

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

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS DE CONCRETOS
CONTENDO DIFERENTES TEORES DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fabiano Missau

Santa Maria, RS, Brasil

2004

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
CONTENDO DIFERENTES TEORES DE CINZA DE
CASCA DE ARROZ**

por

Fabiano Missau

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção, 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

2004

**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 CONTENDO
DIFERENTES TEORES DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

elaborada por
Fabiano Missau

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Antonio Luiz Guerra Gastaldini
(Presidente/Orientador)**

Geraldo Cechella Isaia, Dr (UFSM)

Cláudio de Souza Kazmierczack. (UNISINOS/RS)

Santa Maria, 21 de dezembro de 2004

A Deus

Aos meus pais Orilde e Alvino (in memoriam)

A minha irmã Rose

A minha noiva Carina

A todos meus familiares e amigos

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Luiz G. Gastaldini, por sua orientação competente, incentivo, paciência e principalmente disponibilidade de transmitir os seus conhecimentos teóricos e práticos, tornando possível o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Gerado Isaia, pelo incentivo e apoio, conhecimentos teóricos e materiais disponibilizados, que me foram de muita valia.

Ao meu colega de Pós-Graduação, Maurício Mezzomo, pela valiosa colaboração no planejamento e moldagem dos corpos de prova.

Aos amigos da Pós-graduação, Elinor Dalla Lana, Rodrigo Silveira, Simone Petry, Júlio K. Sperb, Rodrigo dos Santos, Rodrigo Tomazetti, Dalton Wegner, Luis C. Frantz, Tiago Moraes, Rodrigo Emmer e Leandro Zampieri pela amizade e companheirismo.

Aos alunos e amigos bolsistas do Grupo de Pesquisas em Concreto (GEPECON/UFSM), Tiago Hoppe, Jonas A. Scheneider, Rodrigo Bordignon, Éder Pedroso, André Lübeck e Henrique C. Siqueira pela ajuda na preparação dos materiais e moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/UFSM, pela cessão de seus equipamentos e pela valorosa atenção dos seus funcionários, Paulo, João, Emerson, Vitor, Aleise, Mauro, Marialva.

As empresas Cimento Itambé, Reitex, MBT Brasil, Cimento Mizzu, BK Energia pela cessão dos materiais para a pesquisa.

A FIPE/UFSM, CNPq/UFSM e CAPES, pelos recursos e bolsas concedidas a este trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, que proporcionou a realização deste trabalho e também todos alunos e professores deste curso que me auxiliaram nesta pesquisa.

A Universidade Federal de Santa Maria, por tornar possível a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Enfim, a todos aqueles de que uma maneira ou outra contribuíram para efetivação desta importante etapa de minha vida.

O meu sincero muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE REDUÇÕES	xvi
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I	
AÇÃO DOS CLORETOS NO CONCRETO	5
1.1 Considerações iniciais	5
1.2 Aspectos gerais sobre a durabilidade do concreto	5
1.3 Fatores que influenciam a deterioração do concreto	6
1.3.1 Permeabilidade	7
1.3.2 Absorção capilar	8
1.3.3 Migração e difusão iônica	8
1.3.4 Deterioração do concreto por reações químicas	9
1.4 Corrosão das armaduras de concreto	11
1.4.1 Considerações importantes	11
1.4.2 Processo corrosivo	12
1.4.3 Produtos da corrosão da armadura de concreto	15
1.5 Ação dos íons cloreto	15
1.6 Fontes e teores críticos de cloreto para o concreto	16
1.7 Fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto	19
1.7.1 Relação água aglomerante	20
1.7.2 Adições minerais e sua composição química	21
1.7.3 Temperatura	23
1.7.4 Cura	24
1.8 Ação entre permeabilidade de cloretos (ASTMC 1202) e outras propriedades importantes ligadas a durabilidade	25

1.8.1 Caracterização do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP)	27
1.8.2 Correlação entre o coeficiente K e a carga passante	29
1.8.3 Correlação entre a carga passante e a resistividade elétrica aparente.....	30
1.8.4 Correlação entre o coeficiente K e a resistividade elétrica aparente	31
1.8.5 Correlação entre a resistência à compressão e a carga passante.....	32
1.8.6 Mecanismo de transporte iônico durante o TRPC (ASTMC 1202)	33
CAPÍTULO II	
A CINZA DE CASCA DE ARROZ NO CONCRETO	35
2.1 Considerações iniciais	35
2.2 Características da cinza de casca de arroz	38
2.3 Influência do tipo de queima e da moagem nas propriedades da CCA	39
2.4 Influência da cinza de casca de arroz na resistência à compressão	43
2.5 Influência da cinza de casca de arroz na penetração de cloretos	48
2.6 Influência da cinza de casca de arroz na solução aquosa dos poros	52
CAPÍTULO III	
INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL	55
3.1 Considerações iniciais	55
3.2 Variáveis envolvidas na pesquisa	56
3.3 Caracterização dos materiais	57
3.3.1 Cimento	57
3.3.2 Adições minerais	59
3.3.3 Agregados	60
3.3.4 Aditivo	62
3.4 Dosagem dos concretos	62
3.5 Moldagem, cura e preparação dos corpos de prova	63
3.6 Ensaio realizado no concreto	65
3.6.1 Resistência à compressão axial	65
3.6.2 Penetração de cloretos	65
3.6.3 Alcalinidade, cloretos retidos e pH	65
3.6.4 Penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata	66
3.6.4.1 Moldagem dos corpos de prova	66
3.6.4.2 Preparação dos corpos de prova para o ensaio	67
3.6.5 Solução aquosa dos poros	68

3.6.6 Porosimetria de mercúrio	69
3.6.7 Ensaio de resistividade elétrica aparente – Método dos quatro eletrodos (Método de Wenner)	70
CAPÍTULO IV	
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	74
4.1 Considerações iniciais	74
4.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial	74
4.3 Análise dos resultados de penetração de íons cloretos	79
4.4 Análise dos resultados de alcalinidade, teor de cloretos retidos e relação Cl⁻/OH⁻	82
4.5 Análise dos resultados do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata	84
4.6 Análise da solução aquosa dos poros	86
4.7 Porosimetria por intrusão de mercúrio	90
4.8 Análise do ensaio de resistividade elétrica aparente	95
4.9 Integração dos resultados	99
4.9.1 Resistência à compressão x penetração de cloretos	99
4.9.2 Resistência à compressão x volume de intrusão de mercúrio	100
4.9.3 Penetração de cloretos x características de estrutura de poros (volume de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico)	101
4.9.4 Penetração de cloretos x condutividade elétrica	102
4.9.5 Penetração de cloretos x cloretos retidos	103
4.9.6 Coeficiente K x diâmetro crítico	104
4.10 Análise dos resultados em igualdade de resistência	105
4.10.1 Consumo de aglomerantes	107
4.10.2 Penetração de cloretos em igualdade de resistência	108
4.11 Análise de custos	111
CONCLUSÃO	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1 – Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994)	11
FIGURA 1.2 – Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio (CASCUDO, 1997)	13
FIGURA 1.3 – Fissuração e destacamento devido à corrosão das armaduras. (CASCUDO, 1997)	15
FIGURA 1.4 – Atuação simultânea dos diversos mecanismos de transporte de uma estrutura marítima (CONCRETE SOCIETY WORKING PARTY <i>apud</i> FERREIRA, 1999)	17
FIGURA 1.5 – Efeito da relação água cimento sobre a carga total passante (PEREIRA, 2002)	20
FIGURA 1.6 – Influência do teor de C ₃ A na quantidade de íons cloreto livres, a 20° e 70°C (HUSSAIN e RASHEEDUZAFAR, 1993)	23
FIGURA 1.7 – Penetração de cloretos x tempo de cura em concreto. (PLANTE BILODEAU, 1989)	25
FIGURA 1.8 – Gráfico da correlação entre carga passante e coeficiente (K. WEE et al., 2000)	30
FIGURA 1.9 – Gráfico da correlação entre carga passante e resistividade elétrica aparente (WEE et al., 2000)	30
FIGURA 1.10 – Gráfico da correlação entre resistividade elétrica aparente e coeficiente (K. WEE et al., 2000)	31
FIGURA 1.11 – Gráfico da correlação entre resistência à compressão e carga passante. (WEE et al., 2000)	32
FIGURA 2.1 – Foto depósito de cinza de casca de arroz à céu aberto	35
FIGURA 2.2 (a) Principais produtores mundiais de arroz, (b) Porcentagens de participação total produção de arroz mundial (FAO, 2004)	36
FIGURA 2.3 – Percentuais de participação na produção de arroz na América do Sul (FAO, 2004)	37

FIGURA 2.4 – Micrografia da cinza de casca de arroz (MEHTA & MONTEIRO, 1994, p. 300)	38
FIGURA 2.5 – Curva de distribuição do tamanho das partículas da cinza de casca de arroz de acordo com o tempo de moagem (BOUZOUBAË, 2001)	40
FIGURA 2.6 – Desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com diferentes porcentagens de substituição de cinza da casca de arroz com relação a/g 0,40. (ZHANG & MALHOTRA, 1996)	44
FIGURA 2.7 (a) Resistências à compressão das amostras compostas com cinza de casca de arroz passantes na peneira 200, (b) Resistências à compressão das amostras compostas com cinza de casca de arroz passantes na peneira 325 (ISMAIL, 1996)	45
FIGURA 2.8 – Resultados do ensaio de penetração à cloretos aos 28 dias (NEHDI, 2003)	51
FIGURA 2.9 – Variação do pH e da condutividade elétrica da solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em presença de cinza de casca de arroz (QIJUN et al., 1999)	53
FIGURA 3.1 – Gráfico da granulometria do agregado miúdo	60
FIGURA 3.2 – Gráfico da granulometria do agregado graúdo	61
FIGURA 3.3 – Esquema do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata	67
FIGURA 3.4 – Corpo de prova rompido axialmente com os locais de leitura da penetração de cloretos indicados	68
FIGURA 3.5 – Método dos 4 eletrodos – Medida da resistividade elétrica aparente	71
FIGURA 3.6 – Foto do corpo de prova de ensaio de resistividade elétrica aparente	71
FIGURA 3.7 – Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de resistividade elétrica aparente.....	72
FIGURA 3.8 – Detalhe do molde de madeira do ensaio de resistividade elétrica aparente	72
FIGURA 3.9 – Foto do ensaio de resistividade elétrica aparente.	73
FIGURA 4.1 – Resistência à compressão aos 28 e 91 dias das misturas investigadas	76
FIGURA 4.2 (a) Comparação da variação da resistência à compressão das misturas minerais com a mistura de referência, ensaio aos 28 dias de idade, (b) Comparação da variação da resistência à compressão das misturas minerais com a mistura de referência, ensaio aos 91 dias de idade.....	77

FIGURA 4.3 (a) Variação da resistência à compressão com o aumento dos níveis de substituição de CCA, ensaio aos 28 dias, (b) Variação da resistência à compressão com o aumento dos níveis de substituição de CCA, ensaio aos 91 dias	78
FIGURA 4.4 – Resultados do ensaio de penetração de cloretos das misturas com idade de 91 dias.....	80
FIGURA 4.5 – Redução da penetração de cloretos das misturas compostas com adições minerais em relação ao traço de referência, aos 91 dias.....	81
FIGURA 4.6 – Redução da penetração de cloretos com a variação do percentual de substituição da CCA, aos 91 dias	81
FIGURA 4.7 – Resultados do índice K(mm) do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata das misturas estudadas	85
FIGURA 4.8 – Correlação entre a concentração de OH ⁻ e o equivalente alcalino em sódio, (a) referência, (b) 10% CCA, (c) 20% CCA, (d) 30% CCA.....	88
FIGURA 4.9 – Correlação entre a condutividade elétrica específica e a concentração de OH ⁻ , (a) referência, (b) 10% CCA, (c) 20% CCA, (d) 30% CCA.....	89
FIGURA 4.10 – Correlação entre a condutividade elétrica específica e o Na ₂ O _{eq.} , (a) referência, (b) 10% CCA, (c) 20% CCA, (d) 30% CCA.....	90
FIGURA 4.11 – Volume de mercúrio intrudido acumulado em função das dimensões dos poros na idade de 91 dias	92
FIGURA 4.12 – Volume de mercúrio intrudido em função da dimensão dos poros – Referência	93
FIGURA 4.13 – Volume de mercúrio intrudido em função da dimensão dos poros – 10% CCA	94
FIGURA 4.14 – Volume de mercúrio intrudido em função da dimensão dos poros – 20% CCA	94
FIGURA 4.15 – Volume de mercúrio intrudido em função da dimensão dos poros – 30% CCA	95
FIGURA 4.16 – Resultados resistividade elétrica aparente, ensaio aos 28 e 91 dias	96
FIGURA 4.17 – Aumento da resistividade elétrica das misturas compostas com adições minerais em relação a mistura de referência, idades 28 e 91 dias, relação a/ag 0,50	97
FIGURA 4.18 – Variação da resistividade elétrica aparente com o aumento dos níveis de substituição de CCA, idades de 28 e 91 dias, relação a/ag 0,50	98

FIGURA 4.19 – Resistência à compressão axial versus corrente passante, amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias	100
FIGURA 4.20 – Resistência à compressão axial versus volume de intrusão de mercúrio, amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias	101
FIGURA 4.21 – Volume de intrusão de Hg versus penetração de cloretos das amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias	101
FIGURA 4.22 – Diâmetro crítico versus penetração de cloretos das amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias	102
FIGURA 4.23 – Condutividade elétrica versus penetração de cloretos, nas amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias	103
FIGURA 4.24 – Correlação entre a penetração de cloretos em Coulombs e o teor de cloretos totais retidos, para as misturas: (a) Mistura de referência, (b) Mistura com 10% de CCA, (c) Mistura com 20% de CCA, (d) Mistura com 30% de CCA, (e) CV35 e (f) EA50	104
FIGURA 4.25 – Correlação entre o coeficiente K (mm) e a carga passante, para as misturas apresentadas em gráficos unificados para análise comparativa	105
FIGURA 4.26 – Consumo de aglomerantes para a resistência de 40 MPa, aos 91 dias	107
FIGURA 4.27 – Consumo de aglomerantes para a resistência de 50 MPa, aos 91 dias	108
FIGURA 4.28 – Consumo de aglomerantes para a resistência de 60 MPa, aos 91 dias	108
FIGURA 4.29 – Penetração de cloretos para as misturas investigadas em igualdade de resistência à compressão, aos 91 dias	109
FIGURA 4.30 – Diminuição da penetração de cloretos de acordo com a variação das resistências à compressão dos traços em igualdade de resistência	110
FIGURA 4.31 – Quociente dos custos dos materiais (R\$/m ³)/(MPa) das misturas investigadas, idade 91 dias	112
FIGURA 4.32 – Comparação (%) dos custos (R\$/m ³) das misturas compostas com CCA em relação à mistura de referência	113
FIGURA 4.33 – Penetração de cloretos em Coulombs das misturas investigadas em igualdade de resistência à compressão, 40MPa, 50MPa e 60MPa, custos (R\$/m ³) das amostras 20A e REF	114

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Limites normatizados para o teor total de cloretos no concreto (HELENE, 1993)	19
TABELA 1.2 – Tipos de misturas utilizadas nos experimentos de (WEE et al., 2000)	27
TABELA 2.1 – Efeito da moagem da cinza de casca de arroz sobre suas propriedades físicas (BOUZOUBAÂ, 2001)	41
TABELA 2.2 – Dados das misturas de concretos (NEHDI, 2003)	50
TABELA 3.1 – Dados referentes aos ensaios realizados	57
TABELA 3.2 – Características físico mecânicas do cimento	58
TABELA 3.3 – Composição química dos aglomerantes	58
TABELA 3.4 – Proporcionamento dos materiais aglomerantes	59
TABELA 3.5 – Massa específica dos materiais aglomerantes	59
TABELA 3.6 – Características físicas dos agregados	61
TABELA 3.7 – Quantidade de materiais utilizados por m ³ de concreto	63
TABELA 3.8 – Descrição dos corpos de prova de ensaio e seus respectivos tempos de cura	66
TABELA 3.9 – Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita com 25°C	69
TABELA 4.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, 28 e 91 dias	75
TABELA 4.2 – Variações percentuais da resistência à compressão com o aumento dos níveis de substituição de CCA, ensaio aos 28 e 91 dias de idade	79
TABELA 4.3 – Resultados dos ensaios de penetração de íons cloreto, aos 91 dias	80
TABELA 4.4 – Reduções da penetração de cloretos com o aumento dos níveis de substituição de CCA, ensaio aos 91 dias de idade	81
TABELA 4.5 – Alcalinidade, teor de cloreto retido e relação iônica Cl ⁻ /OH ⁻ , aos 91 dias.....	83

TABELA 4.6 – Resultados do índice K(mm) do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata das misturas estudadas	84
TABELA 4.7 – Comparação dos índices K(mm) das misturas compostas com adições minerais e a mistura de referência	85
TABELA 4.8 – Análise da solução aquosa dos poros (Mmol/l) para relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65 e idade de hidratação de 91 dias	86
TABELA 4.9 – Na ₂ O _{eq} , condutividade elétrica e condutividade elétrica relativa para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 aos 91 dias	89
TABELA 4.10 – Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio	91
TABELA 4.11 – Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente	96
TABELA 4.12 – Ordem da resistividade media dos traços investigados aos 28 e 91 dias	98
TABELA 4.13 – Critério de avaliação da resistividade elétrica do concreto (CEB 192, 1989)	99
TABELA 4.14 – Constantes da curva de Abrams para a resistência à compressão aos 28 e 91 dias	105
TABELA 4.15 – Relação a/ag que fornecem mesmas resistências aos 91 dias e os respectivos consumos de aglomerantes	106
TABELA 4.16 – Penetração de cloretos em Coulombs das misturas investigadas em igualdade de resistência mecânica	109
TABELA 4.17 – Qualidade do concreto com base na carga passante segundo a ASTM C 1209/94	109
TABELA 4.18 – Custos dos materiais e custos totais das misturas, por metro cúbico de concreto, em reais (R\$)	111
TABELA 4.19 – Comparação (%) dos custos (R\$/m ³) das misturas compostas com CCA em relação a mistura de referência	113

LISTA DE REDUÇÕES

a/ag – Relação água/aglomerante, em massa

REF – Concreto de referência, sem adição mineral

CCA – Cinza de casca de arroz

10A – Mistura composta com 10% de CCA em substituição ao cimento no concreto

20A – Mistura composta com 20% de CCA em substituição ao cimento no concreto

30A – Mistura composta com 30% de CCA em substituição ao cimento no concreto

E50 – Mistura composta com 50% de EAF forno em substituição ao cimento no concreto

CV35 – Mistura composta com 35% de CV em substituição ao cimento no concreto

EAF – Escória de alto forno

CV – Cinza volante

C₃S – Silicato tricálcico

Ca – Cálcio

CaCl₂ – Cloreto de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CPV-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

Fe₂O₃ – Óxido de ferro III (óxido férrico)

K₂SO₄ – Sulfato de potássio

K – Coeficiente de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata

pH – Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico

R² – Coeficiente de correlação

– Abertura da malha da peneira

Ø – Diâmetro

EPCANP – Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata

f₂₈ – Resistência à compressão aos 28 dias

f₉₁ – Resistência à compressão aos 91 dias

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

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

AUTOR: FABIANO MISSAU

ORIENTADOR: ANTONIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 21 de dezembro de 2004.

Uma das formas de aumentar a vida útil de uma estrutura de concreto é o controle da ação dos agentes agressivos, em geral oriundos do meio ambiente. Estes agentes ocasionam o processo de degradação das estruturas, acarretando prejuízos tanto do ponto de vista técnico – danos causados – como do ponto de vista econômico – custos de recuperação. Os íons cloreto constituem-se um dos mais nocivos agentes agressivos das estruturas de concreto, causando corrosão das armaduras. Assim, inúmeras pesquisas tem sido realizadas com o intuito de descobrir uma composição do concreto que apresente melhor desempenho. Com essa preocupação, o presente trabalho teve por objetivo investigar o comportamento frente a cloretos de concretos compostos com diferentes teores de cinza de casca de arroz. Foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão axial, da penetração de cloretos ASTM C 1202, de cloretos retidos, da penetração de cloretos pelo método de aspersão de nitrato de prata, da porosimetria de mercúrio e da composição da solução aquosa dos poros. Foram investigadas misturas aglomerantes com teores de cinza de casca de arroz de 10%, 20% e 30%, e confrontadas com uma de referência contendo somente cimento (CPV-ARI). Dos resultados obtidos, verificou-se que o aumento no teor de cinza de casca de arroz resultou numa diminuição na carga passante, no teor de cloreto retido, no volume de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico, na condutividade elétrica específica, e aumentou a profundidade de penetração de cloreto avaliada pela aspersão do nitrato de prata. Acredita-se que este comportamento deva-se à diminuição na retenção de cloreto, pelo menor teor de fase líquida, devido à redução no teor de cimento. Isso tudo acarretou uma influência mais significativa na estrutura do concreto que a alteração na estrutura de poros. Observou-se, por fim, forte correlação entre a penetração de cloretos, a resistência à compressão, o teor de cloreto retido, o volume de intrusão de mercúrio, o diâmetro crítico e a condutividade elétrica específica.

ABSTRACT

Masters Thesis

Program of Post graduation in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil**CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE COMPOSITIONS WITH DIFFERENT
CONTENTS OF RICE HUSK ASH**

AUTHOR: FABIANO MISSAU

THESIS ADVISOR: ANTONIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

SANTA MARIA, 21ST DECEMBER 2004.

The service life of concrete structures can be extended by controlling aggressive agents often found in the environment that attack concrete. Such agents may cause structures to deteriorate and result in technical losses (physical damage) and financial losses (repair costs). Chloride ions are among the most aggressive agents that attack concrete structures, causing steel bar corrosion. Several research studies have been performed to develop a concrete composition that would lend optimal chloride ion protection. The present study investigated the chloride resistance behavior of concrete compositions using different contents of rice husk ash (RHA). The concrete samples were tested for axial compressive strength, chloride penetration ASTM C 1202 (RCPT), chloride retention, chloride penetration by silver nitrate spray, mercury porosimetry and pore solution composition. Binder mixtures with 10%, 20% and 30% RHA were investigated and compared with the cement-only reference sample. Test results show that higher RHA concentrations yielded a drop in the charge passed, in the concentration of retained chloride, in the mercury intrusion volume, in the critical diameter and in specific electrical conductivity. At the same time, the chloride penetration depth measured by silver nitrate spray increased. This behavior can be attributed to a reduction in chloride retention and a lower concentration of aluminates resulting from the lower cement content used, a factor that has a more significant influence than the changes in pore structure. A strong correlation was observed between chloride penetration and compressive strength, the concentration of retained chloride, the mercury intrusion volume, the critical diameter and the specific electrical conductivity.

INTRODUÇÃO

A crise energética mundial tem conduzido a humanidade à busca cada vez maior de fontes de energias renováveis. Estas se apresentam como quase inesgotáveis. Como exemplo temos: a energia solar, a energia eólica, a energia hidráulica, as marés e a biomassa.

As fontes renováveis de energia oferecem inúmeras vantagens em relação às energias sujas (nuclear, carvão mineral e petróleo), como: assegurar a sustentabilidade da geração de energia em longo prazo; reduzir as emissões atmosféricas de poluentes; criar novas oportunidades de empregos; e diminuir o desmatamento de nossas florestas.

A utilização racional destas fontes renováveis pode ser adotada em varias áreas participantes no processo de degradação ambiental. Tal utilização apresenta-se hoje como alternativa para a construção de um desenvolvimento sustentável. Este é definido, por Sjöstrom (1996 *apud* JOHN, 2004), como forma de desenvolvimento econômico que emprega os recursos naturais e do meio ambiente não apenas em benefício do presente, mas também de gerações futuras.

Hoje, desenvolvimento sustentável constitui-se uma preocupação também para a indústria da construção civil, tanto a nível nacional, como internacional. Encontra-se relacionado com um imenso ramo de atividades que possuem importância nos impactos ambientais. A reciclagem dos resíduos oriundos das atividades agrícolas e industriais apresenta-se, portanto, como uma alternativa para a diminuição do impacto ambiental gerado pelos processos construtivos usuais.

Deste modo, abordar o desenvolvimento sustentável sob os aspectos da indústria da construção civil, incentivar o desenvolvimento de projetos e de novas tecnologias que proporcionem a redução da geração de resíduos; valorizar o uso racional de recursos tais como a energia e a água, e a utilização de materiais ambientalmente corretos; enfim determinar parâmetros para avaliação ambiental de edifícios, são as diretrizes que têm sido cada vez mais destacadas nos ramos de pesquisas ligadas à engenharia civil e a áreas afins.

Uma das formas de utilização racional dos resíduos agrícolas e industriais é o uso destes em substituição parcial do cimento, no concreto. A utilização de tais adições minerais no concreto - cinza de casca de arroz (CCA), escoria de alto forno (EAF), cinza volante, (CV) entre outras - apresenta-se como uma resposta positiva ao questionamento à respeito do que se fazer com esses resíduos.

O arroz é considerado o cereal mais cultivado no mundo. Dados da F.A.O. – “Food Agriculture Organization”, estimam que a sua produção mundial para o ano de 2004 será da ordem de 612,8 milhões de toneladas, sendo que o Brasil representa uma fatia de 12,5 milhões de toneladas. Observa-se, portanto, que milhões de toneladas de resíduos são produzidos a cada ano, acarretando problemas de ordem ambiental, como a poluição das águas, do solo e do ar.

A utilização destas adições, assim, justifica-se por razões de ordem tecnológica, econômica e ecológica. Elas conferem ao concreto inúmeras vantagens, como:

- maior resistência mecânica, principalmente nas idades mais avançadas;
- menor calor de hidratação;
- maior resistência aos ataques ácidos e, portanto, maior resistência aos agentes agressivos;
- inibição devida à reação álcali agregado entre outras propriedades importantes.

Os benefícios da utilização de adições minerais, na busca de uma “construção auto-sustentável”, foram destacadas por Isaia (1999), em seus estudos sobre a durabilidade do concreto de alto desempenho e o meio ambiente:

A queima de combustíveis alternativos com a inclusão de rejeitos ou subprodutos poluidores, a maior eficiência dos queimadores, o uso de filtros mais efetivos são algumas providências tomadas pelos fabricantes de cimento de um lado e, de outro, os produtores de concreto buscam alternativas usando cimento com menos clínquer e mais adições minerais, empregando concreto com melhor desempenho em termos de resistência e durabilidade... (ISAIA, 1999, p 5)

Esta pesquisa, deste modo, motivou-se na busca pelo desenvolvimento de estruturas de concreto mais resistentes à ação dos cloretos, bem como pela produção de concretos mais econômicos e ecologicamente corretos. Ela abordará a importância das adições minerais na durabilidade frente a cloretos, em especial a cinza de casca de arroz, sendo também estudadas misturas, em caráter comparativo, de cinza volante, de escória de alto forno além da mistura de referência.

Objetivo

O objetivo específico desta pesquisa foi de investigar o comportamento de concretos frente a cloretos, em que parte do cimento foi substituída por cinza de casca de arroz.

Visando uma análise mais precisa da influência dos diferentes teores de substituição de cinza de casca de arroz no lugar do cimento, investigou-se um concreto sem adição, somente com cimento. Este é denominado concreto de referência, e serviu de parâmetro para a comparação dos diferentes resultados obtidos quando utilizadas as diferentes adições minerais em teores de substituição de cimento de 10%, 20%, 30% para a cinza de casca de arroz, 35% para cinza volante e 50% para escória de alto-forno.

A busca pelo objetivo pré-descrito foi norteada por algumas perguntas mais específicas tais como:

- Qual a influência do teor de substituição da cinza de casca de arroz na resistência à compressão?
- Em que medida o teor de substituição de cinza de casca de arroz influencia na penetração a cloreto (ASTM C 1202), na profundidade de penetração de cloretos, nos cloretos retidos, na estrutura dos poros e na composição da solução aquosa de concretos?
- Como eles comportam, frente àqueles compostos com cinza volante e escória de alto forno, adições largamente utilizadas no sul e sudeste do país?
- Se esses concretos forem dosados para alcançarem o mesmo nível de resistência mecânica, como procedem os coeficientes das propriedades estudadas?
- Como as propriedades portam-se em relação ao consumo de cimento?

Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi estruturada em 4 capítulos. O primeiro e o segundo foram constituídos a partir de pesquisa bibliográfica sobre a temática investigada. O terceiro capítulo constitui-se em um relato a respeito da fase experimental. Finalmente, o quarto capítulo contém as análises e discussões dos resultados alcançados.

O capítulo I aborda os aspectos referentes à ação dos cloretos no concreto, relatando alguns aspectos sobre a durabilidade do concreto, bem como algumas propriedades influentes na sua busca. São mencionados também neste tópico dados acerca da corrosão das armaduras e da influência dos cloretos na mesma.

No capítulo II são relatados dados sobre a influência do uso da cinza de casca de arroz sobre a durabilidade das estruturas, bem como sobre sua importância na resistência

do concreto à penetração de cloretos, foco central desta dissertação. São apresentados também alguns benefícios de ordem ambiental e técnica desta importante adição mineral na durabilidade das estruturas.

No capítulo III, há uma descrição dos experimentos realizados na pesquisa. Neste tópico, são apresentados os dados referentes a caracterização dos materiais, das variáveis envolvidas, e dos ensaios realizados.

O capítulo IV descreve a análise dos resultados dos ensaios realizados na presente pesquisa, comparando as respostas alcançadas com outros trabalhos relacionados com os objetivos propostos.

Finalmente, na conclusão, procurou-se responder os questionamentos pré-estabelecidos.

CAPÍTULO I

AÇÃO DOS CLORETOS NO CONCRETO

1.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, será apresentada uma revisão acerca dos fatores desencadeadores da desagregação do concreto, sendo ressaltado principalmente as causas relacionadas à ação dos cloretos no mesmo. Na seqüência, serão também abordados alguns aspectos referentes às modificações das propriedades dos concretos frente à ação deste destacado agente agressivo.

1.2 Aspectos gerais sobre a durabilidade do concreto

Cada vez mais, pesquisas são realizadas no intuito de melhoria das propriedades do concreto e, principalmente, do aumento de sua vida útil. Desta forma, estudos avançam rumo ao domínio das propriedades do mesmo, objetivando-se a construção de estruturas mais duráveis, economizando gastos futuros.

Mehta e Monteiro (1994) destacam que, embora o concreto apresente uma vida longa na maioria dos ambientes naturais ou industriais em que está inserido, quando este não é devidamente dosado e executado, torna-se facilmente vulnerável à ação dos processos físicos e químicos de deterioração, fato pelo qual tem se estabelecido os processos de degradação.

O termo durabilidade, segundo Ferreira (1999), possui várias definições. De maneira sucinta, durabilidade é a resistência de um material ou elemento da construção à deterioração ou desagregação. A degradação, conforme relata a autora, é definida pela perda progressiva das qualidades que o elemento possui para prestar o serviço para o qual foi destinado.

A NBR 6118 (2003) define durabilidade como a capacidade de uma estrutura resistir às influências ambientais, previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Atualmente, as estruturas de concreto têm sido utilizadas em ambientes cada vez mais hostis, próximo ao mar, em climas extremamente quentes ou frios, em ambientes sujeitos à alta pressão, em depósitos de materiais nucleares ou produtos altamente tóxicos, etc...

Esses ambientes agressivos são responsáveis pela aceleração dos processos de deterioração e desagregação do concreto, exigindo que o mesmo seja produzido de maneira a manter as condições de projeto.

A NBR 6118 (2003) define vida útil como sendo o período de tempo durante o qual se mantém a característica das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

Projetar estruturas em função da vida útil impõe quesitos para os projetistas em função do desempenho que o concreto deve apresentar frente à durabilidade. Hoje deve-se projetar estruturas com dada resistência à compressão que atenda às condições de durabilidade requeridas pela construção. A resistência de projeto deve ser fixada através dos requisitos de durabilidade e não ao contrário como acontecia no passado, ocasionando um grande número de patologias e diminuição da vida útil das estruturas (ISAIA, 1995).

A durabilidade deve ser maximizada não só em nível de processos construtivos, através do controle de qualidade de todas etapas de produção, mas também através da manipulação das características do material, tornando-o mais resistente aos ambientes no qual o concreto está inserido.

Silva (2003) relata que, com o acúmulo do acervo científico, percebeu-se um equívoco feito em relação à durabilidade e à resistência deste material. Pensava-se que um concreto com uma razoável resistência seria um concreto durável. Hoje se sabe que, para muitas condições de exposição, tanto a resistência como a durabilidade do concreto devem ser consideradas na fase de projeto.

Andrade (1992) afirma que o concreto armado de maneira geral tem demonstrado a durabilidade adequada para a maioria de seus usos. Esta durabilidade é resultado do duplo papel que o concreto exerce sobre o aço, em parte pelo cobrimento do concreto que é uma barreira física e, por outra parte, pela elevada alcalinidade que o concreto desenvolve sobre o aço, mantendo uma camada passiva sobre o mesmo por um tempo indefinido, em condições específicas.

1.3 Fatores que influenciam a deterioração do concreto

Torna-se necessária a compreensão e o conhecimento dos fatores que influenciam na resistência do concreto a determinados ambientes e agentes agressores, como forma de viabilizar a execução de estruturas mais duráveis e adequadas às utilizações que lhe são impostas. Este tópico, portanto, irá abordar os aspectos relativos aos fatores relevantes no que tange dos processos de degradação provocados pelos agentes agressivos de forma geral. Tem, no entanto, um enfoque especial nas propriedades relacionadas ao agente agressivo cloreto.

1.3.1 Permeabilidade

Neville (1997) define permeabilidade como o escoamento de um fluido através de um meio poroso. A permeabilidade se refere ao escoamento sob diferencial de pressão, depende do tamanho dos poros, da distribuição dos mesmos e da intercomunicação entre eles.

Vários autores, dentre eles Helene (1993), Mehta e Monteiro (1994), destacam a importância da permeabilidade no processo de degradação do concreto. Ela que controla a taxa de deterioração e representa uma característica diretamente relacionada à relação água/cimento e ao grau de hidratação do concreto.

A permeabilidade, conforme descrevem os autores, está internamente relacionada com os fenômenos que governam a durabilidade, pois a água, que percola através dos poros carregando íons agressivos, entre eles os íons cloretos, é o que controla os processos físicos, químicos ou físico-químicos de degradação do concreto.

Prezzi (1996) relata que a permeabilidade do concreto à água encontra-se relacionada ao volume dos poros com diâmetro superior a 132 μm , sendo que os poros capilares e os macroporos são os mais importantes para a durabilidade do concreto.

É consenso entre vários autores que, se tratando de ataques ácidos, a permeabilidade do concreto, bem como a rede de poros interna, podem ser consideradas de pouca importância na velocidade e intensidade dos danos, posto que a ação dos agentes agressivos destruiria, em primeira instância, a entrelaçada rede de poros existente.

Mehta & Monteiro (1994) consideram a permeabilidade a chave para a durabilidade, pois controla a entrada de agentes agressores ao concreto, além da entrada de oxigênio e umidade, fatores que influenciam no processo de corrosão das armaduras do concreto.

Neville (1997) afirma que, se a porosidade for grande e os poros estiverem interligados, os fluidos se deslocarão através do concreto com maior facilidade, de modo que a permeabilidade passa também a ser alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos ou, de outro modo, ineficazes para o deslocamento do fluido, a permeabilidade do concreto será baixa, mesmo com uma porosidade alta. O autor lembra que a permeabilidade depende das propriedades dos aglomerantes, da relação água/aglomerante e do período de cura do concreto.

De modo geral, a permeabilidade é encarada por vários autores, entre eles Malhotra (1993), como a chave para a definição do estado do concreto em relação aos eventuais ataques químicos oriundos do meio ambiente.

1.3.2 Absorção Capilar

A absorção capilar constitui-se outra importante característica na resistência ao ataque químico. Segundo Helene (1993), a absorção capilar é uma das propriedades que regem o transporte de íons para o interior do concreto. O autor afirma que para casos de concretos sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, por se tratar de transporte de água em vazios não saturados, a absorção capilar pode ter grande influência no transporte de água no interior das estruturas.

Camarini (1999), por sua vez, relata que a permeabilidade é a medida de fluxo de líquido sob pressão em materiais saturados, enquanto a absorção capilar é a medida desse fluxo em materiais não saturados, o que normalmente ocorre com estruturas de concreto.

Cascudo (1997) afirma que a absorção capilar é dependente da porosidade aberta, isto é, de poros capilares interconectados entre si, o que permite o transporte das substâncias líquidas contaminadas para o interior do concreto. A absorção, conforme relata o autor, depende sobretudo do diâmetro dos poros e apresenta forças de sucção capilar tão ou mais intensas quanto menores forem os diâmetros capilares e inter-relaciona-se ainda com as características intrínsecas do líquido, tais como viscosidade e tensão superficial.

1.3.3 Migração iônica e Difusão

Helene (1997) e Cascudo (1997) definem migração iônica no concreto como uma movimentação de íons que se dá pela corrente gerada pela ação de campos elétricos decorrentes da corrente elétrica existente no processo eletroquímico.

Regatieri (1999) afirma que a migração de íons cloreto dentro do concreto se dá pela ação do campo elétrico formado a partir do surgimento de pilhas de corrosão eletroquímica. Estes íons tendem, ao penetrarem no concreto, a contribuir para a redução da resistividade elétrica e aumentar a condutibilidade do eletrólito, favorecendo assim o crescimento da taxa de corrosão.

Cascudo (1997) e Neville (1997) definem difusão como sendo uma característica determinada pelo deslocamento de um fluido no interior do concreto devido a uma diferença de gradiente de concentração.

Essas diferenças nas concentrações de íons suscitam o movimento deles em busca de equilíbrio. A difusão iônica apresenta-se como o mecanismo de transporte predominante dos cloretos dentro do concreto, caso seja resguardada uma certa interconexão dos capilares e haja eletrólito (sem o que a difusão iônica não ocorre). As diferenças nas concentrações podem ser um fator mais significativo sob a ótica da durabilidade do que a própria permeabilidade.

Valores típicos da taxa de difusão para pastas de cimento plenamente saturadas são da ordem de 10^{-12} m²/s e, portanto, a penetração de cloretos numa espessura de 10mm de pasta de cimento demandaria muitos meses (CASCUDO, 1997).

Estudo de diversos autores, Rasheeduzzafar (1992), Helene (1993), Bauer (1995), Jones *et al.* (1997) e Wee *et al.* (1999), relatam que as variáveis que mais influenciam na penetração de íons agressivos no concreto são: a porosidade, a permeabilidade, a relação água/aglomerante, a espessura da camada de cobrimento, a duração e as condições de cura, a dosagem correta dos materiais, os teores de íons agressivos do meio, o ambiente em que o concreto esta inserido e o emprego de aditivos e adições minerais e suas características. Esta última variável é discutida no capítulo II desta dissertação.

1.3.4 Deterioração do concreto por reações químicas

A resistência do concreto a processos destrutivos iniciados por reações químicas envolve geralmente, mas não necessariamente, interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio externo e constituintes da pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Em uma pasta de cimento Portland bem hidratada, a fase sólida, que é composta principalmente por hidratados de cálcio relativamente insolúveis, tais como C-S-H, CH e C-

A-S-H, estes encontram-se em um estado de equilíbrio estável com fluidos nos poros com alto pH. Grandes concentrações de íons Na^+ , K^+ e OH^- são responsáveis pelo alto valor do pH, de 12,5 a 13,5, do fluido nos poros das pastas de cimento Portland, o que torna claro que o concreto de cimento Portland estaria em um estado de desequilíbrio químico quando entrasse em contato com um meio ácido. Do ponto de vista da durabilidade qualquer meio com pH menor que 12,5 torna-se prejudicial e pode ser agressivo ao concreto. Isto porque a redução da alcalinidade leva a uma desestabilização dos produtos cimentícios de hidratação. O ataque químico, portanto é função do pH do agente químico e da permeabilidade do concreto (SILVEIRA, 1996).

A água está presente na maioria dos processos de deterioração, e constitui-se em um agente básico, primário, da degradação física dos materiais porosos. Ao servir de veículo para o transporte de íons agressivos, a água pode contribuir também para a desagregação química dos materiais. Esses fenômenos físico-químicos de desagregação relacionados com os movimentos da água no interior dos sólidos porosos podem ser controlados através da permeabilidade do material, como já mencionado.

A água possui um alto poder solvente, assim, muitos íons e gases encontram-se presentes em solução na água, que adquire, dessa forma, a capacidade de quimicamente decompor materiais sólidos.

A taxa de deterioração está relacionada com a mobilidade do ataque, se apenas é superficial ou se envolve, ao mesmo tempo, o interior do material.

Outro fator que influencia os processos de desagregação do material é o tipo de concentração de íons na solução e da concentração química do material. O concreto, ao contrario, dos minerais e das rochas naturais, apresenta uma composição altamente alcalina e, portanto, muito sensível a águas ácidas.

Na Figura 1.1, observa-se que as reações químicas se manifestam, de maneira geral, através de efeitos físicos tais como o aumento da permeabilidade, porosidade, o aumento das tensões internas. Estas geram uma série de conseqüências nocivas e danosas ao concreto, como a perda de rigidez, perda de alcalinidade, perda de resistência, fissuração, deformação e, que por conseguinte, aumentam sua taxa de deterioração.

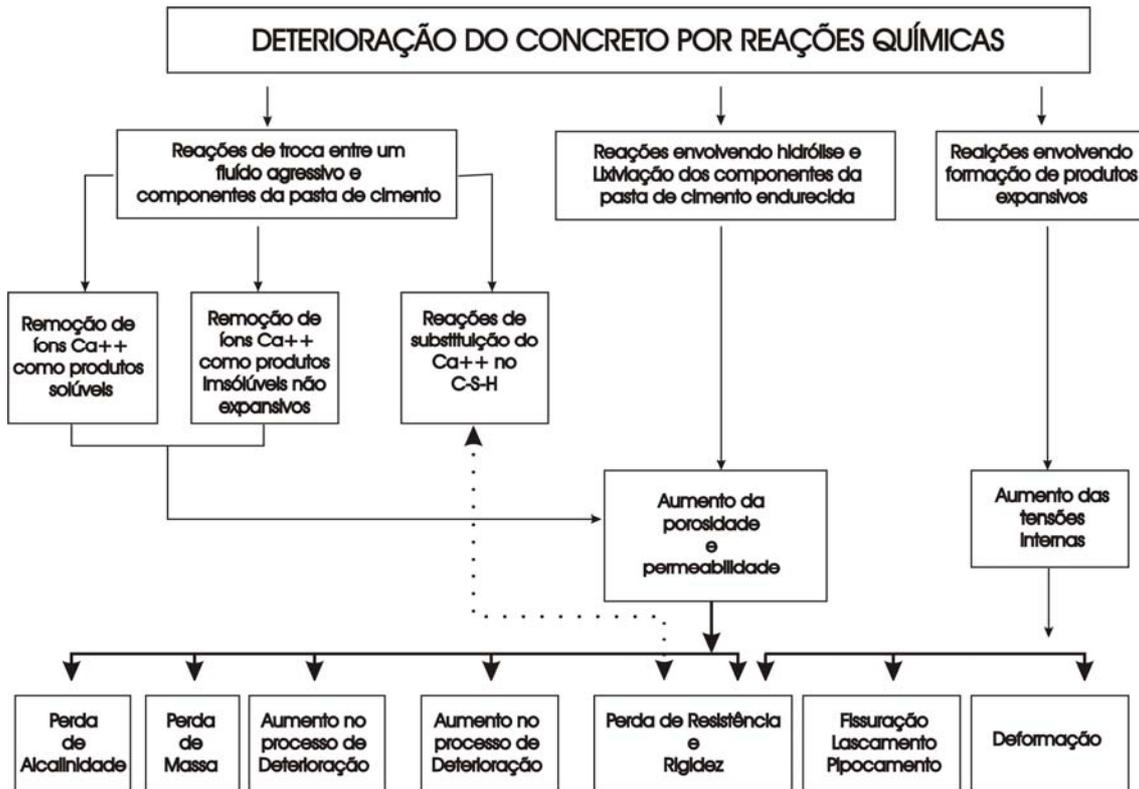


Figura 1.1 – Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto. (MEHTA E MONTEIRO, 1994 p.54)

A principal causa individual de deterioração das estruturas de concreto é a corrosão das armaduras que pode ocorrer devido à carbonatação ou à ação de íons cloreto. Passa-se então a uma revisão dos aspectos relacionados com o ataque de cloretos no concreto.

1.4 Corrosão das armaduras no concreto

1.4.1 Considerações importantes

O fenômeno da corrosão das armaduras no concreto é um problema que além de ocorrer frequentemente, reduz significativamente a vida útil das estruturas, ocasionando defeitos de ordem estética e funcional (HONG, 2000; BASHEER, 2002; SARASWATHY, 2003).

Nos últimos anos, a corrosão de armaduras no concreto despontou como um problema de primeira importância na maioria dos países desenvolvidos. A deterioração prematura das estruturas de concreto constitui a maior preocupação da construção civil no mundo,

principalmente pelos elevados custos associados à manutenção e reparo dessas estruturas. (HUSSAIN et. al., 1996; PREZZI et. al., 1996).

Dal Molin (1988), analisando os casos de corrosão ocorridos no estado do Rio Grande do Sul, em estudo do Cientec, verificou que, do total de fissuras em concreto armado, 11,89% eram devidas à corrosão e, deste significativo valor, 88,2% foram classificadas como graves.

Cascudo (1997) relata que os altos custos globais que envolvem tanto a perda de material deteriorado, quanto a correção do problema, e o comprometimento da estabilidade estrutural inerente ao desenvolvimento do processo corrosivo fazem da corrosão das armaduras certamente a principal manifestação patológica das estruturas de concreto.

1.4.2 Processo corrosivo

Neville (1997) relata que, logo após o início da hidratação do cimento, forma-se uma camada de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, firmemente aderida ao aço. Enquanto esta película estiver aderida ao aço, o mesmo permanecerá protegido. No entanto, os íons cloreto destroem a película e, com a presença de água e do oxigênio ocorrerá a corrosão.

O autor descreve o processo corrosivo sumariamente relatando que, quando existir uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos do aço no concreto, forma-se uma célula eletroquímica: são constituídas uma região anódica e uma região catódica ligadas pelo eletrólito na forma de água dos poros da pasta endurecida. Os íons de ferro, Fe^{++} , com carga elétrica positiva no ânodo passam para a solução, enquanto os elétrons livres, e^- , com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combinam com a água e o oxigênio para formar íons de hidroxila, OH^- . Estes íons se deslocam pelo eletrólito e combinam-se com os íons ferrosos, formando hidróxido ferroso que, por outra oxidação, se transforma em hidróxido férrico (ferrugem). As reações são as seguintes:

reações anódicas:



reação catódica:



Pode se notar que o oxigênio é consumido e a água é regenerada, mas ela é necessária para que o processo tenha continuidade. Assim, não há corrosão em concreto seco, provavelmente em umidade relativa abaixo de 60 %; também praticamente não há corrosão de concreto completamente imerso, exceto quando a água pode reter ar, como por exemplo, pela ação de ondas. A umidade relativa ótima para corrosão é entre 70 % e 80 por cento Cascudo (1997). Em umidades relativas mais altas, a difusão do oxigênio através do concreto é consideravelmente reduzida.

As diferenças de potencial eletroquímicas podem ter origem em diferenças do ambiente do concreto, por exemplo, quando uma parte está permanentemente imersa em água do mar e outra parte está exposta à molhagem e à secagem alternadas. Uma situação semelhante pode ocorrer quando houver uma diferença substancial de espessura de revestimento de uma estrutura de aço que esteja conectada eletricamente. Podem se formar células eletroquímicas também devido a diferenças de concentração salina na água dos poros ou devido a acesso não uniforme de oxigênio. Figura 1.2.

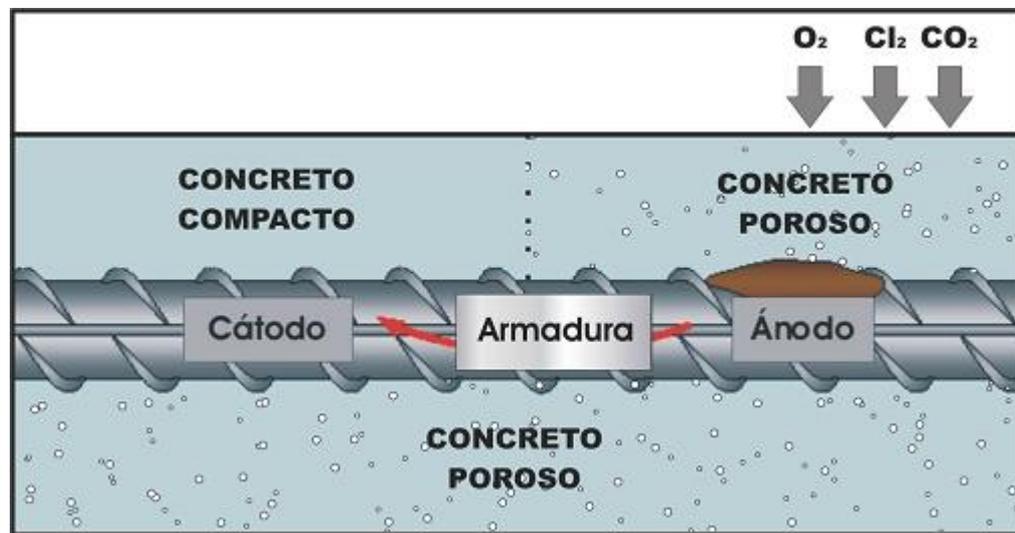
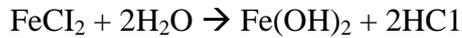


Figura 1.2 – Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio (CASCUDO, 1997, p. 54).

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. As reações são as seguintes:



Assim, o Cl^{-} é regenerado de modo que a ferrugem não contém cloreto, embora se forme cloreto ferroso no estágio intermediário. Como a célula eletroquímica necessita de uma conexão entre o ânodo e o cátodo pela água dos poros, bem como pela própria armadura, o sistema de poros na pasta de cimento endurecida é um fator importante influenciando na corrosão. Em termos elétricos, é a resistência da conexão pelo concreto que controla a passagem da corrente. A resistividade elétrica dele é fortemente influenciada pelo seu teor de umidade, pela composição iônica da água dos poros e pela continuidade do sistema de poros da pasta de cimento endurecida.

Iniciada a corrosão da armadura, a resistividade elétrica e o acesso de oxigênio até a superfície da armadura são os principais fatores controladores do processo. A resistividade regula a mobilidade dos íons, dificultando a sua circulação, enquanto a ausência de oxigênio próximo à superfície do aço interrompe o processo (ABREU, 1998).

Helene (1993) destaca que um teor elevado de cloretos, assim como uma maior mobilidade dos mesmos, gerado pela ação de um campo eletroquímico e ocasionado pela pilha de corrosão pode acelerar, de maneira significativa, o processo corrosivo. Portanto, são de interesse vital para o aumento da velocidade da corrosão das armaduras no concreto o controle do coeficiente de difusão de cloretos, o oxigênio na solução aquosa dos poros e o aumento da resistividade elétrica do concreto.

São duas as conseqüências da corrosão do aço. Primeiro, os produtos da corrosão ocupam um volume várias vezes maior do que o aço que lhes deu origem, de modo que a sua formação resulta em fissuração (caracteristicamente paralela às barras da armadura), lascamento ou delaminação do concreto. Isso torna mais fácil a entrada de agentes agressivos em direção ao aço, com um conseqüente aumento da velocidade de corrosão. Segundo, o progresso da corrosão no ânodo reduz a área da seção transversal do aço, reduzindo, assim, a sua capacidade de suporte de solicitações. Neste particular, deve ser observado que a corrosão induzida por cloretos é localizada em um pequeno ânodo, causando uma escarificação do aço. Quando o suprimento de oxigênio é bastante limitado, pode ocorrer uma corrosão lenta.

1.4.3 Produtos da corrosão das armaduras no concreto

Os produtos de corrosão, menos volumosos do que nas circunstâncias normais, podem se deslocar para os vazios do concreto provocando fissuração ou escamamento progressivos (CASCUDO, 1997), Figura 1.3.

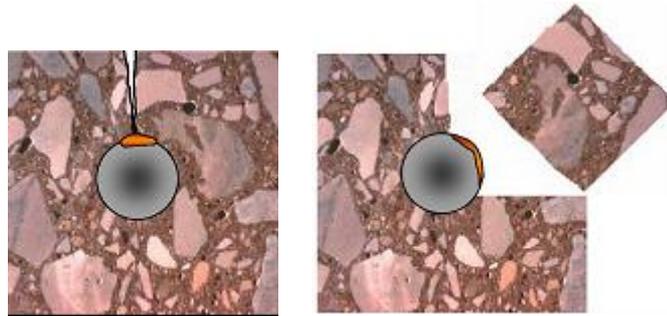


Figura 1.3 – Fissuração e destacamento do concreto, devidos à corrosão de armaduras (CASCUDO, 1997, p. 54).

O processo corrosivo das armaduras de concreto pode ser acelerado por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, entre eles podemos citar os íons sulfetos (S^-), os cloretos (Cl^-) (tema desta dissertação), os nitritos (NO_3^-), o gás sulfídrico (H_2S), entre outros. Esses agentes não permitem a formação ou quebram a película existente de passivação do aço, acelerando a corrosão (HELENE, 1986).

1.5 Ação dos íons cloreto

Os cloretos podem ser encontrados no concreto de duas formas: como cloreto livre, solúvel ou dissociável, na forma de íon, na água dos poros, ou como cloreto combinado, formando parte das fases hidratadas do cimento. O primeiro apresenta-se como cloreto realmente agressivo à armadura, e o segundo, geralmente, encontra-se combinado na forma de cloro-aluminato conhecido como sal de Friedel (HELENE, 1993). A soma do cloreto livre e o cloreto combinado é denominada cloreto total. Embora o cloreto solúvel em água seja o que pode provocar a corrosão, é conveniente determinar os cloretos totais, pois parte destes cloretos combinados podem vir a ficar disponíveis para reações deletérias devido a fenômenos, tais como a carbonatação, a ação dos sulfatos ou a elevação da temperatura.

Helene (1993) relata que a carbonatação e a ação de bactérias no concreto reduzem a alcalinidade natural do concreto, causando dissolução da camada passivante que protege a

armadura da corrosão. Contudo, os íons cloretos constituem-se especialmente agressivos, pois são capazes de despassivar a armadura do concreto, mesmo em pH extremamente elevado.

O concreto, conforme descreve Frey (1994), possui um caráter básico pela sua solução altamente alcalina presente em seus poros, a qual varia entre 12 e 14. Esta solução, juntamente com uma certa quantidade de oxigênio, protege o aço contra agentes agressivos. De acordo com este autor, a alta alcalinidade é ocasionada pela presença de grandes concentrações de íons Na^+ , K^+ e OH^- no fluido dos poros da pasta de cimento e também pela formação de hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento. Pruckner (2004) afirma, em seus estudos, que é da natureza intrínseca do concreto, se bem executado, proteger a armadura, seja por barreira física ou por proteção química, sendo que esta última atua por intermédio da basicidade da composição do mesmo.

Pode ocorrer, no entanto, a ruptura desta capa passivadora, finamente aderida ao aço, ocasionada pela ação dos íons cloreto. Este fenômeno ocorre localmente, ou seja, a ação local destes íons provoca uma dissolução pontual da película protetora e, se houver presença de oxigênio e da água, estará iniciado o processo corrosivo.

Lima (1990) afirma que o íon cloreto apresenta um pequeno raio atômico ($3,6 \text{ \AA}$) e, por isso, penetra com maior facilidade do que os outros íons na película passiva, através dos pontos fracos, dissolvendo coloidalmente a mesma, aumentando sua permeabilidade, rompendo a passividade em pequenas regiões, originando os denominados pites.

1.6 Fontes e teores críticos de cloreto para o concreto

Os cloretos podem ingressar no concreto de várias maneiras, e uma das principais é através dos materiais utilizados na sua confecção. Pode-se encontrar cloretos em agregados contaminados, principalmente em regiões litorâneas, em águas salobras ou excessivamente cloradas, e até mesmo em cimentos, já que os cloretos contribuem para as resistências iniciais.

Os cloretos também podem ser incorporados ao concreto a partir de alguns aditivos aceleradores de pega, que possuem na sua composição cloreto de cálcio (CaCl_2). Quando este aditivo é dissolvido na água, provoca a liberação de íons cloreto que permanecerão na mistura (HELENE, 1993). Tal acelerador não apenas afeta a durabilidade do concreto por propiciar a corrosão da armadura, como pode afetar também os tempos de pega e resistências mecânicas do concreto, quando empregado em concentração de 0,5% a 2,0% de cimento, em massa (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os aditivos aceleradores são utilizados para modificar as propriedades do concreto de cimento portland, de forma a acelerar a velocidade de desenvolvimento da resistência inicial e de permitir, assim, a desforma mais rápida e liberar mais cedo a construção para outros serviços.

Os cloretos do meio ambiente podem penetrar no concreto através da estrutura dos poros capilares contínuos (da zona de interface), caso existam, de fissuras e pelos mecanismos clássicos de ingresso de água e transporte de íons. Geralmente, a maioria dos problemas gerados pelos íons cloreto são provocados pelo ingresso destes íons provenientes do meio ambiente (HELENE, 1993).

Helene (1993) e Neville (1997) afirmam ainda em seus estudos que o ataque dos cloretos em ambiente marinho, normalmente, é maior na zona de respingos que na zona de névoa e é maior na zona de maré do que na zona submersa.

Em regiões litorâneas, a proximidade do mar faz com que a atmosfera contenha íons cloreto. As partículas da água do mar contendo sais dissolvidos, quando em suspensão na atmosfera, são arrastadas pelo vento e podem depositar nas estruturas, possibilitando que o cloreto penetre ali por absorção ou difusão. Este fenômeno é fortemente influenciado pelo vento (Figura 1.4).



Figura 1.4 – Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura marítima (Concrete Society Working Party *apud* FERREIRA, 1999).

Finalmente, os cloretos podem ser incorporados ao concreto, involuntariamente, através dos tratamentos superficiais de limpeza com ácido muriático (ácido clorídrico), sendo

válido neste caso prever, no projeto, a dosagem adequada do concreto de cobrimento para a proteção perfeita das armaduras.

A relação Cl^-/OH^- da solução dos poros determina o limite crítico do teor de cloretos, capaz de despassivar a armadura. Esta relação Cl^-/OH^- depende de vários fatores como da composição do concreto, do teor de C_3A do cimento, da temperatura, da umidade relativa, do pH da solução dos poros, da proporção de cloretos solúveis e do conteúdo de água e a fonte de cloretos (ALONSO et. al, 1997).

De maneira geral, todos os materiais empregados no preparo do concreto podem contribuir para o seu teor total. A seguir serão citados alguns materiais utilizados na preparação do concreto com seus teores de cloretos permitidos.

O cimento Portland possui valores reduzidos de cloretos, não mais que 0,01% em massa. Não há limite especificado na norma nacional. A norma BS12 (BSI, 1991) limita o teor de cloretos no máximo em 0,1% (PEREIRA, 2001).

No que diz respeito ao agregado, a norma BS 812 (BSI 1992) contém diretrizes para o teor máximo aceitável de íon cloreto no agregado, embora se deva considerar a sua contribuição para o teor total no concreto, em função da sua dosagem. A norma determina um limite de 0,01% para o agregado de concreto protendido (em relação à massa total de agregado), 0,03% para concreto armado com cimentos resistentes a sulfatos e 0,05% para outros concretos armados, conforme relata Pereira (2001) em seu estudo sobre a influência do tipo de cimento na determinação de cloretos no concreto.

A água de amassamento não deve conter matéria orgânica indesejável em teores excessivos. Em algumas regiões áridas, ou próximas do mar, a água pode ser salobra, indicada por um alto teor de cloreto. É considerada satisfatória se atende à exigência do apêndice da BS 3148 BSI (1980), que recomenda os limites de 500 ppm para cloreto e 1000 ppm para sulfato segundo NEVILLE (1997). A água potável, por imposição da saúde pública, contém um teor muito baixo de cloro (<1,4 ppm), que não afeta o concreto.

Helene (1993) apresenta em seus estudos os limites para o teor máximo de cloretos no concreto normatizados em diversos países (Tabela 1.1).

O teor de cloretos, como podemos observar na tabela 1.1, é geralmente expresso em porcentagem. Este percentual é variável, pode ser tomado em relação à massa de cimento, ao volume de concreto ou ao volume da água de amassamento.

Tabela 1.1 - Limites normalizados para o teor total de cloretos no concreto (HELENE, 1993)

País	Norma	Limite máximo de cloretos		Limite referido a
		Concreto armado	Concreto protendido	
BRASIL	*NBR 6118	0,05		Água de amassamento
	NBR7197	-	0,05%	
	NBR9062	-	0,05%	
ESPANHA	EH-88	0,40%	-	Cimento
	EP-88	-	0,10%	
EUA	ACI 222	0,20%	0,08%	Cimento
	ACI 201	0,20%	0,08%	
		0,30 ambiente normal		
	ACI 318	0,15% ambiente cloreto		
	1% ambiente seco			
EUROPA	CEB	0,05%	0,025%	Concreto
	CEB-FIP	0,40%	0,20%	
	ENV 206	1% Concreto simples		Cimento
		0,40%	0,20%	
JAPÃO	JSCE SP-2	0,60kg/m ³	0,30 kg/m ³	Concreto

* foram feitas modificações ver norma atualizada NRB 6118 (2003)

Andrade (1992) afirma que, de modo geral, são considerados os limites de 0,4% em relação à massa de cimento, ou 0,05% a 0,1% em relação à massa do concreto, quantidades essas suficientes para provocar a despassivação do aço.

Predominantemente não há um consenso quanto ao teor máximo de cloretos a ser incorporado ao concreto como forma de evitar a corrosão, pois muitos são os fatores que influenciam o processo corrosivo.

1.7 Fatores que influenciam no ingresso de cloretos no concreto

Vários são os fatores que auxiliam o concreto em sua capacidade de resistir à penetração de cloretos, a seguir são abordados alguns deles.

1.7.1 Relação água aglomerante

A relação água/aglomerante é de vital importância para a resistência à penetração de cloretos do concreto, pois influencia, de maneira direta, em suas características, como porosidade, capacidade de absorção de água e porosidade da pasta. De modo geral, a relação a/ag possui relação inversamente proporcional com resistência à penetração de cloretos, ou seja, quanto maior a relação a/ag menor será a resistência do concreto à penetração de cloretos, fato relatado por Wee (1999), devido ao aumento da porosidade da pasta do concreto.

Pereira (2002), por sua vez, constatou que, quanto maior a relação água/cimento, maior será a carga total passante (Figura 1.5). A autora afirma que a relação água/cimento influencia o tamanho e a interconectividade dos poros do concreto, facilitando ou impedindo o deslocamento dos íons cloreto no mesmo.

Ozyildirim (1994) observou que os concretos de referência confeccionados com relação a/ag > 0,40 apresentaram valores acima de 4000C (altos) e os confeccionados com relação a/ag 0,35 apresentaram valores de penetração moderados (2000C a 4000C), o que comprovou a interferência da redução da relação a/ag na diminuição da penetração de cloretos.

Delagrave et al. (1996), Jones et al. (1997) e Oliver (1998) observaram que o aumento da relação a/ag acarretou um aumento da penetração de cloretos. Contudo, Regattieri (1999) constatou em seu estudo que, em algumas situações específicas, não foram observadas diferenças significativas na resistência à penetração de cloretos com o aumento da relação a/ag, exceção esta encontrada em concretos compostos com adições minerais.

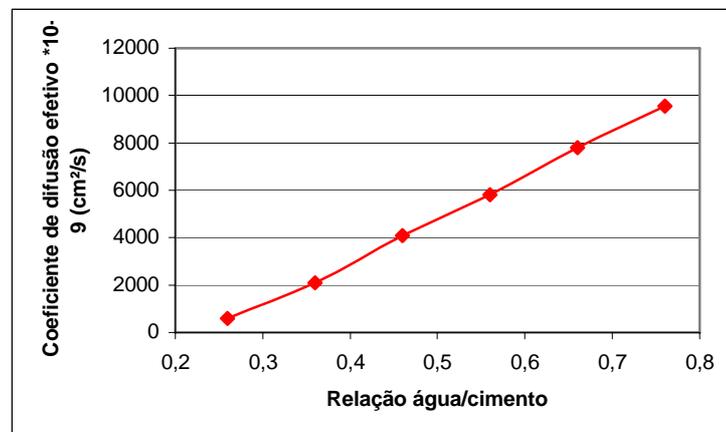


Figura 1.5 – Efeito da relação água cimento sobre a carga total passante (PEREIRA, 2002).

Moreira (2001) afirma, por seu turno, que a relação a/ag, do ponto de vista da degradação superficial do concreto, demonstrou ser um parâmetro bastante eficiente de durabilidade, tendo sido os concretos de maior relação a/c os mais atingidos, em suas pesquisas, pelas soluções agressivas.

1.7.2 Adições minerais e sua composição química

A composição química do cimento pode influenciar de maneira benéfica no processo de diminuição dos cloretos livres na solução dos poros. Este processo ocorre através da reação dos íons cloreto com os aluminatos, formando cloroaluminatos de cálcio, e é determinado pelo teor de C_3A e C_4AF do clínquer (GASTALDINI, 2000). Polder (2002), estudando a corrosão da armadura de concretos expostos a ciclos de molhagem e secagem, afirma que o uso de adições minerais em substituição ao cimento no concreto retarda o ataque da corrosão da armadura, através da redução satisfatória do ingresso de cloretos para o interior do mesmo.

Regattieri (1999) e Ferreira (1999) relatam que o uso de adições minerais é a variável de maior influência sobre a carga passante. Seu uso resulta em concretos com maiores resistências à compressão e penetração de cloretos.

Já Basheer (2002) relata que, quando as adições minerais são utilizadas no concreto, não apenas a porosidade é reduzida, mas também os poros se tornam mais finos e ocorre uma mudança nos hidratos do cimento, conduzindo a uma redução na mobilidade dos íons cloreto. O autor também destaca que a inicial proteção contra a penetração de cloretos provenientes dos concretos compostos com adições minerais pode depender do tipo de material utilizado, da duração da cura e da idade do concreto, quando este estiver exposto a algum ambiente agressivo.

Jones (1997), por seu lado, constatou que as significantes melhorias nas resistências à penetração de cloretos das misturas pozolânicas podem ser atribuídas tanto às influências químicas como às influências físicas. Fisicamente as reações pozolânicas, associadas com o uso de materiais adicionais provocam melhorias na microestrutura do concreto e, do ponto de vista químico, o autor destaca o processo de fixação de íons cloretos em algumas fases de aluminatos.

Ferreira (2003) avaliou a eficiência do emprego de adições minerais, em substituição parcial da massa do cimento, na resistência à penetração de cloretos. Ele utilizou em sua pesquisa, escória de alto forno (65%), sílica ativa (10%), cinza de casca de arroz (10%), cinza

volante (25%) e metacaulinita (10%), com relações a/ag de 0,40 e 0,55 e 2 procedimentos de cura distintos: cura úmida e cura ao ambiente. Realizou ensaios de penetração de íons cloreto aos 28 e 91 dias (ASTM-C 1202). Os resultados dos ensaios de penetração de cloretos indicaram uma influência marcante do tempo de cura na melhoria da resistência à penetração de cloretos. Esta relação a/ag, estatisticamente, mostrou-se menos influente na resistência à penetração de cloretos que as adições minerais e a idade de ensaio. O autor relata ainda que os concretos curados ao ambiente apresentaram menores penetrações a cloretos que os concretos curados em cura úmida.

Feng (2003) estudou a influência do uso da cinza volante ativada térmica, física e quimicamente, em níveis de substituição ao cimento no concreto de 10%, 20%, 30% e 40%, com relação a/ag 0,50. Seus resultados mostraram que as misturas que utilizaram cinza volante ativada apresentaram melhorias na resistência à corrosão do concreto, principalmente nos níveis abaixo de 20% e 30% de substituição.

Já Ramezaniapour & Malhotra (1995) estudaram a influência do uso de adições minerais na penetração de cloretos. As misturas estudadas foram compostas com cinza volante, escória de alto forno e sílica ativa, além da mistura de referência, em teores de substituição de 25% e 58%, 25% e 50%, e 10%, respectivamente, com relações a/ag de 0,35 para a mistura composta com 58% de cinza volante e 0,50 para as demais misturas. Os resultados dos ensaios mostraram que as misturas compostas com adições minerais, tanto aos 28 dias como também aos 180 dias, apresentaram valores muito reduzidos quando comparados com o traço de referência. Fato este destacado pelos autores devido a uma permeabilidade muito baixa destes concretos, em consequência de mudanças na estrutura dos poros dos sistemas com adições minerais hidratadas.

De maneira geral, as adições minerais apresentam uma influência benéfica na redução da penetração de cloretos, pois possuem capacidade de fixação de cloretos, pelo fato de aumentarem a quantidade de aluminatos disponíveis, e provocam um refinamento dos poros, densificando a pasta do concreto, obturando e secionando a rede de intercomunicação dos poros, com isso dificultando a entrada dos íons agressivos para o interior do concreto (BAUER, 1995; ZHANG e MALHOTRA, 1996; BASHEER, 2002).

1.7.3 Temperatura

O controle da temperatura é um detalhe importante para a qualidade do concreto, pois se reflete em efeitos na reologia do mesmo. A alta ou a baixa excessiva da temperatura do concreto pode acarretar em dificuldades no controle da trabalhabilidade e viscosidade do mesmo, ocasionando problemas no transporte e no lançamento dele (AÏCTIN, 2000).

No processo de penetração de cloretos, a temperatura exerce um papel crucial, conforme relata Helene (1993). Ele afirma que um aumento de 15°C para 30°C praticamente duplica o coeficiente de difusão de cloretos.

Hussain et al. (1996), em seus estudos sobre a influência do teor de C_3A na quantidade de cloretos livres com a variação da temperatura, destacam que a alta temperatura reduz a concentração de OH^- na solução dos poros, elevando a relação Cl^-/OH^- , e aumenta a concentração de cloretos livres pela decomposição de cloreto aluminatos. Soma-se a estes fatores, o estímulo dado pela temperatura na movimentação das moléculas, facilitando o transporte de íons (Figura 1.6).

Dhir (1993) estudou a influência dos concretos desenvolvidos com teores de cinza volante superiores a 20% no coeficiente de difusão de cloretos, quando submetidos a temperaturas variadas de cura, de 10°C a 45°C. Os resultados mostraram que a difusão de cloretos diminui com o aumento da temperatura, e isto se deve ao processo de aceleração da hidratação provocada pelo aumento da temperatura.

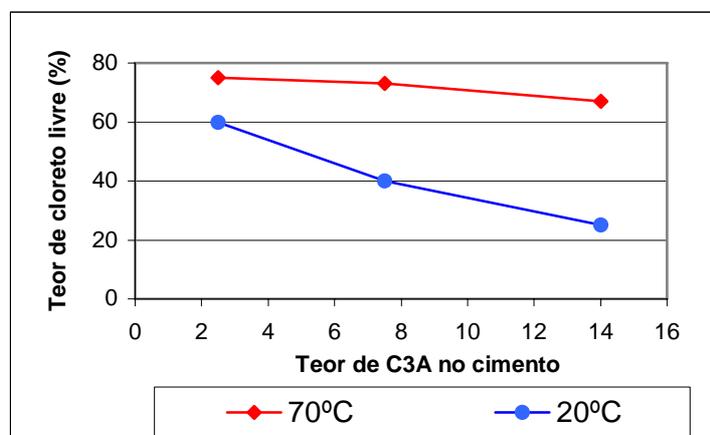


Figura 1.6 – Influência do teor de C_3A na quantidade de íons cloreto livres, a 20° e 70°C (HUSSAIN e RASHEEDUZAFAR, 1993)

Detwiller (1991) estudou a importância da temperatura na aceleração das reações químicas. Seu estudo foi realizado em concretos curados a 5°C, 20°C e 50°C. Os resultados mostraram que os corpos de prova curados em temperatura mais alta apresentaram maior difusão de cloretos, sendo este efeito mais efetivo para a relação a/ag mais baixa.

Pereira (2002) constatou que o incremento na temperatura de cura dos concretos até 40°C mostrou-se favoravelmente significativo para a penetração acelerada de cloretos. A autora também observou que o concreto confeccionado com o cimento CP IV e submetido à temperatura de cura de 25°C apresentou carga passante, aproximadamente, 2 vezes inferior ao mesmo concreto produzido com o mesmo cimento e submetido à temperatura de cura de 5°C.

Observaram-se opiniões variadas a respeito da influência da temperatura do concreto na penetração de cloretos no concreto. Contudo, a maioria dos autores pesquisados afirma que o aumento da temperatura aumenta a difusão de cloretos para o interior do concreto.

1.7.4 Cura

Aïctin (2000) observou que a falta de uma cura adequada do concreto pode ser um fator crítico para a durabilidade do concreto aos agentes agressivos do meio, entre eles o cloreto.

Pesquisadores como GjØrv e Vennesland (1979), afirmam em seus estudos sobre penetração de cloretos em curtos espaços de exposição, que o efeito da relação a/ag é limitado à camada superficial do concreto e, em longos períodos de exposição, o tipo de cimento apresenta maior influência na penetração de cloretos que a relação a/ag.

Plante e Bilideau (1989), em suas pesquisas sobre a utilização da cinza volante em nível de substituição ao cimento de 25%, relatam que o aumento do tempo de cura, acarretou significativa redução da porosidade da pasta com o decorrer do tempo, ocorrendo reduções expressivas na penetração de cloretos em concretos confeccionados com diferentes relações a/ag (Figura 1.7).

Khatib (2002) estudou a influência da cura em altas temperaturas e em baixa umidade sobre a penetração de cloretos no concreto em que parte do cimento foi substituída por 20% de cinza volante e 9% de sílica ativa com relação a/ag 0,45. Os resultados mostraram que as condições iniciais de cura tiveram uma substancial influência na taxa de penetração de cloretos, durante curtos períodos de exposição a ambientes com cloretos. Após longos períodos de exposição o efeito da cura inicial tornou-se insignificante.

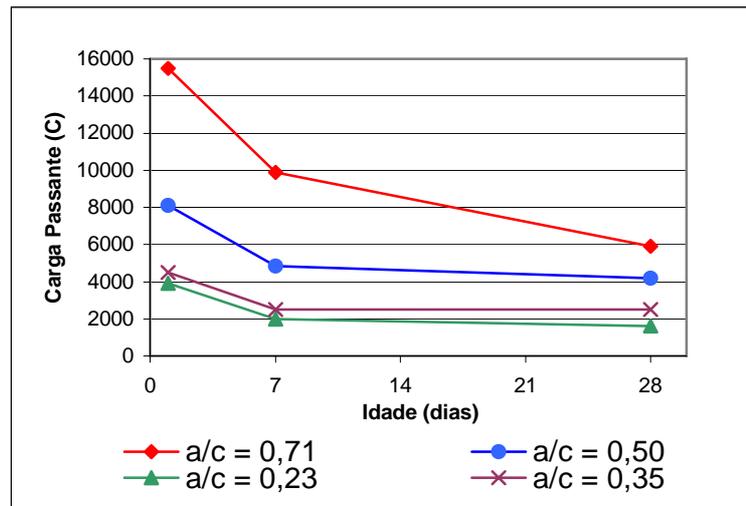


Figura 1.7 – Penetração de íons cloreto x tempo de cura em concreto (PLANTE e BILODEAU, 1989)

Isaia (1995) pesquisou sobre a penetração de cloretos em misturas contendo 25% e 50% de cinza volante, 10% e 20% de sílica ativa e 10% e 30% de cinza de casca de arroz com relações 0,3, 0,4 e 0,5. O autor afirma que a cura desempenha função preponderante no desenvolvimento do grau de hidratação, na formação dos poros grandes e pequenos, contínuos e descontínuos. Assim, a penetração de cloretos através da camada de cobrimento, também é governada pelo modo que foi realizada a maturação do concreto, como explica o autor, pelo período que esteve em contato com a umidade, nas idades iniciais, especialmente quando são empregadas adições minerais.

Observou-se que a cura exerce um papel importante nas melhorias da resistência à penetração de cloretos no concreto. De outro modo, constatou-se uma influência maior da relação a/ag quando confrontada com o tempo de cura na diminuição da penetração de cloretos no concreto, fato este também flagrado em pesquisa realizada por BATTAGIN (2002).

1.8 Relação entre a penetração de cloretos (ASTM C 1202) e outras propriedades importantes ligadas a durabilidade

Neste tópico serão discutidos os inter-relacionamentos existentes entre algumas propriedades ligadas à durabilidade do concreto. Foram analisadas as propriedades referentes

a penetração de cloretos, à resistividade elétrica, à resistência à compressão e ao índice “k” de penetração de cloretos.

Wee et al. (2000) estudaram a correlação existente entre os dados derivados do teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) e os dados referentes ao coeficiente K, derivado do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP), bem como a relação existente entre estes e outras propriedades como resistividade elétrica e resistência à compressão. Realizaram os seguintes experimentos:

- Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP) – teste utilizado para avaliar a resistência do concreto contra a penetração de cloretos, realizado segundo procedimentos descritos na AASHTO T259.
- Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) – Teste descrito na norma ASTM C1202, utilizado para a avaliação da carga total passante (Coulombs) das amostras ensaiadas.
- Resistividade elétrica – Teste baseado nos princípios de Wenner’s (NBR-7117 - DEZ/81), foi utilizado para a determinação da resistividade de concretos, medida em (ohm.cm).
- Resistência à compressão – Ensaio realizado em conformidade com a norma BS1881 (1983).

Avaliaram inicialmente a correlação existente entre os dados da carga passante, derivados do teste rápido de penetração de cloretos (TRPC), e os dados referentes ao coeficiente K, derivados do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP).

Moldaram amostras de concretos contendo proporções e finuras variadas de Escória de alto forno (EAF) e Sílica ativa (SA) (Tabela 1.2), curadas por diferentes períodos e sujeitas ao EPCANP. Avaliaram também as resistências à compressão e a resistividade elétrica dos concretos das misturas minerais.

Tabela 1.2 – Tipos de misturas utilizadas nos experimentos de Wee et al. (2000)

Tipo de mistura	a/ag	Mistura mineral		
		tipo	(%) substituição	Finura (cm ² /g)
REF	0,50	-	-	-
E330	0,50	EAF	30	3000
E355	0,50	EAF	55	3000
E370	0,50	EAF	70	3000
E630	0,50	EAF	30	6000
E655	0,50	EAF	55	6000
E670	0,50	EAF	70	6000
E830	0,50	EAF	30	8000
E855	0,50	EAF	55	8000
E870	0,50	EAF	70	8000
SA 5	0,50	SA	5	250.000
SA 10	0,50	SA	10	250.000

1.8.1 Caracterização do ensaio de penetração de cloretos por aspensão de nitrato de prata (EPCANP)

Wee et al. (2000) mediram a profundidade da penetração de cloretos das amostras ensaiadas segundo a norma AASHTO T259, nos períodos de 7, 14, 28, 56 e 90 dias, para os concretos de referência e os concretos compostos com EAF e SA . Os valores de K, índice que representa a penetração de cloretos do (EPCANP), foram determinados através da equação proposta por BAKKER (1988):

$$X = a + K\sqrt{t}$$

onde: X : representa a profundidade de penetração de cloretos em mm;

t: representa o tempo de imersão no tanque com solução de cloretos;

a: representa o ponto de intersecção da equação com o eixo y, este apresentou valores muito pequenos em relação ao K, então foi desconsiderado.

Relataram que os resultados referentes ao coeficiente K da pesquisa demonstraram resistências superiores das amostras compostas com EAF, quando comparadas com a mistura de referência (0%) de adição.

Observaram, que em geral, para as misturas com determinadas proporções de EAF e respectivas finuras a magnitude de K decresceu com o aumento do período de cura. Notaram que o coeficiente K também diminuiu com o aumento das proporções e da finura das amostras de EAF.

Os resultados do EPCANP revelaram que a difusão dos cloretos para o interior do concreto ocorreu através dos modos de transporte iônico e molecular.

Os autores notaram que as misturas contendo adições minerais, devido às reações pozolânicas, apresentaram resistências à penetração de cloretos superiores à mistura de referência, em consequência do desenvolvimento de um poro estrutura mais densa. Como declarou Mehta (1994), devido à reação pozolânica, o precipitado de hidróxido de cálcio transformar-se-á em gel C-S-H., resultando em um refinamento da poro estrutura.

Perceberam ainda a redução acentuada no conteúdo de hidróxido de cálcio na pasta hidratada, ocasionada pela reação pozolânica, e que os volumes dos poros capilares contínuos foram proporcionalmente reduzidos. Como resultado, a microestrutura das amostras compostas por adições minerais tornaram-se mais densas, tortuosas, e descontínuas, quando comparadas com a mistura de referência, em idades similares. Essas modificações na microestrutura ocasionaram aumento na resistência à penetração de cloretos das misturas minerais.

Seus resultados referentes, ao ensaio descrito pela ASTM C1202 (TRPC), mostraram que as misturas constituídas de 70% de EAF apresentaram, independente da finura, cargas passantes bem inferiores à mistura de referência. Este fato foi também observado na magnitude do coeficiente K, em relação ao K da referida amostra de referência, o que indicou uma tendência similar de K e da carga passante para esta amostra. Relataram que, especialmente para as misturas contendo adições minerais, a correlação entre a carga passante (TRPC) e a permeabilidade a cloretos (EPCANP) torna-se mais complexa devido à adição de variáveis como a condutividade dos fluidos dos poros e as características da microestrutura do concreto. Por esta razão, afirmaram que para as amostras de concreto contendo adições minerais, os dados obtidos pelo TRPC não são válidos para a avaliação correta da penetração de cloretos.

Geiker (1990 *apud* WEE et al., 2000), em sua pesquisa sobre a determinação da penetração de cloretos em misturas com ou sem adições minerais, afirmou que a carga

passante total de misturas contendo EAF mostrou-se estar relacionada com a condutividade do fluido presente na matriz endurecida, o que complica a correlação entre a penetração de cloretos e à carga passante total das misturas contendo EAF. Há um consenso geral, afirma o autor, de que os dados obtidos pelo TRPC refletem a resistividade elétrica do concreto no lugar da resistência à penetração de cloretos e, como declaram Wee et al. (2000), esta relação tem se mostrado válida somente para argamassas e concretos produzidos sem adições.

Visando a quantificação do tipo e natureza da interdependência entre as 3 propriedades referentes ao K, carga passante e resistividade elétrica, Wee et al. (2000) desenvolveram gráficos destes inter-relacionamentos.

Compararam as propriedades de K, carga passante através da análise das misturas dos concretos de referência e dos concretos compostos com adições minerais. Observaram, para a mistura de referência, uma redução no coeficiente K e na carga passante devido à extensão do tempo de cura (3, 7, 28 dias).

Analisaram as tendências seguidas por K e a carga passante, através da definição de 2 fatores nomeados $K_{opc/ma}$ e $C_{opc/ms}$. O fator $K_{opc/ma}$ foi definido, pelos autores, como a taxa de valor K da mistura composta com adição mineral. Do mesmo modo, o fator $C_{opc/ms}$ foi definido pelo quociente da carga passante da mistura de referência pela carga passante da mistura composta por adições minerais. Da análise destes, afirmaram que para uma dada proporção, finura e respectivo tempo de cura (3, 7, 28 dias) $K_{opc/ms}$ seguiu duas diferentes tendências. Ele permaneceu praticamente inalterado, ou seu acréscimo com o período de cura foi menor que a amostra de referência. Por outro lado, o $C_{ops/ms}$ aumentou (maior carga passante da amostra de controle) ou decresceu (com o período de cura) com a superior carga passante das misturas minerais em relação à amostra de controle.

1.8.2 Correlação entre o coeficiente K e a carga passante

Wee et al. (2000) observaram que, para os concretos compostos por misturas minerais, o coeficiente K e a carga passante seguiram diferentes tendências (Figura 1.8). Isto é indicado pelo baixo índice do coeficiente de determinação R^2 (0,63 e 0,32) para as misturas de escória de alto forno e sílica ativa, respectivamente. Tal dado confirma que, nos concretos compostos por adições minerais diferentes mecanismos controlam o transporte iônico.

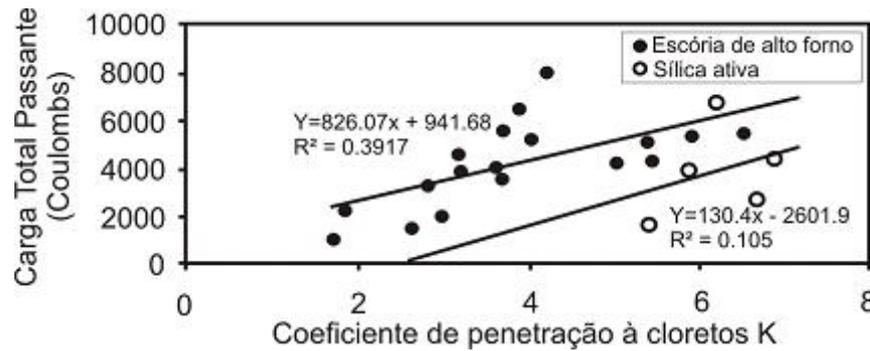


Figura 1.8 – Gráfico da correlação entre a carga passante e o coeficiente K. (WEE et al., 2000).

1.8.3 Correlação entre a carga passante e a resistividade elétrica

Wee et al. (2000) estudaram a correlação existente entre a carga passante e a resistividade elétrica das misturas de EAF e SA. Observaram que a carga passante decresceu exponencialmente com o acréscimo da resistividade elétrica. Encontraram relação inversa entre a carga passante e a resistividade elétrica do concreto. Relataram que a resistividade de uma mistura, contendo 70% de escória de alto forno, com finura $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ e curada por 7 e 28 dias, aumentou com o aumento de sua finura de 6000 para $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$, enquanto a carga passante decresceu nestas mesmas proporções. Os valores de R^2 do gráfico (Figura 1.9), indicaram uma boa correlação entre estas duas propriedades.

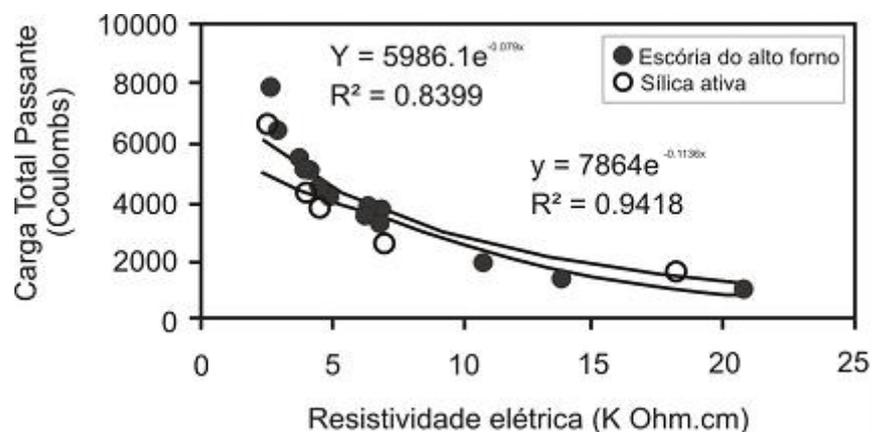


Figura 1.9 – Gráfico da correlação entre a carga passante e a resistividade elétrica aparente (WEE et al., 2000).

1.8.4 Correlação entre o coeficiente K e a resistividade elétrica aparente

Wee et al. (2000) mostram, na Figura 1.10, o inter-relacionamento existente entre o coeficiente K e a resistividade elétrica das misturas compostas por EAF e SA. Esta indicou que as duas misturas possuem propriedades controladas por diferentes fatores. O K primordialmente dependeu da microestrutura e da relativa da mudança ocorrida na mesma, por exemplo, na fixação de cloretos, enquanto a resistividade, similar à carga passante, dependeu da condutibilidade da solução dos fluidos dos poros do concreto. Deste modo, afirmam os autores que, para os concretos contendo adições minerais, o TRPC deve ser utilizado como medida da condutibilidade do concreto em lugar das medidas de permeabilidade do mesmo.

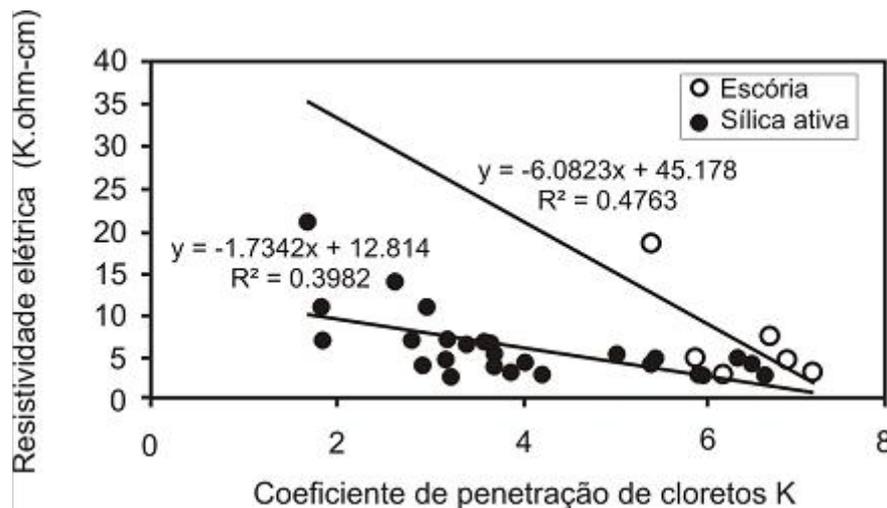


Figura 1.10 – Gráfico da correlação entre a resistividade elétrica e o coeficiente K. (WEE et al., 2000)

Wee et al. (2000) afirmam que a dependência dos resultados do TRPC sobre a condutibilidade dos fluidos dos poros é puramente propriedade deste e não tem relevância para a penetração de cloretos no concreto. Por este motivo, para concretos contendo adições minerais, a interpretação da penetração de cloretos pelos resultados do TRPC torna-se irreal.

1.8.5 Correlação entre a resistência à compressão e a carga passante

Wee et al. (2000) observaram que para a mistura de referência, a resistência à compressão aumentou com o aumento do período de cura, porém o ganho de resistência, acima de 28 dias, foi irrisório. Para as misturas contendo 30% de EAF, a resistência à compressão inicial de 3 dias esteve inferior à mistura de referência. Com o prolongamento da cura para 28 dias, ocorreu uma aproximação desta em relação à mistura de referência. Os resultados também demonstraram uma dependência da RC em relação a variações da finura das misturas analisadas. As comparações dos dados da carga passantes e da resistência à compressão sugeriram uma relação inversa entre elas. Esta interdependência entre ambas propriedades é demonstrada através da Figura 1.11.

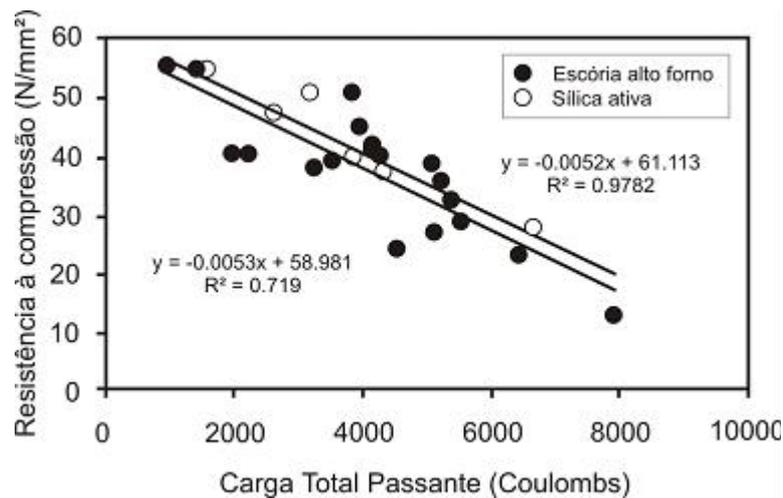


Figura 1.11 – Gráfico da correlação entre a resistência à compressão e a carga total passante (WEE et al., 2000).

Da análise da Figura 1.11 fica claro o acréscimo linear da RC com o decréscimo da carga passante total. Fato também observado por outros autores como Isaia (1995), Cervo (2001), Gomes (2003).

1.8.6 Mecanismo de transporte iônico durante o TRPC (ASTM C 1202)

Wee et al. (2000), em seus estudos sobre o mecanismo de transporte iônico, afirmam que a condutividade do fluido dos poros é, em troca, governada pela concentração de vários íons dissolvidos nele. Relataram que os principais íons que podem participar do processo de condução eletrolítica são Na^+ , K^+ , e OH^- . Observaram também que, durante o TRPC, além da condução eletrolítica dada pelos íons cloreto presentes, no reservatório negativo da célula, os íons presentes nos fluidos dos poros (Na^+ , K^+ , e OH^-) participam também do processo de migração iônica. Quando comparada com a condutividade iônica dos íons cloreto, a condutividade de Na^+ , K^+ , em meio aquoso, foi considerada baixa. O papel dos íons Ca^{++} , durante o processo de migração, é considerado pequeno, devido à presença em baixa concentração no fluido dos poros, e devido também ao seu raio relativamente grande, quando comparado com outros íons. A sua carga, transportada durante o TRPC, é descrita pelo autor como pequena.

Quanto aos íons OH^- , (Andrade, 1993 *apud* WEE et al., 2000) relata que estes são responsáveis pelo transporte de uma significativa quantidade de carga durante o TRPC, por causa de sua alta condutividade iônica, em relação aos outros íons presentes nos fluidos dos poros Na^+ , K^+ e Ca^{++} . Wee et al. (2000) observaram que, para um dado conteúdo de álcali, o aumento do percentual de substituição de CP por SA ou EAF acarretou diminuição nos valores do pH, sendo este efeito mais acentuado para a SA devido à sua maior atividade pozolânica.

A concentração de íons OH^- na solução dos poros depende do conteúdo de cimento da mistura e do conteúdo álcali metal do cimento usado, assim como do tipo e da proporção da adição mineral presente na mistura. Hibbert (*apud* WEE et al., 2000) relata que, para um dado conteúdo álcali, o aumento da porcentagem de substituição de CP por SA ou EAF acarreta uma diminuição nos valores do pH, sendo que o efeito da substituição é mais acentuado para os concretos compostos com SA, devido à intensa reação pozolânica. Além disso, durante o TRPC o pH do fluido dos poros influencia a carga passante total dos concretos compostos com SA e EAF. A influência do pH sobre a carga passante é governada por um regime de cura nos quais os íons OH^- constituem puramente a propriedade do TRPC e não têm ligação direta com a permeabilidade das misturas de concreto.

Observa-se, por fim, nos estudos realizados por Wee et al. (2000), que a extensão do período de cura de 3 para 28 dias resultou em uma grande redução na magnitude da carga

passante, comparada com a correspondente redução na magnitude de K . A prévia observação sugere uma grande dependência da carga passante sobre as mudanças causadas pelo prolongamento da cura do concreto. Estas mudanças foram a diminuição dos íons OH^- da solução dos poros e o aumento da descontinuidade e tortuosidade da estrutura dos poros, tornando a estrutura do concreto mais densa, aumentando sua resistividade elétrica. Como a resistividade elétrica é inversamente proporcional a passagem da corrente, notou-se que este processo tornou o concreto mais resistente à penetração de cloretos, mais durável.

CAPÍTULO II

A CINZA DE CASCA DE ARROZ NO CONCRETO

2.1 Considerações iniciais

Atualmente é crescente a cobrança aos pesquisadores da construção civil, do desenvolvimento de novos materiais que atendam basicamente a requisitos de durabilidade, economia e proteção ambiental. Deste modo, inúmeras pesquisas são desenvolvidas na busca de novas tecnologias e procedimentos que sirvam de auxílio para o desenvolvimento destes novos e promissores materiais ecologicamente corretos.

O uso de subprodutos agrícola e industrial surge como uma alternativa benéfica para o que pode ser denominado de engenharia sustentável.

Alguns autores, Basheer (2002), Polder (2002), entre outros, demonstram em seus estudos que é possível utilizar produtos econômica e ecologicamente viáveis, em substituição aos materiais convencionais utilizados atualmente. O uso de resíduos, gerados pela queima de carvão em uma termoelétrica ou pela queima da casca de arroz, apresentam-se como ótimas alternativas para a o uso na construção civil. A utilização destes materiais, além de substituir minerais não renováveis, surge como solução para o consumo destes rejeitos, agrícolas ou industriais, que se acumulam cada vez mais, sendo lançados de forma desordenada em aterros, ou mesmo abandonados ao longo de estradas e rodovias, ocasionando sérios problemas de ordem ambiental (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Foto de um depósito de cinza de casca de arroz a céu aberto.

O arroz é considerado o cereal mais cultivado no mundo. Dados da FAO – “Food and Agriculture Organization” – estimam que sua produção mundial para o ano de 2004 será da ordem de 612,8 milhões de toneladas, sendo que o Brasil encontra-se na 9º posição em produção deste cereal, com uma produção estimada de 12,5 milhões de toneladas para o ano de 2004 (Figura 2.2).

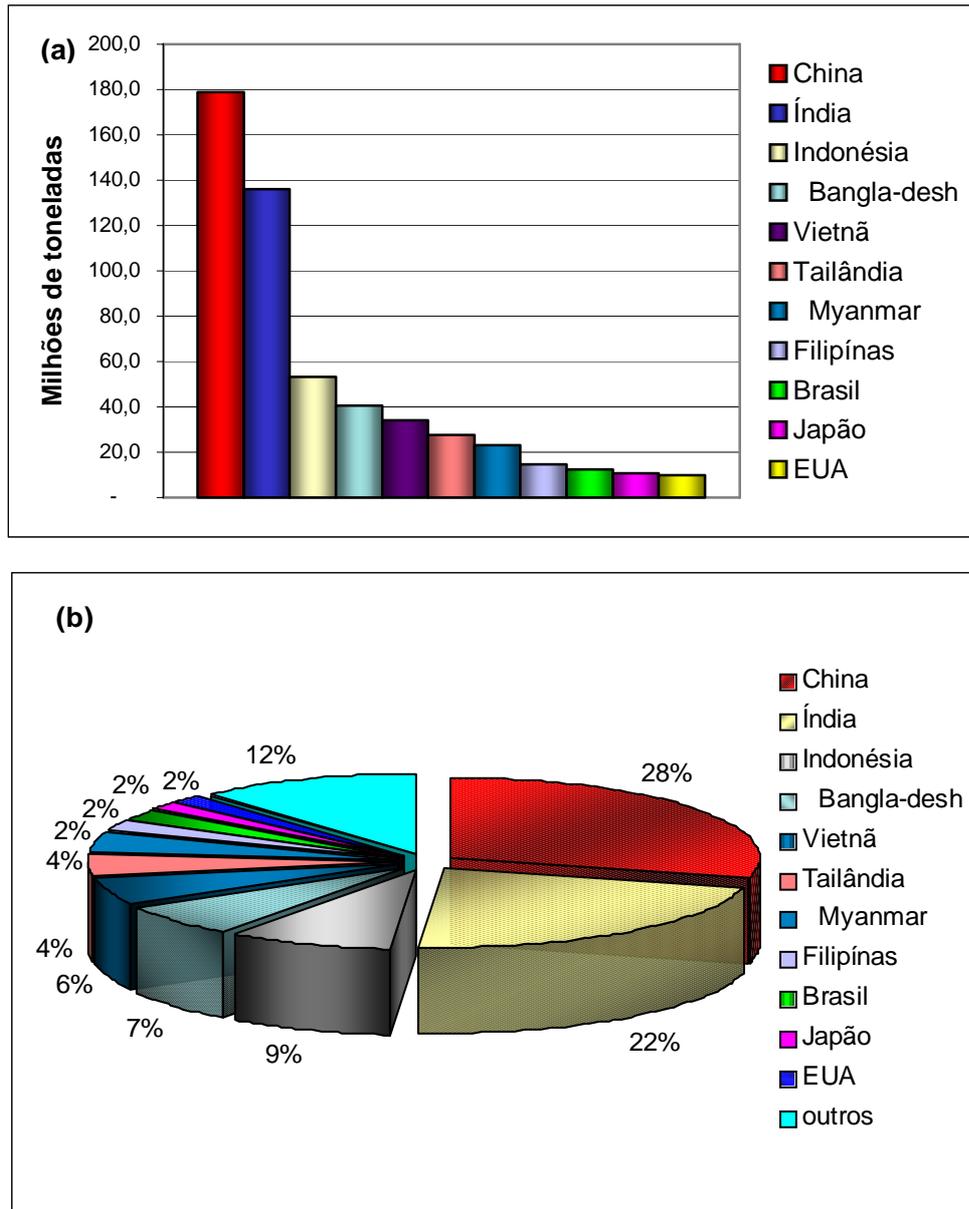


Figura 2.2 – (a) Principais produtores mundiais de arroz e (b) porcentagens de participação na produção total.

Fonte: FAO (2004) – Food and Agriculture Organization (<http://www.fao.org>)

A América do sul detém uma fatia de 3,5% da produção mundial, sendo o Brasil o maior produtor com participação de 57% (Figura 2.3).

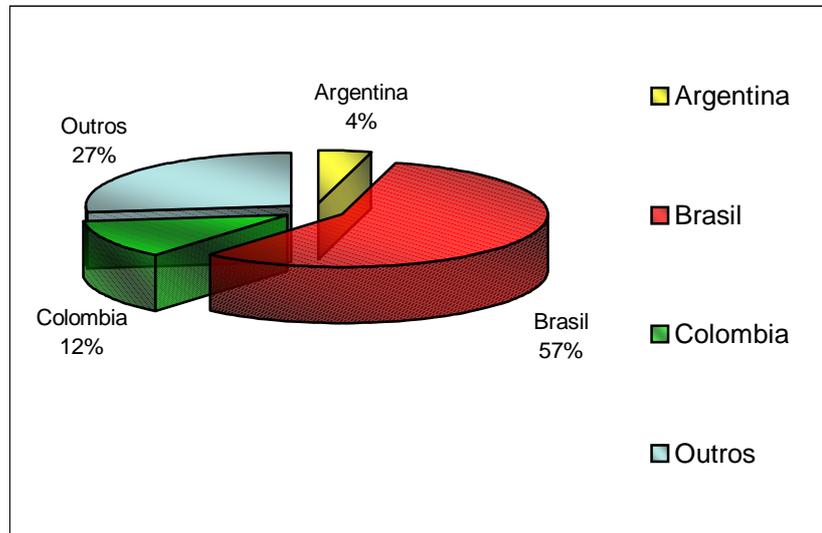


Figura 2.3 – Percentuais de participação na produção de arroz na América do Sul.

Fonte: FAO (2004) – Food and Agriculture Organization. www.fao.org

No Brasil, o estado do Rio Grande do Sul é considerado um dos maiores produtores nacionais de arroz, com participação de aproximadamente 47% da produção nacional, com estimativa de colheita de 5,73 milhões de toneladas (IBGE, 2004).

Segundo Mehta (1992), cada tonelada de arroz produz cerca de 200 kg de casca, resultando em aproximadamente 40 kg de cinza, ou seja, 20% da casca, quando sofre combustão, é convertida em cinza. Portanto, se tomarmos por base a projeção de produção de arroz do estado do Rio Grande do Sul, que é de aproximadamente 5,73 milhões de toneladas, teremos cerca de 1,73 milhões de toneladas de resíduos (casca) oriundos somente desta safra de 2004.

Desta maneira, é válida a soma de esforços para o aproveitamento de pelo menos parte destes resíduos, de modo a diminuirmos este sério problema ambiental gerado.

Na busca desta conscientização, vários são os trabalhos que investigaram a utilização da cinza de casca de arroz como adição ao cimento no concreto, entre eles podemos citar, Santos (1988), Isaia (1995), Silveira (1996), Bretanha (2000), Rego (2001), Gastaldini (2001), Hasparyck (2003).

O alto custo do processo controlado da queima da casca de arroz tem dificultado a utilização da CCA de arroz como adição mineral. Portanto, ocorre hoje um distanciamento

muito grande entre os resultados das pesquisas, que demonstram o seu grande potencial como adição mineral, e a sua utilização no mercado da construção civil. Porém o aumento cada vez mais acentuado dos resíduos poluentes gerados e a necessidade de reciclagem dos mesmos tornarão, num futuro muito próximo, a utilização destes subprodutos obrigatória, como alternativa de desenvolvimento de uma engenharia mais voltada para o meio ambiente, conservadora do mesmo e sustentável.

2.2 Características da cinza de casca de arroz

Mehta (1992) define a casca de arroz como sendo uma capa lenhosa do grão, dura, composta com alto teor de sílica, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra. Após a queima, a lignina e a celulose podem ser removidas resultando em uma estrutura celular porosa como podemos observar na Figura 2.4.

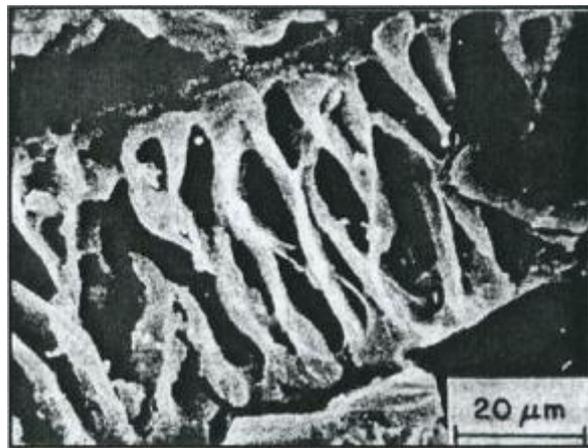


Figura 2.4 – Micrografia da cinza de casca de arroz (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.300).

Se queimada parcialmente, a casca de arroz gera uma cinza com certo teor de carbono, possuindo, assim, a cor preta. Quando totalmente queimada resulta em uma cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das condições impostas na sua queima.

O termo pozolana, segundo a NBR 12653 (1992), é definido como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante mas, quando finamente dividido e

na presença de água, reage com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, para formar compostos de propriedades aglomerantes.

As adições minerais são materiais que possuem propriedades pozolânicas e ou cimentíceas, são adicionadas ao concreto em quantidades que variam geralmente entre 5 e 70% de massa de cimento (REGO, 2001).

Mehta (1992) relata que as adições minerais cimentantes e ou cimentíceas, como exemplo a escória de alto-forno possuem composição química contendo principalmente cálcio, magnésio alumínio e sílica. As cinzas volantes possuem em sua composição na maior parte vidro de silicato contendo principalmente cálcio, magnésio alumínio e álcalis. A cinza de casca de arroz é essencialmente constituída de sílica na forma não cristalina e é classificada como uma pozolana altamente reativa. Relata também em seus estudos que a CCA é extremamente atrativa, como material aglomerante complementar. O autor destaca também que a CCA obtida através da queima controlada da casca, tem, no concreto o seu uso mais nobre.

Mehta (1992) relata em seus estudos que a CCA é extremamente atrativa, como material aglomerante complementar. O autor destaca também que a CCA obtida através da queima controlada da casca, tem, no concreto o seu uso mais nobre, pois se destaca como uma pozolana altamente reativa.

2.3 Influência do tipo de queima e do tempo de moagem nas propriedades da CCA

Calleja (1983), Guedert (1989), Farias & Racena (1990), Santos (1998), Bouzoubaâ et al. (2001), entre outros, estudaram a influência do tempo de moagem e da temperatura de queima da CCA na melhoria das propriedades da mesma e também do concreto.

Calleja (1983) afirma que o grau de moagem é um fator importante no uso da CCA, pois o tempo de moagem relaciona-se diretamente com a finura da cinza, e esta influencia em variáveis importantes para o concreto, como a relação a/ag e a retenção de água pelo concreto. Este fato foi observado também por Farias e Racena (1990), os quais afirmam em seus estudos que a finura, a densidade e a forma das partículas influenciam diretamente a na trabalhabilidade, na retenção de água pelo concreto e na incorporação de areia na argamassa.

Santos (1998), por sua vez, comparou o desempenho da pozolanicidade, em argamassas de misturas compostas com CV e CCA (gerada sem controle de temperatura). A

autora realizou também um estudo da atividade pozolânica dos materiais para diferentes tempos de moagem. Observou que a atividade pozolânica está diretamente ligada ao tempo de moagem. Quanto maior o tempo de moagem, maior a reatividade da CCA, independente do processo de geração da cinza, com ou sem controle de temperatura.

Por seu turno, Bouzooubaa (2001) investigou o tempo ideal de moagem da CCA, utilizando CCA indiana, queimada em forno industrial. Para isto, o autor usou um moinho de bolas com capacidade de 30 gramas. As amostras foram coletadas e analisadas após 80s, 140s e 200s. Foram avaliados também a retenção de água e o índice de atividade pozolânica. A Figura 2.5 mostra as mudanças no tamanho e distribuição das partículas depois de 200s de moagem. Observa-se que o tamanho das partículas decresceu com o acréscimo do tempo de moagem. O tamanho médio das partículas diminuiu de $40.0\mu\text{m}$ para $8.3\mu\text{m}$ e $7.5\mu\text{m}$, depois de 140 e 200 segundos de moagem, respectivamente. O decréscimo do tamanho das partículas foi mais significativo durante os 140s de moagem iniciais. Após este período, as maiorias das partículas maiores sofreram reduções de tamanho de forma a apresentarem tamanhos inferiores a $45\mu\text{m}$. Assim, 55% das partículas apresentaram tamanhos menores que $10\mu\text{m}$. O aumento adicional no tempo de moagem apresentou-se menos efetivo no acréscimo da finura das partículas.

A Tabela 2.1 mostra o efeito da moagem da CCA sobre suas propriedades físicas. (BOUZOUBAÂ et al., 2001).

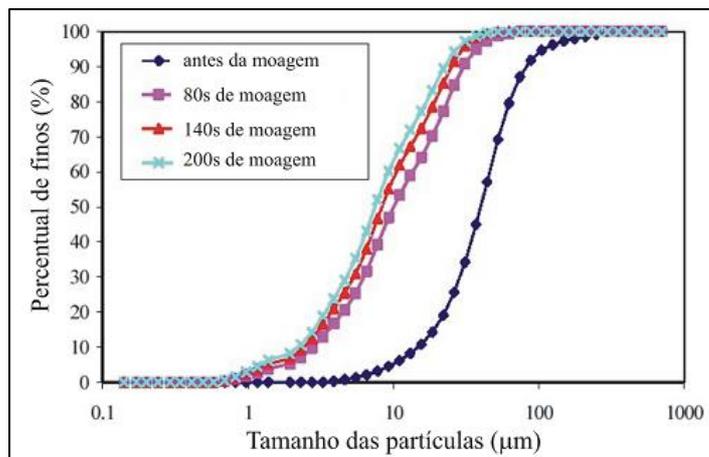


Figura 2.5 – Curva da distribuição do tamanho das partículas da CCA de acordo com o tempo de moagem (BOUZOUBAÂ et al., 2001)

Tabela 2.1 – Efeito da moagem da CCA sobre suas propriedades físicas (BOUZOUBAÂ et al., 2001).

Distribuição do tamanho médio partículas (μm)	antes da moagem	40
	após 80 segundos	10
	após 140 segundos	8
	após 200 segundos	7,5
Consumo de Água (%)	antes da moagem	116
	após 80 segundos	101
	após 140 segundos	104
	após 200 segundos	104
Índice de atividade pozolânica, 7 dias (%)	antes da moagem	71
	após 80 segundos	96
	após 140 segundos	99
	após 200 segundos	101

Bouzooubaâ et al. (2001) afirmam, em suas pesquisas, que a retenção de água da argamassa utilizada para a determinação da atividade pozolânica decresceu após 80s de moagem e isto foi devido à quebra das partículas porosas e, conseqüentemente, à diminuição da absorção de água por essas partículas. A retenção de água das argamassas, produzidas com CCA moídas por 140s, aumentou devido ao acréscimo da finura da CCA. O aumento no tempo de moagem, além de 140s, não alterou a retenção de água da CCA analisada (Tabela 2.1). O autor relata que a CCA deve ser moída por um tempo máximo de 140 segundos, obtendo-se um tamanho de partícula médio de $8\mu\text{m}$, retenção de água de 104% e índice de atividade pozolânica de 100%, aproximadamente.

Outro fator importante para a utilização da CCA é o controle da temperatura de queima. Este governa o teor de sílica amorfa e, por conseguinte, a atividade pozolânica. Porém, como relata Santos (1998), cada pesquisa apresenta um tempo de moagem e uma temperatura de queima, fato este determinado pelas condições de trabalho impostas no momento de seu desenvolvimento (equipamentos disponíveis, condições de ensaio etc.).

Isaia (1995) cita, em sua pesquisa, vários autores que estudaram a influência da temperatura de queima da casca de arroz nas suas propriedades físicas e mecânicas:

- Hwang e Wu (1989) descrevem as propriedades físicas e mecânicas das pastas e argamassas de cimento compostas com CCA e queimadas em temperaturas entre 400°C e 1200°C;
- Boateng e Skeete (1990) afirmam que a temperatura de queima deve manter-se entre 800°C e 900°C para a CCA apresentar-se amorfa e reativa;
- Sugita et al. (1993) estudaram a influência da temperatura de queima no índice de atividade pozolânica. Seus resultados mostraram um índice máximo de atividade pozolânica para temperaturas superiores a 500°C e inferiores a 600°C, por um tempo de queima não superior a 60 minutos.

Ferreira (1996) estudou amostras de CCA queimadas a 800°C e 1000°C e moídas em tempos de 1,5 e 3 horas. Seus resultados mostraram influência da temperatura de queima no diâmetro médio, na superfície específica e na atividade pozolânica da cinza de casca de arroz com o cimento Portland. Estudos deste autor, realizados através de micrografias obtidas por microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários, revelaram significativas diferenças na microestrutura de cinzas queimadas a temperaturas distintas. Seus resultados mostraram que cinzas queimadas a temperaturas inferiores a 800°C apresentam uma estrutura mais porosa, enquanto a temperaturas na faixa de 800°C a 1100°C apresentam uma estrutura mais densa, compacta.

Bartha et al. (1977 *apud* POUHEY, 2004) relataram em suas pesquisas que a queima da CCA, em temperaturas de até 500°C, gera como resíduo uma cinza preta, rica em carbonos fixos, e constituída basicamente de sílica amorfa.

Mazlum (1992 *apud* BOUZOUBAÂ, 2001) afirma que a queima da casca de arroz a 600°C produz uma cinza com uma composição pozolânica ótima. Abaixo desta temperatura, a sílica formada é de natureza pozolânica e, acima desta temperatura, a sílica muda parcialmente para cristobalita, quartzo e tridimita, os quais requerem uma moagem muito fina para adquirir pozolanicidade.

Observou-se, assim, consenso comum entre os autores a respeito do aparecimento de fases cristalinas na sílica contida na CCA, em temperaturas elevadas. Notou-se também a influência das temperaturas de queima da CCA em suas propriedades físicas, no que se refere a sua finura e área superficial.

2.4 Influência da cinza de casca de arroz na resistência à compressão

Os benefícios da utilização da CCA em substituição ao cimento no concreto foi objeto de estudo de inúmeros pesquisadores, tanto no Brasil como no exterior. Vários autores, Bouzoubaâ et al. (2001), Silva (2003), Feng et al. (2003), entre outros, destacam que a CCA propicia melhorias não somente na resistência à compressão, mas na maioria das propriedades ligadas à durabilidade do concreto.

Exceto a cinza de casca de arroz, nenhum outro material pozolânico, incluindo a microssílica, possui a propriedade de contribuir para a resistência do concreto nas idades iniciais de 1 a 3 dias. Isto abre portas para o uso de cinza volante e outras pozolanas, juntamente com a cinza de casca de arroz, atuando esta última como acelerador da resistência (MEHTA, 1992 *apud* ISAIA, 1995, p. 418).

Silva (2003) estudou a influência da utilização da CCA, em níveis de substituição ao cimento no concreto de 5%, 10% e 20%, e adotou em sua pesquisa a relação a/ag 0,35. A CCA pesquisada foi obtida da indústria de beneficiamento de arroz, sem controle de temperatura, moída por 3 a 5 horas em um moinho de bolas. O autor avaliou a resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 63 dias. Constatou aumentos nas resistências aos 7 dias, em relação à mistura de referência das misturas compostas com 5% e 10% de CCA, de 6,3% e 1,4%, respectivamente. Para a mistura composta com 20% de CCA, foi observada redução na resistência, em relação à mistura de referência de 6,2%. Aos 28 dias, todos os níveis de substituição mostraram acréscimos nas resistências. Observou aumentos nas resistências para as misturas com 5%, 10%, 20% de CCA, em relação aos 7 dias, de 15,4%, 18,43% e 25,69%, respectivamente. Aos 63 dias, igualmente ocorreram aumentos de 5,67%, 8,90% e 2,37% para as misturas com 5%, 10% e 20% de CCA. Concluiu que os resultados dos ensaios de resistência à compressão indicaram que os concretos produzidos com a CCA sem controle de temperatura possuem um potencial favorável para a sua utilização na produção de concretos de alto desempenho.

Zhang e Malhotra (1996) por sua vez, pesquisaram a influência da utilização da CCA como material cimentício adicional no concreto. Usaram em suas pesquisas concretos com níveis de substituição do cimento pela CCA de 5%, 8%, 10% e 15%. A CCA utilizada foi oriunda de um processo de queima controlado, com temperaturas não ultrapassando os 800°C, sendo esta queima efetuada em poucos minutos. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 1, 3, 7, 28 e 90 dias, sendo adotada relação a/ag 0,40. Os resultados são apresentados na Figura 2.6.

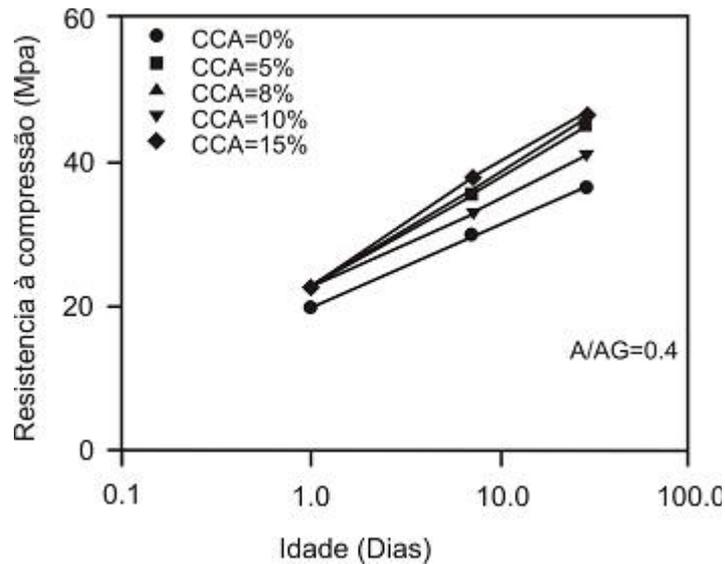


Figura 2.6 – Desenvolvimento da resistência à compressão de concretos com diferentes porcentagens de substituição de CCA e relação a/ag = 0,40 (ZHANG e MALHOTRA, 1996)

Observa-se, na Figura 2.6, a importância do tempo de cura para o desenvolvimento das resistências das amostras estudadas. Os autores também estudaram a influência da relação a/ag no desenvolvimento de resistências à compressão de amostras compostas com 10% de CCA. Os resultados mostraram acréscimo nas resistências das amostras, com o decréscimo da relação a/ag, como o esperado.

Ismail et al. (1996) estudaram a influência da utilização da CCA, em níveis de substituição ao cimento no concreto de 10%, 20% e 30%. Foi pesquisado também o efeito do aumento da finura da CCA na resistência à compressão. A CCA sofreu processo de queima por 24 horas a uma temperatura de 400°C a 700°C, posteriormente a mesma foi moída em um moinho de bolas e peneirada até passar nas peneiras 200 e 325 (peneiras adotadas no estudo). Os resultados são mostrados na Figura 2.7. Observaram acréscimos com o aumento na finura, para as misturas com 10%, 20% e 30%, de 1,70%, 24,41% e 26,91%, aos 3 dias; 8,19%, 16,42%, 23,88% aos 7 dias; 4,08%, 18,37%, 24,28% aos 28 dias e 1,79%, 18,34% e 32,78% aos 150 dias, respectivamente. De modo geral, os resultados refletiram a influência do aumento da finura, sendo esta mais acentuada para as misturas compostas com níveis de substituição mais elevados.

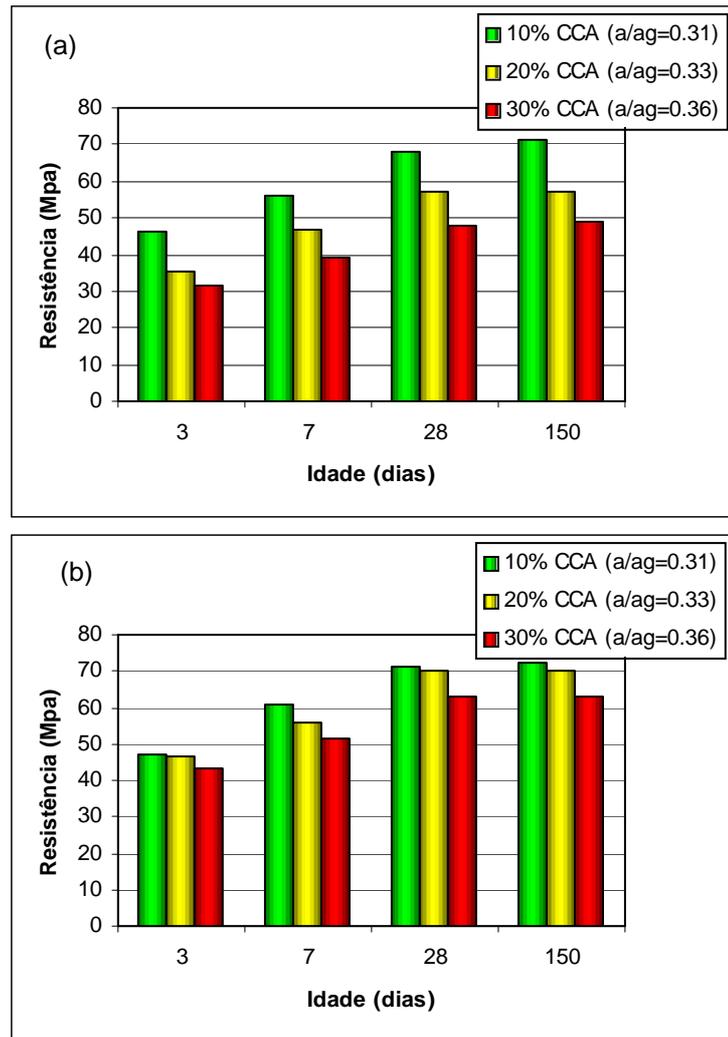


Figura 2.7 – (a) Resistências à compressão das amostras compostas com CCA passantes na peneira 200. (b) Resistências à compressão das amostras compostas com CCA passantes na peneira 325 (ISMAIL et al., 1996)

Feng et al. (2003) investigaram a eficiência da utilização da CCA sobre a resistência à compressão no concreto. Em seus estudos, foi utilizada CCA produzida através de queima controlada em forno comercial. Foram adotadas em sua pesquisa relações a/ag 0,30, 0,45 e 0,55 e níveis de substituição de cimento por CCA de 10%, 20% e 30%, com ensaios realizados aos 3, 7, 28 e 91 dias.

Seus resultados indicaram acréscimos nas resistências com o aumento dos teores de substituição de cimento por CCA. Os concretos moldados com relação a/ag 0,35 contendo 0%, 10%, 20% e 30%, aos 28 dias, apresentaram resistências de 51,2 MPa, 66,2 MPa, 75,2 MPa e 82,2 MPa, respectivamente, sendo estes resultados 29% a 61% maiores que os resultados da amostra de controle (0%) de adição. Foram constatados também acréscimos da resistência à compressão com o aumento do tempo de cura. Amostras compostas com os

mesmos teores relatados anteriormente, porém com relações a/ag 0,30 e 0,45, seguiram as mesmas tendências anteriores.

Gomes (2003), por sua vez, investigou a influência de ativadores químicos, Na_2SO_4 , K_2SO_4 e Na_2SO_3 , na resistência à compressão, em misturas binárias e ternárias de cinza de casca de arroz. As misturas binárias foram compostas com 20% de CCA e as ternárias de 20% CCA e 50% EAF. Adotou relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65 e realizou ensaios aos 7, 28 e 91 dias. Observou que, das misturas binárias estudadas sem os ativadores, apenas a constituída com 20% de CCA apresentou índice médio de resistência, (média aritmética das relações entre a resistência de uma mistura e a resistência da mistura de referência para cada relação água/aglomerante), superior à mistura de referência aos 28 e 91 dias. As misturas compostas com 20% de CCA ativadas, independentemente do tipo de ativador, apresentaram índices médios de resistência à compressão superior ao da mistura de referência. Para estas misturas, os melhores resultados foram obtidos com a utilização de 1% de K_2SO_4 . Constatou ganhos de resistência à compressão nas misturas ternárias de 41,8%, 68,3% e 77,3% para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, com a variação da idade de ensaio de 7 para 91 dias, respectivamente. Na mistura composta com (20%), de CCA observou ganhos de 58,9%, 48,1% e 89,8% para estas mesmas relações a/ag e idades de ensaio.

Já Bouzoubaâ et al. (2001) estudaram a resistência à compressão de concretos compostos com CCA, em níveis de substituição ao cimento de 7,5%, 10% e 12,5% e relações a/ag = 0,4. Os autores também pesquisaram a influência da utilização do ar incorporado em índices de $6 \pm 1\%$, bem como a ação da cura na resistência à compressão.

Os pesquisadores observaram influência do tempo de cura no acréscimo das resistências das misturas analisadas, assim como na superioridade dos resultados encontrados nas amostras curadas com cura úmida (100% U.R, $23 \pm 2^\circ\text{C}$), sobre as amostras curadas com cura ao ar (50% U.R, $23 \pm 2^\circ\text{C}$). Foi notada também a influência do ar incorporado na redução da resistência à compressão: para cada 1% de ar incorporado adicionado, observaram-se reduções aproximadas de 4% e 2,5% para os concretos de referência e para os concretos compostos com CCA, respectivamente.

Sensale (2001) estudou a influência da CCA, com e sem controle da temperatura de queima, em teores de substituição de cimento de 10%, 15% e 20% na resistência à compressão. Adotou relações a/ag de 0,25, 0,28, 0,32 e 0,50 e realizou ensaios nas idades de 1, 7, 28, 63 e 91 dias. Foram utilizados 2 tempos de moagem distintos para a CCA: 2h e 15 min., para a CCA que sofreu processo de queima controlada, e 3h e 30 min. para a amostra

produzida sem o controle da temperatura de queima. Seus resultados mostraram que os concretos apresentaram elevações nas resistências à compressão com o aumento da idade de ensaio e a diminuição da relação a/ag. Com relação ao estudo dos tipos de CCA utilizados, a autora observou que a CCA residual apresentou desempenho muito bom, mostrando sua viabilidade para a utilização como material cimentício adicional.

Dalri (2002) investigou a influência da adição de cal hidratada em misturas binárias e ternárias compostas com CCA na resistência à compressão. Utilizou em seus estudos amostras de concreto moldadas com 3 relações a/g, 0,35, 0,45, 0,55, ensaiadas aos 28 e 91 dias. Observou, aos 28 dias de idade, que a mistura binária (50% CCA), confeccionada com adição de cal, apresentou valores de resistência à compressão superior àqueles da mistura de referência. Aos 91 dias, observou melhor desempenho para a mistura sem a adição de cal, com valores superiores à de referência. A mistura ternária (50%CV+20%CCA) com adição de cal apresentou, aos 28 e 91 dias, valores superiores àqueles da mesma mistura sem cal, embora inferiores àqueles da mistura de referência.

Já Pouey et al. (2002) estudaram o efeito da adição de CCA, de diferentes composições morfológicas, na resistência à compressão do concreto. Realizaram ensaios com 3 tipos de cinzas, uma amorfa, produzida por processo controlado de queima e duas residuais, com diferentes graus de cristalinidade. Verificaram a influência do tempo de moagem e da idade de ensaio, 7 e 28 dias. As amostras compostas com CCA apresentaram em sua composição 15% de EAF, 10% de CCA e 75% de CP, com relações a/ag = 0,39. Realizaram ainda estudo estatístico das variáveis analisadas. Observaram que as variáveis tipo de cinza, tempo de moagem e idade mostraram-se significativas. Quanto ao tempo de queima, observou-se que a cinza produzida por processo de queima controlada teve melhor desempenho que a cinza residual. A análise do tempo de moagem para ambas as amostras (amorfa) e (pouco cristalina) não se mostrou significativa.

Da bibliografia consultada, observa-se que os fatores: tempo de moagem, temperatura de queima e relação a/ag influenciam nas propriedades físicas e químicas relativas a CCA, que, por sua vez, influencia na melhoria das propriedades do concreto com ela produzidos. Nota-se também a influência do tempo de cura no desenvolvimento das resistências à compressão, mais acentuado em idades tardias. Este aumento na resistência à compressão das misturas compostas com CCA está relacionado com o efeito físico (filler) e químico devido à reação com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a subsequente produção de C-S-H.

2.5 Influência da cinza de casca de arroz na penetração de cloretos

Cook (1986), Zhang e Malhotra (1996), Bretanha (1999), Bouzoubaâ et al. (2001), entre outros, focalizaram em seus estudos a verificação da utilização da CCA no incremento de propriedades específicas ligadas à durabilidade.

Apesar de comprovadamente possível substituir mais de 70% do cimento do concreto por CCA, bastam 10% e 20% de substituição para que o concreto se beneficie com uma extraordinária redução da permeabilidade frente aos agentes agressivos (MEHTA et al., 1974 *apud* FAGURY, 2004).

O íon cloreto é um dos maiores causadores de danos no concreto. A penetração de cloretos é sem dúvidas o fenômeno mais devastador das estruturas de concreto. Estes íons podem penetrar nas soluções intersticiais reagindo com o C₃A do cimento Portland, formando monocloroaluminatos (3CaOAl₂O₃ CaCl₂ 10H₂O), que permitem modificar favoravelmente a microestrutura do concreto, ou, de forma mais devastadora, podem atingir as armaduras, promovendo um estado de corrosão intenso. Ocorre então o desenvolvimento de uma rede de microfissuras, a penetração de íons cloreto adicionais e termina pelo lascamento do cobrimento do concreto. Todo este processo é devido às forças expansivas resultantes da formação da ferrugem (DAFICO, 2001).

A proteção do concreto da ação dos íons cloreto passa pelos mecanismos que governam sua permeabilidade (CAPÍTULO I). Mehta (1983 *apud* ISAIA, 1995) afirma que a principal causa da maior resistência a cloretos é de origem física, pois as reações pozolânicas diminuem o teor de cal livre, por um lado, e ao mesmo tempo reduzem também a permeabilidade do concreto. Mehta & Malhotra (1994) afirmam que as adições minerais como a CCA, causam considerável refinamento dos poros, isto é, provocam a transformação de poros grandes em poros menores, processo que acarreta decréscimo substancial na permeabilidade do concreto e, por conseguinte, um aumento da durabilidade. Os benefícios da utilização da CCA no concreto, em substituição ao cimento, foram constatados por vários autores, citados a seguir.

Gomes (2003) avaliou a influência de ativadores químicos na resistência à penetração de cloretos e na resistência à compressão axial de misturas binárias e ternárias contendo cinza de casca de arroz, (20%CCA) e (50%EAF + 20%CCA). Utilizou relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 e realizou ensaios aos 28 e 91 dias. Observou excelente desempenho das misturas minerais quanto à penetração de cloretos. Notou que nas misturas sem ativadores, a composta com 70% de EA e a composta com 20% de CCA apresentaram melhor desempenho. Estas misturas tiveram reduções da carga passante em relação à mistura de referência de 58%, 71%,

74% (EA) e de 65%, 68% e 59%, respectivamente, para as relações 0,35, 0,50 e 0,65 aos 91 dias.

Já Mehta (1992) estudou a influência da utilização da CCA em percentuais de substituição ao cimento de 10%, 15% e 20%, com relações a/ag de 0,33, 0,31 e 0,30, respectivamente. Os ensaios de penetração de cloretos segundo a ASTM C 1202, realizados aos 28 dias, mostraram reduções na carga passante em relação ao traço de referência de 64%, 73% e 87%, para as amostras de (10%), (15%) e (20%), respectivamente. O aumento no tempo de cura para 1 ano acarretou diminuições ainda maiores na carga passante das misturas compostas com CCA. Observou-se decréscimos na carga passante das misturas 10A, 15A e 20A, em relação à mistura de referência, aos 365 dias, de 81%, 89% e 89% respectivamente.

Cervo (2001), por seu turno, verificou a influência do teor, 25% e 50%, e da finura da cinza de casca de arroz, $1300\text{m}^2/\text{g}$ e $1900\text{m}^2/\text{g}$, na penetração de cloretos. Realizou ensaios aos 28 e 91 dias e adotou relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65. Os resultados de seus estudos revelaram que, nas misturas compostas com CCA, o aumento nos percentuais de substituição de 25% para 50% conduziu a reduções na carga passante, para uma mesma finura $1300\text{m}^2/\text{g}$, de 33%, e em relação à mistura de referência de 25%. O aumento no teor de substituição de 25% a 50%, para a finura $1900\text{m}^2/\text{g}$, promoveu uma redução na carga passante de até 33% e, quando comparado à mistura de referência, de até 50%.

Bouzoubaa (2001) estudou o comportamento do ar incorporado na penetração de cloretos em concretos compostos com (7,5%, 10% e 12,5%) de CCA e (7,5) de SA, além da mistura de referência (0%) de adição. Adotou relação a/ag 0,4 e teor de ar incorporado de $6\pm 1\%$. Estas amostras sofreram dois processos de cura distintos, o primeiro de 28 dias de cura úmida ($23\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ e 100% U.R.) e o segundo de 3 dias de cura úmida, seguido de 25 dias de cura ao ar ($23\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ e 50% U.R.).

Os resultados dos ensaios de penetração de cloretos das amostras sem ar incorporado mostraram o desempenho superior da CCA e da sílica ativa. Para os concretos curados em cura úmida (28 dias 100% U.R.), a mistura de referência apresentou penetração aos íons cloreto de 2470 Coulombs, enquanto as misturas com (7,5% e 12,5%) de CCA apresentaram penetrações a cloreto de 600 a 1200 coulombs, respectivamente, e a sílica ativa apresentou 430 coulombs de penetração.

Gastaldini e Isaia (1999) estudaram a influência da utilização da CCA na penetração de cloretos, com teor de substituição de (50%) e relações a/ag 0,4 e 0,6. Seus resultados

indicaram decréscimos na carga passante, da mistura contendo CCA, de 8,3 a 16,7 vezes em relação à mistura de referência.

Nehdi et al.(2003) estudaram a influência da CCA, produzida a partir de uma nova tecnologia de combustão, na penetração de cloretos no concreto. Utilizaram CCA proveniente de um sistema no qual a casca de arroz sofreu processo de combustão em curto espaço de tempo, sendo suas partículas processadas através de jatos de ar produzidos por intermédio de turbinas de alta velocidade. Usaram amostras de concreto compostas com níveis de substituição de cinza de casca de arroz ao cimento de (7,5%), (10%) e (12,5%), e relação a/ag 0,40. Foram utilizadas CCA oriundas do Egito e dos Estados Unidos (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Dados das misturas de concreto NEHDI et al. (2003).

MISTURA	Cimento (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Temperatura de queima (°C)	Origem da cinza
Referência	380	-	-	-
EG-CCA 7,5% (A)	352	29	750	EGITO
EG-CCA 7,5% (B)	352	29	830	EGITO
EG-CCA 7,5% (C)	352	29	750 + AR	EGITO
EG-CCA 10% (A)	342	38	750	EGITO
EG-CCA 10% (B)	342	38	830	EGITO
EG-CCA 10% (C)	342	38	750 + AR	EGITO
EG-CCA 12,5% (A)	333	48	750	EGITO
EG-CCA 12,5% (B)	333	48	830	EGITO
EG-CCA 12,5% (C)	333	48	750 + AR	EGITO
US-CCA 7,5%	352	29	-	USA
US-CCA 10%	342	38	-	USA
US-CCA 12,5%	333	48	-	USA
US-CCA (in natura) 7,5%	352	29	-	USA
US-CCA (in natura) 10%	342	38	-	USA

Avaliaram a penetração de cloretos do concreto utilizando o ensaio descrito pela ASTM C 1202, aos 28 dias, cujos resultados são mostrados na Figura 2.8.

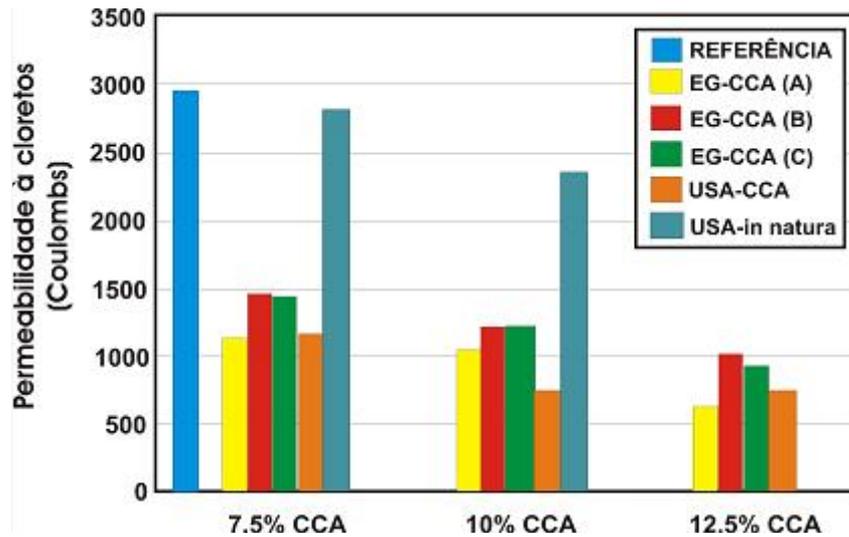


Figura 2.8 – Resultados do ensaio penetração de cloretos aos 28 dias (NEHDI, 2003)

Os autores constataram que a variação nas proporções de utilização da CCA não alterou significativamente a classificação quanto à penetração de cloretos das misturas, porém, o uso da CCA, finamente moída, reduziu a penetração de cloretos, conforme observa-se na Figura 2.8.

Castro (2004) estudou a influência da utilização da CCA, em nível de substituição de 10%, na durabilidade do concreto frente à ação dos íons cloreto. Confeccionou concretos com relações a/ag 0,40, 0,55 e 0,70, e ensaios realizados nas idades de 28, 91 e 182 dias, confrontado-os com a amostra de referência (sem adição). Observou reduções nas amostras compostas com CCA, em relação à mistura de referência, para as relações 0,40, 0,55 e 0,70 de 70%, 83% e 86% aos 28 dias; 82%, 88% e 79% aos 91 dias e 75%, 89% e 83% aos 182 dias, respectivamente. Analisou estatisticamente a influência de todas as variáveis na penetração de cloretos, sendo que a variável tipo de adição mostrou-se mais significativa, seguida da relação a/ag e idade de ensaio.

Observa-se, de modo geral, que o acréscimo dos percentuais de substituição da CCA acarretou diminuição na carga passante. O aumento na finura da CCA utilizada também mostrou influência da diminuição na mesma. Constata-se influência da cura e das variações da relação a/ag no aumento ou diminuição da carga passante. Além disso, a diminuição da relação a/ag e o aumento no tempo de cura úmida das amostras acarretam diminuições na carga passante das amostras pesquisadas.

2.6 Influência da cinza de casca de arroz na solução aquosa dos poros

Há uma utilização crescente de adições minerais no concreto. O seu uso promove alterações na estrutura de poros bem como na composição da solução dos poros do concreto, e conseqüentemente, na condutividade elétrica específica da solução dos poros (MULLICK, 1992 *apud* GASTALDINI, 1999; SHI, 1998).

Gastaldini et al. (1999), Cervo (2001), Dalri (2002), Gomes (2003) comprovaram, em seus estudos, os benefícios da utilização da cinza de casca de arroz, em misturas binárias e ternárias, com e sem ativadores, nas melhorias das propriedades do concreto ligadas a sua estrutura de poro e a condutividade elétrica específica, o que é relatado a seguir.

Gastaldini et al. (1999) investigaram a composição da solução dos poros de pastas compostas de misturas binárias e ternárias de cinza de casca de arroz (CCA) e escória de alto forno (EAF), esta última nas finuras Blaine 400 m²/kg e 700 m²/kg, relação a/ag 0,4 e 0,6, nas idades de ensaio de 28 e 91 dias. Na mistura binária composta com 50% de cinza de casca de arroz houve diminuição na concentração dos íons investigados, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, OH⁻, SO₄²⁻, nas duas idades de ensaio e relações a/ag, quando comparadas à mistura de referência. Na mistura ternária, contendo escória de alto forno na finura Blaine de 400m²/kg, o aumento no seu teor, de 30% para 50%, mantendo o teor de cinza de casca de arroz em 20%, resultou em aumento na concentração de Na⁺ e redução nos demais íons. Nas misturas ternárias contendo 30%EAF e 20% de CCA, o aumento na finura Blaine da escória de 400m²/kg para 700m²/kg acarretou em acréscimo nos teores de Na⁺ e K⁺ e diminuição dos demais íons. Concluíram que, embora o aumento da finura conduza a uma estrutura da pasta mais compacta, com reflexos na resistência à compressão e distribuição de tamanho de poros, resultou numa menor inclusão dos íons Na⁺ e K⁺, o que se constata da concentração destes na composição da solução dos poros.

Yu et al. (1999) estudaram a reação entre a cinza de casca de arroz e o Ca(OH)₂, e a natureza de seu produto. Utilizaram em seus experimentos, Ca(OH)₂ quimicamente puro, água destilada e cimento portland. Pesquisaram cinza de casca de arroz (CCA), oriunda de um processo de queima em um forno a temperatura de 600°C e que foi moída em um moinho de bolas por tempo aproximado de uma hora. Realizaram procedimentos propostos por LUXAN et al.(1989). Utilizaram ainda em seus experimentos um medidor digital de pH e um medidor de condutividade elétrica. Seus resultados são mostrados no gráfico da Figura 2.9.

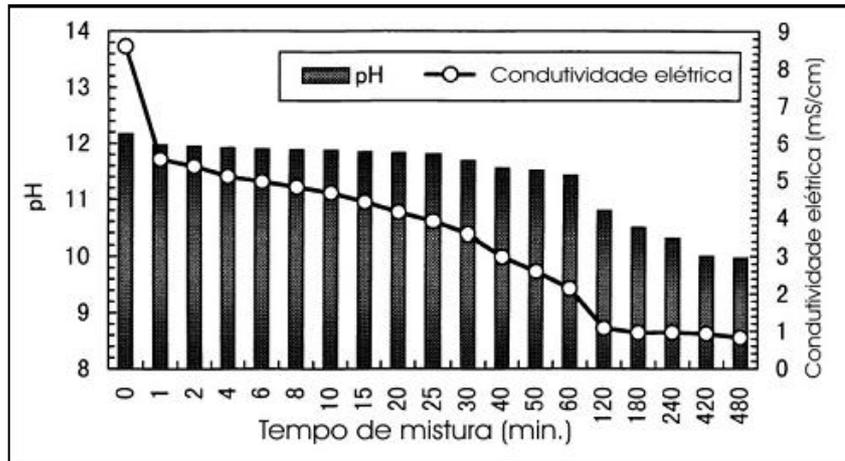


Figura 2.9 – Variação do pH e da condutividade elétrica da solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em presença de CCA (QIJUN et al., 1999).

Os autores observaram que os valores do pH e da condutividade elétrica da solução saturada à 40°C foram de 12,16 e 8,59mS/cm, respectivamente. Após a adição da CCA na solução, ambos valores do pH e da condutividade elétrica decresceram com o tempo, (Figura 2.9). Notaram reduções tanto das concentrações de Ca^{+2} como OH^- da solução. Explicaram que isto foi devido à relação direta existente dos valores do pH com as quantidades de OH^- livres na solução e a dependência da condutividade elétrica em relação as concentrações efetivas de Ca^{+2} e OH^- . Afirmaram que os decréscimos nas concentrações de Ca^{+2} e OH^- foram devidos à interação existente entre estas e a CCA adicionada. Seus experimentos mostraram também que a reação entre a SiO_2 da CCA e a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ teve como produto gel C-S-H.

Já Cervo (2001) pesquisou a solução aquosa dos poros e a condutividade elétrica específica de misturas compostas com CCA com diferentes finuras, 23m²/g e 36,6m²/g, com teores de substituição de 25% e 50%. Adotou relação a/ag 0,50 e realizou ensaios aos 91 dias. Observou que a utilização de misturas compostas com CCA reduziu as quantidades de Ca^{++} , Na^+ , SO_4^{-2} e OH^- , em comparação à mistura de referência, porém sem diminuir o pH para valores menores de 12,8. Constatou que nos concretos compostos com CCA, o aumento no teor de substituição de 25% para 50% apresentou um notável acréscimo nas concentrações de Na^+ e K^+ . Da mesma forma, o aumento da finura de 23m²/g para 36,6m²/g diminuiu a concentração de Na^+ e K^+ na solução dos poros. Avaliou também os valores de Na_2O_e e da condutividade elétrica das soluções dos poros, calculadas a partir das equações apresentadas por SHI et al. (1998). Destes, observou que a substituição de 25% e 50% de CCA provocou diminuições no Na_2O_{eq} , quando comparado com as misturas de referência, em 68,9%, 90,4%

na finura $23\text{m}^2/\text{g}$ e em 77,6% e 91,3% na finura de $36,3\text{m}^2/\text{g}$, respectivamente. Observou também que o aumento na finura da CCA de $23\text{m}^2/\text{g}$ para $36,3\text{m}^2/\text{g}$ diminuiu o $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ em 27,9% e 9,5%, para os teores de substituição de 25% e 50%. O aumento no teor de substituição de 25% para 50% reduziu a condutividade elétrica específica de $2,22\ \text{ohm}^{-1}$ para $1,90\ \text{ohm}^{-1}$ e o aumento na finura reduziu de $1,98\ \text{ohm}^{-1}$ para $1,84\ \text{ohm}^{-1}$, valores inferiores àquele da mistura de referência, $4,14\ \text{ohm}^{-1}$.

Dalri (2002), por sua vez, investigou a influência da cinza de casca de arroz e da cal hidratada na composição da solução dos poros e na condutividade elétrica. Adotou teor de substituição de 50% e relação a/ag 0,55. Observou que na mistura binária sem cal ocorreu reduções nas concentrações dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} e OH^- , quando comparadas à mistura de referência e, naquela com adição de cal, aumento no teor desses íons. A condutividade elétrica específica da mistura binária com adição de cal, $1,44\ \text{ohm}^{-1}$, foi superior àquela sem cal $0,71\ \text{ohm}^{-1}$, entretanto ambas foram inferiores à da mistura de referência, $2,88\ \text{ohm}^{-1}$.

Gomes (2003) pesquisou a influência de ativadores químicos na composição e condutividade elétrica específica da solução dos poros. Utilizou os ativadores Na_2SO_4 , K_2SO_4 , Na_2SiO_3 em teor de 1% da massa de material aglomerante, cinza de casca de arroz em teor de 20% e realizou ensaio aos 91 dias adotando relação a/ag de 0,50. Observou que as misturas ativadas apresentaram, em relação à de referência, aumento nos teores de Ca^{2+} e SO_4^{2-} e diminuição nos teores de K^+ e OH^- , comportamento similar ao da mistura básica de cinza de casca de arroz. Apenas para a mistura ativada com sulfato de sódio, houve aumento na concentração de íon Na^+ , comparativamente à mistura de referência. Constatou, para as misturas compostas com 20% de CCA, 20% de CCA + 1% Na_2SO_4 , 20% de CCA + 1% K_2SO_4 e 20% de CCA + 1% Na_2SiO_3 , reduções na condutividade elétrica específica, em relação à mistura de referência, de 74,42%, 69,02%, 47,85% e 63,94%, respectivamente.

O estudo do acervo bibliográfico referente à influência da utilização da CCA nas modificações na solução aquosa dos poros do concreto mostrou que esta é responsável por importantes modificações na composição e estrutura da pasta. Observou-se que a utilização da CCA no concreto provoca diminuição do pH, o que aumenta o risco de despassivação da armadura, porém provoca igualmente a diminuição da condutividade elétrica do concreto, o que acarreta diminuição na mobilidade dos íons no seu interior, dificultando o processo de formação de corrosão em suas armaduras. A utilização da CCA no concreto provoca também o refinamento dos poros com reflexos, sobretudo na penetração e, conseqüentemente, na durabilidade do concreto.

CAPÍTULO III

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo foi dedicado à descrição da metodologia, bem como do conjunto de materiais, técnicas e procedimentos utilizados ao longo desta pesquisa. Esta teve por objetivo investigar a penetração de cloretos de concretos, em que parte do cimento foi substituída por cinza de casca de arroz .

O questionamento principal pode ser desdobrado em perguntas mais específicas tais como:

- Qual a influência do teor de substituição da cinza de casca de arroz na resistência à compressão?
- Em que medida o teor de substituição de cinza de casca de arroz influencia na penetração a cloreto (ASTM C 1202), na profundidade de penetração de cloretos, nos cloretos retidos, na estrutura dos poros e na composição da solução aquosa de concretos?
- Como eles comportam, frente àqueles compostos com cinza volante e escória de alto forno, adições largamente utilizadas no sul e sudeste do país?
- Se esses concretos forem dosados para alcançarem o mesmo nível de resistência mecânica, como procedem os coeficientes das propriedades estudadas?
- Como as propriedades portam-se em relação ao consumo de cimento?

Na busca das respostas aos questionamentos pré-estabelecidos, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, segundo NBR 5738, penetração de cloretos, segundo ASTM C 1202, profundidade de penetração de cloretos, avaliada por aspersão de AgNO_3 . Foram verificados também a quantidade de cloretos retidos e o pH dos concretos submetidos ao ensaio de penetração de cloretos, bem como foram realizados os ensaios de porosimetria e composição da solução dos poros. Realizou-se estudo preliminar sobre a resistividade elétrica aparente, segundo método de Wenner (NBR 7117).

Visando uma análise mais precisa da influência dos diferentes teores de substituição de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento no concreto, investigou-se um concreto

sem adição, somente com cimento, sendo o mesmo denominado concreto de referência, que serviu de parâmetro para a comparação dos diferentes resultados obtidos com a cinza de casca de arroz, em teores de 10%, 20% e 30%. Ainda, para efeito de comparação, foram investigadas misturas contendo 35% de cinza volante e 50% de escória de alto forno. Esses teores de substituição foram adotados por corresponderem aos valores médios utilizados na produção do cimento Portland pozolânico e cimento Portland de alto forno.

3.2 Variáveis envolvidas na pesquisa

a) Variáveis Independentes:

Relação água/aglomerante (proporção de água em relação à quantidade de cimento + adição), em massa: 0,35; 0,50 e 0,65.

Idade de Ensaio: variáveis de acordo com os ensaios realizados - Tabela 3.1.

b) Variáveis Intervenientes:

- Tipo e teor de adição mineral:

- ◆ cinza de casca de arroz; 10%, 20%, 30%
- ◆ cinza volante; 35%
- ◆ escória de alto-forno. 50%

c) Variáveis dependentes:

No concreto:

- ◆ resistência à compressão axial
- ◆ resistência à penetração de íons cloreto;
- ◆ cloreto retido;
- ◆ pH da solução aquosa dos c.p. do ensaio
- ◆ profundidade de penetração de cloretos
- ◆ resistividade elétrica aparente

Em pasta:

- ◆ porosidade;
- ◆ composição da solução dos poros (concentração dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , OH^- , SO_4^{2-}).

Tabela 3.1 – Dados dos ensaios realizados

Dados dos ensaios realizados				
Ensaio Concreto				
Dados importantes	Resistência à compressão axial	Penetração de Cloretos (C)	Resistividade elétrica aparente	Penetração aspersão nitrato de prata
Misturas ensaiadas	Todas	Todas	Todas	Todas
Relação a/ag	0,35, 0,50 e 0,65	0,35, 0,50 e 0,65	0,50	0,35, 0,50 e 0,65
Idade de ensaio	28 e 91 dias	91 dias	28 e 91 dias	7, 14, 28, 56, 91
Tamanho do Cp moldado	10 x 20 cm	10 x 20 cm	10 x 10 x 17 cm	10 x 20 cm
Unidade de medida	MPa	Coulombs	Ω .cm	coef. K
Ensaio da pasta				
Dados importantes	Extração da água dos poros		Porosimetria porosímetro de mercúrio	
Misturas ensaiadas	REF, 10A,20A,30A		REF, 10A,20A,30A	
Relação a/ag	0,35, 0,50 e 0,65		0,35, 0,50 e 0,65	
Idade de ensaio	91 dias		91 dias	
Tamanho do Cp moldado	4 x 8 cm		5,5 x 3 cm	

A seguir são descritos os materiais utilizados, bem como o conjunto de técnicas e procedimentos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa.

3.3 Caracterização dos materiais

Para se alcançar o objetivo proposto pelo trabalho, fez-se necessário preparar e caracterizar os materiais a serem utilizados.

Na seqüência, são apresentadas as características físicas e químicas dos materiais utilizados, seguindo os procedimentos normalizados pela ABNT ou normas estrangeiras.

3.3.1 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa é o Portland de alta resistência inicial, CPV – ARI, segundo EB 2 – NBR 5733, devido ao mesmo possuir menor quantidade de qualquer tipo de

adições, e apresentar um teor mais elevado de C_3S , por conseguinte, maior disponibilidade de CH necessário para as reações pozolânicas.

A Tabela 3.2 apresenta as características físico/mecânicas do cimento e a Tabela 3.3 composições químicas, respectivamente, do cimento e demais aglomerantes.

Tabela 3.2 – Características físico/mecânicas do cimento

Cimento	CPV-ARI
Cimento	
Resistência (MPa) 1 dia	23,5
Resistência (MPa) 3 dias	35,1
Resistência (MPa) 7 dias	41,2
Resistência (MPa) 28 dias	49,6
Massa específica (kg/m ³)	3,12
Finura # 0,075 mm	0,13
Área específica (m ² /g) - BET	423

Tabela 3.3 – Composição química dos aglomerantes

Composição química	Teor em massa %			
	CPV - ARI	Escória de Alto Forno	Cinza de Casca de Arroz	Cinza Volante
Perda ao fogo	2,09	0,71	9,14	1,16
SiO ₂	19,59	34,98	90,00	64,57
Al ₂ O ₃	4,79	13,06	0,28	27,27
Fe ₂ O ₃	3,07	1,11	0,14	2,21
CaO	64,35	42,28	0,45	1,51
MgO	1,69	6,01	0,28	0,76
SO ₃	2,75	0,11	0,02	0,06
Na ₂ O	0,07	0,17	0,08	0,15
K ₂ O	0,98	0,40	1,55	1,5

3.3.2 Adições minerais

As adições minerais empregadas nessa pesquisa foram a cinza de casca de arroz, a cinza volante e a escória de alto forno. As porcentagens de substituição de cinza de casca de arroz, cinza volante e escória de alto forno nas misturas investigadas, assim como as denominações de cada traço resultante encontram-se na Tabela 3.4.

A cinza de casca de arroz, obtida por queima controlada, proveniente de usina termoelétrica, sofreu moagem prévia no moinho de bolas de aço, pelo período de dez minutos, para homogeneização e uniformização de sua finura. A escória de alto forno foi procedente de indústria siderúrgica nacional e a cinza volante proveniente da queima do carvão mineral em usina termelétrica, sendo empregadas sem qualquer processamento adicional.

Tabela 3.4 – Proporcionamento dos materiais aglomerantes

Traço	Cimento	Escória de Alto Forno	Cinza de Casca de Arroz	Cinza Volante
REF	100	-	-	-
10A	90	-	10	-
20A	80	-	20	-
30A	70	-	30	-
CV35	65	-	-	35
E50	50	50	-	-

As características físicas das adições minerais, com os valores de massa específica e finura são encontradas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Massa específica dos materiais aglomerantes

Material Aglomerante	Massa específica (kg/m ³)	Sup. esp. BET (m ² /kg)
Cimento	3,11	1,48
Escória de alto forno	2,89	1,07
Cinza de casca de arroz	2,17	4,00
Cinza volante	2,19	2,32

3.3.3 Agregados

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi a areia natural, quartzosa, proveniente do município de Santa Maria. A areia passou por sucessivos processos de lavagem para retirada de eventuais impurezas, sendo seca em estufa, peneirada na peneira #6,3 mm e estocada em caixas de madeira. Como agregado graúdo, foi utilizada pedra britada de rocha diabásica proveniente do município de Itaara, sendo peneirada na peneira #19 mm, lavada e seca em estufa antes de ser armazenada para posterior uso.

A Tabela 3.6 apresenta as características físicas dos agregados e as Figuras 3.1 e 3.2 mostram as curvas granulométricas para o agregado miúdo e para o agregado graúdo, respectivamente.

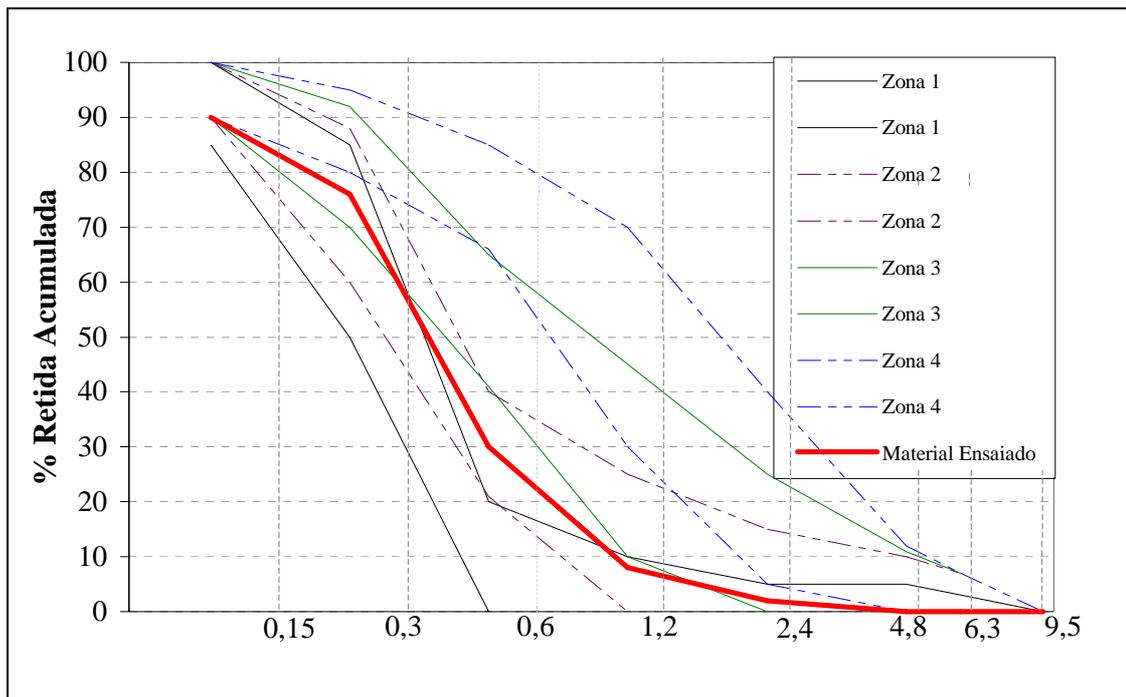


Figura 3.1 – Gráfico da granulometria do agregado miúdo

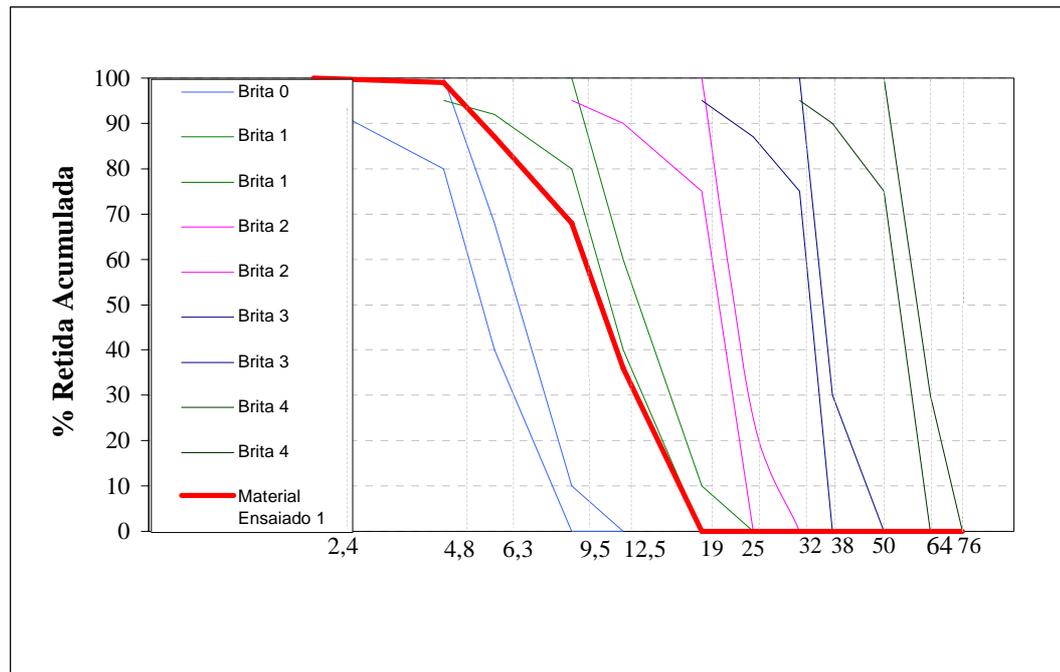


Figura 3.2 – Gráfico da granulométrica do agregado graúdo

Tabela 3.6 – Características físicas dos agregados

Peneiras (mm)	Porcentagens retidas acumuladas	
	Brita 1	Areia
12,50	36	
9,50	68	
6,30	87	
4,80	99	0
2,40	100	2
1,20	100	8
0,60	100	30
0,30	100	76
0,15	100	90
Módulo de Finura	6,67	2,06
Dimensão Máxima Característica - mm	19,00	2,40
Massa Específica - kg/dm ³	2,50	2,61
Massa Unitária Solta - kg/dm ³	1,31	1,67
Absorção de Água - %	2,81	0,50
Índice de Forma	2,99	

3.3.4 Aditivo

A consistência especificada, 60mm a 80mm, foi obtida a partir da utilização de um aditivo superplastificante à base de éter carboxílico modificado que atende as prescrições da ASTM C 494.

3.4 Dosagem dos Concretos

Os concretos investigados, para os ensaios de resistência à compressão axial, penetração de cloretos e penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata foram dosados pelo método de substituição em massa do cimento por adições minerais. Para obtenção da curva de Abrams, de cada mistura, foi necessário um mínimo de três níveis de resistência. Foram fixadas as relações a/ag em 0,35; 0,50 e 0,65, com proporcionamento aglomerante: agregado de 1:1,3:2,21; 1:2,06:2,94 e 1:2,83:3,68, respectivamente.

A porcentagem de argamassa, dada em volume de material seco, foi fixada em 51%, por ser o volume ótimo encontrado.

No total, foram moldadas 6 misturas, cada uma com três relações a/ag, totalizando dezoito traços, sendo uma mistura de referência e as demais com adições minerais.

Na Tabela 3.7, são apresentadas as quantidades de materiais por m³ de concreto.

Para a correta definição das quantidades de materiais contidas na Tabela 3.5, foram utilizados conceitos e procedimentos práticos determinados por Helene e Terzian (1992).

Para verificar a consistência de cada mistura em relação à faixa estabelecida na pesquisa, 60 a 80 mm, realizaram-se *ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone* (NBR 7223).

Tabela 3.7 – Quantidade de materiais utilizados por m³ de concreto.

Mistura	A/ag	aglom kg/m ³	Cimento kg/m ³	Água Kg/m ³	CV kg/m ³	CCA kg/m ³	EAF kg/m ³	Aditiv o (%) Massa	Agreg. Miúdo kg/m ³	Agreg. Graúdo kg/m ³
REF	0,35	488	488	170,8	-	-	-	0,13	634	1078
	0,50	359	359	179,5	-	-	-	-	739	1055
	0,65	284	284	184,6	-	-	-	-	803	1044
10A	0,35	488	439	170,8	-	49	-	-	610	1078
	0,50	359	323	179,5	-	36	-	0,2	725	1055
	0,65	284	255	184,6	-	28	-	0,4	789	1044
20A	0,35	488	390	170,8	-	98	-	0,9	590	1078
	0,50	359	287	179,5	-	72	-	0,5	710	1055
	0,65	284	227	184,6	-	57	-	0,23	778	1044
30A	0,35	488	342	170,8	-	146	-	1,95	834	1078
	0,50	359	251	179,5	-	108	-	1,05	696	1055
	0,65	284	199	184,6	-	85	-	0,65	766	1044
CV35	0,35	488	317	170,8	171	-	-	-	498	1078
	0,50	359	133	179,5	126	-	-	0,2	906	1055
	0,65	284	184	184,6	100	-	-	0,42	775	1044
E50	0,35	488	244	170,8	-	-	244	-	615	1078
	0,50	359	179	179,5	-	-	179	-	728	1055
	0,65	284	142	184,6	-	-	142	0,15	792	1044

3.5 Moldagem, cura e preparação dos corpos de prova

Para cada relação água/aglomerante de uma mistura, foi moldado um total de 12 corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Desse total, 8 foram utilizados para *ensaios de resistência à compressão axial*, 4 foram rompidos na idade de 28 dias, 4 aos 91 dias, e os demais para os ensaios de penetração de cloretos ASTM C 1202 (1) e determinação da profundidade de penetração de cloretos (3).

Somado a isto, foram moldados os corpos de prova para a realização do ensaio de resistividade elétrica aparente, totalizando a moldagem de 6 prismas de concreto de (10cm x 10cm x 17cm), para cada uma das 6 misturas, sendo moldados apenas os cps com relação a/ag = 0,50.

As moldagens dos corpos-de-prova foram realizadas em conformidade com o preconizado pela norma NBR 5738. Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes metálicos por 24 horas. Após esse prazo, foram retirados dos moldes, identificados e colocados durante 28 dias em câmara climatizada, à temperatura de 23°C ± 2°C e à umidade

relativa de 95%. Posteriormente, foram armazenados em uma prateleira aguardando as datas previstas para seus respectivos ensaios. Este procedimento foi utilizado como forma de estudo da influencia da cura seca nas propriedades do concreto. (Tabela 4.1).

As moldagens ocorreram durante o inverno, fato que determinou a conveniência do aquecimento da água da mistura. Essa foi aquecida na temperatura necessária para que a massa de concreto resultasse em 18°C. Para esse fim, foi utilizada uma fórmula (Mehta & Monteiro, 1994) que considera as massas de aglomerante, de agregados e da água, assim como suas temperaturas.

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

T – Temperatura da massa de concreto (°F)

T_m – Temperatura dos agregados (°F)

T_c – Temperatura do cimento (°F)

T_a – Temperatura da água (°F)

M_m – Massa dos agregados (Kg)

M_c – Massa de cimento (Kg)

M_a – Massa de água (Kg)

A moldagem dos corpos de prova foi efetuada depois de atingidos os valores limites pré-fixados para o abatimento do tronco de cone, ou seja, entre 60mm e 80mm. O adensamento dos CPs foi realizado em mesa vibratória, com os concretos sendo lançados nos moldes em três camadas sucessivas.

Para a realização dos ensaios de *penetração de cloretos*, os corpos-de-prova foram serrados, com disco de corte, nas dimensões previstas na respectiva norma - ASTM C 1202-97.

Para o ensaio de extração da água dos poros e porosimetria de mercúrio, foram moldados corpos de prova de dimensões 4 x 8 cm para cada relação a/ag das misturas de REF, 10A, 20A e 30A.

3.6 Ensaios realizados com o Concreto

3.6.1 Resistência à compressão axial

Para cada traço, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões $\varnothing 10 \times 20$ cm destinados aos ensaios de resistência à compressão axial, sendo rompidos aos 28 dias (4 c.p.) e 91 dias (4 c.p.), de acordo com a NBR 5738 e 5739.

3.6.2 Penetração de cloretos

Os ensaios de penetração de cloretos foram realizados conforme o método da ASTM C 1202/92. Neste ensaio, a amostra de concreto é fixada a duas células de acrílico preenchidas com uma solução preparada de 3% de NaCl e 0,3N de NaOH, onde é aplicado uma diferença de potencial de 60V, e realizadas leituras durante seis horas de ensaio. Este método de ensaio avalia a resistência à penetração de cloretos através de uma relação com a condutância elétrica em corpos de prova de concreto, sendo utilizável para a avaliação de materiais, dosagens e desempenho.

Para este ensaio foram moldados corpos de prova com dimensões de 100 x 200 mm Para cada uma das misturas aglomerantes investigadas e relações a/ag adotadas (0,35; 0,50 e 0,65), foram ensaiados dois corpos de prova na idade de 91 dias, adotando-se a média aritmética como valor representativo, desde que satisfeitas as prescrições de norma quanto à diferença nestes resultados.

3.6.3 Cloretos retidos e pH

A determinação da quantidade de cloreto retido e pH foi realizada com os corpos de provas curados por 91 dias e submetidos ao ensaio de penetração de íons cloreto, em que se coletou amostra da face de concreto que esteve em contato com a solução de cloreto de sódio, na profundidade de 0 – 1,5 cm. A coleta do pó de concreto seguiu as recomendações da norma ASTM C 1152/92, utilizando-se perfuratriz com broca de vídia de 16 mm de diâmetro,

perfurando-se pelo menos 8 furos. Após recolhido, o material foi peneirado na #100, sendo então separadas as quantidades necessárias para o ensaio de teor de cloreto retido e pH.

A quantidade total de cloreto retido ao concreto por migração induzida por corrente elétrica, segundo a ASTM C 1202, foi realizada por titulação potenciométrica de cloreto com nitrato de prata, segundo a seção 19 da norma ASTM C 114.

A determinação do pH seguiu as diretrizes de Al-Amoudi *et al.* (1991), suspendendo-se 50 g de pó com 50 ml de água destilada, mantendo-se a suspensão em agitação por 30 minutos em agitador mecânico, seguido de uma hora de repouso. A determinação do pH foi realizada logo após, com eletrodo combinado, executando-se leituras da amostra.

3.6.4 Penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata

Para facilitar o entendimento da metodologia deste ensaio, o mesmo foi dividido em 3 partes principais:

3.6.4.1 Moldagem dos corpos de prova

Inicialmente, foram moldados, para cada mistura analisada, 3 corpos de prova de 10x20cm. A Tabela 3.8 nos mostra dados dos cps moldados para este ensaio e os seus tempos respectivos de cura, bem como seus tempos de imersão em água contendo NaCl em concentração semelhante à água do mar.

Tabela 3.8 – Descrição dos cps do ensaio e seus tempos respectivos de cada cura

Misturas Analisadas	Relações A/ag	Dimensão dos cps moldados	Dimensão dos cps do ensaio (faces)	Tempo de cura no tanque com solução de cloretos	Tempo de Cura em Câmara Úmida
REF					
10A	0,35, 0,50, 0,65	Ø10x20cm (3 cps por traço)	Ø10x10cm	7, 14, 28, 56 e 91 dias	28 dias
20A			(4 cps por traço)		
30A			Ø10x20cm		
CV35			(2 cps por traço)		
E50					

3.6.4.2 Preparação dos corpos de prova para o ensaio

Após a moldagem e o respectivo tempo de cura em câmara úmida os cps deste ensaio foram separados e serrados com serra diamantada. Após esta etapa, os cps foram deixados durante o tempo necessário para tornarem-se superficialmente secos. Posteriormente, os mesmos tiveram suas superfícies superiores e inferiores pintadas com 3 demãos de verniz poliuretânico. Na seqüência deste processo, os cps foram colocados no tanque com a solução pré-descrita de cloretos, aguardando no mesmo até o tempo de realização do ensaio, descrito na Tabela 3.8 e Figura 3.3.

Na idade de ensaio, os cps são retirados do tanque de cloretos no qual foram mergulhados e rompidos axialmente. Então foram separadas as 2 metades por amostra rompida e efetuado sobre as mesmas o borrifamento de uma solução com nitrato de prata.

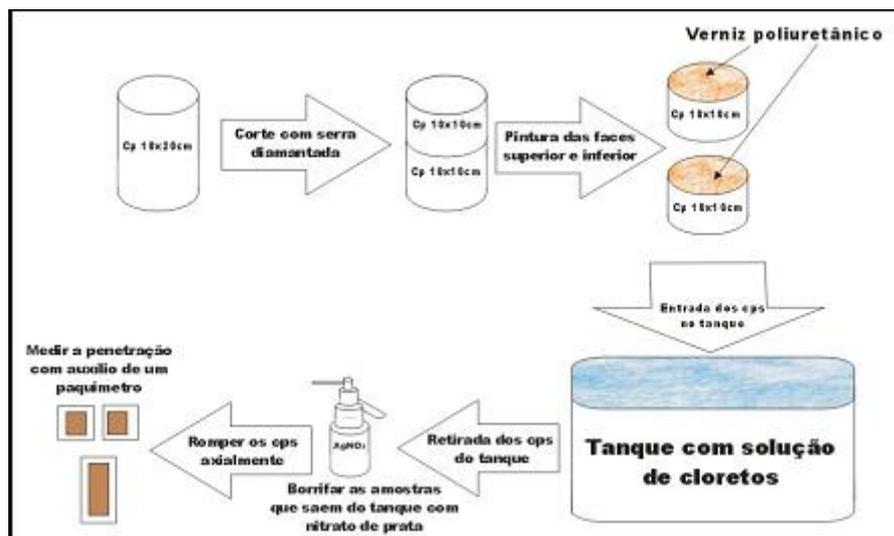


Figura 3.3 – Esquema do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (AASHTO T259).

Após esta etapa, efetuou-se a leitura da profundidade de penetração de cloretos, tendo sido determinadas 10 leituras em cada face analisada, conforme descreve a Figura 3.4.

Posteriormente, de posse dos dados coletados, realizou-se a análise destes, descrita no capítulo IV, em que se discutem os resultados.

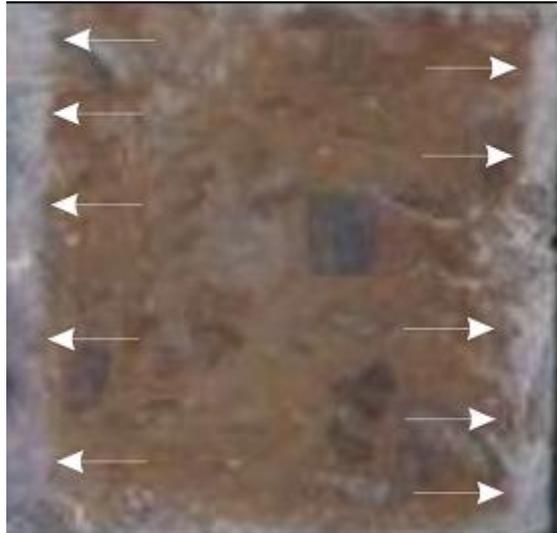


Figura 3.4 – Foto de um cp rompido axialmente com os locais de leitura da profundidade de penetração de cloretos indicados.

3.6.5 Ensaio da solução aquosa dos poros

Foram moldadas pastilhas de pasta pulverizadas na idade de ensaio, 91 dias. Esse pó foi colocado em suspensão em água deionizada até estabilização do pH. Após, filtrou-se e determinou-se as concentrações dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} e OH^- . Esse procedimento foi adotado devido à impossibilidade de extração, no equipamento proposto por Longuet e colaboradores (1973), da quantidade mínima de solução necessária para a realização dos ensaios na idade de 91 dias, para a relação água/aglomerante de 0,35.

As concentrações dos íons de Na^+ , K^+ e Ca^{2+} foram determinadas através de ensaio de espectroscopia de absorção atômica. A concentração de íons OH^- , delimitada através de titulação direta com HCL. Os valores de pH das soluções dos poros, calculados a partir das concentrações de íons hidroxilas. A concentração de íons SO_4^{2-} , determinada, indiretamente pela precipitação de BaSO_4 , em uma solução contendo BaCl_2 em excesso.

Para o cálculo da condutividade elétrica da solução dos poros do concreto, utilizaram-se as equações propostas por SHI et al (1998):

$$\rho = \rho_{\text{água}} + \sum C_i \lambda_i / 1000 \quad (1)$$

onde:

ρ = condutividade elétrica da solução aquosa;

$\rho_{\text{água}}$ = condutividade elétrica da água;

C_i = concentração equivalente do íon i ;

λ_i = condutividade equivalente do íon i .

sendo que:

$$\lambda_i = \lambda_{i,0} - A_i \sqrt{C_i} \quad (2)$$

onde $\lambda_{i,0}$ é a condutividade equivalente a concentração infinita. A constante A_i da equação é determinada teoricamente por:

$$A_i = 0,2289 \lambda_{i,0} + 60,12 \quad (3)$$

A Tabela 3.9 apresenta os valores de $\lambda_{i,0}$ dos íons presentes na solução dos poros do concreto.

Tabela 3.9 – Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25°C.

Íon	Na+	K+	Ca2+	SO42-	OH-
Condutividade equivalente	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,0198
$M^2 \cdot \text{equiv.}^{-1} \cdot \text{ohm}^{-1}$					

3.6.6 Ensaio de porosimetria de Mercúrio

Os ensaios para a determinação do volume total de intrusão de mercúrio, que se constitui em dados comparativos aceitáveis para a determinação da porosidade, realizaram-se em equipamento da marca Micromeritics, modelo Autopore II 9220.

Foram moldados corpos de prova de pasta com dimensões de 3x4 cm, adensados em mesa vibratória e na data de ensaio extraído “cubos” de arestas aproximadas de 0,6 cm. A paralisação da hidratação realizou-se com imersão em álcool isopropílico e, após secagem, em estufa a 80°C.

3.6.7 Ensaio de Resistividade elétrica aparente – Método dos quatro eletrodos (Método de Wenner)

O método dos quatro eletrodos é um método, conforme relata Abreu (1998), normalizado pela ASTM G57, originalmente desenvolvido para o uso em solos. A adaptação para o uso em concreto tem sido objeto de muitos estudos, conforme relata a autora e, em consequência disto, foram desenvolvidos equipamentos que possibilitam medidas de resistividade *in situ*, de forma não destrutiva.

O ensaio é realizado fazendo-se uso de uma fonte de alimentação de corrente alternada. É aplicada corrente entre os eletrodos externos. Entre os eletrodos internos é medida a diferença de potencial. Vale ressaltar que, para a aquisição de dados confiáveis, os eletrodos devem estar equidistantes em linha reta (Figura 3.5). O valor da resistividade, de acordo com a fórmula de Frank Wenner, é feito da seguinte forma (Medeiros Filho, 1979 *apud* AGUIDA, 1998):

$$\rho = R \cdot k \quad (3.2)$$

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3.3)$$

onde:

ρ = resistividade calculada do concreto, em ohm.cm;

R= resistência medida pelo instrumento, em ohm.cm;

a = distância de separação entre os eletrodos em cm;

b = profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova, em cm.

É importante que sejam coletados dados como: corrente, diferença de potencial, distancia entre os eletrodos, temperatura do ar, unidade relativa.

Para a realização deste ensaio, foram moldados 6 cps com dimensões de 10cm x 10cm x 17 cm, para cada traço, com relação a/ag de 0,50 (Figura 3.6).

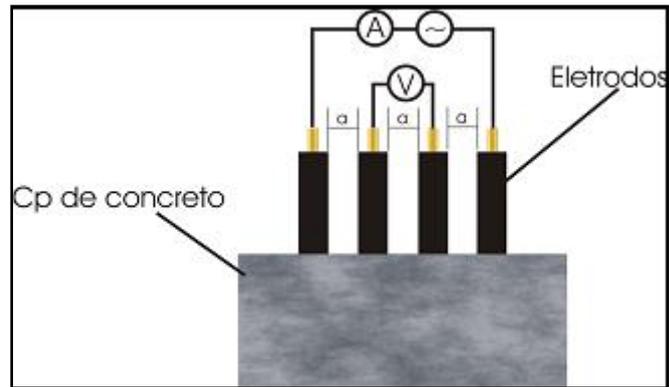


Figura 3.5 – Método dos 4 eletrodos para medição de resistividade elétrica: “A” – Amperímetro, “V” – Voltímetro de alta impedância de entrada, e “a” a distância entre os eletrodos. (ABREU, 1998).



Figura 3.6 – Foto de um cp do ensaio de resistividade elétrica aparente.

O ensaio é realizado utilizando-se uma fonte de alimentação de corrente alternada que é aplicada entre os eletrodos externos. E, entre os eletrodos internos, é medida a diferença de potencial. Para este ensaio, foram moldados corpos de prova conforme ilustra a Figura 3.7 a seguir:

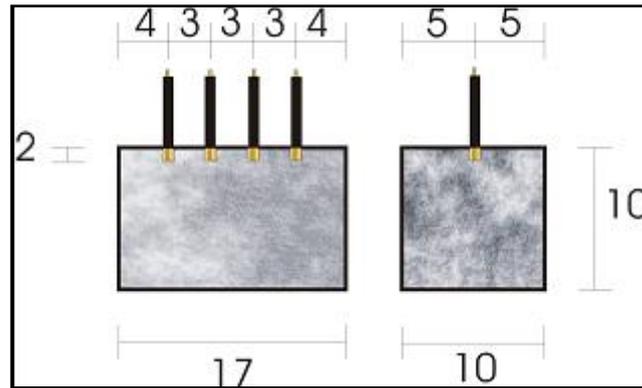


Figura 3.7 – Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de resistividade pelo método dos 4 eletrodos (medidas em cm). ABREU, (1998).

O preparo dos eletrodos (fios de cobre de 10mm^2) envolveu as seguintes etapas:

- corte do fio em pedaços de aproximadamente 8 cm;
- decapagem dos fios de forma a resultarem 5cm de fio coberto correspondentes a altura do gabarito;
- remoção do verniz (antioxidante e isolante) das extremidades;
- amassamento da extremidade do fio a ser imersa no concreto (2cm), para aumentar a aderência entre o eletrodo e o concreto.

A Figura 3.8 apresenta o molde utilizado no do preparo dos corpos de prova.



Figura 3.8 – Detalhe do molde de madeira do ensaio de resistividade elétrica aparente

ABREU, (1998) destaca que é importante a adoção de uma folga entre a superfície do concreto e a parte inferior do gabarito. Esta solução foi necessária para que o gabarito não ficasse aderido ao concreto na região dos eletrodos, o que provocaria o deslocamento dos eletrodos, por ocasião da desmoldagem dos corpos de prova.

Para a realização do ensaio, o circuito foi montado conforme o esquema descrito na Figura 3.9. Foi coletada a diferença de potencial e a corrente que circulava no circuito. Moldaram-se seis corpos de prova para cada traço e em cada corpo de prova realizaram-se quatro leituras não consecutivas, com o objetivo de ratificação dos dados lidos, sendo o resultado adotado como a média entre todas as leituras efetuadas.

O valor da resistividade foi calculado de acordo com a fórmula de Frank Wenner (item 3.2). A figura 3.9 ilustra o esquema montado do ensaio de resistividade.



Figura 3.9 Foto do ensaio de resistividade elétrica aparente

Para a realização das leituras do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um gerador de função, com o papel de emitir uma onda senoidal, com corrente alternada e frequência de 10Hz;
- Um multímetro com função de leitura da corrente alternada;
- Um multímetro com papel de leitura da diferença de potencial (com valores em torno de 5V).
- Foram excluídos os valores com coeficiente de variação superior a 20%.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, de penetração de cloretos segundo a ASTM C 1202 e pelo método de aspersão de nitrato de prata, cloretos retidos, de pH, de composição da solução dos poros e de porosimetria de mercúrio. Na seqüência, realizou-se um estudo preliminar da resistividade elétrica do concreto das misturas estudadas, na relação a/ag 0,50. Efetuou-se um estudo a respeito do inter-relacionamento de algumas propriedades ligadas à durabilidade do concreto.

Para cada ensaio, as propriedades das misturas estudadas são avaliadas inicialmente comparando-as com as de uma mistura sem adição mineral e também entre elas próprias.

Os resultados são apresentados na forma de gráficos e tabelas de maneira a possibilitar uma melhor visualização. Numa segunda etapa eles foram analisados para igualdade de resistência mecânica de 40MPa, 50MPa e 60 MPa, comparando-se os valores entre si e em relação à mistura de referência. No final, foi realizada uma análise global em que se discute as implicações dos vários aspectos envolvidos.

4.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 4.1, Figura 4.1. Foram obtidos, aos 28 dias, a partir de corpos de prova curados em câmara úmida até esta idade. Os resultados aos 91 dias, foram alcançados em corpos de prova curados por 28 dias e, após, conservados ao ar, em ambiente de laboratório, até o momento do ensaio.

Observa-se, aos 28 dias de idade e relação água/aglomerante igual a 0,35, que apenas a mistura composta com 50% de escória de alto forno apresentou valores de resistência à compressão inferior àquela de referência, (-8%). Este fato também foi observado em pesquisa de PEREIRA (2003), na qual misturas compostas com EAF (65%) apresentaram resistências também inferiores à mistura de referência. As demais misturas, CV35, 10A, 20A e 30A apresentaram valores superiores, 26%, 26,8%, 34% e 25,5% na mesma ordem.

Para a relação água/aglomerante 0,50 e 0,65, as misturas compostas com cinza volante, CV35 e escória de alto forno E50, apresentaram valores inferiores ao de referência, -23% e -30,5% (0,50) e -40% e -27% (0,60), respectivamente.

Na mistura contendo 10% de cinza de casca de arroz, o valor obtido para $a/agl = 0,50$ foi semelhante àquele de referência e, para os teores de 20% e 30%, foram 10,6% e 5,9% superiores, respectivamente.

Para a relação $a/agl = 0,65$, nestas misturas, os valores obtidos foram superiores àquele de referência, 14,8% (10A), 20,3% (20A) e 8,3% (30A) (Figura 4.2 a).

Aos 91 dias, os concretos compostos com cinza volante e escória, para as três relações água/aglomerante, 0,35 – 0,50 e 0,65, apresentaram valores inferiores ao de referência, -28%, -13%, -31% para CV e -9%, -10% e -17% para a escória.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, 28 e 91 dias

Série	Relação a/ag	Resistência à compressão (MPa)	
		f_{28}	f_{91}
REF	0,35	53,7	67,9
	0,50	47,3	51,4
	0,65	27,6	35,0
10A	0,35	68,1	76,4
	0,50	46,9	62,1
	0,65	31,7	38,6
20A	0,35	72,0	85,6
	0,50	52,3	62,9
	0,65	33,2	41,7
30A	0,35	67,4	78,9
	0,50	50,1	65,1
	0,65	29,9	37,3
CV35	0,35	55,1	66,8
	0,50	36,6	44,6
	0,65	16,7	24,1
E50	0,35	49,3	61,8
	0,50	32,9	46,1
	0,65	20,2	29,0

Nas misturas compostas com cinza de casca de arroz, os valores foram sempre superiores ao de referência em igualdade de relação água/aglomerante. Para o teor de substituição de 10%, os acréscimos foram de 12,5%, 20,8% 22,4%; para 20% e 30% de

substituição os acréscimos foram de 26%, 22%, 19% e 16%, 26,6%, 6,6% respectivamente (Figura 4.2 b).

A Figura 4.1 apresenta a resistência à compressão com a idade de ensaio, 28 e 91 dias. Observa-se que, para a mistura de referência e relação água/aglomerante (a/g) 0,35, 0,50 e 0,65, houve um acréscimo na resistência à compressão, dos 28 para os 91 dias, de 26%, 9% e 27%, respectivamente. Da mesma forma, para as amostras compostas com 10% de CCA, os acréscimos foram de 12%, 32% e 22% e, para os teores de substituição de 20% e 30% de CCA, foram de 19%, 20% e 17%, 30% e 25%, respectivamente.

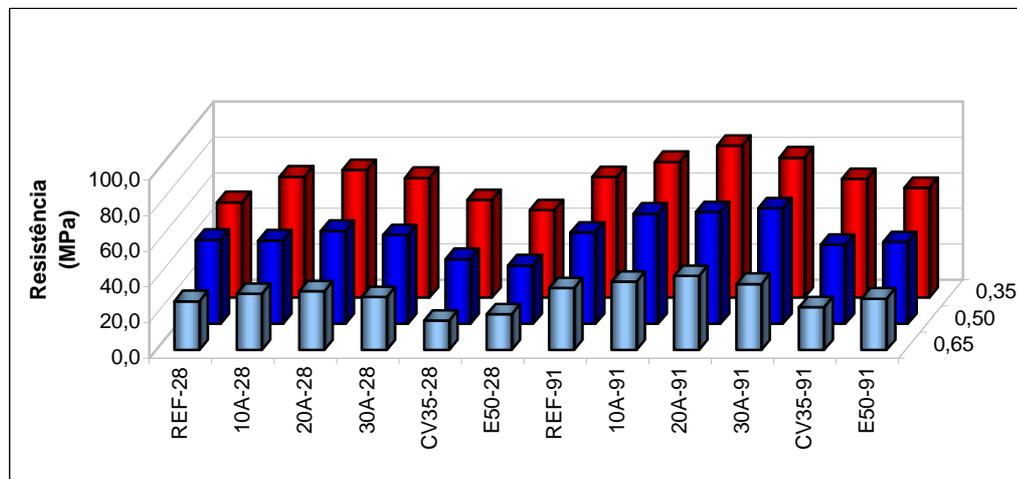


Figura 4.1 – Resistência à compressão aos 28 e 91 dias das misturas investigadas

Nas misturas compostas com cinza volante e escória de alto forno, nas mesmas relações água/aglomerante, esses acréscimos foram, na mesma ordem, de 21%, 22%, 44% e 25%, 40%, e 44%, respectivamente.

O aumento no teor de substituição de CCA de 10% para 20% resultou em alterações nos valores de f_c , para as relações água/aglomerante utilizadas de 6%, 12% e -11% aos 28 dias, e de 12%, 1,3% e 8% aos 91 dias (Figura 4.3).

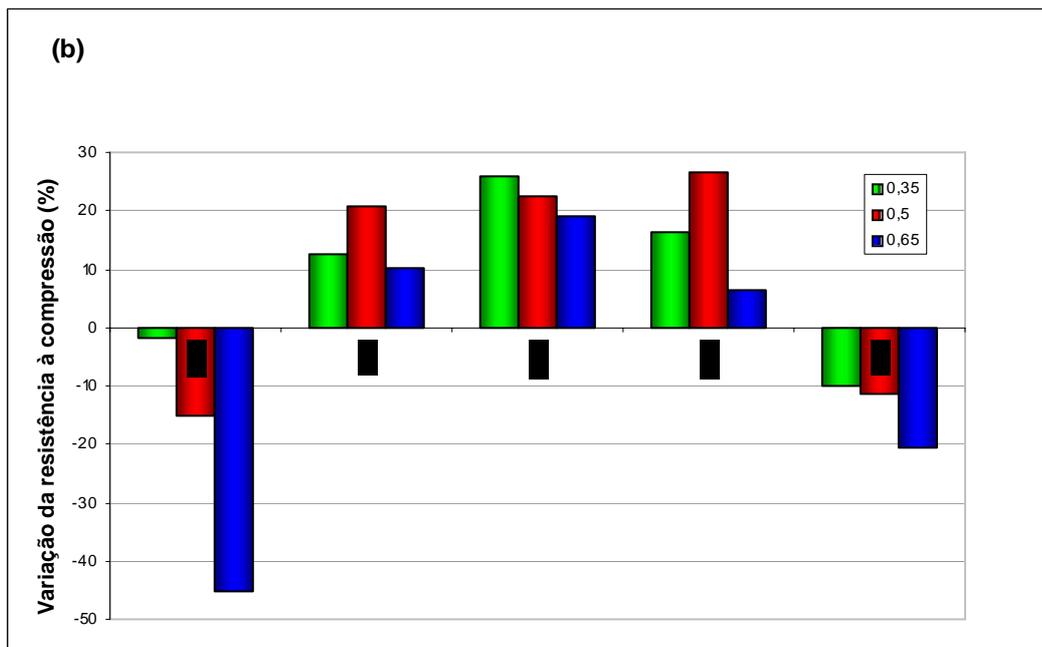
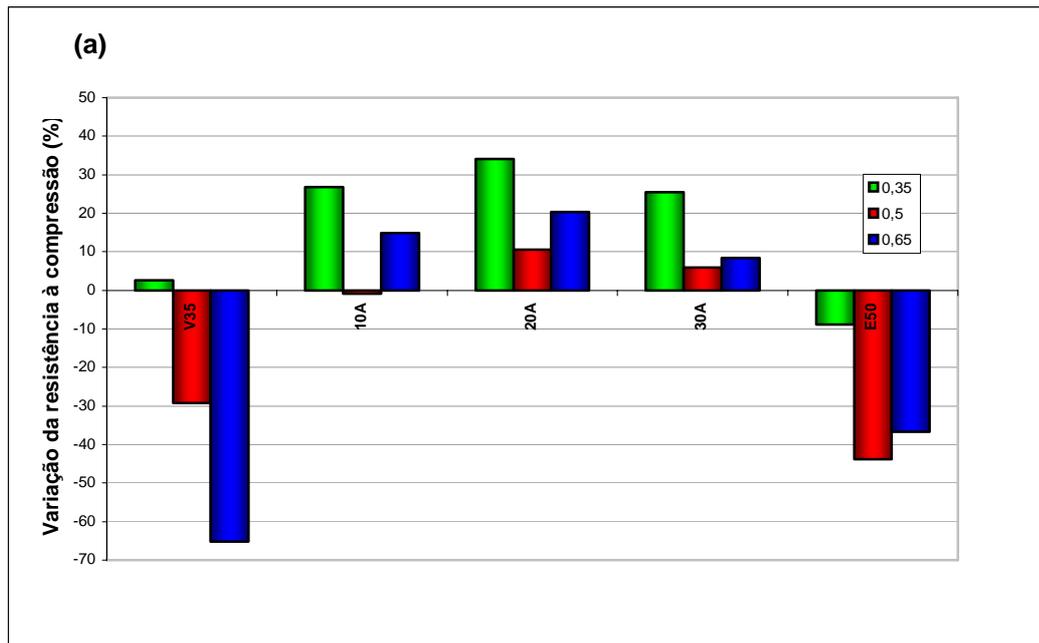


Figura 4.2 – (a) Comparação da variação da resistência à compressão das misturas minerais com a mistura de referência, ensaio aos 28 dias de idade. (b) Idem aos 91 dias de idade.

Quando o teor de substituição passou de 20 % para 30%, as alterações da resistência à compressão, aos 28 e 91 dias, foram de 7%, 4%, 11% e 8%, -35% e 12%, respectivamente (Figura 4.3 e Tabela 4.2).

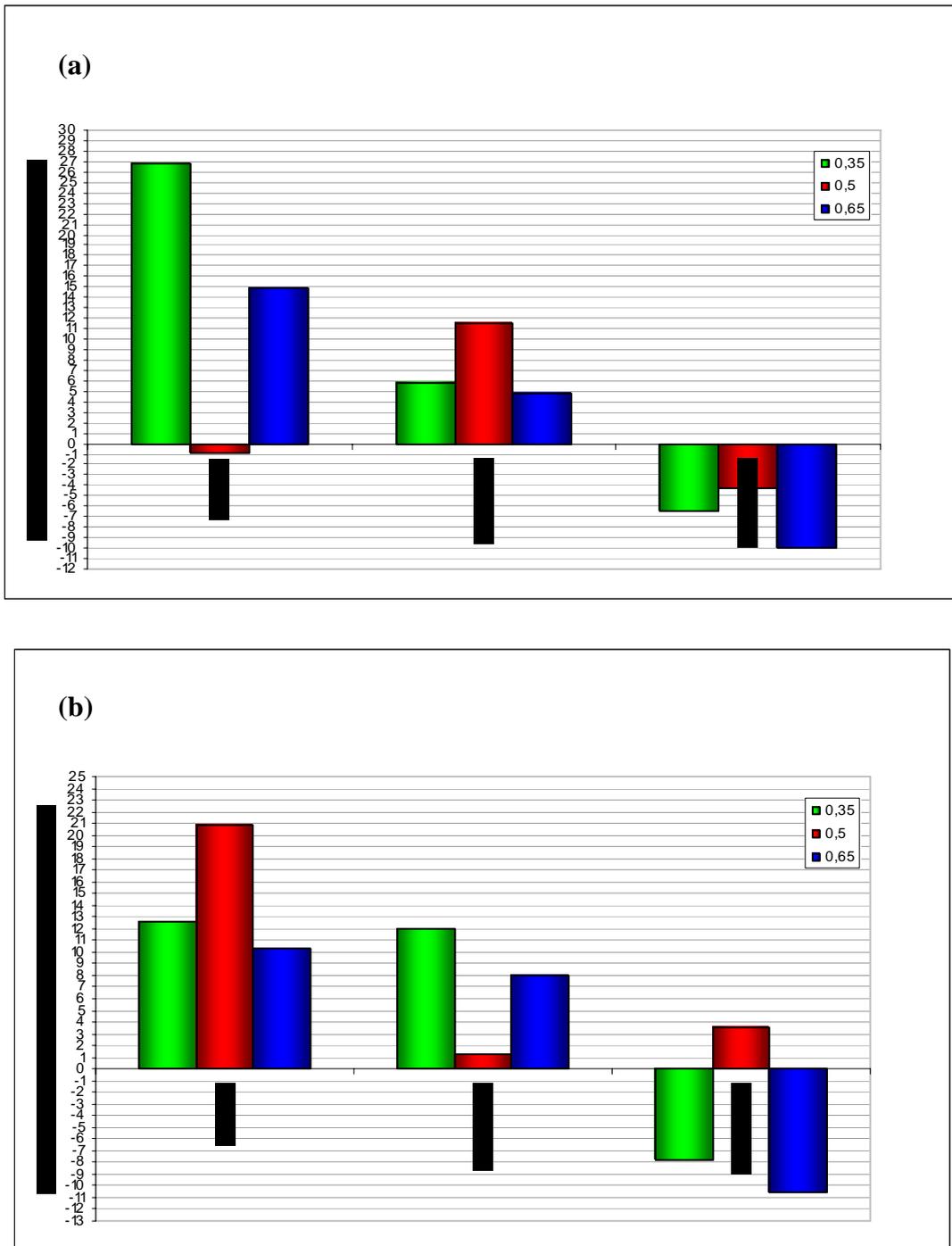


Figura 4.3 – Variação da resistência à compressão com o aumento dos níveis de substituição de CCA, (a) ensaio aos 28 dias de idade e (b) ensaio aos 91 dias de idade.

Tabela 4.2 – Variações percentuais da resistência à compressão com o aumento dos níveis de substituição de CCA, ensaio aos 28 e 91 dias de idade.

28 dias de idade			
Variação (%) de substituição de CCA	Relação a/ag		
	0,35	0,50	0,65
0% - 10%	26,82	-0,85	14,86
10% - 20%	5,73	11,57	4,73
20% - 30%	-6,39	-4,21	-9,94
91 dias de idade			
Variação (%) de substituição de CCA	Relação a/ag		
	0,35	0,50	0,65
0% - 10%	12,52	20,82	10,29
10% - 20%	12,04	1,29	8,03
20% - 30%	-7,83	3,50	-10,55

Este fato não foi observado por Ismail (1996), que notou em suas pesquisas reduções nas resistências à compressão com o aumento dos percentuais de substituição de 10% para 20% de CCA e de 20% para 30% de CCA.

4.3 Análise dos resultados de penetração de íons cloreto

Os resultados do ensaio de penetração de íons cloreto estão apresentados na Tabela 4.3 e Figura 4.4. Os resultados, aos 91 dias, foram obtidos em corpos de prova curados por 28 dias e após conservados ao ar, em ambiente de laboratório, até o momento do ensaio.

Da análise desses resultados, observa-se aumento da carga passante, em Coulombs, com aumento da relação água/aglomerante. Tal fato é também observado por diversos autores — Ozyildirim (1994), Regattieri (1999), Pereira (2002).— assim como diminuição da carga passante, devido à substituição parcial do cimento pelas adições minerais, de acordo com pesquisas de Cervo (2001), Dalri (2002) e Gomes (2003).

Em se tratando da cinza de casca de arroz, a diminuição da carga passante foi tanto maior quanto maior o teor de substituição de cimento por esta adição. Tal fato é observado por Mehta (1992), Cervo (2001) e Nehdi (2003). Dessa forma, para as misturas compostas com cinza de casca de arroz em teores de substituição de 10%, 20% e 30%, houve uma redução na carga passante, quando comparadas à mistura de referência e mesma relação água/aglomerante, 0,35, 0,50 e 0,65, de 55%, 46%, 51% (10A), 69%, 70%, 71% (20A) e 74%, 74% e 68% (30A) (Figura 5.3).

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de penetração de íons cloreto, aos 91 dias

Série	Relação a/ag	Penetração de cloretos (C)
		Idade - 91 dias
REF	0,35	1038,78
	0,50	1479,69
	0,65	1778,49
10A	0,35	472,32
	0,50	798,03
	0,65	876,42
20A	0,35	321,03
	0,50	445,77
	0,65	697,95
30A	0,35	270,72
	0,50	381,69
	0,65	567,86
CV35	0,35	343,67
	0,50	591,48
	0,65	898,88
E50	0,35	545,94
	0,50	742,91
	0,65	1104,30

Para essas mesmas relações água/aglomerante, o aumento no teor de substituição de cinza de casca de arroz de 10% para 20% resultou em decréscimo na carga passante de 32%, 44% e 20% respectivamente. Quando variou de 20% para 30% de substituição, o decréscimo foi de 16%, 14% e 19% (Tabela 4.4 e Figuras 4.5 e 4.6).

Nas misturas compostas com cinza volante a redução da carga passante, em relação ao concreto de referência, aos 91 dias foi de 67%, 60% e 49%. Naquelas compostas com escória de alto forno, as reduções foram de 47%, 50% e 38% (Figura 4.5). Este comportamento está de acordo com o relatado por CERVO 2001, DALRI (2002) e GOMES (2003).

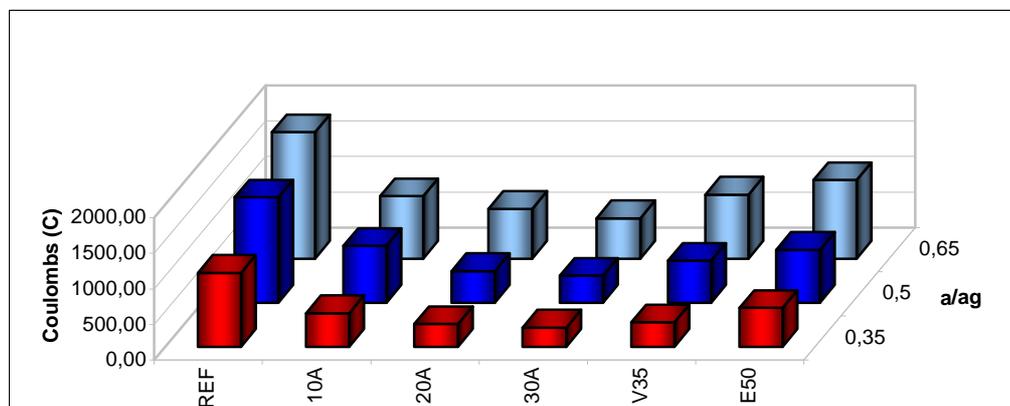


Figura 4.4 – Resultados do ensaio de penetração de cloretos das misturas com idade de 91 dias.

Tabela 4.4 – Reduções da penetração de cloretos com o aumento dos níveis de substituição de CCA, ensaio aos 91 dias de idade.

Variação (%) de substituição de CCA	91 dias de idade		
	Relação a/ag		
	0,35	0,50	0,65
0% - 10%	-54,53	-46,06	-50,72
10% - 20%	-32,03	-44,14	-20,36
20% - 30%	-15,67	-14,38	-18,64

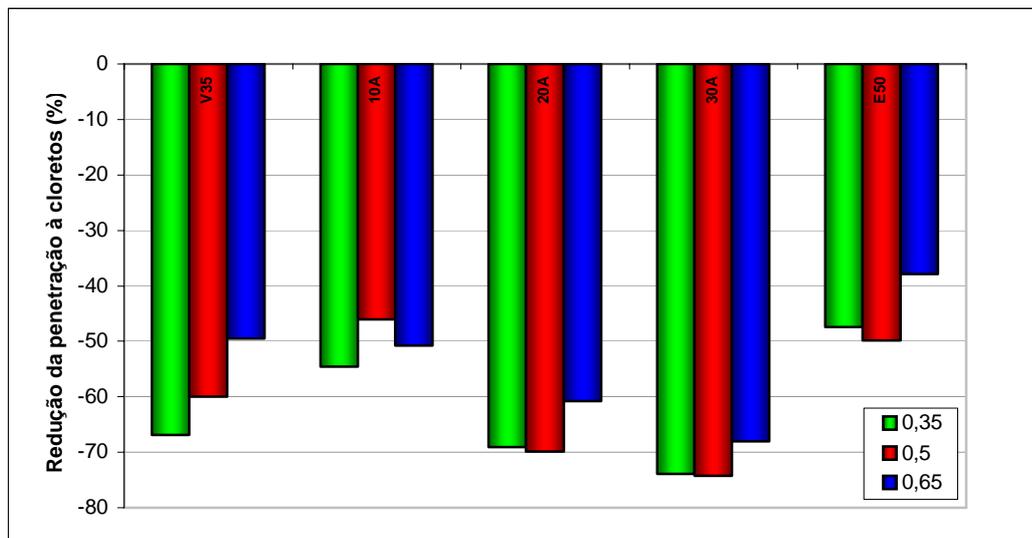


Figura 4.5 – Redução da penetração de cloretos das misturas compostas com adições minerais em relação ao traço de referência, aos 91 dias.

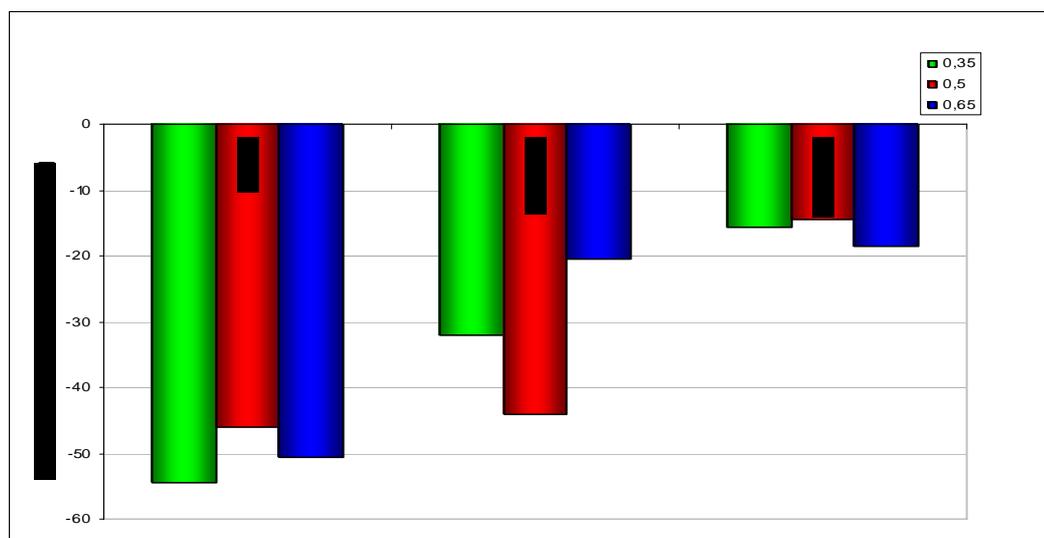


Figura 4.6 – Redução da penetração de cloretos com a variação do percentual de substituição da CCA, aos 91 dias.

4.4 Alcalinidade, teor de cloretos retidos e relação Cl^-/OH^-

Na Tabela 4.7, são apresentados os valores de pH, teor de cloretos retidos e relação iônica Cl^-/OH^- das misturas investigadas. Constatou-se, para todas as misturas investigadas que o valor de pH diminuiu com o aumento da relação a/ag. Para as relações a/ag adotadas, 0,35, 0,50 e 0,65, os valores de pH variaram de 12,56 a 12,65, de 12,53 a 12,64 e de 12,4 a 12,63, respectivamente.

O aumento no teor de substituição de cinza de casca de arroz de 10% para 30% resultou em pequena variação no valor de pH. Para os teores de substituição de 10% e 20%, os valores obtidos foram semelhantes àqueles da mistura de referência.

As misturas binárias contendo 50% de escória de alto forno e 35% de cinza volante apresentaram, para as relações a/ag adotadas, valores semelhantes de pH e pouco inferiores ao da mistura de referência, para as relações a/ag 0,50 e 0,65.

Entre todas as misturas investigadas, a de referência foi a que apresentou os maiores valores de cloretos retidos, 0,185%, 0,193% e 0,209%, referente as relações a/ag adotadas, 0,35, 0,50 e 0,65.

Para as misturas compostas com cinza de casca de arroz a de menor teor de substituição apresentou os maiores teores de cloretos retidos, 0,070%, 0,128% e 0,177%, para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 respectivamente. Este comportamento se justifica pela diminuição no teor de cimento e conseqüentemente, no teor de aluminatos.

Nas misturas compostas com 50% de escória de alto forno e com as mesmas relações a/ag, os valores de cloretos retidos foram 0,095%, 0,161% e 0,161%.

Naquelas contendo 35% de cinza volante e as mesmas relações a/ag, os valores foram 0,112%, 0,144% e 0,177%.

Os maiores percentuais de retenção de cloretos das misturas compostas com CV em relação às misturas compostas com CCA estão de acordo com a pesquisa realizada por Isaia (1995), que afirmou que este fato se explica pelo maior teor de alumina apresentado pela CV (27,7%) contra (2,6%) da CCA.

Observa-se, para todas as misturas, que houve aumento da relação Cl^-/OH^- , com o aumento da relação a/ag.

Tabela 4.5 – Alcalinidade, teor de cloreto retido e relação iônica Cl⁻/OH⁻, aos 91 dias.

Misturas	a/ag	pH	% Cl retido	OH (%)	Cl ⁻ /OH ⁻
REF	0,35	12,7	0,185	0,077	2,380
	0,50	12,6	1,193	0,0709	2,722
	0,65	12,6	0,210	0,0692	3,034
10A	0,35	12,6	0,079	0,076	1,039
	0,50	12,6	0,128	0,073	1,753
	0,65	12,6	0,177	0,073	2,424
20A	0,35	12,6	0,063	0,076	0,829
	0,50	12,6	0,112	0,074	1,513
	0,65	12,6	0,128	0,069	1,855
30A	0,35	12,6	0,046	0,062	0,742
	0,50	12,5	0,063	0,058	1,086
	0,65	12,5	0,112	0,058	1,931
CV35	0,35	12,6	0,112	0,076	1,250
	0,50	12,6	0,144	0,063	2,555
	0,65	12,5	0,177	0,53	3,038
E50	0,35	12,6	0,095	0,071	1,577
	0,50	12,6	0,161	0,063	2,285
	0,65	12,4	0,161	0,53	4,116

As misturas contendo adições minerais, de modo geral, apresentaram relações Cl⁻/OH⁻ menores do que a do traço de referência. Esta última, apresentou relações Cl⁻/OH⁻ que variaram entre os limites de 2,381 a 3,034.

Nas misturas contendo 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, as relações Cl⁻/OH⁻ variaram de 1,039 a 2,424, de 0,829 a 1,855 e de 0,742 a 1,931, respectivamente. Em igualdade de relação a/ag, constata-se a redução na relação Cl⁻/OH⁻, com o aumento no teor de substituição.

Nas misturas compostas com 50% de escória de alto forno, as relações Cl⁻/OH⁻ variaram de 1,577 a 4,116, sendo os valores para as relações a/ag 0,5 e 0,65 semelhantes àquele da mistura de referência, o último dado superior.

Para as misturas contendo 35% de cinza volante, as relações Cl⁻/OH⁻ variaram de 1,250 a 3,038. Este último dado, a superior à amostra de referência.

Os maiores valores de Cl⁻/OH⁻ foram: 4,116 para as relações a/ag 0,65 na mistura contendo 50% de EAF, e 3,038 para a relação a/ag 0,65 e a mistura contendo 35% de cinza volante. Os menores valores de Cl⁻/OH⁻ foram: 0,752 e 0,809 para as relações a/ag 0,35 das misturas contendo 30% e 20% de cinza de casca de arroz, respectivamente. A relação Cl⁻/OH⁻ é um excelente indicador de possibilidade de corrosão de armadura (ISAIA,1992). Logo

observou-se que as misturas compostas com CCA propiciam boas condições de proteção em ambientes com cloretos uma vez que estas apresentam, para as mesmas relações a/ag, valores de Cl⁻/OH⁻ inferiores à amostra de referência.

4.5 Análise dos resultados de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata

Os resultados do ensaio de penetração de íons cloreto por aspersão de nitrato de prata estão apresentados na Tabela 4.5 e Figura 4.7. Os resultados, aos 91 dias, foram obtidos segundo ensaio previamente descrito no Capítulo III.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de penetração de íons cloreto por aspersão de nitrato de prata, índice K(mm), aos 91 dias.

Série	Relação a/ag	Índice K de penetração de
		cloretos (mm) Idade - 91 dias
REF	0,35	1,93
	0,50	2,74
	0,65	3,05
10A	0,35	1,12
	0,50	2,19
	0,65	2,61
20A	0,35	1,48
	0,50	2,13
	0,65	2,77
30A	0,35	1,90
	0,50	2,50
	0,65	3,07
CV35	0,35	1,99
	0,50	2,68
	0,65	3,92
E50	0,35	1,44
	0,50	2,10
	0,65	2,62

Da análise desta tabela, observa-se que as misturas compostas com 10% e 20% de cinza de casca de arroz e aquela composta com 50% de escória de alto forno apresentaram valores de K, para as três relações a/ag, inferiores àqueles da mistura de referência. A mistura

composta com 30% de cinza de casca de arroz apresentou valores semelhantes ao da mistura de referência.

Os aumentos nos teores de substituição de cimento por cinza de casca de arroz acarretaram acréscimos nos índices K(mm) de penetração (Figura 4.7).

Assim, para as misturas compostas com cinza de casca de arroz em teores de substituição de 10%, 20% e 30% houve variações no índice k(mm), quando comparadas à mistura de referência e à mesma relação água/aglomerante, 0,35, 0,50 e 0,65, de -42,16%, -19,95%, -14,42% (10A), -23,23%, -22,32%, -9,20% (20A) e -1,46%, -8,79% e 0,74% (30A) (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Comparação percentual dos índices K(mm) das misturas compostas com adições minerais e a mistura de referência.

Comparação com o REF			
misturas	Relações a/ag		
	0,35	0,50	0,65
REF	-	-	-
CV	3,21	8,73	18,67
10A	-42,16	-19,95	-14,42
20A	-23,23	-22,32	-9,20
30A	-1,46	-8,79	0,74
E50	-25,38	-23,22	-14,15

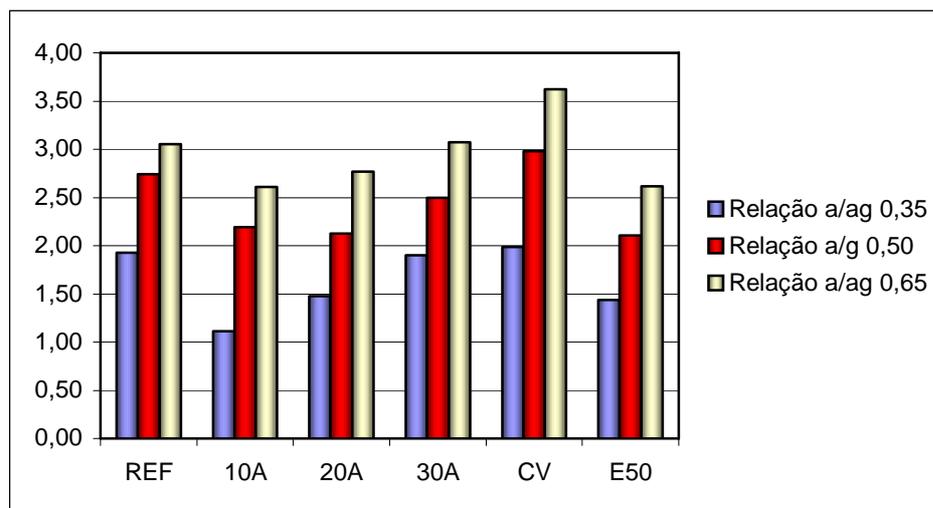


FIGURA 4.7 – Resultados do índice K(mm) do ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata das misturas estudadas, idade de 91 dias

Para essas mesmas relações água/aglomerante, o aumento no teor de substituição de cinza de casca de arroz de 10% para 20% resultou em variações do índice K(mm) de 32,72%, -2,95% e 6,10%, respectivamente. Quando variou de 20% para 30% de substituição, ocorreram aumentos no índice de penetração K(mm) de 28,35%, 17,42% e 10,94%, para as respectivas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65.

Nas misturas compostas com cinza volante, ocorreram aumentos no índice K(mm), em relação ao concreto de referência, aos 91 de 3,21%, 8,73% e 18,67%. Naquelas compostas com escória de alto forno, observaram-se reduções de -25,38%, -23,22% e -14,15%.

De acordo com Wee et al (2000), K depende da microestrutura e de alterações que ocorrem nesta, como, por exemplo, a combinação dos íons cloretos.

De fato, como exposto no item 4.6, há uma alteração na estrutura de poros devido à substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, tanto mais significativo quanto maior o teor de substituição. Entretanto, o aumento no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz resultou em aumento na profundidade de penetração de cloreto K e na diminuição da capacidade de fixação de cloreto, conforme apresentado no item 4.5. Assim, acredita-se que o efeito de fixação de cloretos foi mais preponderante que a alteração na estrutura de poros.

4.6 Análise da solução aquosa dos poros

Os resultados dos ensaios de solução dos poros das misturas investigadas aos 91 dias são apresentados na Tabela 4.8.

Segundo SHI (2004), há uma concentração apreciável de íons de Na^+ , K^+ , OH^- , Ca^{2+} e SO_4^{2-} logo após o contato do cimento com a água. Entretanto, depois da pega e da hidratação inicial, a concentração dos íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} diminuem a valores negligenciáveis, ficando a solução composta essencialmente de hidróxidos alcalinos. Os resultados apresentados na tabela 4.8 comprovam este fato.

Observa-se também destes resultados que a concentração dos íons alcalinos (Na^+ , K^+) associados com os íons OH^- na solução dos poros, diminui significativamente com o aumento do nível de substituição de cimento por cinza de casca de arroz.

Ocorre, assim, uma diminuição na alcalinidade, porém o valor mais baixo observado, 13,02, obtido pela mistura composta com 30% de cinza de casca de arroz e relação a/ag 0,65, é adequado para assegurar a passivação da armadura.

Constata-se, para uma mesma mistura, redução na concentração dos íons Na^+ , K^+ , OH^- , Ca^{2+} e SO_4^{2-} com o aumento da relação a/ag, assim como diminuição na concentração destes íons com o aumento no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz.

Da mesma forma, há uma redução no equivalente alcalino em sódio ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$) com o aumento da relação a/ag, bem como com o aumento no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz. Os menores valores foram obtidos para a mistura composta com 30% de cinza de casca de arroz. Os níveis de potássio foram sempre muito maiores do que os de sódio.

A redução no teor alcalino em sódio, com o aumento da relação a/ag, é, provavelmente, como relatado por Gastaldini & Isaia (1999), devido à melhor condição de hidratação, resultando numa maior quantidade de C-S-H formado e, conseqüentemente, mais íons de sódio e potássio estarão inseridos.

A concentração de OH^- variou muito pouco em função das composições aglomerantes investigadas. Isto leva a crer que os cátions alcalinos, originados durante a hidratação da cinza de casca de arroz, foram efetivos em aumentar a concentração de OH^- da solução dos poros.

TABELA 4.8 – Análise da solução aquosa dos poros (Mmol/l) para relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65 e idade de hidratação de 91 dias.

Mistura	pH	Na^+	K^+	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	OH^-
REF 0,35	13,17	15,09	83,0	1,51	0,6704	147,911
REF 0,50	13,13	10,7	52,2	3,12	0,06131	134,896
REF 0,65	13,06	5,3	22,2	1,52	0,02321	114,815
10A 0,35	13,12	10,8	68,8	0,45	0,5777	131,826
10A 0,50	13,09	8,7	47,0	1,40	0,5837	123,027
10A 0,65	13,07	4,3	19,0	6,60	0,0244	117,490
20A 0,35	13,09	8,8	64,0	0,43	0,4933	123,027
20A 0,50	13,05	4,7	23,0	0,67	0,05399	122,202
20A 0,65	13,04	4,3	19,0	0,20	0,03421	109,648
30A 0,35	13,06	7,0	55,1	0,32	0,3800	114,815
30A 0,50	13,04	4,0	19,5	0,63	0,08642	109,648
30A 0,65	13,02	3,1	15,8	0,93	0,02420	104,713

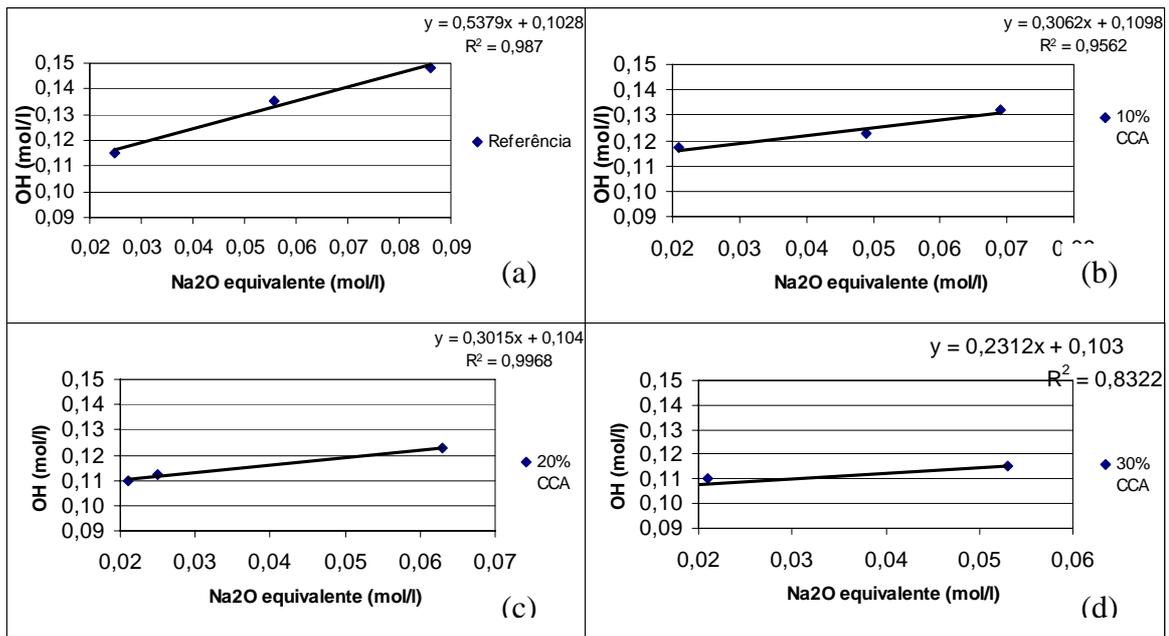


FIGURA 4.8 – Correlação entre a concentração de OH⁻ e o equivalente alcalino em sódio, (a) referência (b) 10%CCA, (c) 20% CCA, (d) 30% CCA.

Há uma boa correlação entre o teor de OH⁻ e o Na₂O equivalente da solução dos poros (Figura 4.8).

Na Tabela 4.9, são apresentados os valores de condutividade elétrica específica da solução dos poros, calculados a partir das equações apresentadas por SHI et al (1998), considerando a concentração de todos os íons, Na⁺, K⁺, OH⁻, Ca²⁺ e SO₄²⁻ (coluna A). Entretanto, SHI (2004) relata que devido aos valores negligenciáveis de concentração de Ca²⁺ e SO₄²⁻ na solução dos poros, a condutividade elétrica específica da solução dos poros pode ser determinada com uma boa precisão usando as mesmas equações, considerando apenas as concentrações Na⁺, K⁺, OH⁻. Os resultados apresentados na tabela 4.6.2, (coluna B) comprovam este fato, ou seja, a variação nos valores obtidos é muito pequena.

Nas Figuras 4.9 e 4.10, constata-se a excelente correlação existente entre a condutividade elétrica específica e as concentrações de íons OH⁻ e Na₂O equivalente.

Para todas as misturas investigadas, o aumento na relação a/ag resultou numa redução nos valores de condutividade elétrica específica e isso se deve à diminuição na concentração dos íons, como já comentado anteriormente. Além disso o aumento no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz também resultou em diminuição na condutividade elétrica específica.

TABELA 4.9 – Na₂O_{eq}, condutividade elétrica e condutividade elétrica relativa para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 aos 91 dias.

Mistura	* Na ₂ O _{eq}	Condutividade Elétrica (ohm ⁻¹) (A)	Condutividade Elétrica (ohm ⁻¹) (B)	Condutividade Elétrica Relativa (%) (A)
REF 0,35	0,087	2,834	2,825	100,00
REF 0,50	0,056	2,504	2,487	100,00
REF 0,65	0,025	2,101	2,025	100,00
10A 0,35	0,069	2,525	2,523	89,09
10A 0,50	0,049	2,294	2,286	91,61
10A 0,65	0,021	2,076	2,059	98,81
20A 0,35	0,063	2,371	2,365	83,66
20A 0,50	0,025	1,993	1,989	79,59
20A 0,65	0,021	1,929	1,927	91,81
30A 0,35	0,053	2,204	2,202	77,76
30A 0,50	0,021	1,933	1,929	77,19
30A 0,65	0,017	1,837	1,831	87,43

Para a mistura de referência, 10A, 20A e 30A, os valores variaram de 2,101ohm⁻¹ a 2,834ohm⁻¹, de 2,076ohm⁻¹ a 2,525 ohm⁻¹, de 1,929ohm⁻¹ a 2,371ohm⁻¹ e de 1,837ohm⁻¹ a 2,204ohm⁻¹, respectivamente.

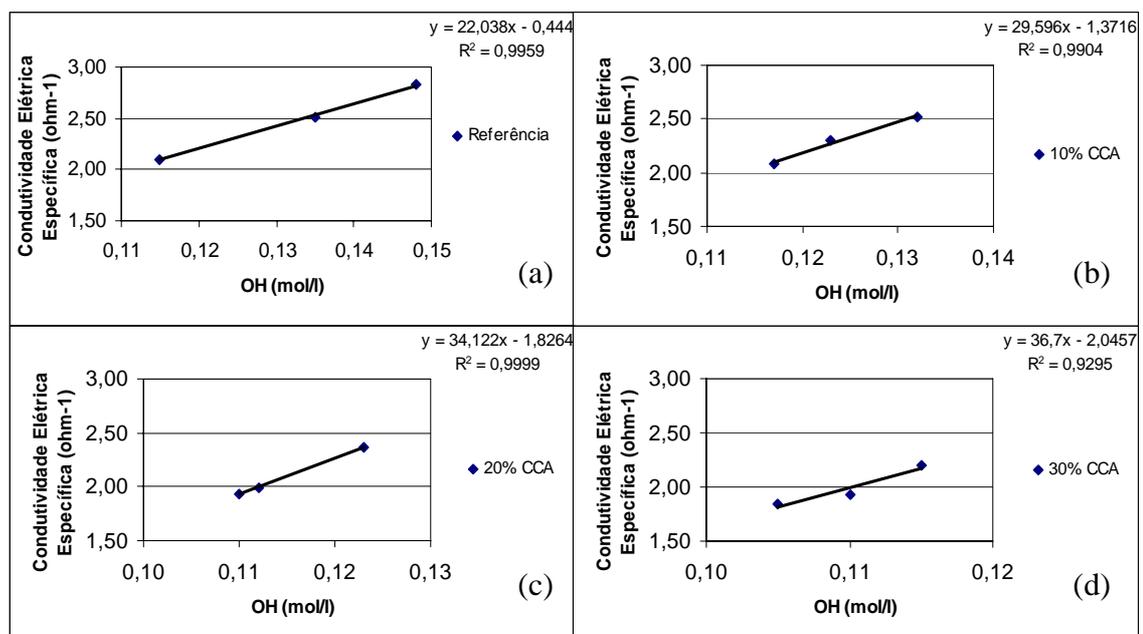


FIGURA 4.9 – Correlação entre a condutividade elétrica específica e a concentração de OH-, (a) referência (b) 10%CCA, (c) 20% CCA, (d) 30% CCA.

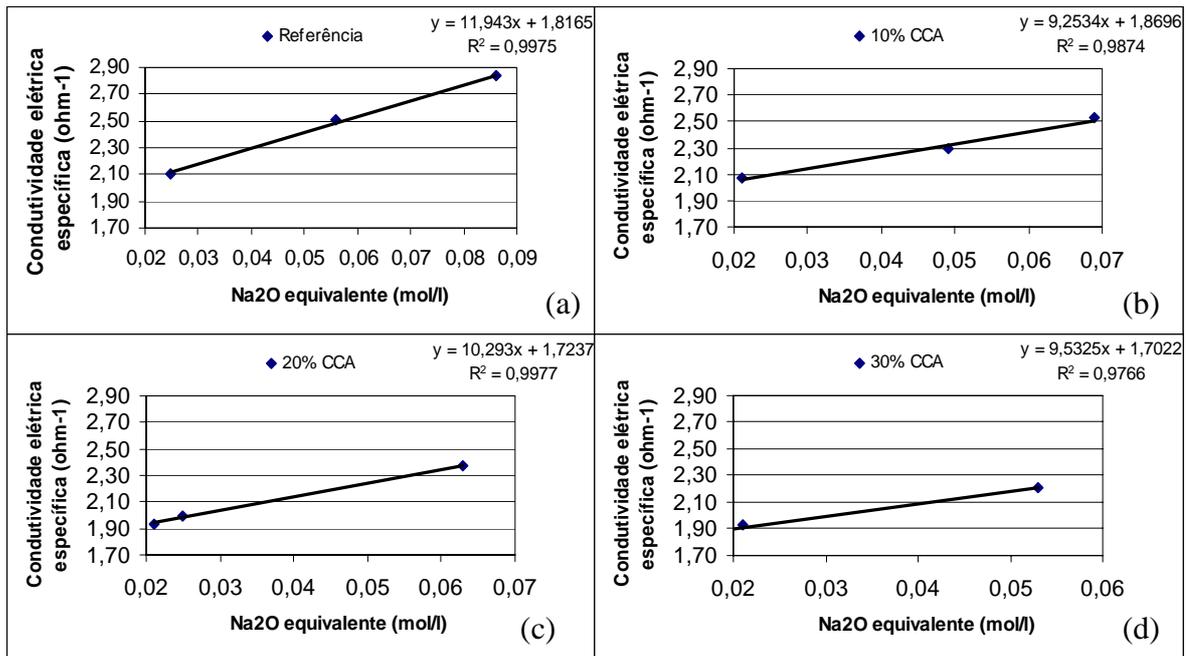


FIGURA 4.10 – Correlação entre a condutividade elétrica específica e Na₂Oeq, (a) referência (b) 10%CCA, (c) 20% CCA, (d) 30% CCA.

4.7 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados num equipamento da marca Micromeritics, modelo Autopore II 9220, à pressão de 414 MPa, permitindo a determinação de tamanho de poro de até 3nm.

Foi considerado um ângulo de contato de 130° e uma tensão superficial de mercúrio de $4,85 \times 10^{-1}$ N/m.

Os resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio são apresentados na Tabela 4.10. A partir destes resultados, foi possível determinar o diâmetro crítico, que é definido como a menor dimensão de poro acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados de uma extremidade a outra da amostra (Sato, 1998). Além disso, foi possível detectar a quantidade de mercúrio intrudido em poros acima e abaixo de 50nm. Capilares maiores que 50nm, denominados macroporos, são considerados os mais nocivos quanto ao transporte de massa, enquanto que poros menores que 50nm, denominados microporos, interferem mais na retração por secagem e na fluência, como declarou Mehta (1994 *apud* SATO, 1998).

TABELA 4.10 – Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio

Mistura	Volume de intrusão de mercúrio (mL/g)	Ø Crítico nm	Ø > 50nm	Ø < 50nm	Faixa de poros de maior volume de Int. Mercúrio - nm
REF 0,35	0,0979	7,86	0,0404	0,0575	1,65 - 10,09
REF 0,50	0,1055	10,16	0,0448	0,0607	1,65 - 12,86
REF 0,65	0,2438	12,92	0,1278	0,1160	1,65 - 16,34
10A 0,35	0,1189	10,05	0,0427	0,0762	1,65 - 12,94
10A 0,50	0,206	12,0	0,0686	0,1374	1,65 - 12,97
10A 0,65	0,2929	12,94	0,1381	0,1548	1,65 - 16,26
20A 0,35	0,1194	7,9	0,0358	0,0836	1,65 - 10,02
20A 0,50	0,1953	10,1	0,0680	0,1273	1,65 - 12,83
20A 0,65	0,3172	12,97	0,1367	0,1805	1,65 - 14,93
30A 0,35	0,1363	6,05	0,0301	0,1062	1,65 - 6,05
30A 0,50	0,2273	7,25	0,0221	0,2052	1,65 - 7,25
30A 0,65	0,3191	10,07	0,1066	0,2125	1,65 - 12,94

Como esperado, o aumento na relação a/ag resultou numa alteração na estrutura de poros das misturas investigadas. Constata-se aumento no valor do diâmetro crítico e no volume total de intrusão de mercúrio, decorrentes da alteração na distribuição de tamanho de poros e de sua interconexão. Há um deslocamento da curva de distribuição de tamanho de poros no sentido dos menores, evidenciando o refinamento destes (Figura 4.11).

Quando comparada à mistura de referência e a mesma relação a/ag, observa-se um aumento no volume total de intrusão de mercúrio, tanto maior, no geral, quanto maior o teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz. Entretanto, a maior parte do mercúrio intrudido nessas misturas encontra-se em poros menores do que 50 nm (Tabela 4.10).

Nas Figuras 4.12 a 4.15, estão ilustradas as distribuições de volume de poros em função de seus diâmetros. Verifica-se que ao aumentar a relação a/ag, e, portanto a porosidade total, o valor máximo de volume de poros intrudidos ocorreu em diâmetros maiores, comportamento semelhante àquele obtido por Sato (1998) em concretos com escória.

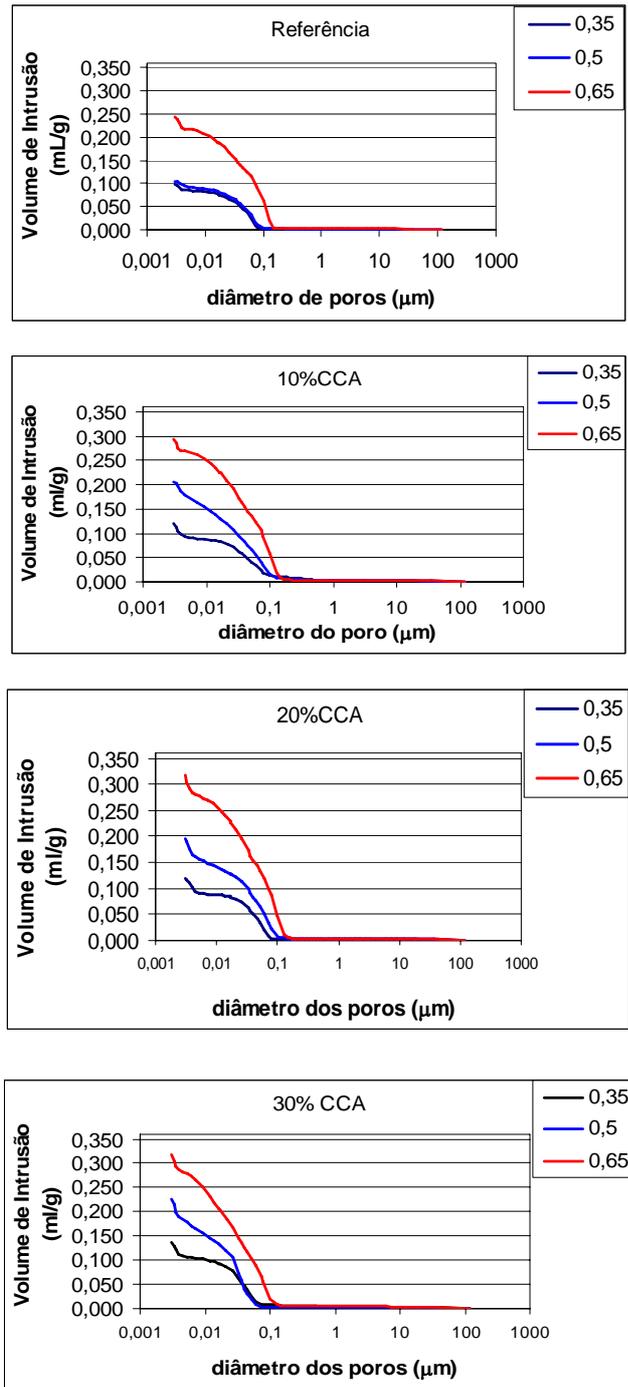


Figura 4.11 – Volume de mercúrio intrudido acumulado em função das dimensões de poros na idade de 91 dias.

Para o concreto de referência, com a variação da relação a/a_g de 0,35 para 0,65, o valor máximo de volume de poro intrudido ocorreu entre os diâmetros 0,0605 a 0,1009 μm . Para as misturas contendo cinza de casca de arroz, a variação foi de 0,0604 a 0,1010 μm (10%CCA), 0,0608 a 0,0787 μm (20%CCA) e 0,0263 a 0,0750 μm (30%CCA) respectivamente, ou seja,

com o aumento no teor de substituição, houve uma redução no diâmetro de poro onde ocorreu o valor máximo de volume de mercúrio intrudido.

Observa-se também das Figuras 4.12 a 4.15 que para o concreto de referência e relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, há uma maior concentração de volume de mercúrio intrudido na faixa de poro de 0,0165 a 0,1009 μm – (0,35), de 0,0165 a 0,1286 μm (0,50) e de 0,0165 a 0,1634 μm (0,65). Para os concretos compostos com cinza de casca de arroz e mesmas relações a/ag essas faixas são: de 0,0165 a 0,1294 μm , de 0,0165 a 0,1297 μm e de 0,0165 a 0,1626 μm – 10%CCA; 0,0165 a 0,1002 μm , 0,0165 a 0,1283 μm e 0,0165 a 0,1493 μm – 20%CCA; de 0,0165 a 0,0605 μm , de 0,0165 a 0,0725 μm e de 0,0165 a 0,1294 μm – 30%CCA.

Constata-se que, para todas as misturas investigadas, o aumento da relação a/ag acarreta num aumento da faixa, assim como, para uma mesma relação a/ag, há redução desta com o aumento no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz.

Como relatado anteriormente, o menor poro medido tem diâmetro de 0,003 μm . Assim, verifica-se, das misturas investigadas, figuras (4.12 a 4.15), que a quantidade de poros com dimensão de 0,003 μm (menor valor na abscissa das figuras) é diferente de zero, indicando a presença de poros menores. A quantidade desses, nos concretos com cinza de casca de arroz, é superior à do concreto de referência e aumenta com o acréscimo no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz.

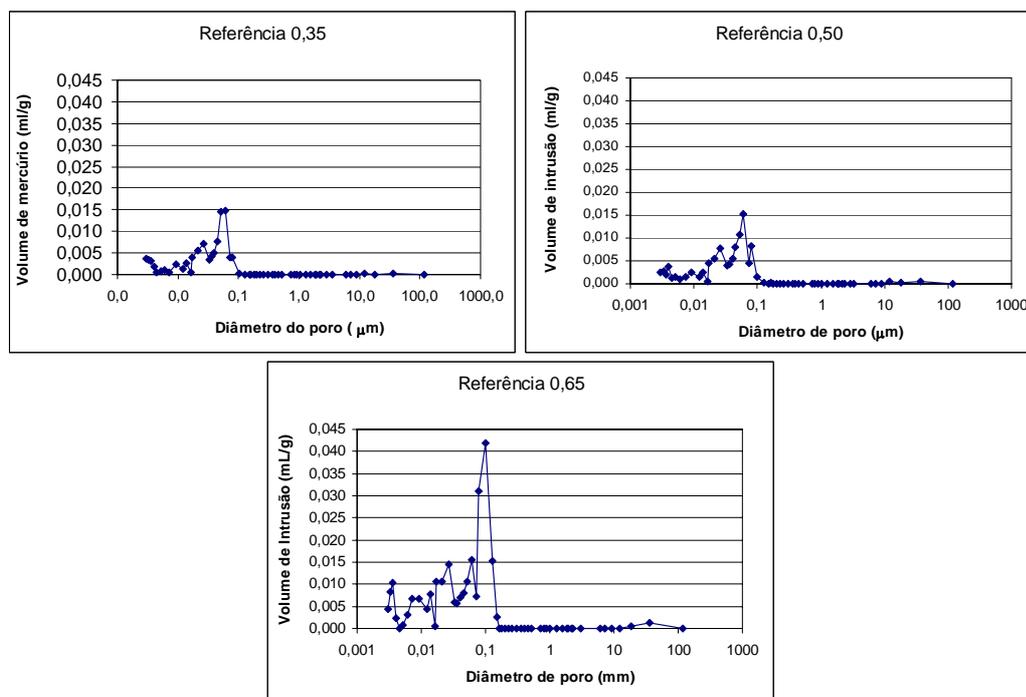


Figura 4.12 – Volume de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros - Referência

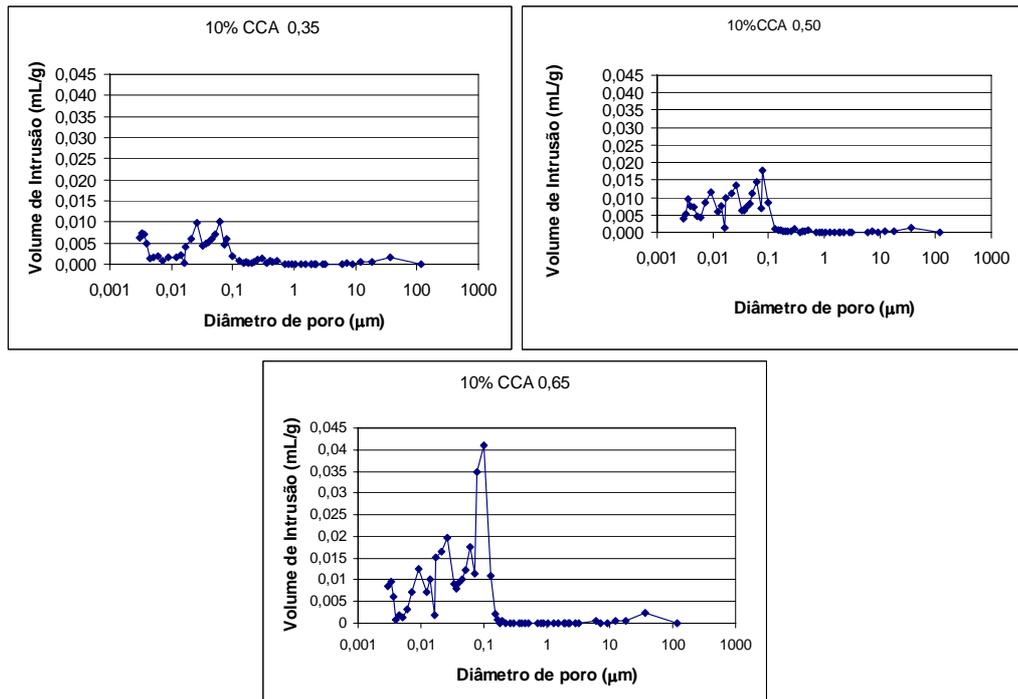


Figura 4.13 – Volume de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros - 10 % CCA

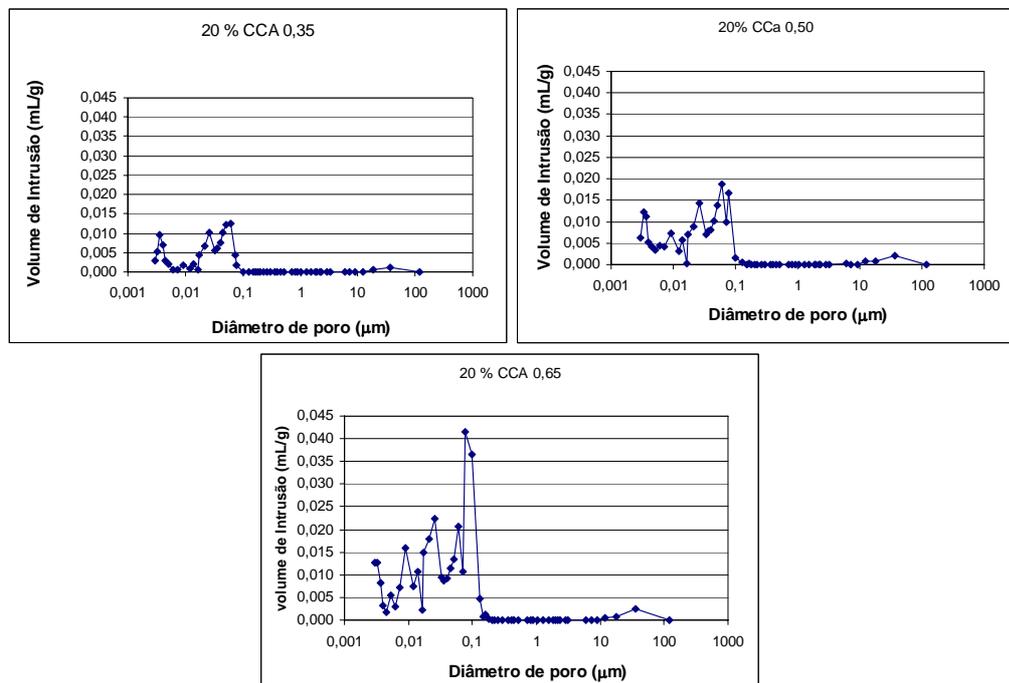


Figura 4.14 – Volume de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros - 20 % CCA

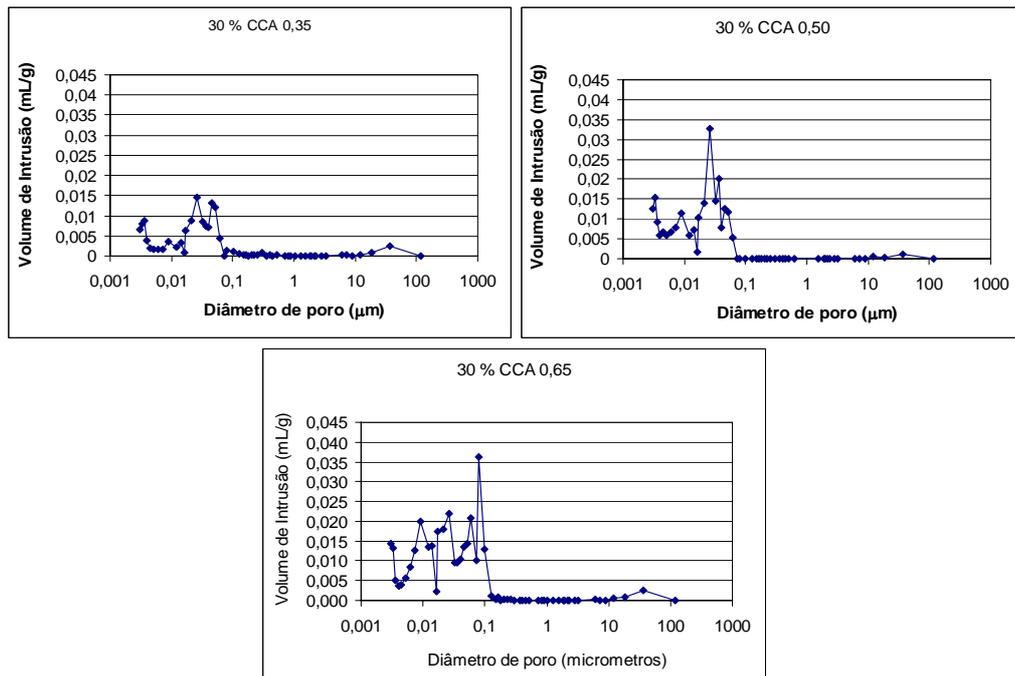


Figura 4.15 – Volume de mercúrio intrudido em função das dimensões dos poros - 30% CCA

Na seqüência desta pesquisa, foi previsto um estudo preliminar referente à resistividade elétrica aparente do concreto. Esta propriedade é de fundamental importância para a durabilidade do concreto, pois é vital para o controle da corrosão do mesmo, reduzindo a mobilidade dos íons no seu interior e controlando de forma eficiente o aumento da taxa de corrosão. Andrade (1995) afirma que a durabilidade das estruturas de concreto armado é resultado da ação protetora do concreto sobre o aço. Quando esta proteção deixa de existir, a estrutura torna-se vulnerável ao fenômeno de corrosão e, nestas condições, é controlada pela resistividade elétrica e pela disponibilidade de oxigênio.

Objetivou-se com isto uma investigação mais completa a respeito da durabilidade do concreto, bem como a realização de um estudo inicial, que poderá servir de referência para pesquisas futuras que envolverem a influência das adições minerais na resistividade elétrica do concreto e, por conseguinte, sua influência na durabilidade.

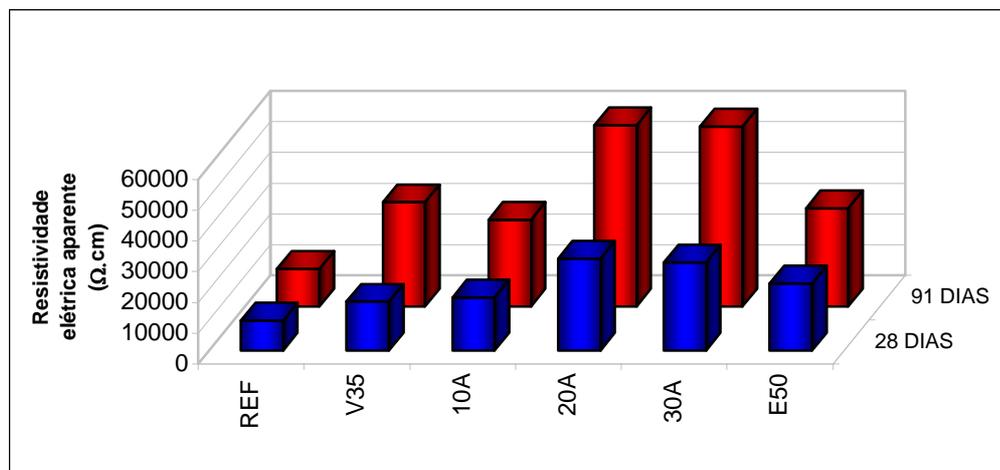
4.8 Análise do ensaio de resistividade elétrica aparente

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente do concreto são apresentados na Tabela 4.11 e Figura 4.16.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de resistividade elétrica aparente

Série	A/Agl	Resis. Elétrica Aparente ($\Omega \cdot \text{cm}$)	
		Idades	
		28 dias	91 dias
REF	0,50	9855	12228
CV35	0,50	15955	33894
10A	0,50	17258	28144
20A	0,50	29915	58881
30A	0,50	28665	58533
E50	0,50	21923	31958

Da análise destes, constata-se o aumento significativo da resistividade elétrica com a elevação do grau de hidratação, de 28 para 91 dias (Figura 4.17); assim como o aumento da resistividade elétrica dos concretos, em que parte do cimento foi substituída pelas adições minerais.

**Figura 4.16 – Resultados da resistividade elétrica aparente, ensaio aos 28 e 91 dias**

Para concretos compostos com 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, o acréscimo do grau de hidratação resultou em aumento na resistividade elétrica de 63,08%, 96,83% e 104,20%, respectivamente. Da mesma forma, para os concretos compostos com cinza volante e escoria de alto forno, houve um aumento na resistividade elétrica de 112,44% e 45,77% com a elevação do grau de hidratação.

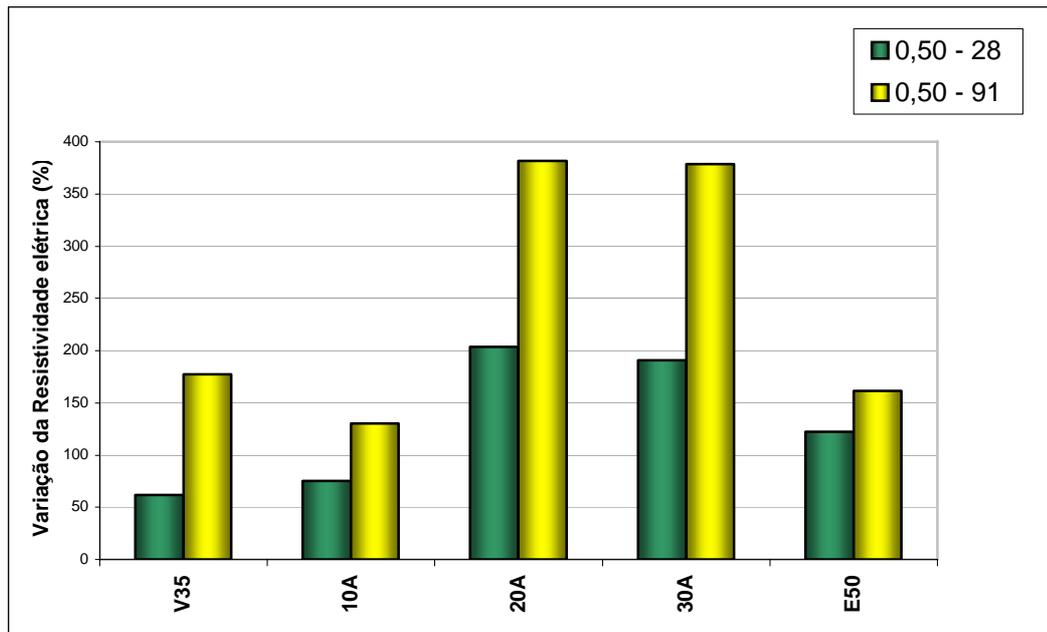


Figura 4.17 – Aumento da resistividade elétrica das misturas compostas com adições minerais em relação a mistura de referência, idades 28 e 91 dias, relação a/ag 0,50.

O aumento do nível de substituição de 10% para 20% de CCA, em massa de cimento, resultou em aumentos na resistividade elétrica do concreto de 73,34% e 109,22%, para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente. Com a variação dos teores de substituição de CCA de 20% para 30%, observou-se uma diminuição de -4,18% e -0,59% para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente. O estudo mostrou que a variação de 10% de substituição de CCA para 30% acarretou aumentos na resistividade elétrica do concreto de 66,10% e 13,55% para as idades de 28 e 91 dias (Figura 4.18).

Quando confrontados com a mistura de referência, (100%) de cimento, àquelas compostas com 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz apresentaram valores de resistividade elétrica, aos 28 dias, de 75,12%, 203,55 e 190,87% superiores. Aos 91 dias, de idade essas mesmas misturas apresentaram valores de resistividade elétrica 130,16%, 381,54% e 378,70% superiores à de referência (Figura 4.17).

Para as misturas binárias compostas com cinza volante e escoria de alto forno houve um aumento da resistividade elétrica aos 28 dias de 62% e 122% e aos 91 dias de 177% e 161%.

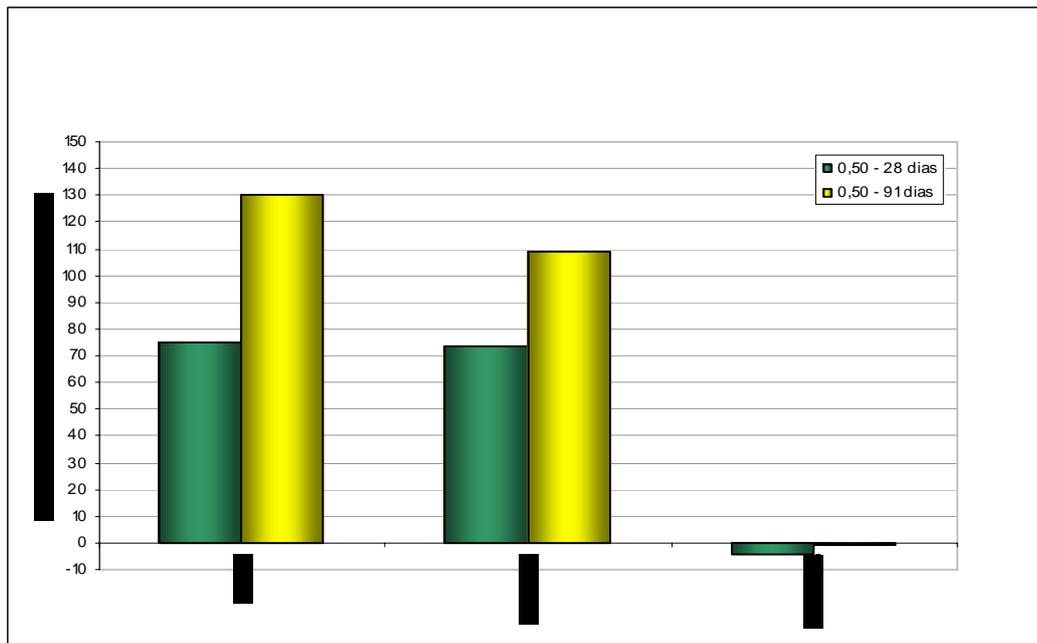


Figura 4.18 – Variação da resistividade elétrica aparente com o aumento dos níveis de substituição de CCA, idades de 28 e 91 dias, relação a/ag 0,50.

Das misturas aglomerantes investigadas, o melhor desempenho quanto à resistividade elétrica aos 28 dias, foi a mistura composta de cinza de casca de arroz no teor de 20%, seguida da misturas 30A, E50, 10A, CV35 e referência. Aos 91 dias, a ordenação é a seguinte: 20A > 30A > CV35 > E50 > 10A > referência (Tabela 4.12).

Na Tabela 4.13, são apresentados os critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto, descritos de acordo com o CEB 192 (1989 *apud* BRAUN, 2003).

Tabela 4.12 – Ordem da resistividade média dos traços investigados aos 28 e 91 dias.

Idade - dias	Ordem decrescente de resistividade elétrica aparente (Ω.cm)
28	20A > 30A > E50 > 10A > CV35 > REF
91	20A > 30A > CV35 > E50 > 10A > REF

De acordo com a classificação apresentada na Tabela 4.13, constata-se que, aos 28 dias, o traço de referência apresentou valor de resistividade elétrica que se enquadra como alta, e os traços CV35 e 10A como moderada. Os demais traços ensaiados obtiveram

classificações de probabilidade de risco de corrosão desprezíveis. Já aos 91 dias, a mistura de referência apresentou valor de resistividade elétrica classificada como moderada e as demais misturas investigadas com probabilidade de risco de corrosão desprezíveis.

Tabela 4.13 – Critério de avaliação da resistividade elétrica do concreto (CEB 192, 1989).

Resistividade do concreto	Indicação de probabilidade de corrosão
> 20.000 Ω .cm	Desprezível
10.000 a 20.000 Ω .cm	Moderado
5.000 a 10.000 Ω .cm	Alta
< 5.000 Ω .cm	Muito Alta

4.9 Integração dos resultados

Neste tópico foram analisados os inter-relacionamentos referentes às variáveis ligadas à durabilidade das estruturas. Esta análise foi realizada para as misturas compostas com 10%, 20% e 30% de CCA, além da amostra de referência, para as 3 relações a/ag estudadas. Para tanto, foram estudadas as relações existentes entre as seguintes propriedades:

- Resistência à Compressão x Penetração de Cloretos;
- Resistência à Compressão x Volume de intrusão de mercúrio;
- Penetração de Cloretos x Volume de intrusão de mercúrio;
- Penetração de Cloretos x Diâmetro crítico;
- Penetração de Cloretos x Condutividade Elétrica;
- Penetração de Cloretos x Cloretos Retidos;
- Coeficiente K x Diâmetro Crítico;
- Coeficiente K x Volume de intrusão.

4.9.1 Resistência à compressão x penetração de cloretos

Com o intuito de analisar a evolução da penetração de cloretos com o desenvolvimento da resistência à compressão, tornou-se necessário construir o gráfico da Figura 4.19 que

apresenta a relação existente entre a penetração de cloretos e a resistência à compressão das misturas 10A, 20A e 30A, além daquela de referência. Da análise desta figura, constata-se que, para uma dada resistência à compressão, diferentes valores de penetração de cloretos são obtidos, em função da composição da mistura aglomerante adotada.

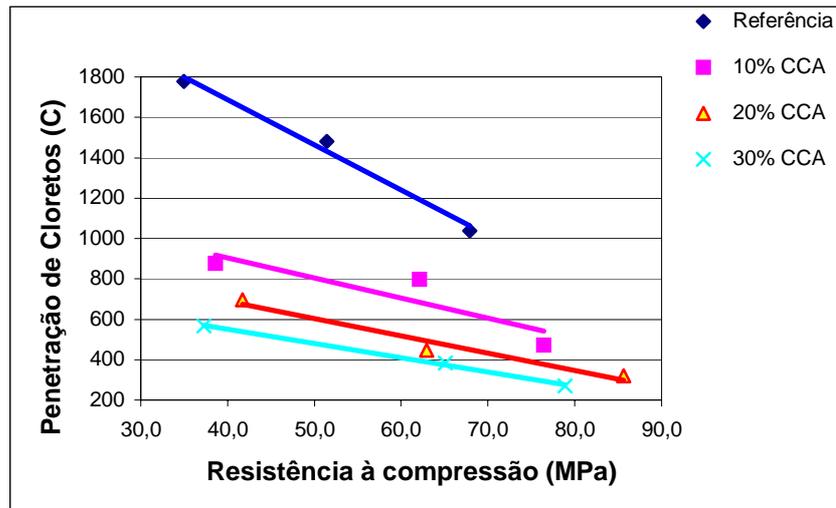


Figura 4.19 – Resistência à compressão axial versus corrente passante amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias.

4.9.2 Resistência à compressão x volume de intrusão de mercúrio

Com o objetivo de verificar a relação existente entre a resistência à compressão e o volume de intrusão de mercúrio, foi construído o gráfico da Figura 4.20 que apresenta, num gráfico único, a relação existente entre a resistência à compressão e o volume de mercúrio intrudido. Da análise desta, verifica-se, que para um mesmo nível de resistência à compressão, são obtidos diferentes valores de volume de mercúrio intrudido, fato que pode ser explicado por diferenças na distribuição de tamanho de poros das misturas aglomerantes investigadas.

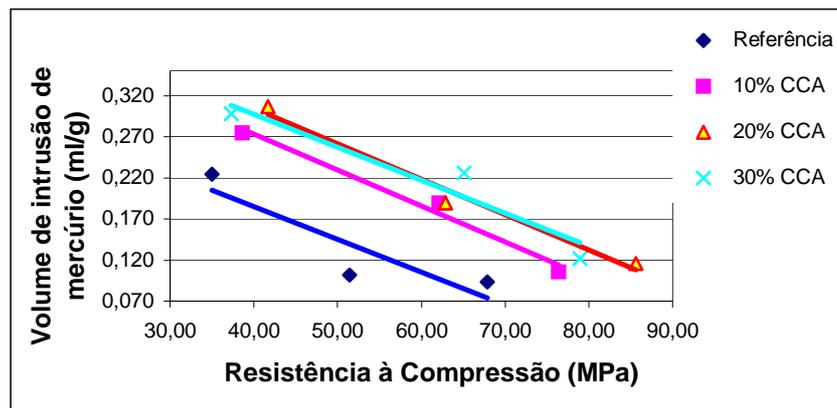


Figura 4.20 – Resistência à compressão axial versus Volume de intrusão de mercúrio, amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias.

4.9.3 Penetração de cloretos x características da estrutura de poros (volume de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico)

Shi (1998) relata que a penetração de cloretos no concreto é função da estrutura de poros e da condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, com o objetivo de verificar a relação existente entre a penetração de cloretos e o volume de intrusão de mercúrio e o diâmetro crítico dos poros, foram construídas as Figuras 4.21 e 4.22.

Observa-se da Figura 4.21, que reúne num único gráfico os dados referentes à penetração de cloretos e do volume de intrusão, que, para um mesmo volume de intrusão de mercúrio, obtêm-se diferentes valores de penetração de cloretos.

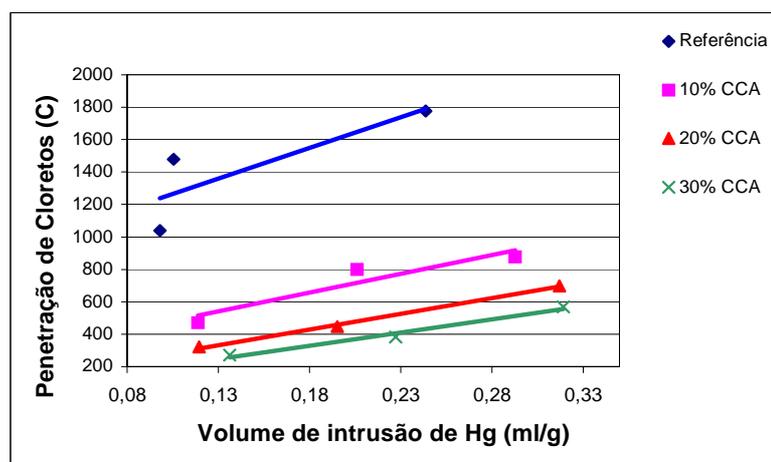


Figura 4.21 – Volume de Intrusão de Hg versus Penetração de Cloretos das amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias.

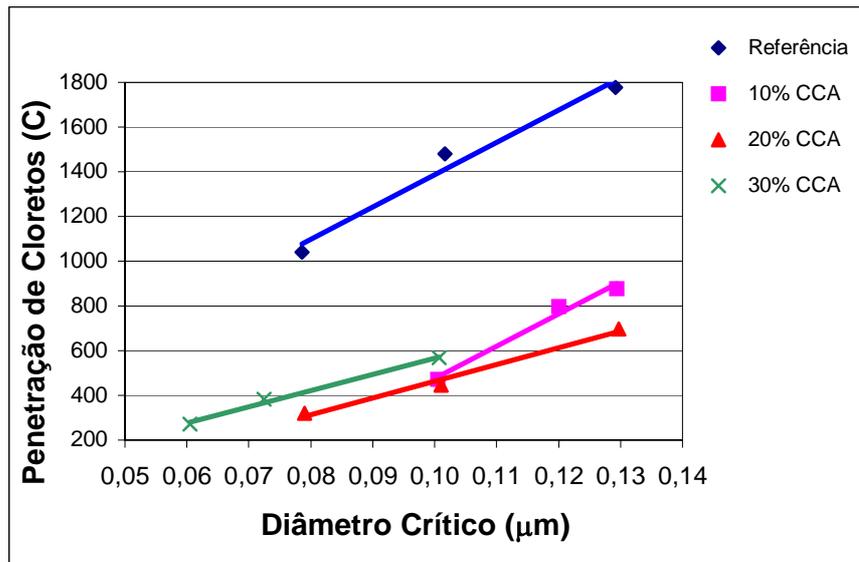


Figura 4.22 – Diâmetro Crítico versus Penetração de Cloretos das amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias.

Da figura 4.22, que reúne num único gráfico os dados referentes aos diâmetros críticos e à penetração de cloretos, verifica-se que para um mesmo valor de diâmetro crítico obtêm-se diferentes valores de penetração de cloretos.

4.9.4 Penetração de cloretos x condutividade elétrica

A Figura 4.23 reúne, em um único gráfico, os dados referentes às condutividades elétricas das soluções dos poros e às penetrações de cloretos das misturas de REF, 10A, 20A e 30A. A partir destes, observa-se claramente que as misturas compostas com CCA, apresentaram condutividades elétricas muito inferiores àquela da amostra de referência. O aumento no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz mostrou significativa variação na condutividade elétrica, tendo a mistura composta com (30%) de CCA e relação a/ag 0,35 apresentado o menor valor de condutividade elétrica ($1,837\text{ohm}^{-1}$)

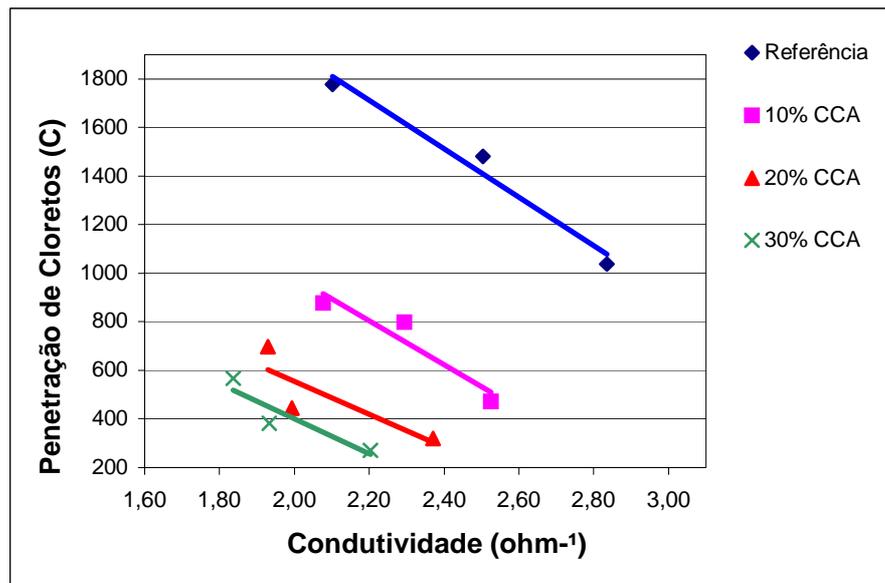


Figura 4.23 – Condutividade Elétrica versus Penetração de Cloretos, nas amostras REF, 10A, 20A, 30A, aos 91 dias.

4.9.5 Penetração de cloretos x cloretos retidos

Na Figura 4.24 (a-f), são apresentadas as correlações entre a penetração de cloretos e o teor de cloretos totais retidos das misturas investigadas na idade de 91 dias de cura e relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65.

Com exceção da mistura contendo 50% de escória de alto forno que apresentou correlação $R^2 = 0,593$, considerada baixa, as demais misturas – referência, 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz e 35% de cinza volante – apresentaram valores de R^2 de 0,913, 0,889, 0,792, 0,982 e 0,996, respectivamente.

Verifica-se, assim, que o ensaio da ASTM C 1202 da penetração de cloretos estima com segurança o teor de retenção de cloretos totais e pode ser considerado como um parâmetro confiável na determinação da quantidade total de cloretos retidos no concreto. Este comportamento também foi observado por Isaia (1995), Cervo (2000), Pereira (2001) e Dal Ri (2002).

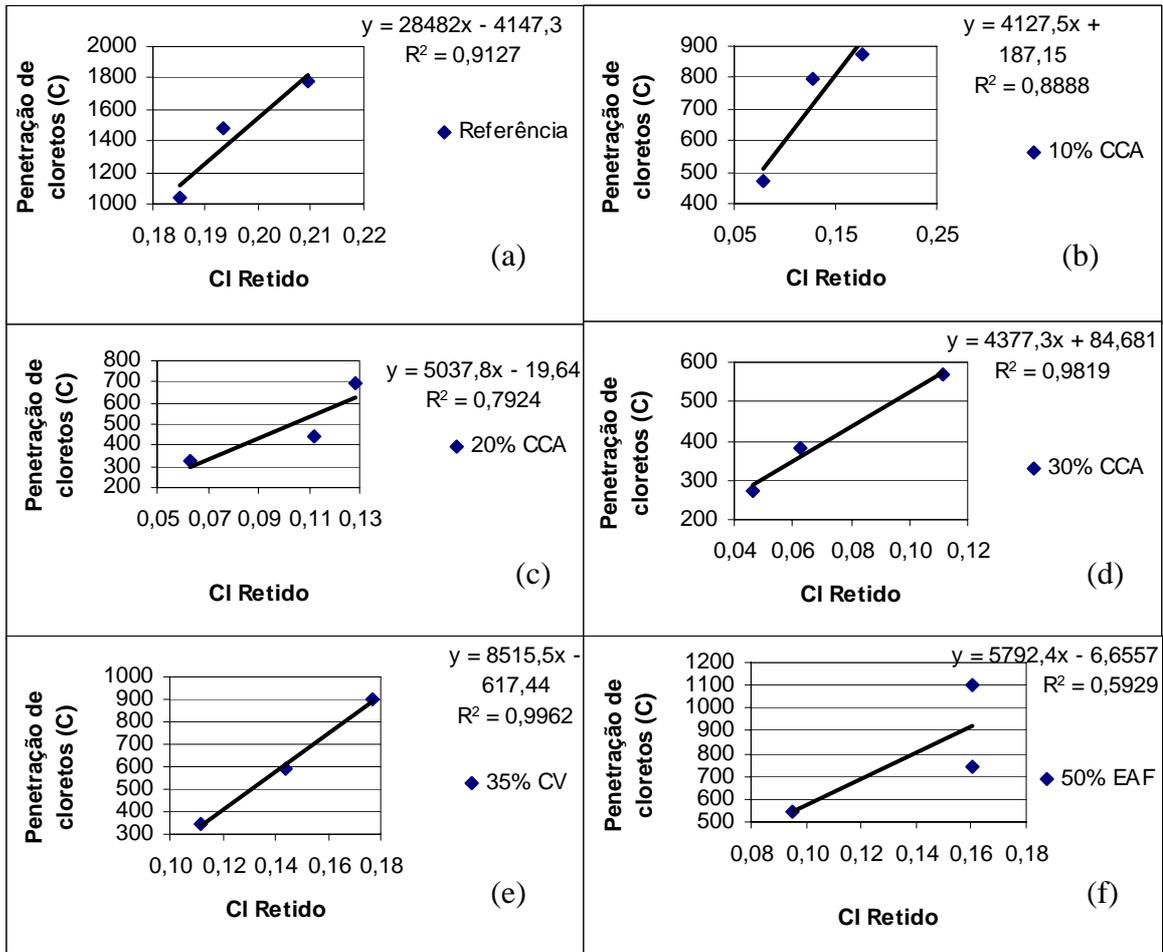


Figura 4.24 – Correlação entre a penetração de cloretos em Coulombs e o teor de cloretos totais retidos, para as misturas: (a) REF, (b) 10A, (c) 20A, (d) 30A, (e) CV35 e (f) EA50

4.9.6 Coeficiente K x diâmetro crítico

A Figura 4.25 apresenta em um único gráfico, a relação entre o coeficiente K(mm) e o diâmetro crítico das misturas contendo cinza de casca de arroz e a de referência para análise comparativa, mostrando assim que o inter-relacionamento entre essas propriedades é válido para cada mistura aglomerante.

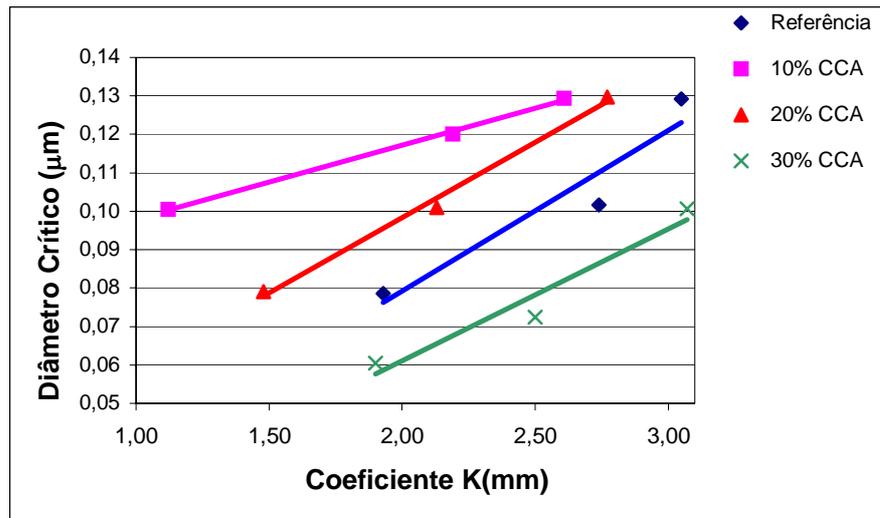


Figura 4.25 – Correlação entre o coeficiente K(mm) e a carga passante, para as misturas apresentadas em gráfico unificadas para análise comparativa.

4.10 Análise dos resultados em igualdade de resistência

A resistência à compressão é a propriedade tomada como referência por projetistas como base para o dimensionamento de estruturas de concreto. Ela será a referência neste tópico para uma análise comparativa entre algumas das propriedades estudadas.

A Tabela 4.14 apresenta os valores das constantes da equação de Abrams determinadas com os resultados das resistências à compressão axial, aos 28 e 91 dias, possibilitando a determinação das relações água/aglomerante em igualdade de resistência mecânica.

A partir da Tabela 4.15, foi possível obter os valores das relações a/ag que concedem às misturas, em estudo, níveis de resistências de 40MPa, 50MPa e 60MPa, aos 91 dias. Esses parâmetros de resistências foram posteriormente utilizados em comparações entre as propriedades dos concretos, objetos deste estudo.

Tabela 4.14 – Constantes da curva de Abrams para a resistência à compressão aos 28 e 91 dias.

	Res. à Comp. (MPa)	Constantes de Abrams			Res. à Comp. (MPa)	Constantes de Abrams		
	28 DIAS	A	B	R ²	91 DIAS	A	B	R ²
REF	53,7	125,0326	9,1949	0,9593	67,9	149,9280	9,1062	0,9999
	47,3				51,4			
	27,6				35,0			

10A	68,1	166,7014	12,7926	0,9955	76,4	177,0044	9,7102	0,9903
	46,9				62,1			
	31,7				38,6			
20A	72,0	168,6892	13,2022	0,9999	85,6	201,5191	10,9992	0,9998
	52,3				62,9			
	33,2				41,7			
30A	67,4	180,4557	15,0185	0,9904	78,9	200,9413	12,1495	0,9816
	50,1				65,1			
	29,9				37,3			
CV35	55,1	236,1428	53,4708	0,9997	66,8	227,3221	29,9133	0,9997
	36,6				44,6			
	16,7				24,1			
	50,1				65,1			
E50	29,9	141,5654	19,5727	0,9973	37,3	153,7354	12,4537	0,9996
	49,3				61,8			
	32,9				46,1			
	20,2				29,0			

Tabela 4.15 – Relações a/ag que fornecem mesmas resistências aos 91 dias e os respectivos consumos de aglomerantes

Nível de resistência analisado	Traços	a/ag	Consumo Kg/m ³				
			Aglomerante	Cimento	Escória	Cinza casca de arroz	Cinza volante
40 MPa	REF	0,60	308	308	-	-	-
	10A	0,65	278	250	-	28	-
	20A	0,67	268	215	-	54	-
	30A	0,65	282	198	-	85	-
	CV35	0,51	360	231	-	-	126
	E50	0,53	346	173	173	-	-
50 MPa	REF	0,50	370	370	-	-	-
	10A	0,56	332	299	-	33	-
	20A	0,58	317	254	-	63	-
	30A	0,56	332	232	-	99	-
	CV35	0,45	406	264	-	-	142
	E50	0,45	406	203	203	-	-
60 MPa	REF	0,41	429	429	-	-	-
	10A	0,48	384	346	-	38	-
	20A	0,51	364	291	-	73	-
	30A	0,48	378	265	-	114	-
	CV35	0,39	440	286	-	-	154
	E50	0,37	462	231	231	-	-

4.10.1 Consumo de aglomerantes

Foi realizado um estudo mais detalhado dos valores efetivos dos consumos de aglomerantes para as misturas investigadas, em igualdade de resistência mecânica, para os níveis de 40MPa, 50MPa e 60MPa. Os dados de consumo apresentados na Tabela 4.15 foram obtidos através da construção de um gráfico similar ao de Abrams, utilizando-se as mesmas relações a/ag propostas, para atingir os níveis de resistência mencionados, obtendo-se assim os valores dos consumos de cimento e adições minerais. Na seqüência, são apresentados os gráficos comparativos dos consumos de aglomerantes para estes níveis de resistências, bem como os que mostram os aumentos no consumo de cimento ocasionados pelas variações de 40MPa para 50MPa, de 50MPa para 60MPa e, por fim, de 40MPa para 60MPa.

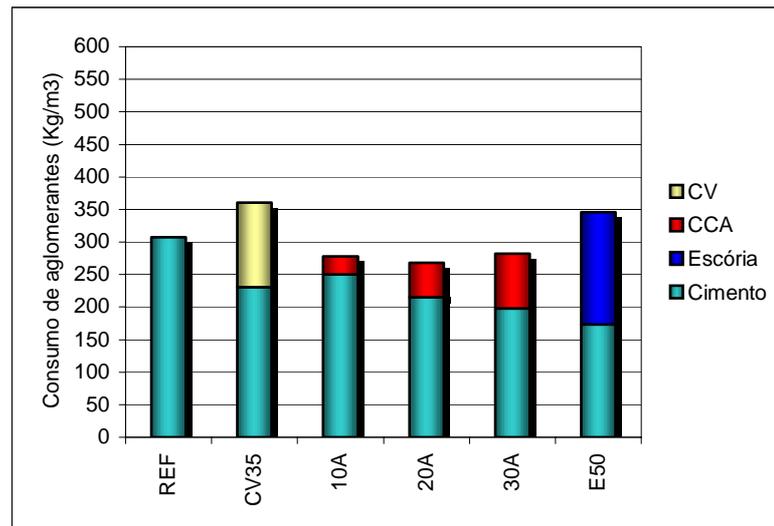


Figura 4.26 - Consumo de aglomerantes para a resistência de 40MPa aos 91 dias

Observa-se, na Figura 4.26, que os consumos de cimento para as misturas com adições minerais e nível de resistência de 40MPa, aos 91 dias, situaram-se na faixa de 173 Kg/m³ a 250 Kg/m³, apresentando diminuição no consumo de cimento, em relação à mistura de referência de 19%(10A), 30%(20A), 36%(30A), 24% (CV35) e 44%(E50).

Para o nível de resistência de 50MPa, o consumo de cimento variou de 203 Kg/m³ a 299 Kg/m³, apresentando, assim, diminuição em relação ao de referência de 19%(10A), 31%(20A), 37%(30A), 29%(CV35) e 45%(E50) (Figura 4.27).

Para o nível de resistência de 60MPa o consumo de cimento variou de 231 Kg/m³ a 429 Kg/m³, apresentando diminuição em relação ao de referência de 19%(10A), 32%(20A), 38%(30A), 33%(CV35) e 46%(E50) (Figura 4.28).

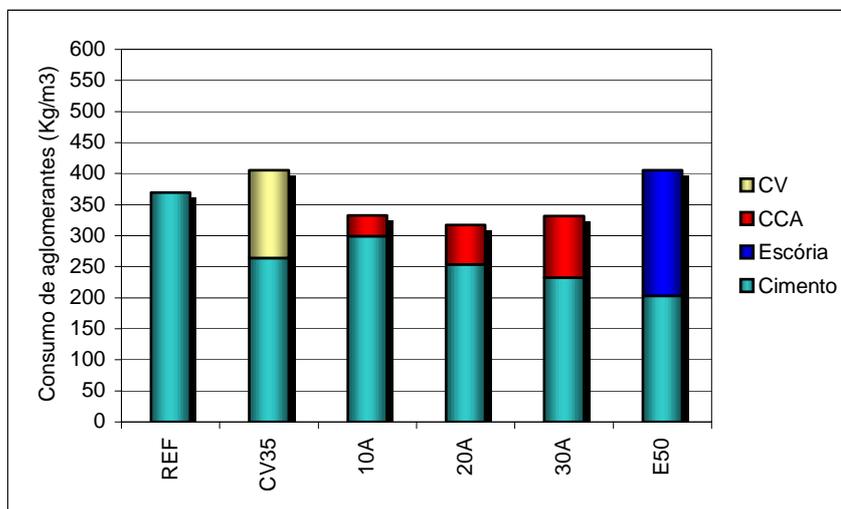


Figura 4.27 – Consumo de aglomerantes para a resistência de 50MPa aos 91 dias

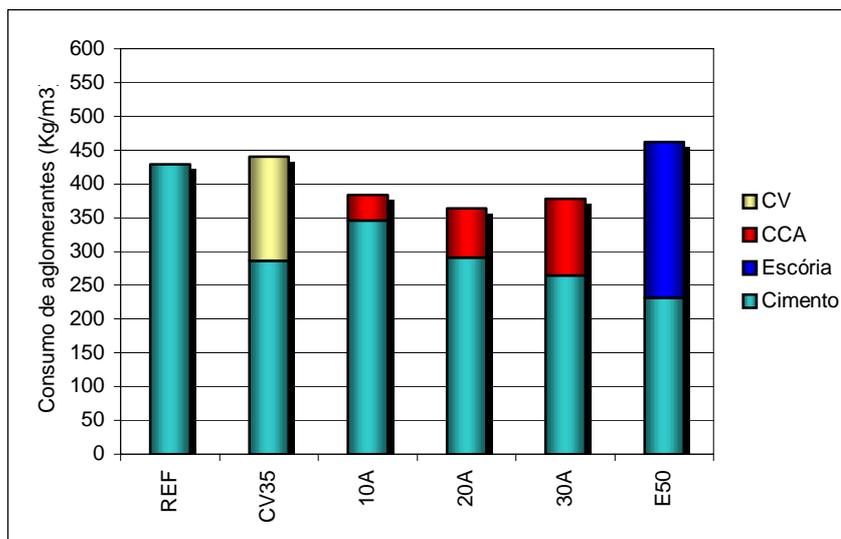


Figura 4.28 – Consumo de aglomerantes para a resistência de 60MPa aos 91 dias

4.10.2 Penetração de cloretos em igualdade de resistência

Na Tabela 4.16 são apresentados os valores das penetrações de cloretos em Coulombs das misturas investigadas em igualdade de resistência mecânica. Na Tabela 4.17, são apresentados os critérios de qualidade do concreto em relação ao seu risco de corrosão, de acordo com a norma ASTM C 1202.

A análise das Tabelas 4.16 e 4.17 mostra que, para os níveis de resistência de 40MPa, 50MPa e 60MPa, as penetrações de cloreto expressas em Coulombs classificaram-se, segundo a ASTM C 1202 como baixo a muito baixo risco de corrosão. A mistura de referência, nos 3 níveis de resistência analisados na Tabela 5.2, apresentou uma maior penetração de cloretos quando comparada às demais misturas minerais investigadas, mostrando o caráter benéfico do uso de adições minerais na resistência à penetração de cloretos (Figura 4.29).

O aumento dos níveis de resistência de 40MPa para 50MPa ocasionou uma diminuição na penetração de cloretos para as misturas REF, 10A, 20A, 30A, CV35 e E50 de 17%, 18%, 21%, 20%, 19% e 19%, respectivamente.

Tabela 4.16 – Penetração de cloretos em Coulombs das misturas investigadas em igualdade de resistência mecânica.

Nível de resistência analisado	Traços	a/ag	Penetração de cloretos (Coulombs)
40 MPa	REF	0,60	1668
	10 ^A	0,65	950
	20 ^A	0,67	729
	30 ^A	0,65	558
	CV35	0,51	564
	E50	0,53	829
50 MPa	REF	0,50	1391
	10 ^A	0,56	776
	20 ^A	0,58	573
	30 ^A	0,56	447
	CV35	0,45	460
	E50	0,45	673
60 MPa	REF	0,41	1200
	10 ^A	0,48	658
	20 ^A	0,51	470
	30 ^A	0,48	374
	CV35	0,39	389
	E50	0,37	568

Tabela 4.17 – Qualidade do concreto com base na carga passante segundo a ASTM C 1202/94

Carga Passante	Risco de Corrosão
> 4000	Alto
2000 – 4000	Moderado
1000 – 2000	Baixo
100 – 1000	Muito Baixo
< 100	Desprezível

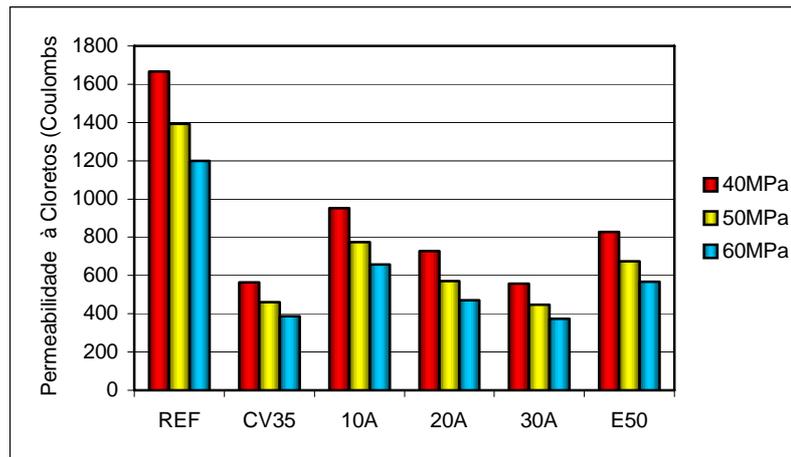


Figura 4.29 – Penetração de cloretos para as misturas investigadas em igualdade de resistência à compressão, aos 91 dias

Da mesma forma, quando feita a análise do aumento dado dos níveis de resistência à compressão, de 50MPa para 60MPa, observou-se diminuições na penetração de cloretos, para as misturas REF, 10A, 20A, 30A, CV35 e E50 de 14%, 15%, 18%, 16% 15% e 16%, respectivamente. A variação de 40MPa para 60MPa na resistência à compressão para os mesmos traços citados, na mesma ordem, ocasionou diminuições na penetração de cloretos de 28%, 31%, 35%, 33%, 31%, e 31%, respectivamente (Figura 4.30).

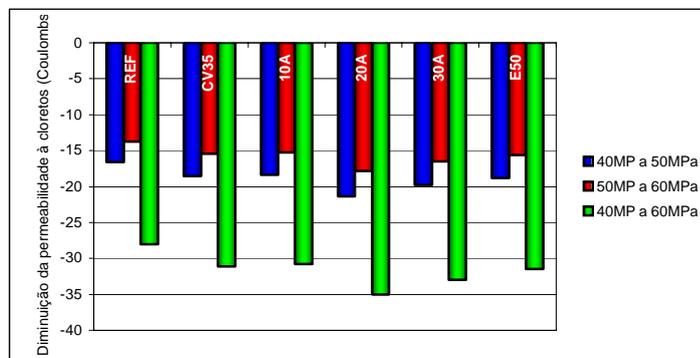


Figura 4.30 – Diminuição da penetração de cloretos de acordo com a variação das resistências à compressão dos traços em igualdade de resistências.

4.11 Análise de custos

Constatou-se, ao longo desta pesquisa, as vantagens da utilização da CCA em substituição ao cimento no concreto. Além disso, foram verificadas, em algumas propriedades, melhorias ligadas à durabilidade do concreto, como resistência à compressão, resistência à penetração de cloretos, resistividade elétrica. Tais melhorias foram descritas

neste trabalho para evidenciar a necessidade da utilização da CCA, bem como de outras adições importantes, muito utilizadas principalmente nas regiões sul e sudeste do nosso país, como a cinza volante e a escória de alto forno.

Neste tópico, foi realizado um estudo da viabilidade econômica das amostras investigadas, de modo a determinarmos qual teor de adição de CCA apresentou potencialidade no mercado, ou seja, uniu os benefícios pré-descritos aos custos de sua utilização na construção civil.

A Tabela 4.18 apresenta os custos dos materiais e os custos totais das misturas, por metro cúbico de concreto, em reais (R\$).

A Figura 4.31 apresenta o custo de cada mistura investigada, tomado pelo quociente do custo do m³ em reais (R\$) pela resistência à compressão alcançada em MPa.

Tabela 4.18 – Custos dos materiais e custos totais das misturas, por metro cúbico de concreto, em reais (R\$).

Mistura	A/agl	Cimento	Adição mineral	Agreg. miúdo	Agreg. graúdo	Aditivo	Total
REF	0,35	207,35	0,00	4,86	10,78	8,56	231,55
	0,50	152,50	0,00	5,66	10,55	0,00	168,72
	0,65	120,60	0,00	6,15	10,44	0,00	137,20
10A	0,35	186,61	26,15	4,67	10,78	26,35	254,76
	0,50	137,25	19,38	5,55	10,55	9,69	182,42
	0,65	108,54	15,32	6,05	10,44	0,00	140,36
20A	0,35	165,88	52,69	4,52	10,78	59,28	293,15
	0,50	122,00	38,75	5,44	10,55	24,22	200,97
	0,65	96,48	30,65	5,96	10,44	8,81	152,34
30A	0,35	145,14	79,04	6,39	10,78	128,43	369,39
	0,50	106,75	58,13	5,33	10,55	50,86	231,63
	0,65	84,42	45,97	5,87	10,44	24,90	171,61
CV35	0,35	134,73	6,83	3,81	10,78	22,35	178,54
	0,50	99,03	5,02	6,94	10,55	8,24	129,78
	0,65	78,39	3,97	10,28	10,44	0,00	98,74
E50	0,35	103,67	48,79	4,71	10,78	9,88	177,83
	0,50	76,25	35,38	5,58	10,55	0,00	128,27
	0,65	60,30	28,38	6,07	10,44	0,00	105,19

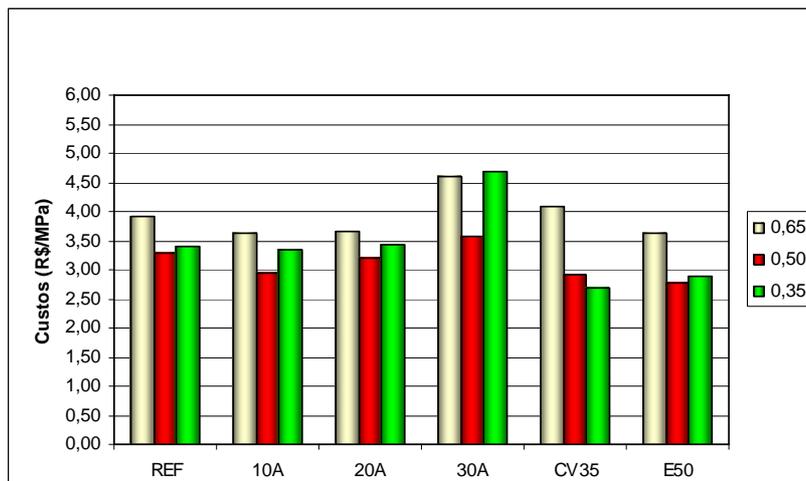


Figura 4.31 – Quociente dos custos dos materiais (R \$/m³)/(MPa) das misturas investigadas, idade 91 dias.

Da Figura 4.31, observa-se à proximidade da relação custo (R\$/m³)/(MPa) das misturas REF, 10A e 20A. Esta última apresentou excelente resistência à compressão e à penetração de cloretos, além de altos valores de resistividade elétrica, propriedades vitais para alcançarmos a durabilidade do concreto.

Destacaram-se também pelo baixo índice (R\$/m³)/(MPa) as misturas compostas com CV35 e E50 que, apesar de não terem desempenhos superiores às misturas compostas com 20% e 30% de CCA, nas principais propriedades estudadas, apresentaram custos inferiores a todas as misturas investigadas, mostrando-se também como viáveis utilizações comerciais.

A comparação dos custos (R\$/m³) das misturas compostas com CCA em relação à mistura de referência mostrou acréscimos, nos custos de produção, de 10%, 8% e 2%, para o traço 10A, 27%, 19% e 8% para o traço 20A; e 60%, 37% e 25% para o traço 30A, para as relações 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente. Este fato foi observado principalmente nos custos de processamento da CCA e na utilização do superplastificante, para obtenção de consistência adequada (Figura 4.32).

O estudo dos custos (R\$/m³) das demais amostras investigadas, em relação à mistura de referência, revelou reduções nos gastos com produção de 31%, 32% e 39% para o traço CV35 e 30%, 32% e 30% para o traço E50, para as relações 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente (Figura 4.32).

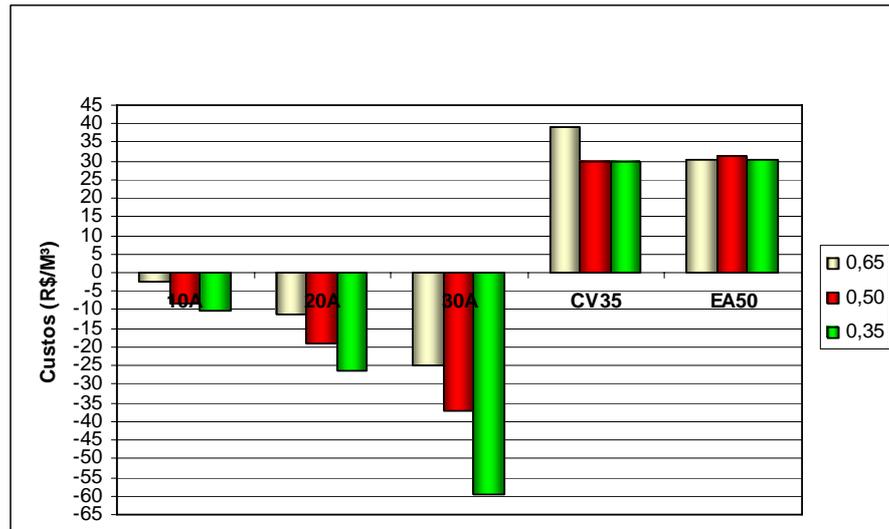


Figura 4.32 – Comparação (%) dos custos (R\$/m³) das misturas compostas com CCA em relação à mistura de referência

A Figura 4.33 e a Tabela 4.19 apresentam a penetração de cloretos em Columbs (C) das misturas investigadas, em igualdade de resistência, de 40MPa, 50MPa e 60MPa, além de uma comparação dos custos (R\$/m³) da amostra que mais se destacou nas análises das propriedades de durabilidade (amostra 20A) com os custos da mistura de referência.

Tabela 4.19 – Comparação (%) dos custos (R\$/m³) das misturas compostas com CCA em relação à mistura de referência.

Nível de resistência analisado	Traços	a/ag	Penetração de cloretos (Coulombs)	Custo em Reais (R\$)
40 MPa	REF	0,60	1668	147,466
	10A	0,65	950	137,507
	20A	0,67	729	142,051
	30A	0,65	558	168,432
	CV35	0,51	564	127,974
	E50	0,53	829	126,222
50 MPa	REF	0,50	1391	175,883
	10A	0,56	776	167,124
	20A	0,58	573	174,029
	30A	0,56	447	211,707
	CV35	0,45	460	145,382
	E50	0,45	673	147,326
60 MPa	REF	0,41	1200	203,122
	10A	0,48	658	196,001
	20A	0,51	470	205,433
	30A	0,48	374	255,198
	CV35	0,39	389	161,34
	E50	0,37	568	167,162

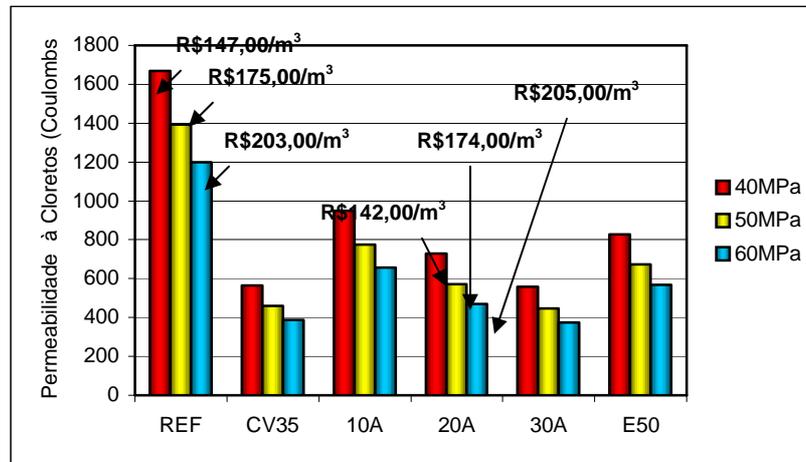


Figura 4.33 – Penetração de cloretos em Coulombs das misturas investigadas em igualdades de resistência à compressão, 40MPa, 50MPa e 60MPa, custos (R\$/m³) das amostras 20A e REF.

Da análise da Figura 4.33, observou-se que em igualdade de resistência a mistura 20A, composta com 20% de CCA, apresenta custo (R\$/m³) similar à mistura de referência, no entanto, apresentou vantagens consideráveis do ponto de vista das propriedades de resistência à compressão, penetração de cloretos entre outras já discutidas. Merece, portanto, destaque entre as misturas minerais estudadas.

A análise superficial, da relação custo/durabilidade, conduz a eleição da amostra composta com 20% de CCA como melhor amostra, dentre as misturas compostas com CCA investigadas. No entanto, se avaliarmos a relação a/ag destas misturas analisadas, em igualdade de resistência à compressão (40MPa, 50MPa e 60MPa), nota-se que a mistura 20A, dosada para 40MPa, apresentou relação a/ag 0,67, não adequada para obtenção de durabilidade adequada. Deste modo, observou-se que a mistura que melhor aliou durabilidade e custos, dentre as compostas com CCA, foi à mistura 20A, porém quando produzida com relação a/ag 0,51, para alcançar resistência de 60MPa, a qual apresentou grande redução na carga passante, 60,83% e aumento no custo, em relação à mistura de referência, irrisório (1,12%).

Observou-se, que dentre todas as misturas investigadas em igualdade de resistência à compressão, a que mais aliou os critérios de durabilidade e custo foi à mistura composta com 35% de cinza volante. Esta apresentou desempenho satisfatório em ensaios como penetração de cloretos ASTM C 1202, onde apresentou classificação de muito baixo risco de corrosão, nos 3 níveis de igualdade de resistência estudados, 40MPa, 50MPa e 60MPa e excelente

desempenho também no ensaio de resistividade elétrica aparente, onde apresentou aos 91 dias, classificação de desprezível risco quanto a probabilidade de corrosão, tabela 4.13. Todas estas vantagens foram aliadas a sua excelente capacidade de fixação de cloretos dada pelo alto teor de alumina constatado na análise química de sua composição e seu baixo custo de produção R\$161,34/m³, R\$145,82/m³, R\$127,97/m³, para as resistências de (60MPa), (50MPa) e (40MPa), respectivamente. Quando comparados os custos (R\$/m³) da amostra composta com 35% de CV com a amostra de REF constataram-se economias de 13,21%, 17,34% e 20,56% nos níveis de resistência de 40MPa, 50MPa e 60MPa, respectivamente. O que a destaca juntamente com as misturas compostas com CCA como as melhores alternativas de substituição, dentre as misturas e teores investigados.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve por objetivo investigar a penetração de cloretos de concretos, nos quais parte do cimento foi substituída por cinza de casca de arroz.

Estudou-se qual a influência do teor de substituição da CCA na resistência à compressão. De posse dos resultados, observou-se que os níveis de substituição do cimento por CCA (10%, 20% e 30%) influenciaram de maneira benéfica a resistência à compressão dos concretos das misturas investigadas. Tanto aos 28 como aos 91 dias, notou-se superioridade nas resistências à compressão das amostras compostas com CCA, nos 3 níveis de substituição e nas 3 relações a/ag estudadas, fato não observado nas demais misturas estudadas, CV e EAF.

Neste estudo, procurou-se também determinar em que medida e em qual teor de substituição que a CCA influencia na penetração de cloretos pela ASTM C 1202, no teor de cloretos retidos, pH e relação Cl^-/OH^- . A análise dos resultados obtidos mostrou reduções na carga passante, aos 91 dias, quando comparada à mistura de referência e mesma relação a/ag 0,35, 0,50 e 0,65. Estas reduções na penetração de cloretos ainda foram observadas nos demais traços estudados, CV e EAF, porém em menor intensidade que as amostras compostas com 20% e 30% de CCA.

A utilização da CCA não ocasionou modificação acentuada nos valores de pH. Observou-se que os cátions alcalinos originados durante a hidratação da CCA foram efetivos em aumentar a concentração de OH^- da solução dos poros, aumentando, por sua vez, os valores de pH.

Com relação aos cloretos retidos, verificou-se que, para as misturas compostas com cinza de casca de arroz, a de menor teor de substituição apresentou os maiores índices de cloretos retidos. Isto é devido ao maior teor de cimento e, conseqüentemente, ao maior teor de alumina. Dentre todas as misturas investigadas, as que apresentaram maiores teores de cloretos retidos foram aquelas compostas com 50% de escória de alto forno e 35% de cinza volante, devido ao maior teor de alumina presente nelas.

As misturas contendo adições minerais, de modo geral, apresentaram relações Cl^-/OH^- menores do que a do traço de referência. Nas misturas contendo 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, as relações Cl^-/OH^- variaram de 1,039 a 2,424, de 0,829 a 1,855 e de 0,742 a 1,931, respectivamente. Em igualdade de relação a/ag, constatou-se redução na relação Cl^-/OH^- , com o aumento no teor de substituição. Nas misturas compostas com 50% de escória de

alto forno, as relações Cl^-/OH^- variaram de 1,577 a 4,116, sendo os valores para as relações a/ag 0,5 e 0,65 semelhantes àquele da mistura de referência. Para as misturas contendo 35% de cinza volante, as relações Cl^-/OH^- variaram de 1,250 a 3,038.

Com relação à penetração de cloretos avaliada pela aspensão de nitrato de prata (K), observou-se que o aumento no teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz resultou em maiores valores de penetração. Acredita-se que o efeito de fixação de cloretos foi mais significativo que a alteração na estrutura dos poros ocasionada pela adição mineral.

A análise da solução aquosa dos poros mostrou reduções nas concentrações dos íons Na^+ , K^+ , OH^- , Ca^{+2} e SO_4^{-2} e no equivalente alcalino, com aumento nos teores de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, bem como com o aumento da relação a/ag. Essa redução no teor alcalino em sódio, provavelmente, é devida à melhor condição de hidratação, resultando em uma maior quantidade de C-S-H formado e, conseqüentemente, mais íons de sódio e potássio estarão inseridos.

Constatou-se excelentes correlações entre a condutividade elétrica específica e as concentrações de íons OH^- e Na_2O equivalente. Observou-se ainda que o aumento do teor de substituição de cimento por CCA resultou em diminuição na condutividade elétrica específica.

O estudo preliminar referente à resistividade elétrica aparente, realizado para as misturas compostas com relação a/ag 0,50, mostrou resistividades bem superiores às amostras compostas com CCA, quando comparadas com a mistura de referência. Este aumento na resistividade elétrica das misturas compostas com CCA foi confirmado pela baixa condutividade elétrica relativa destas misturas, visto que as propriedades de resistividade elétrica e condutividade elétrica específica mostraram-se inversas.

Para as demais misturas investigadas, CV35 e E50, notou-se aumento da resistividade em relação à mistura de REF, aos 91 dias.

A análise integrada dos resultados dos ensaios de algumas propriedades ligadas à durabilidade, como resistência à compressão, penetração de cloretos, volume de intrusão de mercúrio, diâmetro crítico, condutividade elétrica e penetração de cloretos revelou algumas constatações. Estas foram baseadas no estudo do índice de correlação R^2 , utilizado para definir o grau de inter-relacionamento entre algumas das propriedades estudadas.

Constatou-se boa correlação (R^2) das misturas investigadas com CCA, entre as propriedades de penetração de cloretos (ASTM C 1202) e as propriedades de resistência à compressão, volume de intrusão de mercúrio, condutividade elétrica específica e cloretos

retidos. Do mesmo modo, observou-se excelente correlação entre as propriedades de penetração de cloretos (aspersão de nitrato de prata) e o diâmetro crítico.

A análise dos dados dos ensaios de penetração de cloretos (ASTM C 1202), em relação às misturas dosadas para resistências à compressão de 40MPa, 50MPa e 60MPa, mostrou que as penetrações de cloretos destas amostras, expressas em Coulombs, classificaram-se, segundo a ASTM C 1202, como baixo e muito baixo risco de corrosão. A mistura de REF, nos 3 níveis de relação a/ag, mostrou uma maior penetração de cloretos, quando comparada às demais misturas investigadas, demonstrando o caráter benéfico da utilização das adições minerais. Observou-se, além disso, que o aumento nos níveis de resistência acarretaram melhorias nas resistências à penetração de cloretos (ASTM C 1202). A mistura composta com 20% de CCA, por exemplo, apresentou diminuição de 35% na penetração de cloretos, com a variação de sua resistência à compressão de 40MPa para 60MPa.

Com o objetivo de determinar a possibilidade de viabilidade de produção, em escala comercial, de algumas das misturas analisadas, realizou-se um estudo dos custos (R\$/m³) de cada mistura. Também foi investigado o índice dado pelo quociente do custo de cada mistura (R\$/m³) pela sua resistência à compressão, verificada aos 91 dias (MPa), como forma de análise do custo que determinado traço terá para atingir alguma resistência específica. Observou-se a proximidade entre os índices R\$/m³/(MPa das misturas REF e 20A. A amostra composta com 20% de CCA destacou-se entre as misturas compostas com CCA investigadas, pois apresentou excelentes desempenhos nos ensaios de resistência à compressão, resistência à penetração de cloretos (ASTM C 1202) e resistividade elétrica aparente. O estudo da penetração de cloretos ASTM C 1202, em igualdade de resistência à compressão, mostrou que, para 40MPa, a amostra de REF apresentou carga passante de 1668C, com custo de R\$147,46/m³, enquanto a amostra do traço 20A, para esta mesma resistência de 40MPa, apresentou carga passante de 729C, redução da carga passante de 56,29%, com custo de produção de R\$142,05/m³; portanto, apenas 3,35% maior que o custo de produção do concreto de REF. Quando dosado para 50MPa, a amostra de REF apresentou carga passante de 1391C, com custo de produção de R\$175,88/m³, enquanto que a amostra 20A apresentou 573C de carga passante, com o custo de produção de R\$167,12/m³; ou seja, houve redução na penetração de cloretos de 58,80% e redução no custo de 4,97%. Esta mesma comparação, quando feita em relação ao nível de resistência à compressão de 60MPa, mostrou que a amostra de referência apresentou carga passante de 1200C e custo de produção de R\$200,31/m³. Já a amostra 20A apresentou carga passante de 470C e custo de produção de

R\$205,43/m³, havendo então redução de 60,83% na carga passante e aumento no custo de produção por m³ de apenas 1,12%.

No entanto, se avaliada a relação a/ag destas misturas analisadas, em igualdade de resistência à compressão (40MPa, 50MPa e 60MPa), nota-se que a mistura 20A, dosada para 40MPa, apresentou relação a/ag 0,67, não adequada para obtenção da durabilidade necessária.

Deste modo, constatou-se que, dentre todas as misturas investigadas, em igualdade de resistência à compressão, a que mais aliou os critérios de durabilidade e custo foi a mistura composta com 35% de cinza volante. Esta apresentou desempenho satisfatório em ensaios como penetração de cloretos ASTM C 1202, em que teve classificação de muito baixo risco de corrosão, nos 3 níveis de resistência estudados, 40MPa, 50MPa e 60Mpa, e excelente desempenho também no ensaio de resistividade elétrica aparente, em que apresentou, aos 91 dias, classificação de desprezível risco quanto à probabilidade de corrosão (tabela 4.13). Todas estas vantagens foram aliadas a sua excelente capacidade de fixação de cloretos dada pelo alto teor de alumina, constatado na análise química de sua composição, e seu baixo custo de produção R\$161,34/m³, R\$145,82/m³, R\$127,97/m³, para as resistências de (60MPa), (50MPa) e (40MPa), respectivamente. De modo geral, quem mereceu devido destaque nesta pesquisa foi a cinza de casca de arroz. Esta, devidamente preparada e utilizada em substituição ao cimento no concreto, conferiu ao mesmo consideráveis benefícios, comprovados ao longo deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Rapid determination of Chloride Permeability of Concrete - Standard Specification for Transportation of Materials and Methods of Sampling and Testing : AASHTO T 259**, Washington. D. C, 1986. p.277-289.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to Resist Chloride Íon Penetration** : ASTM C 1202-91, Philadelphia, 1992.

_____. **Standard Test Method for Acid Soluble Chloride in Mortar and Concrete** : ASTM C 1152-90, Philadelphia, 1992.

_____. **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete** : ASTM C 494, 1992.

_____. **Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method - G 57**. In:____. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1978.

_____. **Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of Thin-Heater Apparatus** : ASTM C 1114, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – procedimento** : NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos** : NBR 7117. Rio de Janeiro, 1981. 15p.

_____. **Cimento Portland de alta resistência inicial** : NBR 5733. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

_____. **Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio** : NBRNM 67. Rio de Janeiro, 1998..

_____. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – procedimento** : NBR 5738 MB2. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Cimento e materiais pozolânicos** : NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.

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

AÏCTIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Gerald G. Serra. São Paulo : Pini, 2000. 667 p.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO P. Valores críticos de cloruros para despassivar aceros de refuerzo embebidos em um mortero estandarizado de cimento Portland. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre : UFRGS, 1997, p. 555-562.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.23, n.3, p. 724-742, 1993.

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

BAKKER, R. F. Initiation period. In: SHISSL, P. (ed.). **Corrosion of steel in concrete**. London: Chapman and Hall, 1988, p.22-25. (RILEM Report TC 60-CSC).

BARTHA, P.; IUPPERTZ, E. A. Structure and crystallization of silica in rice husk. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE UTILIZATION OF RICE BY-PRODUCTS. Valencia, Espanha, 1974. **Proceedings...** Valencia: IATA, 1977. p.89-98.

BASHEER, P. M .A. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement & Concrete Composites**, USA : Elsevier Science, (24), p.4371-449, 2002.

BATTAGIN, A.; FORTI, C. R.; SILVA, C. O. Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Brasília-DF. **Anais...**, Brasília : Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.

BAUER E.. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. 236 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BOATENG, A. A.; SEKEETE, D. A. Incineration of rice hull for use as cementitious material: the guyana experience. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science (20), p.795-802,1990.

BOUZOUBAË N., FOURMIER, B., **Concrete incorporating rice-husk ash: compressive strength and chloride-ion penetrability**. Cement and Concrete (ICON), CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada, p. 1-16, July, 2001.

BRETANHA, A.; DAL MOLIN, D. C. C. Concreto com cinza de casca de arroz frente ao ataque por sulfatos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999. Salvador – BA. **Anais...** Salvador : Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM.

_____. Análise da microestrutura do concreto com cinza de casca de arroz submetido a ação de sulfatos. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIEERIA ESTRUCTURAL, 29., Punta Del Este. **Anales...** Punta Del Este, Uruguay, 2000. 1 CD-ROM.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Specification for portland cements** : BS 12, 1991.

_____. **Method for determination of water soluble chloride salts** : BS 812: part 117, 1992.

_____. **Methods for determination of water soluble chloride salts** : BS 812. September, 1992.

_____. **Methods of test for water for making concrete (including notes on the suitability of the water)** : BS3148, September, 1980.

CABRERA, J.G. AND GHODDOUSSI, P. The Influence of Fly Ash on the Resistivity and Rate of Corrosion of Reinforced Concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE DURABILITY, SP-170, 1994. **Proceedings...** Fourth CANMET/ACI, Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 1994. p. 229-244.

CALLEJA, J. Adiciones y cementos con adiciones. **Materiales de Construcción**, n. 190-191, p.25-52, 1983.

CAMARINI G. Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 41., 1999. Salvador. **Anais...** Salvador-BA. : Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM.

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

CASTRO, A.; FERREIRA, R.; NEIRY, A.; LOPES M.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Durabilidade de concretos com adições minerais frente a carbonatação e o ataque por íons cloreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 46°, 2004. Florianópolis-SC. **Anais...** Florianópolis : Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. 1 CD-ROM.

CERVO, T. C. Ação de pozolanas na durabilidade do concreto frente à cloretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu-PR : Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

COOK, D. J. Rice husk ash. In: SWAMY, R. (ed.) **Cement replacements materials. Concrete Technology and Design**. Glasgow : Surrey University Press, 1986, 3v. v.3, p.171-196.

DAFICO, D. A., **Estudo da dosagem do Concreto de Alto Desempenho Utilizando Pozolanas Provenientes da Casca de Arroz**. 2001, 191p. Tese (Doutorado em Engenharia)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DAL RI, M. Penetração de Cloretos em concretos com diferentes composições aglomerantes contendo adição de cal hidratada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Brasília – DF. **Anais...** Brasília: Instituto Brasileiro do Concreto. 2002. 1 CD-ROM.

DELAGRAVE A.; MARCHAND J.; SAMSON E. Prediction of diffusion coefficients in cement-based materials on the basis of migration experiments. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.26, n.12, p. 1831-1842, 1996.

DETWILER, R.; KJELSEN, K.; GJØRV, O. **Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures.** ACI MAT. JOURNAL, Detroit, v.88, n.1, p. 19-24, 1991.

DHIR R. K.; JONES, M. R.; ELGHALY, A. E. PFA concrete; exposure temperature effects on chloride diffusion. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.23, n.12, p. 1105-1114, 1993.

FAGURY, S. C. ;LIBORÓRIO, J. Considerações na utilização das cinzas da casca do arroz residual de termoeletricas como adição na produção de concretos estruturais. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 2004, Mendonça. **Anales...** Mendonça, Argentina, 2004. 1 CD-ROM.

FAO – **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** Disponível em <<http://www.fao.org/>> Acesso em: 24 setembro 2004.

FARIAS, J. S. A.; RECENA, F. A. P. Study for Brazilian rice husk ash cement. In: SOBRAL, H. S. (Ed.). Proceedings of the second international RILEM symposium. Salvador, 1990.**Anais...** p. 360-369.

FENG, H.Q.; YAMAMICHI, M.; SHOYA, S. S. Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid preteament.. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, (xx), 2003 p.xxx-xxx. article in press.

FERREIRA, A. A. **Influência da temperatura de queima da cinza de casca de arroz na pozolanicidade e microestrutura do concreto.** Seminário da disciplina de novos materiais, Escola de Engenharia, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

_____. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** 1999. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

FERREIRA, RICARDO, Influencia das Adições minerais na penetrabilidade de íons cloreto no concreto de cobertura.. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 45° **Anais.** Espírito Santo - ES, Instituto Brasileiro do Concreto 2003.

FREY R. T. BALOGH and G. L. BALÁZS. Kinetic method to analyse chloride diffusion in various concretes. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.24, n.5, p. 863-873, 1994.

GASTALDINI, A. L. G. & ISAIA, G. C. Chloride permeability of high performance concrete with mineral addition: binary and ternary mixtures. INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 2.Gramado, Brasil, **Proceedings...** 1999. 1 CD-ROM.

_____. Efeitos de misturas compostas de pozolanas e escória na permeabilidade a cloreto. In: ENCONTRO NACIONAL EM TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 27., 2000, Salvador.**Anais...** v.2, p. 1026-1033.

GASTALDINI, A. L. G. Resistência à compressão e penetração de íons cloreto em concretos com aglomerantes ternários. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2001, Punta Del Este, URUGUAI **Anales...** Punta Del Este, 2001. 1 CD-ROM.

GEIKER, M.; THAULOW, N.; ANDERSON, P. J. Assentement of rapid chloride permeability of concrete with and without mineral admixtures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AN COMPONENTS, 5th, 1990. **Proceddings...**, p.45-55.

GJØRV O. E. & VENNESLAND O. Diffusion of chloride ions from seawater into concrete. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.09, n.6, p. 229-238, 1979.

GOMES, N. S. **Influência de ativadores químicos na penetração de cloretos em concretos de misturas binárias e ternárias**. 2003, 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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

HANSSON, I. L. H. E HANSSON, C. M. . Diffusion of chloride ions from seawater into concrete. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.13, n.6, p. 675-683, 1983.

HASPARYK, N. P. **Estudo da influência da cinza de casca de arroz amorfa nas propriedades do concreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Vitória. **Anais...** Vitória – ES : Instituto Brasileiro do Concreto, 2003. 1 CD-ROM.

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

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**, 1993. 231f. Tese (Livre Docência)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1997, São Leopoldo. **Anais...** São Leopoldo, 1997. p. 31-42.

HONG, K. & HOOTON, R. D. Effects of fresh water exposure on chloride contaminated concrete. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, n.30, p. 1199-1207, 2000.

HUSSAIN S.E.; AL-GAHTANI A.S.; RASHEEDUZAFAR. Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete. **ACI MAT. JOURNAL**, v.94, n.6, p. 534-538, 1996.

HWANG, C. L.; WU, P. S. Properties o cement paste containing rice husk. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4th, Istanbul, 1992. **Proceddings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993, 2 v., v2, p73-762. (SP-114).

IBGE – *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Disponível em: <[http:// www. ibge.br](http://www.ibge.br)> Acesso em 24 de setembro de 2004.

ISAIA, G.C , Enfoque crítico sobre concretos de alta resistência com elevados teores de cinza volante frente a corrosão das armaduras. In: Reunião Anual do IBRACON, 34, Curitiba 1992, **Anais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, 1992, 2c. V.1, p. 217-230

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

ISAIA, GERALDO CEHELLA, A durabilidade do concreto de alto desempenho e o meio ambiente um estudo sócio econômico. . In: Congresso Brasileiro do Concreto, 41º, Salvador-BA, **Anais...**1999.

ISMAIL, S. M. Effect of rice husk ash on high strength concrete. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science. (10), 1996. p.521-526.

JOHN M. V. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. Texto técnico. <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm> Depto. Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, USP (PCC/USP).2004.

JONES M.R, R.K, Concrete containing ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, n.6, v.27, 1997. p.825-831.

KHATIB J. M., P. S. MANGAT, Influence of high-temperature and low humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete.. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, (32), 2002. p.1743-1753.

LIMA M. G., **Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras**, 1990. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

LONGUET, P.; BURGLIN, L. M.; ZELWER, A. La phase liquide du ciment hydraté. **Revue du Matériaux de Construcion**, Paris, n. 767, p. 34-41, 1973.

LUXAN M. P. M. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, n.19, 1989. p.63-68.

MALHOTRA V. M, **Fly ash, slag fume and rice husk ash in concrete a review**. Concrete International, Michigan - USA, v.15, n.4, p. 23-98, April 1993.

MAZLUM, F.; UYAN, M. **Strength of Mortar Made with Cement Containing Rice-husk Ash and Cured in Sodium Sulfate Solution**, ACI-SP 132 , 1992, pp. 513-531. (ed. V.M. Malhotra).

MEDEIROS FILHO, S. **Fundamentos de medidas elétrica**. Recife: Universitária. Universidade Federal de Pernambuco, 1979.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo : Pini, 1994.

MEHTA, P. K., SCHIESSL, P., RAUPACH, M. Performance and durability of concretes systems. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENTS, 9th, New Delhi. **Proceedings...**, New Delhi, 1992, v.1, p.571-659.

MEHTA, P.K. Rice-husk Ash - A unique Supplementary Cementing Material. **Advances in Concrete Technology**, MSL Report 94-1 (R), CANMET : V.M.Malhotra,1994. pp. 419-444.

MEHTA, P.K. Pozzolanic and cementitious by products as mineral admixtures for concrete. A critical review. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) INTERNACIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND OTHER MINERAL BY PRODUCTS IN CONCRETE. 1st, Montebello, 1983. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1983, 2v. v.1, p. 1-46. (SP-79).

MEHTA, P.K., **Highly Durable Cement Products Containing Siliceous Ashes**, U.S.Patent n. 5, 346, 548, Sept. 13, 1994.

MEHTA, P. K., & PITT, N. A new process of rice utilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE UTILIZATION OF RICE BY-PRODUCTS. 1977, Valencia, Spain. **Proceedings...** Valencia: IATA 1974, published in 1977, p.45-58.

MOREIRA, H. P. **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros**, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001. 16p.

MULLICK, A.K. Why concrete is not always durable. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 9th, 1992, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: National Council of Cement and Building Materials, 1992, 6 v., v.1, p.1-31.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; DAMATTY, A. EL, Performance of rice husk ash using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement & Concrete Composites**, USA : Elsevier Science, n.33, 2003, p.1203-1210.

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

OLIVER J. P. **Durability of concrete**. Boletim técnico da EPUSP, BT/PCC/192, 1998.

OZYILDIRIM, C. Rapid Chloride permeability testing of sílica-fume concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v.6, n.1, p.53-56, Jun, 1994.

PEREIRA G. A., DAL MOLIN D. C. C. Avaliação da penetração acelerada de íons cloreto em concretos confeccionados com diferentes tipos de cimento, relação a/c, temperatura e tempo de cura. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002. p. 1211-1219.
PEREIRA, L. de F.; L. DA COSTA, M. A. C. Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento.. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica

da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil., São Paulo, 2001. **Anais...** CD-ROM.

PLANTE, P.; BILODEAU, A. A rapid chloride ion permeability test: data on concretes incorporating supplementary cementing materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 1989, Tronchein. **Proceedings...**1989 v.1, p. 625-644 (ACI SP 144-30).

POLDER, ROB B.; PEELLEN, H. A. Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, (24), 2002. p.427-435.

POUEY, M. T. Estudo comparativo da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes composições mineralógicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO – IBRACON, 44, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte-MG, 2002. 1 CD-ROM.

POUEY, M. T.; PAGNUSSAT, DANIEL T. e DALMOLIN, DENISE C.C. Estudo da pozolanicidade de cinzas de casca de arroz com diferentes características submetidas à micronização. In: Jornadas Sud-americanas de ingenieria estructural, Mendonza, Argentina, **Anais**. p.1-8, 2004.

PREZZI et al. Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to marine environments. **ACI Materials Journal Michigan**, v.93, n.6, nov/dec 1996.

PRUCKNER F. & GJØRV O. E. Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, accepted 8 december 2003 – article in press, 2004.

QIJUN, K., YU, SAWAYAMA, S., SUGITA, M., SHOYA, Y., ISOJIMA. The reaction between rice husk ash and Ca(OH)₂ solution and the nature of its product. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.29, n.6, p. 37-43, 1999.

RAMEZANIANPOUR, A. A. & MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement & Concrete Composites**, USA : Elsevier Science, (17), 1995. p.415-436.

RASHEEDUZZAF, A. R. Influence of cement composition on concrete durability. **ACI MAT. JOURNAL**, v.89, n.6, p. 574-586, 1992.

RASHEEDUZZAF, A. R.; HUSSAIN, S.; AL-SAADOUN, S. Effect of tricalcium aluminate content of cement on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete. **ACI MAT. JOURNAL**, v.89, n.1, p.-12, 1992.

REDDY, B., G. K. GLASS, P. J. LIM, N. R. BUENFELD, On the corrosion risk presented by chloride bound in concrete. **Cement & Concrete Composites**, USA : Elsevier Science, (24), 2002. p.1-5.

REGATTIERI, CARLOS EDUARDO X., Influência das adições de cimento na resistência à penetração de íons cloreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO – IBRACON, 41., 1999. Salvador-BA. **Anais...** Salvador : Instituto Brasileiro do Concreto, 1999. 1 CD-ROM.

REGO, J. H. S. **Viabilidade técnica da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento.** Goiânia : CMEC/ UFG, 2001. p.1-16.

SANTOS, SILVIA Estudo comparativo da pozolanicidade de cinza volante e cinza de casca de arroz residual. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1998. p. 936-939.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concretos com vistas a avaliação de suas durabilidades.** 1998, 172f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, São Paulo, 1998.

SARASWATHY V.; MURALIDHARAN K.T.; SRINIVASAN S. Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, (25), 2003. p.673-680.

SENSALE, G. R. & DAL MOLIN, D. C. Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu : Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

SHI, C.; STEGEMANN, J. A. CALDWELL, R. J. Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. **ACI MAT. JOURNAL**, v.95, n.4, march-april, 1998.

SHI, C.; STEGEMANN, J. A. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTMC 1202) or (ASSHTOT 277) results. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, (34), 2004. p.537-545.

SILVA, J. H. S. Análise da confiabilidade de estruturas de concreto armado sujeitas aos efeitos de corrosão por cloretos. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003. **Anais...** São Paulo, Brasil, 2003. 1 CD-ROM.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo de ataque por sulfatos.** 1996. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SJÖSTROM, CH. Durability and sustainable use of building materials. In: Sustainable use of materials. **J.W. Llewellyn & H. Davies editors.** London BRE/RILEM, 1996.

SUGITA, S.; SHOYA, M.; TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4th, 1992, Instambul. **Proceedings...** Detroit: American Concrete, 1993, 2v., v1, p. 495-512. (SP-132).

WEE T. H. et al. Influence of aggregate fraction in the mix on reliability of the rapid chloride permeability test. **Cement & Concrete Composites**, USA : Elsevier Science, v.21, n. 1, 1999. p.59-72.

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

ZHANG M. H; LASTRA, R. and MALHOTRA, V. M. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, USA : Elsevier Science, v.26, n.6, 1996. p.963-977.