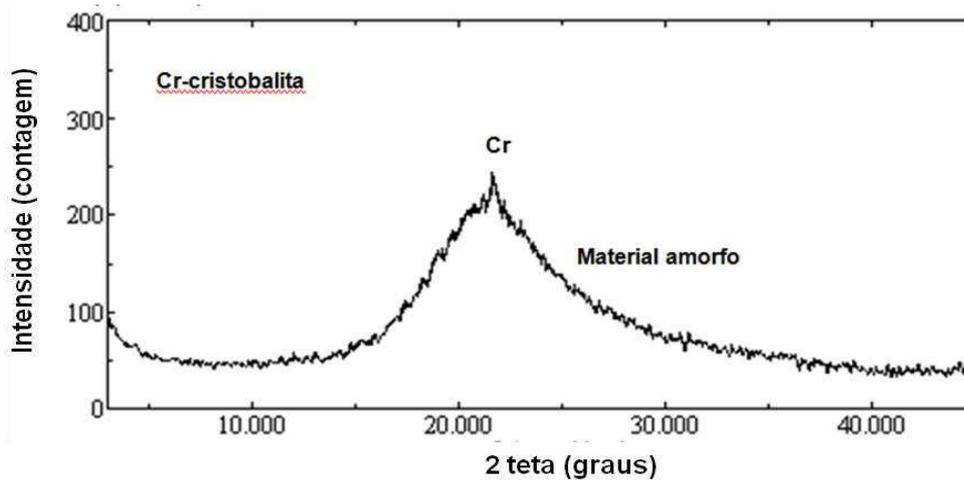


Figura 4.2 - Difratograma da amostra de cinza de casca clara (C)

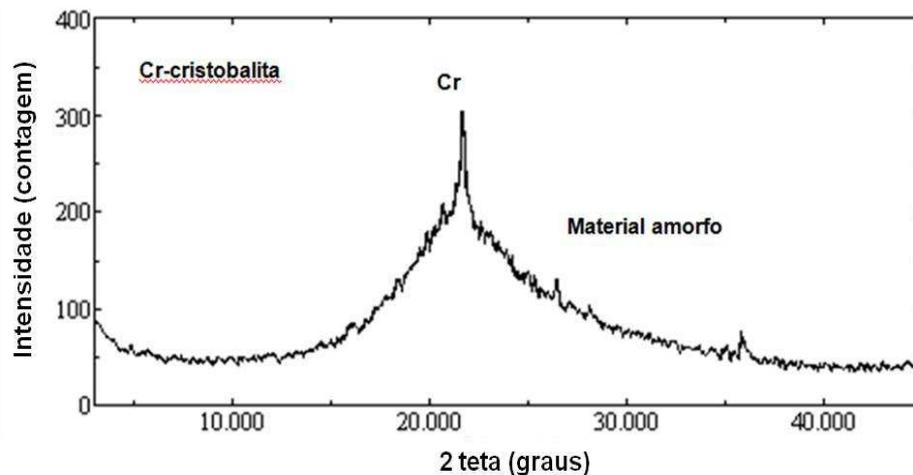


Figura 4.3 - Difratograma da amostra de cinza de casca escura (E)

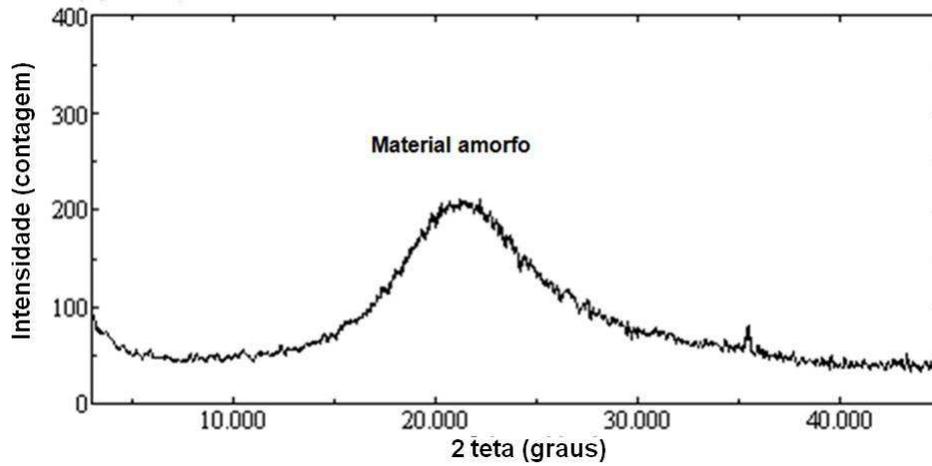


Figura 4.4 - Difratograma da amostra de sílica ativa (SA)

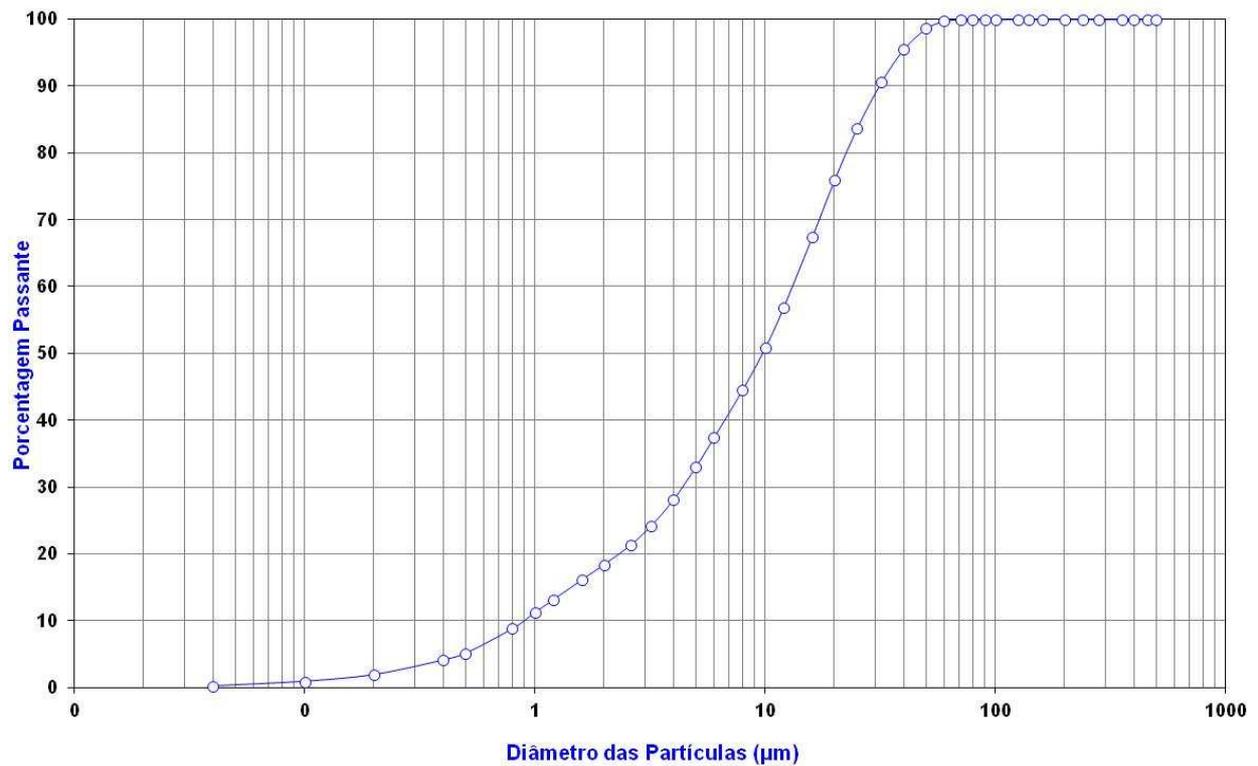


Figura 4.5 -Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI)

A Figura 4.6, a seguir, apresenta as imagens das amostras dos aglomerantes utilizados nesta pesquisa.



**Figura 4.6 - Amostras dos aglomerantes utilizados nesta pesquisa.**

#### 4.2.1.2 Agregados

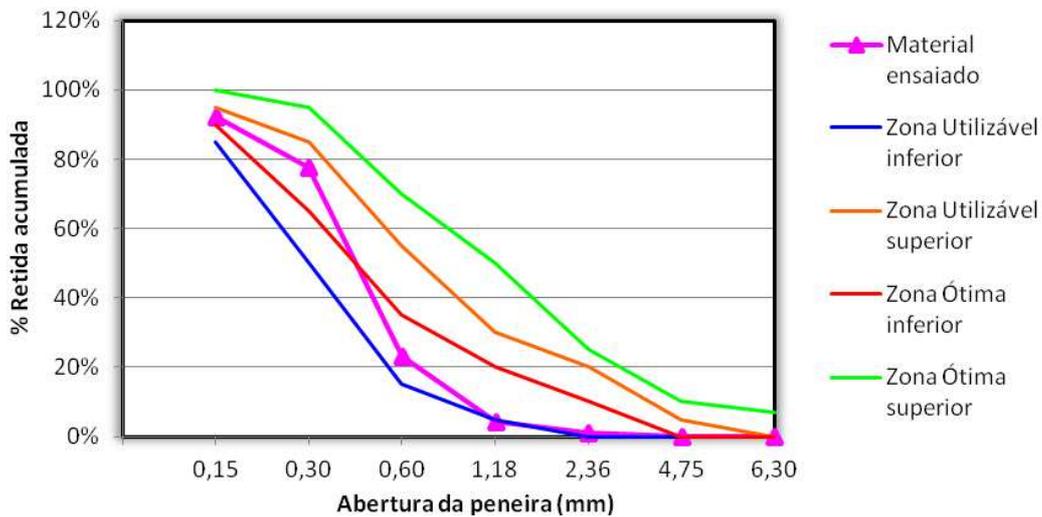
Para obtenção das características físicas dos agregados, foram realizados ensaios conforme as seguintes normas:

- NBR NM 26/2001: Agregados – Amostragem;
- NBR NM 52/2003: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- NBR NM 53/2003: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- NBR NM 248/2003: Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- NBR 7809/2006: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.
- NBR NM 45/2006: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;

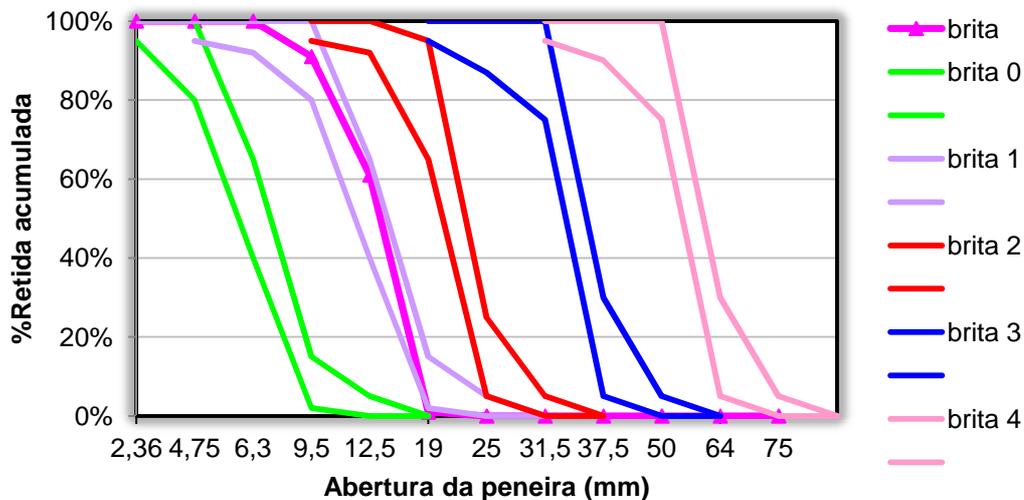
A Tabela 4.4 apresenta as características físicas dos agregados. As curvas granulométricas da areia e da brita utilizadas nesta pesquisa estão representadas nas Figuras 4.7 e 4.8 respectivamente.

**Tabela 4.4 - Características físicas dos agregados**

| Grandeza Física                        | Areia | Brita |
|--|-------|-------|
| Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> ) | 2,66  | 2,48  |
| Massa unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )   | 1,62  | 1,38  |
| Módulo de finura                       | 1,85  | 6,92  |
| Índice de forma                        | -     | 2,23  |
| Dimensão máxima característica (mm)    | 1,2   | 19    |



**Figura 4.7 - Curva granulométrica da areia**



**Figura 4.8 - Curva granulométrica da brita**

### 4.3 Dosagem do concreto

O proporcionamento dos materiais para os concretos foi realizado segundo a metodologia proposta por Helene e Terzian (1992), em que o teor ótimo de argamassa encontrado foi de 51%, em massa de materiais secos.

Devido à menor massa específica das adições minerais, em relação ao cimento, e o conseqüente aumento no volume de pasta, quando o cimento é substituído por estes materiais para que o teor de argamassa fosse mantido constante em todos os traços, tornou-se necessária a correção do volume de areia em cada mistura.

Para o traçado das curvas que indicam o comportamento dos concretos com diferentes aglomerantes, com relação às propriedades investigadas, em distintos níveis de resistência, os concretos foram dosados com três relações água/aglomerante, resultando nos traços unitários indicados na Tabela 4.5, no caso do concreto de referência.

**Tabela 4.5 - Traços unitários utilizados na dosagem dos concretos de referência**

| Relação água/aglomerante | Traço unitário  |
|--------------------------|-----------------|
| 0,35                     | 1 : 1,30 : 2,21 |
| 0,50                     | 1 : 2,06 : 2,94 |
| 0,65                     | 1 : 2,83 : 3,68 |

A Tabela 4.6 apresenta as quantidades de materiais por m<sup>3</sup> de concreto correspondentes a cada mistura.

**Tabela 4.6 - Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto correspondente a cada mistura aglomerante**

| Mistura | Relação |      | Materiais em Kg/m <sup>3</sup> |      |      |    |       |       |      |                |                 |
|---------|---------|------|--------------------------------|------|------|----|-------|-------|------|----------------|-----------------|
|         | a/agl   | Agil | Cim                            | CCAC | CCAE | SA | Areia | Brita | Água | Aditivo plast. | Aditivo superp. |
| REF     | 0,35    | 487  | 487                            | -    | -    | -  | 633   | 1076  | 170  | 2,44           | -               |
|         | 0,50    | 359  | 359                            | -    | -    | -  | 739   | 1055  | 180  | -              | -               |
|         | 0,65    | 284  | 284                            | -    | -    | -  | 802   | 1043  | 185  | -              | -               |
| 5C      | 0,35    | 487  | 463                            | 24   | -    | -  | 618   | 1076  | 170  | 3,16           | -               |
|         | 0,50    | 359  | 341                            | 18   | -    | -  | 732   | 1055  | 180  | -              | -               |
|         | 0,65    | 284  | 270                            | 14   | -    | -  | 798   | 1043  | 185  | -              | -               |
| 10C     | 0,35    | 487  | 438                            | 49   | -    | -  | 610   | 1076  | 170  | 4,87           | 1,95            |
|         | 0,50    | 359  | 323                            | 36   | -    | -  | 725   | 1055  | 180  | 1,08           | -               |
|         | 0,65    | 284  | 256                            | 28   | -    | -  | 789   | 1043  | 185  | 0,29           | -               |
| 20C     | 0,35    | 487  | 389                            | 98   | -    | -  | 591   | 1076  | 170  | 4,87           | 3,90            |
|         | 0,50    | 359  | 287                            | 72   | -    | -  | 711   | 1055  | 180  | 2,51           | -               |
|         | 0,65    | 284  | 227                            | 57   | -    | -  | 778   | 1043  | 185  | 1,00           | -               |
| 30C     | 0,35    | 487  | 340                            | 147  | -    | -  | 574   | 1076  | 170  | 4,87           | 7,30            |
|         | 0,50    | 359  | 251                            | 108  | -    | -  | 697   | 1055  | 180  | 3,59           | 1,44            |
|         | 0,65    | 284  | 199                            | 85   | -    | -  | 767   | 1043  | 185  | 1,99           | -               |
| 5E      | 0,35    | 487  | 463                            | -    | 24   | -  | 618   | 1076  | 170  | 3,04           | -               |
|         | 0,50    | 359  | 341                            | -    | 18   | -  | 732   | 1055  | 180  | -              | -               |
|         | 0,65    | 284  | 270                            | -    | 14   | -  | 798   | 1043  | 185  | -              | -               |
| 10E     | 0,35    | 487  | 438                            | -    | 49   | -  | 610   | 1076  | 170  | 4,87           | 2,19            |
|         | 0,50    | 359  | 323                            | -    | 36   | -  | 725   | 1055  | 180  | 1,26           | -               |
|         | 0,65    | 284  | 256                            | -    | 28   | -  | 789   | 1043  | 185  | 0,43           | -               |
| 20E     | 0,35    | 487  | 389                            | -    | 98   | -  | 591   | 1076  | 170  | 4,87           | 4,14            |
|         | 0,50    | 359  | 287                            | -    | 72   | -  | 711   | 1055  | 180  | 2,87           | -               |
|         | 0,65    | 284  | 227                            | -    | 57   | -  | 778   | 1043  | 185  | 1,14           | -               |
| 30E     | 0,35    | 487  | 340                            | -    | 147  | -  | 574   | 1076  | 170  | 4,87           | 7,55            |
|         | 0,50    | 359  | 251                            | -    | 108  | -  | 697   | 1055  | 180  | 3,59           | 1,61            |
|         | 0,65    | 284  | 199                            | -    | 85   | -  | 767   | 1043  | 185  | 2,13           | -               |
| 5SA     | 0,35    | 487  | 463                            | -    | -    | 24 | 618   | 1076  | 170  | 2,92           | -               |
|         | 0,50    | 359  | 341                            | -    | -    | 18 | 732   | 1055  | 180  | -              | -               |
|         | 0,65    | 284  | 270                            | -    | -    | 14 | 798   | 1043  | 185  | -              | -               |
| 10SA    | 0,35    | 487  | 438                            | -    | -    | 49 | 610   | 1076  | 170  | 4,87           | 1,70            |
|         | 0,50    | 359  | 323                            | -    | -    | 36 | 725   | 1055  | 180  | 0,90           | -               |
|         | 0,65    | 284  | 256                            | -    | -    | 28 | 789   | 1043  | 185  | -              | -               |

## 4.4 Ensaios experimentais

### 4.4.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com as normas da ABNT: NBR 5738/2003 e NBR 5739/2007. Para cada relação a/agl de cada mistura a ser investigada, foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing$  100 mm x 200 mm), sendo 8 para cada período de cura úmida (3 e 7 dias). Os corpos de prova foram moldados em duas camadas e adensados em mesa vibratória. Durante as primeiras 24h, todos os corpos de prova foram armazenados em local protegido de intempéries, sendo devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar perda de água do concreto. Após 24h, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida numa temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95% , pelos períodos de cura úmida pré-estabelecidos.

As idades dos corpos de prova na realização deste ensaio foram de 28 e 91 dias, sendo rompidos 4 corpos de prova para cada idade de cura e traço.

Todos os corpos de prova receberam nas faces paralelas um capeamento à base de enxofre, a fim de regularizar as extremidades e permitir uma distribuição de carga uniforme.

O valor da resistência final adotada, para cada mistura e idade, consistiu-se da média aritmética de quatro corpos de prova, quando o desvio relativo máximo mostrou-se menor do 6%.

#### 4.4.2 Retração total

As recomendações que regem este ensaio são dadas pela ASTM C157 / C157M - 08 e ASTM C 490 - 04. Foram moldados corpos de prova em fôrmas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 285 mm, com um pino de 22,5 mm de comprimento no centro de cada uma das extremidades, de modo que a distância entre os pinos fosse de 250 mm.

Foram moldados 8 corpos de prova para cada relação a/agl de cada mistura a ser investigada, sendo 4 corpos de prova para cada período de cura úmida (3 e 7 dias). A desmoldagem foi feita após 24 horas e logo em seguida as amostras foram estocadas em câmara úmida durante o prazo de cura desejado e, depois, retiradas da mesma para ser feita a primeira leitura de seus comprimentos (dia zero). Na sequência, os corpos de prova foram mantidos em sala climatizada (temperatura de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50 \pm 10\%$ ) para secagem ao ar. As idades de ensaio frente à retração total foram 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91 e 182 dias após a retirada da câmara úmida. Para realização das leituras dos corpos de prova, foi utilizado um comparador de expansibilidade com marcador digital de precisão de 0,001 mm (Figura 4.9).

Após 91 dias, dois dos 4 corpos-de-prova de cada mistura foram preparados para o ensaio de penetração de cloretos por imersão, sendo que os outros dois permaneceram na sala climatizada para a leitura seguinte de retração (182 dias).



Figura 4.9 - Equipamento utilizado no ensaio de retração total - comparador de expansibilidade

#### 4.4.3 Penetração de íons cloreto por imersão

A metodologia deste ensaio, deu-se pela preparação de metade dos corpos de prova utilizados no ensaio de retração transcorridos 91 dias após a cura úmida, na seguinte sequência:

- Corpos de prova de 100 mm x 10 mm x 285 mm foram cortados em partes de aproximadamente 55 mm de espessura, totalizando 15 fatias, sendo 3 fatias para cada um dos cinco períodos do ensaio (7, 14, 28, 56 e 91 dias);
- Foram impermeabilizadas em quatro das seis faces, com três demãos de verniz poliuretânico, permitindo, assim, que somente duas faces paralelas (100 mm x 55 mm) ficassem sujeitas à penetração de íons cloreto;
- Após a impermeabilização, as fatias foram imersas em um reservatório com solução salina na proporção de 31,94 g de NaCl para cada litro de água destilada;
- Os períodos de imersão foram de 7, 14, 28, 56 e 91 dias;
- Ao completarem cada idade de ensaio, 3 fatias de cada relação a/agl foram retiradas do reservatório e lavadas com água potável. Após, foram rompidas na direção de penetração dos íons cloreto;
- Em seguida, foi aspergido solução de nitrato de prata (17 g de  $\text{AgNO}_3$  para cada litro de água deionizada) para percepção visual e registro fotográfico da região de penetração de íons cloreto após a secagem da solução;
- A determinação da profundidade de penetração de íons cloreto foi realizada com o auxílio de programas computacionais.

A Figura 4.10, a seguir, ilustra esquematicamente a metodologia aplicada neste ensaio.

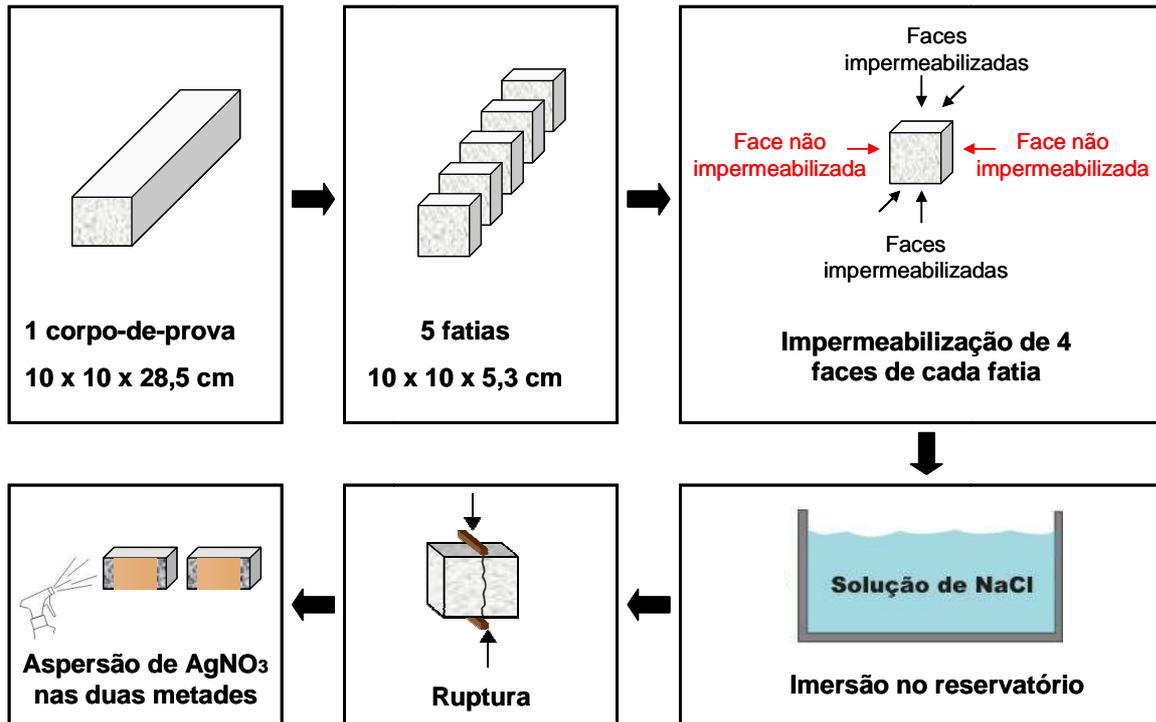


Figura 4.10 - Representação esquemática da metodologia do ensaio de penetração de íons cloreto.

Segundo Otsuki et al (1992), a profundidade de penetração de íons cloreto é indicada por um limite de mudança de cor. A solução de nitrato de prata reage onde a concentração de cloretos livres é superior a 0,15% do peso de cimento e forma uma coloração branca e, onde não há cloretos livres, realça uma coloração marrom de óxido de prata ( $\text{AgO}$ ).

A profundidade média de penetração foi determinada através de uma fotografia digitalizada, com o auxílio do programa computacional *AutoCAD*. Foram feitas várias linhas de medida, espaçadas de 1 mm, na região onde houve a penetração de íons cloreto. Com a utilização de uma rotina chamada *COTA*, no mesmo programa computacional, mediu-se o comprimento de cada linha, que gerou automaticamente um arquivo para o programa computacional *Excel*. Os valores discrepantes, com coeficiente de variação superior a 10%, foram excluídos.

As características das soluções de  $\text{NaCl}$  e de  $\text{AgNO}_3$  estavam em conformidade com o método utilizado por Wee et al (2000).

Após serem estabelecidas as médias de penetração para cada prazo de submersão, os resultados deste ensaio foram feitos com base no coeficiente angular

da equação de regressão linear (4.2), proposta por Bakker (1988), chamado coeficiente de penetração (k).

$$X = a + k (t)^{1/2} \quad (4.2)$$

Onde:

**X** é a profundidade de penetração (mm);

**a** é o ponto de intersecção da reta com o eixo y (no gráfico profundidade de penetração x tempo<sup>1/2</sup>);

**k** é o coeficiente de penetração;

**t** é o tempo (semanas).

Deste modo, os valores de profundidade média de cada mistura investigada foram plotados em um gráfico em função do tempo de imersão, sendo que a inclinação da reta (coeficiente angular) representa o coeficiente de difusão de cloretos do concreto, como exemplificado na Figura 4.11.

Neste estudo, optou-se por considerar a constante "a" da equação como diferente de zero. Tal consideração não afeta os resultados quanto às propriedades das misturas, mas serve como um meio de ajustar as curvas dos dados como propõe Wee et al (2000).

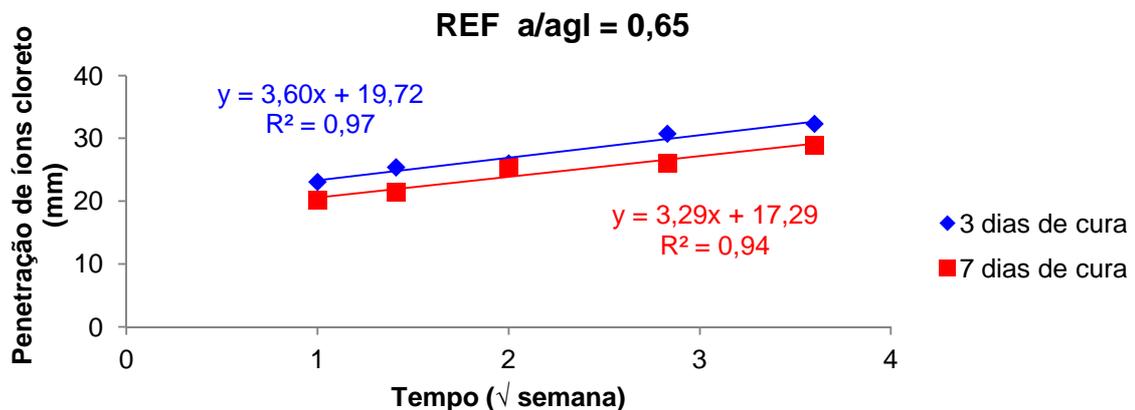


Figura 4.11 - Gráfico para obtenção dos coeficientes k.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Introdução

O presente capítulo reúne a análise dos resultados das misturas testadas nos ensaios de resistência à compressão axial, retração total, penetração de íons cloreto por imersão, além de uma análise econômica, através de uma abordagem comparativa entre as diversas misturas.

São discutidas as alterações das propriedades estudadas frente à variação do tipo de adição, do percentual de substituição, da relação a/agl, do tempo de cura e idade dos corpos de prova.

### 5.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias, para as misturas investigadas, são apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2.

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam as resistências médias obtidas no ensaio de compressão axial e os índices percentuais de obtenção de resistência em relação aos valores evidenciados na mistura de referência aos 3 e 7 dias de cura, respectivamente.

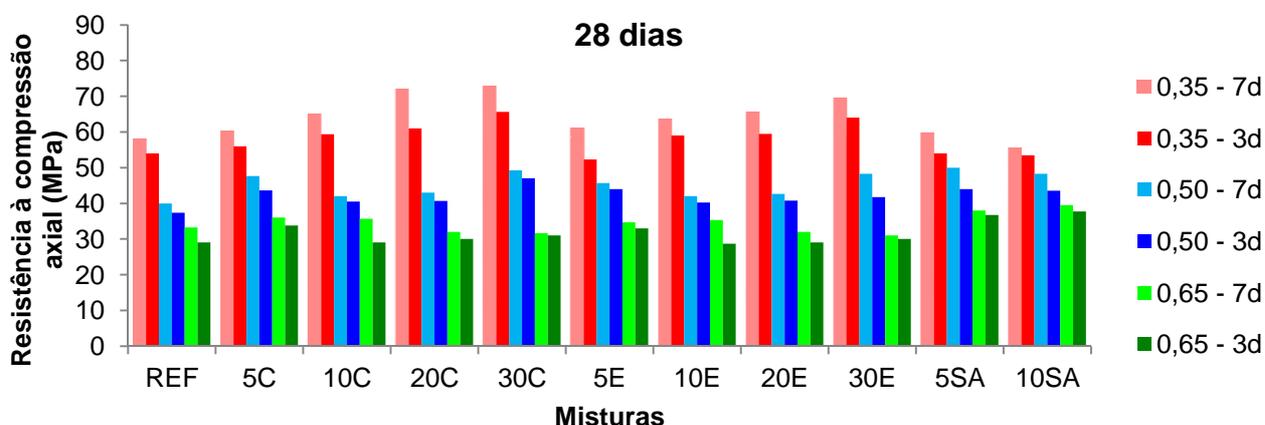


Figura 5.1 - Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade nas misturas investigadas.

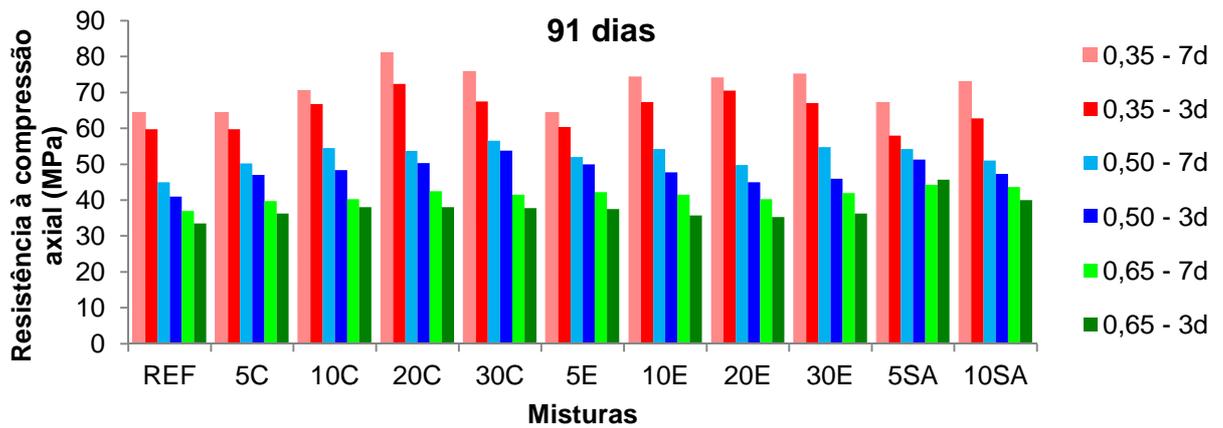


Figura 5.2 - Resistência à compressão axial aos 91 dias de idade nas misturas investigadas.

Tabela 5.1 - Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 3 dias.

| Mistura | a/ag | Resistência à compressão (Mpa) $f_c$ mistura / $f_c$ referência (%) |       |        |        |
|---------|------|---|-------|--------|--------|
|         |      | Idade (dias)  |       |        |        |
|         |      | 28  | 91    | 28     | 91     |
| REF     | 0,35 | 54,00   | 59,75 | 100,00 | 100,00 |
|         | 0,50 | 37,33   | 41,00 | 100,00 | 100,00 |
|         | 0,65 | 29,00   | 33,50 | 100,00 | 100,00 |
| 5C      | 0,35 | 56,00   | 59,75 | 103,70 | 100,00 |
|         | 0,50 | 43,67   | 47,00 | 117,00 | 114,60 |
|         | 0,65 | 33,75   | 36,25 | 116,40 | 108,20 |
| 10C     | 0,35 | 59,33   | 66,75 | 109,90 | 111,70 |
|         | 0,50 | 40,50   | 48,33 | 108,50 | 117,90 |
|         | 0,65 | 29,00   | 38,00 | 100,00 | 113,40 |
| 20C     | 0,35 | 61,00   | 72,33 | 113,00 | 121,10 |
|         | 0,50 | 40,67   | 50,33 | 108,90 | 122,80 |
|         | 0,65 | 30,00   | 38,00 | 103,40 | 113,40 |
| 30C     | 0,35 | 65,67   | 67,50 | 121,60 | 113,00 |
|         | 0,50 | 47,00   | 53,75 | 125,90 | 131,10 |
|         | 0,65 | 31,00   | 37,75 | 106,90 | 112,70 |
| 5E      | 0,35 | 52,33   | 60,33 | 96,90  | 101,00 |
|         | 0,50 | 44,00   | 50,00 | 117,90 | 121,90 |
|         | 0,65 | 33,00   | 37,50 | 113,80 | 111,90 |
| 10E     | 0,35 | 59,00   | 67,33 | 109,30 | 112,70 |
|         | 0,50 | 40,25   | 47,75 | 107,80 | 116,50 |
|         | 0,65 | 28,67   | 35,75 | 98,90  | 106,70 |
| 20E     | 0,35 | 59,50   | 70,50 | 110,20 | 118,00 |
|         | 0,50 | 40,75   | 45,00 | 109,20 | 109,80 |
|         | 0,65 | 29,00   | 35,25 | 100,00 | 105,20 |
| 30E     | 0,35 | 64,00   | 67,00 | 118,50 | 112,10 |
|         | 0,50 | 41,75   | 46,00 | 111,80 | 112,20 |
|         | 0,65 | 30,00   | 36,25 | 103,40 | 108,20 |
| 5SA     | 0,35 | 54,00   | 58,00 | 100,00 | 97,10  |
|         | 0,50 | 44,00   | 51,25 | 117,90 | 125,00 |
|         | 0,65 | 36,75   | 45,67 | 126,70 | 136,30 |
| 10SA    | 0,35 | 53,50   | 62,75 | 99,10  | 105,00 |
|         | 0,50 | 43,50   | 47,25 | 116,50 | 115,20 |
|         | 0,65 | 37,75   | 40,00 | 130,20 | 119,40 |

**Tabela 5.2 - Resistência médias obtidas no ensaio de compressão axial e índices de resistência das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 7 dias.**

| Mistura | a/ag | Resistência à compressão(Mpa) $f_c$ mistura / $f_c$ referência (%) |       |        |        |
|---------|------|--|-------|--------|--------|
|         |      | Idade (dias)   |       |        |        |
|         |      | 28   | 91    | 28     | 91     |
| REF     | 0,35 | 58,00  | 64,25 | 100,00 | 100,00 |
|         | 0,50 | 40,00  | 45,00 | 100,00 | 100,00 |
|         | 0,65 | 33,25  | 37,00 | 100,00 | 100,00 |
| 5C      | 0,35 | 60,25  | 64,33 | 103,90 | 100,10 |
|         | 0,50 | 47,67  | 50,25 | 119,20 | 111,70 |
|         | 0,65 | 36,00  | 39,75 | 108,30 | 107,40 |
| 10C     | 0,35 | 65,00  | 70,50 | 112,10 | 109,70 |
|         | 0,50 | 42,00  | 54,50 | 105,00 | 121,10 |
|         | 0,65 | 35,67  | 40,25 | 107,30 | 108,80 |
| 20C     | 0,35 | 72,00  | 81,00 | 124,10 | 126,10 |
|         | 0,50 | 43,00  | 53,67 | 107,50 | 119,30 |
|         | 0,65 | 32,00  | 42,50 | 96,20  | 114,90 |
| 30C     | 0,35 | 72,67  | 75,75 | 125,30 | 117,90 |
|         | 0,50 | 49,25  | 56,50 | 123,10 | 125,60 |
|         | 0,65 | 31,67  | 41,50 | 95,20  | 112,20 |
| 5E      | 0,35 | 61,00  | 64,33 | 105,20 | 100,10 |
|         | 0,50 | 45,67  | 52,00 | 114,20 | 115,50 |
|         | 0,65 | 34,67  | 42,25 | 104,30 | 114,20 |
| 10E     | 0,35 | 63,67  | 74,25 | 109,80 | 115,60 |
|         | 0,50 | 42,00  | 54,25 | 105,00 | 120,60 |
|         | 0,65 | 35,33  | 41,50 | 106,30 | 112,20 |
| 20E     | 0,35 | 65,67  | 74,00 | 113,20 | 115,20 |
|         | 0,50 | 42,67  | 49,75 | 106,70 | 110,60 |
|         | 0,65 | 32,00  | 40,25 | 96,20  | 108,80 |
| 30E     | 0,35 | 69,50  | 75,00 | 119,80 | 116,70 |
|         | 0,50 | 48,25  | 54,75 | 120,60 | 121,70 |
|         | 0,65 | 31,00  | 42,00 | 93,20  | 113,50 |
| 5SA     | 0,35 | 59,75  | 67,00 | 103,00 | 104,30 |
|         | 0,50 | 50,00  | 54,25 | 125,00 | 120,50 |
|         | 0,65 | 38,00  | 44,25 | 114,30 | 119,60 |
| 10SA    | 0,35 | 55,50  | 73,00 | 95,70  | 113,60 |
|         | 0,50 | 48,25  | 51,00 | 120,60 | 113,30 |
|         | 0,65 | 39,50  | 43,67 | 118,80 | 118,00 |

Todas as misturas apresentaram, como esperado, aumento nos valores de resistência à compressão axial com a diminuição da relação a/agl, aumento do período de cura úmida e aumento da idade.

A substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz, nos teores de 5%, 10%, 20% e 30%, resultou, nas idades de 28 e 91 dias, em valores de resistência à compressão, no geral, superiores àqueles do concreto de referência,

comportamento também relatado por outros pesquisadores: ZHANG E MALHOTRA, 1996; COUTINHO, 2003; SARASWATHY E SONG, 2007; FENG et al, 2003; CHAO-LUNG et al, 2011. Estes observaram que concretos compostos com 20% CCA, com alto teor de carbono grafítico (8,5%), apresentaram valores equivalentes àquele do concreto de referência após 28 dias.

Segundo Tuan et al (2011), a adição de cinza de casca de arroz, com menor tamanho de partícula do que o cimento, aumenta a resistência à compressão devido ao efeito filer. O efeito filer das adições minerais, como a sílica ativa, é a principal responsável pela melhoria da resistência em misturas com baixa relação a/agl. (DETWILER E MEHTA, 1989).

Assim, a adição de cinza de casca de arroz, com um tamanho de partícula muito menor do que a do cimento, aumenta a resistência devido ao efeito filer. Esse comportamento é responsável pela maior resistência à compressão das misturas compostas com cinza de casca de arroz quando comparadas à mistura de referência em um mesmo grau de hidratação. Contudo, Tuan et al (2011) observaram menores valores de resistência à compressão de concretos compostos com cinza de casca de arroz nas idades iniciais, isto é, antes dos 7 dias. Os autores justificaram esse comportamento pela menor quantidade de água disponível para a hidratação do cimento, uma vez que a cinza de casca de arroz absorve certa quantidade de água durante a mistura. Esta água absorvida pode promover a hidratação do cimento em idades posteriores, causando um aumento da resistência à compressão. Além disso, as resistências superiores das misturas compostas com cinza de casca de arroz podem, possivelmente, ser atribuídas à redução da relação a/agl efetiva, já que parte da água livre é adsorvida e retida nos pequenos poros (SUGITA et al, 1997).

Constata-se que o desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos com cinza de casca de arroz é ligeiramente maior que àquela das misturas compostas com sílica ativa nas idades posteriores, isto é, depois dos 3 dias. Isto ocorre apesar das partículas de cinza de casca de arroz serem menos prováveis de obterem um denso empacotamento das partículas e também de serem menos reativas do que as partículas de sílica ativa. Resultados similares foram obtidos por Zhang et al (1996).

Ganesan et al (2008) analisaram teores de substituição de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% , 25%, 30% e 35% de CCA, com área específica (BET) de 36,47 m<sup>2</sup>/g, na resistência à compressão de concretos produzidos com relação a/agl igual a 0,53,

idades de ensaio de 7, 14, 28 e 91 dias. Constataram maiores valores de resistência em todas as idades de ensaio para o teor de substituição de 20% e resistências semelhantes ao concreto de referência para o teor de substituição de 30%.

Tashima et al (2005) estudaram teores de substituição de 5% e 10% de CCA na resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias. Adotaram relação a/agl igual a 0,42 e obtiveram melhor resultado para o teor de substituição de 5% em todas as idades. Contudo, a mistura composta com 10% de CCA apresentou resistência à compressão semelhante ao concreto de referência aos 7 dias e superior nas demais idades.

Saraswathy e Song (2007) investigaram teores de substituição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de CCA em concretos com relação a/ag igual a 0,53. Observaram maiores valores de resistência à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias para os teores de substituição de 30%, 20% e 25%, respectivamente. Contudo, a resistência à compressão dos concretos compostos com 30% de CCA foi superior àquele de referência.

Cordeiro et al (2009) verificaram a influência de diferentes tempos de moagem sobre a distribuição de tamanho de partícula, área superficial e atividade pozolânica. Constataram que um tempo de moagem de 120 minutos foi suficiente para obter uma cinza com tamanho médio de partícula de 6,8  $\mu\text{m}$ , área específica de 33,67  $\text{m}^2/\text{g}$  e índice de atividade pozolânica de 109%. Produziram quatro concretos de alto desempenho, relação a/ag = 0,35, com essa cinza de casca de arroz ultra fina, em teores de substituição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, com abatimento de 150mm $\pm$ 20mm, obtido com a utilização de um superplastificante em teores crescentes conforme o aumento do teor de CCA. Observaram aumento da resistência com o aumento do teor de CCA obtendo melhor resultado em todas as idades de ensaio, 7, 28, 91 e 180 dias, para o teor de substituição em massa de 20% de CCA.

Coutinho (2003) investigou concretos com relação a/ag igual a 0,43 e teores de substituição de cimento por CCA com área específica de 22,36  $\text{m}^2/\text{g}$  de 0%, 10%, 15% e 20%. Observou, aos 80 dias, melhor desempenho para o teor de substituição de 20%.

Dos resultados obtidos no presente estudo, em concretos com cinzas de casca de arroz com diferentes teores de carbono gráfico e submetidos a diferentes prazos de cura, verifica-se que, quando se compara o desempenho das duas cinzas,

observa-se, para a idade de ensaio de 28 dias e prazo de cura de 3 e 7 dias, que as misturas, com cinza de casca de arroz clara, apresentaram maiores valores de resistência à compressão do que àqueles obtidos com a CCA escura. O mesmo comportamento é observado na idade de 91 dias e prazo de cura de 3 e 7 dias. Contudo, quando se analisa em igualdade de teor de substituição, esse comportamento varia em função da relação a/agl, idade de ensaio e prazo de cura, não apresentando uma tendência geral.

Para a idade de 28 dias e prazo de cura de 3 dias, observa-se que o comportamento das misturas variou em função da relação a/agl e tipo de cinza de casca de arroz. Assim, para a relação a/agl igual a 0,35, ocorreu aumento da resistência à compressão com o aumento no teor de substituição de cimento por CCA, tanto para a cinza clara como para a cinza escura. Dessa forma, as misturas compostas com 30% de CCA apresentaram os maiores valores de resistência à compressão de 65,7MPa e 64,0 MPa, respectivamente. Para a relação a/agl igual a 0,50, o melhor desempenho aos concretos compostos com cinza de casca de arroz clara foi para o teor de substituição de 30%, 47,0MPa e àqueles com CCA escura para o teor de substituição de 5%, 41,7MPa. Para a relação a/agl igual a 0,65, o melhor desempenho às duas cinzas de casca de arroz foi para o teor de substituição de 5%, 33,8 MPa e 33,0MPa, respectivamente.

Quando a cura foi estendida até o sétimo dia para os concretos compostos com CCA clara e escura, relação a/agl igual a 0,35 e 0,50, o melhor desempenho foi para o teor de substituição de 30% (72,7MPa e 49,3MPa CCA clara e 69,5 MPa e 48,2MPa para CCA clara. Para a relação a/agl igual a 0,65 a CCA clara apresentou melhor desempenho para o teor de substituição de 5%, 36,0 MPa, (valor semelhante àquele com 10% de CCA clara) e para a CCA escura, o melhor desempenho foi para o teor de substituição de 10%, 35,3MPa.

Na idade de 91 dias e prazo de cura de 3 dias, o melhor desempenho para a relação a/agl igual a 0,35 foi obtido para o teor de substituição de 20%, para as duas cinzas investigadas, 72,3 MPa - CCA clara e 70,5 MPa CCA escura. Para a relação a/agl igual a 0,50, o melhor desempenho foi para a mistura composta com 30% de CCA clara, 53,7 MPa, e 5% de CCA escura, 50,0 MPa. Para relação a/agl igual a 0,65, a cinza clara apresentou resistência que variaram de 36,25MPa a 38,0 MPa para os quatro teores de substituição, ou seja, pouca variação, assim com a cinza escura que apresentou resistências variando entre 35,25MPa a 37,50 MPa.

Quando o prazo de cura foi estendido para 7 dias e a relação água/aglomerante foi igual a 0,35, o melhor desempenho para os concretos com CCA clara foi obtido com o teor de substituição de 20% (81,0 MPa). Para a CCA escura, aqueles compostos com 10%, 20% e 30% apresentaram valores semelhantes e superiores a aquele com 5% (74,0 a 75,0MPa).

Para a relação a/agl igual a 0,50, o melhor desempenho para a CCA clara e escura foi obtido para o teor de substituição de 30%, 56,50MPa e 54,75MPa, respectivamente. Quando a relação a/agl foi de 0,65, o melhor desempenho para a CCA clara foi para o teor de substituição de 20%, 42,5 MPa, e para a CCA escura de 5%, 42,25 MPa.

As resistências obtidas com os concretos compostos com 5% e 10% de sílica ativa, na idade de 28 dias, só superaram àquelas com cinza de casca de arroz na relação a/agl igual a 0,65 nos dois prazos de cura. Entretanto, analisando em igualdade de teor de substituição (5%), na idade de 28 dias e prazo de cura de 3 dias, a mistura composta com sílica ativa foi superior àquela com CCA clara e escura para a relação a/agl igual a 0,65. Nesta mesma idade e prazo de cura de 7 dias, a mistura composta com 5% de sílica ativa foi superior àquela com CCA clara e escura nas relações a/agl igual a 0,50 e 0,65.

A mistura composta com 10% de sílica ativa na relação a/agl igual a 0,35 apresentou valores de resistência à compressão menores do que aqueles apresentados com CCA clara e escura, entretanto, nas relações a/agl 0,50 e 0,65, observa-se comportamento contrário, com valores superiores àqueles das misturas compostas com CCA.

Na idade de 91 dias e prazo de cura de 3 dias, as misturas compostas com 5% de sílica ativa apresentaram valores superiores àqueles com CCA clara e escura nas relações a/agl 0,50 e 0,65 e para o prazo de cura de 7 dias nas três relações a/agl.

Nesta mesma idade e prazo de cura, a mistura composta com 10% de sílica ativa apresentou valores de resistência à compressão superiores àqueles com CCA clara e escura na relação a/agl igual a 0,65. Esse comportamento se repetiu para o prazo de cura de 7 dias. Comportamento contrário é observado na relação a/agl igual a 0,50. Na relação a/agl igual a 0,35, a mistura composta com 10% de sílica ativa apresentou comportamento superior àquele obtido com a CCA clara.

### 5.3 Análise dos resultados de retração total

Os resultados do ensaio de retração total são representados nas Figuras 5.3 e 5.4. Nelas são mostradas as micro-deformações ( $10^{-6}$  mm/mm) dos corpos de prova das misturas em cada uma das idades avaliadas para os dois períodos de cura (3 e 7 dias).

A análise detalhada dos resultados, incluindo comparações percentuais entre os resultados numéricos, foi feita com base nos valores obtidos nas leituras de retração da última idade avaliada até então, 182 dias, conforme a Tabela 5.3. Na tabela, observam-se valores típicos de retração para concretos em idades avançadas, entre 200 e  $800 \times 10^{-6}$  mm/mm, dentro da faixa de valores citados por Zia et al (1997 apud ACI COMMITTEE 209, 2005).

Com base nas comparações percentuais dos resultados, toda vez que uma mistura apresentou retração superior em até 20% da observada em outra mistura, ou redução de até 17% quando comparadas, considerou-se que ambas possuem comportamentos similares. Estes valores foram usados porque Sivasundaram e Malhotra (1992), ao discutir seus resultados, concluíram que a retração hidráulica foi praticamente a mesma dentro de uma faixa entre  $405 \times 10^{-6}$  e  $493 \times 10^{-6}$ .

**Tabela 5.3 - Retração final das misturas**

| Cura   | a/agl | Retração ( $10^{-6}$ mm/mm), aos 182 dias para cada mistura |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|--------|-------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|        |       | REF   | 5C  | 10C | 20C | 30C | 5E  | 10E | 20E | 30E | 5SA | 10SA |
| 3 dias | 0,35  | 540   | 397 | 406 | 418 | 489 | 409 | 455 | 435 | 526 | 391 | 414  |
|        | 0,50  | 616   | 370 | 424 | 482 | 499 | 385 | 506 | 483 | 569 | 365 | 400  |
|        | 0,65  | 520   | 386 | 417 | 425 | 506 | 404 | 486 | 437 | 544 | 403 | 438  |
| 7 dias | 0,35  | 534   | 324 | 349 | 415 | 474 | 335 | 389 | 431 | 525 | 328 | 357  |
|        | 0,50  | 566   | 363 | 410 | 458 | 465 | 376 | 428 | 478 | 512 | 357 | 392  |
|        | 0,65  | 465   | 367 | 371 | 393 | 486 | 382 | 409 | 428 | 532 | 387 | 418  |

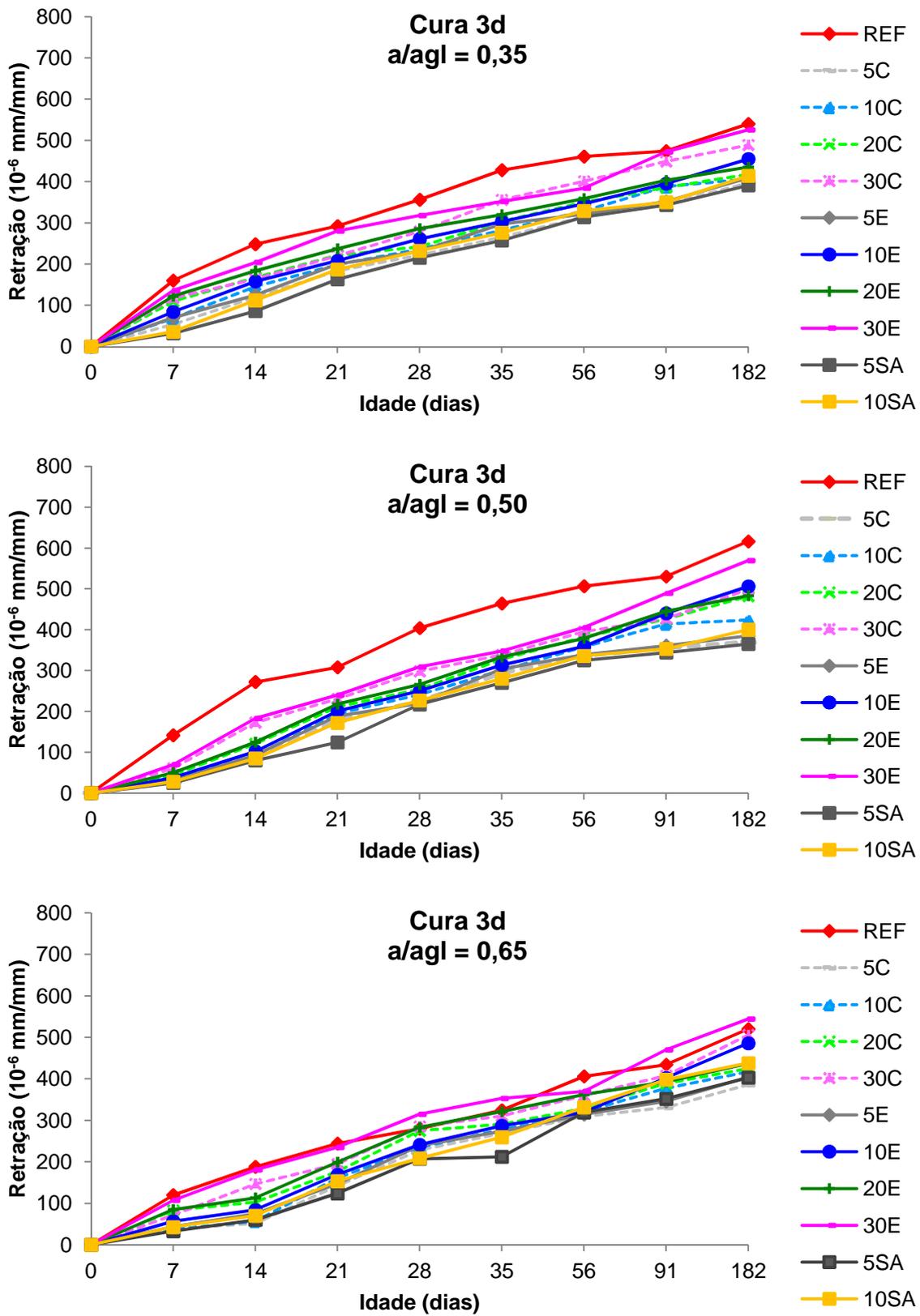


Figura 5.3 - Retração total das misturas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/agl.

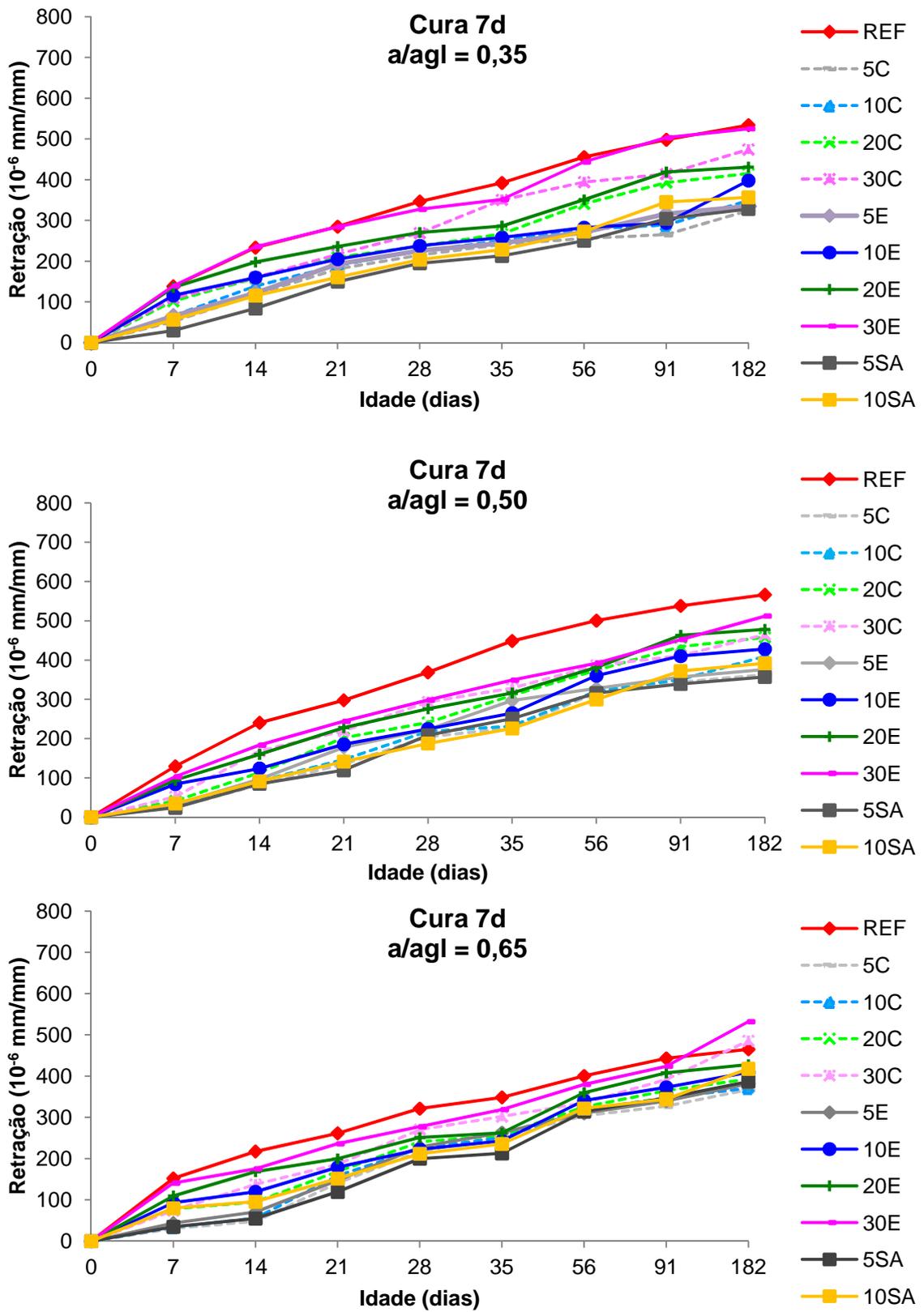


Figura 5.4 - Retração total das misturas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/agl.

### 5.3.1 Comparação entre os períodos de cura

Conforme observado na Tabela 5.3, os resultados de retração para o período de cura úmida de 7 dias foram menores em todas as misturas, quando comparados ao período de 3 dias de cura úmida, com diferença notável apenas para as misturas 5C e 5E na relação a/agl de 0,35, em que a retração apresentou valores de 23% e 22% maior, respectivamente. Para as demais misturas, foram observados valores semelhantes quanto à retração total entre os prazos de cura de 3 e 7 dias.

### 5.3.2 Comparação entre as adições minerais

Comparando as misturas com cinza de casca de arroz clara e escura, de mesmo teor e períodos de cura, as misturas com cinza de casca de arroz clara apresentaram menores valores de retração para todas as relações a/agl e ambos os períodos de cura, sem diferença ntável aos 182 dias.

A mistura REF apresentou os maiores valores de retração total, para todas as relações a/agl e ambos períodos de cura, quando comparada às demais misturas.

Ao comparar as misturas com 5%, os resultados foram semelhantes para as três adições minerais (cinza de casca de arroz clara, escura e sílica ativa). Já a mistura com 10% de sílica ativa, apresentou aos 182 dias, maiores valores de retração total quando comparadas com a mistura com 10% de cinza de casca de arroz clara, para os dois períodos de cura, exceto para relação a/agl 0,50. Quando comparadas com as misturas com 10% cinza de casca de arroz escura, as misturas 10SA apresentaram menores valores de retração, com exceção apenas da mistura com relação a/agl 0,65 e período de cura de 7 dias. A diminuição da retração total entre 10E e 10SA foi de 21% para relação a/agl 0,50 aos 3 dias de cura.

### 5.3.3 Comparação entre os diferentes teores de substituição

#### 5.3.3.1 Cinza de casca de arroz clara

Os resultados com cinza de casca de arroz clara mostram que o aumento do teor de substituição resultou no aumento da retração total para todas as relações a/agl e ambos os períodos de cura, aos 182 dias.

Comparando a mistura 5C com REF, as reduções nos valores de retração total foram de 26% para as relações a/agl 0,35 e 0,65 e 40% para 0,50 para cura de 3 dias e de 39%, 36% e 21% para as relações 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente, para cura de 7 dias.

A mistura 10C, 3 dias de cura, apresentou reduções na retração de 25%, 31% e 20%, respectivamente, para as relações a/agl de 0,35, 0,50 e 0,65, quando comparada com a mistura de referência. Quando o período de cura foi maior (7 dias), as reduções foram de 35%, 28% e 20% para as referidas relações a/agl. Ao comparar a mistura 20C, 3 dias de cura, com REF, os valores de redução foram de 23%, 22% e 18%, respectivamente, para as relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65. Para a mesma mistura com 7 dias de cura, as reduções foram de 22% e 19%, respectivamente, para as relações 0,35 e 0,50.

Comparando a mistura 30C com REF, a primeira apresentou redução de 19% para mistura curada por 3 dias para relação a/agl 0,50 e 18% para curada por 7 dias.

#### 5.3.3.2 Cinza de casca de arroz escura

As misturas com cinza de casca de arroz escura apresentaram comportamento semelhante às com cinza de casca de arroz clara, ou seja, conforme o aumento do teor de substituição (5, 10, 20 e 30%) houve também um aumento da retração total para todas as relações a/agl e ambos os períodos de cura, exceto para mistura 20E aos 3 dias de cura, que apresentou valores de retração menores que 10E.

Confrontando a mistura 5E com a mistura de referência, observa-se redução na retração de 24%, 38% e 22% para 3 dias de cura e 37%, 34% e 18% para 7 dias de cura, respectivamente, para as relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65.

Comparando a mistura 10E com REF, notam-se reduções na retração para relação a/agl 0,50 (18%) para 3 dias de cura e para as relações 0,35 (27%) e 0,50 (24%) para 7 dias de cura. A mistura 20E apresentou diminuição na retração de 19% e 22%, respectivamente, para as relações a/agl 0,35 e 0,50, para 3 dias de cura e 19% para relação a/agl 0,35 para 7 dias de cura, quando comparadas à mistura de referência. Já a mistura 30E não apresentou reduções maiores que 17% na retração quando comparada à REF.

#### 5.3.3.3 Sílica Ativa

A mistura 5SA apresentou comportamento similar às misturas com 5% de cinza de casca de arroz clara e escura, ou seja, houve diminuição nos valores de retração quando comparada à mistura de referência nas três relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65, sendo 28%, 41% e 23% para 3 dias de cura e 39%, 37% e 17% para 7 dias de cura.

A mistura com 10% de sílica ativa (10SA) apresentou reduções nos valores de retração para as relações a/agl 0,35 e 0,50. Os percentuais de redução obtidos foram 23% e 35% para 3 dias de cura e 33% e 31% para 7 dias de cura, nas respectivas relações a/agl.

#### 5.3.4 Discussão dos resultados

A maioria dos trabalhos publicados sobre retração de concretos com cinza de casca de arroz e sílica ativa referem-se a uma única relação a/agl e consumo de aglomerante. São escassos os trabalhos que apresentam resultados com diferentes relações a/agl e consumo de aglomerante.

Para melhor compreensão dos resultados, faz-se necessário enfatizar que as diferentes relações a/agl possuem diferentes teores de material aglomerante, isto é, quanto menor a relação a/agl maior o consumo de material aglomerante, possibilitando uma mesma consistência para todas as misturas, tendo sido fixado o abatimento de  $100 \pm 10$  mm. Dessa forma, justificam-se alguns casos nos quais não foi constatada diferença expressiva de retração entre as diferentes relações a/agl em uma mesma mistura. Sivasundaram e Malhotra (1992) observaram que os menores valores de retração foram para concretos com a maior relação a/agl investigada, justificando o comportamento pelos baixos teores de material aglomerante nesses concretos. De acordo com Young (1988 apud COLLINS E SANJAYAN, 2000), a retração, em condições usuais, depende da perda de água dos mesoporos (raios dos poros entre as dimensões de 1 nm e 25 nm), de modo que nem sempre o concreto que apresenta maior quantidade de água evaporável é o que retrai mais. Kalintzis e Kuperman (2001) investigaram a retração hidráulica concretos com 6% de sílica ativa em substituição ao cimento e com relações a/agl de 0,29; 0,37; 0,52 e 0,76. Dos resultados obtidos, observaram que os valores de retração são muito próximos, para todas as relações a/agl estudadas, especialmente até os 40 dias sob secagem. Segundo os autores não foi possível estabelecer uma relação entre a retração e a relação a/agl. Os ensaios confirmaram que em concretos com mesma consistência, a quantidade de água por  $m^3$  de concreto é determinante na retração hidráulica independente da relação a/agl.

A retração verificada nos concretos curados durante o maior período avaliado (7 dias) pode ser justificada pelo maior refinamento da estrutura da pasta hidratada, em que se desenvolve maior quantidade de mesoporos, de modo que parte da água que ainda não reagiu quimicamente, presente nesses poros, tende a aumentar a tensão capilar ao abandoná-los em função da exposição ao ar, ocasionando retração do elemento e confirmando, assim, de acordo com o evidenciado por Wittmann (1982 apud COLLINS E SANJAYAN, 2000) e Young (1988 apud COLLINS E SANJAYAN, 2000), a forte influência da distribuição dos tamanhos dos poros na retração hidráulica do concreto. Por outro lado, a retração verificada para a cura de menor duração (3 dias) é creditada à maior quantidade de água evaporável presente, uma vez que apresenta um menor grau de hidratação, com menos água combinada quimicamente. Segundo Neville (1997), o esvaziamento dos capilares

causa uma perda de água sem retração, porém, uma vez removida a água capilar, passa a ocorrer a remoção da água adsorvida.

Comparando as adições minerais entre si, notam-se comportamentos similares entre as três adições. Tal fato pode ser justificado pela proximidade das características físico-químicas das adições minerais como a superfície específica e porcentagem de  $\text{SiO}_2$ . O melhor desempenho das misturas com adição mineral na retração total, quando comparadas à mistura de referência, foi também evidenciado por Zhang e Malhotra (1996), Ding e Li (2002) e Meira (2009).

Em se tratando dos teores de substituição de adição mineral, observa-se, de maneira geral, um aumento de retração total com o aumento do teor, essa tendência também foi observada por Silva et al (2006). Os autores estudaram a influência da cinza de casca de arroz na retração hidráulica, adotando os teores de 5%, 10%, 20%, 30% e 50% de cinza de casca de arroz em substituição à massa do cimento. Verificaram que o aumento do teor de cinza de casca de arroz resultou em um aumento da retração hidráulica. De acordo com o resultado obtido, os autores concluíram que a adição de cinza de casca de arroz é viável no controle à retração hidráulica apenas nos teores de 5 e 10% de CCA.

Resultados semelhantes foram relatados por Malathy e Subramanian (2007) que em misturas compostas com 5, 10 e 15% de sílica ativa e relação  $a/agl$  0,50 constataram aumento na retração hidráulica (aos 28 dias) com o aumento do teor de substituição justificaram à maior reação pozolânica da sílica ativa, resultando em um maior refinamento dos poros. Contudo a influência da sílica ativa na retração hidráulica em idades posteriores (365 dias) não foi significativa.

A diminuição da retração total com o uso de adição mineral foi também evidenciada por Meira (2009), que, ao estudar a substituição de cinza de casca de arroz moída nos teores de 15% e 25% em substituição à massa do cimento, observou uma diminuição da retração nos concretos com adição mineral, quando comparados à mistura de referência, aos 300 dias de idade. Segundo a autora, esse fato se deve ao aumento no volume dos poros de gel e diminuição no volume de poros capilares, aumentando o refinamento e contribuindo para uma menor permeabilidade. Observou também que, para maiores teores de adição, a retração foi maior (isso devido ao maior volume de pasta na mistura).

Entretanto resultados contrários foram verificados por Güneiyisi et al (2012). Os autores investigaram a retração hidráulica de concretos compostos com 5 e 10%

de sílica ativa e relação a/agl = 0,35. Conservaram os concretos no molde por 24 hs e após foram mantidos ao ar. Os ensaios foram realizados por um período de 42 dias e foi constatado em todas as idades de ensaio menor retração hidráulica com o aumento no teor de substituição. As misturas compostas com 5% e 10% apresentaram em relação ao concreto de referência na idade de 42 dias redução da retração hidráulica de 29% e 35% respectivamente.

#### 5.4 Análise dos resultados de penetração de íons cloreto por imersão

A Tabela 5.4 apresenta os valores de coeficiente obtidos a partir dos gráficos de cada mistura investigada.

**Tabela 5.4 - Coeficiente de penetração k das misturas investigadas em cada período de cura.**

| Mistura | a/agl | k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ ) |        |
|---------|-------|---------------------------------|--------|
|         |       | Cura                            |        |
|         |       | 3 dias                          | 7 dias |
| REF     | 0,35  | 2,71                            | 2,57   |
|         | 0,50  | 3,20                            | 3,19   |
|         | 0,65  | 3,60                            | 3,29   |
| 5C      | 0,35  | 2,05                            | 1,90   |
|         | 0,50  | 2,38                            | 2,20   |
|         | 0,65  | 2,80                            | 2,76   |
| 10C     | 0,35  | 2,12                            | 2,10   |
|         | 0,50  | 2,91                            | 2,75   |
|         | 0,65  | 3,24                            | 2,99   |
| 20C     | 0,35  | 2,28                            | 2,26   |
|         | 0,50  | 2,97                            | 2,95   |
|         | 0,65  | 3,34                            | 3,19   |
| 30C     | 0,35  | 2,45                            | 2,31   |
|         | 0,50  | 3,05                            | 3,00   |
|         | 0,65  | 3,59                            | 3,33   |
| 5E      | 0,35  | 2,17                            | 2,03   |
|         | 0,50  | 2,41                            | 2,21   |
|         | 0,65  | 3,15                            | 3,02   |
| 10E     | 0,35  | 2,31                            | 2,20   |
|         | 0,50  | 3,08                            | 2,90   |
|         | 0,65  | 3,42                            | 3,21   |
| 20E     | 0,35  | 2,33                            | 2,30   |
|         | 0,50  | 3,14                            | 3,17   |
|         | 0,65  | 3,36                            | 3,28   |
| 30E     | 0,35  | 2,47                            | 2,32   |
|         | 0,50  | 3,19                            | 3,18   |
|         | 0,65  | 3,64                            | 3,44   |
| 5SA     | 0,35  | 2,03                            | 2,00   |
|         | 0,50  | 2,08                            | 2,05   |
|         | 0,65  | 3,05                            | 3,04   |
| 10SA    | 0,35  | 2,18                            | 2,12   |
|         | 0,50  | 2,44                            | 2,23   |
|         | 0,65  | 3,40                            | 3,27   |

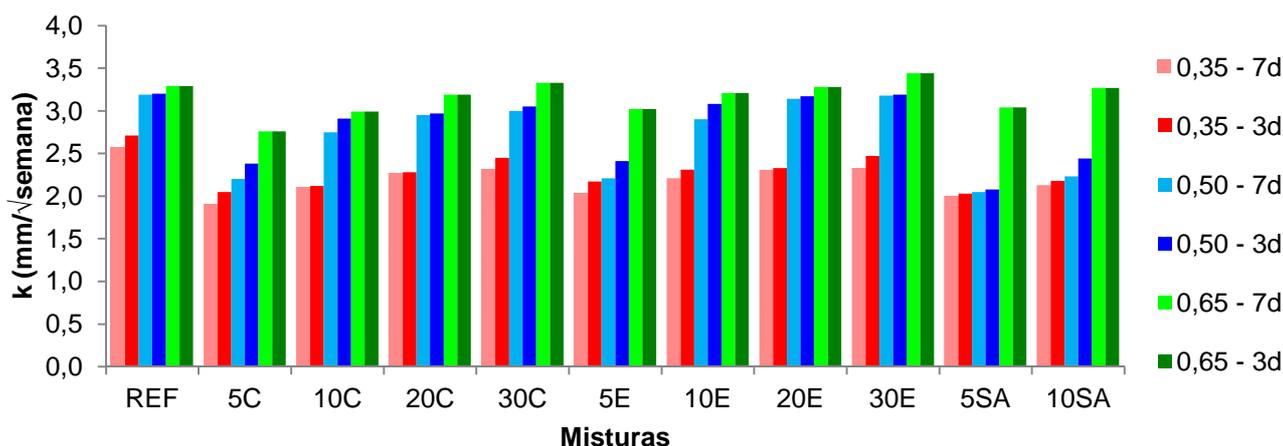
Observa-se, na Tabela 5.4, que o maior valor para o coeficiente de penetração  $k$  foi para mistura 30E e relação a/agl 0,65 com 3 dias de cura e o menor valor para mistura 5C e relação a/agl 0,35 com 7 dias de cura (diferença de 1,9 vezes entre o maior e menor valor).

O aumento do período de cura úmida de 3 para 7 dias ocasionou em reduções nos coeficientes em todas as misturas investigadas. A maior parte das misturas não apresentou reduções maiores do que 6% nas relações a/agl investigadas, com exceção da mistura REF, que apresentou uma redução de 9% para relação a/agl 0,65; da mistura 5C, que apresentou uma redução de 7% e 8% respectivamente para as relações a/agl 0,35 e 0,50; a mistura 10C apresentou para relação a/agl 0,65 uma redução de 8%; a mistura 30C apresentou uma redução de 7% para relação a/agl 0,65; a mistura 5E apresentou redução de 8% para relação a/agl 0,50 e a mistura 5SA que apresentou redução de 9% para relação a/agl de 0,50, quando o aumento do período de cura úmida aumentou de 3 para 7 dias.

Comparando as adições minerais entre si, observa-se que não houve um comportamento único para nenhuma das três adições nos diferentes teores de substituição e relações a/agl. As misturas com cinza de casca de arroz clara apresentaram, de maneira geral, os menores valores de coeficiente  $k$  para as relações a/agl investigadas. Porém, quando comparadas as misturas com cinza de casca de arroz escura e com sílica ativa (5% e 10%), as misturas com sílica ativa apresentaram os menores valores para  $k$  para a maioria das relações a/agl.

A partir da análise dos dados da Tabela 5.4, nota-se que a relação a/agl influencia o valor do coeficiente de penetração, isto é, na resistência à penetração de íons cloreto no concreto. Ngala et al (1995) afirmam que a relação a/agl na mistura é o principal parâmetro que influencia a penetração de íons cloreto no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar que se obtém nas baixas relações a/agl. Nesses concretos, os íons cloreto propagam-se por caminhos mais tortuosos e desconexos, o que dificulta o seu ingresso para o interior do concreto.

A Figura 5.5 ilustra a influência do coeficiente de penetração dos íons cloreto de acordo com a relação a/agl das misturas investigadas.



**Figura 5.5 - Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação a/agl e período de cura.**

Para todas as misturas investigadas, o aumento da relação a/agl ocasionou o aumento do coeficiente de penetração independentemente do período de cura. Para os concretos com 3 dias de cura úmida, o aumento da relação a/agl de 0,35 para 0,50 ocasionou no aumento do coeficiente k em 27% para mistura 10C, 26% para mistura 20E e 25% para mistura 10E. Quando a relação a/agl passou de 0,50 para 0,65, as misturas 5SA e 10SA tiveram um aumento do coeficiente k de 32% e 28% respectivamente, e a mistura 5E apresentou um aumento de 23%.

Nas misturas curadas por 7 dias, o aumento do coeficiente k chegou a 27% para as misturas 20E e 30E e de 24% para as misturas 10C e 10E quando são comparados os dados das relações 0,35 e 0,50. Já as misturas 5SA, 10SA e 5E foram as que apresentaram maiores acréscimos no coeficiente k, quando comparados os dados das relações 0,50 e 0,65, sendo 33%, 32% e 27% respectivamente.

Verifica-se que o coeficiente de penetração nas misturas investigadas é tanto maior quanto maior for a quantidade de água na mistura. Isto pode ser atribuído, segundo Silva e Vieira (2001), à maior porosidade e à formação de redes interconectadas de poros capilares em concretos com elevadas relações a/agl.

Hoffmann (2001) avaliou concretos com 0%, 10%, 15% e 20% de sílica ativa e relações a/agl de 0,28, 0,35, 0,45, 0,60 e 0,75 quanto à resistência à penetração de íons cloreto no método de penetração acelerada de cloretos. Os resultados indicaram que a penetração de íons cloreto diminuiu em até 70% com o decréscimo

da relação a/agl de 0,75 para 0,28 e em até 60% com o aumento do teor de sílica ativa.

Sacilotto (2008) estudou concretos com cinza de casca de arroz nos teores de 10%, 20% e 30% e relações de 0,35, 0,50 e 0,65 frente à resistência à penetração de íons cloreto. Os resultados indicaram que a penetração de cloretos diminuiu com a redução da relação a/agl e com o prolongamento do período de cura.

A Tabela 5.5 apresenta os índices de penetração de íons cloreto em relação ao concreto de referência nos períodos de cura avaliados.

**Tabela 5.5 - Índices de penetração de íons cloreto das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 3 e 7 dias.**

| Mistura | a/agl | Índice de penetração (%) |        |
|---------|-------|--------------------------|--------|
|         |       | Cura                     |        |
|         |       | 3 dias                   | 7 dias |
| REF     | 0,35  | 100                      | 100    |
|         | 0,50  | 100                      | 100    |
|         | 0,65  | 100                      | 100    |
| 5C      | 0,35  | 76                       | 74     |
|         | 0,50  | 74                       | 69     |
|         | 0,65  | 78                       | 84     |
| 10C     | 0,35  | 78                       | 82     |
|         | 0,50  | 91                       | 86     |
|         | 0,65  | 90                       | 91     |
| 20C     | 0,35  | 84                       | 88     |
|         | 0,50  | 93                       | 92     |
|         | 0,65  | 93                       | 97     |
| 30C     | 0,35  | 90                       | 90     |
|         | 0,50  | 95                       | 94     |
|         | 0,65  | 100                      | 101    |
| 5E      | 0,35  | 80                       | 79     |
|         | 0,50  | 75                       | 69     |
|         | 0,65  | 88                       | 92     |
| 10E     | 0,35  | 85                       | 86     |
|         | 0,50  | 96                       | 91     |
|         | 0,65  | 95                       | 98     |
| 20E     | 0,35  | 86                       | 89     |
|         | 0,50  | 99                       | 98     |
|         | 0,65  | 93                       | 100    |
| 30E     | 0,35  | 91                       | 90     |
|         | 0,50  | 100                      | 100    |
|         | 0,65  | 101                      | 105    |
| 5SA     | 0,35  | 75                       | 78     |
|         | 0,50  | 65                       | 64     |
|         | 0,65  | 85                       | 92     |
| 10SA    | 0,35  | 80                       | 82     |
|         | 0,50  | 76                       | 70     |
|         | 0,65  | 94                       | 99     |

Comparando as misturas com adição mineral com a mistura de referência, observa-se que o maior acréscimo foi para mistura 30E com relação a/agl 0,65 e 7 dias de cura. Já a mistura que teve o maior redução em relação à mistura de referência foi a 5SA com relação a/agl 0,50 e 7 dias de cura. As misturas não tiveram um comportamento uniforme quanto a acréscimos ou reduções dos índices de penetração de íons cloreto em relação à mistura de referência. As misturas que apresentaram índices menores que REF em todas as relações a/agl e em ambos os períodos de cura foram 5C, 10C, 20C, 5E, 10E, 5SA e 10SA.

Wee et al (2000) afirmam que a penetração de cloretos, através do concreto, depende da microestrutura e das alterações ocorridas nela, como a fixação dos íons cloretos pelas fases aluminatos e ferro-aluminatos do cimento. Assim, a substituição do cimento por adições com baixos teores de alumina, como, por exemplo, a cinza de casca de arroz, reduz a capacidade de combinação dos íons cloretos com os aluminatos presentes na mistura, podendo resultar misturas com maior coeficiente de penetração. Porém, a substituição do cimento por adições minerais ocasiona o refinamento da estrutura de poros do concreto, reduzindo a permeabilidade e, conseqüentemente, a penetração de íons cloreto (MEHTA E AÏTCIN, 1990). Deste modo, o comportamento frente à penetração de íons cloreto de um determinado concreto é influenciado, entre outros fatores, pela quantidade de aluminatos do aglomerante e pelas alterações na sua microestrutura, sendo sua capacidade final de resistir à penetração desses íons uma combinação dos fatores.

Diante disso, as misturas com adição de cinza de casca de arroz apresentaram um coeficiente de penetração  $k$  inferior ao concreto de referência para a maioria das relações a/agl, exceto para mistura 30C nos dois períodos de cura (a/agl = 0,65), 20E com 7 dias de cura (a/agl = 0,65) e a mistura 30E nos dois períodos de cura e relações a/agl = 0,50 e 0,65, informando que a maioria das misturas são mais resistentes à penetração de íons cloreto que o concreto sem adição mineral.

Observa-se, no entanto, que o desempenho das misturas com cinza de casca de arroz, em relação ao concreto de referência, depende da relação a/agl e do teor de substituição. Missau (2005) estudou a porosidade de pastas para os mesmos teores de substituição de cinza de casca de arroz e relações a/agl e verificou que a substituição do cimento pela adição promoveu um refinamento da estrutura de poros

da pasta, que foi mais acentuado na medida em que se aumentou o teor de substituição.

Nas misturas em que a substituição parcial do cimento foi por sílica ativa, o coeficiente de penetração  $k$  foi menor nas três relações  $a/agl$  e nos dois períodos de cura quando comparados ao concreto de referência, indicando o benefício desta adição mineral no fenômeno de penetração de íons cloreto. O refinamento das redes de poros proporcionado pelas reações pozolânicas da sílica ativa, devido a maior área específica e maior teor de dióxido de silício, pode ser a causa do bom desempenho dessas misturas.

## 5.5 Análise econômica

A análise proposta tem por objetivo verificar a viabilidade econômica das misturas estudadas. Para isso, foram confrontados os custos de produção dos concretos com adição de cinza de casca de arroz clara, escura e sílica ativa, considerando seu desempenho frente à resistência à compressão. Inicialmente, foi feita uma abordagem em igualdade de relação a/agl e, na sequência, em igualdade de resistência à compressão.

A análise de custos foi realizada através de cálculos de custo dos materiais por m<sup>3</sup> de concreto, considerando os preços dos materiais vigentes no segundo semestre de 2011 (Tabela 5.6). O custo por m<sup>3</sup> de cada mistura é apresentado na Tabela 5.7. Cabe ressaltar que, ao contrário de outras pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica, os concretos do presente trabalho foram produzidos com aditivo plastificante, lançando-se mão de aditivo superplastificante nas misturas com menor relação a/g e/ou maior teor de substituição de cimento por CCA. Da mesma forma, os concretos foram curados por 3 e 7 dias, por serem esses os prazos de cura na maioria das vezes empregadas em obra.

**Tabela 5.6 - Custo dos materiais em reais utilizados para cálculo do custo das misturas.**

| <b>Material</b>    | <b>Custo R\$</b>     |
|--------------------|----------------------|
| Cimento            | 21,00 saco com 40Kg  |
| Cinza C            | 750,00 tonelada      |
| Cinza E            | 580,00 tonelada      |
| Sílica Ativa       | 1,80 Kg              |
| Areia              | 35,00 m <sup>3</sup> |
| Brita              | 50,00 m <sup>3</sup> |
| Plastificante      | 2,50 kg              |
| Superplastificante | 12,00 kg             |

**Tabela 5.7 - Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto correspondente a cada mistura aglomerante.**

| Mistura | Relação a/agl | Materiais em Kg/m <sup>3</sup> |     |      |      |    |       |       |      |                |                 | Custo (R\$) |
|---------|---------------|--------------------------------|-----|------|------|----|-------|-------|------|----------------|-----------------|-------------|
|         |               | Agil                           | Cim | CCAC | CCAE | SA | Areia | Brita | Água | Aditivo plast. | Aditivo superp. |             |
| REF     | 0,35          | 487                            | 487 | -    | -    | -  | 633   | 1076  | 170  | 2,44           | -               | 312,44      |
|         | 0,50          | 359                            | 359 | -    | -    | -  | 739   | 1055  | 180  | -              | -               | 240,34      |
|         | 0,65          | 284                            | 284 | -    | -    | -  | 802   | 1043  | 185  | -              | -               | 201,69      |
| 5C      | 0,35          | 487                            | 463 | 24   | -    | -  | 618   | 1076  | 170  | 3,16           | -               | 319,36      |
|         | 0,50          | 359                            | 341 | 18   | -    | -  | 732   | 1055  | 180  | -              | -               | 244,26      |
|         | 0,65          | 284                            | 270 | 14   | -    | -  | 798   | 1043  | 185  | -              | -               | 204,77      |
| 10C     | 0,35          | 487                            | 438 | 49   | -    | -  | 610   | 1076  | 170  | 4,87           | 1,95            | 352,51      |
|         | 0,50          | 359                            | 323 | 36   | -    | -  | 725   | 1055  | 180  | 1,08           | -               | 250,88      |
|         | 0,65          | 284                            | 256 | 28   | -    | -  | 789   | 1043  | 185  | 0,29           | -               | 208,48      |
| 20C     | 0,35          | 487                            | 389 | 98   | -    | -  | 591   | 1076  | 170  | 4,87           | 3,90            | 386,58      |
|         | 0,50          | 359                            | 287 | 72   | -    | -  | 711   | 1055  | 180  | 2,51           | -               | 262,29      |
|         | 0,65          | 284                            | 227 | 57   | -    | -  | 778   | 1043  | 185  | 1,00           | -               | 216,57      |
| 30C     | 0,35          | 487                            | 340 | 147  | -    | -  | 574   | 1076  | 170  | 4,87           | 7,30            | 438,10      |
|         | 0,50          | 359                            | 251 | 108  | -    | -  | 697   | 1055  | 180  | 3,59           | 1,44            | 290,12      |
|         | 0,65          | 284                            | 199 | 85   | -    | -  | 767   | 1043  | 185  | 1,99           | -               | 225,15      |
| 5E      | 0,35          | 487                            | 463 | -    | 24   | -  | 618   | 1076  | 170  | 3,04           | -               | 314,98      |
|         | 0,50          | 359                            | 341 | -    | 18   | -  | 732   | 1055  | 180  | -              | -               | 241,20      |
|         | 0,65          | 284                            | 270 | -    | 14   | -  | 798   | 1043  | 185  | -              | -               | 202,39      |
| 10E     | 0,35          | 487                            | 438 | -    | 49   | -  | 610   | 1076  | 170  | 4,87           | 2,19            | 347,06      |
|         | 0,50          | 359                            | 323 | -    | 36   | -  | 725   | 1055  | 180  | 1,26           | -               | 245,21      |
|         | 0,65          | 284                            | 256 | -    | 28   | -  | 789   | 1043  | 185  | 0,43           | -               | 204,07      |
| 20E     | 0,35          | 487                            | 389 | -    | 98   | -  | 591   | 1076  | 170  | 4,87           | 4,14            | 372,80      |
|         | 0,50          | 359                            | 287 | -    | 72   | -  | 711   | 1055  | 180  | 2,87           | -               | 250,95      |
|         | 0,65          | 284                            | 227 | -    | 57   | -  | 778   | 1043  | 185  | 1,14           | -               | 207,23      |
| 30E     | 0,35          | 487                            | 340 | -    | 147  | -  | 574   | 1076  | 170  | 4,87           | 7,55            | 416,11      |
|         | 0,50          | 359                            | 251 | -    | 108  | -  | 697   | 1055  | 180  | 3,59           | 1,61            | 273,80      |
|         | 0,65          | 284                            | 199 | -    | 85   | -  | 767   | 1043  | 185  | 2,13           | -               | 211,05      |
| 5SA     | 0,35          | 487                            | 463 | -    | -    | 24 | 618   | 1076  | 170  | 2,92           | -               | 343,96      |
|         | 0,50          | 359                            | 341 | -    | -    | 18 | 732   | 1055  | 180  | -              | -               | 263,16      |
|         | 0,65          | 284                            | 270 | -    | -    | 14 | 798   | 1043  | 185  | -              | -               | 219,47      |
| 10SA    | 0,35          | 487                            | 438 | -    | -    | 49 | 610   | 1076  | 170  | 4,87           | 1,70            | 400,96      |
|         | 0,50          | 359                            | 323 | -    | -    | 36 | 725   | 1055  | 180  | 0,90           | -               | 288,23      |
|         | 0,65          | 284                            | 256 | -    | -    | 28 | 789   | 1043  | 185  | -              | -               | 237,15      |

A Tabela 5.7 permite constatar que, em igualdade de relação a/agl, as misturas REF apresentam custos inferiores às demais misturas com CCA e SA. As misturas compostas com CCA apresentam custos crescentes com o aumento no teor de substituição. Entretanto, esta é apenas uma análise generalizada e não engloba os resultados de resistência mecânica e de durabilidade.

A avaliação do custo/m<sup>3</sup> do concreto em igualdade de resistência à compressão foi realizado por ser esse o parâmetro tomado como referência no dimensionamento das estruturas. Assim, as análises foram realizadas para os níveis de resistência à compressão de 40MPa e 50MPa aos 28 dias<sup>1</sup>.

A Tabela 5.8 apresenta os coeficientes das equações  $F_c = A/B^{a/agl}$ , obtidos das correlações entre os valores de resistência à compressão na idade de 28 dias e suas respectivas relações a/agl, assim como os coeficientes de determinação, R<sup>2</sup>.

**Tabela 5.8 - Coeficientes A, B e R<sup>2</sup> das equações do tipo  $F_c = A/B^{a/agl}$  das misturas investigadas aos 28 dias.**

(continua)

| Cura | Mistura | a/agl | MPa   | A          | B         | R <sup>2</sup> |
|------|---------|-------|-------|------------|-----------|----------------|
| 3d   | REF     | 0,35  | 54,00 | 109,381243 | 7,943024  | 0,98           |
|      |         | 0,50  | 37,33 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 33,50 |            |           |                |
| 7d   | REF     | 0,35  | 58,00 | 107,602027 | 6,389318  | 0,97           |
|      |         | 0,50  | 40,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 37,00 |            |           |                |
| 3d   | 5C      | 0,35  | 56,00 | 101,252421 | 5,408135  | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 43,67 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 33,75 |            |           |                |
| 7d   | 5C      | 0,35  | 60,25 | 110,728433 | 5,565641  | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 47,67 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 36,00 |            |           |                |
| 3d   | 10C     | 0,35  | 59,33 | 135,676003 | 10,870625 | 0,99           |
|      |         | 0,50  | 40,50 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 29,00 |            |           |                |
| 7d   | 10C     | 0,35  | 65,00 | 125,075524 | 7,390960  | 0,95           |
|      |         | 0,50  | 42,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 35,67 |            |           |                |
| 3d   | 20C     | 0,35  | 61,00 | 137,274347 | 10,650302 | 0,98           |
|      |         | 0,50  | 40,67 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 30,00 |            |           |                |
| 7d   | 20C     | 0,35  | 72,00 | 178,767201 | 14,925941 | 0,97           |
|      |         | 0,50  | 43,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 32,00 |            |           |                |

<sup>1</sup> Os níveis de resistência à compressão, na idade de 28 dias,  $f_{cj} = 40,0$  MPa e  $50,0$  MPa, foram determinados a partir da definição do  $f_{ck} = 35,0$  MPa e  $45,0$  MPa respectivamente, através da equação  $f_{cj} = f_{ck} + 1,65sd$  (desvio padrão) considerando um  $sd = 3,5$  MPa.

(conclusão)

| Cura | Mistura | a/agl | MPa   | A          | B         | R <sup>2</sup> |
|------|---------|-------|-------|------------|-----------|----------------|
| 3d   | 30C     | 0,35  | 65,67 | 159,815069 | 12,209121 | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 47,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 31,00 |            |           |                |
| 7d   | 30C     | 0,35  | 72,67 | 193,188668 | 15,935181 | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 49,25 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 31,67 |            |           |                |
| 3d   | 5E      | 0,35  | 52,33 | 91,334273  | 4,650032  | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 44,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 33,00 |            |           |                |
| 7d   | 5E      | 0,35  | 61,00 | 117,651703 | 6,575367  | 0,99           |
|      |         | 0,50  | 45,67 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 34,67 |            |           |                |
| 3d   | 10E     | 0,35  | 59,00 | 135,953083 | 11,085307 | 0,99           |
|      |         | 0,50  | 40,25 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 28,67 |            |           |                |
| 7d   | 10E     | 0,35  | 63,67 | 121,551768 | 7,122581  | 0,96           |
|      |         | 0,50  | 42,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 35,33 |            |           |                |
| 3d   | 20E     | 0,35  | 59,50 | 136,734825 | 10,974799 | 0,99           |
|      |         | 0,50  | 40,75 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 29,00 |            |           |                |
| 7d   | 20E     | 0,35  | 65,67 | 148,334308 | 10,983063 | 0,98           |
|      |         | 0,50  | 42,67 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 32,00 |            |           |                |
| 3d   | 30E     | 0,35  | 64,00 | 152,434675 | 12,498630 | 0,98           |
|      |         | 0,50  | 41,75 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 30,00 |            |           |                |
| 7d   | 30E     | 0,35  | 69,50 | 180,573129 | 14,748359 | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 48,25 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 31,00 |            |           |                |
| 3d   | 5SA     | 0,35  | 54,00 | 84,254923  | 3,606794  | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 44,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 36,75 |            |           |                |
| 7d   | 5SA     | 0,35  | 59,75 | 102,948738 | 4,520443  | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 50,00 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 38,00 |            |           |                |
| 3d   | 10SA    | 0,35  | 53,50 | 79,490405  | 3,197344  | 0,99           |
|      |         | 0,50  | 43,50 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 37,75 |            |           |                |
| 7d   | 10SA    | 0,35  | 55,50 | 83,359598  | 3,106845  | 1,00           |
|      |         | 0,50  | 48,25 |            |           |                |
|      |         | 0,65  | 39,50 |            |           |                |

A Tabela 5.9 apresenta os coeficientes das equações  $\text{Custo} = C/D^{a/agl}$ , obtidos das correlações entre os valores do custo/m<sup>3</sup> das misturas investigadas e suas respectivas relações a/agl, assim como os coeficientes de determinação, R<sup>2</sup>.

Tabela 5.9 - Coeficientes C, D e R<sup>2</sup> das equações do tipo  $\text{Custo} = C/D^{a/agl}$  das misturas investigadas.

| Mistura | a/agl | Custo  | C      | D    | R <sup>2</sup> |
|---------|-------|--------|--------|------|----------------|
| REF     | 0,35  | 312,44 | 513,13 | 4,30 | 0,99           |
|         | 0,50  | 240,34 |        |      |                |
|         | 0,65  | 201,69 |        |      |                |
| 5C      | 0,35  | 319,36 | 528,23 | 4,40 | 0,98           |
|         | 0,50  | 244,26 |        |      |                |
|         | 0,65  | 204,77 |        |      |                |
| 10C     | 0,35  | 352,51 | 633,99 | 5,76 | 0,97           |
|         | 0,50  | 250,88 |        |      |                |
|         | 0,65  | 208,48 |        |      |                |
| 20C     | 0,35  | 386,58 | 735,54 | 6,90 | 0,97           |
|         | 0,50  | 262,29 |        |      |                |
|         | 0,65  | 216,57 |        |      |                |
| 30C     | 0,35  | 438,10 | 927,63 | 9,20 | 0,98           |
|         | 0,50  | 290,12 |        |      |                |
|         | 0,65  | 225,15 |        |      |                |
| 5E      | 0,35  | 314,98 | 519,72 | 4,37 | 0,98           |
|         | 0,50  | 241,20 |        |      |                |
|         | 0,65  | 202,39 |        |      |                |
| 10E     | 0,35  | 347,06 | 627,50 | 5,87 | 0,97           |
|         | 0,50  | 245,21 |        |      |                |
|         | 0,65  | 204,07 |        |      |                |
| 20E     | 0,35  | 372,80 | 714,84 | 7,08 | 0,96           |
|         | 0,50  | 250,95 |        |      |                |
|         | 0,65  | 207,23 |        |      |                |
| 30E     | 0,35  | 416,11 | 894,77 | 9,61 | 0,98           |
|         | 0,50  | 273,80 |        |      |                |
|         | 0,65  | 211,05 |        |      |                |
| 5SA     | 0,35  | 343,96 | 572,69 | 4,47 | 0,99           |
|         | 0,50  | 263,16 |        |      |                |
|         | 0,65  | 219,47 |        |      |                |
| 10SA    | 0,35  | 400,96 | 723,47 | 5,76 | 0,98           |
|         | 0,50  | 288,23 |        |      |                |
|         | 0,65  | 237,15 |        |      |                |

Assim, a partir das Tabelas 5.8 e 5.9, foi possível construir a Tabela 5.10, que apresenta as relações a/agl, o consumo e o custo/m<sup>3</sup> das misturas investigadas para os níveis de resistência à compressão de 40MPa e 50MPa aos 28 dias de idade.

**Tabela 5.10 - Custo de cada mistura em igualdade de resistência à compressão - 40MPa e 50MPa e suas respectivas relações a/agl.**

| Cura | Mistura | 40MPa         |       |             | 50MPa         |       |             |
|------|---------|---------------|-------|-------------|---------------|-------|-------------|
|      |         | Relação a/agl | Cons. | Custo (R\$) | Relação a/agl | Cons. | Custo (R\$) |
| 3d   | REF     | 0,43          | 417   | 274,02      | 0,38          | 456   | 294,75      |
| 7d   |         | 0,47          | 388   | 258,48      | 0,41          | 432   | 282,13      |
| 3d   | 5C      | 0,55          | 336   | 233,86      | 0,42          | 424   | 283,53      |
| 7d   |         | 0,59          | 313   | 220,41      | 0,46          | 395   | 267,22      |
| 3d   | 10C     | 0,46          | 395   | 283,34      | 0,42          | 424   | 303,90      |
| 7d   |         | 0,51          | 361   | 259,60      | 0,46          | 395   | 283,34      |
| 3d   | 20C     | 0,47          | 388   | 296,74      | 0,43          | 417   | 320,57      |
| 7d   |         | 0,51          | 361   | 274,67      | 0,47          | 388   | 296,74      |
| 3d   | 30C     | 0,51          | 361   | 299,16      | 0,46          | 395   | 334,26      |
| 7d   |         | 0,53          | 348   | 286,17      | 0,49          | 374   | 312,74      |
| 3d   | 5E      | 0,54          | 342   | 234,42      | 0,39          | 448   | 292,45      |
| 7d   |         | 0,57          | 324   | 224,28      | 0,45          | 402   | 267,69      |
| 3d   | 10E     | 0,46          | 395   | 277,97      | 0,42          | 424   | 298,36      |
| 7d   |         | 0,51          | 361   | 254,42      | 0,45          | 402   | 282,93      |
| 3d   | 20E     | 0,46          | 395   | 290,52      | 0,42          | 424   | 314,18      |
| 7d   |         | 0,50          | 368   | 268,64      | 0,45          | 402   | 296,26      |
| 3d   | 30E     | 0,48          | 381   | 301,99      | 0,44          | 409   | 330,60      |
| 7d   |         | 0,52          | 355   | 275,86      | 0,48          | 381   | 301,99      |
| 3d   | 5SA     | 0,58          | 318   | 240,25      | 0,41          | 432   | 309,91      |
| 7d   |         | 0,63          | 291   | 222,92      | 0,48          | 381   | 279,07      |
| 3d   | 10SA    | 0,49          | 374   | 306,82      | 0,40          | 440   | 359,18      |
| 7d   |         | 0,54          | 342   | 281,11      | 0,45          | 402   | 329,08      |

Da análise da Tabela 5.10, constata-se que a mistura composta com 5% de CCA clara ou escura, prazo de cura de 3 e 7 dias, apresenta custo/m<sup>3</sup> menor do que a mistura de referência. Entretanto, para os demais teores de substituição, 10%, 20% e 30%, o custo/m<sup>3</sup> é superior ao concreto de referência, tanto maior quanto maior o teor de substituição.

Observa-se, também, que mesmo para nível de resistência à compressão de 40,0MPa (fck = 35,0MPa), ou seja, quase o dobro do mínimo exigido pela NBR 6118, as misturas compostas com 5% de CCA clara atingem esse valor adotando-se relação a/agl de 0,55 para prazo de cura de 3 dias ou 0,59 para prazo de cura de 7 dias. Para a CCA escura as relações a/agl são de 0,54 e 0,57 para as mesmas condições. A relação a/agl considerando os 3 dias de cura atende a exigência da NBR 6118 e 12655 para a classe de agressividade III (relação a/agl ≤ 0,55 e consumo de cimento por metro cúbico ≥ 320 kg).

Constata-se também da Tabela 5.10 que o aumento do prazo de cura resultou em diminuição no custo por metro cúbico do concreto. No geral, observa-se maior redução para o teor de substituição de 20%, para os três níveis de resistência à compressão analisados.

Para o nível de resistência à compressão de 40 MPa as misturas compostas com 10% de CCA, clara e escura, curada por 7 dias apresentam custo por metro cúbico em relação à mistura de referência curada por 3 dias de - 5,6 % (clara) e - 7,7% (escura). As misturas compostas com 20% de CCA clara quando curada por 7 dias apresentam custo semelhante a da mistura de referência curada por 3 dias e àquela com CCA escura um custo 2% inferior.

A redução do custo do metro cúbico em função do prolongamento do período de cura vai depender de vários fatores como o tipo de estrutura, o processo construtivo adotado (alvenaria estrutural por exemplo ao invés do estrutura de concreto convencional), o procedimento de cura a ser adotado (molhagem intermitente ou fazer uma contenção na laje e deixá-la alagada, cura química, sacos de aniagem etc. Assim como o atendimento de exigência de norma quanto a máxima relação a água/aglomerante a ser adotado tendo em vista os critérios de durabilidade.

## 6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo analisar o desempenho de concretos de cimento Portland (CPV-ARI) com substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico, comparando-os com concretos com sílica ativa e sem adição mineral sobre algumas propriedades ligadas à durabilidade do concreto. Os teores de cinza de casca de arroz investigados foram 5%, 10%, 20% e 30% e os de sílica ativa foram 5% e 10%, para todas as propriedades pesquisadas; as relações água/aglomerante foram 0,35, 0,50 e 0,65 e os concretos foram curados por dois prazos de cura úmida, 3 e 7 dias. Além da comparação entre as adições minerais, os teores de substituição, as relações água/aglomerante e prazos de cura úmida, foram analisados os custos de cada mistura investigada e viabilidade econômica do uso de adições.

O desempenho das diversas misturas foi verificado através da análise dos resultados de resistência à compressão axial (aos 28 e 91 dias), de retração total (aos 182 dias) e de penetração de cloretos após retração (aos 91 dias de imersão). Buscou-se, dessa maneira, alcançar os objetivos pré-estabelecidos a fim de melhor compreender os efeitos das adições minerais nas propriedades investigadas.

Foi constatado um acréscimo da resistência à compressão axial com o aumento do período de cura úmida, redução da relação a/agl e aumento da idade de ensaio. O maior valor de resistência foi para mistura 30C com relação a/agl 0,35 aos 28 dias e para mistura 20C com relação a/agl 0,35 aos 91 dias para ambos os períodos de cura. As misturas com CCA clara, aos 28 dias, apresentaram maiores valores de resistência à compressão do que àqueles obtidos com a CCA escura. O mesmo comportamento é observado na idade de 91 dias e prazo de cura de 3 e 7 dias. Contudo, quando se analisa em igualdade de teor de substituição, esse comportamento varia em função da relação a/agl, idade de ensaio e prazo de cura, não apresentando uma tendência geral.

Na análise econômica constatou-se que em igualdade de relação a/agl, as misturas REF apresentam custos inferiores as demais misturas com CCA e SA. As misturas compostas com CCA apresentam custos crescentes com o aumento no teor de substituição. Porém na avaliação do custo/m<sup>3</sup> do concreto em igualdade de resistência à compressão observou-se que a mistura composta com 5% de CCA

clara ou escura, prazo de cura de 3 e 7 dias, apresentam custo/m<sup>3</sup> menor do que a mistura de referência. Entretanto, para os demais teores de substituição, 10%, 20% e 30%, o custo/m<sup>3</sup> é superior ao concreto de referência, tanto maior quanto maior o teor de substituição.

O aumento do prazo de cura resultou em diminuição no custo por m<sup>3</sup> do concreto. Porém, a redução do custo do m<sup>3</sup> em função do prolongamento do período de cura está sujeito a vários fatores como o tipo de estrutura, o processo construtivo adotado, o procedimento de cura a ser adotado, assim como o atendimento de exigência de norma quanto a máxima relação a/agl a ser adotado, tendo em vista os critérios de durabilidade.

Na retração, concluiu-se que o uso da cinza de casca de arroz clara, da cinza de casca de arroz escura e da sílica ativa proporcionou um melhor desempenho dos concretos, quando comparados ao concreto sem adição mineral. Observaram-se comportamentos similares, para retração total, entre as três adições pesquisadas. Embora tenham sido observados valores de retração pouco maiores para a cura de 3 dias, não foi constatada variação pronunciada entre os prazos de cura úmida, exceto para as misturas 5C e 5E com relação a/agl 0,35. Estas, por sua vez, são influenciadas pelo grau de hidratação do material aglomerante. Constatou-se também que o aumento do teor de substituição ocasionou um aumento na retração, o que pode ser explicado pelo aumento do volume de pasta na mistura.

Com relação ao ensaio de penetração de íons cloreto por imersão, observou-se que o maior valor do coeficiente k foi para mistura 30E e relação a/agl 0,65 com 3 dias de cura e o menor valor para mistura 5C e relação a/agl 0,35 com 7 dias de cura, sendo 3,64mm/ $\sqrt{\text{semana}}$  e 1,90mm/ $\sqrt{\text{semana}}$ , respectivamente. O aumento do período de cura úmida de 3 para 7 dias ocasionou em reduções nos coeficientes em todas as misturas investigadas, porém, a maioria das misturas não apresentaram reduções maiores do que 6% nas relações a/agl investigadas. Ao comparar as adições minerais entre si, constatou-se que as misturas, com cinza de casca de arroz clara, apresentaram, de maneira geral, os menores valores de coeficiente k para as relações a/agl investigadas. Para todas as misturas investigadas, o aumento da relação a/agl ocasionou o aumento do coeficiente de penetração independentemente do período de cura. Concluiu-se que o coeficiente de penetração nas misturas investigadas é tanto maior quanto maior for a quantidade de água na mistura. Esse fato pode ser atribuído à maior porosidade e à formação

de redes interconectadas de poros capilares em concretos com elevadas relações a/agl.

As misturas não tiveram um comportamento uniforme quanto a acréscimos ou reduções dos índices de penetração de íons cloreto em relação à mistura de referência. Isso se explica devido à influência de fatores a que o concreto está submetido, dentre eles, a quantidade de aluminatos do aglomerante e alterações na sua microestrutura, sendo sua capacidade final de resistir à penetração de íons cloreto uma combinação dos fatores.

## **6.1 Sugestões para pesquisas futuras**

Como continuidade deste trabalho, objetivando analisar a viabilidade técnica do uso das cinzas de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico, sugere-se o estudo de outras propriedades relacionadas à durabilidade do concreto e mencionadas a seguir:

- Penetração de cloretos em idades iniciais
- Carbonatação
- Permeabilidade ao oxigênio
- Hidróxido de cálcio remanescente
- Composição da solução dos poros
- Calorimetria de condução
- Porosimetria de mercúrio

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.G. **Efeito da adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998, 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

AİTCIN, P.C., **High-Performance Concrete**, New-York. E & FN Spon, 1998.

AKKAYA, Yilmaz; OUYANG, Chengsheng; SHAH, Surendra P. Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 117-123, 2007.

ALVAREDO, A. M.; WITTMANN, F. H. **Shrinkage and cracking of normal and high performance concrete**. High Performance concrete: Properties and Design. Aedificatio Publishers, Freiburg, pp 91-110. 1995.

ALY, T.; SANJAYAN, J. G.; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. **Materials and Structures**, v. 41, n. 10, p. 1741-1753, jan. 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 209**: Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 109/C109M – 08**: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens), 2008.

\_\_\_\_\_. **ACI Committee 226**: Silica fume in concrete, 1987.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 157/C 157M – 06**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete, 2006.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 490 – 04**: Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete, 2004.

AMICK, James A. **Purification of Rice Hulls as a Source of Solar Grade Silicon for Solar Cells**. J. Electrochem Soc. v129. n4, p.864-866. 1982.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

ANDRADE, W. P. de, **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

ANJOS, R. D.; ISMAEL, M. R.; RAMAL JR., F. T., PANDOLFELLI, V. C. Adição de SA e a secagem de concretos refratários. **Cerâmica** v.50, p.331-335, 2004.

Anuário Brasileiro do Arroz, 2011 Disponível em: <<http://www.anuarios.com.br/upload/publicacaoCapitulo/pdfpt/pdf546.pdf>> Acessado em 18 de dezembro de 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. ABNT. Rio de Janeiro. 221 p. 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579**. Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991. Janeiro, 2004.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 13957**. Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733**. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 10**. Cimento Portland - Análise química – Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 11-1**. Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 1: Método ISO. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 12**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 13**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 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.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 15**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 16.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 17.** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 19.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 21.** Cimento Portland - Análise química - Método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido férrico, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23.** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248.** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003

\_\_\_\_\_. **NBR NM 26.** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 43.** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45.** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52.** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53.** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65.** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 76.** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

BAKKER, R. F. M. **Corrosion of Steel in Concrete.** Chapter 3: Initiation Period. RILEM Report of the Technical Committee 60-CSC, Editor Peter Schiessl. Chapman and Hall, London, 1988.

BATTAGIN, A. F; CURTI, R; SILVA, C. O; MUNHOZ, F. A. C. **Influência das Condições de Cura em Algumas Propriedades dos Concretos Convencionais e de Alto Desempenho.** 44<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo, IBRACON, 2002.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1655-1662, 1999.

CALÇADA, L. M. L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto**. Florianópolis, 2004, 214p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com SA e Metacaulins face à resistência mecânica e à viabilidade econômica**. Dissertação Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

CARVALHO; R. C; FILHO, J. R, F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2003** . São Paulo: Ed. UFSCar, 2007.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia: Ed. UFG, 1997.

CASSAL S. B., **Durabilidade de concretos com adição de cinza de casca de arroz frente ao ataque por ácidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

CCAA - Cement Concrete e Aggregates Australia. **Drying Shrinkage of Cement and Concrete**. Latest Data Sheet. julho 2002. Disponível em: <<http://www.concrete.net.au/publications/pdf/DryingShrinkage.pdf>>. Acessado em 14 de dezembro de 2010.

CHANDRASEKHAR, S., SATYANARAYANA, K. G., PRAMADA, P. N.RAGHAVAN, P., Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk – an overview, **Journal of Materials Science**, v. 38, pp. 3159 - 3168. 2003.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. **Construction and Build Materials**, v. 25, p. 3768-72, 2011.

CHINDAPRASIRT, P., RUKZON, S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. **Constructions and Building Materials**, 22, pp. 1601 - 1606. 2008.

COLLEPARDI, M.; BORSOI, A.; COLLEPARDI, S.; OLAGOT, J. J. O.; TROLI, R. Effects os shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n.6, p. 704-706, 2005.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p.1401-1406, 2000.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama Nº 005, de 05 de agosto de 1993**. Disponível em: <<http://www.areaseg.com/conama/1993/005-1993.pdf>> Acesso em 4 de agosto de 2010.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama Nº 023, de 12 de dezembro de 1996**. Disponível em: <[http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/legislacao/legislacaomeioambiente/docs\\_resol\\_polui\\_sonora/resolucao\\_23\\_1996.pdf](http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/legislacao/legislacaomeioambiente/docs_resol_polui_sonora/resolucao_23_1996.pdf)> Acesso em 4 de agosto de 2010.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO; R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 42, p. 983-92, 2009.

COUTINHO, J.S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**; 25:51-59, 2003.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca do arroz**. 2001. 191f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

DAFICO, D. A., PRUDÊNCIO, L. R. J. **Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca**. Foz de Iguaçu - PR. p.1671-1680. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído Artigo Técnico. 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssílica**. Tese de Doutorado.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 286 p, 1995.

DELLA, Viviana Possamai. **Síntese e caracterização do pigmento cerâmico de hematita, obtida a partir de carepa de aço, encapsulada em sílica amorfa obtida a partir de casca de arroz**. Tese Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2005.

DELLINGHAUSEN, L. M. **Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno**. Santa Maria, 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DETWILER, R. J.; MEHTA, P. K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete, **ACI Materials Journal** 86(1989) 609-614.

DING, J.; Li, Z. Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete. **ACI Materials Journal**. v. 99, nº 4. 2002.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2005. **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil**. Importância Econômica, Agrícola e Alimentar do Arroz Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap01.htm>> Acesso em 30 junho de 2010.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://www.fao.org/>> Acesso em 20 junho 2011.

FENG, Q.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M.; SUGITA, S. Efficiency of highly active Rice husk ash on the high-strength concrete. In: 11th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT (ICCC), 2003, Durban, South Africa. **Anais ... 2003**. 1 CD-ROM.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GRANGER, L.; TORRENTI, J. M.; ACKER, P. Thoughts about drying shrinkage: Scale effects and modelling. **Materials and Structures**, v. 30, n. 2, p. 96-105, 1997.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1989.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KARAOĞLU, K.; MERMEDAŞ, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction and Building Materials**, 34, p. 120-130, 2012.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; MERMEDAŞ, K. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. **Materials and Structures**, v. 41, n. 5, p. 937-949, 2008.

HABEEB, G. A.; FAYYADH, M. M. Rice husk ash concrete: the effect of RHA average particle size on mechanical properties and drying shrinkage. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, 3(3), pp. 1616-1622, 2009.

HAQUE, M. N. **Strength Development and Drying Shrinkage of High-strength Concretes**. *Cement and Concrete Composites*, v. 18, p. 333-342, 1996.

HE, Z.; LI, Z. J.; CHEN, M. Z.; LIANG, W. Q. Properties of shrinkage-reducing admixture-modified pastes. **Materials and Structures**, v. 39, n. 4, p. 445-453, 2006.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 271f. Tese Livre Docência em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1988.

HELENE, P., (2001). **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001**. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Ed. Pini, 1992. 349p.

HELENE. P; ANDRADE. T. **Concreto de cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). *Materiais de construção civil*. São Paulo: IBRACON, v 2, cap. 27, p. 905-944, 2007.

HOFFMANN, A.T. **Influência da adição de sílica ativa, relação a/ag, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001.

HOLT, E. E. Early ages autogenous shrinkage of concrete. **Technical Research Centre of Finland**, ESPOO, 2001.

HOLT, E. E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 521-530, jul. 2004.

HOUSTON, D. F. **Rice: Chemistry and Technology**. American Association of Cereal Chemistry, Minnessota, p. 301-352, 1972.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr\\_201109.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr_201109.pdf)> Acesso em 15 de outubro de 2011.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER - IARC. **Silica and some silicates, coal dust and para-aramid fibrils**. Lyon: WHO, v. 68, 506 p. ISBN: 92-832-1268-1. 1997

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units**, section 1, definitions and terminology, IUPAC Council, Editor D. H. Everett, Washington, 1971.

ISAIA, G. C. **Efeitos das Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: um estudo de Durabilidade com vistas à Corrosão da Armadura**. 1995, 280f. Tese Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

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

ISAIA, G.C.; VAGHETTI, M.A.; GASTALDINI, A.L.G. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Dosagem de concreto com casca de arroz para produtos pré-moldados**. XXIV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, II Simpósio do Grupo Latino-Americano da RILEM sobre Tecnologia dos Materiais e VIII Simpósio Panamericano de Estruturas. Porto Alegre, RS. p. 206-216. 1987.

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

KALINTZIS, C. A. A.; KUPERMAN, S. C. **Um sistema para planejamento operacional de obras de rodovias**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001.

KAPUR, P. C. Production of reactive bio-silica from the combustion of rice husk in a tube-in-basket (TIB) burner. **Powder Technology**, 44:p.63-67, 1985.

LAM, H. **Effects of Internal Curing Methods on Restrained Shrinkage and Permeability**. 134f. Thesis (Civil and Environmental Engineering). University of Toronto. 2005.

MALATHY, R.; SUBRAMANIAN, K. Drying shrinkage of cementitious composites with mineral admixtures. **Indian Journal of Engineering e Materials Sciences**, vol. 14, pp. 146-150. Abril, 2007.

MEDEIROS, M. H. F; HELENE, P. Durabilidade e proteção do concreto armado. **Revista Técnica**. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/151/artigo154416-1.asp>>. Acesso em 23 de setembro de 2010.

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

MEHTA, P. K; MALHOTRA, L V. M. **Pozzolanic and cementitious materials - advances in concrete technology**, vol.1, Gordon and Breach, Amsterdam, Holanda, 1996.

MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – Another look**. In: International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 1989.

MEHTA, P.K. **Rice husk ash: a unique supplementary cementing material**. In: MALHOTRA, V.M. (Ed.). **Advances in concrete technology**. Ottawa: Canmet, p.403-431. 1992.

MEHTA, P.K., AİTCIN, P.C. Principles underlying production of High-Performance Concrete. **Cement, Concrete e Aggregates**, Philadelphia: ASTM. v. 12, n. 2, p.70-78, 1990.

MEIRA, L. R. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem**. 2009. Tese Mestrado em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

MELO NETO, A. A.; CINCOTTO, M.A; REPETTE, W. L. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. **Cement and Concrete Research**, 2007.

MELO NETO, A. A.; **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 333f. Tese

(Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

MISSAU, F. **Penetração de Cloretos em concretos compostos com diferentes teores de cinza de casca de arroz.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2004.

MITCHELL, D.R.G.; HINCKZAK, I.; DAY, R.A. Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p. 1571–1584, 1998.

NETO, A. A. M. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada.** 2002. 179p. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L.; PARROTT, L. J.; YU, S. W. Diffusion in cementitious materials: II. further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30% PFA pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 819-826, 1995.

NITZKE, J. A.; BIEDRZYCKI, A. **Terra de arroz:** grão de arroz. 2004 Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/icta/agronom/arroz>>. Acesso em 5 out. 2010.

NMAI, C.K; TOMITA, R.; HONDO, F.; BUFFENBARGER, J. Shrinkage reducing admixture. **Concrete International**, v. 20, n. 4, p. 31-37, 1998.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A.D. **Retração do Concreto de Cimento Portland.** Boletim Técnico. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

OHLWEILER, O. A. **Química inorgânica.** São Paulo: Edgard Blücher, 428 p. 1971.

OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 587-592, 1992.

PERENCHIO, W. F. **The drying shrinkage dilemma.** Concrete Construction, v. 42, n. 4, p. 379-383, 1997.

POUEY, M.T.F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

PRUDÊNCIO Jr, L. R; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional.** Coletânea HABITARE - vol 4, ROCHA, J. C. & JOHN, V. M. (ed.). Porto Alegre, 2003.

RAO, G. A. Influence of silica fume replacement of cement on expansion and drying shrinkage. **Cement and Concrete Research**. vol 28, nº 10, pp. 1505 - 1509, jul. 1998.

REAL, C.; ALCALÁ, M. D.; CRIADO, J. M. Preparation of silica from rice husks. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 79, n. 8, p. 2012-2016, 1996.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas**. Tese (Doutorado em Eng. Civil). Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

REINHARDT, H. W. **Transport of chemicals through concrete**. Material Science of Concrete III, Edited by Jan Skalny, The American Ceramic Society, Westerville. OH. pp209-241. 1992.

SACILOTTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura**. Santa Maria, 2008, 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SALES, A. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu**. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

SARASWATY, V.; SONG, H. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1779-84, 2007.

SENSALE, G. R. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, 28, p. 158-160, 2006.

SENSALE, G. R. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, 32, p. 718-725, 2010.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. Study of Influence of Rice-husk Ash on compressive Strength of concrete at Different Ages. In: **High-Performance Concrete – Performance and Quality of Concrete Structures**. Gramado, RS, 213-230p. 1999.

SHAH, S. P.; KARAGULER, M. E.; SARIGAPHUTI, M. Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete. **ACI Material Journal**, v. 89, nº 3, p. 291-295. 1992.

SILVA E.J, RICCI E.C, AKASAKI J.L, TASHIMA.MT. **Análise da variação da retração por secagem em argamassas com a adição da cinza de casca de arroz** - Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Abril / 2006.

SILVA, C.O.; VIEIRA, S.R.S.S. Influência da temperatura de cura nas características reológicas, físico-mecânicas e microestruturais do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

SILVA, E. J., AKASAKI, J. L, TASHIMA, M. M. **Estudo da adição de cinza de casca de arroz em pastas e argamassas.** In XVI Congresso de Iniciação Científica da UNESP. Ilha Solteira SP, 2004.

SILVA, F. G; LIBORIO, J. B. L. **Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos.** Vetor, Rio Grande, 15(2): 35-47, 2005.

SILVA, M. G. **Cimento Portland com adições minerais.** In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Materiais de construção civil. . v 1, cap. 23, p. 761-793. São Paulo: IBRACON, 2007

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de CCA em concretos submetidos à reação alcali-agregado.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SIQUEIRA, H. C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente.** 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SIVASUNDARAM, V.; MALHOTRA , V. M. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 554-563, 1992.

SNIC. **Sindicato da Indústria do Cimento.** Disponível em: <<http://www.snic.org.br>> Acesso em 19 setembro de 2011.

SOUSA, S. P. B; **Betões eco-eficientes com cinza de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Portugal, 2005

SOUZA, U.E.L.; PALIARI, J. C; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, Porto Alegre: ANTAC, v. 4, n. 4, p. 33-46, out/dez. 2004.

SUGITA, S.; SHOYA, M.; TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of Rice husk ash. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4<sup>th</sup>, 1992, Istanbul. **Anais ...** Detroit: American Concrete, 1993. 2v., v. 1, p. 495-512. (SP-132).

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**, London: Thomas Telford, 2ed, 1997.

TUAN, N. V.; YE, G.; BREUGEL, K. V.; COPUROGLU, O. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**. CEMCON-04306, 2011. 8 p.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L.; BARBOSA, M. B. Influence of rice husk ash in mechanical characteristics of concrete. In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. American

Concrete Institute. 08-05, 2005. **Anais ...** Coimbra: American Concrete Institute, 2005. Paper XII.08, p. 780-90, 2005.

VAN DAM, T. J.; PETERSON, K. R.; SUTTER, L. L.; PANGULURI, A.; SYTSMA, J.; BUCH, N.; KOWLI, R.; DESARAJU, P. **Final Report for Early-Opening-to-Traffic Portland Cement Concrete for Pavement Rehabilitation**. NCHRP Web-Only Document 76 (Project 18-4B), 2005.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WALTER, J. P.; ROSSATO, M. V.; Destino do resíduo casca de arroz na microregião de Restinga Seca - RS: Um enfoque à responsabilidade sócio ambiental. VI Congresso Nacional de Excelência em Gestão. **Energia, Inovação, Tecnologia e Complexidade para a Gestão Sustentável**. Rio de Janeiro: Niterói, 2010.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 2, p. 221-232, 2000.

WSCSD. **World Business Council for Sustainable Development**. Disponível em: <[http://www.wbcsdcement.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=53&Itemid=114](http://www.wbcsdcement.org/index.php?option=com_content&task=view&id=53&Itemid=114)> Acessado em 23 março de 2011.

ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M.; KIM, K. S.; KIM, J.C. Concrete incorporating supplementary cementing materials: effect on compressive strength and resistance to chloride-ion penetration. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 2, p. 181-189, 1999.

ZHANG, M. H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 6, p. 963-77, mar. 1996.

ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; LEOW, M. P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1687-1694, out. 2003.

ZHANG, M.; MALHOTRA, V. M. High-performance concrete incorporating Rice husk ash as a supplementary cementing material. **ACI Materials Journal**, v.93, nº 6, p. 629-636, 1996.