

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

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS  
COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE  
DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Fabício Beltrame Zamberlan**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2013**



# **PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

**Fabrício Beltrame Zamberlan**

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  
2013



**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

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM  
CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE  
CARBONO GRAFÍTICO**

elaborada por  
**Fabício Beltrame Zamberlan**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

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

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

**Ênio Pazini Figueiredo, Dr. (UFG)**

Santa Maria, 10 de outubro de 2013.



*Dedico este trabalho aos meus pais, Rômulo e Rosangela, ao meu irmão Lucas, ao meu padrasto Cleber e aos meus avôs, Ângelo e Jurema, pelo apoio e incentivo ao longo deste período.*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao fim desta importante etapa da minha vida, agradeço a Deus pela vida e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Em especial, ao meu orientador professor Antônio Luiz Guerra Gastaldini, sempre presente ao longo desta pesquisa, pelos conhecimentos transmitidos, pela amizade e pela incansável e competente orientação.

Ao professor Geraldo Cechella Isaia, pelos conhecimentos teóricos transmitidos e pela amizade.

À Roseane, pelo incentivo e companheirismo, principalmente na fase inicial deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da Universidade Federal de Santa Maria, Tiago Hoppe e Rodrigo de Bivar dos Santos, pelas dicas e pelo incentivo em todos os momentos.

Aos colegas de mestrado, Monique Pafiadache, Carlos Zinn Mostardeiro Neto, Douglas Garcez Nunes e Daiana de Souza Cezar pela ajuda nos trabalhos práticos e, também, pela amizade.

Aos bolsistas de iniciação científica do GEPECON, Maurício Silveira, Lucas Lamberti, Henrique Bolacel, Bruno Gonçalves, Pedro Orlando, Daniel Teixeira e Patrícia Osmari, pela amizade e ajuda nos trabalhos laboratoriais.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, pela ajuda nos momentos em que necessitei.

À Universidade Federal de Santa Maria, por possibilitar esta pesquisa.

Muito obrigado!!!



## RESUMO

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

### **PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO**

AUTOR: FABRÍCIO BELTRAME ZAMBERLAN

ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 10 de outubro de 2013

As características de durabilidade devem ser parâmetros de concepção das estruturas de concreto tanto quanto a sua resistência à compressão. O concreto deve manter a integridade frente aos agentes que o danificam, além de atuar como camada protetora a entrada de substâncias que venham a promover a corrosão das armaduras em seu interior. O uso de adições minerais no concreto tem proporcionado bons resultados frente a várias características, além de ser benéfico ao meio ambiente, justamente por dar destino a um subproduto descartável de um processo industrial. O presente estudo teve por objetivo avaliar a penetração de íons cloretos em concretos compostos com cinza de casca de arroz clara e escura, com diferentes teores de carbono grafítico e períodos de cura. Os concretos foram moldados com CCA com teores de 5%, 10%, 20% e 30% em substituição ao cimento Portland de alta resistência inicial (CPV . ARI), com diferentes relações água/aglomerante (0,35; 0,50; 0,65) e com períodos de cura em câmara úmida de 3 e 7 dias. Duas misturas com 5% e 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland foram empregadas como parâmetro de comparação. A penetração de cloretos, por imersão em solução salina, foi realizada em corpos de prova de dimensões 100mm x 100mm x 285mm e avaliada nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Já o ensaio do Teste Rápido de Penetração de Cloretos seguiu as orientações da norma ASTM C 1202/05 e foi realizado em corpos de prova de 100mm x 51mm, que foram ensaiados aos 28 e 91 dias. Os resultados mostram, de maneira geral, um melhor desempenho da cinza de casca de arroz clara em relação à escura, frente à penetração de cloretos, apesar da proximidade dos resultados. O aumento do teor de substituição, nos concretos com cinza de casca de arroz, provocou decréscimos na carga total passante (Q), sendo estes mais expressivos em teores de até 20% de substituição. A utilização das duas cinzas de casca de arroz e da sílica ativa em substituição ao cimento apresentou um melhor desempenho frente à penetração de íons cloretos para todos os teores de substituição, relações água/aglomerante e períodos de cura analisados, quando comparadas à mistura de referência. Dessa forma, confirma-se a eficiência da utilização de adições minerais em propriedades de durabilidade do concreto.

**Palavras-chave:** Concreto. Cinza de Casca De Arroz. Penetração de Cloretos. Cura. Durabilidade.



## **ABSTRACT**

Master's Dissertation  
Program of Post Graduation in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE WITH ADDITIONS OF RICE HUSK ASH WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS OF GRAPHITIC CARBON**

AUTHOR: FABRÍCIO BELTRAME ZAMBERLAN  
SUPERVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI  
Santa Maria, 10th October 2013

In addition to compressive strength, durability is an important variable to be taken into account in the mix design of concrete. Concrete must be able to withstand the action of aggressive agents and function as a protective layer that can block the penetration of corrosive substances that could affect the reinforced steel frame. The use of mineral additions in concrete has been shown to improve a range of physical properties in concrete while providing an environmentally sound alternative in the use of industrial by-products that would otherwise make their way into landfill sites. This study aimed to assess the penetration of chloride ions in concrete samples with the addition of white and dark rice husk ash and different concentrations of graphitic carbon and different curing periods. The concrete samples were prepared with content of 5%, 10%, 20% and 30% of mineral additions as substitution for high early strength Portland cement (CPV . ARI). Different water/binder ratios (0.35; 0.50; 0.65) were used and the samples were cured in a wet chamber for 3 and 7 days. Two samples with 5% and 10% silica fume as substitution for Portland cement were used as control mixes. Chloride penetration by immersion in a saline solution was determined in test specimens measuring 100mm x 100mm x 285mm at the ages of 7, 14, 28, 56 and 91 days. A Rapid Chloride Penetration Test was carried out as defined in ASTM C1202/05 in test specimens measuring 100mm x 51mm tested at 28 and 91 days. Results showed a better performance of white rice husk ash when compared to dark rice husk considering chloride penetration. The increase in the content of rice husk ash reduced the total Coulomb charge (Q), which was more significant at levels up to 20% substitution. The use of two types of rice husk ash as well as silica fume in substitution for cement showed a better performance regarding penetration of chloride ions for all levels of replacement, water/binder ratios, and curing periods tested when compared to the reference mixture. Thus, one may conclude that the use of mineral addition on properties of concrete durability is efficient.

**Keywords:** Concrete. Rice Husk Ash. Chloride Penetration. Curing. Durability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito de substituição de uma pozolana natural sobre o calor de hidratação de um cimento Portland.....	36
Figura 2 - Resistência à compressão. ....	38
Figura 3 - Taxa de absorção de água.....	40
Figura 4 - Principais usos da casca de arroz.....	43
Figura 5 - Depósito de cinza de casca de arroz ao longo de estradas vicinais. ....	44
Figura 6 - Depósito de cinza de casca de arroz a céu aberto. ....	44
Figura 7 - Divisão do grão de arroz. ....	45
Figura 8 - Micrografia eletrônica de varredura da CCA queimada a 560°C.....	46
Figura 9 - Difração de raios X das CCA obtidas pela queima de casca de arroz em diferentes temperaturas.....	48
Figura 10 - Micrografias de cinza de casca de arroz.....	50
Figura 11 - Variação do IAP com o tempo de moagem. ....	50
Figura 12 - Micrografia da CCA.....	51
Figura 13 - Demanda de água no ensaio de pozolanicidade. ....	52
Figura 14 - Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio. ....	60
Figura 15 - Tipos de corrosão. ....	62
Figura 16 - Ilustração da fissuração e destacamento do concreto devido a corrosão da armadura. ....	63
Figura 17 - Influência dos ciclos de cura na penetração de íons cloreto.....	74
Figura 18 - Efeito da cura e da relação a/c na profundidade de alcance dos cloretos. ....	75
Figura 19 - Penetração de cloretos . CP V ARI com e sem sílica ativa.....	76
Figura 20 - Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI). ....	81
Figura 21 - Difratograma da amostra de cimento (CPV-ARI). ....	83
Figura 22 - Difratograma da amostra de CCAC. ....	85
Figura 23 - Difratograma da amostra de CCAE.....	85
Figura 24 - Difratograma da amostra SA.....	86
Figura 25 - Curva granulométrica do agregado miúdo. ....	88
Figura 26 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	88
Figura 27 - Corpo de prova entre as células de acrílico. ....	93
Figura 28 . Corpos de prova imersos em solução salina dentro do reservatório.....	95
Figura 29 . Corpo de prova após aspersão de nitrato de prata. ....	96
Figura 30 - Gráfico para determinação dos coeficientes k. ....	99
Figura 31 - Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação a/ag e período de cura . cura 3 dias.....	101
Figura 32 - Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação a/ag e período de cura . cura 7 dias.....	102
Figura 33 . Influência do período de cura úmida sobre o coeficiente de penetração k. ....	107
Figura 34 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade - cura de três dias.....	112
Figura 35 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade - cura de sete dias.....	112
Figura 36 - Carga total passante das misturas investigadas aos 91 dias de idade - cura de três dias.....	113

Figura 37 - Carga total passante das misturas investigadas segundo aos 91 dias de idade - cura de sete dias.....	113
Figura 38 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 28 dias.....	121
Figura 39 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 28 dias.....	122
Figura 40 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 91 dias.....	122
Figura 41 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 91 dias.....	122
Figura 42 - Carga passante <i>versus</i> resistência à compressão . 28 dias - três dias de cura.....	124
Figura 43 - Carga passante <i>versus</i> resistência à compressão . 28 dias - sete dias de cura.....	124
Figura 44 - Consumo de aglomerante por m <sup>3</sup> de concreto para o nível de resistência de 40 MPa e períodos de cura investigados.....	129
Figura 45- Consumo de aglomerante por m <sup>3</sup> de concreto para o nível de resistência de 50MPa e períodos de cura investigados.....	129
Figura 46 - Carga passante para o nível de resistência de 40 MPa e períodos de cura investigados, juntamente com classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos. ....	131
Figura 47 - Carga passante para o nível de resistência de 50 MPa e períodos de cura investigados, juntamente com classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos. ....	132
Figura 48 - Coeficiente de difusão de cloretos para o nível de resistência de 40 MPa e períodos de cura investigados. ....	134
Figura 49 - Coeficiente de difusão de cloretos para o nível de resistência de 50 MPa e períodos de cura investigados. ....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das adições minerais para concreto.....	34
Tabela 2 - Produção brasileira de arroz e casca (safra 2012/2013).....	41
Tabela 3 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C <sub>3</sub> A. .	71
Tabela 4 - Períodos mínimos de cura.....	73
Tabela 5 - Proporções das adições minerais em cada mistura de aglomerante. ....	79
Tabela 6 - Ensaio em argamassa do CPV-ARI. ....	82
Tabela 7 - Características físicas do cimento. ....	82
Tabela 8 - Características químicas do cimento.....	82
Tabela 9 - Características físicas das adições minerais.....	84
Tabela 10 - Características químicas das adições minerais.....	84
Tabela 11 - Características físicas dos agregados.....	87
Tabela 12 - Traço unitário para o concreto de referência.....	89
Tabela 13 - Consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto. ....	90
Tabela 14 - Classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos. ....	93
Tabela 15 - Coeficiente de penetração k das misturas, de acordo com a relação a/ag e período de cura em câmara úmida.....	99
Tabela 16 - Índice de penetração de íons cloreto em relação à REF.....	104
Tabela 17 - Resultados de carga total passante aos 28 dias. ....	110
Tabela 18 - Resultados de carga total passante aos 91 dias. ....	111
Tabela 19 - Classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos. ....	111
Tabela 20 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 28 dias para três e sete dias de cura úmida.....	115
Tabela 21 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 91 dias para três e sete dias de cura úmida.....	116
Tabela 22 - Influência do período de cura úmida sobre a redução da carga passante. ....	119
Tabela 23 - Coeficientes C, D e r <sup>2</sup> das equações exponenciais que relacionam o coeficiente de difusão de cloretos k e a relação a/ag x, dada pela expressão k = C/Dx para cada mistura testada. ....	125
Tabela 24 - Relações a/ag, consumo de aglomerante, coeficiente de difusão e carga passante, calculados para os níveis de resistência à compressão de 40MPa e 50MPa.....	127
Tabela 25 - Tp (em anos) necessário para os íons cloreto atingirem a camada de passivação do aço, para os níveis de resistência de 40 MPa e 50 MPa.....	137
Tabela 26 - Acréscimos percentuais nos tempos de penetração, quando o período de cura aumenta de três para sete dias, para os níveis de resistência de 40 MPa e 50 MPa. ....	138



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Teor limite de cloreto para diversas normas.....	65
Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental. ....	69
Quadro 3 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto. .....	70
Quadro 4 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $c = 10\text{mm}$ . ....	70



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABCP</b>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<b>ACI</b>	American Concrete Institute
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>AgNO<sub>3</sub></b>	Nitrato de prata
<b>a/c</b>	Relação água/cimento
<b>a/ag</b>	Relação água/aglomerante em massa
<b>agl</b>	Aglomerante
<b>C</b>	Coulomb
<b>°C</b>	Graus Celsius
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminato tricálcico
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Ferro Aluminato tetracálcico
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	Cloreto de cálcio
<b>CA</b>	Casca de arroz
<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>CCA E</b>	Cinza de casca de arroz de cor escura
<b>CH</b>	Hidróxido de cálcio
<b>cm</b>	Centímetro(s)
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CONAB</b>	Companhia Nacional de Abastecimento
<b>CPV - ARI</b>	Cimento Portland de alta resistência inicial
<b>cp<del>B</del></b>	Corpos de prova
<b>C-S-H</b>	Silicato de cálcio hidratado
<b>EPCANP</b>	Ensaio de penetração de cloretos por aspensão de nitrato de prata
<b>Fe</b>	Ferro
<b>Fe<sup>++</sup></b>	Íons ferro
<b>g</b>	Gramas(s)
<b>GEEA</b>	Indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete
<b>GEPECON</b>	Grupo de Pesquisa em Concreto
<b>h</b>	Hora(s)
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Molécula de água
<b>IBRACON</b>	Instituto Brasileiro do Concreto
<b>LMCC</b>	Laboratório de Materiais de Construção Civil
<b>kg</b>	Quilogramas
<b>m</b>	Metro(s)

<b>m<sup>2</sup></b>	Metro quadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>mm</b>	Milímetro(s)
<b>MPa</b>	Mega-Pascal
<b>Na</b>	Sódio
<b>NaCl</b>	Cloreto de sódio
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sódio
<b>NBR</b>	Norma Brasileira Regulamentada
<b>O<sub>2</sub></b>	Gás oxigênio
<b>OH<sup>-</sup></b>	Íons hidroxila ou hidroxila
<b>pH</b>	Potencial de hidrogênio
<b>Q</b>	Carga total passante
<b>REF</b>	Mistura de referência, composta somente de cimento Portland como aglomerante
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de silício
<b>SA</b>	Sílica ativa
<b>tp</b>	Tempo de penetração
<b>TRPC</b>	Teste rápido de penetração de cloretos
<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

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012) .	
Tabela 5.1. ....	159
Anexo B - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012) .	
Tabela 5.2. ....	160



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	26
<b>1.1 Definição temática</b> .....	28
1.1.1 Apresentação do tema .....	28
<b>1.2 Objetivos</b> .....	28
1.2.1 Objetivo geral .....	28
1.2.2 Objetivos específicos.....	29
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b> .....	29
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	32
<b>2.1 Adições minerais</b> .....	32
2.1.1 Influência das adições minerais nas propriedades do concreto .....	35
2.1.2 Cinza de casca de arroz.....	41
<b>2.2 A ação de íons cloreto</b> .....	53
2.2.1 Mecanismos de transporte no concreto.....	54
2.2.1.1 Permeabilidade.....	55
2.2.1.2 Absorção capilar.....	55
2.2.1.3 Difusão e migração.....	56
2.2.2 Corrosão das armaduras.....	58
2.2.3 Penetração de íons cloreto.....	63
2.2.3.1 Teores limite de cloretos .....	64
2.2.3.2 Fatores que influenciam o ingresso de íons cloreto no concreto.....	66
2.2.3.2.1 Fatores climáticos.....	66
2.2.3.2.2 Condições de exposição .....	67
2.2.3.2.3 Fatores inerentes ao concreto.....	71
2.2.3.3 Influência da cura na resistência à penetração de cloretos.....	72
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	78
<b>3.1 Introdução</b> .....	78
<b>3.2 Materiais</b> .....	79
3.2.1 Caracterização dos materiais .....	80
3.2.1.1 Aglomerantes .....	80
3.2.1.2 Agregados .....	86
<b>3.3 Dosagem dos concretos</b> .....	88
3.3.1 Moldagem e cura dos corpos de prova .....	91
<b>3.4 Ensaio realizados</b> .....	92
3.4.1 Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) . ASTM C1202.....	92
3.4.2 Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP) .....	94
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	98
<b>4.1 Introdução</b> .....	98
<b>4.2 Análise dos resultados de penetração de cloretos EPCANP</b> .....	98
4.2.1 Influência da relação água/aglomerante.....	101
4.2.2 Influência do teor de substituição do cimento pelas adições minerais .....	103
4.2.3 Influência do período de cura úmida .....	107
<b>4.3 Análise dos resultados de penetração de cloretos ASTM C1202</b> .....	108
4.3.1 Influência da relação água/aglomerante.....	110
4.3.2 Influência do teor de substituição do cimento pelas adições minerais .....	115
4.3.3 Influência do período de cura úmida .....	118

4.3.4	Determinação da profundidade de penetração nas misturas submetidas ao ensaio TRPC (ASTM C1202).....	121
4.3.5	Comparação entre carga passante e resistência à compressão .....	123
<b>4.4</b>	<b>Análise dos resultados em igualdade de resistência</b> .....	<b>125</b>
4.4.1	Análise do consumo de aglomerante para concretos com 40MPa e 50MPa.	128
4.4.2	Análise da carga total passante para concretos com 40MPa e 50MPa .....	131
4.4.3	Análise do coeficiente de difusão de cloretos para concretos com 40MPa e 50MPa .....	133
4.4.4	Determinação do tempo ( $t_p$ ) para que os íons cloreto penetrem através da camada de revestimento até a superfície do aço, para concretos com 40MPa e 50MPa.....	136
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>140</b>
5.1	Sugestões para pesquisas futuras.....	144
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>146</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>158</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Dada a crescente preocupação mundial com o meio ambiente, torna-se indispensável que se busque soluções de desenvolvimento sustentável em todos os ramos de atividade. Além disso, com a crise energética mundial que vem ocorrendo, tem-se buscado soluções e fontes alternativas de energia renovável. Entre elas, tem aumentado bastante o uso de combustíveis de origem vegetal, como os resíduos agrícolas, com destaque para o uso da casca de arroz (PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).

Isaia (1995) explica que o concreto, por ser o material mais utilizado pelo homem, demanda, na fabricação do cimento, uma quantidade muito grande de energia e matéria-prima (argila e calcário), que gera grande impacto ambiental sobre o ecossistema, devido à retirada desse material e ao excessivo consumo energético necessário para transformá-lo em clínquer. O autor ainda adverte que grande parte desse impacto pode ser minimizado se parte do cimento utilizado no concreto for substituído por um ou mais tipos de pozolanas.

Na indústria do cimento e do concreto, inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas nos últimos anos, utilizando adições minerais em substituição ao cimento. Essas pesquisas convergem para o pensamento em voga atualmente, o qual visa aliar o crescimento à sustentabilidade, pois utilizam subprodutos industriais que, muitas vezes, não tinham uma destinação adequada.

Além disso, o uso de adições minerais no cimento proporciona uma redução na poluição gerada, pois diminui a emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) no processo de produção de cimento. Na atualidade, com o uso de adições minerais, a média mundial de emissão de CO<sub>2</sub> gira em torno de 750Kg por tonelada de cimento produzido, e, no, Brasil esse valor é ainda menor, ficando abaixo de 600Kg por tonelada de cimento, devido à modernidade da indústria cimenteira nacional e da normalização brasileira de cimento (DAL MOLIN, 2011).

A casca de arroz é o resíduo do beneficiamento do arroz colhido. Como é um produto volumoso, apresenta sério problema de armazenamento para as centrais beneficiadoras de arroz. Cada tonelada de arroz produz em torno de 200 kg de casca, que, queimada, gera 40 kg de cinza. A cinza formada durante a queima não controlada, geralmente, possui uma grande quantidade de sílica não reativa.

Portanto, deve ser moída em partículas muito finas para desenvolver atividade pozolânica. Entretanto, pode-se obter cinza altamente pozolânica através da queima controlada, em que a sílica é mantida na forma não cristalina e em estrutura celular (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O desempenho do concreto quando parte do cimento é substituído por cinza de casca de arroz (CCA) moída tem sido relatado por vários autores (BOUZOUBAË; FOURNIER, 2001; HOPPE, 2005; SARASWATY; ONG, 2006; COUTINHO, 2003; ZHANG; MALHOTRA, 1996). A reação pozolânica que envolve a adição de CCA refina os poros do concreto, diminuindo a penetrabilidade deste.

É essencial que as estruturas de concreto apresentem o desempenho e a durabilidade prevista ao longo de sua vida útil (BOUZOUBAË; FOURNIER, 2001). A deterioração das estruturas não se deve apenas a um fator agressivo, mas, à combinação de vários, atuando simultaneamente. O processo de corrosão das estruturas de concreto armado, por exemplo, desenvolve-se quando há condições propícias, como é o caso de ambientes marítimos, aliados às inadequadas técnicas construtivas, que, muitas vezes, devem-se ao desconhecimento ou ao mínimo cumprimento das normas (OLAVARRIETA et al., 2011). Assim, para o concreto atender às solicitações ao longo de sua vida útil, deve ter qualidade e, para isso, a penetrabilidade merece uma atenção especial, pois todas as consequências desfavoráveis decorrem do transporte de fluidos através do concreto (NEVILLE, 1997).

Outro fator importante para obtenção de um concreto durável e de qualidade é a execução de uma cura adequada. A adoção de uma alta relação água/aglomerante (a/ag) somada à ausência de cura impede a formação de uma camada superficial compacta, dessa forma, todos os fenômenos de penetrabilidade à água, à gases, à absorção de água, à retenção de fuligem, à difusão de elementos agressivos, entre outros, serão intensificados e comprometerão a proteção da armadura e a durabilidade da estrutura (HELENE, 1986).

Assim, o presente estudo teve por objetivo avaliar a influência da CCA, obtida com queima controlada, com o objetivo primário de gerar energia, e do período de cura na resistência à penetração de cloretos. Adotou-se teores de 5%, 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz com teor de carbono grafítico de 0,41% (denominada clara - CCAC) e cinza de casca de arroz com teor de carbono grafítico de 3,69% (denominada escura - CCAE), além de períodos de cura de três e sete

dias. Duas misturas com sílica ativa, em teores de 5% e 10% de substituição ao cimento, foram utilizadas para comparação dos resultados.

O presente trabalho faz parte de uma pesquisa maior que verificou o desempenho de concretos com adição de CCA com diferentes teores de carbono grafítico. Mostardeiro Neto (2011) também pesquisou o comportamento da absorção capilar e a resistividade elétrica ao substituir o cimento CPV-ARI por 10%, 20% e 30% das cinzas estudadas. Também utilizando as mesmas adições, Da Silva (2012), ao substituir teores de 5%, 10%, 20% e 30%, verificou o desempenho dos concretos em relação à retração total, à penetração de cloretos e à resistência mecânica.

## **1.1 Definição temática**

### **1.1.1 Apresentação do tema**

A pesquisa consiste no estudo de concretos com diferentes adições minerais: CCAC e CCAE, com diferentes teores de carbono grafítico e sílica ativa.

Tem-se como objetivo avaliar o desempenho das adições minerais, comparando os concretos frente à penetração de íons cloreto em cada um.

## **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 CCAC e CCAE e sílica ativa, aplicadas em substituição ao cimento nos teores de 5%, 10%, 20% e 30% para as CCAs e 5% e 10% para a sílica ativa, frente 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:

- a) averiguar e comparar a influência das diferentes relações  $a/ag$  e dos diferentes prazos de cura úmida frente à penetração de íons cloreto em concretos com e sem CCAC e CCAE e sílica ativa;
- b) comparar os desempenhos dos concretos com CCAC e CCAE e sílica ativa entre si, a fim de averiguar qual adição mineral e qual teor de substituição é mais benéfico à durabilidade do concreto, em especial à penetração de íons cloreto;
- c) analisar o comportamento dos concretos com e sem CCAC e CCAE e sílica ativa frente à penetração de íons cloreto em igualdade de resistência;

### 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

No capítulo 1, Introdução, é comentada a importância da utilização de adições minerais no concreto, tanto em relação à questão ambiental como à durabilidade das estruturas e exposição dos objetivos a serem atingidos.

No capítulo 2, Revisão da literatura, é feita uma abordagem sobre adições minerais, com ênfase em cinza de casca de arroz, além de discutir a ação dos íons cloretos no concreto, mais especificamente, no que diz respeito a mecanismos de transporte, corrosão das armaduras e penetração de íons cloreto.

No capítulo 3, Materiais e métodos, é feita a identificação das variáveis que envolvem a pesquisa, além da caracterização dos materiais, dosagem dos concretos e descrição dos ensaios realizados.

No capítulo 4, Análise e discussão dos resultados, são apresentados e debatidos os resultados dos ensaios realizados, analisando-os de forma a atender os objetivos traçados.

No capítulo 5, Conclusões e considerações finais, para finalizar, são destacados os resultados encontrados na pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.



## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

O concreto, por ser um material utilizado em grande escala no mundo todo, exige uma atenção especial no que se refere à durabilidade dessas estruturas, sendo assim, vários autores tem trabalhado na busca de soluções que melhorem os aspectos ligados à durabilidade das estruturas de concreto armado.

Com o objetivo de nortear este trabalho, são apresentados neste capítulo, conceitos e características das adições minerais, em especial a cinza de casca de arroz e a ação dos íons cloreto no concreto.

### **2.1 Adições minerais**

As adições minerais são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que podem ser adicionados ao concreto em porcentagens pré-determinadas de substituição ao cimento Portland.

O emprego desses materiais em cimentos e concretos ganha maior importância atualmente devido ao compromisso da indústria de reduzir a emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera (CINCOTTO, 2011).

Geralmente, os resíduos descartados são subprodutos de processos industriais que, acumulados em aterros, representam perda de material e causam sérios problemas de poluição ambiental (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo Dal Molin (2005), estes resíduos são, normalmente, descartados em lugares impróprios, gerando risco de contaminação do solo e de fontes de água.

O descarte, como agregado para concreto, é um aproveitamento menos nobre, que não utiliza o potencial pozolânico e cimentante destes materiais. Contudo, com controle de qualidade adequado, os subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, na forma de cimentos Portland compostos ou de adições minerais, o que resultaria em uma economia significativa de energia e custo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O uso de adições minerais na indústria do cimento e do concreto, substituindo parcialmente o clínquer ou o cimento, não só reduz o impacto ambiental causado pelos resíduos dispostos inadequadamente, mas também reduz o volume de extração de matérias-primas por parte da indústria de construção civil (DAL MOLIN, 2005). Segundo Sjöström (1996 apud DAL MOLIN, 2005), o setor da construção civil é o maior consumidor individual de recursos naturais, utilizando entre 20% a 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade.

Neville (1997) salienta que, muitas vezes, o uso de adições minerais no concreto, em substituição ao cimento Portland, é valorizado devido à economia de energia e ao interesse em preservar os recursos naturais. Porém, o autor afirma que o argumento mais poderoso a favor desses materiais são as vantagens técnicas da sua utilização no concreto, que, em muitos casos, é preferível em detrimento ao cimento Portland puro.

A utilização de adições minerais, normalmente, resulta na obtenção de materiais cimentícios com boas características técnicas, pois modifica a estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição agregado/matriz, resultando em um concreto com menor porosidade capilar e menor suscetibilidade ao ataque de agentes agressivos, além de diminuir o calor de hidratação e, por consequência, a fissuração de origem térmica (DAL MOLIN, 2005). No entanto, as vantagens proporcionadas pelas adições minerais no concreto são dependentes, dentre outros parâmetros, do tipo de adição, da finura e da forma das partículas, da área superficial específica e da composição química e mineralogia destas, as quais influenciam diretamente as ações físicas e químicas (DAL MOLIN, 2011). Pereira (2008) complementa, afirmando que o uso correto das adições minerais proporciona, além das vantagens em termos econômicos e técnicos, melhora nas propriedades do concreto fresco e endurecido, através da redução da segregação, da exsudação, da retração plástica e da permeabilidade.

O uso de adições minerais no concreto provoca alterações químicas e físicas na estrutura da pasta, as quais têm sua intensidade fortemente influenciadas pela quantidade de cimento que é substituída por esses materiais. A introdução de adições minerais finas na pasta de cimento refina os poros maiores e incrementa os locais de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação. Com o aumento da idade do concreto, as alterações químicas reforçam as ações físicas segmentando, em maior grau, os poros e refinando os grãos de CH (ISAIA, 1995).

As adições minerais são materiais com propriedades pozolânicas e/ou cimentícias, que podem ser adicionadas ao concreto antes ou durante a mistura, em quantidades que variam entre 5% e 100% do peso do cimento (SILVEIRA, 1996). O seu uso pode ser feito de duas formas:

- a) como substituição de parte do cimento, buscando a redução de custo;
- b) como adição em percentuais variáveis em relação ao peso do cimento, geralmente com o uso de aditivos superplastificantes.

Dentre as adições minerais, as mais estudadas e utilizadas são: cinza volante, sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno e cinza de casca de arroz (CCA) (Tabela 1). De acordo com sua ação físico-química, estes materiais podem ser classificados como pozolânicos, cimentícios e fíler.

Os materiais são pozolânicos quando possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, e, quando finamente divididos e em presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formando compostos com propriedades cimentantes. O cimentante não necessita do  $\text{Ca(OH)}_2$  presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), no entanto, sua hidratação é normalmente lenta. Quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, o  $\text{Ca(OH)}_2$  e a gipsita aceleram sua hidratação. O fíler é uma adição mineral praticamente sem atividade química. Logo, sua ação resume-se a um efeito físico de empacotamento granulométrico e à formação de pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2011). Segundo Soroka e Stern (1978), o fíler calcário age como núcleo de cristalização, aumentando a velocidade de cristalização do CH e a subsequente velocidade de hidratação do cimento.

Tabela 1 - Classificação das adições minerais para concreto.

(continua)

Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e pozolânicos	Cinza volante com alto teor de cálcio ( $\text{CaO} > 10\%$ )
Superpozolanas	Sílica ativa, metacaulim, CCA produzida por combustão controlada (predominantemente amorfa), cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ultra fina)

Tabela 1 - Classificação das adições minerais para concreto.

(conclusão)

Pozolanas comuns	Cinza volante com baixo teor de cálcio (CaO<10%), argilas calcinadas, cinza vulcânica
Pozolanas pouco reativas	Escórias de alto-forno resfriadas lentamente, cinza de casca de arroz predominantemente cristalina
Fíler	Calcáreo, pó de quartzo, pó de pedra

Fonte: adaptação de Mehta &amp; Monteiro (2008).

### 2.1.1 Influência das adições minerais nas propriedades do concreto

O efeito da utilização de adições minerais no concreto tem sido estudado por diversos autores, os quais constatam alterações nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No concreto fresco, podem ser percebidos, entre outros fatores, a variação no consumo de água, calor de hidratação e na fissuração por dessecação superficial.

O consumo de água em concretos com adições minerais depende da forma, da superfície específica e da quantidade de adição utilizada como substituição ao cimento (DAL MOLIN, 2005). Adições com grande superfície específica demandam mais água para uma mesma trabalhabilidade. Consequentemente, quanto maior a porcentagem de substituição ao cimento, maior será o consumo de água. Esse problema pode ser resolvido com o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes.

De modo geral, a substituição de cimento por adições minerais proporciona redução no calor de hidratação gerado, pois há uma diminuição na quantidade de clínquer utilizado, resultando em uma menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação (DAL MOLIN, 2005). Isaia (1995), em seu estudo, constatou um decréscimo no calor de hidratação à medida que aumentou o teor de pozolana, independentemente do tipo de adição empregada, comprovando que essa

propriedade depende mais da diminuição do teor de cimento do que do tipo de pozolana utilizada.

A figura 1 representa o efeito de quantidades crescentes de pozolana sobre o calor de hidratação do cimento Portland pozolânico.

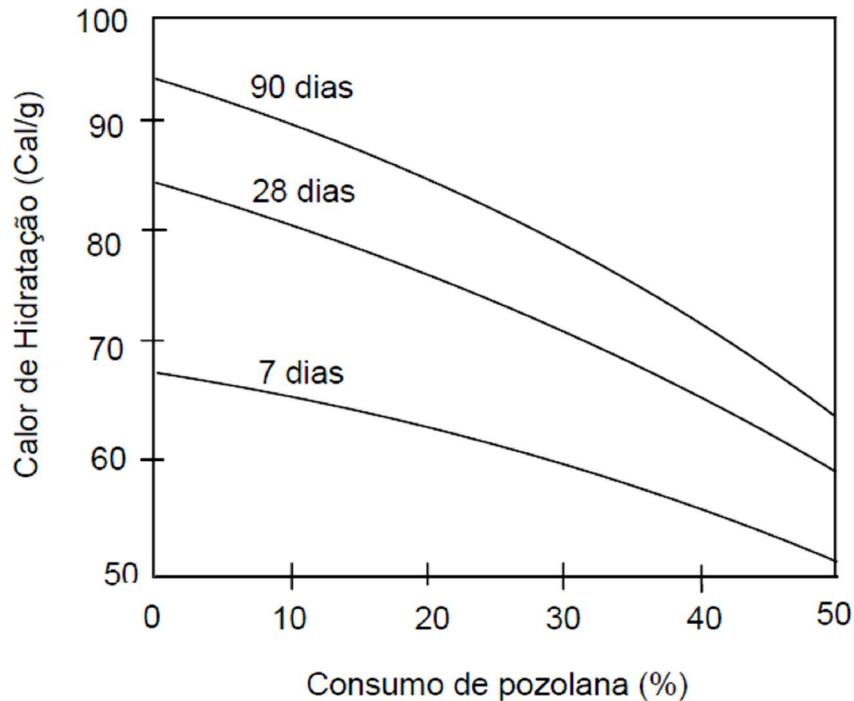


Figura 1 - Efeito de substituição de uma pozolana natural sobre o calor de hidratação de um cimento Portland.

Fonte: Massazza e Costa (1978 apud FONSECA, 2010).

Segundo Dal Molin (2005), a retração plástica pode ocorrer sempre que o concreto sofrer uma cura inadequada, na qual a velocidade de evaporação da água superficial for maior do que a taxa de reposição da água pelo fenômeno de exsudação. A autora ainda afirma que as adições minerais, normalmente, provocam redução na exsudação do concreto, aumentando o risco de fissuração deste, principalmente em dias quentes, que apresentam alto nível de evaporação.

Geralmente, os cimentos pozolânicos são mais lentos no desenvolvimento da resistência do que o cimento Portland comum, pois a reação pozolânica depende do

$\text{Ca(OH)}_2$  resultante do processo de hidratação do cimento. Quando os materiais pozolânicos são utilizados em proporções moderadas e ocorre uma cura úmida para períodos prolongados, em geral, as resistências finais dos cimentos pozolânicos acabam por ser maiores do que a resistência do cimento Portland. Isto se deve ao refinamento dos poros associado às reações pozolânicas e ao aumento de C-S-H e outros produtos de hidratação, às custas do  $\text{Ca(OH)}_2$  (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento tem um papel fundamental no aumento das resistências mecânicas, na medida em que aumenta a resistência da matriz na zona de transição (DAL MOLIN, 2005). Por isso, Isaia (1995) pontua que vários autores colocam a reatividade como principal fator de desempenho de uma pozolana, pois, quanto maior a quantidade de material amorfo e quanto maior a finura deste, mais reativa será a adição mineral. Isaia (1995), ao testar microssílica, CCA e cinza volante, teve a oportunidade de verificar, através dos ensaios de resistência em todas as idades (mesmo nas idades mais avançadas, quando as reações pozolânicas são processadas com maior intensidade) a menor reatividade da cinza volante em comparação com as outras adições.

Rêgo (2004) ao analisar a influência da substituição do cimento por cinzas de casca de arroz amorfa e cristalina percebeu a grande diferença na estrutura das cinzas, com a cinza amorfa com 100% de material amorfo e a cinza cristalina com somente com 6,35% de material amorfo. O autor, ao avaliar o índice de atividade pozolânica (IAP), em diferentes tempos de moagem, verificou que tanto a cinza amorfa quanto a cristalina apresentaram aumento do IAP com a diminuição do diâmetro médio das partículas. Quando finamente divididas, ambas mostraram-se altamente pozolânicas, o que indica que o grau de finura parece ter uma maior influência na atividade pozolânica das cinzas do que o índice de amorfismo, tendo em vista os bons resultados obtidos, nos ensaios, pela cinza cristalina quando finamente dividida. Porém, o autor verificou que os materiais cimentícios ensaiados com cinza amorfa geralmente apresentaram maiores resistências à compressão do que os com cinza cristalina.

Vieira (2003) verificou que a adição de 10% e 20% de sílica ativa no concreto promoveu um incremento de 12% e 25%, respectivamente, na resistência à compressão, conforme ilustra a figura 2. O autor ainda afirma que, através do efeito físico e pozolânico, a sílica ativa afeta a morfologia e a microestrutura da matriz

cimentante e da zona de transição pasta/agregado, reduzindo a porosidade do cimento.

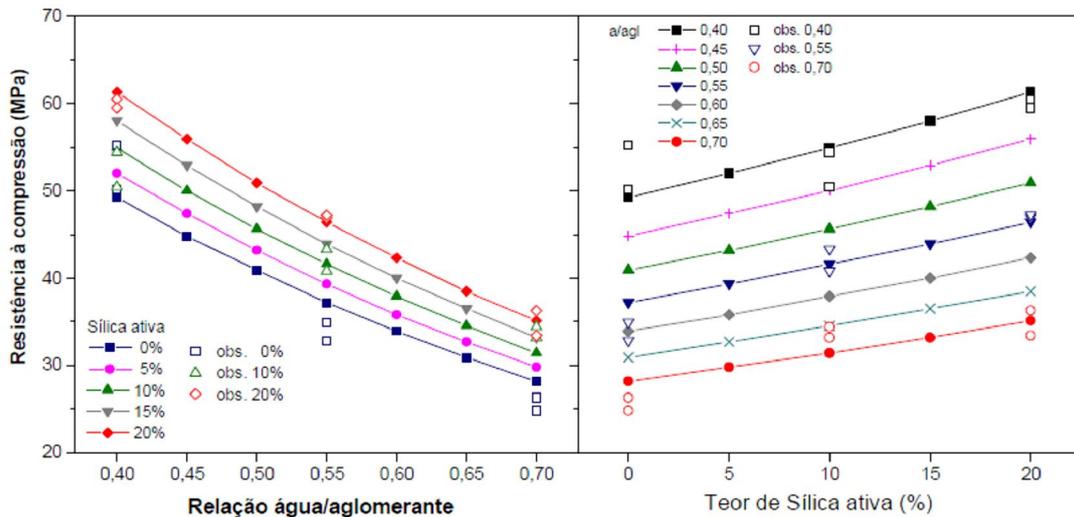


Figura 2 - Resistência à compressão.

Fonte: Vieira (2003).

Dal Molin (2005) afirma que a resistência final do concreto com adições minerais e a sua evolução com o tempo dependem da quantidade e das características da adição mineral (tamanho das partículas, quantidade de  $\text{SiO}_2$  em forma amorfa, entre outros), das proporções do concreto (tipo e consumo de cimento, relação água/cimento . a/c, presença de superplastificante etc.) e das condições de cura.

No que se refere à durabilidade, as adições minerais apresentam uma resposta positiva, pois, segundo Dal Molin (2005), as reações deste material com o  $\text{Ca(OH)}_2$  resultante da hidratação do cimento geram silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratado, que acabam preenchendo os vazios capilares da pasta de cimento endurecida, reduzindo, assim, a permeabilidade e a absorção do concreto.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), ao confeccionarem concretos com CCA em teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35%, com relação água/aglomerante (a/ag) de 0,53, verificaram uma melhoria substancial nas propriedades de permeabilidade do concreto quando utilizado o teor de 30% de

substituição, em comparação à mistura de referência (REF), sem adição. Ao substituir o cimento por 30% de CCA, obtiveram uma redução de 35% na permeabilidade à água no concreto, em relação à mistura tida como referência.

A redução da porosidade capilar é muito importante para a durabilidade do concreto, uma vez que é, principalmente, por meio de mecanismos de absorção que os íons agressivos, responsáveis pelos processos de deterioração, penetram no concreto (DAL MOLIN, 2005).

Vieira (2003) usou a sílica ativa como adição mineral e a apontou como uma alternativa viável para aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado, pois obteve um desempenho favorável frente à corrosão desencadeada por íons cloreto. Collepardi e Biagini (1989) também obtiveram uma redução na penetração de cloretos em concretos com sílica ativa e cinza volante.

Ahmed et al. (2008), ao testarem misturas binárias e ternárias com sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno frente à penetração de cloretos, obtiveram menores resultados de carga passante nos concretos com adição mineral em relação ao de referência.

Ao utilizar teores de 10% e 20% de sílica ativa em substituição ao cimento CPV-ARI, Vieira (2003) verificou que a taxa de absorção de água, com teor de 10%, diminuiu, em média, 31% em comparação ao concreto de referência, e que, com teor de 20% de substituição, a redução média de 40%. A figura 3 apresenta claramente o efeito da adição mineral, neste caso, sílica ativa, na absorção do concreto.

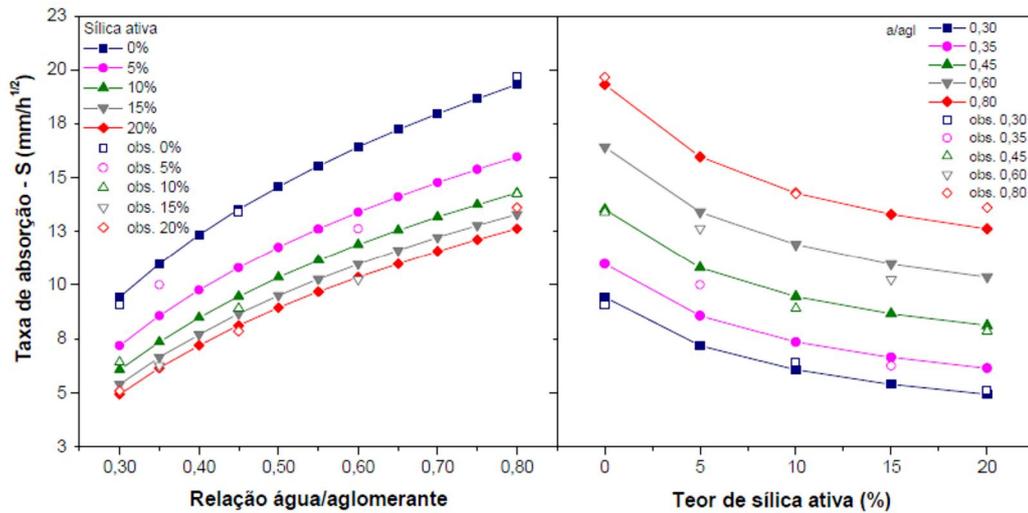


Figura 3 - Taxa de absorção de água.

Fonte: Vieira (2003).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), a durabilidade superior do cimento com adições minerais frente aos sulfatos e aos ambientes ácidos em relação ao cimento Portland comum deve-se ao efeito combinado da maior impermeabilidade e redução do conteúdo de  $\text{Ca(OH)}_2$  na pasta de cimento endurecida. As adições minerais, além de reduzirem a permeabilidade do concreto e dificultarem a entrada de sulfatos, reagem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  proveniente da hidratação do cimento, diminuindo a sua quantidade disponível para combinar com os sulfatos presentes e gerar etringita, responsável pela reação expansiva do concreto (DAL MOLIN, 2005).

De acordo com Dal Molin (2005), muitas propriedades do concreto podem ser influenciadas, benéficamente, pelo efeito físico, devido, principalmente, ao tamanho das partículas, ou pelo efeito químico proveniente da atividade pozolânica ou, ainda, pela ação conjunta dos dois efeitos. Os efeitos físicos gerados pelas adições minerais no concreto atuam na alteração da microestrutura da zona de transição, no refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento e como efeito de microfíler (DAL MOLIN, 2011). Já o efeito químico das pozolanas está associado à capacidade de reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$  formado durante a hidratação do cimento, para formar C-S-H, que é o principal responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas (DEL CARPIO, 2009).

A principal reação que norteia essas alterações é denominada pozolânica. Mehta e Monteiro (2008) descreveram a reação pozolânica como uma reação lenta, motivo pelo qual a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência também serão lentos. No entanto, Dafico (2001) pontua que a reação pozolânica pode ser acelerada tanto pela temperatura quanto por aceleradores químicos, como álcalis e sulfatos. Mehta e Monteiro (2008) afirmam, ainda, que a reação consome óxido de cálcio, o que proporciona maior durabilidade da pasta endurecida frente a meios ácidos e que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando, assim, a resistência e a impermeabilidade do sistema.

#### 2.1.2 Cinza de casca de arroz

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de arroz, e o Estado do Rio Grande do Sul desponta como o maior produtor nacional. A tabela 2 apresenta a produção brasileira de arroz e casca para a safra 2012/2013.

Tabela 2 - Produção brasileira de arroz e casca (safra 2012/2013).  
(continua)

<b>Região</b>	<b>Produção de arroz (mil t)</b>	<b>Produção de casca (mil t)</b>
<b>Norte</b>	<b>965,8</b>	<b>193,16</b>
<b>Nordeste</b>	<b>1.041,0</b>	<b>208,2</b>
<b>Centro-Oeste</b>	<b>660,0</b>	<b>132,0</b>
<b>Sudeste</b>	<b>135,1</b>	<b>27,02</b>
<b>Sul</b>	<b>9.260,1</b>	<b>1.852,02</b>
<b>Paraná</b>	<b>157,8</b>	<b>31,56</b>
<b>Santa Catarina</b>	<b>1.076,1</b>	<b>215,22</b>

Tabela 2 - Produção brasileira de arroz e casca (safra 2012/2013).

(conclusão)

<b>Rio Grande do Sul</b>	<b>8.026,2</b>	<b>1.605,24</b>
<b>Brasil</b>	<b>12.062,0</b>	<b>2.412,4</b>

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

Fonte: Conab (2013).

Na indústria do arroz, a casca é o subproduto mais volumoso, e pode ser aproveitada de diversas maneiras, como gerar energia. A geração de energia através da queima da casca do arroz mostra-se uma alternativa viável do ponto de vista tecnológico, ecológico e econômico. No caso da geração de energia pela combustão direta, o resíduo final é a cinza impura, que, se usada para algum fim comercial, irá fechar o ciclo da industrialização do arroz, possibilitando o total aproveitamento da matéria-prima proveniente da lavoura (FOLETTTO et al., 2005). A cinza gerada na combustão apresenta certa quantidade de carbono residual, portanto, se descartada no meio ambiente, tornar-se-á um poluente do solo.

Da Silva (2009) considera que o aproveitamento industrial da casca de arroz, como matéria-prima, faz-se oportuno devido ao seu baixo custo, além de sua contribuição para diminuir os problemas ambientais. Santos (2006), em seu estudo, ratifica que o uso comercial da CCA, além de diminuir o volume de resíduo disposto no meio ambiente, deixa de ser um problema e torna-se matéria-prima, aumentando a renda das beneficiadoras de arroz. A figura 4 aponta algumas opções de utilização para casca de arroz.

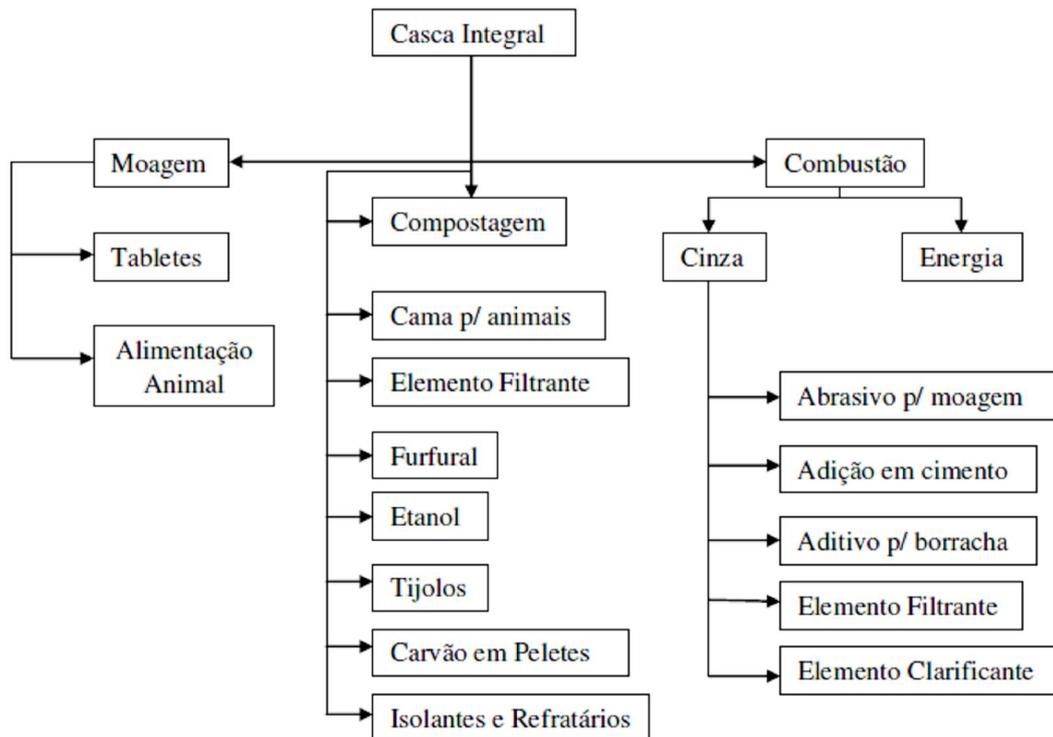


Figura 4 - Principais usos da casca de arroz.

Fonte: Da Silva (2009).

Na atualidade, as maiores consumidoras da casca de arroz são as próprias empresas beneficiadoras, que acabam por utilizá-la no processo de secagem do cereal. Como essas empresas, geralmente, não possuem um processo adequado para aproveitamento e descarte desse material, a CCA é lançada em terrenos ou cursos d'água e acaba por transformar-se em um agente poluidor, conforme mostram as figuras 5 e 6 (PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).



Figura 5 - Depósito de cinza de casca de arroz ao longo de estradas vicinais.

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).



Figura 6 - Depósito de cinza de casca de arroz a céu aberto.

Fonte: Missau (2004).

Segundo Foletto et al. (2005), a cinza de casca de arroz, por possuir alto teor de sílica (>92%), torna-se um resíduo valorizado, no entanto, apenas se tiver alta qualidade, a qual é mensurada pela alta superfície específica, pelo tamanho e pureza das partículas. Por serem compostas basicamente de sílica, a CCA pode ser utilizadas como matéria-prima de diversos materiais em diferentes ramos industriais, como o da construção civil, o da cerâmica e de vidros (FOLETTTO et al., 2005).

A CCA é um resíduo proveniente do processo de queima da casca do arroz. A casca, por sua vez, é o revestimento de proteção do grão, gerada pelo beneficiamento do arroz, que possui baixa densidade e elevado volume. A figura 7 mostra a divisão básica do grão de arroz.

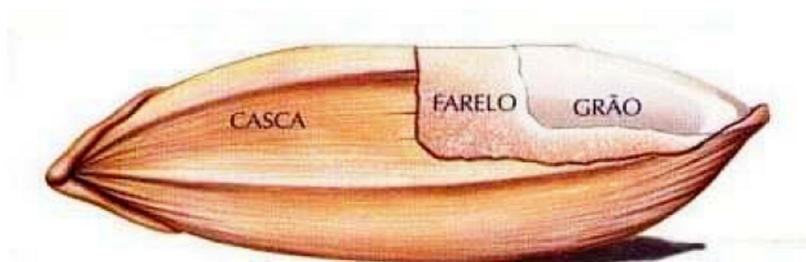


Figura 7 - Divisão do grão de arroz.

Fonte: Nitzke e Biedrzycki (2004).

A casca, em sua composição, possui 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de resíduos inorgânicos, os quais contém, em média, entre 95% e 98%, em peso, de sílica na forma amorfa (HOUSTON, 1972). Quando queimada, a celulose e a lignina podem ser removidas da casca, resultando em uma estrutura celular e porosa, como mostra a figura 8 (PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).

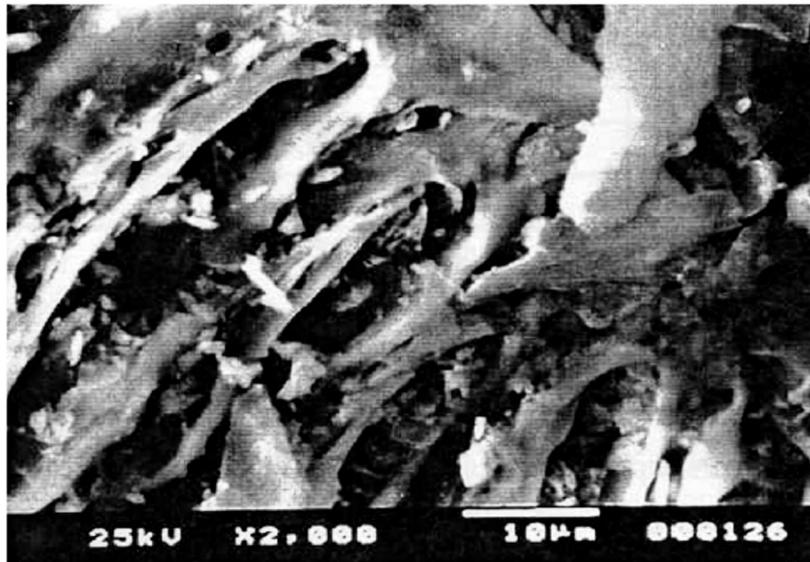


Figura 8 - Micrografia eletrônica de varredura da CCA queimada a 560°C.

Fonte: Silveira e Ruaro (1995 apud PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).

Prudêncio Junior, Santos e Dafico (2003) afirmaram que grande parte dessa cinza apresentam características pozolânicas, pois, quando finamente moídas e em presença de água, reagem com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  proveniente do processo de hidratação do cimento e formam compostos cimentantes. A cinza também modifica a microestrutura da zona de transição com o agregado, devido à redução do teor de CH combinado com a sílica, formando C-S-H e proporcionando uma interface mais uniforme e menos porosa (ISAIA, 1995).

De acordo com Prudêncio Junior, Santos e Dafico (2003), a casca de arroz, quando queimada parcialmente, possui um alto teor de carbono e, por isso, apresenta cor escura, já quando queimada inteiramente, gera cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, a depender das impurezas e condições de queima. Os autores ainda afirmam que, apesar da CCA ter um grande potencial como pozolana, não tem sido muito utilizada no concreto, seja no Brasil, seja no exterior, devido ao fato de a cinza com alto teor de carbono proporcionar uma cor escura ao concreto, o que ainda é pouco aceito pelo mercado consumidor.

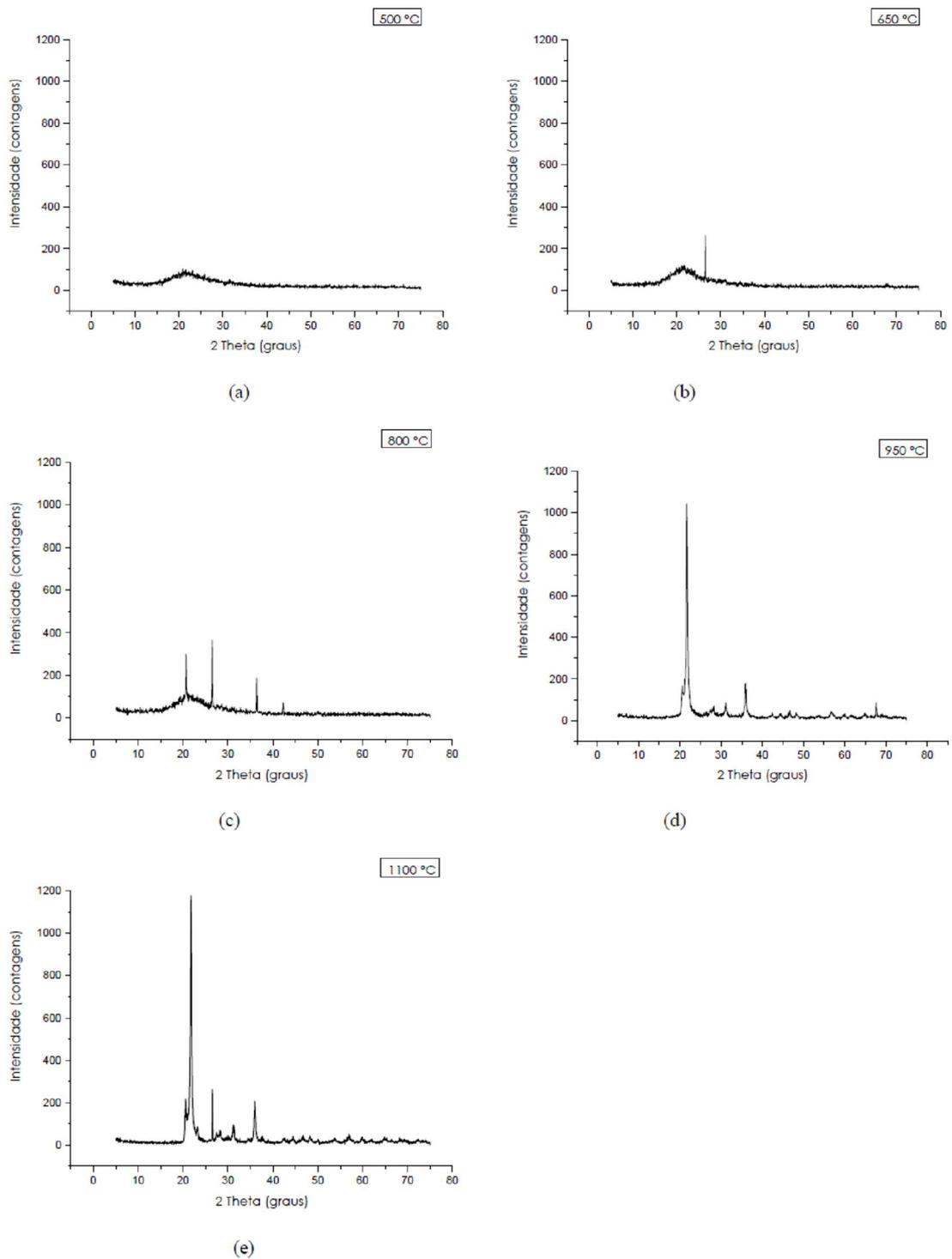
As mudanças de cor estão associadas ao processo de combustão da celulose e às transformações estruturais que ocorrem no material com a variação da

temperatura. Quanto mais escura a cinza, maior o teor de carbono presente, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada (DAL MOLIN, 2011).

Prudêncio Junior, Santos, Dafico (2003) relataram que Mehta (1992) foi, provavelmente, um dos pesquisadores que mais publicou artigos sobre o uso da CCA no concreto, em sua época, e que vários autores citados por ele concluem que a casca deve ser queimada em temperaturas baixas, entre 500°C a 800°C, para que a cinza resultante tenha boa atividade pozolânica, uma vez que a queima em temperaturas mais elevadas gera a cristalização da cinza, e, por consequência, diminui a sua reatividade.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), ao produzirem cinza à temperatura de 650°C, obtiveram um material rico em sílica amorfa (87%) e com baixo valor de perda ao fogo (2,1%).

Cordeiro (2009) queimou cascas em cinco temperaturas (500°C, 650°C, 800°C, 950°C e 1100°C), a fim de produzir um material com diferentes características cristalográficas. Nesse experimento, os difratogramas obtidos apresentaram maior número de picos cristalinos quando em temperaturas mais altas, o que valida a afirmação dos autores citados anteriormente, conforme mostram os gráficos da figura 9.



(a) 500°C, (b) 650°C, (c) 800°C, (d) 950°C, (e) 1100°C

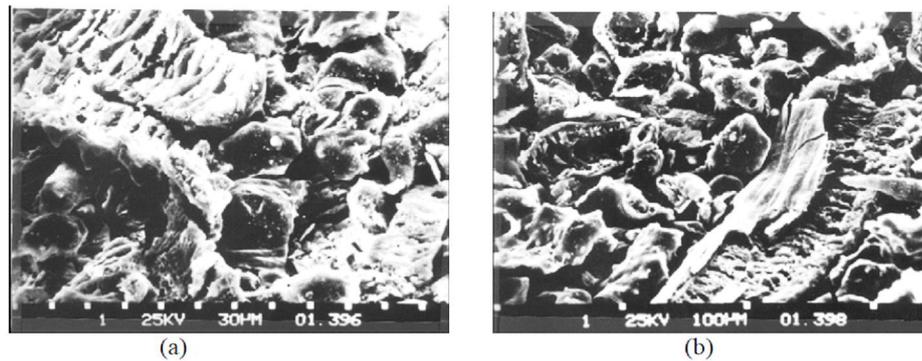
Figura 9 - Difração de raios X das CCA obtidas pela queima de casca de arroz em diferentes temperaturas.

Fonte: Cordeiro (2009).

No processo de queima a céu aberto ou no qual não haja um controle de temperatura, não existe uma uniformidade na queima, havendo zonas com temperaturas muito elevadas, em que as cinzas resultante serão cristalina, e outras com temperaturas baixas, que resulta em cinzas amorfa, motivo pelo qual esse tipo de queima gera cinzas com estrutura não homogênea (PEREIRA, 2008).

No Brasil, a maior parte dos estudos sobre o uso de CCA como pozolana foram realizados com cinzas que não tiveram um controle de temperatura na queima, não podendo, assim, evitar a formação de sílica cristalina. Contudo, os resultados obtidos nas pesquisas brasileiras concluíram que a CCA apresenta um desempenho satisfatório como pozolana, mesmo para cinzas que exibiam picos cristalinos nos ensaios de difração de raio X, podendo ser comparada à sílica ativa, que é considerada uma pozolana altamente reativa (PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003). Rêgo (2004) ao analisar aspectos da microestrutura das pastas compostas com cinzas de casca de arroz amorfa e cristalina, verificou que tanto a amorfa quanto a cristalina apresentaram aumento no índice de atividade pozolânica, quando finamente divididas, e mostraram-se altamente pozolânicas em relação aos ensaios realizados.

Além da temperatura de queima, outro fator que interfere na microestrutura da CCA é o tipo de queima. Agopyan (1991 apud POUHEY, 2006) relatou, por exemplo, que uma cinza produzida em um leito fluidizado possui uma estrutura porosa, ao passo que outra, produzida em um forno comum, apresenta uma fração de estrutura compacta e granulada. Na figura 10 são apresentadas as micrografias dos dois tipos de estrutura.



(a) produzida em forno comum; (b) produzida em leito fluidizado.

Figura 10 - Micrografias de cinza de casca de arroz

Fonte: Agopyan (1991 apud POUHEY, 2006).

A maioria da CCA é produzida em leitos fluidizados, porém Nehdi, Duquette e El Damatty (2003) propuseram a produção desta com o uso de um reator torbed e, ao testarem cinza de origem egípcia, obtiveram um produto altamente reativo e com menor teor de carbono quando comparado à produzida com leitos fluidizados.

Os trabalhos desenvolvidos no Brasil também concluíram que o grau de moagem das cinzas pode influenciar o seu desempenho, medido pelo índice de atividade pozolânica, conforme mostra a figura 11 (PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003). Os autores atribuem, ainda, a queda da pozolanicidade a partir de uma finura à dificuldade de dispersar partículas muito finas na argamassa.

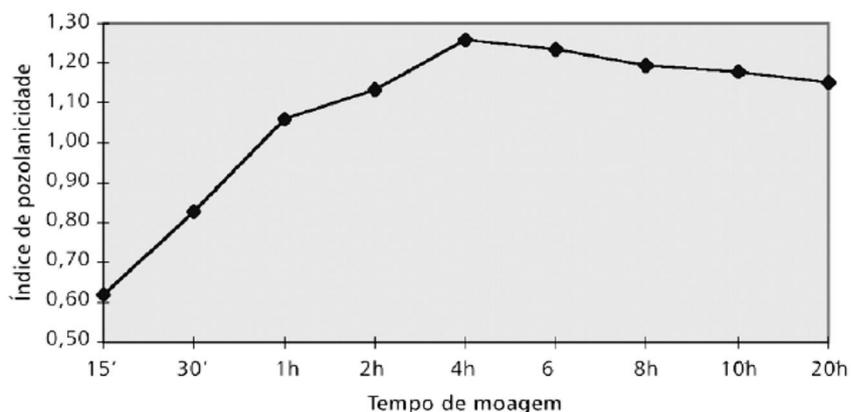


Figura 11 - Variação do IAP com o tempo de moagem.

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).

A moagem mostra-se importante frente ao desempenho das cinzas, pois altera suas propriedades físicas, como finura e superfície específica (Figura 12). Quanto maior o tempo de moagem, maior a finura e a superfície da cinza.

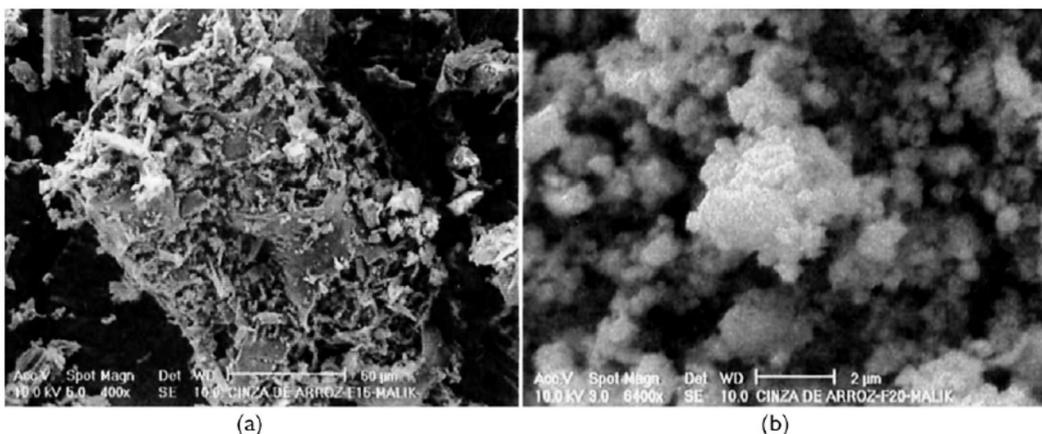


Figura 12 - Micrografia da CCA.

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNPIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).

Pouey (2006) constatou que o tratamento físico, ou seja, a diminuição da granulometria das cinzas, proporcionou os maiores benefícios no que se refere à resistência e à compressão, pois, quanto menor a granulometria, maior a pozolanicidade das cinzas e, conseqüentemente, maior a resistência à compressão dos cimentos.

Resumidamente, as propriedades da CCA estão diretamente ligadas ao tempo e à temperatura de queima, ao tempo de arrefecimento e às condições de moagem (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007).

Prudêncio Junior et al. (2003) relataram outra constatação relevante do trabalho de Santos (1997), referente à demanda de água das argamassas. Este descobriu uma diminuição demanda de água das argamassas devido, conforme o aumento do grau de moagem, atribuída à destruição progressiva da estrutura esponjosa das cinzas (Figura 13).

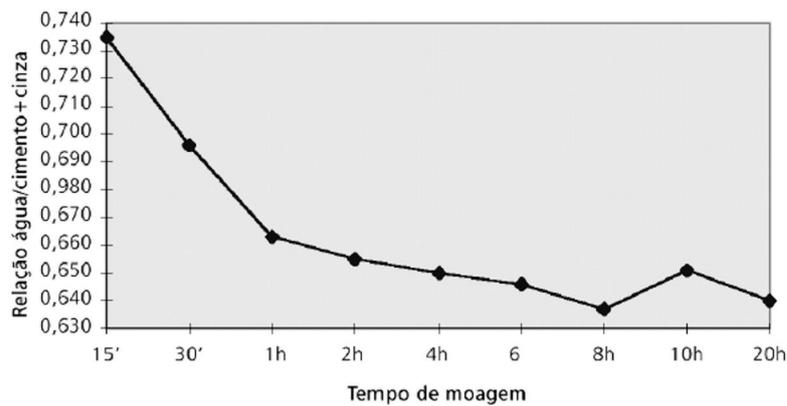


Figura 13 - Demanda de água no ensaio de pozolanicidade.

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNCIO JUNIOR et al., 2003).

Como explicado anteriormente, o consumo de água em concretos com adições minerais depende da forma, do teor de substituição ao cimento e da superfície específica da adição, que, geralmente, é maior do que a do cimento. Bui et al. (2005), ao fazer uma substituição parcial de 10%, 15% e 20% de CCA no cimento, observou um aumento na demanda de água conforme o aumento do teor de substituição. A fim de manter a mesma trabalhabilidade, os pesquisadores fizeram uso de aditivo superplastificante.

A utilização da CCA como adição influencia, benéficamente, tanto os aspectos relacionados à resistência mecânica, conforme pode ser visto no trabalho de Bui et al. (2005), como os relacionados à durabilidade. Alguns desses aspectos são favorecidos pelos efeitos físicos associados ao tamanho das partículas, geralmente mais finas que as do cimento Portland, e outros pelas reações pozolânicas e cimentícias (SILVEIRA, 1996).

Zhang e Malhotra (1995 apud FOLETTTO 2005) avaliaram as propriedades físicas e químicas da CCA incorporada ao concreto e o desempenho desta no concreto fresco e endurecido. Ao compararem o concreto contendo cinzas com o concreto composto somente de cimento Portland, perceberam melhor desempenho do concreto com cinzas frente à penetração de cloretos. O mesmo comportamento também foi constatado por Nehdi, Duquette, e El Damatty (2003), Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008) e Chindaprasirt et al. (2008) em ensaios com argamassa.

Mostardeiro Neto (2011), ao estudar a influência da substituição de teores de 10%, 20% e 30% de duas CCAs com diferentes teores de carbono gráfico em relação à absorção capilar e à resistividade elétrica do concreto, verificou, para ambas, a diminuição da absorção capilar e o aumento da resistividade elétrica devido à elevação do teor de substituição, mostrando a contribuição à durabilidade proporcionada por essa adição mineral.

Da Silva (2012), usando teores de 5%, 10%, 20% e 30% das mesmas cinzas usadas por Mostardeiro Neto (2011) em substituição ao cimento, relações  $a/ag$  de 0,35, 0,50 e 0,65 e períodos de cura úmida de três e sete dias, verificou menor retração dos concretos com cinzas em relação aos sem adição mineral, porém, houve acréscimo na retração conforme o aumento do teor de substituição, atribuindo-se, então, este comportamento, ao aumento do volume de pasta na mistura. Em relação à penetração de íons cloreto, a autora, ao realizar o ensaio de imersão após o período de retração, verificou que, além do comportamento benéfico que a redução da relação  $a/ag$  e o aumento do período de cura proporcionaram, houve um aumento do coeficiente de penetração conforme o aumento do teor de substituição para as duas cinzas analisadas.

Tendo em vista o melhor desempenho do concreto com cinza frente à várias características, Mehta (1992) concluiu que o uso dessa adição mineral deve ser levado em conta não apenas pela questão ambiental e pelo baixo custo, mas também pelas questões de segurança e durabilidade.

## **2.2 A ação de íons cloreto**

As estruturas de concreto armado sofrem degradação com a ação dos agentes agressivos provenientes do meio em que estão inseridas. Os líquidos e gases são conduzidos para o interior do concreto através de mecanismos de transporte e acabam por deteriorar as estruturas, diminuindo a sua vida útil.

A ação dos íons cloreto no concreto simples é quase inócua, pois tem pouca influência sobre suas propriedades. No entanto, torna-se um elemento extremamente danoso quando o enfoque é a armadura do concreto estrutural

exposto à ambiente agressivo, pois é um dos principais causadores da corrosão (ISAIA, 1995).

### 2.2.1 Mecanismos de transporte no concreto

A durabilidade do concreto depende muito da facilidade com a qual os fluidos, tanto líquidos como gases, podem penetrar no concreto e deslocar-se no seu interior. Essa característica é, geralmente, mencionada como permeabilidade do concreto (NEVILLE, 1997). Esse deslocamento depende, basicamente, da estrutura da pasta de cimento hidratado. Portanto, Mehta e Monteiro (2008) salientam que a durabilidade mantém uma relação direta com a estrutura de poros e com as microfissuras da pasta de cimento.

O transporte dos agentes agressivos no concreto é regido por mecanismos físico-químicos, os quais dependem do fluxo da substância e de sua concentração, das condições ambientais, da velocidade de renovação dos agentes agressivos, da estrutura e das dimensões dos poros, do grau de saturação dos poros e da temperatura (DA SILVA, 2011).

Os mecanismos de transporte mais importantes são a permeabilidade, a difusão, a absorção capilar e a migração, podendo, ainda, existir a combinação entre eles (DA SILVA, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a água é considerada o principal agente de degradação de materiais, pois é capaz de penetrar em poros extremamente finos, possui elevada temperatura de evaporação (depende da pressão) e dissolve mais substâncias do que qualquer outro líquido, incluindo íons agressivos que podem causar a decomposição química de materiais sólidos.

Hilsdorf (1995 apud DA SILVA, 2011) elege a resistência à penetração de agentes agressivos como critério mais confiável de caracterizar concretos em relação à durabilidade.

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado tem evoluído devido a maior quantidade de estudos sobre os mecanismos de transporte de líquidos e gases nos meios porosos, como o concreto (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). Portanto, o conhecimento e o entendimento dos mecanismos de

transporte de líquidos e gases no concreto são de fundamental importância para que se desenvolvam concretos duráveis e que atendam à vida útil estimada em projeto.

#### 2.2.1.1 Permeabilidade

Segundo Neville (1997), permeabilidade é definida como a facilidade de escoamento de um fluido através de um meio poroso. O autor refere-se a um escoamento sob diferença de pressão.

Devido à existência de poros de natureza diferentes, alguns dos quais contribuem para a permeabilidade, é importante distinguir desta, a porosidade. Porosidade é a medida da proporção no volume total do concreto ocupada pelos poros, geralmente expressa em porcentagem (NEVILLE, 1997). De acordo com Neville (1997), se o concreto possuir uma porosidade alta e os poros forem interligados, terá, também, uma permeabilidade alta. No entanto, se o sistema de poros não proporcionar uma continuidade para o escoamento de fluidos, esta propriedade será baixa, mesmo que a porosidade seja alta.

Já quanto à permeabilidade, Mehta e Monteiro (2008) apontam-na como um dos principais mecanismos de transporte que influenciam a deterioração do concreto, pois uma estrutura que apresente esta propriedade elevada fica mais suscetível ao ataque de agentes agressivos. Esta é uma propriedade que depende principalmente da quantidade e do tipo de aglomerante e adições minerais, da relação a/ag e das condições de cura, fatores que governam a formação da porosidade no concreto (ISAIA, 1995).

#### 2.2.1.2 Absorção capilar

Um dos principais mecanismos de penetração de líquidos no concreto é o transporte por capilaridade, no qual os poros produzem grandes forças capilares que controlam o ingresso de líquidos. Essas forças capilares são causadas pela tensão superficial do líquido que penetra no interior dos poros e depende das características

do líquido (viscosidade, densidade) e da microestrutura dos poros (NEPOMUCENO, 2005). O líquido é absorvido pela matriz porosa do concreto por sucção capilar, de modo que este atua como uma esponja (HAMILTON III, 2007). Contudo, o fenômeno da absorção não acontece em concretos saturados, pois o concreto deve estar com os poros secos ou parcialmente secos para que seja possível a absorção de água por capilaridade (HELENE, 1993).

A água, ao incidir em estruturas que possuem cloretos na superfície, carrega esses íons dissolvidos para o interior do material, através da absorção capilar, cujos sais permanecem aderidos à superfície por adsorção capilar. O acúmulo desses sais poderá ocasionar a deterioração da estrutura, devido à corrosão das armaduras.

A absorção capilar é um dos mecanismos de transporte que mais afeta a durabilidade das estruturas, principalmente as expostas à chuva, que estão constantemente sujeitas a ciclos de umedecimento e secagem (NEPOMUCENO, 2005). Mota et al. (2010), a fim de representarem peças de concreto em edificações à beira mar, que estivessem, em algum momento, em contato com a água do mar, em comparação à concretos submetidos apenas à névoa salina, verificaram teores de cloretos bem acima dos valores prescritos por normativas. Estes teores foram encontrados até a profundidade de cobrimento de 2,5 cm, em concretos expostos a ciclos de molhagem e secagem em recipiente com água do mar. Medeiros et al. (2010), ao analisarem teores de cloretos em pilares de uma estrutura, localizada na cidade do Rio de Janeiro, também verificaram maiores teores de cloretos em pilares sujeitos a ciclos de umedecimento e secagem, o que indica que este é um fator de grande importância para a penetração de íons cloreto em uma estrutura de concreto armado.

#### 2.2.1.3 Difusão e migração

Neville (1997) define difusão como sendo o deslocamento de um fluido através do concreto, devido a uma diferença de concentração e não de pressão. Para o autor, a difusão é um processo que equilibra as diferentes concentrações. A difusão de íons cloreto ocorre quando a concentração do lado de fora do concreto é maior do que a do lado de dentro. Havendo umidade suficiente para este

movimento, os íons cloreto deslocam-se de regiões de alta concentração (elevada energia) para regiões de baixa concentração (baixa energia) (HAMILTON III, 2007). Já a migração ou eletro-migração é o fluxo de íons, através dos poros do material, em campo elétrico, devido a uma diferença de voltagem. Em estruturas reais, esse procedimento ocorre nos ensaios de extração de cloretos de estruturas contaminadas por aplicação de potencial e nas que são submetidas à realcalinização. Esse procedimento é um mecanismo eletroquímico de reparação de estruturas de concreto armado e é muito utilizado para ensaios acelerados a fim de determinar a penetrabilidade do concreto ao íon cloreto (NEPOMUCENO, 2005).

A difusão através da água é quatro vezes maior do que através do ar. O coeficiente de difusão varia com a idade, pois há uma modificação no sistema de poros do concreto conforme a evolução da hidratação do cimento (NEVILLE, 1997).

Segundo Neville (1997), o dióxido de carbono e o oxigênio são de grande importância para a difusão dos gases, posto que o primeiro provoca a carbonatação da pasta de cimento e o segundo possibilita a corrosão das armaduras no concreto.

Além dos gases, íons como cloretos e sulfatos também se deslocam por difusão na água dos poros e, nessa água, ocorrem as reações com a pasta de cimento hidratado. Assim como na permeabilidade, a relação a/c também influencia a difusão, a qual é menor quanto menor for a relação a/c (NEVILLE, 1997).

Conforme Nepomuceno (2005), determinar o coeficiente de difusão dos cloretos é um grande desafio para o meio acadêmico, já que é dele que depende a previsão da vida útil das estruturas de concreto em ambientes agressivos.

Um ensaio que busca mensurar a difusão dos cloretos no concreto é o de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata. Otsuki et al. (1992), na busca de um indicador químico para medir a penetração de íons cloretos em materiais cimentícios endurecidos, realizaram um estudo com nitrato de prata, nitrato de chumbo e nitrato de tálio. Ao aspergir os produtos em concretos contaminados por cloretos, os autores perceberam que somente o nitrato de prata delimitava, pela mudança de cor, a região contendo cloretos. Isto ocorre porque, em presença de luz, a solução de  $\text{AgNO}_3$  reage preferencialmente com os cloretos livres e forma um precipitado branco de cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ), e reage com os íons  $\text{OH}^-$  na região isenta de cloretos, formando um precipitado marrom de óxido de prata ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ), dessa forma delimita a profundidade de penetração de cloretos.

A migração é bem caracterizada no ensaio da ASTM C1202, este ensaio é um dos mais utilizados para avaliar a resistência à penetração de cloretos em concretos. Este procedimento consiste em aplicar uma diferença de potencial de 60 V a qual induz os íons cloreto a atravessar uma fatia de concreto (detalhado no item 3.4.1). Neste método há um predomínio do mecanismo de migração iônica, pois a elevada tensão permite desprezar as forças de difusão e com o concreto saturado não existe absorção (HISADA; NAGATAKI; OTSUKI, 1999).

O ensaio é uma forma rápida de avaliar a qualidade do concreto e, segundo Neville (1997) o ensaio pode ser útil para comparação e determinação do concreto mais adequado. Isaia (1995) relata que o ensaio apresenta a vantagem de ser aplicado em quase todos os tipos de concreto, principalmente quando se deseja comparar desempenho em relação a outro de referência.

### 2.2.2 Corrosão das armaduras

Há uma preocupação mundial, cada vez maior, com a durabilidade das estruturas de concreto armado, pois muitas delas apresentam, precocemente, patologias que interferem diretamente na redução de suas vidas úteis. Uma das principais causas da deterioração de estruturas de concreto é a corrosão das armaduras.

Os problemas técnico-operacionais e as consequências ocasionadas pela corrosão das armaduras são um dos maiores problemas enfrentado pela engenharia civil, tanto pelo aspecto da eficiência dos reparos como pelo alto custo econômico necessário para a recuperação das estruturas atacadas por essa patologia (ISAIA, 1995).

Segundo Cascudo (2005), a corrosão das armaduras das estruturas de concreto é um processo de deterioração da fase metálica, que implica uma progressiva perda de seção das barras de aço. Em estágios avançados, ela compromete a segurança estrutural, podendo levar a estrutura ao colapso.

A deterioração do concreto que contém metais embutidos, tais como eletrodutos, canos e armaduras de aço, é atribuída ao efeito combinado de mais de

uma causa. No entanto, a corrosão do metal embutido é invariavelmente uma das causas principais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), há a expectativa de que, se a armadura estiver protegida da ação do ar, por uma camada de concreto espessa e de alta compactidade, a corrosão do aço não ocorreria. A espessura e a porosidade da camada de cobrimento e o microclima do ambiente estão entre as principais causas da corrosão das armaduras (ISAIA, 1995). O concreto protege as armaduras de aço em seu interior tanto por ação física como por ação química, devido a sua alta alcalinidade (HELENE, 1993).

A corrosão das armaduras do concreto é um típico caso de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que os eletrólitos possuem características de resistividade elétrica mais alta do que as dos eletrólitos típicos (meio aquoso comum, não confinado a uma rede de poros) (CASCUDO, 1997). Os potenciais eletroquímicos para formar as células de corrosão podem ser gerados de duas formas (MEHTA; MONTEIRO, 2008):

a) Células de composição podem ser formadas quando dois metais diferentes estão imersos no concreto, como aço e eletrodos de alumínio, ou quando existem variações nas características superficiais do aço (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

b) Células de concentração podem ser formadas devido às diferenças de concentração de íons dissolvidos no entorno do aço, tais como álcalis, cloretos e oxigênio (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para Cascudo (1997), o mecanismo de corrosão eletroquímica gera a formação de pilhas eletroquímicas, que podem estabelecer-se entre dois metais diferentes ou em regiões diferentes de um mesmo metal.

Em resumo, na corrosão eletroquímica em meio aquoso, há a formação de íons metálicos e a liberação de elétrons na região anódica, na qual ocorre a oxidação do metal (região deteriorada), e, simultaneamente, há o consumo de todos esses elétrons na região catódica e a redução dos íons do eletrólito, isto é, a neutralização dos íons de hidrogênio ou a formação de íons carregados negativamente. O resultado da combinação dos produtos das reações anódicas e catódicas gera os produtos finais de corrosão (CASCUDO, 1997).

Cascudo (1997) relatou que a diferença de potencial é essencial ao processo de corrosão, porque dela depende a formação da pilha eletroquímica. A diferença de

potencial pode originar-se de várias causas, sendo a aeração diferencial considerada a principal causa geradora. A figura 14 ilustra que, na formação de aeração diferencial, as zonas menos aeradas (concretos mais densos) tornam-se cátodos e as zonas mais aeradas (concretos mais porosos) tornam-se áreas anódicas.

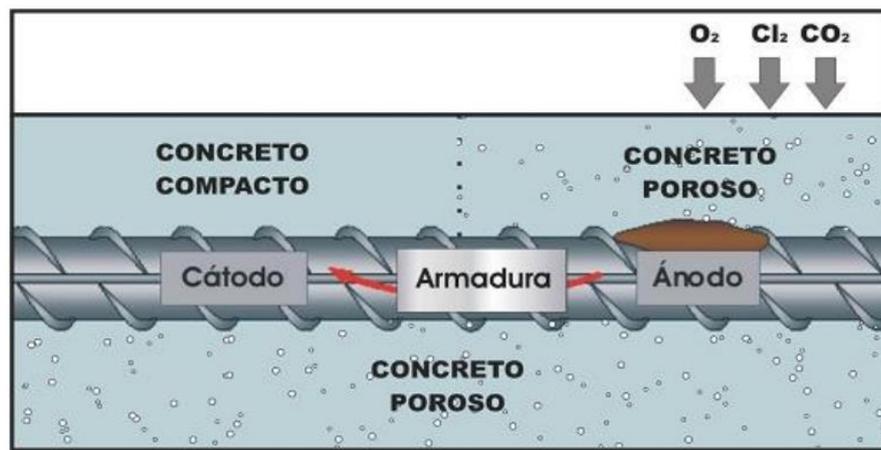


Figura 14 - Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio.

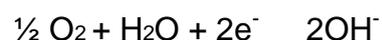
Fonte: Cascudo (1997).

As reações do processo corrosivo são bastante complexas e numerosas, porém podem ser apresentadas de maneira simplificada, da seguinte forma:

a) Nas regiões anódicas (corroídas):



b) Nas regiões catódicas (não corroídas):



Nas reações, pode-se observar que o oxigênio é consumido e a água é regenerada. Segundo Neville (1997), não há corrosão em concreto seco, em umidade relativa abaixo de 60%, e, também, não há em concreto completamente imerso, a não ser quando a água pode reter ar. O autor salienta que a umidade relativa ótima para

corrosão é entre 70% e 80%, posto que, em umidades mais altas, a difusão do oxigênio através do concreto é prejudicada.

Andrade (1992) coloca a carbonatação e os íons cloreto como os principais agentes iniciadores do processo de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado.

O processo de corrosão do aço no concreto passa, inicialmente, por uma fase em que os agentes agressivos alteram as condições do concreto no entorno da barra de aço, despassivando a armadura, e, posteriormente forma-se uma célula de corrosão que propaga o efeito da corrosão (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

A película passivadora que protege o aço é gerada por uma reação eletroquímica rápida e extensa, que resulta na formação de uma fina camada de óxidos aderente ao aço (POURBAIX, 1987 apud FIGUEIREDO; MEIRA, 2011). Essa película apresenta alta resistência ôhmica, que confere pequenas taxas de corrosão, pois impede o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

Para que se inicie a corrosão, a camada de passivação deve ser atravessada. Os íons cloreto ativam a superfície do aço formando o ânodo, sendo o cátodo a superfície passivada (NEVILLE, 1997). Figueiredo e Meira (2011) mencionam que os íons cloreto penetram nos poros do concreto, juntamente com a água e o oxigênio, provocando desestabilizações pontuais na película passivadora da armadura. Assim, desencadeiam uma corrosão por pites, diferente da ocasionada pela carbonatação, que se faz generalizada. A figura 15 apresenta os tipos de corrosão.

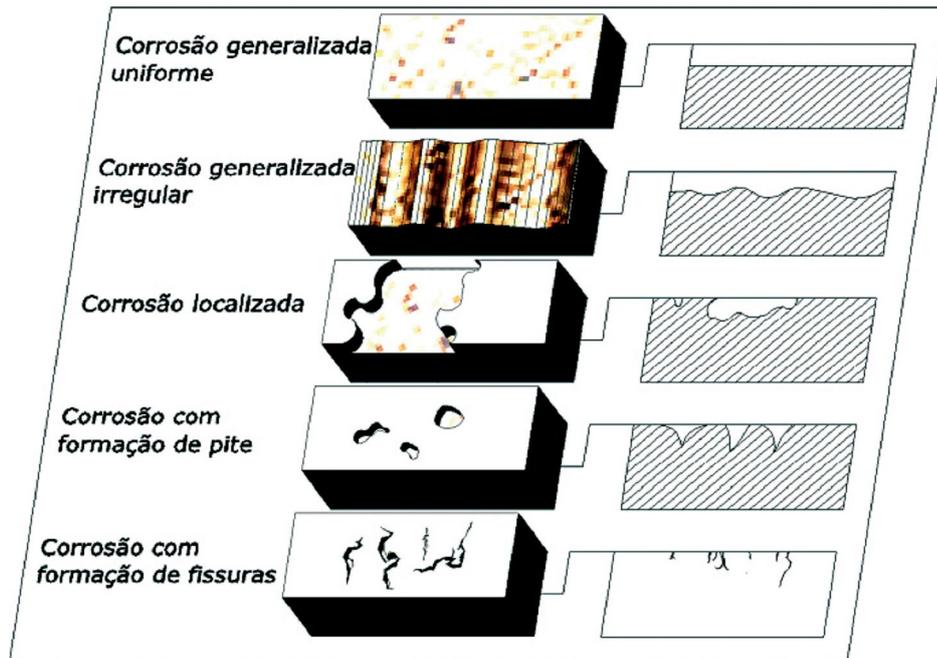


Figura 15 - Tipos de corrosão.

Fonte: Feliu (1984 apud FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

Cascudo (2005) relatou que a despassivação da armadura ocorre frente à, pelo menos, uma das duas condições básicas: a) presença de quantidade suficiente de cloretos ou b) diminuição da alcalinidade do concreto. Esta última é causada, principalmente, pelas reações de carbonatação do concreto. A resistividade elétrica do concreto também é reduzida na presença de umidade e de sais (ISAIA, 2011).

De acordo com Neville (1997), a principal ação do ataque por cloretos é a corrosão do aço, que, conseqüentemente, danifica o concreto que está em torno da armadura. Os produtos da corrosão ocupam um volume de seis a sete vezes maior do que o aço que lhes deu origem. Isso se dá, pois sua formação resulta na expansão, na fissuração, que, em geral, é paralela à armadura, e no deslocamento, quando o processo está em estágio mais avançado, ilustrado na figura 16 (ISAIA, 2011). Isso torna mais fácil a entrada de agentes agressivos em direção ao aço, levando ao conseqüente aumento da velocidade de corrosão (NEVILLE, 1997).

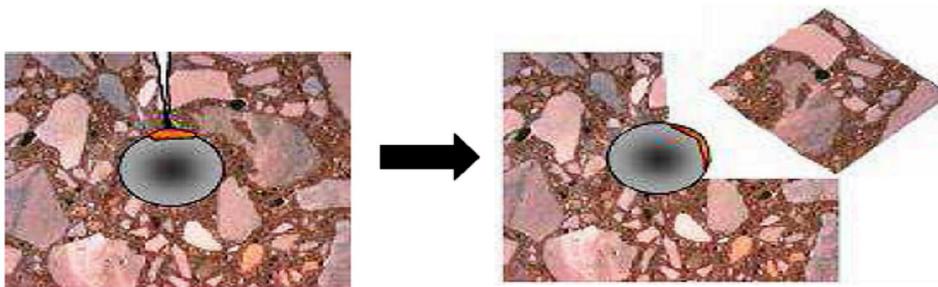


Figura 16 - Ilustração da fissuração e destacamento do concreto devido a corrosão da armadura.

Fonte: Cascudo (1997).

Nos casos em que o suprimento de oxigênio é limitado, pode-se ter uma corrosão lenta, na qual os produtos de corrosão, por terem um volume menor, podem deslocar-se para os espaços vazios do concreto sem ocasionar fissurações ou escamamento progressivo (NEVILLE, 1997).

A proteção do aço é de extrema importância no combate à corrosão. Portanto, a camada de cobrimento e a qualidade do concreto são fundamentais, já que, além de formarem uma barreira química em torno do concreto, também proporcionam uma proteção física. Um concreto com baixa permeabilidade dificulta o ingresso de agentes agressivos, bem como de água e oxigênio, que são necessários para a promoção da corrosão eletroquímica (SHIESSL; BAKKER, 1988 apud FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

### 2.2.3 Penetração de íons cloreto

De acordo com Figueiredo e Meira (2005), os íons cloreto podem chegar até o concreto de várias formas, como através do uso de aceleradores de pega que contêm cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), da impureza dos agregados e da água, da maresia, da água do mar, do uso de sais de degelo e de processos industriais. No interior do concreto, os íons cloreto podem ser encontrados quimicamente combinados,

fisicamente adsorvidos na superfície dos poros capilares e livres na solução dos poros do concreto.

O problema do ataque por cloretos geralmente surge quando os íons originam-se do meio. Independentemente de sua origem, os cloretos penetram no concreto devido à movimentação da água em que estão contidos, através dos mecanismos de difusão dos íons na água e da absorção destes pelo concreto. Se o concreto for exposto à penetração de íons cloreto por muito tempo, o resultado será altas concentrações de íons cloreto na superfície da armadura (NEVILLE, 1997).

Segundo Neville (1997), em situações em que o concreto permanece submerso, os cloretos penetram até profundidades significativas, mas não há corrosão, a não ser que haja oxigênio presente no cátodo. A penetração de cloretos no concreto faz-se mais agressiva quando este está suscetível a períodos de secagem e molhagem. Ao ser molhado pela água do mar, por exemplo, o concreto vai sendo encharcado por absorção e, após, no período de secagem, a água pura evapora através das extremidades dos poros capilares, deixando como resquícios apenas os sais. Dessa forma, a concentração de sal na superfície do concreto aumenta, originando uma diferença de concentração e fazendo com que o sal desloque-se para as partes de menor concentração no interior do concreto, através do mecanismo de difusão.

#### 2.2.3.1 Teores limite de cloretos

Como mencionado no item 2.1.3, os íons cloreto podem estar presente no concreto devido a diferentes causas. Entretanto, para que se inicie o processo de corrosão, deve haver uma concentração mínima de íons cloreto na superfície do aço, embora não exista um limite universalmente aceito para essa concentração (NEVILLE, 1997).

Uma certa quantidade de íons cloreto pode ser aceita sem risco de corrosão, pois, após reagirem com os aluminatos, provenientes do clínquer, esses íons não estarão livres para despassivar a armadura (HANSSON et al., 1985 apud FIGUEIREDO, 2011). Pozolanas que apresentam teores elevados de alumina em sua composição, como a cinza volante, são adições que apresentam boa

capacidade de retenção de cloretos (ISAIA, 1995). No entanto, Figueiredo (2011) afirma que existe um valor limite de concentração de íons cloreto que pode romper a camada passivadora e provocar a corrosão da armadura. Porém, não há consenso em relação a esse valor, apesar de algumas normas apresentarem valores orientadores.

O Quadro 1 apresenta alguns desses valores estabelecidos por diferentes normativas.

NORMA	PAÍS	ANO	TEOR DE CLORETOS RECOMENDADO
NBR 6118 (ABNT)	Brasil	2003	Não se reporta ao teor de cloretos.
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos.
			$\leq 0,3\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal.
			$\leq 1\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco.
			$\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento (concreto protendido).
CEB	Europa	1991	0,40% em relação à massa de cimento.
ENV 206	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	$\leq 0,60 \text{ kg/m}^3$ de concreto.

Quadro 1 - Teor limite de cloreto para diversas normas.

Fonte: Figueiredo (2005).

Angst et al. (2009) fazem uma revisão sobre o conteúdo crítico de cloretos e métodos para determinação de conteúdo de cloretos totais e livres em concreto armado.

Para Tuuti (1993 apud ISAIA, 1995), o teor crítico de cloretos necessário para dar início ao processo de corrosão é constante para dado concreto e dadas condições de exposição, porém, o aumento da concentração desses íons na superfície gera redução do teor crítico.

Segundo Raharinaivo e Génin (1986), o teor de íons cloreto influencia diretamente a natureza dos produtos finais de corrosão, sendo a goetita, a lepidocrocita e a magnetita os principais produtos encontrados. Desses, apenas a

magnetita não apresenta um volume tão grande de íons cloreto em sua formação (WILKINS; SHARP 1990 apud FIGUEIREDO, 2011).

Conforme Neville (1997) é difícil estabelecer um limite de penetração de íons cloreto abaixo do qual não exista corrosão. Os fatores que influenciam esse limite, muitas vezes, não são bem conhecidos. Na prática, a prevenção deve ser feita pelo controle do ingresso de íons cloreto no concreto, através do cobrimento da armadura e da penetrabilidade do concreto de cobrimento.

### 2.2.3.2 Fatores que influenciam o ingresso de íons cloreto no concreto

#### 2.2.3.2.1 Fatores climáticos

O meio ambiente interfere significativamente na durabilidade das estruturas. Para Nepomuceno (2005), a umidade relativa e a temperatura do meio, a periodicidade das chuvas e a orientação dos ventos estão entre os principais aspectos do meio ambiente que podem interagir com a estrutura e, conseqüentemente, influir na durabilidade desta. Almusallam (2001) relatou que a temperatura e a umidade relativa do ar e a velocidade do vento afetam tanto as propriedades do concreto fresco quanto as do concreto endurecido.

Nepomuceno (2005) ressalta que, especificamente no Brasil, por ser um país que apresenta regiões de climas distintos, é importante determinar parâmetros para o concreto que poderão ser usados em projetos arquitetônicos e estruturais que estejam em conformidade com cada realidade. Por isso, faz-se necessário seguir as especificações mínimas recomendadas pela Norma Brasileira (NBR) 6118 quanto ao concreto (ABNT, 2007) para assegurar a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Para Neville (1997), a elevação da temperatura aumenta a velocidade das reações, e, com isso, as estruturas que se encontram em regiões quentes deterioram-se mais rapidamente do que aquelas localizadas em regiões de clima frio. Segundo GEHO-CEB (1993 apud LIMA, 2011), um aumento de 10°C na temperatura dobra a velocidade das reações (Lei de Arrhenius).

O comportamento da corrosão por pite (localizada, puntiforme) em ambientes que contêm cloreto, é muito influenciado pela temperatura (BENJAMIM; SYKES 1990 apud CASCUDO, 1997). Os autores ainda afirmam, a partir de ensaios feitos em argamassas, que os teores limites críticos de cloretos serão menores conforme o aumento da temperatura.

Lima (2011) esclarece que a temperatura alta do ambiente, aliada à baixa umidade relativa deste, acelera a retração plástica do concreto, e, conseqüentemente, gera fissuras que degradam o concreto, pois permitem a penetração de oxigênio e umidade, podendo dar origem à corrosão das armaduras.

A umidade relativa do ambiente tem papel fundamental na penetração dos íons cloreto no concreto, pois a umidade dos poros do concreto tende a estar em equilíbrio com o meio e os agentes agressivos são influenciados pela umidade interna do concreto. Por exemplo, de acordo com Neville (1997), a difusão de gases como CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, praticamente não ocorre em concretos saturados e, em concretos com poros quase secos, a migração e a difusão de íons, como sulfatos e cloretos, é prejudicada.

Cada agente do meio ambiente interfere, por si só, de uma forma na degradação do concreto, mas o ideal é observar e estudar o efeito combinado desses agentes, pois é dessa forma que eles atuam nas estruturas, diminuindo a durabilidade das mesmas.

#### 2.2.3.2.2 Condições de exposição

As estruturas de concreto devem ser concebidas de forma a fornecer condições de uso e segurança às pessoas, durante sua vida de serviço. Quando se trata de vida de serviço de uma estrutura de concreto, as condições ambientais a que essa estrutura está exposta tornam-se tão importantes quanto suas propriedades mecânicas (LIMA, 2005). Temperatura, umidade relativa, vento, poluição, agressividade da água, entre outros, são elementos que têm influência na vida útil das estruturas de concreto (LIMA, 2005).

Os conceitos de caracterização dos diferentes ambientes em contato com as estruturas foram introduzidos, no Brasil, por Helene (1986), que os classificou em ambiente marinho, ambiente rural, ambiente urbano, entre outros (LIMA, 2005).

Segundo Lima (2011), são mais comumente estudados, devido a sua agressividade, os ambientes urbano e marinho. Porém, o autor chama a atenção para o fato de que, devido às características de urbanização atuais, cabe acrescentar, na referida classificação, o ambiente marinho urbano, em que se tem a ação de condições presentes nos dois ambientes.

O ambiente urbano, dadas suas características de concentração populacional, provoca alterações no meio ambiente original. Essas alterações, quanto à deterioração das estruturas de concreto, resultam na ocorrência de chuvas ácidas, na deposição de partículas sólidas e no lançamento de CO<sub>2</sub> na atmosfera, o que, através da carbonatação, provoca a corrosão das armaduras (LIMA, 2011).

De acordo com Lima (2005), o ambiente marinho é o que mais vem sendo estudado, devido ao alto grau de agressividade que propicia. Estruturas marítimas estão expostas à ação simultânea de processos de deterioração física e química. O concreto, nesse ambiente, pode deteriorar-se devido a efeitos combinados da ação química dos constituintes da água do mar sobre os produtos de hidratação do cimento, da pressão de cristalização dos sais dentro do concreto, da ação do congelamento em climas frios, da corrosão da armadura e da erosão física pela ação das ondas e objetos flutuantes (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Lima (2011) relatou que muitos autores e códigos de normalização apresentam o ambiente marinho dividido em diferentes zonas. Essa divisão caracteriza-se pelo distinto acesso de água, umidade e oxigênio. A autora apresenta essa divisão em zona de atmosfera marinha, zona de respingos, zona de variação de marés e zona submersa. Dessas, as regiões que possuem ciclos de molhagem e secagem (zonas de respingos e variação de marés) são as que apresentam maior penetração de cloretos. Costa e Appleton (1999), avaliando concretos em ambiente marinho em diferentes condições de exposição, verificaram maiores velocidades de penetração de cloretos na zona de maré.

A NBR 6118 (ABNT, 2007) contempla uma classificação de agressividade ambiental de acordo com o meio em que a estrutura está inserida (Quadro 2).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1),2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1),2)</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>1),3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental.

Fonte: ABNT (2007).

A NBR 6118 (ABNT, 2007) ainda contém os Quadros 3 e 4, em que apresenta, respectivamente, aspectos relativos aos concretos mais adequados a cada classe de agressividade ambiental e às espessuras de cobrimento.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	m0,65	m0,60	m0,55	m0,45
	CP	m0,60	m0,55	m0,50	m0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	- C20	- C25	- C30	- C40
	CP	- C25	- C30	- C35	- C40

## NOTAS

1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Quadro 3 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Fonte: ABNT (2007).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Todos	30	35	45	55

<sup>1)</sup> Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

<sup>2)</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos alfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq$  15mm

<sup>3)</sup> Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq$  45mm.

Quadro 4 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para  $c = 10\text{mm}$ .

Fonte: ABNT (2007).

### 2.2.3.2.3 Fatores inerentes ao concreto

A resistência do concreto à penetração de agentes agressivos, determinada por fatores inerentes ao concreto, depende, dentre outros fatores, da composição, do tipo e da quantidade de cimento, além da relação a/ag.

A principal forma de fixação dos íons cloreto no concreto ocorre pela reação deste com o  $C_3A$ , formando o cloroaluminato de cálcio (NEVILLE, 1997). A quantidade de  $C_3A$  do cimento determina a capacidade de combinação com os íons cloreto (BAKKER, 1988). Portanto, pode-se concluir que mais íons cloreto ficam retidos quanto mais alto for o teor de  $C_3A$  do cimento e, quanto maior for o consumo de cimento na mistura (NEVILLE, 1997). Logo, menos íons cloreto ficam livres para atacar a armadura. Somente os cloretos livres estão disponíveis para despassivar a armadura e deflagar a corrosão, embora os combinados possam reverter-se em livres por carbonatação ou por outras situações (ISAIA, 1995).

Rasheeduzzafar et al. (1990), trabalhando com cimentos de diferentes teores de  $C_3A$ , verificaram que aqueles com teores mais elevados de  $C_3A$  podem apresentar melhor desempenho, frente à agressividade dos íons cloreto, em relação aos que possuem teores baixos de  $C_3A$  (Tabela 3).

Tabela 3 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de  $C_3A$ .

Teor de $C_3A$	% de cloretos livres	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2%	86%	Referência
9%	58%	1,75 vezes
11%	51%	1,93 vezes
14%	33%	2,45 vezes

Fonte: adaptado de Rasheeduzzafar et al. (1990 apud FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

Outro fator importante é a relação a/ag. Para Figueiredo (2005), a quantidade e o tamanho dos poros do concreto endurecido estão diretamente relacionados com a relação a/ag. Sabe-se que quanto maior a relação a/ag, maior será a porosidade e

a permeabilidade do concreto, e, conseqüentemente, maior será a facilidade de penetração dos agentes agressivos. Halamickova e Detwiler (1995), ao estudarem argamassas com diferentes teores de areia e relações a/c de 0,4 e 0,5, perceberam um aumento do tamanho dos poros e da permeabilidade quando se aumentou a relação a/c para um mesmo grau de hidratação.

### 2.2.3.3 Influência da cura na resistência à penetração de cloretos

A durabilidade das estruturas está diretamente relacionada à estrutura porosa e à penetrabilidade do concreto, uma vez que concretos menos permeáveis dificultam o ingresso de agentes agressivos, como íons cloreto, os quais provocam a despassivação da armadura, dando origem à corrosão e comprometendo a durabilidade das estruturas.

Segundo Page, Short e Tarras (1981), a cura interfere nas propriedades da pasta de cimento endurecida, e, portanto, na difusibilidade dos íons cloreto. Os autores relatam que as condições de cura modificam a estrutura dos poros, alterando, assim, a porosidade final.

A porosidade é bastante sensível ao modo de cura, podendo quintuplicar ou até decuplicar se a superfície do concreto secar prematuramente, criando gradiente de dessecação interna, enquanto as reações de hidratação não estiverem suficientemente adiantadas (ISAIA, 1995).

A literatura tem apresentado a influência dos tipos e dos períodos de cura sobre a durabilidade do concreto, uma vez que uma cura bem executada favorece a produção de uma estrutura de qualidade e, conseqüentemente, de maior duração.

De acordo com Battagin et al. (2002), a cura tem como principais funções hidratar o cimento, garantindo que as reações de hidratação ocorram e evitar, ao máximo, a retração do concreto. Estas funções, se mal executadas, acabam por favorecer a entrada de agentes agressivos. Portanto, os autores julgam fundamental que concretos convencionais que possuem relações a/ag maiores do que as de concretos de alto desempenho tenham uma cura adequada como pré-requisito à obtenção de uma estrutura durável.

Battagin et al. (2002) apresentam, em seu trabalho, uma recomendação do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) com relação ao tempo mínimo de cura de acordo com o tipo de cimento e com a relação a/c (Tabela 4).

Tabela 4 - Períodos mínimos de cura.

Tipo de cimento	Fator a/c			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e II - 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP IV - 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III - 32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP I e II - 40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V - ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

Fonte: adaptado de Battagin et al. (2002).

Colleparidi e Biagini (1989), estudando concretos com períodos de cura de três e 28 dias, obtiveram menor coeficiente de difusão de cloretos para a mistura de cura mais prolongada e afirmaram que, quanto maior for o tempo de cura, menor será a penetração de cloretos.

Battagin et al. (2002), ao investigarem a influência dos vários ciclos de cura úmida e seca em concretos com relação a/c de 0,30, 0,45 e 0,65 na resistência à penetração de cloretos, observaram que, quanto maior o período de cura úmida, maior a resistência à penetração de íons cloreto. Essa influência foi mais expressiva para as relações de 0,45 e 0,65, conforme ilustra a figura 17. Os autores ainda ressaltam que, apesar de o aumento dos ciclos de cura úmida influenciar positivamente na resistência à penetração de cloretos, o fator preponderante e mais significativo foi a relação a/c.

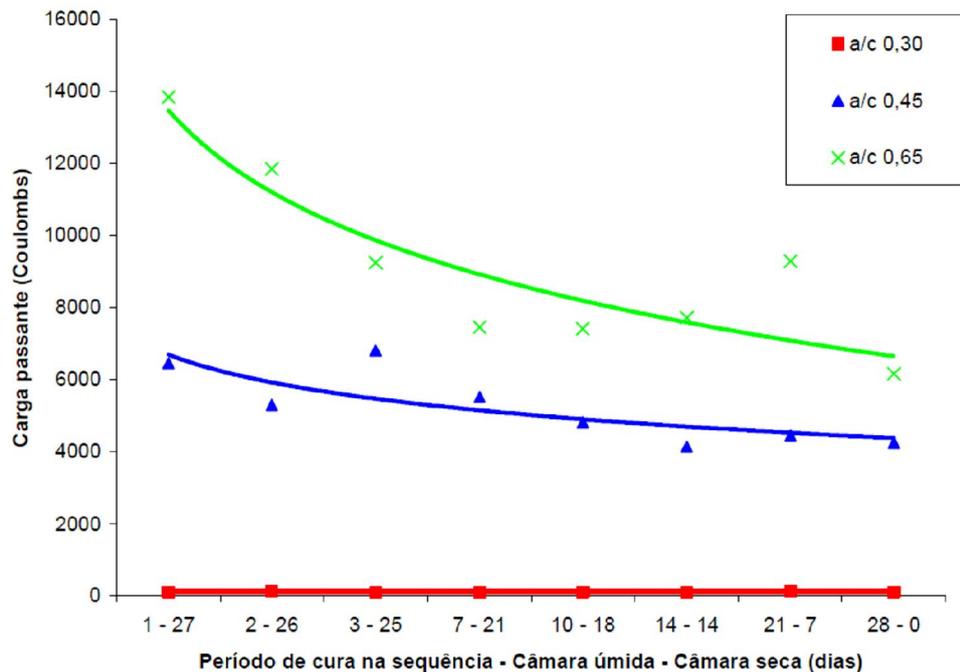


Figura 17 - Influência dos ciclos de cura na penetração de íons cloreto.

Fonte: Battagin et al. (2002).

Dellinghausen et al. (2009), ao substituírem cimento por escória de alto-forno, nos teores de 50% e 70%, e praticarem períodos de cura de três e sete dias, observaram melhor desempenho, frente à penetração de cloretos, com o acréscimo do teor de escória e o maior prazo de cura.

Conforme anteriormente exposto, a cura altera a estrutura de poros da pasta, portanto, segundo Jaergermann (1990), um concreto com período de cura maior apresenta menos cloretos do que um concreto curado em um período menor. No entanto, o autor explica que essa diferença é menos significativa à medida que se analisam camadas mais internas do concreto, pois a difusibilidade interna não sofre tanta influência das propriedades da pele. A figura 18 apresenta o efeito favorável da cura na profundidade limite do concreto.

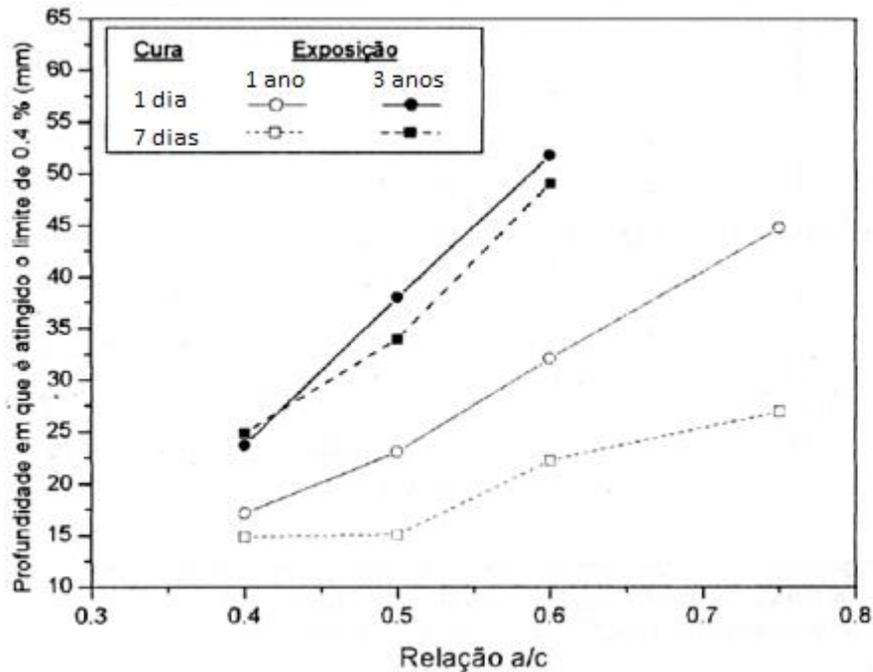


Figura 18 - Efeito da cura e da relação a/c na profundidade de alcance dos cloretos.

Fonte: Jaergemann (1990 apud FIGUEIREDO, 2011).

Barbosa et al. (2006) testaram o efeito da cura térmica a 60°C em concretos com adição de 10% de sílica ativa em comparação com misturas sem adição e curadas ao ar, frente à penetração de cloretos. Os autores observaram que o concreto sem adição e com cura térmica apresentou profundidade maior de penetração de cloretos (Figura 19), ou seja, menor resistência à penetração desses íons, e atribuíram esse comportamento à contribuição da cura térmica para a formação de uma estrutura desordenada dos compostos hidratados do cimento que forma uma carapaça de produtos hidratados ao redor dos grãos, impedindo a hidratação nas idades mais avançadas, resultando, assim, em uma estrutura mais porosa.

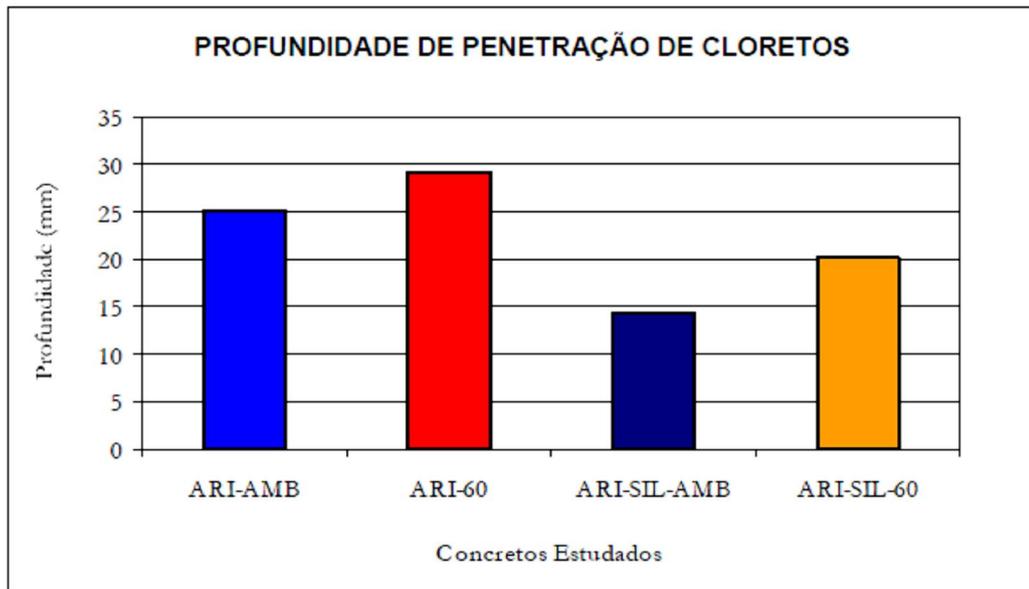


Figura 19 - Penetração de cloretos . CP V ARI com e sem sílica ativa.

Fonte: Barbosa et al. (2006).



## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Introdução

Para que se obtenham os resultados dos objetivos pré-estabelecidos, foi feita a análise, frente à ação de íons cloreto, de concretos compostos com adições minerais, em especial cinza de casca de arroz clara (CCAC), cinza de casca de arroz escura (CCA) e sílica ativa, nos períodos de três e sete dias de cura úmida. Para isso, as misturas com CCA tiveram seu desempenho comparado ao das misturas contendo sílica ativa e cimento puro (CP V-ARI).

Os ensaios de laboratório foram conduzidos de forma a investigar como o teor de substituição e o período de cura influenciam a carga passante e o coeficiente de difusão de cloretos destes concretos.

A fim de atingir os objetivos, realizaram-se os seguintes ensaios:

- a) - teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) (ASTM C1202:2005);
- b) - ensaio de penetração de cloretos por aspensão de nitrato de prata (EPCANP - método proposto pela AASHTO T259);

As variáveis utilizadas na pesquisa foram:

- Variáveis independentes: aquelas que alteram as propriedades do material cimentante e influenciam a relação sólido/espaco da pasta e seu grau de compactação. São elas:

- a) - Adições minerais: CCAC, CCA e sílica ativa;
- b) - Teor de substituição: 5%, 10%, 20% e 30% de CCAC e CCA e 5% e 10% de sílica ativa;
- c) - Relação água/aglomerante (a/ag): 0,35; 0,50; 0,65;
- d) - Período de cura úmida: três e sete dias;
- e) - Idade de realização dos ensaios: penetração de cloretos pelo TRPC: 28 e 91 dias e penetração de cloretos pelo (EPCANP): 7, 14, 28, 56 e 91 dias.

- Variáveis dependentes: aquelas que são influenciadas pelas variáveis independentes. São elas:

- a) - Penetração de cloretos (TRPC): carga total passante (Q);
- b) - Penetração de cloretos (EPCANP): coeficiente de difusão de cloretos.

A pesquisa foi realizada na cidade de Santa Maria, RS, com os experimentos executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), anexo ao Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

### 3.2 Materiais

Com o objetivo de verificar a influência da substituição do cimento Portland por diferentes teores de CCA clara e escura frente à penetração de íons cloreto, testaram-se as seguintes misturas, conforme tabela 5:

Tabela 5 - Proporções das adições minerais em cada mistura de aglomerante.

Nomenclatura das misturas	Proporção dos materiais (% do total de aglomerante)			
	Cimento (CPV-ARI)	CCAC	CCAE	Sílica ativa
REF	100	-	-	-
5CCAC	95	5	-	-
10CCAC	90	10	-	-
20CCAC	80	20	-	-
30CCAC	70	30	-	-
5CCAE	95	-	5	-
10CCAE	90	-	10	-
20CCAE	80	-	20	-
30CCAE	70	-	30	-
5SA	95	-	-	5
10SA	90	-	-	10

Para cada mistura, foram estudadas três relações de a/ag, sendo elas: 0,35; 0,50 e 0,65. Todas as misturas foram amostras com dois períodos de cura úmida (três e sete dias) para atender aos objetivos propostos por esta pesquisa. Os materiais utilizados nesta investigação experimental foram:

- a) cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI): em conformidade com a Norma Brasileira (NBR) 5733 (ABNT, 1991a);
- b) CCAC: procedente da indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete/RS (GEEA/RS), moída no LMCC da UFSM, através do moinho de bolas;
- c) CCAE: também procedente da GEEA já moída na indústria;
- d) sílica ativa (SA): proveniente de fornecedor nacional;
- e) areia: o agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa encontrada na região de Santa Maria, RS, previamente lavada e seca em estufa entre 105°C e 110°C;
- f) brita: o agregado graúdo foi a pedra britada originária de rocha diabásica do município de Itaara, RS, previamente lavada e seca;
- g) 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 da UFSM, o que garante sua potabilidade. Foi utilizada água destilada para elaboração das soluções de cloreto de sódio e hidróxido de sódio e água deionizada para a solução de nitrato de prata. Essas soluções foram utilizadas nos ensaios de penetração de íons cloreto.
- h) aditivo: com o objetivo de manter igualdade de consistência entre as diversas misturas investigadas, foi utilizado aditivo químico plastificante de pega normal, cuja dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,2% a 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) foi utilizado um aditivo superplastificante sintético com base de polímeros policarboxilatos, cuja dosagem recomendada é de 0,2% a 5,0% do peso do aglomerante.

### 3.2.1 Caracterização dos materiais

#### 3.2.1.1 Aglomerantes

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

- a) NBR 11579 (ABNT, 1991b): Cimento Portland . Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200);
- b) Análise química: NBR NM 10 (ABNT, 2004a), 11-1 (ABNT, 2004b), 12 (ABNT, 2004c), 13 (ABNT, 2004d), 14 (ABNT, 2004e), 15 (ABNT, 2004f), 16 (ABNT, 2004g), 17 (ABNT, 2004h), 18 (ABNT, 2004i), 19 (ABNT, 2004j), 21 (ABNT, 2004k);
- c) Distribuição granulométrica a laser: Associação Brasileira de Cimento Portland, SP (ABCP/SP);
- d) NBR NM 23 (ABNT, 2001a): Cimento Portland e outros materiais em pó . Determinação de massa específica;
- e) NBR NM 43 (ABNT, 2002): Cimento Portland . Determinação da pasta de consistência normal;
- f) NBR NM 65 (ABNT, 2003d): Cimento Portland . Determinação do tempo de pega;
- g) NBR NM 76 (ABNT, 1998): Cimento Portland . Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).

A figura 20 apresenta a distribuição granulométrica a laser do cimento utilizado na pesquisa.

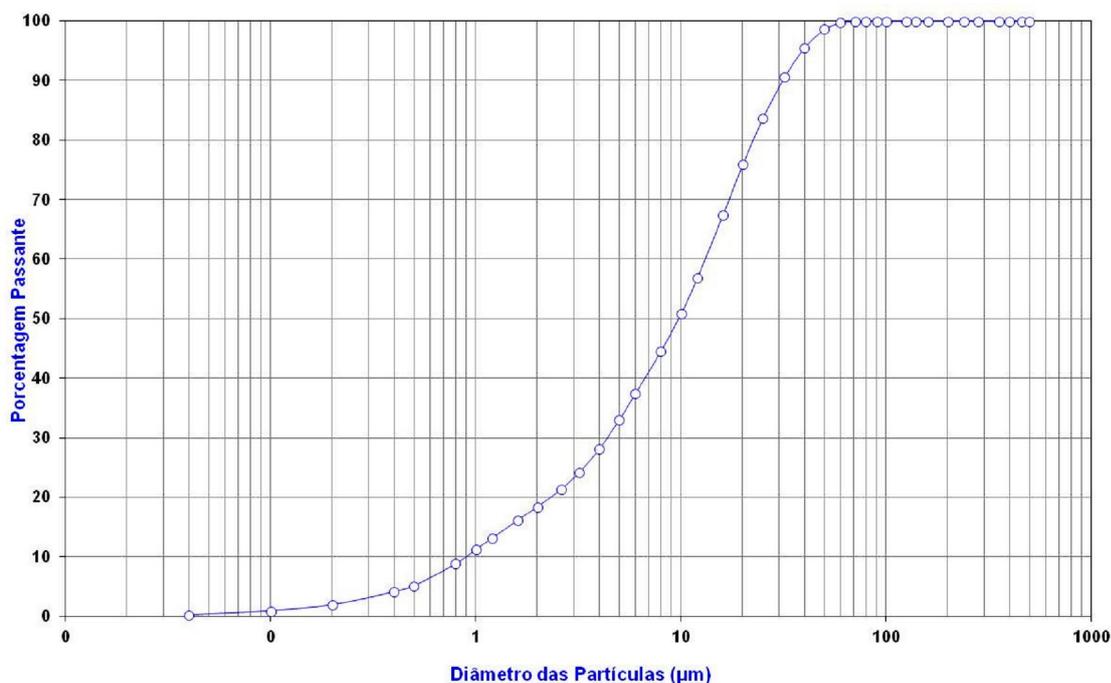


Figura 20 - Distribuição granulométrica do cimento (CPV-ARI).

As tabelas 6, 7 e 8 apresentam, respectivamente, as características mecânicas e físicas e a composição química do cimento.

A figura 21 representa o difratograma da amostra de cimento.

Tabela 6 - Ensaio em argamassa do CPV-ARI.

<b>Classificação NBR 5733</b>	<b>CPV-ARI</b>
<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>Tempo de pega</b>	
Início de pega (min.)	180
Fim de pega (min.)	250

Tabela 7 - Características físicas do cimento.

<b>Características físicas</b>	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,13
Finura #0,075 mm	0,22
Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	1,14

Tabela 8 - Características químicas do cimento.

(continua)

<b>Composição química</b>	<b>% em massa dos materiais</b>
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

Tabela 8 . Características químicas do cimento.

(conclusão)

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
TiO <sub>2</sub>	0,23
SrO	0,28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13
Cal livre	1,39
Resíduo insolúvel	0,49
Carbono gráfico	1,93
Perda ao fogo	3,39

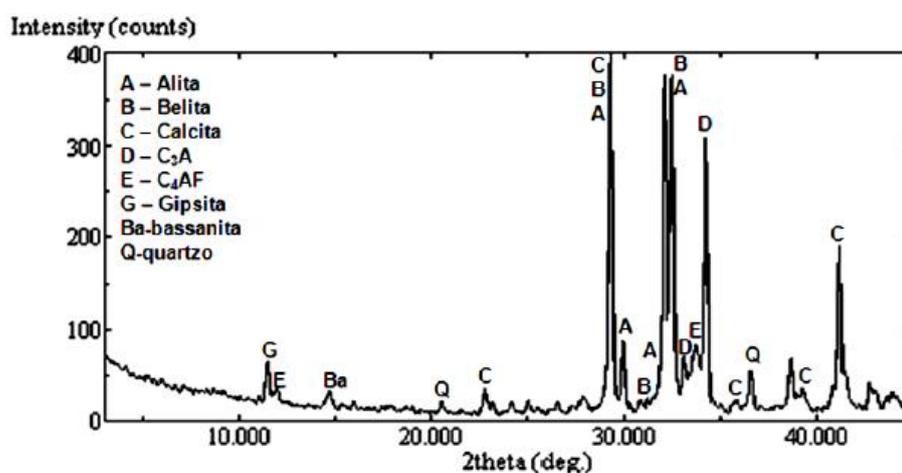


Figura 21 - Difratograma da amostra de cimento (CPV-ARI).

As tabelas 9 e 10 apresentam, respectivamente, as características físicas e a composição química das adições minerais utilizadas nesta pesquisa.

As figuras 22, 23 e 24 representam, respectivamente, os difratogramas das amostras de CCAC, CCAE e SA.

Tabela 9 - Características físicas das adições minerais.

Características físicas	CCAC	CCAE	SA
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,11	2,12	2,20
Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	18,89	20,73	18,83

Segundo Bartha e Huppertz (1977 apud RÊGO, 2004), quando a cinza de casca de arroz é queimada de forma controlada, possui uma estrutura celular porosa e com alta superfície específica. À medida que a temperatura de queima vai aumentando ocorre um tamponamento dessa estrutura celular, diminuindo a superfície específica da cinza. Neste caso a CCAE apresenta uma superfície específica um pouco superior, fato que pode ser atribuído às partículas de carbono, que apresentam uma menor granulometria.

Tabela 10 - Características químicas das adições minerais.

Composição química	% em massa dos materiais		
	CCAC	CCAE	SA
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	-
Perda ao fogo	2,32	5,88	2,03

Através do teor de perda ao fogo e conseqüentemente de carbono grafítico, pode-se determinar a quantidade de material não queimado nas amostras. Segundo Uchikawa (1986 apud RÊGO, 2004), valores de perda ao fogo maiores de 15% indicam grande quantidade de cinza de casca de arroz não queimada, o que pode diminuir a reatividade da pozolana.

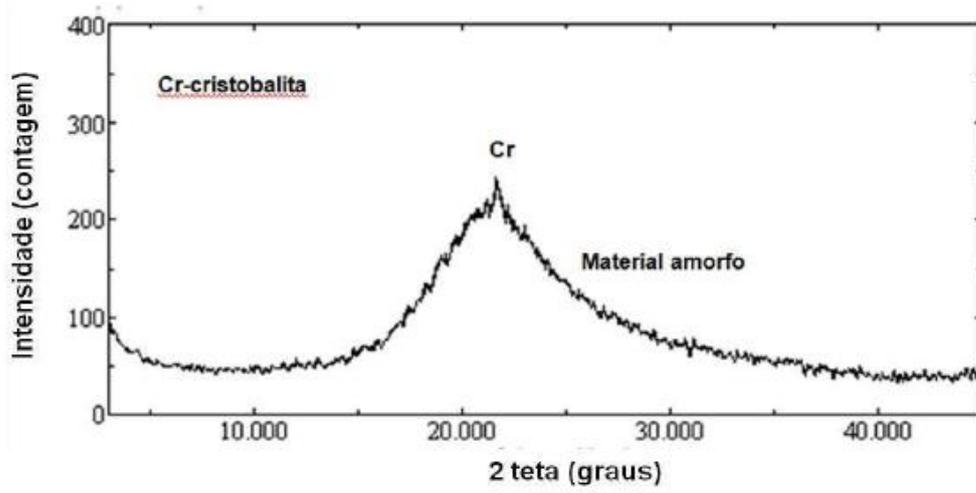


Figura 22 - Difratograma da amostra de CCAC.

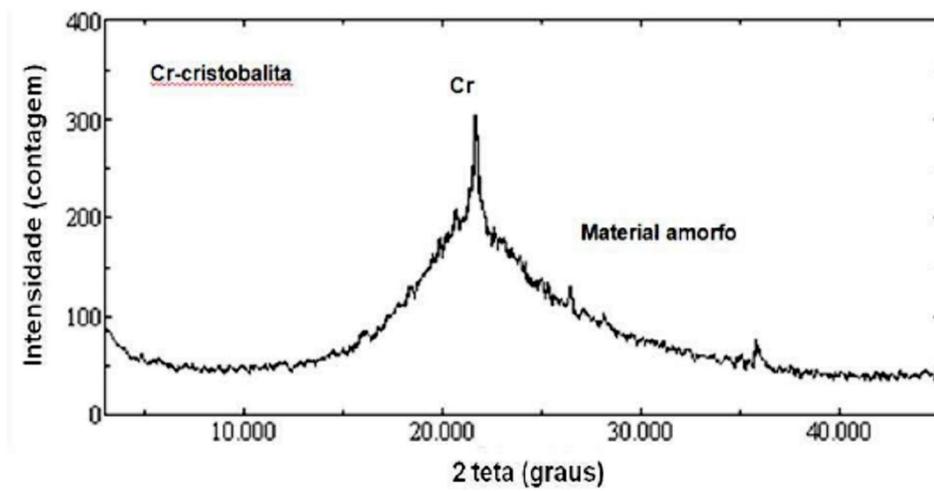


Figura 23 - Difratograma da amostra de CCAE.

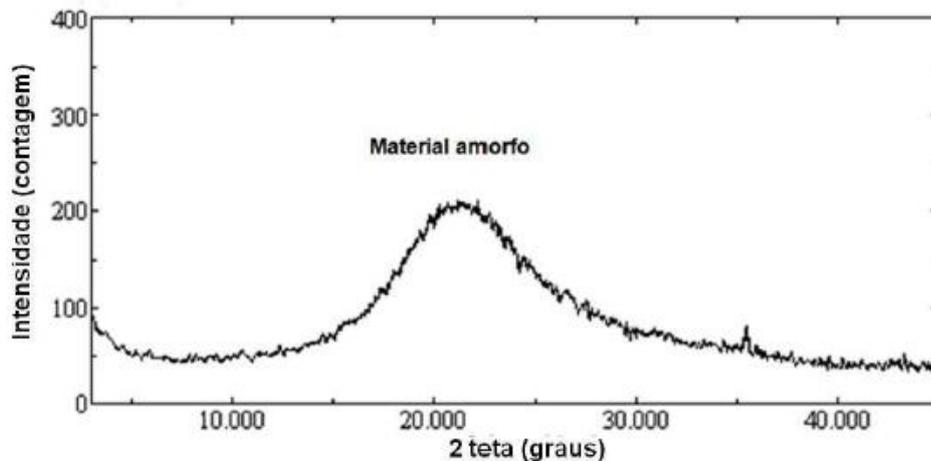


Figura 24 - Difratograma da amostra SA.

As CCA e a SA apresentam difratogramas semelhantes, em que todos são considerados materiais amorfos, mesmo com a CCAE apresentando um maior teor de carbono grafítico. Fato que pode ser atribuído à queima controlada realizada nas cinzas.

### 3.2.1.2 Agregados

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

- a) NBR NM 26 (ABNT, 2001b): Agregados . Amostragem;
- b) NBR NM 52 (ABNT, 2003b): Agregado miúdo . Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- c) NBR NM 53 (ABNT, 2003c): Agregado graúdo . Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- d) NBR NM 248 (ABNT, 2003e): Agregados . Determinação da composição granulométrica;
- e) NBR 7809 (ABNT, 2006a): Agregado graúdo . Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.

f) NBR NM 45 (ABNT, 2006c): Agregados . Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Como agregado miúdo, utilizou-se areia natural, de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria, RS. A areia foi lavada para remoção de possíveis impurezas que poderiam influenciar o desempenho do concreto. Após a lavagem, foi seca em estufa entre 105°C e 110°C, para remoção da umidade.

Para agregado graúdo, utilizou-se pedra britada, proveniente de rocha de origem diabásica, procedente do município de Itaara, RS. Este material foi lavado para remoção de componentes que poderiam alterar o desempenho do concreto e, posteriormente, foi seco para remoção da umidade.

Na tabela 11, são apresentadas as características físicas dos agregados e, nas figuras 25 e 26, podem ser observadas as distribuições granulométricas do agregado miúdo e graúdo, respectivamente.

Tabela 11 - Características físicas dos agregados.

<b>Grandeza física</b>	<b>Agregado miúdo</b>	<b>Agregado graúdo</b>
<b>Massa específica (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>2,66</b>	<b>2,48</b>
<b>Massa unitária (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,62</b>	<b>1,38</b>
<b>Módulo de finura</b>	<b>1,85</b>	<b>6,92</b>
<b>Índice de forma</b>	<b>-</b>	<b>2,23</b>
<b>Dimensão máxima característica (mm)</b>	<b>1,2</b>	<b>19,0</b>
<b>Absorção de água (%)</b>	<b>-</b>	<b>2,87</b>

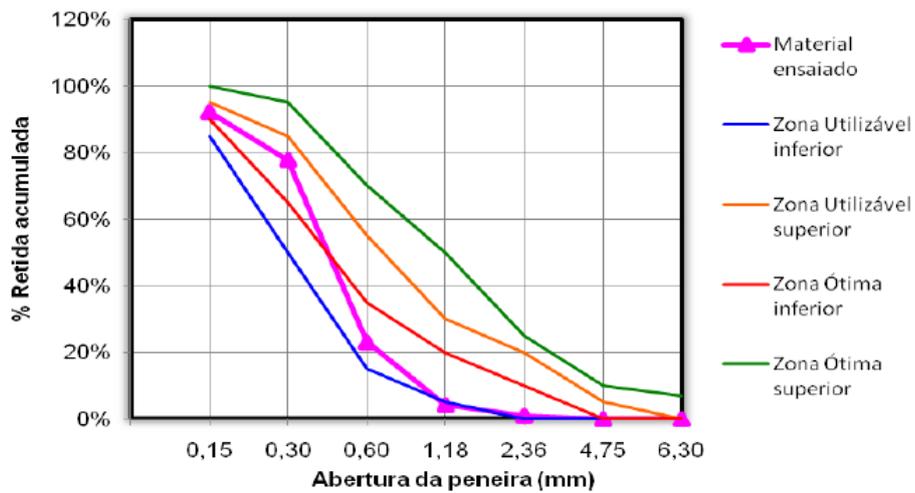


Figura 25 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

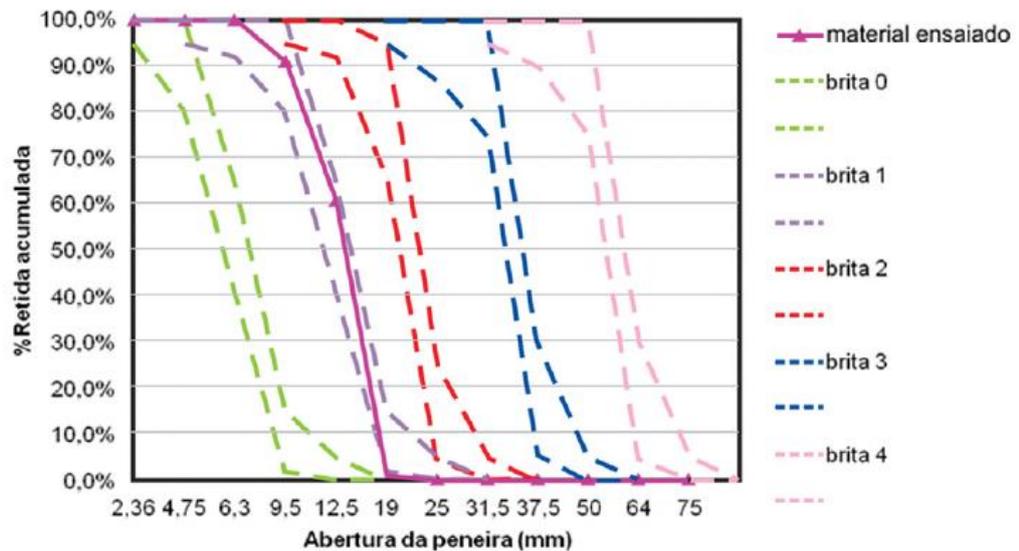


Figura 26 - Curva granulométrica do agregado graúdo.

### 3.3 Dosagem dos concretos

A dosagem dos materiais para moldagem dos concretos foi realizada de acordo com os procedimentos propostos por Helene e Terzian (1992), considerando um teor ótimo de argamassa de 51% em massa de materiais secos.

Para manter o teor de argamassa constante em todas as misturas e igual ao da REF, fez-se uma compensação no teor de agregado miúdo nos traços com adições minerais (devido à menor massa específica das adições minerais em relação ao cimento).

Os concretos foram dosados com três relações a/ag (0,35; 0,50; 0,65), a fim de obter as curvas que indicassem o comportamento do concreto com diferentes aglomerantes, resultando nos traços unitários, apresentados na tabela 12, para a REF.

Tabela 12 - Traço unitário para o concreto de referência.

<b>Relação a/ag</b>	<b>Traço unitário</b>
<b>0,35</b>	<b>1 : 1,30 : 2,21</b>
<b>0,50</b>	<b>1 : 2,06 : 2,94</b>
<b>0,65</b>	<b>1 : 2,83 : 3,68</b>

O consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto utilizados na pesquisa é apresentado na tabela 13.

Tabela 13 - Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto.

Mistura	Relação a/agl	Materiais em Kg/m <sup>3</sup>									
		Agl	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	-	-
5CCAC	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	-	-
10CCAC	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	-
20CCAC	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	-
30CCAC	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	-
5CCAE	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	-	-
10CCAE	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	-
20CCAE	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	-
30CCAE	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	-	-

### 3.3.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos, na medida 10x20cm, para realizar o ensaio de TRPC e outros prismáticos (100 mm x 100 mm x 285 mm e 100 mmx100 mmx 400 mm) para o ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP), de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003a). O adensamento foi realizado em mesa vibratória.

Com a finalidade de conferir consistência a cada mistura (90±10 mm), realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67:1998.

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 a seguir, proposta por Mehta e Monteiro (2008), que correlaciona a temperatura do concreto com a massa e a temperatura inicial dos materiais constituintes.

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c)} \quad (\text{eq. 1})$$

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)

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, para posterior desmoldagem. Decorrido este período, os corpos de prova (cp $\phi$ ) foram identificados e armazenados em câmara úmida climatizada com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa maior que 95%, permanecendo até completarem o período de cura estipulado (três e sete dias). Após o período de cura úmida, os cp $\phi$  destinados ao ensaio de TRPC foram armazenados em sala coberta

sob condições de umidade e temperatura ambientais até as datas de ensaio (28 e 91 dias), já os destinados ao EPCANP foram preparados e imersos em solução salina.

### **3.4 Ensaios realizados**

#### **3.4.1 Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) . ASTM C1202**

Este ensaio realizou-se de acordo com a norma ASTM C1202 e consiste em verificar a carga passante através de uma amostra de concreto fixa entre duas células de acrílico, uma preenchida com solução de NaCl e a outra com NaOH. A resistência à penetração de cloretos será associada à carga passante.

Para o ensaio, utilizaram-se dois corpos de prova, cuja medida será de 10x20cm, para cada período de cura (três e sete dias) e para cada relação a/ag (0,35; 0,50; 0,65), pois foram ensaiados aos 28 e 91 dias, ou seja, obteve-se 12 corpos de prova por mistura, totalizando 132 corpos de prova. Estes foram serrados nas dimensões 10x5,1cm para formarem duas amostras cilíndricas, impermeabilizados lateralmente com resina epóxi e encaminhados ao processo de vácuo para que os poros da amostra fossem completamente saturados.

Posteriormente ao processo de saturação, colocou-se a amostra nas células de acrílico, em que uma foi preenchida com solução de 3% de NaCl e a outra com 0,3N de NaOH, conforme figura 27. A este sistema será aplicada uma diferença de potencial de 60 Volts por seis horas e serão realizadas leituras a cada 30 minutos. A diferença de potencial faz com que os íons cloreto migrem da solução de NaCl para a de NaOH. Quanto maior a carga total passante (Q) menor é a resistência do concreto à penetração de cloretos. De acordo com a tabela 14, a ASTM C1202 permite classificar o concreto quanto à penetração de íons cloretos.

Tabela 14 - Classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos.

<b>PENETRAÇÃO DE CLORETOS</b>	<b>Carga Total Passante (Coulomb)</b>
ALTA	> 4000
MODERADA	de 2000 a 4000
BAIXA	de 1000 a 2000
MUITO BAIXA	de 100 a 1000
DESPREZÍVEL	< 100

Fonte: ASTM C1202 (2005).

Com os resultados das duas amostras ensaiadas, foi adotada a média aritmética da carga passante como valor representativo, desde que satisfeitas às prescrições da norma.



Figura 27 - Corpo de prova entre as células de acrílico.

O método da ASTM C1202, *Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, publicado em 1991, é o mais empregado atualmente, devido ao fato de ser um ensaio rápido (FIGUEIREDO, 2005).

Apesar de o teste medir a condutividade elétrica do concreto e não medir diretamente a permeabilidade do mesmo apresenta uma boa correlação de resultados quando comparado com outros métodos (WHITING, 1981 apud HAMILTON III, 2007). De acordo com Neville (1997), o ensaio pode ser importante para comparação e escolha do tipo de concreto mais adequado para determinada situação no que diz respeito à resistência à penetração de cloretos.

Segundo Figueiredo (2005), a principal crítica, quanto a este ensaio, é referente à elevada diferença de potencial empregada, pois, em concretos com alta condutividade elétrica, a corrente passante pode elevar a temperatura do sistema e distorcer os resultados, sendo necessário monitorar a temperatura da solução ao longo do ensaio.

#### 3.4.2 Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP)

A metodologia deste ensaio consistiu em preparar os corpos de prova, após a cura úmida, considerando-se os seguintes aspectos:

- a) dois corpos de prova (100 mm x 100 mm x 285 mm e 100 mmx100 mmx 400 mm) de cada relação a/ag, de cada mistura e de cada período de cura úmida, foram cortados em pedaços de aproximadamente 53mm de espessura, totalizando 17 fatias para cada mistura, sendo três fatias de cada período de cura úmida (três e sete dias) e de cada relação a/ag para cada um dos cinco períodos do ensaio (7, 14, 28, 56 e 91 dias);
- b) todas as fatias foram impermeabilizadas, em quatro das seis faces, com três demãos de verniz poliuretânico, permitindo, assim, que somente duas faces paralelas (100 mm x 53 mm) ficassem sujeitas à penetração de íons cloreto;
- c) após a impermeabilização, as fatias foram imersas em um reservatório com solução salina na proporção de 31,94g de NaCl para cada litro de água destilada, conforme ilustra a figura 28;
- d) os períodos de imersão foram de 7, 14, 28, 56 e 91 dias;
- e) ao completarem cada idade de ensaio, três fatias de cada relação a/ag foram retiradas do reservatório e lavadas com água potável e, após, foram rompidas na direção de penetração dos íons cloreto;

f) foi aspergida solução de nitrato de prata (17g 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, conforme figura 29;

g) a determinação da profundidade de penetração de íons cloreto foi feita com o auxílio de programas computacionais.



Figura 28 . Corpos de prova imersos em solução salina dentro do reservatório.



Figura 29 . Corpo de prova após aspersão de nitrato de prata.

Segundo Otsuki, Nagataki e Nakashita (1992), com a concentração de cloretos acima de 0,15% do peso do cimento, a solução de nitrato de prata reage, proporcionando uma coloração branca e delimitando a penetração de íons cloreto.

A profundidade média de penetração foi determinada através de uma fotografia digitalizada, com o auxílio do programa computacional *AutoCAD*. Fizeram-se várias linhas de medida, espaçadas de 1mm, na região em que 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, gerando, 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  $\text{AgNO}_3$  estarão em conformidade com o método utilizado por Wee, Suryavanshi e Tin (2000).

Após serem estabelecidas as médias de penetração para cada prazo de submersão, os resultados deste ensaio foram obtidos com base no coeficiente angular da equação de regressão linear, proposta por Bakker (1988), chamado coeficiente de penetração ( $k$ ).

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

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)

## **4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANPs) e pelo método da norma ASTM C1202, de todas as misturas analisadas.

Os resultados foram analisados e discutidos frente à influência que a variação do tipo e do teor de adição, a relação água/aglomerante ( $a/ag$ ) e o tempo de cura úmida exercem sobre a resistência dos concretos estudados à penetração de cloretos.

### **4.2 Análise dos resultados de penetração de cloretos EPCANP**

O método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata é prático e de fácil aplicação, permitindo medir a profundidade de penetração do cloreto livre no concreto. Portanto, por sua praticidade, contribui para a identificação, na estrutura de concreto armado, da existência ou não de íons cloreto, podendo, assim, auxiliar as técnicas de reparos a serem aplicadas (CARVALHO; MOTA; MONTEIRO, 2011).

Neste ensaio, conforme detalhado no capítulo anterior, os valores das profundidades médias de penetração (aos 7, 14, 28, 56 e 91 dias) das misturas investigadas foram plotados no gráfico em função do tempo de imersão (Figura 30), sendo o coeficiente de penetração de cloretos representado pelo coeficiente angular da reta.

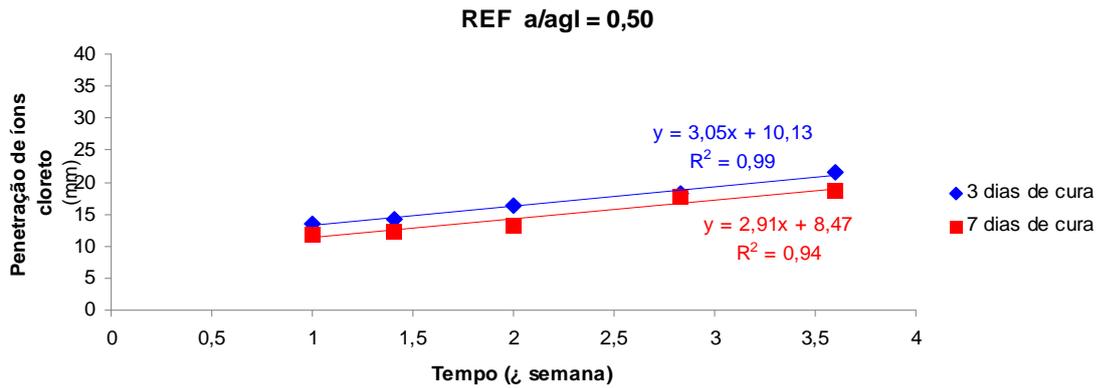


Figura 30 - Gráfico para determinação dos coeficientes k.

No presente trabalho, considerou-se a constante  $k_0$  da equação (valor que intercepta o eixo das ordenadas) diferente de zero. Essa consideração corrige a equação, conforme proposto por Wee, Suryavanshi e Tin (2000), sem alterar os resultados quanto às propriedades das misturas.

Os valores dos coeficientes obtidos para cada mistura estudada, através do EPCANP, são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Coeficiente de penetração k das misturas, de acordo com a relação a/ag e período de cura em câmara úmida.

(continua)

Mistura	a/ag	k (mm/semana)	
		Cura	
		3 dias	7 dias
REF	0,35	2,56	2,43
	0,50	3,05	2,91
	0,65	3,49	3,19
5C	0,35	1,53	1,40
	0,50	1,76	1,67
	0,65	2,05	1,89
10C	0,35	1,36	1,23
	0,50	1,56	1,37
	0,65	1,87	1,73

Tabela 15 - Coeficiente de penetração k das misturas, de acordo com a relação a/ag e período de cura em câmara úmida.

			(conclusão)
20C	0,35	1,09	0,93
	0,50	1,21	1,15
	0,65	1,33	1,26
30C	0,35	0,98	0,84
	0,50	1,11	0,96
	0,65	1,22	1,16
5E	0,35	1,65	1,51
	0,50	2,31	2,09
	0,65	2,69	2,45
10E	0,35	1,40	1,30
	0,50	1,63	1,45
	0,65	1,80	1,64
20E	0,35	1,12	0,97
	0,50	1,28	1,16
	0,65	1,40	1,33
30E	0,35	0,96	0,90
	0,50	1,09	1,04
	0,65	1,30	1,21
5SA	0,35	1,30	1,21
	0,50	1,73	1,63
	0,65	2,03	1,91
10SA	0,35	0,62	0,57
	0,50	0,90	0,82
	0,65	1,08	1,03

Observa-se, nesta tabela, que o maior valor de k é o da REF com relação a/ag 0,65 e período de cura de três dias e que o menor valor é o da mistura 10SA com relação a/ag 0,35 e sete dias de cura úmida. Analisando os coeficientes, nota-se a grande variação de valores encontrados, obtendo uma diferença de 6,1 vezes entre o maior e o menor valor. Independentemente da relação a/ag e do período de cura, a REF foi a que apresentou os maiores valores de k, ou seja, o pior desempenho frente à penetração de cloretos. Já, para as misturas com adições, à medida que aumentou o teor de substituição para os dois tipos de cinzas, houve um decréscimo no valor de k, também observado nas misturas de sílica ativa.

A seguir, encontra-se uma discussão mais detalhada sobre a influência de cada fator no fenômeno de difusão de cloretos, tais como relação a/ag, teor de substituição, teor de carbono grafítico, período de cura úmida e tipo de adição mineral.

#### 4.2.1 Influência da relação água/aglomerante

Nas figuras 31 e 32, são apresentados, gráfica e respectivamente, os coeficientes de penetração das misturas investigadas, submetidas à período de cura úmida de três e sete dias. Da análise destes, constata-se a grande influência da relação a/ag no valor do coeficiente k. Para Ngala et al. (1995), a quantidade de água na mistura é o principal parâmetro que influencia a penetração de íons cloreto no concreto, pois relações a/ag mais baixas proporcionam menor valor de porosidade capilar.

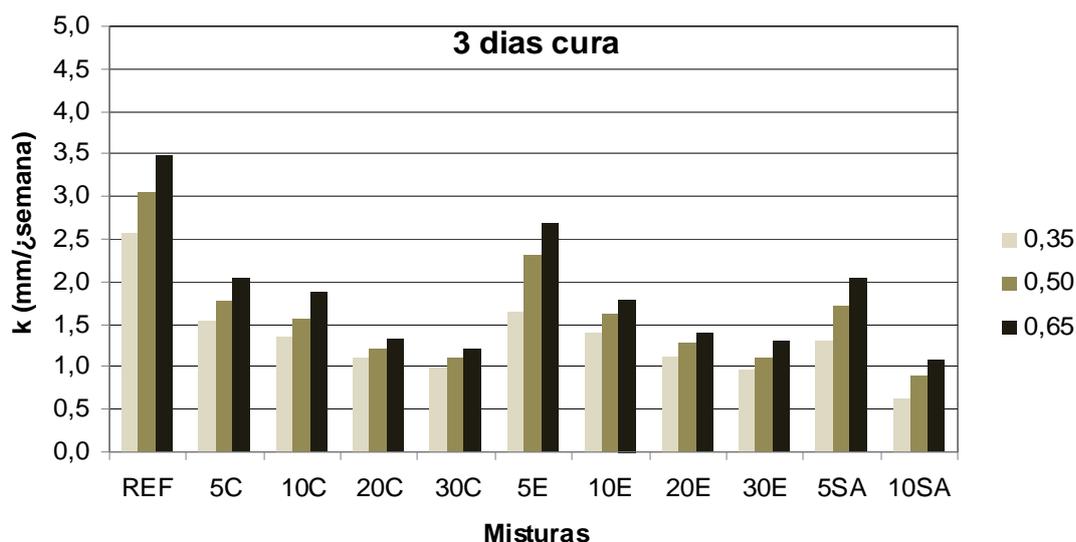


Figura 31 - Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação a/ag e período de cura . cura 3 dias.

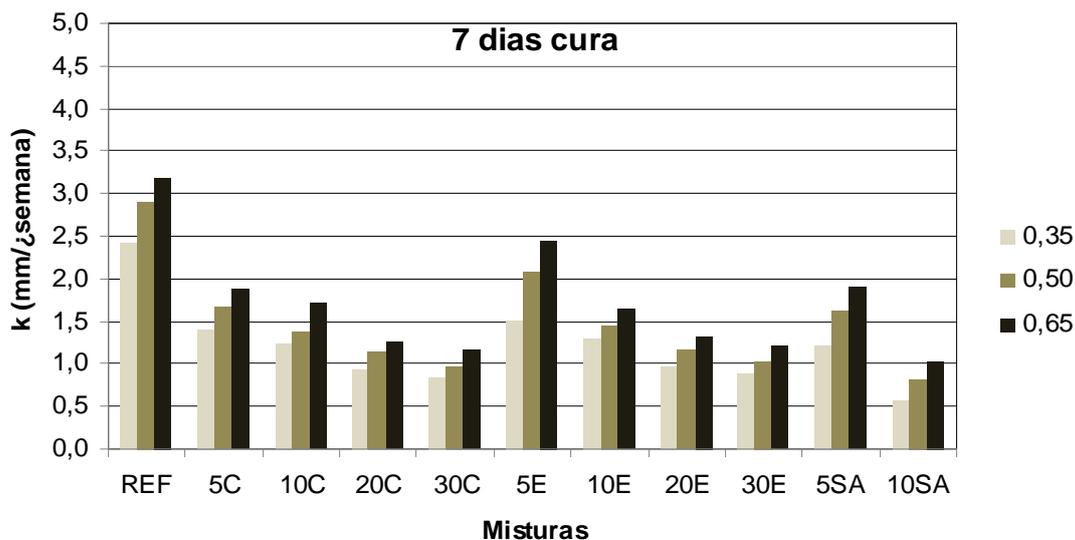


Figura 32 - Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação a/ag e período de cura . cura 7 dias.

No período de cura úmida de três dias, a redução da relação a/ag de 0,65 para 0,50 resultou em uma diminuição de 17% do coeficiente de penetração k para as misturas 10C e 10SA e 16% para a mistura 30E. Quando a relação diminuiu de 0,50 para 0,35, as reduções mais expressivas foram de 31%, 29% e 25% para as misturas 10SA, 5E e 5SA, respectivamente.

Para os concretos curados por sete dias, a redução da relação a/ag de 0,65 para 0,50 resultou na diminuição de 21% do coeficiente k para a mistura 10C, 20% para a 10SA e 17% para a mistura 30C. Quando a relação passou de 0,50 para 0,35, as maiores reduções do coeficiente k foram de 30%, 28% e 26% para as misturas 10SA, 5E e 5SA, respectivamente.

A relação a/ag é um dos fatores que mais influencia a penetração de cloretos no concreto e é um assunto que vem sendo bastante estudado no meio acadêmico por diversos autores. Collepardi e Biagini (1989), ao analisarem os efeitos da relação a/ag em concretos com adição de cinza volante ou sílica ativa, obtiveram, para misturas com baixa relação a/ag, baixos valores de coeficientes de difusão de cloretos.

Rizzon e Andrade (2006), estudando a penetração de cloretos em concretos com relações a/ag de 0,4, 0,5 e 0,6, observaram aumento na penetração dos íons conforme o aumento da relação a/ag e atribuíram este fato ao aumento da porosidade no concreto.

Crauss (2010), ao analisar o comportamento dos coeficientes de penetração ( $k$ ), em diferentes tipos de cimentos e níveis de resistência, observou uma diminuição de  $k$  conforme o aumento da resistência e a consequente redução da relação  $a/ag$ .

Os concretos compostos com cinza de casca de arroz clara (CCAC) e cinza de casca de arroz escura (CCAÉ) e aqueles com sílica ativa apresentaram uma maior resistência à penetração de íons cloreto, quando comparado à REF.

Ao se comparar as CCAC e as CCAÉ, mantendo fixa a relação  $a/ag$ , observou-se que, apesar da pequena diferença entre os valores dos coeficientes de penetração  $k$ , de modo geral, a CCAC apresenta melhor desempenho na maior parte dos resultados obtidos. Para o período de cura de três dias, a CCAÉ obteve melhor desempenho apenas no teor de substituição de 10% na relação  $a/ag$  0,65 com  $k$  4% inferior ao da CCAC e no teor de 30% nas relações  $a/ag$  0,35 e 0,50 com  $k$  2% inferior ao da CCAC nas duas relações  $a/ag$ . Já, no período de cura de sete dias, a CCAÉ apresentou menor coeficiente de penetração apenas no teor de 10% na relação  $a/ag$  0,65 com  $k$  5% inferior ao da CCAC.

O melhor resultado da CCAC, na comparação das duas cinzas, pode ser creditado ao maior efeito químico do que físico (efeito fíler), devido ao menor teor de carbono grafítico apresentado por essa cinza, que é nove vezes inferior àquele da CCAÉ, conforme tabela 10.

#### 4.2.2 Influência do teor de substituição do cimento pelas adições minerais

Conforme mencionado anteriormente, o coeficiente  $k$  diminuiu à medida que o teor de substituição das adições minerais pelo cimento aumentou e todas as misturas apresentaram coeficientes menores do que a REF.

Na tabela 16, são apresentados os índices de penetração de íons cloreto em relação à REF (em porcentagem) para cada relação  $a/ag$  e período de cura.

Tabela 16 - Índice de penetração de íons cloreto em relação à REF.

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	60	58
	0,50	58	57
	0,65	59	59
10C	0,35	53	51
	0,50	51	47
	0,65	54	54
20C	0,35	43	38
	0,50	40	40
	0,65	38	39
30C	0,35	38	35
	0,50	36	33
	0,65	35	36
5E	0,35	64	62
	0,50	76	72
	0,65	77	77
10E	0,35	55	53
	0,50	53	50
	0,65	52	51
20E	0,35	44	40
	0,50	42	40
	0,65	40	42
30E	0,35	38	37
	0,50	36	36
	0,65	37	38
5SA	0,35	51	50
	0,50	57	56
	0,65	58	60
10SA	0,35	24	23
	0,50	30	28
	0,65	31	32

A mistura 10SA com relação a/ag de 0,35 e período de cura úmida de sete dias foi a que obteve a maior redução em relação à REF, uma vez que o índice de penetração de 23% equivale a uma redução de 77%, indicando melhor desempenho dessa adição mineral, com esse teor de substituição, frente à penetração de cloretos. Já a mistura 5E com relação a/ag de 0,65 apresentou a menor redução percentual do coeficiente k para todas as misturas estudadas, pois, com um índice de penetração de 77% (para os dois períodos de cura), reduziu apenas 23% em relação à mistura sem adição mineral. Com esses resultados, pode-se analisar a influência do teor de substituição das adições minerais no concreto e verificar o

benefício que o aumento desse teor proporciona à resistência à penetração de íons cloreto, independentemente da relação a/ag e do período de cura úmida.

Segundo Wee, Suryavanshi e Tin (2000), a microestrutura do concreto tem papel fundamental na difusão dos íons cloreto, propiciando a própria fixação desses íons pelas fases aluminatos e ferro-aluminatos do cimento. Dessa forma, ao substituir o cimento por uma adição mineral, como a cinza de casca de arroz (CCA), que possui baixo teor de alumina, espera-se obter misturas com maiores coeficientes de penetração, pois reduz-se a capacidade de fixação dos íons cloretos por parte dos aluminatos. No entanto, a adição de CCA promove um refinamento dos poros, alterando a microestrutura do concreto e tornando-o menos permeável, o que reduz a penetrabilidade dos íons cloreto.

Assim, o bom desempenho do concreto frente à penetração de íons cloreto é dependente tanto das alterações da microestrutura da mistura quanto da quantidade de aluminatos do aglomerante, sendo a combinação desses fatores a grande responsável pelo desempenho final do concreto frente à ação desses íons.

Dos resultados obtidos, constatou-se uma predominância do efeito de refinamento dos poros na microestrutura, que será maior conforme maior for o teor de substituição do cimento pelas adições minerais.

Da Silva (2012), ao estudar a penetração de íons cloretos para as mesmas misturas desta pesquisa, verificou aumento do coeficiente de penetração  $k$  conforme o aumento do teor de substituição. Porém, diferentemente deste estudo, depois da cura úmida, as misturas só entraram no tanque de cloretos após 91 dias, ou seja, depois da retração do concreto, que se deu maior quanto maior o teor de substituição do cimento pelas adições minerais, justificando o comportamento, nesse caso, frente à penetração de cloretos.

Pereira (2008), analisando a resistência à penetração de cloretos em argamassa com areia normalizada e substituição de cimento por teores de 10% e 15% de CCA portuguesa e 10% de sílica ativa, obteve coeficientes de difusão menores do que a REF (sem adição), sendo os melhores resultados de desempenho, em ordem crescente, as misturas de 10% e 15% de CCA e 10% de sílica ativa.

Os concretos compostos com sílica ativa apresentaram menores valores de coeficientes  $k$  para os dois períodos de cura úmida e os dois teores de substituição

estudados (5% e 10%), em comparação aos compostos com CCAC e CCAE utilizados na presente pesquisa.

Da análise dos valores dos coeficientes de penetração, constatou-se um ganho significativo na resistência à penetração de cloretos nos concretos compostos com 10% de sílica ativa. Houve uma redução substancial quando se aumentou o teor de sílica ativa de 5% para 10%. Para o período de cura de três dias, o aumento no teor significou uma redução do coeficiente  $k$  de 52%, 48% e 47% para as relações  $a/ag$  0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente. Já, para o período de cura de sete dias, o aumento do teor de sílica ativa reduziu os valores de  $k$  em 53%, 50% e 46% para as relações  $a/ag$  0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente. Na comparação com os teores de 10% de substituição da CCAC e da CCAE, a sílica ativa também manteve um desempenho bastante superior.

Barbosa et al. (2006), em seu estudo, ao substituírem 10% de cimento por sílica ativa e compararem com a REF (sem adição), confirmaram o bom desempenho desta adição mineral frente à penetração de íons cloreto.

Tuan et al. (2011), ao estudarem misturas com 20% de CCA e 20% de sílica ativa, em diferentes idades, com relação  $a/ag$  0,18, verificaram um aumento na resistência à compressão, em comparação com a REF, para ambas as misturas com adições minerais, tanto aos 28 como aos 91 dias, obtendo melhor desempenho para a mistura de 20% de CCA. De acordo com os autores, a CCA e sílica ativa apresentam uma composição química similar, com área de superfície específica muito alta, porém, a CCA não é um material ultrafino como a sílica ativa. A grande superfície específica da CCA origina-se da porosidade interna, por isso, a CCA e a sílica ativa podem ter comportamentos diferentes, em termos de hidratação e microestrutura do concreto.

A sílica ativa é considerada uma adição altamente reativa, que, através das reações pozolânicas, produz uma alteração na microestrutura do concreto, refinando a rede de poros e tornando-o mais resistente ao ataque de agentes agressivos. Esse bom desempenho pode ser atribuído ao alto teor de dióxido de silício amorfo encontrado nessa adição mineral e também por sua maior finura.

#### 4.2.3 Influência do período de cura úmida

Na figura 33, apresenta-se a redução do coeficiente de penetração de cloretos devido ao aumento do prazo de cura, em porcentagem. Como esperado, para todas as misturas estudadas, houve diminuição do valor de k conforme o aumento do período de cura de três para sete dias.

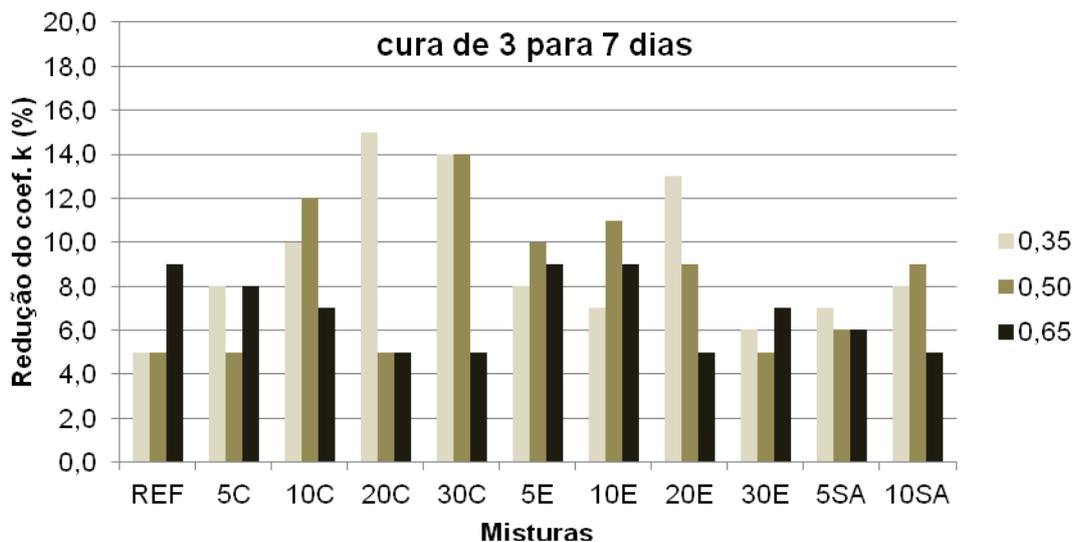


Figura 33 . Influência do período de cura úmida sobre o coeficiente de penetração k.

A redução do coeficiente variou de 5% a 15% e as misturas que foram menos sensíveis ao aumento do período de cura foram as de referência (REF) (a/ag 0,35 e 0,50), 5C (a/ag 0,50), 20C (a/ag 0,50 e 0,65), 30C (a/ag 0,65), 20E (a/ag 0,65), 30E (a/ag 0,50) e 10SA (a/ag 0,65), pois apresentaram apenas 5% de redução. Já a mistura 20C (a/ag 0,35), com 15% de redução, foi a que apresentou a maior diminuição do coeficiente k quando o período de cura úmida passou de três para sete dias.

Apenas seis misturas apresentaram redução maior do que 10%, dentre todas as relações a/ag estudadas. São elas: 10C (a/ag 0,50) com redução de 12%, 20C (a/ag 0,35) com redução de 15%, 30C (a/ag 0,35 e 0,50) ambas com redução de 14%, 10E (a/ag 0,50) com redução de 11% e 20E (a/ag 0,35) com redução de 13%.

Como pode ser observado, os decréscimos de  $k$ , com o aumento do período de cura de três para sete dias, não variaram linearmente com o aumento das relações  $a/ag$  e com o aumento do teor de substituição, ou seja, não apresentaram uma tendência geral. Constatou-se, no entanto, que este aumento do período de cura úmida exerceu influência positiva sobre todos os concretos analisados, pois favorece a formação de uma microestrutura menos porosa e permeável, aumentando, assim, a resistência à penetração de agentes agressivos no concreto e, conseqüentemente, resultando em uma estrutura com maior qualidade e durabilidade.

Collepari e Biagini (1989), ao analisarem os efeitos do período de cura frente à penetração de cloretos em concretos com adição de cinza volante ou sílica ativa, obtiveram redução dos valores de coeficientes de difusão de cloretos quando o período de cura passou de três para 28 dias.

#### **4.3 Análise dos resultados de penetração de cloretos E ASTM C1202**

Shi (2004), através de uma revisão de resultados publicados, relatou que fatores que têm grande influência sobre a condutividade elétrica do concreto (parâmetro medido pelo ensaio da ASTM C1202) pouco contribuem para o transporte de íons cloreto. Pela análise individual dos componentes do concreto, o autor afirmou que:

a) O uso de materiais cimentícios suplementares pode alterar significativamente a solução dos poros do concreto, porque incorporam muitos álcalis nos produtos hidratados, resultando na alteração química da solução dos poros;

b) O aumento do volume de agregado no concreto tem um efeito diluente de íons condutivos e álcalis que podem ser adsorvidos na sua superfície, diminuindo a condutividade. Certos tipos de agregados podem, também, liberar íons na solução dos poros que a tornam mais condutiva.

c) A composição do cimento também tem grande influência sobre a solução dos poros do concreto.

Wee, Suryavanshi e Tin (2000) relataram que a avaliação da penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata é influenciada pela estrutura de poros, pela capacidade de fixação de cloretos nas fases do cimento ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ) e, também, pela dupla camada elétrica formada nas paredes dos poros. Já o ensaio da ASTM C1202, além de ser controlado pela microestrutura, também depende da condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, o rebaixamento da condutividade da solução dos poros (devido à diminuição dos íons  $OH^-$ ) sugere maior ganho de resistência à penetração de cloretos quando se aumenta o grau de hidratação do que realmente acontece. Os autores ainda sugerem que, durante o ensaio acelerado, o teste rápido de penetração de cloretos (TRPC), o impulso gerado pelo campo elétrico externo deverá impedir, ou diminuir a interação química entre os cloretos e o concreto (como fixação de cloretos e dupla camada elétrica).

No presente trabalho, o TRPC, proposto pela ASTM C1202, foi utilizado para determinar a resistência de concretos com idades de 28 e 91 dias, com diferentes teores de CCA e submetidos a diferentes períodos de cura, conforme descrito no item 3.4.1, à penetração de cloretos. Os resultados foram comparados ao concreto de referência (100% cimento Portland) e àqueles em que parte do cimento foi substituído por sílica ativa. Segundo Bryant Junior (2009), especificações baseadas no ensaio da ASTM C 1202 são muito comuns na indústria da construção nos Estados Unidos. O autor ainda cita que o Departamento de Transporte da Virgínia está conduzindo um programa para usar a ASTM C 1202 como especificação de desempenho, e a Autoridade Portuária de Nova York e Nova Jersey usa a ASTM C 1202 em suas especificações de desempenho de concretos.

Os resultados das cargas passantes ( $Q$ ) obtidas, dos coeficientes  $C$  e  $D$  das equações  $Q = C/D^x$  e os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) são apresentados nas tabelas 17 e 18. Os coeficientes foram calculados a partir da correlação entre carga total passante ( $Q$ ) e da relação  $a/a_g$  de cada mistura.

Na tabela 19, apresenta-se a classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos, de acordo com a ASTM C1202. A classificação foi feita a partir da carga total passante obtida no ensaio TRPC.

Da análise geral dos resultados obtidos, constatou-se grande variabilidade dos valores de carga passante entre as várias misturas investigadas.

## 4.3.1 Influência da relação água/aglomerante

Independentemente da relação a/ag, do período de cura e da idade de ensaio, a REF apresentou os maiores valores de carga total passante, conforme pode ser visto nas figuras 34, 35, 36 e 37, sendo classificada como o concreto de menor resistência à penetração de cloretos, dentre todos os analisados.

Tabela 17 - Resultados de carga total passante aos 28 dias.

Mistura	Período de cura (dias)	Carga total passante (Coulombs)					
		a/ag			Coeficientes <sup>A</sup>		
		0.35	0.50	0.65	C	D	r <sup>2</sup>
REF	3	2611	3762	4863	1286,90	0,1258	0,9999
	7	2482	3395	4283	1331,12	0,1622	0,9999
5 CCAC	3	1820	3424	4534	665,29	0,0477	0,9945
	7	1750	3251	4203	668,86	0,0539	0,9917
10 CCAC	3	1159	2226	2961	412,50	0,0439	0,9944
	7	893	1276	1659	440,41	0,1269	1,0000
20CCAC	3	469	1226	1944	97,03	0,0087	0,9998
	7	440	942	1542	106,53	0,0153	0,9986
30CCAC	3	448	1142	1683	104,79	0,0121	0,9974
	7	373	934	1496	79,48	0,0097	0,9999
5 CCAE	3	1823	3192	4105	744,46	0,0668	0,9934
	7	1690	2655	3621	711,25	0,0789	1,0000
10 CCAE	3	1173	2374	3548	339,20	0,0249	0,9999
	7	940	2258	2623	320,48	0,0326	0,9504
20CCAЕ	3	693	1340	1736	253,48	0,0467	0,9904
	7	591	1151	1578	199,17	0,0378	0,9969
30CCAЕ	3	510	1098	1514	154,47	0,0266	0,9952
	7	494	914	1234	179,04	0,0473	0,9969
5 SA	3	711	1638	2328	193,14	0,0192	0,9964
	7	661	1377	2093	181,56	0,0214	1,0000
10 SA	3	392	1017	1759	72,93	0,0067	0,9987
	7	341	814	1402	69,23	0,0089	0,9980

A: Coeficientes C e D das equações exponenciais que relacionam a Carga Total Passante (Q) e a relação a/ag  $x$ , dada pela expressão  $Q = C/D^x$ , em Coulombs, para cada mistura testada.

Tabela 18 - Resultados de carga total passante aos 91 dias.

Mistura	Período de cura (dias)	Carga total passante (Coulombs)					
		a/ag			Coeficientes <sup>A</sup>		
		0.35	0.50	0.65	C	D	r <sup>2</sup>
REF	3	2291	3218	4146	1163,43	0,1384	1,0000
	7	1815	2845	3827	779,77	0,0832	0,9999
5 CCAC	3	1358	3079	3823	448,81	0,0317	0,9748
	7	1295	2420	3545	416,54	0,0348	1,0000
10 CCAC	3	708	1657	2147	214,16	0,0248	0,9835
	7	612	1077	1543	215,32	0,0458	0,9999
20CCAC	3	362	1039	1611	70,28	0,0069	0,9988
	7	278	887	1498	43,32	0,0036	0,9999
30CCAC	3	292	756	1568	42,64	0,0037	0,9878
	7	263	540	981	57,78	0,0124	0,9914
5 CCAE	3	1227	2264	3869	325,47	0,0217	0,9924
	7	1150	2156	2849	423,01	0,0486	0,9944
10 CCAE	3	548	1540	2241	118,25	0,0091	0,9951
	7	444	1465	2049	86,03	0,0061	0,9879
20CCAE	3	324	992	1586	56,60	0,0050	0,9994
	7	305	839	1447	53,61	0,0056	0,9993
30CCAE	3	318	810	1349	63,24	0,0081	0,9996
	7	293	767	1003	78,27	0,0165	0,9818
5 SA	3	481	1598	2117	99,51	0,0071	0,9784
	7	409	1161	1913	74,03	0,0058	1,0000
10 SA	3	233	864	1725	24,99	0,0013	0,9961
	7	228	668	1260	33,39	0,0033	0,9964

A: Coeficientes C e D das equações exponenciais que relacionam a Carga Total Passante (Q) e a relação a/ag x, dada pela expressão  $Q = C/D^x$ , em Coulombs, para cada mistura testada.

Tabela 19 - Classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos.

Penetração de cloretos	Carga Total Passante (Coulomb)
alta	> 4000
moderada	de 2000 a 4000
baixa	de 1000 a 2000
muito baixa	de 100 a 1000
desprezível	< 100

Fonte: ASTM C1202 (2005).

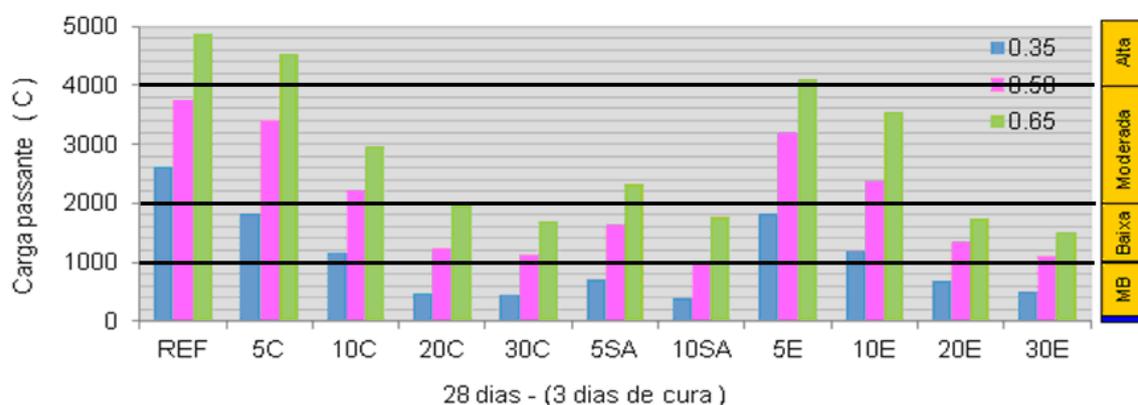


Figura 34 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade - cura de três dias.

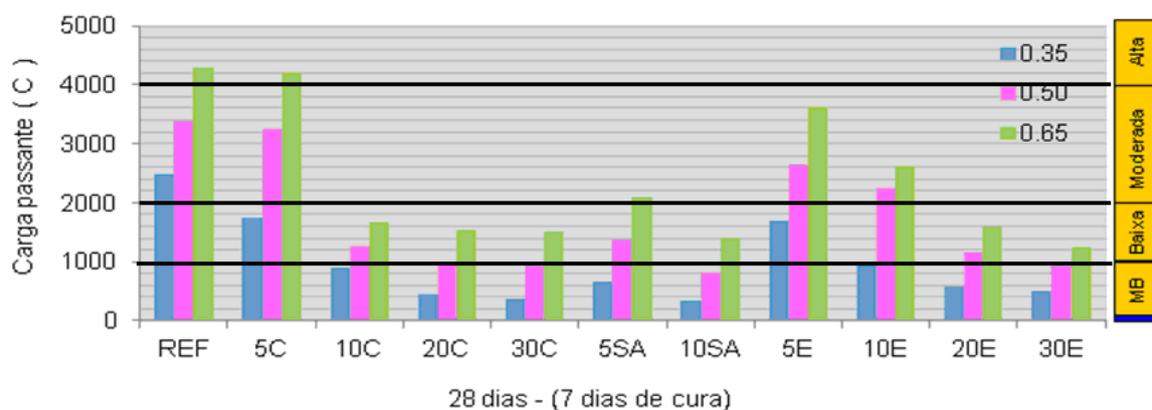


Figura 35 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade - cura de sete dias.

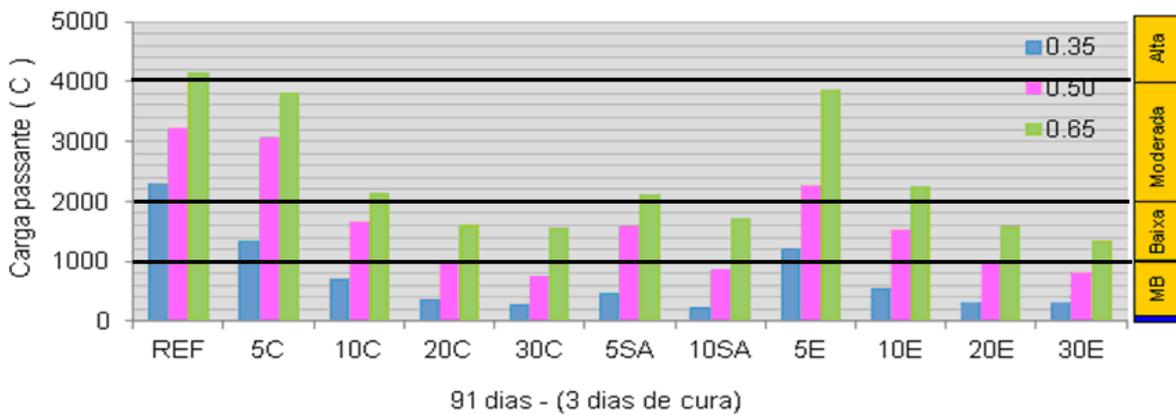


Figura 36 - Carga total passante das misturas investigadas aos 91 dias de idade - cura de três dias.

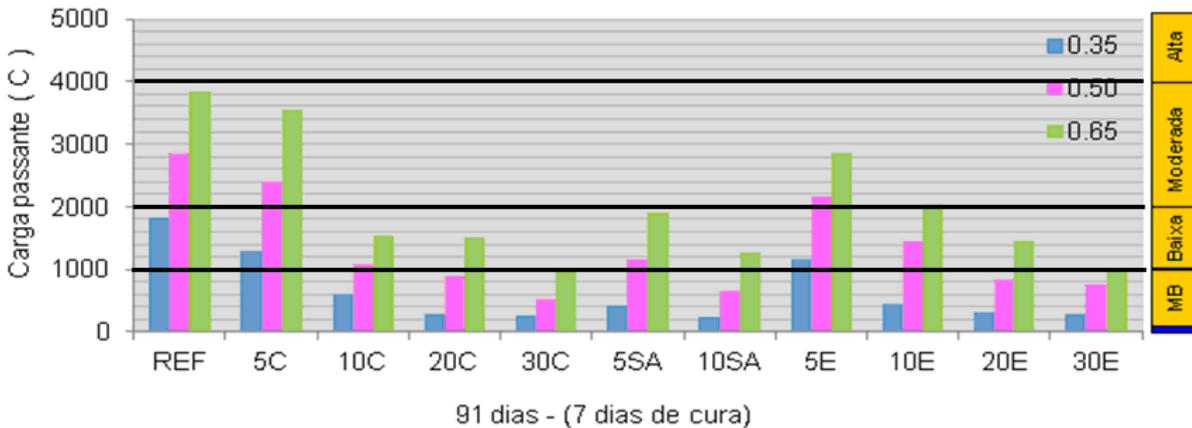


Figura 37 - Carga total passante das misturas investigadas segundo aos 91 dias de idade - cura de sete dias.

Em todas as misturas investigadas, a redução da relação  $a/ag$  reduziu o valor da carga total passante, tornando o concreto menos permeável e, conseqüentemente, aumentando a resistência deste à penetração de cloretos, como esperado. Esse comportamento também foi observado por Crauss (2010), Battagin et al. (2002), Gastaldini e Isaia (2005), Saciloto (2005) e outros. Para Battagin et al. (2002), a cura influencia a penetrabilidade do concreto aos íons cloreto, porém, a relação  $a/ag$  é a mais preponderante nesse aspecto.

Para a idade de ensaio de 28 dias e de cura úmida de três dias, a mistura 10SA foi a que apresentou maior redução de carga total passante quando a relação  $a/ag$  passou de 0,65 para 0,50 e de 0,65 para 0,35, 42% e 78%, respectivamente.

No entanto, quando a relação  $a/ag$  foi reduzida de 0,50 para 0,35, a mistura 20C obteve o maior decréscimo (62%), seguida das misturas 30C e 10SA, ambas com 61%.

Nos concretos curados por sete dias, novamente, a mistura 10SA registrou decréscimos maiores de carga total passante quando a relação  $a/ag$  foi reduzida de 0,65 para 0,50 e 0,65 para 0,35, com valores de 42% e 76%, respectivamente. Quando a relação  $a/ag$  passou de 0,50 para 0,35 a mistura 30C, obteve-se uma redução de 60%, seguida das misturas 10SA e 10E, com 58%.

Ao analisar os resultados do ensaio realizado aos 91 dias com cura aos três dias, pode-se perceber que a redução mais expressiva foi de 52% da mistura 30C quando a relação  $a/ag$  passou de 0,65 para 0,50, seguida da mistura 10SA, com 50%. Quando a relação  $a/ag$  passou de 0,50 para 0,35 e 0,65 para 0,35, a mistura 10SA apresentou os maiores decréscimos de  $Q$  com valores de 73% e 86% respectivamente.

Com o prolongamento do período de cura para sete dias, a mistura 10SA confirmou ser a mais sensível quanto à alteração da quantidade de água no concreto, pois apresentou redução de carga total passante de 47% quando a relação  $a/ag$  passou de 0,65 para 0,50, 82% com a  $a/ag$  reduzida de 0,65 para 0,35 e, com a variação da  $a/ag$  de 0,50 para 0,35, apresentou um decréscimo de 66%, ou seja, próximo dos 70% apresentado pela mistura 10E.

Com os resultados analisados, foi possível perceber a interferência da quantidade de água da mistura na penetrabilidade do concreto e, conseqüentemente, na resistência à penetração de cloretos, pois, em todas as misturas investigadas, quanto maior a relação  $a/ag$  utilizada maior foi o valor de carga total passante encontrado e menor a resistência à penetração de íons cloreto.

O aumento da resistência à penetração de cloretos conforme a redução da relação  $a/ag$  é um assunto já bastante estudado. Este comportamento pode ser visto em vários trabalhos, como o de Hoffmann (2001), que, ao analisar um concreto com teor de substituição de 10% de sílica ativa, observou um decréscimo na carga total passante de 88% ao reduzir a relação  $a/ag$  de 0,75 para 0,28.

Missau (2004), estudando teores de substituição de 10%, 20% e 30% de CCA, com relações  $a/ag$  de 0,35, 0,50 e 0,65, observou decréscimos nos valores de carga passante conforme a diminuição da relação  $a/ag$ .

#### 4.3.2 Influência do teor de substituição do cimento pelas adições minerais

O valor da carga total passante, obtida no TRPC, é diretamente influenciado pelas alterações na microestrutura da pasta e na composição química da solução aquosa dos poros, provocadas pelas reações pozolânicas (SHI; STEGEMANN; CALDWELL, 1998). A descontinuidade e a tortuosidade da rede de poros dificultam a passagem dos íons cloreto e as alterações na composição química da solução de poros modificam a condutividade elétrica do concreto. Fatos que sofrem influência direta da quantidade de adição mineral utilizada na mistura.

Neste tópico, será discutido isoladamente quanto o teor de substituição de cimento pelas adições minerais influencia a redução da carga total passante. Nas tabelas 20 e 21, pode-se observar a porcentagem de redução da carga passante de cada mistura em relação à REF para os dois períodos de cura e três relações a/ag estudados.

Tabela 20 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 28 dias para três e sete dias de cura úmida.

Mistura	Redução de Carga Passante (%)			Mistura	Redução de Carga Passante (%)		
	28 dias - 3 d cura				28 dias - 7 d cura		
	0,35	0,50	0,65		0,35	0,50	0,65
REF	0	0	0	REF	0	0	0
5C	30	9	7	5C	29	4	2
10C	56	41	39	10C	64	62	61
20C	82	67	60	20C	82	72	64
30C	83	70	65	30C	85	72	65
5SA	73	56	52	5SA	73	59	51
10SA	85	73	64	10SA	86	76	67
5E	30	15	16	5E	32	22	15
10E	55	37	27	10E	62	33	39
20E	73	64	64	20E	76	66	63
30E	80	71	69	30E	80	73	71

Tabela 21 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 91 dias para três e sete dias de cura úmida.

Mistura	Redução de Carga Passante (%)			Mistura	Redução de Carga Passante (%)		
	91 dias - 3 d cura				91 dias - 7 d cura		
	0,35	0,50	0,65		0,35	0,50	0,65
<b>REF</b>	0	0	0	<b>REF</b>	0	0	0
<b>5C</b>	41	4	8	<b>5C</b>	29	15	7
<b>10C</b>	69	49	48	<b>10C</b>	66	62	60
<b>20C</b>	84	68	61	<b>20C</b>	85	69	61
<b>30C</b>	87	77	62	<b>30C</b>	86	81	74
<b>5SA</b>	79	50	49	<b>5SA</b>	77	59	50
<b>10SA</b>	90	73	58	<b>10SA</b>	87	77	67
<b>5E</b>	46	30	7	<b>5E</b>	37	24	26
<b>10E</b>	76	52	46	<b>10E</b>	76	49	46
<b>20E</b>	86	69	62	<b>20E</b>	83	71	62
<b>30E</b>	86	75	67	<b>30E</b>	84	73	74

É notável o bom desempenho das três adições minerais investigadas quando se aumenta o teor de substituição nas misturas, independentemente do período de cura úmida e da relação a/ag. Com o aumento do teor de substituição, foram observadas reduções no valor da carga total passante, o que indica melhoria na qualidade dos concretos que contêm adições minerais. Fato também analisado por Nehdi, Duquette e El Damatty (2003).

Missau (2004) observou, em relação à REF, reduções na carga passante e igual relação a/ag, 0,35, 0,50 e 0,65, de 55%, 46% e 51% (10% de CCA), 69%, 70% e 71% (20% CCA) e 74%, 74% e 68% (30% de CCA).

No ensaio realizado aos 28 dias em concretos curados por três dias, a CCAC apresentou decréscimos significativos de carga total passante até teores de 20% de substituição, em relação à REF, com valores de carga passante de 469 C (redução de 82%), 1226 C (redução de 67%) e 1944 C (redução de 60%) nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente. O mesmo comportamento pode ser observado na CCAE, pois, na mesma ordem de relações a/ag citadas, obteve carga passante de 693 C (redução de 73%), 1340 C (redução de 64%) e 1736 C (redução de 64%)

para 20% de substituição. O teor de 30% diminuiu a carga total passante, porém, não houve um ganho expressivo em relação ao já conquistado pelo teor de 20%.

A sílica ativa utilizada em substituição ao cimento Portland no teor de 5% apresentou carga passante de 711 C (redução de 73%), 1638 C (redução de 56%) e 2328 C (redução de 52%) nas relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente, em comparação à REF, comprovando ser uma adição altamente reativa. Quando utilizada em teores de 10% de substituição, apresentou valores de 392 C (redução de 85%), 1017 C (redução de 73%) e 1759 C (redução de 64%), para as mesmas relações a/ag.

Quando realizada cura de sete dias, a CCAC apresentou altos valores de redução da carga total passante. Para teores de substituição de 10% apresentou valores de carga passante de 893 C, 1276 C e 1659 C, para relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente, valores estes 60% inferiores em relação à mistura de referência. Com a CCAE, os valores de decréscimos foram mais expressivos no teor de 20%, com carga passante de 591 C (redução de 76%), 1151 C (redução de 66%) e 1578 C (redução de 63%) para a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65 respectivamente. Para a sílica ativa, os valores foram muito semelhantes aos das misturas com três dias de cura úmida, para os dois teores de substituição investigados.

No ensaio realizado aos 91 dias, todas as adições minerais mantiveram o mesmo comportamento em relação ao ensaio de 28 dias, para os períodos de cura de três e sete dias, como pode ser observado na tabela 22. Para a cura de três dias, a CCAC e a CCAE apresentaram reduções mais expressivas de carga total passante no teor de 20% de substituição, com valores de 362 C (redução de 84%), 1039 C (redução de 68%) e 1611 C (redução de 61%) para a CCAC, e 324 C (redução de 86%), 992 C (redução de 69%) e 1586 C (redução de 62%) para a CCAE nas relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente. A sílica ativa, novamente, mostrou bom desempenho já com 5% de substituição, proporcionando maior redução na carga passante quando utilizada no teor de substituição de 10%.

Com período de cura de sete dias, a CCAC apresentou reduções acima de 60% no teor de 10% de substituição. Para a CCAE, os decréscimos mais expressivos voltaram a ser no teor de 20%, com valores de 305 C (redução de 83%), 839 C (redução de 71%) e 1447 C (redução de 62%), na ordem crescente de relação a/ag, e a sílica ativa continuou apresentando bom desempenho frente à

penetração de cloretos, apontado pelos altos percentuais de redução de carga total passante, mesmo com baixos teores de substituição ao cimento.

Assim, verificou-se que, de maneira geral, tanto para a CCAC como para a CCAE, obtêm-se ganhos significativos na redução da carga total passante até valores de 20% de substituição. A sílica ativa apresentou reatividade maior que as duas CCAs estudadas, com altos valores de decréscimos já com teor de 5% de substituição, os quais se mostraram ainda maiores com o aumento do teor para 10%. Para esta porcentagem de sílica ativa, nas relações a/ag 0,35 e 0,50, as reduções de carga passante, aos 28 dias, são superiores às obtidas com 30% de CCAC e CCAE para os dois períodos de cura.

Deste modo, a inclusão de adições minerais nas misturas, resultou em concretos com menores valores de carga total passante, de acordo com a ASTM C1202, e, conseqüentemente, mais resistentes à penetração de íons cloretos. Fato também observado por Gastaldini e Isaia (2005), Salas et al. (2009) e Bui et al. (2012) ao estudarem cinzas amorfa e cristalina, com 20% de substituição ao cimento e compará-las com a mistura de referência (sem adição).

Hoffmann (2001), estudando concretos com adição de sílica ativa em teores de 5%, 10%, 15% e 20%, obteve reduções da carga passante conforme o aumento do teor de substituição. Essas reduções chegaram até 100% na relação a/ag de 0,28 com 20% de substituição, em relação ao concreto de referência. A autora atribuiu esse comportamento ao efeito pozolânico e microfíler proporcionado pela sílica ativa, que provoca maior refinamento da estrutura de poros do concreto e gera uma microestrutura mais fechada e densa, aumentando a resistência do concreto à penetração dos íons cloreto.

#### 4.3.3 Influência do período de cura úmida

No presente trabalho, ao se analisar exclusivamente o efeito do prolongamento do período de cura úmida de três para sete dias, observou-se uma diminuição do valor da carga passante obtida no ensaio ASTM C1202 em todas as misturas e relações a/ag investigadas, como esperado.

Na tabela 22, apresenta-se, em porcentagem, a influência que o aumento do período de cura teve sobre as misturas investigadas, para os ensaios de 28 e 91 dias.

Tabela 22 - Influência do período de cura úmida sobre a redução da carga passante.

Mistura	Redução de Carga Passante (%)			Mistura	Redução de Carga Passante (%)		
	3 para 7 dias cura - 28 dias				3 para 7 dias cura - 91 dias		
	0,35	0,50	0,65		0,35	0,50	0,65
<b>REF</b>	5	10	12	<b>REF</b>	21	12	8
<b>5C</b>	4	5	7	<b>5C</b>	5	21	7
<b>10C</b>	23	43	44	<b>10C</b>	14	35	28
<b>20C</b>	6	23	21	<b>20C</b>	23	15	7
<b>30C</b>	17	18	11	<b>30C</b>	10	29	37
<b>5SA</b>	7	16	10	<b>5SA</b>	15	27	10
<b>10SA</b>	13	20	20	<b>10SA</b>	2	23	27
<b>5E</b>	7	17	12	<b>5E</b>	6	5	26
<b>10E</b>	20	5	26	<b>10E</b>	19	5	9
<b>20E</b>	15	14	9	<b>20E</b>	6	15	9
<b>30E</b>	3	17	18	<b>30E</b>	8	5	26

No ensaio ASTM C1202, realizado aos 28 dias, o aumento do período de cura em câmara úmida de três para sete dias resultou em reduções da carga passante que variam de 3% na mistura 30E e na relação a/ag 0,35 até 44% na mistura 10C e na relação a/ag 0,65.

Para a relação a/ag de 0,35, as reduções mais significativas ocorreram com as misturas de 10C (23%) e 10E (20%), pois quando curadas por três dias, ocupavam a classe dos concretos com baixa penetração de cloretos, segundo critério de classificação proposto pela ASTM C1202, e com o prolongamento do período de cura adquiriram características de concretos pertencentes à classe de muito baixa penetração de cloretos.

Na relação a/ag de 0,50, a mistura 10C obteve uma redução de 43% da carga passante, o que possibilitou a passagem desta mistura da classe moderada para baixa penetração de cloretos. Já as misturas 20C, 30C, 10SA e 30E com reduções

de 23%, 18%, 20% e 17%, respectivamente, passaram a ocupar a classe de muito baixa penetração de cloretos.

Para a relação 0,65, os decréscimos mais expressivos foram nas misturas 10C, 20C, 10SA e 10E, com porcentagem de redução de 44%, 21%, 20% e 26%, respectivamente. Porém, das misturas mencionadas, apenas a 10C mudou da classe moderada para baixa penetração de cloretos.

No ensaio realizado aos 91 dias, o aumento do período de cura ocasionou decréscimos de carga passante que variaram de 2% para a mistura 10SA (a/ag 0,35) até 37% para a mistura 30C (a/ag 0,65).

Na relação a/ag 0,35, as reduções mais significativas foram da REF e das misturas 20C e 10E, com porcentagens de 21%, 23% e 19%, respectivamente, mas apenas a REF mudou da classe moderada para baixa penetração de cloretos.

Para a/ag 0,50, as misturas 5C, 10C, 30C, 5SA e 10SA apresentaram decréscimos de carga passante acima dos 20% e, para a relação a/ag de 0,65, as reduções mais expressivas da carga passante, acima de 20%, ocorreram nas misturas 10C, 30C, 10SA, 5E e 30E. Contudo, apenas as misturas 10C e 30C obtiveram, respectivamente, mudança de classe para baixa e muito baixa.

Analisando os resultados obtidos no ensaio proposto pela ASTM C1202, observou-se não haver uma tendência geral para o valor percentual da redução quando se aumenta o teor de adição mineral ou da relação a/ag, sendo essa redução característica de cada mistura ou relação a/ag. Apenas percebeu-se, que, ao se prolongar o período de cura úmida de três para sete dias, as misturas compostas com CCAC mostraram-se mais sensíveis do que as com CCAE, ou seja, apresentaram decréscimos percentuais superiores na maioria dos casos.

Com isto, percebeu-se a influência que a cura exerce sobre o concreto em relação à capacidade de resistir ao ataque de íons agressivos, pois o referido aumento do período de cura proporcionou decréscimos de carga passante que ultrapassaram 40% em alguns casos, melhorando sensivelmente a qualidade dos concretos investigados.

Battagin et al. (2002), ao estudarem a influência do período de cura em câmara úmida sobre concretos com relações a/ag de 0,30, 0,45 e 0,65, frente à penetração de cloretos, observaram, através do ensaio regido pela ASTM C1202, uma redução da carga passante conforme o aumento do período de cura úmida. Este comportamento foi mais significativo nas relações a/ag de 0,45 e 0,65.

#### 4.3.4 Determinação da profundidade de penetração nas misturas submetidas ao ensaio TRPC (ASTM C1202)

Ao término do ensaio acelerado de penetração de cloretos, os corpos de prova foram rompidos ao meio por compressão diametral e receberam, nas faces rompidas, um jato de solução de nitrato de prata (0,1 M) com o objetivo de medir a profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico. Nas figuras 38, 39, 40 e 41 são apresentados, em gráficos os resultados da correlação entre carga passante e profundidade de penetração aos 28 e 91 dias de ensaio para os dois períodos de cura úmida analisados.

De acordo com estes gráficos e com os coeficientes de correlação ( $R^2$ ), observou-se a grande dependência entre estas duas grandezas, também verificada por Andrade et al. (1999).

Cezar (2011), analisando a resistência de concretos compostos com CCA moída e natural, em teores de substituição de 15% e três relações a/ag (0,45-0,55-0,65), à penetração de cloretos, verificou que os resultados obtidos pelo teste colorimétrico, realizado após o ensaio acelerado, apresentaram tendência semelhante aos da carga passante, evidenciando a forte correlação existente entre as duas grandezas.

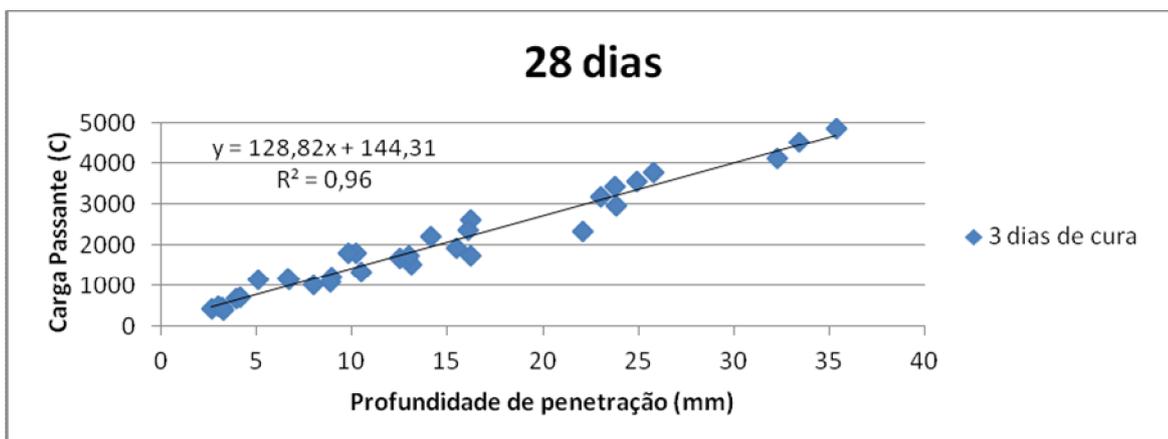


Figura 38 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 28 dias.

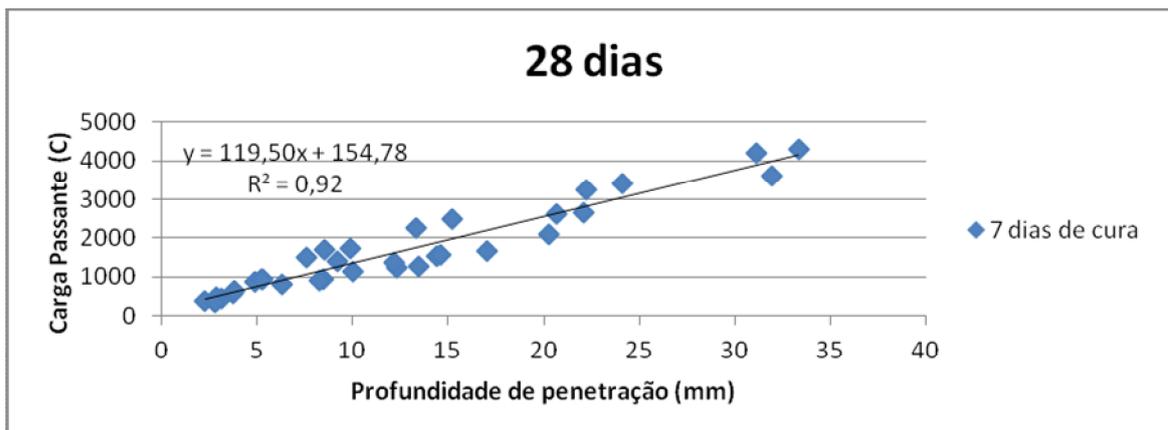


Figura 39 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 28 dias.

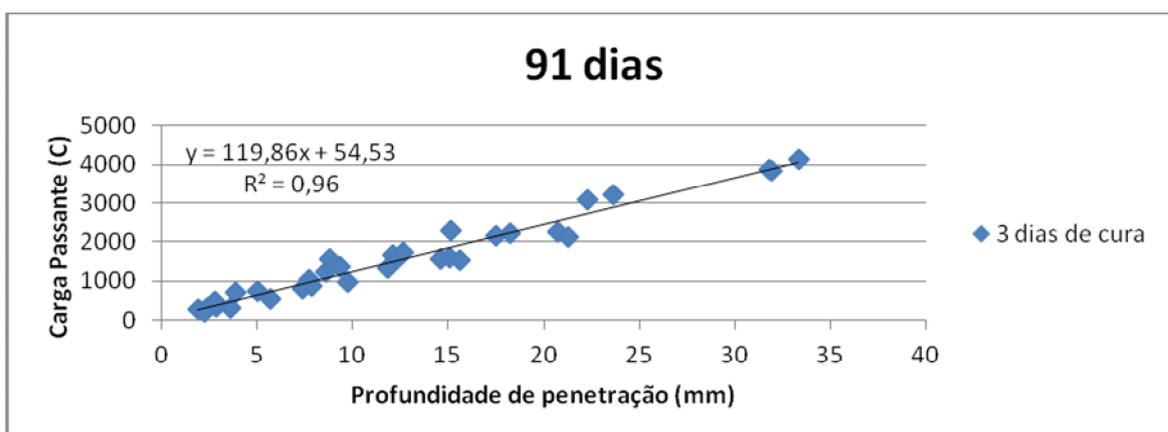


Figura 40 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 91 dias.

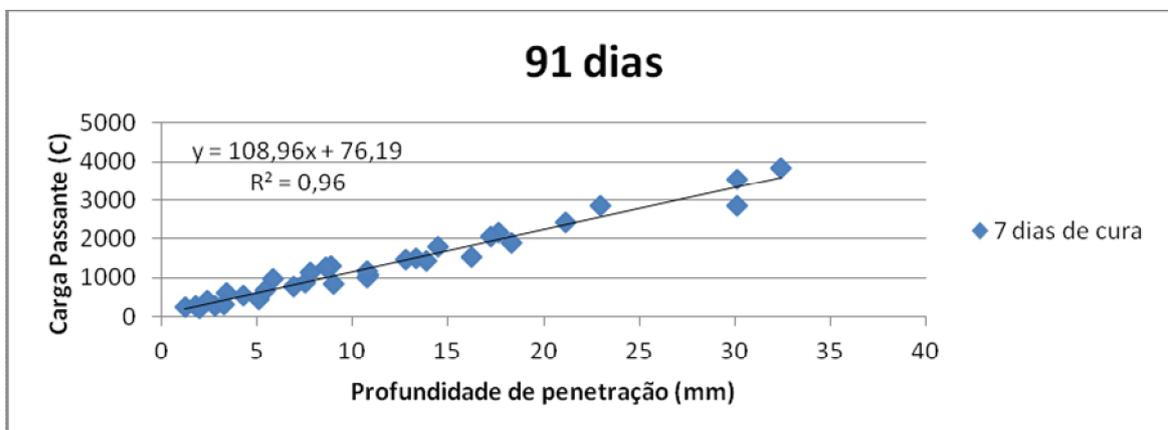


Figura 41 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 91 dias.

#### 4.3.5 Comparação entre carga passante e resistência à compressão

Neste tópico, são apresentados e comparados os resultados obtidos da carga passante e da resistência à compressão das misturas investigadas, aos 28 dias, para as relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65 e para os períodos de cura úmida de três e sete dias.

As figuras 42, 43 apresentam gráficos de cada mistura. Cada gráfico é composto por três pontos (cada ponto corresponde a uma relação a/ag), que correlacionam os valores encontrados para carga passante (tabelas 17) com valores de resistência à compressão obtidos através do trabalho de Da Silva (2012) (Anexo A e B).

De acordo com os resultados, percebeu-se, de maneira geral, uma relação inversa entre a carga passante e a resistência à compressão do concreto, ou seja, quanto maior o valor da resistência mecânica, menor foi o valor da carga passante. Este comportamento já era esperado, pois concretos de maior resistência mecânica são menos porosos, e, portanto mais resistentes à penetração de íons agressivos, como os cloretos.

Crauss (2010), ao estudar a penetração de cloretos em diferentes tipos de cimento e em diferentes níveis de resistência (15 MPa, 20 MPa e 25 MPa), observou, também, uma diminuição do valor da carga total passante a medida que aumentou a resistência do concreto para todos os tipos de cimento.

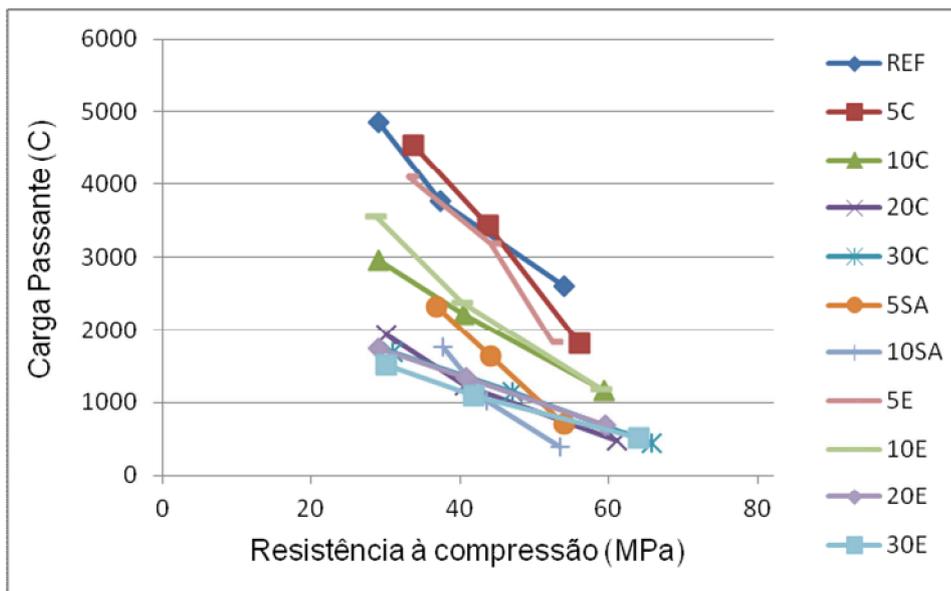


Figura 42 - Carga passante *versus* resistência à compressão . 28 dias - três dias de cura.

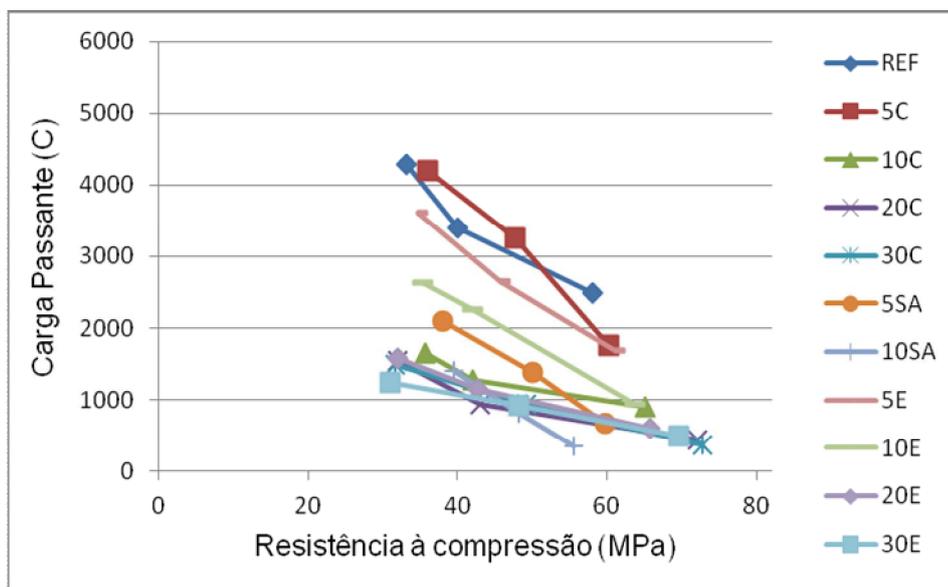


Figura 43 - Carga passante *versus* resistência à compressão . 28 dias - sete dias de cura.

#### 4.4 Análise dos resultados em igualdade de resistência

A resistência mecânica é a propriedade do concreto mais utilizada para especificar estruturas de concreto armado, pois, ao mesmo tempo em que está diretamente ligada ao dimensionamento dessas estruturas, sua medição é de fácil determinação.

Desse modo, neste tópico analisam-se as variações da carga passante e do coeficiente de difusão de cloretos para as diversas misturas investigadas, em dois níveis de resistência à compressão: 40MPa e 50MPa<sup>1</sup>.

Os resultados de resistência à compressão ( $f_c$ ) foram apresentados e discutidos na dissertação de Da Silva (2012), assim como as equações exponenciais (Abrams) que possibilitaram determinar a relação  $a/ag$  de cada mistura para a obtenção dos níveis de resistência à compressão de 40MPa e 50 MPa. Assim, foram calculados os consumos de aglomerante por m<sup>3</sup> para cada mistura e nível de resistência.

Para a obtenção dos valores de carga passante, os valores das relações  $a/ag$  obtidos para cada nível de resistência foram aplicados às equações  $Q = C/D^{a/ag}$ , cujos coeficientes são apresentados na tabela 17. Da mesma forma, foram obtidos os valores dos coeficientes de difusão de cloretos, ou seja, os valores de  $a/ag$  foram aplicados às equações  $k = C/D^{a/ag}$ , cujos coeficientes são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Coeficientes C, D e  $r^2$  das equações exponenciais que relacionam o coeficiente de difusão de cloretos k e a relação  $a/ag$  x, dada pela expressão  $k = C/Dx$  para cada mistura testada.

(continua)

Mistura	Período de cura (dias)	Coeficiente		
		C	D	$r^2$
REF (remoldagem)	3	1,7953	0,3559	0,9995
	7	1,7952	0,4036	0,9886
5 CCAC	3	1,0852	0,3771	0,9977
	7	0,9951	0,3677	0,9982

<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.

Tabela 23 . Coeficientes C, D, e  $r^2$  das equações exponenciais que relacionam o coeficiente de difusão de cloretos k e a relação a/ag x, dada pela expressão  $k = C/Dx$  para cada mistura testada.

(conclusão)

<b>10 CCAC</b>	<b>3</b>	0,9311	0,3459	0,9923
	<b>7</b>	0,8090	0,3207	0,9692
<b>20CCAC</b>	<b>3</b>	0,8655	0,5151	1,0000
	<b>7</b>	0,6658	0,3633	0,9819
<b>30CCAC</b>	<b>3</b>	0,7628	0,4818	0,9988
	<b>7</b>	0,5710	0,3409	0,9897
<b>5 CCAE</b>	<b>3</b>	0,9619	0,1960	0,9881
	<b>7</b>	0,8826	0,1992	0,9909
<b>10 CCAE</b>	<b>3</b>	1,0534	0,4326	0,9962
	<b>7</b>	0,9890	0,4609	0,9977
<b>20CCAЕ</b>	<b>3</b>	0,8696	0,4752	0,9966
	<b>7</b>	0,6759	0,3491	0,9994
<b>30CCAЕ</b>	<b>3</b>	0,6684	0,3639	0,9908
	<b>7</b>	0,6364	0,3728	0,9984
<b>5 SA</b>	<b>3</b>	0,7892	0,2263	0,9947
	<b>7</b>	0,7270	0,2183	0,9933
<b>10 SA</b>	<b>3</b>	0,3349	0,1572	0,9922
	<b>7</b>	0,2923	0,1391	0,9987

A tabela 24 apresenta os valores da relação a/ag, do consumo de aglomerante, do coeficiente de difusão e da carga passante para os níveis de resistência de 40MPa e 50MPa. Ao lado da relação a/ag, é apresentada a classe correspondente de agressividade segundo a Norma Brasileira (NBR) 12655 (2006b).

Tabela 24 - Relações a/ag, consumo de aglomerante, coeficiente de difusão e carga passante, calculados para os níveis de resistência à compressão de 40MPa e 50MPa.

Nível de Resistência	Misturas	Cura (dias)	C.A.*	a/ag	C	K	Q <sup>A</sup>
40 MPa	REF	3	III	0,49	377	2,96	3520
		7	III	0,53	346	2,91	3513
	5CCAC	3	III	0,55	336	1,86	3549
		7	II	0,59	311	1,80	3782
	10CCAC	3	III	0,51	360	1,60	2043
		7	II	0,57	324	1,55	1428
	20CCAC	3	III	0,52	354	1,22	1151
		7	III	0,55	334	1,17	1079
	30CCAC	3	III	0,55	334	1,14	1207
		7	II	0,57	325	1,05	1110
	5CCAE	3	III	0,54	344	2,31	3186
		7	II	0,57	322	2,22	3047
	10CCAE	3	III	0,51	362	1,61	2215
		7	II	0,57	326	1,53	2222
	20CCAE	3	III	0,51	359	1,27	1220
		7	III	0,55	338	1,20	1194
	30CCAE	3	III	0,53	348	1,14	1054
		7	II	0,56	330	1,11	988
	5SA	3	II	0,58	318	1,87	1918
		7	I	0,63	293	1,89	2020
10SA	3	II	0,59	312	1,00	1400	
	7	I	0,65	282	1,05	1465	
50 MPa	REF	3	IV	0,38	458	2,65	2816
		7	IV	0,41	430	2,61	2823
	5CCAC	3	IV	0,42	426	1,63	2374
		7	III	0,46	393	1,58	2587
	10CCAC	3	IV	0,42	426	1,45	1525
		7	III	0,46	396	1,36	1135
	20CCAC	3	IV	0,43	419	1,15	736
		7	III	0,47	387	1,07	764
	30CCAC	3	III	0,46	392	1,07	814
		7	III	0,49	375	0,97	764
	5CCAE	3	IV	0,39	446	1,82	2151
		7	IV	0,45	399	1,84	2255
	10CCAE	3	IV	0,42	428	1,49	1573
		7	IV	0,45	400	1,40	1506
	20CCAE	3	IV	0,42	424	1,19	918
		7	IV	0,45	399	1,09	880
	30CCAE	3	IV	0,44	408	1,04	765
		7	III	0,48	383	1,02	767
	5SA	3	IV	0,41	435	1,44	964
		7	III	0,48	382	1,51	1144
10SA	3	IV	0,40	441	0,70	536	
	7	IV	0,45	401	0,71	579	

LEGENDA: a/ag: relação água/aglomerante; C: consumo de aglomerante, em kg/m<sup>3</sup>; k: coeficiente de difusão de cloretos, em mm/(semana)<sup>1/2</sup>; Q: carga total passante, em Coulomb.

A: Os valores de carga passante Q para os concretos de 40MPa e 50MPa, foram calculadas na idade de 28 dias.

\* Tabela 2 da NBR 12655 (ABNT, 2006b) . Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Da análise da tabela 24, constatou-se que, para um mesmo nível de resistência, existem variações nas relações  $a/ag$ , de acordo com o tipo de mistura e período de cura investigados, que correspondem a diferentes classes de agressividade, segundo a NBR 12655 (2006b). Para a resistência de 40MPa, o menor valor de  $a/ag$  foi 0,49 para a REF (três dias) e o maior foi 0,65 para a mistura 10SA (sete dias). Para o nível de resistência de 50MPa, o menor valor da relação  $a/ag$  foi de 0,38, também para a REF (três dias), e o maior foi de 0,49 para a mistura 30CCAC (sete dias). Portanto, percebeu-se que concretos com mesma resistência podem apresentar durabilidades distintas, pois a relação  $a/ag$  é um dos principais fatores que influênciam a porosidade do concreto.

#### 4.4.1 Análise do consumo de aglomerante para concretos com 40MPa e 50MPa

A partir da análise da tabela 24, constatou-se que todas as misturas apresentam consumo de aglomerante que satisfaz à exigência da NBR 12655.

Conforme a tabela 24 e a figura 44, para o nível de resistência de 40 MPa, a REF apresenta o maior consumo de aglomerante nos dois períodos de cura investigados, pois, para atingir esta resistência, possui os menores valores de relação  $a/ag$  em comparação às outras misturas, 0,49 e 0,53 para os períodos de cura de três e sete dias, respectivamente.

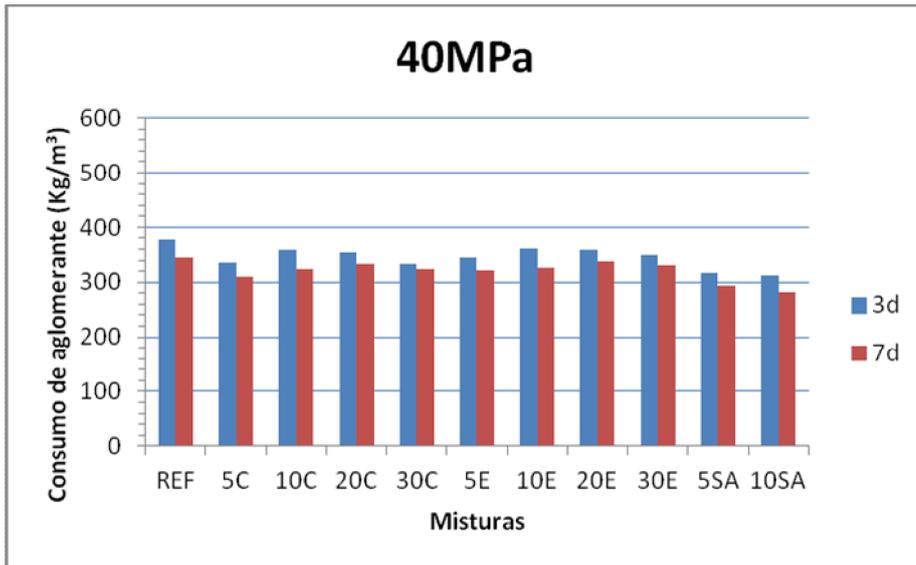


Figura 44 - Consumo de aglomerante por m<sup>3</sup> de concreto para o nível de resistência de 40 MPa e períodos de cura investigados.

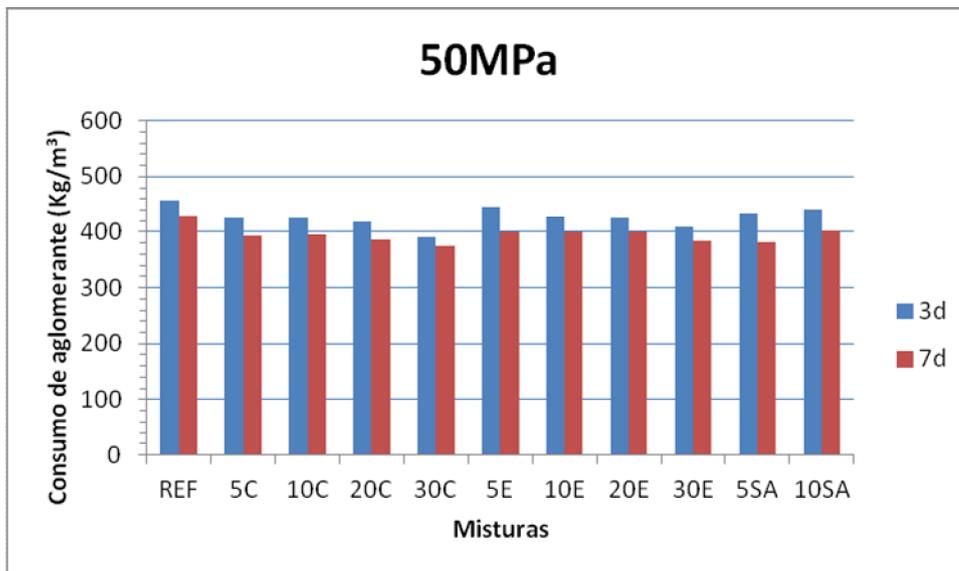


Figura 45- Consumo de aglomerante por m<sup>3</sup> de concreto para o nível de resistência de 50MPa e períodos de cura investigados.

Para o nível de 40 MPa, as misturas com sílica ativa apresentaram os menores consumos de aglomerante, devido aos maiores valores de relação a/ag, o que denota maior reatividade desta adição frente às demais. A mistura 10SA apresentou

redução do consumo de aglomerante de 17% e 19% para os períodos de cura de três e sete dias, respectivamente, em relação à mistura de referência.

As misturas com CCAC e CCAE apresentaram desempenho semelhante, pois a 5CCAC e 5CCAЕ, aos sete dias de cura, obtiveram os menores consumos de aglomerante com valores de 311 Kg/m<sup>3</sup> e 322 Kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, e as misturas 10CCAC e 10CCAЕ, aos três dias de cura, os maiores com valores de 360 Kg/m<sup>3</sup> e 362 Kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, entre todos os teores de CCA investigados.

O aumento no período de cura úmida traz benefícios ao concreto, que, nesse caso, pode ser verificado com a redução do consumo de aglomerante. Para o nível de resistência de 40 MPa, o aumento da cura de três para sete dias, implicou decréscimos no consumo de aglomerante que variaram de 3% a 10%. As misturas 10CCAC, 10CCAЕ e 10SA mostraram-se mais sensíveis com o aumento do período de cura e reduziram, em média, 10% o consumo de aglomerante. Já as misturas 30CCAC e 30CCAЕ apresentaram os menores valores de redução, 3% e 5%, respectivamente.

Assim como no nível de 40 MPa, em igualdade de resistência de 50 MPa, conforme tabela 24 e figura 45, a mistura que apresentou maior consumo de aglomerante foi a REF, para os dois períodos de cura investigados. Já as misturas de 30CCAC e 30CCAЕ apresentaram as menores quantidades de aglomerante para atingir essa resistência, consumindo, em média, 13% e 11%, respectivamente, menos em relação à de referência.

Para este último nível de resistência, o referido aumento do período de cura também proporcionou redução do consumo de aglomerante nas misturas, cujo percentual variou de 4% a 12%, sendo mais expressivo nas misturas 5SA (12%), 5E (11%) e 10SA (9%). Já a mistura 30CCAC apresentou a menor redução (4%), assim como na resistência de 40 MPa.

No trabalho de Da Silva (2012) foram apresentados custos de cada mistura estudada, em igualdade de resistência, a fim de compará-las entre si.

#### 4.4.2 Análise da carga total passante para concretos com 40MPa e 50MPa

Ao analisar a tabela 24 e a figura 46, percebeu-se que, para o nível de resistência de 40MPa, a REF (sem adições) apresenta os maiores valores de carga passante, nos dois períodos de cura úmida, exceto quando comparada à mistura de 5CCAC, pois esta mistura apresenta maiores valores de relação  $a/ag$ , o que interfere diretamente no valor da carga passante e, conseqüentemente, na durabilidade do concreto. Para esse nível de resistência, o menor valor de relação  $a/ag$  pertence à mistura REF (três dias), com 0,49, e o maior pertence à mistura 10SA (sete dias), com 0,65, valor limite especificado pela NBR 12655 para concretos expostos a ambientes não agressivos.

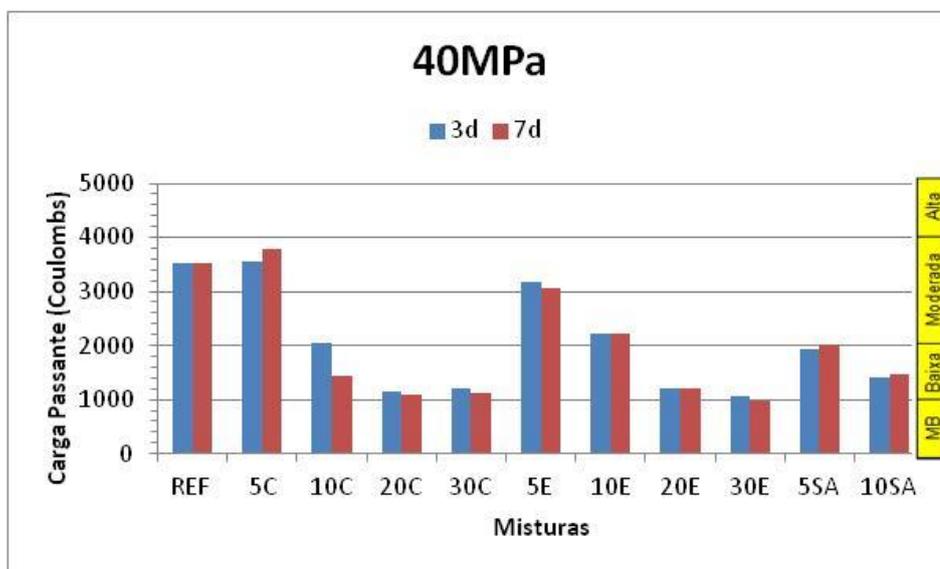


Figura 46 - Carga passante para o nível de resistência de 40 MPa e períodos de cura investigados, juntamente com classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos.

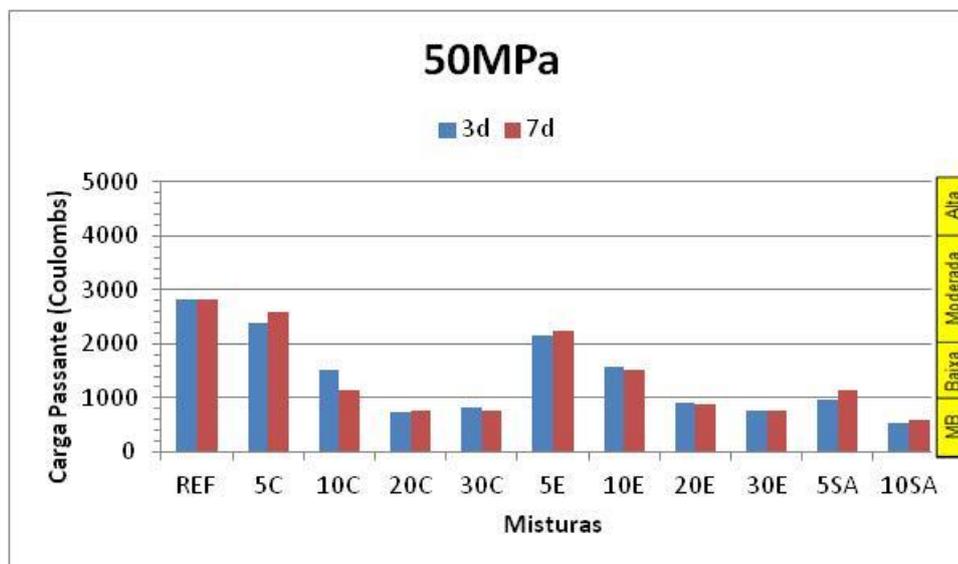


Figura 47 - Carga passante para o nível de resistência de 50 MPa e períodos de cura investigados, juntamente com classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos.

Neste nível de resistência a REF e as misturas 5CCAC, 10CCAC, 5CCAE e 10CCAE apresentaram valores de carga passante de 2000C à 4000C, que as faz pertencer à classe de moderada penetração de cloretos, com exceção, apenas, da mistura 10CCAC (sete dias) a qual, por apresentar o valor de 1428C, pertence à classe de baixa penetração de cloretos, segundo a ASTM C1202.

As misturas 20CCAC, 30CCAC, 20CCAE, 30CCAE, 5SA e 10SA, apresentaram valores de carga passante entre 1000C e 2000C, que as classificam como de baixa penetração de cloretos, com exceção das misturas 30CCAE (sete dias) e 5SA (sete dias), as quais pertencem à classe de muito baixa e de moderada penetração de cloretos, respectivamente.

Com o nível de resistência em 50MPa, novamente, verificaram-se maiores valores de carga passante para a REF (sem adições) em relação a todas as misturas investigadas, independentemente do período de cura analisado, conforme tabela 24 e figura 47. A REF e as misturas 5CCAC e 5CCAE apresentaram valores de carga passante acima de 2000C, obtendo classificação de moderada penetração de cloretos, como no nível de 40MPa. As misturas 10CCAC, 10CCAE e 5SA (sete dias) classificaram-se como baixa penetração de cloretos, e todas as misturas restantes enquadraram-se na classificação de muito baixa penetração de cloretos pois apresentam valores de carga passante menores que 1000 C, sendo a mistura

10SA a de melhor desempenho para os dois períodos de cura úmida, ou seja, com menores valores entre todas misturas investigadas.

O aumento do nível de resistência à compressão do concreto de 40 MPa para 50 MPa resultou na diminuição da carga total passante. Para o período de cura de três dias, as misturas 10CCAC e 10CCAE passaram da classificação de moderada para baixa penetração de cloretos. As misturas 20CCAC, 30CCAC, 20CCAE, 30CCAE, 5SA e 10SA passaram da classificação de baixa para muito baixa penetração de cloretos, ficando as misturas REF, 5CCAC e 5CCAE sem alteração de classe. Para o período de cura de sete dias as misturas 10CCAE e 5SA passaram da classificação de moderada para baixa penetração de cloretos. As misturas 20CCAC, 30CCAC, 20CCAE e 10SA passaram da classificação de baixa para muito baixa penetração de cloretos, as demais misturas não tiveram alteração de classe com o aumento da resistência.

#### 4.4.3 Análise do coeficiente de difusão de cloretos para concretos com 40MPa e 50MPa

Ao analisar a tabela 24 e a figura 48, percebeu-se que, na resistência de 40 MPa, a REF é a mistura que apresenta os maiores valores de coeficientes  $k$  para ambos os períodos de cura. Já os menores valores pertencem às misturas com maiores teores de adições, ou seja, 30CCAC, 30CCAE e 10SA, que apresentam reduções médias de 62%, 61% e 65%, respectivamente, em relação à REF. Esses valores apontam para o bom desempenho da sílica ativa, pois, com teor de 10%, consegue resultados equivalentes aos das CCAs com 30% de substituição.

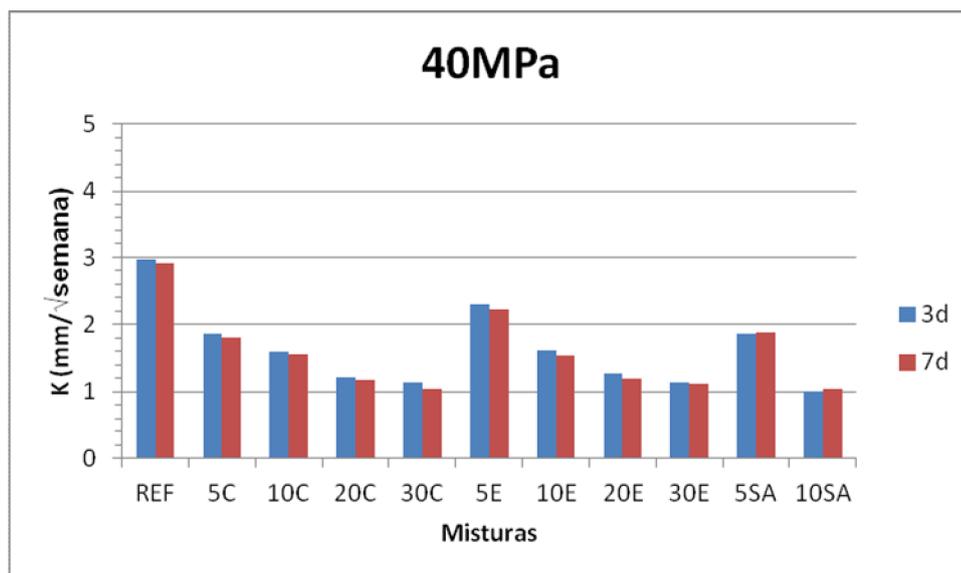


Figura 48 - Coeficiente de difusão de cloretos para o nível de resistência de 40 MPa e períodos de cura investigados.

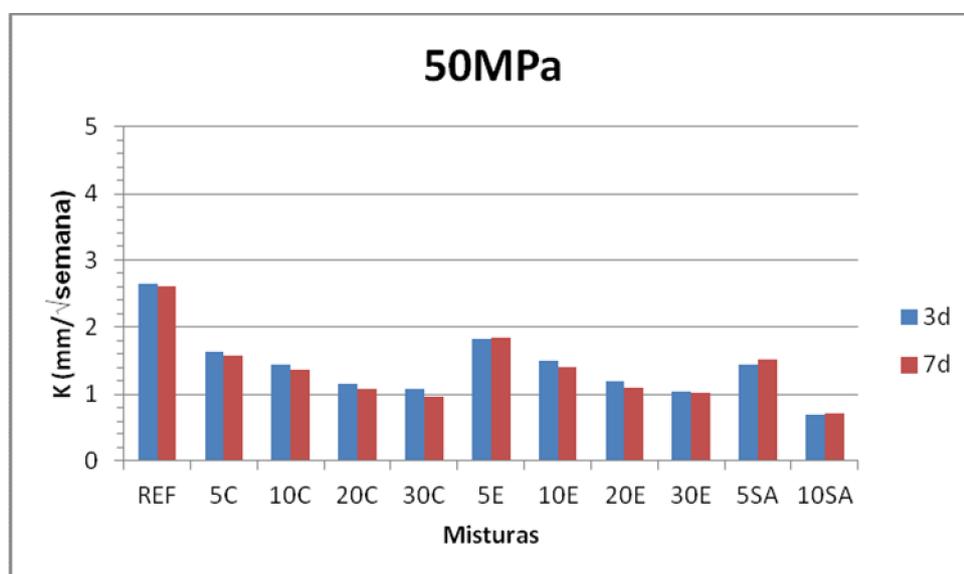


Figura 49 - Coeficiente de difusão de cloretos para o nível de resistência de 50 MPa e períodos de cura investigados.

Outra tendência analisada é a redução dos coeficientes  $k$  conforme o aumento do teor de substituição de cimento por adições minerais.

O prolongamento do período de cura de três para sete dias provocou reduções nos coeficientes  $k$ , exceto nas misturas com sílica ativa. As reduções variaram de 2% para a REF a 8% para a mistura 30CCAC.

Na resistência à compressão de 50 MPa, os concretos apresentaram uma tendência similar ao nível de 40 MPa, embora com valores menores de  $k$ . A REF apresenta os maiores coeficientes  $k$  para os dois períodos de cura úmida e, novamente, os menores valores de  $k$  pertencem às misturas 30CCAC, 30CCAE e 10SA com reduções, em média, de 61% para as misturas com CCA e 73% para a mistura 10SA, em relação à REF.

Para 50 MPa, também foram constatadas reduções de  $k$  conforme o aumento do período de cura, exceto nas misturas 5E, 5SA e 10SA, conforme tabela 24 e figura 49. Os valores variaram de 1%, para REF, a 9%, para a mistura 30CCAC.

#### 4.4.4 Determinação do tempo ( $t_p$ ) para que os íons cloreto penetrem através da camada de cobrimento até a superfície do aço, para concretos com 40MPa e 50MPa

Neste tópico, busca-se avaliar o tempo necessário para que os íons cloreto penetrem na camada de cobrimento, denominado de tempo de penetração ( $t_p$ ), e atinjam a superfície do aço. Com isso, tem-se um parâmetro de comparação entre as misturas estudadas e uma noção sobre o comportamento da difusão dos cloretos nos concretos.

Para o cálculo do  $t_p$ , foram utilizados os resultados dos coeficientes  $k$  (para 40 e 50 MPa), valores de cobrimento retirados da NBR 6118 (2007) (para viga/pilar nas diferentes classes de agressividade ambiental) e foram aplicados à equação de Bakker (apresentada no capítulo 3 desta pesquisa).

Assim, calculado o tempo de penetração, a concentração de cloretos livres em cada profundidade considerada será maior do que 0,15% sobre a massa de cimento, pois este é o valor mínimo necessário para a visualização da profundidade de penetração de cloretos através do EPCANP.

A tabela 25 apresenta os tempos de penetração para cada mistura, o período de cura e a espessura de cobrimento. A fim de comparar os resultados dos coeficientes de difusão e da carga passante, foi inserida a classificação dos concretos quanto à penetração de cloretos, segundo a ASTM C1202.

Com a análise dos resultados, percebeu-se que a REF apresentou os menores tempos de penetração ( $t_p$ ) para os dois níveis de resistência, ou seja, possui o pior desempenho. Para 40 MPa, o  $t_p$  varia de 1,4 anos (cura de três dias e cobrimento de 25mm) a 5,7 anos (cura de sete dias e cobrimento de 50mm) e, da mesma forma, para 50 MPa, o  $t_p$  varia de 1,7 até 7,1 anos.

Para os dois níveis de resistência, as misturas 30CCAC, 30CCAE e 10SA apresentaram os maiores valores de  $t_p$ , ou seja, têm o melhor desempenho frente às outras misturas. Destacou-se o ótimo desempenho do concreto 10SA, na resistência de 50 MPa, pois este possui valores de  $t_p$  muitas vezes superiores ao dobro dos valores das misturas 30CCAC e 30CCAE.

Tabela 25 - Tp (em anos) necessário para os íons cloreto atingirem a camada de passivação do aço, para os níveis de resistência de 40 MPa e 50 MPa.

MISTURAS	CURA (dias)	RESISTÊNCIA									
		40 MPa					50 MPa				
		Espessura do cobrimento (mm)				Classe ASTM <sup>A</sup>	Espessura do cobrimento (mm)				Classe ASTM <sup>A</sup>
		25	30	40	50		25	30	40	50	
REF	3	1,4	2,0	3,5	5,5	M	1,7	2,5	4,4	6,8	M
	7	1,4	2,0	3,6	5,7	M	1,8	2,5	4,5	7,1	M
5CCAC	3	3,5	5,0	8,9	13,9	M	4,5	6,5	11,6	18,1	M
	7	3,7	5,3	9,5	14,8	M	4,8	6,9	12,3	19,3	M
10CCAC	3	4,7	6,8	12,0	18,8	M	5,7	8,2	14,6	22,9	B
	7	5,0	7,2	12,8	20,0	B	6,5	9,4	16,6	26,0	B
20CCAC	3	8,1	11,6	20,7	32,3	B	9,1	13,1	23,3	36,4	MB
	7	8,8	12,6	22,5	35,1	B	10,5	15,1	26,9	42,0	MB
30CCAC	3	9,2	13,3	23,7	37,0	B	10,5	15,1	26,9	42,0	MB
	7	10,9	15,7	27,9	43,6	B	12,8	18,4	32,7	51,1	MB
5CCAE	3	2,3	3,2	5,8	9,0	M	3,6	5,2	9,3	14,5	M
	7	2,4	3,5	6,2	9,8	M	3,6	5,1	9,1	14,2	M
10CCAE	3	4,6	6,7	11,9	18,5	M	5,4	7,8	13,9	21,7	B
	7	5,1	7,4	13,1	20,5	M	6,1	8,8	15,7	24,5	B
20CCAE	3	7,5	10,7	19,1	29,8	B	8,5	12,2	21,7	34,0	MB
	7	8,3	12,0	21,4	33,4	B	10,1	14,6	25,9	40,5	MB
30CCAE	3	9,2	13,3	23,7	37,0	B	11,1	16,0	28,4	44,4	MB
	7	9,8	14,0	25,0	39,0	MB	11,6	16,6	29,6	46,2	MB
5SA	3	3,4	4,9	8,8	13,7	B	5,8	8,3	14,8	23,2	MB
	7	3,4	4,8	8,6	13,5	M	5,3	7,6	13,5	21,1	B
10SA	3	12,0	17,3	30,8	48,1	B	24,5	35,3	62,8	98,1	MB
	7	10,9	15,7	27,9	43,6	B	23,8	34,3	61,0	95,4	MB

A: Classificação dos concretos quanto à penetração de íons cloreto segundo a ASTM C1202: M: moderada penetração de cloretos (2000<cp<4000 coulombs); B: baixa penetração de cloretos (1000<cp<2000 coulombs); MB: muito baixa penetração de cloretos (100<cp<1000 coulombs).

Tabela 26 - Acréscimos percentuais nos tempos de penetração, quando o período de cura aumenta de três para sete dias, para os níveis de resistência de 40 MPa e 50 MPa.

MISTURAS	CURA (dias)	RESISTÊNCIA							
		40 MPa				50 MPa			
		Espessura do cobrimento (mm)				Espessura do cobrimento (mm)			
		25	30	40	50	25	30	40	50
REF	3 / 7	-	-	2,8%	3,6%	5,9%	-	2,3%	4,4%
5CCAC	3 / 7	5,7%	6%	6,7%	6,5%	6,7%	6,1%	6,0%	6,6%
10CCAC	3 / 7	6,4%	5,9%	6,7%	6,4%	14,0%	14,6%	13,7%	13,5%
20CCAC	3 / 7	8,6%	8,6%	8,7%	8,7%	15,4%	15,3%	15,4%	15,4%
30CCAC	3 / 7	18,5%	18,0%	17,7%	17,8%	21,9%	21,8%	21,6%	21,7%
5CCAE	3 / 7	4,3%	9,4%	6,9%	8,9%	-	-	-	-
10CCAE	3 / 7	10,9%	10,4%	10,1%	10,8%	13,0%	12,8%	12,9%	12,9%
20CCAE	3 / 7	10,7%	12,1%	12,0%	12,1%	18,8%	19,7%	19,3%	19,1%
30CCAE	3 / 7	6,5%	5,3%	5,5%	5,4%	4,5%	3,7%	4,2%	4,0%
5SA	3 / 7	-	-	-	-	-	-	-	-
10SA	3 / 7	-	-	-	-	-	-	-	-

Com a análise da tabela 26, percebeu-se que o aumento do período de cura de três para sete dias resultou em um acréscimo do  $t_p$ , sendo a mistura de 30CCAC a que apresentou o maior acréscimo percentual, que é, em média, de 18% para o nível de resistência de 40 MPa e 21,7% para 50 MPa. Já a REF apresentou os menores valores percentuais de acréscimos no tempo de penetração em comparação com as demais misturas. As misturas com sílica ativa e 5CCAE (50MPa) apresentaram comportamento contrário, ou seja, decréscimos de  $t_p$ , devido

a um maior valor do coeficiente de difusão de cloretos na idade de sete dias. Isso se explica pela maior relação  $a/ag$  necessária, nesta idade, para atingir a resistência determinada.

O aumento da resistência de 40 MPa para 50 MPa também gerou uma elevação no  $tp$ , que variou de 12% até 118% entre as misturas investigadas.

A espessura da camada de cobrimento foi o parâmetro que exerceu maior influência sobre o  $tp$ , dentre os  $tps$  analisados, pois, ao dobrar a espessura, obteve-se um aumento médio de quatro vezes no  $tp$ .

Alguns autores contestaram a avaliação da penetração de cloretos pelo método ASTM C1202, como relatado no item 4.3, pois, com a análise dos resultados pode-se perceber algumas incoerências, como é o caso da mistura 5SA (40MPa e 3d), que possui classificação de baixa penetração de cloretos e, ao mesmo tempo, um coeficiente  $k$  de 1,87, portanto, maior do que os coeficientes das misturas 10CCAC (três dias), 5CCAC e 10CCAE que se classificaram como de moderada penetração de cloretos. No entanto, esta avaliação da penetração de cloretos pelo método ASTM C1202 torna-se eficiente para uma análise qualitativa com fins de comparar os concretos investigados.

Ainda nesse contexto, foi possível verificar a existência de alguns concretos com a mesma classificação, mas com diferenças consideráveis nos  $tp$ , como, por exemplo, no nível de 50 MPa, em que as misturas 5SA (três dias) e 10SA (três dias) possuem a classificação de muito baixa penetração de cloretos. No entanto, o concreto 10SA possui um  $tp$  4,2 vezes maior em relação ao  $tp$  da mistura 5SA.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve o objetivo de investigar o desempenho de concretos de cimento Portland (CPV-ARI) com adição de cinzas de casca de arroz com diferentes teores de carbono grafítico, frente à penetração de íons cloreto. Os concretos foram produzidos com teores de substituição parcial de 5%, 10%, 20% e 30%, em relação à massa de cimento, e comparados com misturas de sílica ativa, em teores de substituição de 5% e 10%, e também com a mistura de referência (sem adições minerais). Para todas as misturas, foram utilizadas relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65 e períodos de cura em câmara úmida de três e sete dias. Analisou-se, comparativamente, o desempenho entre as adições minerais e os respectivos teores de substituição, a relação a/ag e o período de cura úmida em relação à penetração desses íons agressivos.

Para atingir os objetivos traçados, foram realizados ensaios de penetração de cloretos, aos 28 e 91 dias, através do Teste Rápido de Penetração de Cloretos (TRPC . ASTM C1202), e aos 91 dias, também através do Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata (EPCANP). Dessa forma, buscou-se alcançar os objetivos estabelecidos e entender os efeitos das adições minerais investigadas frente à penetração de cloretos no concreto.

Pelo EPCANP foi constatada uma diminuição do valor do coeficiente de penetração  $k$  conforme o decréscimo da relação água/aglomerante (a/ag) e o aumento do período de cura úmida e do teor de substituição de cimento pelas adições minerais para todas as misturas investigadas. A mistura de referência (REF) foi a que apresentou os maiores valores de coeficientes  $k$ , dentre todas as misturas, independentemente da relação a/ag e do período de cura, ou seja, apresentou o pior desempenho frente à penetração de cloretos. O maior valor de  $k$  foi o da REF com relação a/ag 0,65 e período de cura de três dias (3,49 mm/ $\frac{1}{2}$ semana) e o menor valor foi o da mistura 10SA com relação a/ag 0,35 e sete dias de cura úmida (0,57 mm/ $\frac{1}{2}$ semana).

De acordo com os resultados, pode-se perceber a grande influência da relação a/ag sobre o coeficiente de penetração  $k$ , chegando a uma redução de 31% no valor de  $k$  na mistura 10SA (3d) quando a relação a/ag diminuiu de 0,50 para

0,35, indicando que relações  $a/ag$  mais baixas proporcionam concretos com menor penetrabilidade.

Ao comparar a cinza de casca de arroz clara (CCAC) com a cinza de casca de arroz (CCAÉ), mantendo fixa a relação  $a/ag$ , o teor de substituição e o período de cura, observou-se que, apesar da pequena diferença entre os valores dos coeficientes de penetração  $k$ , há, de modo geral, melhor desempenho da CCAC na maior parte dos resultados obtidos. O melhor resultado da CCAC pode ser creditado a um maior efeito químico do que físico devido ao maior teor de sílica e ao menor teor de carbono grafítico apresentado por essa cinza, que é nove vezes inferior ao da CCAÉ. Já os concretos com sílica ativa apresentaram os menores valores de  $k$  nos dois teores de substituição, 5% e 10%, quando comparados aos compostos com CCAC e CCAÉ, e ganho significativo na resistência à penetração de cloretos, quando se aumenta o teor de sílica ativa de 5% para 10%, o que significou uma redução média no valor de  $k$  de 49% e 50% para os períodos de cura de três e sete dias, respectivamente.

O aumento do período de cura de três para sete dias reduziu os valores dos coeficientes de penetração  $k$  para todas as misturas, porém estas não variaram linearmente, ou seja, não apresentaram uma tendência geral, atingindo um máximo de 15% de redução. Constatou-se, no entanto, que o aumento da cura exerceu influência positiva sobre todos os concretos investigados, pois favoreceu a formação de uma estrutura mais compacta.

Com base nos resultados obtidos no TRPC, percebeu-se que a redução da relação  $a/ag$ , a substituição do cimento pelas adições minerais, o aumento do período de cura e a idade de ensaio reduziram os valores da carga total passante ( $Q$ ). A REF foi a que apresentou os maiores valores de  $Q$  dentre todas as misturas investigadas, independentemente da relação  $a/ag$  e do período de cura. Já os menores valores de  $Q$ , entre as três adições estudadas, foram as de maiores teores de substituição, 30% de CCAC e CCAÉ, e 10% de SA.

Segundo os critérios da ASTM C1202, para ensaio realizado aos 28 dias, apenas a REF de relação  $a/ag$  0,65 e de ambos os períodos de cura e a mistura 5CCAÉ de relação 0,65 e cura de três dias, foram classificadas como de alta penetração de cloretos. Para o ensaio aos 91 dias, apenas foi assim classificada a REF de relação  $a/ag$  0,65 e cura de três dias, todas as demais pertencem à classe de moderada, baixa e muito baixa penetração de cloretos.

Para o ensaio realizado aos 28 dias, a mistura 10SA foi a que apresentou maiores decréscimos de Q quando se reduziu a relação a/ag, para os dois períodos de cura. Quando a relação a/ag passou de 0,65 para 0,50 e de 0,65 para 0,35, a mistura citada obteve reduções médias de 42% e 77%, respectivamente. Nos ensaios de 91 dias, confirmou-se que a mistura 10SA é a mais sensível quando se altera a quantidade de água no concreto, pois reduziu a Q, em média, em 48% quando a relação a/ag passou de 0,65 para 0,50 e em 84% quando a redução foi de 0,65 para 0,35.

Ao analisar separadamente o desempenho das adições minerais e os teores de substituição, percebeu-se que, além do uso das adições, também o aumento do teor de substituição provocou decréscimos no valor de Q para todas as misturas estudadas. No entanto, observou-se que esses decréscimos foram mais expressivos, para as CCAC e CCAE, nas duas idades de ensaio e nos períodos de cura, até teores de 20% de substituição, com reduções médias de Q de 71% para a CCAC e de 70% para a CCAE, em relação à REF. Com a cura de sete dias, a CCAC apresentou reduções acima de 60% já no teor de 10% de substituição, para as duas idades de ensaio.

A sílica ativa já com 5% obteve reduções de Q bastante expressivas, quando comparada com a CCAC e a CCAE de mesmo teor de substituição. Quando utilizada a sílica ativa em teores de 10%, as reduções foram ainda maiores, podendo ser comparadas à CCAC e à CCAE no teor de 30%, mostrando ser uma adição altamente reativa.

O prolongamento do período de cura de três para sete dias provocou diminuição no valor de Q em todas as misturas e relações a/ag investigadas. No entanto, os resultados não apresentaram uma tendência geral quanto ao valor percentual da redução ao se aumentar o teor de adição mineral ou a relação a/ag. Percebeu-se, apenas, que, ao prolongar o período de cura, as misturas compostas com CCAC mostraram-se mais sensíveis do que as com CCAE, ou seja, apresentaram decréscimos percentuais maiores na maioria dos casos, chegando a valores acima de 40% na mistura 10CCAC de relação a/ag 0,50 e 0,65 no ensaio de 28 dias.

A carga passante, de maneira geral, mantém uma relação inversa com a resistência à compressão, de acordo com os resultados de resistências obtidos no trabalho de Da Silva (2012), ou seja, quanto maior o valor da resistência mecânica,

menor o valor de Q. Este resultado era esperado, pois concretos de maior resistência apresentam estrutura mais densa e, portanto, são mais resistentes à penetração de íons agressivos.

Com o aumento do teor de substituição reduz-se o teor de aluminatos (existente no cimento), que se combinariam com os íons cloreto, diminuindo a quantidade de íons livres capazes de atacar as armaduras. No entanto, neste caso o efeito físico (refinamento dos poros) se sobrepôs à diminuição dos aluminatos, pois o aumento do teor de substituição de cimento pelas cinzas de casca de arroz proporcionou um melhor desempenho frente à penetração dos íons cloretos.

Dos resultados obtidos em igualdade de resistência (40 MPa e 50 MPa), constatou-se que, para um mesmo nível de resistência, existem variações nas relações a/ag de acordo com o tipo de mistura e o período de cura investigados. Portanto, concretos com a mesma resistência podem apresentar durabilidades distintas, uma vez que a relação a/ag é um dos principais fatores que influencia a microestrutura do concreto.

Para os dois níveis de resistência estudados, a REF apresentou os maiores valores de consumo de aglomerante, para os dois períodos de cura, pois, para atingir a resistência de 40 MPa e 50 MPa possui os menores valores de relação a/ag em comparação às outras misturas. Para o nível de 40 MPa, as misturas com sílica ativa apresentaram os menores consumos de aglomerante; já para o nível de 50 MPa, os menores consumos foram das misturas de 30CCAC e 30CCAE. O prolongamento do período de cura trouxe reduções no consumo de aglomerante, para 40 MPa, as reduções variaram de 3% a 10% e, para o nível de 50 MPa, variaram de 4% a 12%.

Segundo a classificação da ASTM C1202, nenhuma mistura pertence à classe de alta penetração de cloretos, nos dois níveis de resistência, pois todas as misturas apresentaram valores de Q inferiores a 4000 Coulombs. O aumento da resistência de 40 MPa para 50 MPa resultou na diminuição de Q, que teve uma variação média de de 20% para REF e de 61% para 10SA.

Em igualdade de resistência, para ambos os níveis, a REF apresentou os maiores valores de coeficientes k, já as misturas com maiores teores de substituição (30CCAC, 30CCAE e 10SA) obtiveram os menores valores de k, dentre todas as misturas analisadas, com reduções médias de 62%, 61% e 65%, respectivamente, para o nível de 40 MPa, e de 61%, 61% e 73%, para 50 MPa, em relação à REF.

Esses resultados confirmam, novamente, o bom desempenho da sílica ativa, pois com teor de 10% consegue-se desempenho equivalente às cinzas no teor de 30% de substituição.

Com o intuito de comparar as misturas, fez-se uso do tempo de penetração ( $tp$ ), já explicado no capítulo 4. Através dos resultados do tempo necessário para que os íons cloreto penetrem na camada de cobrimento e atinjam a superfície do aço, concluiu-se, outra vez, que a REF apresenta os menores valores de  $tp$ , para os dois níveis de resistência, ou seja, possui o pior desempenho. Já as misturas 30CCAC, 30CCAE e 10SA apresentaram os maiores valores de  $tp$ , destacando o ótimo desempenho do concreto 10SA, na resistência de 50 MPa, pois possui  $tps$ , muitas vezes, superiores ao dobro dos valores obtidos pelas misturas 30CCAC e 30CCAE. O aumento de resistência de 40 MPa para 50 MPa gerou uma elevação no  $tp$ , entre as misturas, que variou de 12% a 118%. O parâmetro que exerceu a maior influência no tempo de penetração foi a espessura da camada de cobrimento, pois, ao dobrá-la, obteve-se aumento médio de quatro vezes do valor de  $tp$ .

Partindo dos resultados obtidos nesta pesquisa, verificou-se o bom desempenho atingido com a adição da CCAC e da CCAE, frente à penetração de cloretos no concreto. Dessa forma, além de melhorar propriedades de durabilidade das estruturas, o uso dessas adições promove um benefício ambiental à medida que diminui o uso de cimento e concede importância econômica a um resíduo antes sem destinação.

### **5.1 Sugestões para pesquisas futuras**

Com ênfase no uso de cinza de casca de arroz no concreto, em substituição parcial ao cimento, sugere-se uma continuidade no estudo de propriedades relacionadas à durabilidade do concreto como: carbonatação acelerada, porosimetria de mercúrio, calorimetria de condução, água combinada, composição da solução dos poros, hidróxido de cálcio remanescente e permeabilidade ao oxigênio.



## REFERÊNCIAS

AHMED, M. S.; KAYALI, O.; ANDERSON, W. Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods. **Cement & Concrete Composites**, 30, p. 576-582, 2008.

ALMUSALLAM, A. A. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. **Cement & Concrete Composites**, 23, p. 353-361, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. ASTM C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia, 2005.

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

ANDRADE, C. et al.. Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-91. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 417- 421, 1999.

ANGST, U. et al. Critical chloride content in reinforced concrete . A review. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1122-1138, 2009.

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

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

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

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland: Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006b.

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

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

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

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

\_\_\_\_\_. **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, 2004e.

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

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

\_\_\_\_\_. **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, 2004h.

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

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

\_\_\_\_\_. **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, 2004k.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23.** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

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

\_\_\_\_\_. **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, 2006c.

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

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

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

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

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

BAKKER, R. F. M. Initiation Period. RILEM Report of the Technical Committee 60-CSC. In: SCHIESSL, P. (Ed). **Corrosion of Steel in Concrete**. London: Chapman and Hall, 1988.

BARBOSA, D. C.; BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. Influência do perfil de penetração de íons cloreto em concretos com sílica ativa submetidos a diferentes procedimentos de cura. In: JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 32., 2006, Campinas. **Anais...** Campinas: 2006. Trabalho JOR0077, p. 2457-2466.

BATTAGIN, A. F. et al. Influência das Condições de Cura em Algumas Propriedades dos Concretos Convencionais e de Alto Desempenho. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, São Paulo, **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002.

BOUZOUBAÂ, N.; FOURNIER, B. **Concrete incorporating rice-husk ash: compressive strength and chloride-ion penetrability**. Ottawa: Materials Technology Laboratory, 2001. Disponível em: <<http://www.ecosmartconcrete.com/>>.

BRYANT JUNIOR, J. W.; WEYERS, R. E.; GARZA, J. M. In-place resistivity of bridge deck concrete mixtures. **ACI Materials Journal**, v.106, n. 2, p. 114-122, 2009.

BUI, D. D.; HU, J.; STROEVEN, P. Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete. **Cement & Concrete Composites**, 27, p. 357-366, 2005.

BUI, L. A. T.; CHEN, C. T.; HWANG, C. L.; WU, W. S. Effect of silica fumes in rice husk ash on the properties of concrete. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 19, n. 3, p. 252, 2012.

CARVALHO, J. R.; MOTA, A. C. M.; MONTEIRO, E. C. B. Avaliação da presença de cloretos livres em pasta de concreto executadas com cimento CP II Z . 32, através do método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y XIII CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD EM LA CONSTRUCCIÓN-CONPAT, 11., 13., v. 1, 2011. Antigua Guatemala-Guatemala. **Anales...** Antigua Guatemala: Conpat, 2011. Trabajo 201BR, p. 167-174, 2011.

CASCUDO, O. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

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

CEZAR, D. S. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. Santa Maria, 2011, 143 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CINCOTTO, M. A. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S.; SIRIVIVATNANON, V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. **Construction and Building Materials**, 22, p. 932-938, 2008.

COLLEPARDI, M.; BIAGINI, S. Effect of water/cement ratio, pozzolanic addition and curing time on chloride penetration into concrete. In: EUROPEAN READY MIXED CONCRETE ORGANIZATION CONGRESS, 9. Norway, **Proceedings...** Norway, 1989.

CONAB. **Companhia Nacional do Abastecimento**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_01\\_09\\_17\\_44\\_20\\_boletim\\_graos\\_janeiro\\_2013.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_01_09_17_44_20_boletim_graos_janeiro_2013.pdf)>. Acesso em: 01 fev. 2013.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Porto Alegre, 2009, 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

COSTA, J.; APPLETON, J. Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, n. 46, 1999.

COUTINHO, J. S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, 25, p. 9-51, 2003.

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. Santa Maria, 2010, 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

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

DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

DA SILVA, T. J. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

DA SILVA, M. P. **Retração total e penetração de cloretos de concretos compostos com CCA de diferentes teores de carbono grafítico**. Santa Maria, 2012, 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

DA SILVA, E. J. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil**. Ilha Solteira, 2009, 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

DEL CARPIO, J. A. V. **Estudo da influência da adição da cinza de casca de arroz nas propriedades do CCR (concreto compactado com rolo) para seu uso em pavimentos compostos**. Florianópolis, 2009, 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

DELLINGHAUSEN, L. M. et al. Penetração de cloretos em concretos com diferentes aglomerantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009. Curitiba, **Anais...** Curitiba: IBRACON, 2009.

FIGUEIREDO, E. P. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

FIGUEIREDO, E. P. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

FOLETTTO, E. L. et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1055-1060, 2005.

FONSECA, G. C. **Adições Minerais e as Disposições Normativas Relativas à Produção de Concreto no Brasil: Uma Abordagem Epistêmica** . Belo Horizonte, 2010, 106 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) . Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, p. 515-524, 2007.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1675-1683, 2008.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C. Concreto com cinza de casca de arroz . Contribuição para o desenvolvimento sustentável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23. Campo Grande, **Anais...** Campo Grande, 2005.

HALAMICKOVA, P.; DETWILER, R. J. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 4, p. 790-802, 1995.

HAMILTON III, H. R. **Permeability of Concrete É Comparison of Conductivity and Diffusion Methods**. Florida, 2007. 238 f. Department of Civil & Coastal Engineering . College of Engineering . University of Florida, Gainesville, Florida, 2007.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993. 271 f. Tese (Livre Docência em Engenharia) . Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

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

HISADA, H.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 21, p. 443-448, 1999.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Porto Alegre, 2001, 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Santa Maria, 2005, 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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

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**. São Paulo, 1995, 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

LIMA, M. G. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

LIMA, M. G. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

MEDEIROS, M. H. F. et al. Influência da altura e posição da edificação na penetração de cloretos: Estudo de caso em obra no Rio de Janeiro - Brasil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, 7., 2010. Córdoba, **Anales...** Córdoba: Cinpar, 2010.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Santa Maria, 2004, 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MOSTARDEIRO NETO, C. Z. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. Santa Maria, 2011, 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MOTA, J. M. F. et al. Avaliação da contaminação por íons cloreto em amostras de concreto submetidas a condições agressivas. In: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS, 7., 2010. Córdoba, **Anales...** Córdoba: Cinpar, 2010.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATTY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1203-1210, 2003.

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

NEPOMUCENO, A. A. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

NGALA, V. T. et al. 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**, USA: Pergamon, v. 25, p. 819-826, 1995.

NITZKE, J. A.; BIEDRZYCKI, A. **Terra de arroz: grão de arroz**. 2004 Disponível em: <[http://www8.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr\\_divisao.htm](http://www8.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr_divisao.htm)>. Acesso em: 9 abr. 2012.

OLAVARRIETA, M. et al. Caracterización de fallas por corrosión en edificaciones de concreto armado expuestas en ambientes marinos. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EM LA CONSTRUCCIÓN-CONPAT, 11., 13., 2011, Antigua Guatemala, **Anales...** Antigua Guatemala: Conpat, 2011.

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.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 395-406, 1981.

PEREIRA, I. G. **Cinza de Casca de Arroz É Uma Adição Sustentável**. Porto, 2005, 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade do Porto, Porto, 2008.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. **Coletânea Habitare**, v. 4, Porto Alegre, 2003.

RAHARINAIVO, A.; GÉNIN, J. R. On the corrosion of reinforcing steels in concrete in the presence of chlorides. **Materiales de Construcción**, v. 36, n. 204, 1986.

RASHEEDUZZAFAR et al. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 5, p. 723-738, 1990.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento É Aspectos da microestrutura das pastas**. Brasília, 2004. 274 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

RIZZON, A. C.; ANDRADE, J. J. O. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de concretos de cimento branco**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO-IBRACON, 48., 2006. Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006.

SACIOTO, A. P. **Comportamento Frente à Ação de Cloretos de Concretos Compostos com Adições Mineraias Submetidos a Diferentes Períodos de Cura**. Santa Maria, 2005, 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SALAS, A. et al. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 773-778, 2009.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** Florianópolis, 2006. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SARASWATY, V.; ONG, H.W.S. Corrosion performance of Rice-husk ash blends concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 84-1779, 2006.

SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI Materials Journal**, USA: American Concrete Institute, v. 95, p. 389-394, 1998.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 537-545, 2004.

SILVEIRA, A. A. **A Utilização de Cinza de Casca de Arroz com vistas a Durabilidade de Concretos: Estudo do Ataque por Sulfatos.** Porto Alegre, 1996, 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SOROKA, I.; STERN, N. Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 6, 367-376, 1978.

TUAN, N. V. et al. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, 2011.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** Porto Alegre, 2003. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

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.

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. High-performance concrete incorporating Rice-husk ash as a supplementary cementing material. **ACI Materials Journal**, v. 93, 6 nov./dec. 1996.



## **ANEXOS**

**Anexo A - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012)  
 É Tabela 5.1.**

**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)		fc mistura / fc 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

**Anexo B - Resultados de resistência à compressão obtidos por Da Silva (2012)  
É Tabela 5.2.**

**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) fc mistura / fc 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