

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

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DA CASCA DO
ARROZ RESIDUAL EM CONCRETOS ESTRUTURAIIS:
UMA ANÁLISE DA DURABILIDADE AOS CLORETOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Éder Claro Pedrozo

Santa Maria, RS, Brasil

2008

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DA CASCA DO
ARROZ RESIDUAL EM CONCRETOS ESTRUTURAIS: UMA
ANÁLISE DA DURABILIDADE AOS CLORETOS**

por

Éder Claro Pedrozo

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

Orientador: Prof. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Santa Maria, RS, Brasil

2008

© 2007

Todos os direitos autorais reservados a Éder Claro Pedrozo. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho somente com autorização por escrito do autor.

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, CEP: 97105-900.

Fone: (55) 3220-8837 Fax: (55) 3220-8030 e-mail: pgcivil@ct.ufsm.br



<http://www.ufsm.br/gepecon>

**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

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DA CASCA DO ARROZ
RESIDUAL EM CONCRETOS ESTRUTURAIS: UMA ANÁLISE DA
DURABILIDADE AOS CLORETOS**

elaborada por
Éder Claro Pedrozo

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini – UFSM/RS
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia – UFSM/RS

Prof. Dr. Ruy Alberto Cremonini – UFRGS/RS

Santa Maria, 27 de Março de 2008.

Aos meus pais, Olmes e Dilma, aos meus irmãos, Crístofer, Jair e Sandro, e à minha amada Shirle, pelo carinho, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Um trabalho com a magnitude de uma dissertação de mestrado, apesar de monográfico, não pode ser realizado sem a participação de outros colaboradores. Portanto, cabem agora os meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. *Antônio Luiz Guerra Gastaldini* não apenas pela inquestionável orientação, mas também pelo incentivo, pela amizade, por depositar-me confiança e, principalmente, por sua integridade ética e moral no exercício da profissão a qual me servirá de exemplo por toda a vida.

Ao Prof. Dr. *Geraldo Cechella Isaia*, pela busca inexorável ao conhecimento, pela elegância e clareza com os quais ministra os preceitos da ciência e pela grandeza ao abordar, no meio científico, temas que contribuem verdadeiramente para com o desenvolvimento da humanidade.

Ao grupo de professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelos ensinamentos, pela amizade e pelo suporte nos momentos de dificuldade.

Aos colegas de Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto, *Tatiana Cureau Cervo, Régis da Costa Moraes, Alessandro Eduardo Hoppe, José Valdenir Bitencourt Teixeira, Letícia Meira, Marcelo Adriano Duarte, Lóri Ane Scremim, Irineu Dala Corte Filho*, pela inestimável contribuição pessoal e pela enriquecedora dialética.

Aos amigos bolsistas, *Rogério Quinhones Pereira, Mauren Nabaes Ferrari, Jociano Dalmaso, Marcelo Dias de Oliveira, Dilnei Dorneles Severo e Karina Kozoroski Veiga* pelo empenho e companheirismo durante os ensaios laboratoriais.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil, pelo empréstimo das suas dependências e pela cessão do técnico, Sr. João, que repassou toda a sua experiência na realização das tarefas.

À UFSM que mantém seu nível de excelência em ensino, pesquisa e extensão, e propicia a comunidade, mesmo em momentos de crise, ensino gratuito de qualidade.

Às empresas Reitex e Degussa, pelos materiais cedidos.

Ao CNPq e à FAPERGS pelos auxílios financeiros e bolsas concedidas.

A Deus por, acima de tudo, oferecer-me saúde e capacidade intelectual.

"Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos".

(Albert Einstein)

RESUMO

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

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DA CASCA DO ARROZ RESIDUAL EM CONCRETOS ESTRUTURAIS: UMA ANÁLISE DA DURABILIDADE AOS CLORETOS

AUTOR: ÉDER CLARO PEDROZO

ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2008.

A utilização de resíduos como a cinza da casca do arroz produzida sem controle da temperatura na fabricação de concretos reduz o impacto ambiental gerado na cadeia produtiva deste material, significando menor consumo de energia, menor desperdício de recursos naturais, menor poluição do meio ambiente e menor custo agregado. No presente trabalho investiga-se a viabilidade de se utilizar a CCA residual, ao natural ou moída, em concretos estruturais, em substituição parcial ao cimento Portland, a partir da análise da durabilidade aos ions cloretos. Para isso, foram testadas cinco misturas aglomerantes: duas compostas com CCA ao natural, duas com CCA moída e uma mistura de referência com 100% cimento Portland, a qual se confrontaram os resultados. Adotaram-se os teores de substituição de 15% e 25%, e as relações a/ag de 0,45; 0,55 e 0,65. Procederam-se os ensaios de resistência à penetração de cloretos segundo o método de penetração acelerada ASTM C 1202 (EAPC) e também, segundo o método de imersão em solução salina (EPCI). Adicionalmente, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água por imersão, segundo prescrições da ABNT. Os resultados obtidos na investigação confirmam que é viável utilizar a CCA residual, ao natural ou moída, como substituição parcial ao cimento Portland, em concretos para uso estrutural. Quanto à resistência a compressão axial, aos 91 dias, as misturas compostas CCA, em geral, apresentaram desempenhos superiores aos das misturas de referência. No EAPC a utilização de CCA resultou em decréscimos nos valores das cargas passantes que, em geral, promoveram melhoria nas classificações das misturas quanto à penetrabilidade aos cloretos, em comparação as misturas de referência. No EPCI a utilização da CCA, queimada sem controle de temperatura, também promoveu melhorias no desempenho da maioria das misturas, em comparação às misturas de referência, com reduções nos coeficientes de penetração de cloretos. Porém as misturas apresentaram comportamentos diferenciados quando comparados ao apresentado no EAPC. No caso da absorção de água por imersão, constatou-se que a utilização de CCA, em geral, aumentou a absorção de água dos concretos, entretanto, os valores apresentados pelas misturas compostas com CCA foram próximos aos de referência.

Palavras-chave: Concreto, Cinza de casca de arroz, Resistência à compressão axial, Penetração de cloretos, absorção de água por imersão.

ABSTRACT

Master's Thesis
Post-graduation in Civil Engineering Program
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

UTILIZATION STUDY OF RESIDUAL RICE RUSK ASH IN STRUCTURAL CONCRETE: AN ANALYSIS OF THE CHLORIDE DURABILITY

AUTHOR: ÉDER CLARO PEDROZO

COORDINATOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

City and Date: Santa Maria, February 28th of 2007.

The use of residues, as the rice husk ash (RHA) in the concrete's production reduces the environmental impact caused in its productive chain. It means fewer energy's consumption, fewer natural resources waste, less environmental pollution and lower aggregated cost. In the present study, the viability of using residual RHA, "in natura" (non-ground) or ground, on structural concrete, in partial substitution to the Portland cement was investigated, starting from the durability chloride ions analysis. In such a way, five cementitious blends, two composed by natural RHA, two with crushed RHA and one as a reference sample were tested. The substitution's rates were 15% and 25%. The water/binder relations used were 0.45, 0.55 and 0.65. The samples were tested for chloride penetration according to ASTM C 1202 (Rapid Chloride Permeability Test) and for long-term test (colorimetric method). Additionally, the tests of axial compressive strength and water absorption by immersion, according to the ABNT prescriptions were conducted. The obtained results showed that is viable to use residual non-ground RHA as partial substitution to Portland cement in structural concretes. For the axial compressive strength at 91 days and to the same relation w/b, in general, the residual non-ground RHA blends showed higher performance than those presented by the reference mixture. In the RCPT the use of RHA resulted in decreases in the passing charges that, in general, promoted improvement in the mixtures ratings on the chloride penetrability, compared with the reference mixtures. In long-term test, the use of RHA burnt without temperature control, also promoted improvements in the mixture performances, compared to the reference mixtures, with reductions in the chloride penetration coefficients. But the mixtures were dissimilar when compared to those presented by the RCPT. In the case of water absorption by immersion, it was found that the use of RHA, in general, increased the concrete water absorption, however, the results presented by mixtures composed with RHA were close to those of reference ones.

Key words: Concrete, chloride penetration, axial compressive strength, water absorption, rice husk ash.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1 – Níveis de modelagem segundo CEB 1997.....	29
FIGURA 1.2 – Modelo de vida útil de TUUTTI (1982).....	35
FIGURA 1.3 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado.....	37
FIGURA 1.4 – Tipos de corrosão e fatores que a provocam.....	38
FIGURA 1.5 – Corrosão em estruturas executadas com aditivo com cloretos (Vagheti et al., 2002).....	39
FIGURA 1.6 – Estrutura localizada na linha da maré severamente deteriorada...	40
FIGURA 1.7 – Variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade ambiental.....	43
FIGURA 2.1 – Estrutura celular da casca de arroz (Coutinho, 2003).....	47
FIGURA 2.2 – Micrografias da CCA. (a) CCA produzida em forno comum; (b) CCA produzida em leito fluidizado.....	48
FIGURA 2.3 – DRX de uma amostra de CCA obtida sem o controle da temperatura.....	49
FIGURA 2.4 – DRX de uma amostra de CCA obtida com o controle da temperatura.....	49
FIGURA 2.5 – Variação do IAP(índice de atividade pozolânica) com o tempo de moagem.....	50
FIGURA 2.6 – Fatores de eficácia da SA e da CCA, aos 28 dias, à temperatura de 20 °C.....	51
FIGURA 2.7 – Penetração acelerada de cloretos aos 28 dias (NEHDI <i>et al.</i> , 2003).....	55
FIGURA 2.8 – Depósito de CCA a céu aberto, em aterro.....	59
FIGURA 2.9 – Depósito de CCA a céu aberto, na beira de estrada vicinal.....	59
FIGURA 3.1 – Distribuição granulométrica a laser dos aglomerantes.....	63

FIGURA 3.2 – Pozolanidade de cimento pozolânico.....	65
FIGURA 3.3 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	67
FIGURA 3.4 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos.....	67
FIGURA 3.5 – Esquema do ensaio de penetração de cloretos por imersão	74
FIGURA 3.6 – Ensaio acelerado de penetração de cloretos.....	75
FIGURA 3.7 – Esquema do ensaio de absorção de água por imersão.....	75
FIGURA 4.1 – Evolução da resistência à compressão nas misturas com relação $a/ag= 0,45$	80
FIGURA 4.2 – Evolução da resistência à compressão nas misturas com relação $a/ag= 0,55$	81
FIGURA 4.3 – Evolução da resistência à compressão nas misturas com relação $a/ag= 0,65$	81
FIGURA 4.4 – Acréscimo da carga passante versus aumento da relação a/ag	84
FIGURA 4.5 – Influência da utilização da CCA na carga passante, aos 91 dias...	86
FIGURA 4.6 – Carga passante versus profundidade de penetração.....	91
FIGURA 4.7 – Análise de regressão das misturas com relação $a/ag= 0,45$	93
FIGURA 4.8 – Análise de regressão das misturas com relação $a/ag= 0,55$	94
FIGURA 4.9 – Análise de regressão das misturas com relação $a/ag=0,65$	94
FIGURA 4.10 – Influência da relação a/ag no coeficiente de difusão de cloretos.	96
FIGURA 4.11 – Influência da CCA no índice K em comparação ao concreto de referência.....	98
FIGURA 4.12 – Índice de penetração de cloretos versus nível de resistência à compressão.....	101
FIGURA 4.13 – Resultados de absorção de água por imersão para as misturas investigadas.....	104
FIGURA 4.14 – Desempenho das misturas compostas com CCA em comparação a de referência.....	104
FIGURA 4.15 – Absorção de água para os níveis de resistência de 30MPa 40MPa e 50MPa.....	106
FIGURA 4.16 – Condutividade elétrica específica das misturas investigadas.....	107
FIGURA 4.17 – Diagrama de dispersão entre as cargas passantes e os	

volumes totais de intrusão de todas as misturas investigadas.....	110
FIGURA 4.18 – Correlação entre a carga passante e o volume total de intrusão para cada mistura aglomerante.....	109
FIGURA 4.19 – Diagrama de dispersão entre os índices de penetração e os volumes totais de intrusão de todas as misturas investigadas.....	110
FIGURA 4.20 – Correlação entre os coeficientes de difusão de cloretos e o volume total de intrusão para cada mistura aglomerante.....	112
FIGURA 4.21 – Correlação entre a condutividade elétrica específica e a penetração de cloretos acelerada.....	113
FIGURA 4.22 – Correlação entre a condutividade elétrica específica e a penetração de cloretos por imersão.....	113
FIGURA 4.23 – Correlação entre a resistência à compressão e a penetração acelerada de cloretos.....	115
FIGURA 4.24 – Correlação entre a resistência à compressão e a penetração de cloretos por imersão.....	115
FIGURA 4.25 – Análise de regressão entre a resistência à compressão e a penetração de cloretos por imersão.....	116
FIGURA 4.26 – Correlação entre a resistência à compressão e a penetração acelerada de cloretos.....	117
FIGURA 4.27 – Correlação entre a absorção de água e a penetração de cloretos por imersão.....	117
FIGURA 4.28 – Análise de regressão entre a absorção de água e a penetração de cloretos por imersão.....	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Teor limite de cloretos (% em relação à massa de cimento).....	43
TABELA 2.1 – Principais produtores mundiais de arroz (FAO,2005).....	47
TABELA 2.2 – Principais características físico-químicas da casca de arroz (HOUSTON,1972).....	47
TABELA 2.3 – Cargas passantes, segundo ASTM C 1202, encontradas por outros pesquisadores.....	54
TABELA 3.1 – Características físicas dos aglomerantes.....	64
TABELA 3.2 – Ensaio em argamassa de CII F – 32.....	65
TABELA 3.3 – Composição química dos aglomerantes.....	65
TABELA 3.4 – Convenções adotadas no ensaio de pozolânicidade.....	65
TABELA 3.5 – Índice de atividade Pozolânica (Fratini).....	66
TABELA 3.6 – Características físicas dos agregados.....	66
TABELA 3.7 – Quantidades de materiais.....	69
TABELA 3.8 – Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira.....	70
TABELA 3.9 – Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25 °C.....	77
TABELA 4.1 – Resultados de resistência à compressão.....	79
TABELA 4.2 – Taxa de variação de resistência à compressão em comparação ao concreto de referência.....	80
TABELA 4.3 – Equações de Abrams aos 91 dias.....	82
TABELA 4.4 – Relações a/ag em igualdade resistência à compressão.....	82
TABELA 4.5 – Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C 1202).....	83
TABELA 4.6 – Classificação dos concretos quanto à penetrabilidade aos íons	

cloreto (ASTM C 1202).....	87
TABELA 4.7 – Enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202.....	88
TABELA 4.8 – Carga passante e classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto em igualdade de resistência a compressão.....	89
TABELA 4.9 – Classificação dos concretos baseados na carga passante e profundidade de penetração de cloretos.....	91
TABELA 4.10 – Coeficientes de penetração de cloretos das misturas investigadas.....	92
TABELA 4.11 – Coeficientes de penetração de cloretos das misturas investigadas.....	97
TABELA 4.12 – Equações de correlação entre os índices K e as relações a/ag, aos 91 dias.....	100
TABELA 4.13 – Equações de correlação entre a absorção de água por imersão e as relações a/ag, aos 91 dias.....	110
TABELA A.1 - Penetração de cloretos por imersão (profundidades médias).....	142
TABELA A.2 – Porosímetria por intrusão de mercúrio.....	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/ag – água (água + aditivo)/aglomerante (cimento + adição), em massa

a/c – água (água + aditivo)/cimento, em massa

CaSO₄ – Sulfato de cálcio

Ca²⁺ – Íons cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

C₃A – Aluminato tricálcico

CCA – Cinza da casca do arroz

CCAs – Cinzas da casca do arroz

CCAM – Cinza da casca do arroz, moída

CCAN – Cinza da casca do arroz, ao natural

CEB - Comitê euro-international du béton

Cl⁻ - Íon cloreto

Cl⁻/OH⁻ - Relação iônica entre cloretos e hidroxilas

CO₂ – Anidrido carbônico ou dióxido de carbono

CP – Cimento Portland

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CP II – F – Cimento Portland composto com filler calcário

EAPC – Ensaio acelerado de penetração de cloretos

E_f – Eficiência cimentícia

EPCI - Ensaio de penetração de cloretos por imersão em solução salina.

f_c – Resistência à compressão axial

Fe²⁺ – Íons ferro

H⁺ - Íons hidrogênio

HCl – Ácido clorídrico

k - coeficiente obtido do ensaio imerso de penetração de cloretos, por $y = K\sqrt{t}$, em mm/ $\sqrt{\text{semana}}$.

K⁺ - Íons potássio

KOH – Hidróxido de potássio

K₂O – Óxido de potássio

KCl – Cloreto de potássio

K₂SO₄ – Sulfato de potássio

Mg²⁺ - Íons magnésio

MgCl₂ – Cloreto de magnésio

MgSO₄ – Sulfato de magnésio

Na⁺ - Íons sódio

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

Na₂O – Óxido de sódio

O₂ – gás oxigênio

OH⁻ - Íons hidroxila ou hidroxila

pH – Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico

R² - Coeficiente de determinação

R – Mistura de referência com 100% de cimento

R45 – Mistura de referência com 100% de cimento, relação a/ag=0,45

R55 – Mistura de referência com 100% de cimento, relação a/ag=0,55

R65 – Mistura de referência com 100% de cimento, relação a/ag=0,65

RAA -A reação álcali-agregado

SiO₂ – Dióxido de silício

SO₄²⁻ - Óxido de enxofre

σ = Condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros

- Abertura da malha da peneira

∅ - Diâmetro

15M – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto

15M45 – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação a/ag=0,45

15M55 – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,55$

15M65 – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,65$

25M – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto

25M45 – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,45$

25M55 – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,55$

25M65 – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,65$

15N – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto

15N45 – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,45$

15N55 – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,55$

15N65 – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,65$

25N – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto

25N45 – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,45$

25N55 – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,55$

25N65 – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,65$

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Resultados dos ensaios.....	143
--	------------

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xv
LISTA DE ANEXOS.....	xviii
INTRODUÇÃO	21
1 ASPECTOS REFERENTES À DURABILIDADE DO CONCRETO	26
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	26
1.2 MODELOS DE PREVISÃO DE DURABILIDADE: CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	28
1.3 FATORES QUE INTERFEREM NA DURABILIDADE DOS CONCRETOS	31
1.3.1 Fatores mecânicos e físicos	32
1.3.2 Fatores Biológicos	33
1.3.3 Fatores químicos	33
1.4 CORROSÃO DAS ARMADURAS.....	36
1.4.1 Generalidades	36
1.4.2 Mecanismo de corrosão no concreto	37
1.4.3 Morfologia da corrosão	39
1.4.4 Penetração de Cloretos	40
1.4.5 Mecanismos de transporte de cloretos para o concreto	42
1.4.6 Limites críticos de cloretos	44
2 A CINZA DA CASCA DO ARROZ.....	46
2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	46
2.2 INFLUÊNCIA DA QUEIMA E DA MOAGEM NA QUALIDADE DA CCA.....	50
2.3 A EFICIÊNCIA CIMENTÍCIA DA CCA	52
2.4 O PAPEL DA CCA COMO ADIÇÃO MINERAL.....	54
2.4.1 A influência da utilização da CCA na penetração de cloretos em concretos:.....	55
2.4.2 A utilização da CCA e a sustentabilidade:.....	60
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.1 INTRODUÇÃO.....	63
3.2 VARIÁVEIS DA PESQUISA	64
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	65
3.3.1 Aglomerantes.....	65
3.3.2 Agregados	69

3.3.3	<i>Aditivo</i>	71
3.3.4	<i>Água</i>	72
3.4	PROPORCIONAMENTO DAS MISTURAS	72
3.5	MOLDAGEM E CURA	73
3.6	ENSAIOS REALIZADOS.....	75
3.6.1	<i>Resistência à compressão</i>	75
3.6.2	<i>Ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202</i>	77
3.6.3	<i>Absorção de água por imersão</i>	78
3.6.4	<i>Composição iônica da solução aquosa dos poros</i>	79
3.6.5	<i>Ensaio de porosímetria de mercúrio</i>	81
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
4.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	82
4.1.1	<i>Determinação das curvas de Abrams.</i>	86
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO ACELERADO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS (ASTM C 1202) 87	
4.2.1	<i>Influência da relação água aglomerante</i>	89
4.2.2	<i>Influência da adição de CCA</i>	90
4.2.3	<i>Classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto</i>	92
4.2.4	<i>Análise das cargas passantes em igualdade de resistência a compressão</i>	93
4.2.5	<i>Determinação da profundidade de penetração nos concretos submetidos ao teste rápido de penetração de cloretos.</i>	95
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS POR IMERSÃO (EPCI)....	96
4.3.1	<i>Influência da relação a/ag</i>	99
4.3.2	<i>Influência da utilização de CCA</i>	101
4.3.3	<i>Cinza de casca de arroz moída x Cinza de casca de arroz ao natural</i>	104
4.3.4	<i>Análise dos coeficientes de penetração de cloretos em igualdade de resistência a compressão axial</i>	105
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	107
4.5	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ESPECÍFICA DA SOLUÇÃO DOS POROS.....	111
4.6	CORRELAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS.	113
4.6.1	<i>Cruzamento dos resultados de penetração de cloretos com a porosidade (volume total de intrusão)</i>	114
4.6.1.1	<i>Penetração de cloretos acelerada</i>	114
4.6.1.2	<i>Penetração de cloretos por imersão</i>	115
4.6.2	<i>Correlação dos resultados de penetração de cloretos com a condutividade elétrica da solução dos poros</i>	117
4.6.3	<i>Correlação dos resultados de penetração de cloretos com a resistência a compressão axial.</i> 119	
4.6.4	<i>Correlação dos resultados de penetração de cloretos com a absorção de água por imersão.</i>	121

5	CONCLUSÕES	124
5.1	COM RELAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES OCORRIDAS NAS PROPRIEDADES ESTUDADAS.....	124
5.1.1	<i>Resistência à compressão axial.....</i>	<i>124</i>
5.1.2	<i>Penetração de cloretos.....</i>	<i>125</i>
5.1.3	<i>Absorção de água por imersão</i>	<i>126</i>
5.2	COM RELAÇÃO A INTERATUAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS COM AS OUTRAS PROPRIEDADES ESTUDADAS.....	127
5.3	COM RELAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES ESTUDADAS EM IGUALDADE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	128
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	130
	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	131
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
	ANEXO A	142

Introdução

A versatilidade do concreto não possui paralelo na construção civil na medida em que se podem fabricar elementos construtivos com variedade de formas, a baixo custo e com relativa facilidade. Esses atributos, relatados por Nmai (2003), associados à evolução da cadeia produtiva, ao advento dos aditivos químicos e a novos métodos de cálculo estrutural, tornaram-no o material de construção mais popular do mundo, tendo em vista que o concreto é utilizado nas mais diversas estruturas, de forma esteticamente agradável, em geral, com confiança e durabilidade.

Entretanto, segundo Coutinho (1998), ao longo dos anos, criou-se um excesso de confiança no meio técnico o qual provocou um certo relaxamento com relação aos cuidados e requisitos inerentes a construção e a manutenção das estruturas de concreto. Essa afirmação é confirmada pelo fato de que, continuamente, são gastos grandes montantes em dinheiro com o reparo ou a reconstrução de estruturas de concreto com problemas de durabilidade, principalmente, devido a uma deterioração prematura em serviço, agravada pela exposição a ambientes com elevada agressividade. Além disso, uma diminuição na durabilidade origina um problema de ordem ambiental haja vista que uma menor vida útil do material significa desperdício de matérias-primas, aumento da produção de resíduos e aumento nos consumos de energia e de recursos naturais limitados.

Mas, a diminuição da durabilidade não é o único fator, associado ao concreto, que origina problemas ambientais. Desde a obtenção das matérias-primas até os resíduos finais, gerados ao término da vida útil, o concreto responde por grandes impactos ao meio ambiente e dentre eles estão: o elevado consumo de energia, a geração de resíduos e a emissão de gases poluentes. Somente o gás carbônico (CO₂) emitido na produção do cimento Portland contribui com, aproximadamente, 5% do total que é emitido anualmente na atmosfera (MEHTA, 1999).

Talvez por isso, procurar soluções que prolonguem a vida útil das estruturas de concreto e minimizem o impacto ambiental gerado por sua cadeia produtiva, tenha se tornado, nos últimos anos, num dos grandes desafios para os pesquisadores e alvo de inúmeras pesquisas dentro do setor da construção civil. É imperativo que as questões que podem, potencialmente, diminuir a durabilidade das

estruturas de concreto armado ou impactar o meio ambiente de maneira prejudicial, sejam corretamente identificadas e administradas durante as etapas de projeto e de execução. Neste sentido, a utilização de pozolanas provenientes de resíduos agroindustriais tem se mostrado como uma alternativa comprovadamente viável, aumentando consideravelmente o desempenho dos concretos.

Assim, os efeitos do emprego da cinza da casca do arroz (CCA), em concretos, vêm sendo estudados por muitos pesquisadores e, geralmente, as pesquisas demonstram que os concretos com adição de CCA possuem maior durabilidade e maior resistência mecânica que os concretos de referência. A quantidade de trabalhos relacionados à utilização da cinza e da casca do arroz é vasta. Os principais trabalhos disponíveis acerca do tema, bem como, os principais pesquisadores, em âmbito nacional e internacional, serão relatados no capítulo 2, dedicado totalmente à CCA.

Contudo, a CCA ao natural, sem beneficiamento, é pouco estudada. Os pesquisadores, geralmente, estudam os efeitos da adição de CCA beneficiada em concretos, ou seja, aquela que é obtida através de uma queima controlada. Segundo Rêgo (2002) o elevado custo agregado ao processo de beneficiamento da CCA tem inviabilizado que os bons resultados obtidos nas pesquisas cheguem efetivamente até o mercado. Isso é agravado pelo fato de que as cinzas da casca do arroz (CCAs) brasileiras, normalmente, são provenientes de queima sem o controle da temperatura. Segundo Sensale & Dal Molin (2002), a obtenção das CCAs no Brasil e Uruguai, em grande maioria, faz-se por intermédio do resgate do resíduo acumulado no processo de secagem dos grãos nas indústrias beneficiadoras de arroz. Esse processo de queima produz cinzas com características bastante variadas (CCA residual), encontrando-se formas cristalinas de sílica (SiO_2) ao invés da sílica amorfa, altamente reativa, produzida no processo de queima controlada. Isaia (1995), afirma haver certo preconceito no meio técnico quanto a CCA, obtida a temperaturas elevadas, sem que haja evidências de mau desempenho quando adicionadas a concretos e argamassas.

Como não há emprego para esse material, geralmente, é estocado a céu aberto ou acaba sendo lançado de forma clandestina ao meio ambiente, gerando contaminação do solo e dos mananciais. Dessa forma, fatalmente, mais um grave problema ambiental é gerado, sendo que no Brasil o problema toma proporções ainda maiores na medida em que o país figura entre os principais produtores de

arroz do mundo. Assim, diante do panorama atual de desenvolvimento, é inadmissível descartar de forma insustentável um resíduo que, comprovadamente, aumenta o desempenho do concreto e que poderia auxiliar na sustentabilidade do concreto.

No intuito de contribuir com a solução desse problema, instituições de pesquisa do Brasil, da Argentina e do Uruguai, que são os principais produtores de arroz do Mercosul, vêm desenvolvendo, em conjunto, uma pesquisa de grande porte a cerca do tema da CCA, cujo objetivo principal é investigar a viabilidade de se produzir concreto estrutural com substituição parcial do cimento Portland por CCA residual, ao natural. Pesquisa esta, relacionada ao projeto denominado “Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz in natura, sem beneficiamento”, que tem apoio financeiro do CNPq por via do Edital 40/2005, PROSUL, Projetos para Apoio Financeiro de Atividades de Cooperação em Projetos Conjuntos de P&D&I. Fazem parte do projeto: a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) através de seu Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON/UFSM), a Universidad de la Republica (UDELAR/Uruguay) e o Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT/Argentina), no qual, está sendo investigada a influência da CCA nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Para isso, está sendo realizada uma grande varredura sobre as propriedades: mecânicas, de durabilidade e de microestrutura, dos concretos produzidos. Entre outros, estão sendo executados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, resistência à tração, módulo de elasticidade, retração, carbonatação, penetração de cloretos, resistividade elétrica, difusão de fluidos, resistência a ácidos, ataque por sulfatos, aderência matriz-agregado, reação álcali-agregado, resistência às altas temperaturas, difração de Raios X, microscopia eletrônica de varredura e porosímetria por intrusão de mercúrio.

Na presente dissertação, que é parte integrante da pesquisa referida anteriormente, a investigação da viabilidade da utilização da CCA ao natural em concretos, como substituição parcial ao cimento Portland, é estudada frente ao comportamento que os concretos apresentam quanto à durabilidade aos cloretos. Uma propriedade mecânica, a resistência à compressão axial, e duas propriedades de durabilidade, a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água, que são parâmetros interatuantes e que estão relacionados ao desempenho dos

concretos frente à durabilidade aos cloretos, foram investigados para atingir-se o objetivo principal. Assim, foram levantadas as seguintes questões de pesquisa, mais específicas, conexas ao objetivo principal, que são:

- a) Quais as alterações ocorridas na resistência à compressão axial, na penetração de cloretos e na absorção de água dos concretos com utilização da CCA, queimada sem controle de temperatura, ao natural ou moída, em relação aos concretos de referência, para os teores de 15% e 25% de substituição?
- b) Como a penetração de cloretos interatua com a resistência à compressão axial, com a absorção de água, com a condutividade elétrica específica da solução dos poros e com a porosidade?
- c) Como variam as propriedades estudadas em igualdade de resistência à compressão axial, nos níveis de 30MPa, 40MPa e 50MPa?

O conteúdo desta dissertação foi estruturado em cinco capítulos. No Capítulo I revisam-se os conceitos ligados à durabilidade das estruturas de concreto armado. Apresentam-se os modelos de previsão da vida útil das estruturas de concreto armado, bem como, os fatores que interferem na durabilidade dos concretos. Analisam-se, também, os conceitos e mecanismos referentes à corrosão das armaduras e ao transporte de cloretos para o interior dos concretos. Por fim, são relatadas as formas de contaminação e a participação dos íons cloreto no processo corrosivo.

O Capítulo II é totalmente dedicado a cinza da casca do arroz. A revisão que foi realizada engloba aspectos ligados à estrutura físico-química da casca e da cinza da casca do arroz, bem como dos processos de obtenção e queima do resíduo. Também é demonstrado o papel que a cinza da casca do arroz exerce quando utilizada como substituição parcial ao cimento Portland em concretos. O capítulo revisa as alterações causadas aos concretos que utilizam CCA, resumindo trabalhos que versam sobre a penetração de cloretos e a resistência à compressão axial. Ao final do capítulo, são abordados alguns aspectos referentes às questões da sustentabilidade, ligados a utilização de CCA em concretos.

No Capítulo III, são expostos os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais de pesquisa, a técnica de dosagem dos concretos, assim como, os procedimentos adotados em sua moldagem e cura. Esse capítulo também apresenta a metodologia adotada em cada ensaio.

No Capítulo IV, são reunidos os resultados dos ensaios de resistência à compressão, dos dois ensaios de penetração de cloretos, da análise da condutividade elétrica específica da solução dos poros e do ensaio de absorção de água por imersão. No capítulo são analisados e discutidos os resultados de forma individual e, também, de forma integrada.

Por último, no capítulo V, são elaboradas as conclusões finais obtidas da análise dos resultados frente aos questionamentos propostos.

1 Aspectos referentes à durabilidade do concreto

1.1 Considerações iniciais

Segundo a contextura atual de desenvolvimento e de sustentabilidade, da construção civil, o concreto do século 21 deve ser mais resistente, mais durável, mais econômico e, ao mesmo tempo, mais eficiente energeticamente que seus antecessores.

Quando se iniciou a utilização do concreto armado os construtores fabricavam-no de baixa resistência à compressão, devido à falta de tecnologia disponível para se produzir concretos de resistências mais elevadas, o que exigia a adoção de seções transversais e cobrimentos de grandes dimensões. Também, eram utilizados aços macios nas estruturas o que, em geral, não provocava fendilhação. (COUTINHO, 1998)

Todos esses fatores, associados aos baixos níveis de poluição ambiental, contribuía para que as estruturas tivessem vidas longas, sendo consideradas, na época, de vida ilimitada. Criou-se, assim, um excesso de confiança no meio técnico o qual provocou certo relaxamento com relação aos cuidados e requisitos inerentes à construção das estruturas. (COUTINHO, 1998).

Entretanto, com a evolução da cadeia produtiva, com o advento dos aditivos e com as novas descobertas acerca do material, criaram-se condições para que concretos com elevada resistência, associados a novos métodos de cálculo estrutural, tivessem o seu desenvolvimento, tornando-se cada vez mais usuais na construção civil na medida em que propiciam redução das seções armadas e conseqüentes vantagens econômicas e arquitetônicas.

Mas, as reduções das seções armadas, com conseqüente diminuição dos cobrimentos, aliadas ao aumento da agressividade ambiental (poluição), contribuíram com a diminuição da proteção natural das armaduras oferecida pelo concreto. Surgiram vários problemas nas estruturas de concreto armado,

geralmente, associados à degradação do material, causada por fatores mecânicos, biológicos, químicos, físicos ou eletroquímicos.

Dentre os fatores que causam a degradação do concreto, há um consenso, que a corrosão das armaduras, associada à iniciação por cloretos ou à carbonatação, é o principal fator.

Além dos cuidados com a composição, preparo, lançamento, adensamento e cura dos concretos, devem ser procedidos, também, os cuidados com a manutenção das estruturas uma vez que se degradam conforme as condições do ambiente a que estão submetidas. Segundo Coutinho (1998) estes critérios contribuíram para o surgimento de uma nova noção associada ao concreto, a durabilidade.

Para Andrade (2000), uma estrutura é considerada durável se, durante sua vida, conservar seus requisitos de projeto em termos de segurança, de funcionalidade e de estética, sem custos de manutenção não previstos.

A durabilidade de uma estrutura é função de diversos parâmetros, tais como, das características das diversas etapas construtivas (projetos, especificações, materiais, manutenção), da agressividade do meio ambiente em que a estrutura está inserida, da forma de utilização da estrutura e do tempo, ou seja, da vida útil requerida (METHA, 1997).

Logo, em estruturas de concreto, vida útil pode ser descrita como o período de tempo em que estas satisfazem aos requisitos de projeto. Para prolongá-la, baixa permeabilidade e baixa retração são características de desempenho muito importantes, imprescindíveis aos concretos sujeitos a condições severas de exposição.

Pode-se ainda, segundo Helene (1993), classificar as “vidas úteis” em:

- a) Vida útil de projeto: Período de iniciação no qual os agentes agressivos ainda não provocaram danos efetivos à estrutura.
- b) Vida útil de serviço: Período no qual os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar.
- c) Vida útil total: Corresponde ao período onde há o colapso parcial ou total da estrutura.

- d) Vida útil residual: Corresponde ao período contado a partir do momento em que o desempenho da estrutura se torna inaceitável. Há, neste período, a necessidade de intervenção, procedendo-se reparos para que a estrutura retome condições de segurança, funcionalidade ou estética (COUTINHO, 1998). Portanto, a vida útil residual, pode ser aceita como sendo o período compreendido entre a vida útil de serviço e a vida útil total.

1.2 Modelos de previsão de durabilidade: considerações gerais

Os estudos sobre a durabilidade das estruturas de concreto evoluíram muito em função de um maior conhecimento dos mecanismos de transporte dos fluidos em meios porosos, permitindo-se associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente estes mecanismos (ANDRADE, 2005). Assim, nos últimos anos tem ocorrido um interesse crescente pelo desenvolvimento de modelos que estimem o tempo de vida útil das estruturas de concreto. Nessa projeção, é importante identificar-se um modelo matemático para cada mecanismo envolvido no processo de deterioração e poder descrever adequadamente as condições ambientais de exposição (AGUIAR, 2006).

Sarja (1994) relata que há a necessidade do projetista dispor de modelos com previsão de durabilidade, da estrutura e dos materiais, que incluam parâmetros de projeto como as dimensões das peças, as características dos materiais e a agressividade ambiental, para executar o projeto estrutural de durabilidade.

Deste modo, modelos de previsão de durabilidade vêm sendo elaborados para diversos fins, baseando-se em tipos e níveis de dados diferentes, podendo ser:

- a) Modelos de degradação: representações matemáticas que procuram reproduzir a evolução da degradação com o tempo, associado a um determinado parâmetro.
- b) Modelos de desempenho: a degradação pode ser também representada como uma redução do desempenho, através de cálculos matemáticos que

procuram reproduzir a diminuição do desempenho com o tempo, associado a um determinado parâmetro.

- c) Modelos de vida útil em serviço: modelos matemáticos que procuram reproduzir a vida útil de serviço de uma estrutura, em função de diferentes parâmetros. (FERREIRA, 2000)

Os modelos dividem-se, também, em modelos determinísticos e modelos probabilísticos.

Na abordagem determinística considera-se, nos modelos matemáticos, tanto a qualidade do concreto quanto o percurso que o agente agressivo deve percorrer até atingir a armadura, em concentrações e quantidades suficientes para deteriorar a estrutura (ANDRADE, 2005). Entretanto, neste caso, não são conhecidas informações probabilísticas sobre incerteza. As equações são solucionadas de maneira analítica e estas fornecem sempre valores médios de degradação, desempenho ou vida útil.

Na abordagem probabilística é considerado o fato de que muitas decisões da engenharia são tomadas na condição de incerteza. Assim, são necessárias adequadas quantificações da aleatoriedade, bem como, uma verificação de seus efeitos dentro de um todo. Nesta abordagem os principais pontos considerados são a geometria da estrutura, os materiais utilizados, o ambiente, a variabilidade dos parâmetros envolvidos, a qualidade da mão-de-obra, os mecanismos de degradação (principalmente a corrosão) e o planejamento das atividades de inspeção (ANDRADE, 2005).

Segundo Isaia (2002), a ação dos projetistas deve estar direcionada a critérios probabilísticos. Deverão ser conhecidos os agentes e os modelos que governam os mecanismos de transporte das substâncias agressivas pelos poros do concreto, com o intuito de garantir às estruturas determinado grau de confiabilidade em relação à durabilidade e a vida útil.

Andrade (2001) apresenta uma sumarização segundo CEB (1997) que compendia a modelagem que é utilizada na previsão de vida útil das estruturas de concreto, conforme figura 1.1.

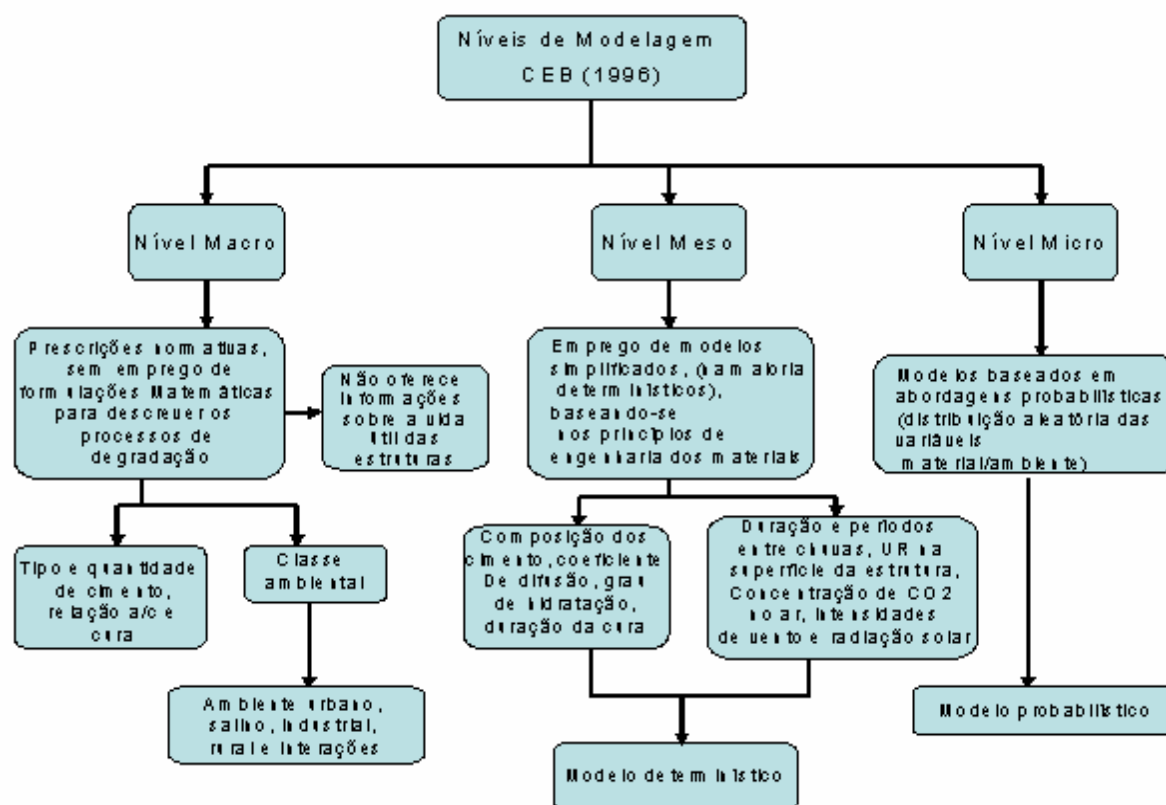


Figura 1.1 – Níveis de modelagem segundo CEB 1997.

Fonte: Andrade (2001) adaptado.

Nesta, a modelagem é representada por três níveis de precisão bem definidos que são:

- Nível Macro: corresponde ao nível mais simplificado, no qual não é realizada uma estimativa de vida útil. Neste caso existem apenas prescrições normativas que especificam parâmetros como o tipo e a quantidade de cimento, a relação a/ag, e os cobrimentos mínimos, em função da agressividade ambiental.
- Nível Meso: corresponde ao nível intermediário, no qual já existe o emprego de modelos matemáticos simplificados, na maioria determinísticos, para estimar a vida útil das estruturas. Estes modelos são baseados nos princípios da engenharia dos materiais e dispõem de considerações de contorno como: a composição do cimento, coeficientes de difusão, grau de hidratação, duração da cura, umidade

relativa, concentração de CO₂ no ar, intensidade de ventos, períodos de chuvas e radiação solar.

- Nível Micro: corresponde ao nível que proporciona estimativas mais precisas com relação à vida útil das estruturas. Como relatado anteriormente, neste caso, são utilizados modelos matemáticos nos quais são analisadas, também, as condições de incertezas que estão inseridas nas variáveis (materiais - ambiente), ou seja, é considerado o efeito propiciado pela distribuição aleatória das variáveis.

1.3 Fatores que interferem na durabilidade dos concretos

A complexidade dos mecanismos responsáveis pela deterioração do concreto está associada ao fato de que estes são fatores internos ou externos, podendo atuar de maneira individual ou em conjunto, e nem sempre são detectados visualmente. Os principais sintomas de deterioração, que podem alterar a capacidade do concreto no desempenho de suas funções, são a fissuração, o destacamento e a desagregação (AGUIAR, 2006).

Como comentado anteriormente, as condições de exposição devem influenciar no dimensionamento de um concreto durável. Logicamente, a partir de tais condições, também é possível determinar quais os fatores de deterioração que devem ser considerados.

A seguir, serão abordados, de maneira geral, os principais fatores de deterioração do concreto, de modo que se possa ter um breve esclarecimento dos aspectos que interferem na durabilidade do concreto, como também, da vasta quantidade e complexidade dos agentes existentes. Obviamente os aspectos referentes à penetração de cloretos serão abordados com maior ênfase tenha-se em consideração que estão diretamente ligados ao objetivo principal desta dissertação.

1.3.1 Fatores mecânicos e físicos

- a) Ciclos de gelo-degelo: Surgem tensões no concreto endurecido, causadas pelo congelamento da água retida nos poros, que podem sobrepujar a resistência do material provocando a fissuração. É um fenômeno muito importante em países que possuem invernos rigorosos.

- b) Tensões térmicas: Se, nas peças de concreto, houver restrições das contrações e expansões causadas pela variação da temperatura, e as tensões de tração resultantes forem maiores que sua resistência, poderão ocorrer fissuras. As tensões térmicas são consideradas como uma das principais causas de fissuração no concreto.

- c) Deformação por retração: É uma deformação que ocorre nos concretos, independentemente do carregamento, causada, geralmente, pela perda de água. Pode ocorrer no estado plástico ou no estado endurecido e causar danos ao material. A retração pode ser classificada em: retração plástica (retração pré-endurecimento, se desenvolve no estado plástico), retração por secagem (ocorre no concreto endurecido como resultado do movimento de água), retração autógena (ocorre variação de volume sem a perda de água para o meio externo, devido às reações químicas de hidratação no concreto) e a retração por carbonatação (que ocorre devido a carbonatação do concreto).

- d) Deformação por fadiga: Ocorre aumento de deformação no concreto quando há ação de uma carga que é aplicada repetidas vezes ao longo do tempo (fadiga). Por conseguinte a fadiga pode causar o colapso do material (CALLISTER, 2002).

- e) Desgaste por abrasão, erosão e cavitação: A abrasão é o desgaste causado à superfície do concreto devido a algum processo de fricção. Geralmente ocorre em pavimentos ou superfícies que tenham tráfego intenso ou, ainda, em contato com escoamento hidráulico onde o processo pode ocorrer devido a sólidos contidos na lâmina d'água (DALFRÉ FILHO, 2004). A erosão e a cavitação são processos de desgaste provocados pelo escoamento de águas. A erosão é o carregamento de partículas devido a águas fluindo em altas velocidades e a cavitação é a degradação causada pela implosão de bolhas de vapor de água na superfície do concreto quando muda bruscamente à velocidade ou a direção do escoamento (NEVILLE, 1997).
- f) Efeito das altas temperaturas: Costa (2002) afirma que as altas temperaturas podem afetar notavelmente as estruturas de concreto. Isso quer dizer que aumentar a temperatura do concreto a níveis muito elevados pode ocasionar modificações importantes em sua microestrutura e prejudicar severamente o desempenho do concreto quanto à resistência e durabilidade.

1.3.2 Fatores Biológicos

O concreto é um material bioreceptivo. Assim, pode sofrer ações deletérias causadas por microorganismos (biodeterioração) que podem interferir esteticamente e comprometer sua durabilidade ou resistência (PINHEIRO, 2003).

1.3.3 Fatores químicos

Segundo Neville (1997) o concreto possui boa resistência frente ao ataque químico. Entretanto, existem algumas substâncias que podem atacar o concreto severamente e, portanto, o concreto não deve ser utilizado em alguns casos a menos que esteja devidamente protegido. Os ataques químicos mais importantes são:

- a) Ataque por ácidos: Devido à alta alcalinidade do concreto, ácidos fortes, em geral, decompõem os produtos de hidratação ou formam outros produtos que, se solúveis, podem ser lixiviados criando zonas de maior permeabilidade. Se forem produtos insolúveis, podem expandir-se causando tensões no concreto, que podem dar origem a fissuras. Segundo Aguiar (2006), o ataque ocorre a partir de valores de pH próximos a 6,5 e que para pH entre 3 e 6 a velocidade do ataque é proporcional a raiz quadrada do tempo. São exemplos de ácidos que podem deteriorar o concreto: ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido acético, ácido clorídrico e ácido carbônico.
- b) Ataque por sulfatos: Neville (1997) afirma que o mecanismo da expansão, provocada pela reação entre os sulfatos e os produtos de hidratação do cimento Portland (formação de etringita no concreto endurecido), ainda é controvertido. Entretanto, as conseqüências do ataque por sulfatos compreendem, além da expansão, com conseqüente desagregação e fissuração, a perda de coesão na pasta de cimento endurecida e a perda da aderência entre a matriz de pasta e a superfície dos agregados, diminuindo a resistência mecânica.
- c) Reação álcali-agregado: A reação álcali-agregado (RAA) é, em geral, uma reação que se manifesta lentamente com conseqüências às estruturas de concreto, que podem variar de desprezíveis a significativas. Consiste, basicamente numa expansão e fissuração, resultado de reações químicas envolvendo os íons alcalinos do cimento Portland, ou de outras fontes, íons hidroxila e certos constituintes silicosos que podem estar presentes nos agregados. Dentre as principais conseqüências sobre o concreto estão: discretas reduções na resistência à compressão, significativas perdas de resistência à tração e acentuadas quedas no módulo de elasticidade. Podendo ainda, devido à fissuração, haver a facilitação do ingresso de agentes que provocam a corrosão das armaduras no concreto armado (MEHTA, 1994). A que mais ocorre no Brasil, é a reação entre a sílica reativa, contida nos agregados, o hidróxido de cálcio que é liberado pelo cimento, e

os álcalis (sódio e potássio) da pasta de cimento, conhecida como reação álcali-silica. (SINDIPEDRAS, 2007).

- d) Lixiviação e eflorescência: As águas provenientes de lençóis freáticos, de rios, de lagos, da chuva ou da condensação da umidade, mesmo que não contenham elevados índices de contaminação por cloretos, sulfatos, bicarbonatos (de cálcio e magnésio), podem ser prejudiciais a algumas propriedades do concreto. À medida que estas águas entram em contato com a pasta de concreto endurecido podem hidrolisar ou dissolver os produtos de hidratação contendo cálcio, ou seja, lixiviá-los. Além de uma perda de resistência, essa lixiviação pode provocar a formação de crostas esbranquiçadas na superfície do concreto, conhecidas como eflorescências, que são indesejáveis por razões estéticas. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).
- e) Ataque por água do mar: As águas marinhas, além do oxigênio (O_2) e do dióxido de carbono (CO_2), contém diversos sais dissolvidos, que podem atacar o concreto. Alguns destes sais, como é o caso dos cloretos (de sódio, magnésio e potássio – $NaCl$, $MgCl_2$ e KCl - respectivamente) e dos sulfatos (de magnésio, cálcio e potássio – $MgSO_4$, $CaSO_4$ e K_2SO_4 - respectivamente), se apresentam em quantidades significativas, sendo o teor de cloretos muito maior do que o teor de sulfatos. Mehta & Monteiro (1994) relatam que:

O concreto exposto ao ambiente marinho pode deteriorar como um resultado de efeitos combinados da ação química dos constituintes da água do mar sobre os produtos de hidratação do cimento, da expansão álcali-agregado (quando houver a presença de agregados reativos), da pressão de cristalização dos sais dentro do concreto, se uma face está sujeita a condições de molhagem e outras, a condições de secagem, da ação do congelamento em climas frios, da corrosão do aço em peças armadas ou protendidas e da erosão física, devido à ação das ondas e objetos flutuantes (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

- f) Carbonatação: Na presença de umidade, o dióxido de carbono (CO_2) reage, com os compostos solúveis alcalinos do concreto C-H (hidróxido de cálcio), K-

H (hidróxido de potássio) e Na-H (hidróxido de sódio), consumindo hidróxido de cálcio e formando carbonato de cálcio. (ISAIA, 1995; SPERB, 2003). A frente de carbonatação avança ao interior do concreto lentamente, diminuindo seu pH e, ao encontrar a armadura de concreto, podendo provocar a despassivação da película de óxido protetora, dando início a uma corrosão generalizada.

1.4 Corrosão das armaduras

1.4.1 Generalidades

Nas estruturas de concreto armado a corrosão do aço é de natureza eletroquímica (em meio aquoso), ou seja, o processo físico-químico gerador dos óxidos e hidróxidos de ferro é devido à formação de uma célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre pontos da superfície. (PÓLITO, 2006).

Na medida em que os óxidos e hidróxidos formados no processo de corrosão ocupam um volume maior que as barras de aço originais há a ocorrência de um fenômeno expansivo no interior do concreto, o que pode levar ao aparecimento de tensões elevadas, ocasionando, até, uma desagregação do revestimento de concreto. Também, devido ao processo corrosivo, há uma diminuição da seção de armadura e, conseqüentemente, uma diminuição da resistência e da aderência entre o aço e o concreto, podendo, inclusive, levar a estrutura ao colapso. (TUUTTI, 1982; HELENE, 1993; MEHTA & MONTEIRO, 1994; AÏTICIN, 2000; ANDRADE, 2001).

No modelo clássico de TUUTTI (1982), o autor realiza uma correlação entre o grau de corrosão das estruturas e o tempo demandado no processo conforme figura 1.2. Nesta correlação o processo corrosivo é subdividido em dois períodos, o de iniciação e o de propagação, onde a soma destes é igual ao período de vida útil da estrutura e corresponde ao grau máximo aceitável de corrosão. O período de iniciação compreende o intervalo de tempo necessário para que os agentes agressivos penetrem através da camada de revestimento de concreto e atinjam as armaduras. Quando estes elementos nocivos atingem um certo nível, provocam a

chamada despassivação da película de óxidos, protetora do aço. Ao ocorrer essa despassivação, pode instalar-se o período de propagação no qual ocorre a dissolução do ferro, formando os produtos de corrosão das armaduras (óxidos e hidróxidos).

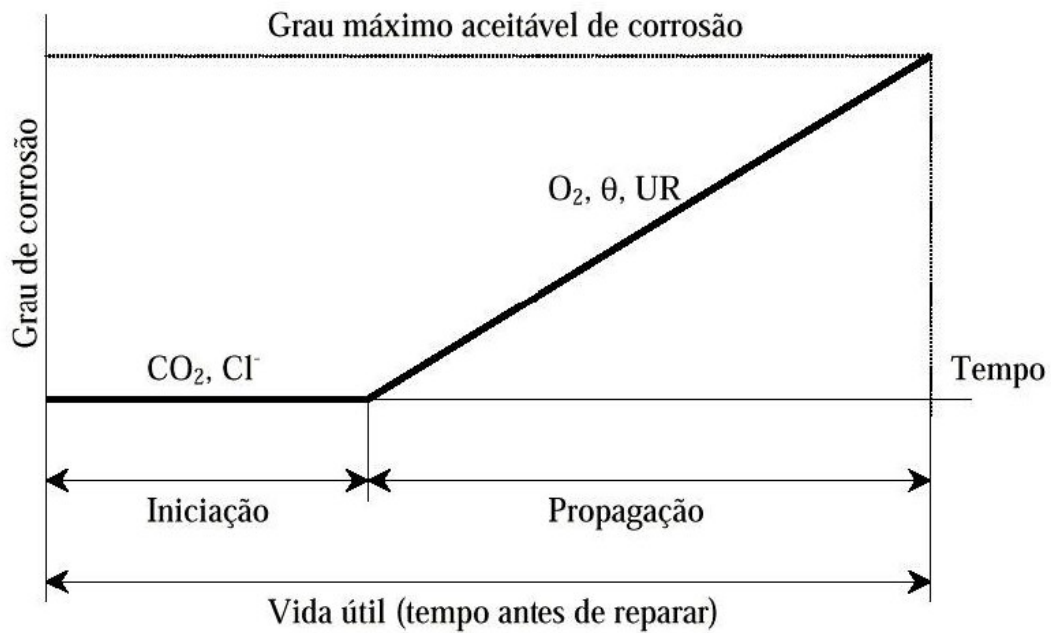
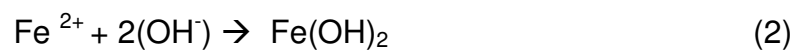


Figura 1.2- Modelo de vida útil de TUUTTI (1982).

1.4.2 Mecanismo de corrosão no concreto

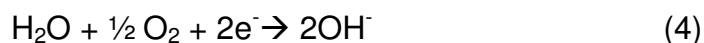
Segundo Gentil (1996), a célula de corrosão no concreto é composta por:

- Uma zona anódica (corroída), na qual ocorrem as reações de oxidação do ferro (1), (2) e (3).





- Uma zona catódica (não corroída), zona na qual ocorre a redução (4)



Na figura 1.3 está ilustrado o mecanismo de corrosão que ocorre no concreto armado. Acontece que, na região anódica, há dissolução do metal com formação de cátions ferrosos (Fe^{2+} , Fe^{3+}), que passam para a solução aquosa dos poros. Há, também, uma migração de elétrons livres para a região catódica onde, na presença de água e oxigênio, são formados íons hidroxila (OH^-). Como há mobilidade de íons pelo eletrólito, os íons hidroxila se combinam com os íons ferrosos formando assim a ferrugem como produto da corrosão.

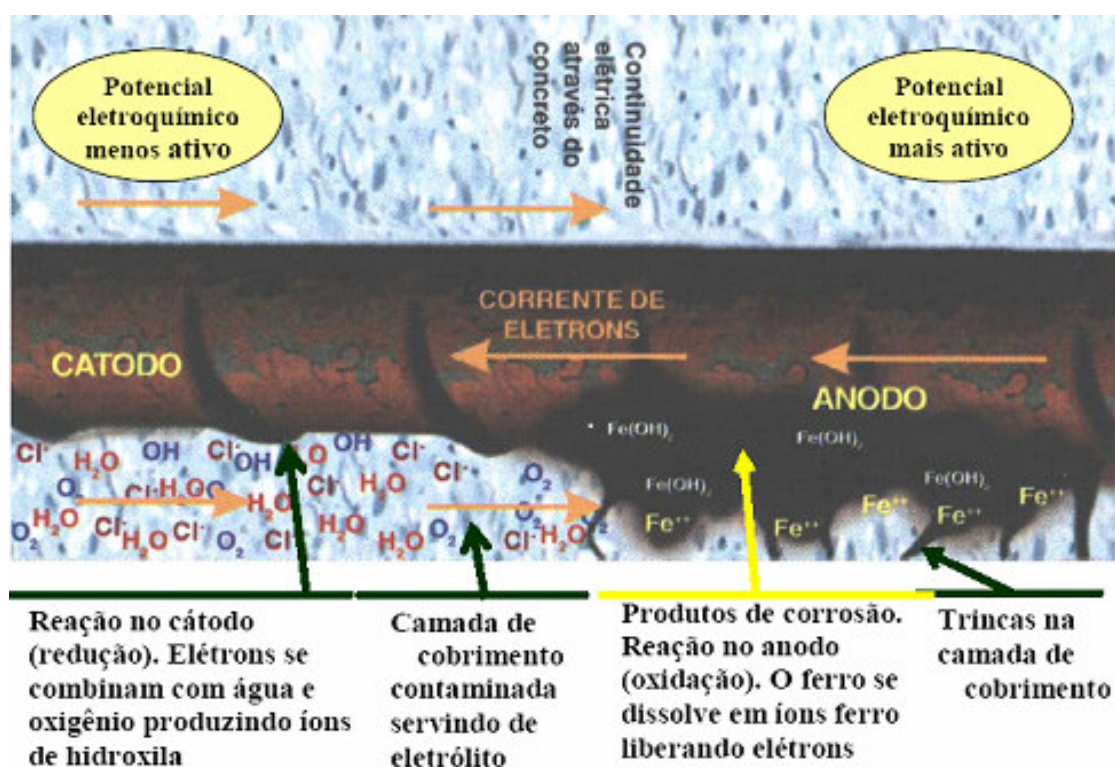


Figura 1.3 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado.
Fonte: Rodrigues (1997) apud Pólito (2006).

1.4.3 Morfologia da corrosão

Gentil (1996) relata que, segundo sua morfologia, a corrosão das armaduras pode ser classificada como generalizada ou como localizada. Os agentes básicos que podem dar origem ao processo são o CO_2 , no caso da corrosão generalizada devido à carbonatação, e os íons Cl^- , no caso da corrosão localizada por pites. Existe, ainda, um outro tipo de corrosão localizada chamada de corrosão por tensão fraturante, que ocorre, principalmente, em concreto protendido, mas que, segundo Cascudo (1997), também pode ocorrer em concreto armado. Embora pouco conhecida esse tipo de corrosão é muito perigosa, pois promove uma ruptura brusca do aço sob tensão, sem deformações significativas e sem sintomas aparentes de corrosão, principalmente, na presença de cloretos (PÓLITO, 2006). Na figura 1.4 é apresentada uma representação dos diferentes tipos de corrosão das armaduras citados acima.

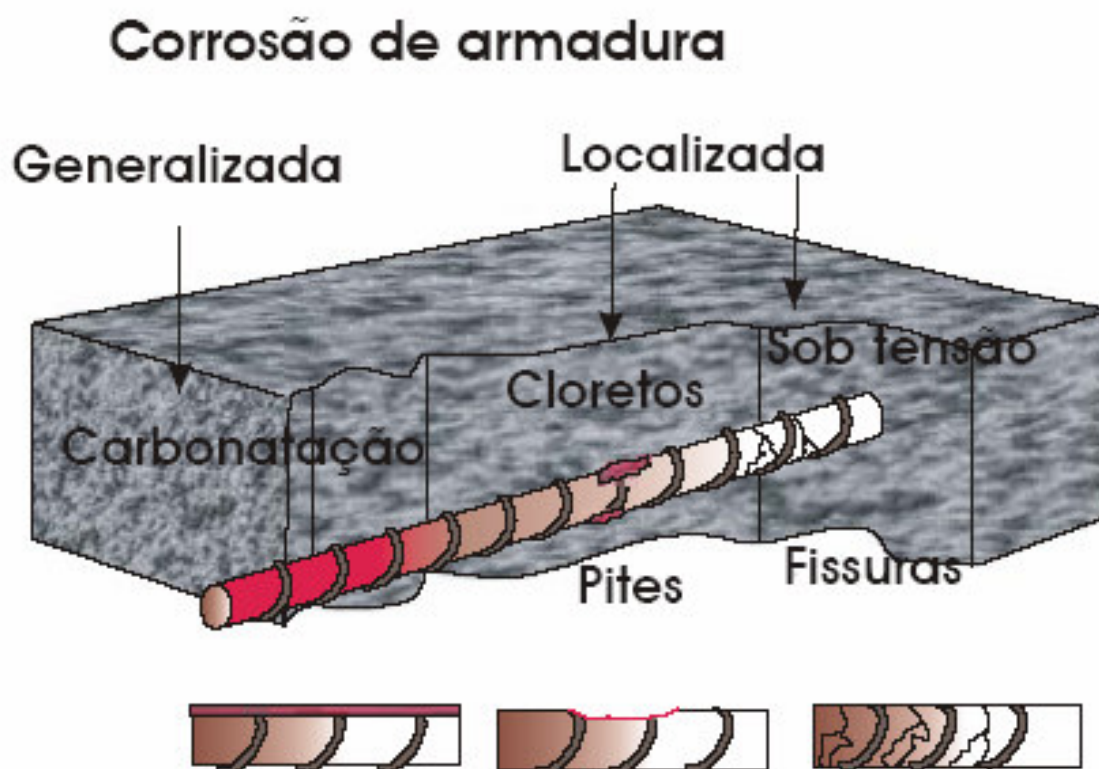


Figura 1.4- Tipos de corrosão e fatores que a provocam.
Fonte: Cascudo (1997) apud Pólito (2006).

1.4.4 Penetração de Cloretos

Devido ao fato dos cloretos serem abundantes na natureza e serem considerados como os maiores causadores de corrosão nas armaduras dos concretos, este agente agressivo é amplamente estudado por pesquisadores do mundo todo (DOTTO, 2006).

Isaia (1995) afirma que em concreto simples a presença dos íons cloreto torna-se quase que irrelevante a não ser pelo fato de que funciona como um aditivo acelerador de pega. Entretanto, em concreto armado podem tornar-se avassaladores. Estes íons são capazes de destruir a camada passivadora do aço mesmo em ambientes com alta alcalinidade. (SCHNEIDER, 2005).

Segundo Dotto (2006), no Brasil, como não há a necessidade da utilização de sais descongelantes em rodovias ou pontes, o ingresso de íons cloretos no concreto se pode dar por meio de:

- Difusão: nas estruturas submersas em águas marinhas.
- Absorção: nas estruturas localizadas na orla marítima, sujeitas à maresia, a neblina ou, ainda, estruturas em zonas de respingos.
- Incorporação durante a mistura: pelo uso indevido de água de amassamento ou agregados contaminados com cloretos.
- Adição intencional: como aditivo acelerador. (atualmente a NBR 6118 proíbe a utilização, em concreto armado ou protendido, de aditivos aceleradores que contenham cloretos em sua composição).

A autora afirma, ainda, que as formas em que os cloretos são encontrados no interior do concreto são as seguintes:

- Combinados quimicamente com o C_3A formando cloroaluminatos (ARYA *et al.*, 1990)
- Adsorvidos quimicamente na superfície dos poros da pasta hidratada.
- Livres na solução dos poros do concreto (segundo Jensen *et al.* (2002), a porção livre de cloretos que é a responsável pelos danos causados às armaduras).

Na figura 1.5 e 1.6 são apresentados alguns exemplos de estruturas deterioradas pela corrosão das armaduras induzida por íons cloreto.



Figura 1.5 – Corrosão em estruturas executadas com aditivo com cloretos (Vagheti et al., 2002)



**Figura 1.6 Estrutura localizada na linha da maré severamente deteriorada.
Fonte: Aguiar (2006).**

1.4.5 Mecanismos de transporte de cloretos para o concreto

Helene (1993), relata que os cloretos nocivos ao concreto encontram-se, geralmente, na forma de íons dissolvidos em água, pois quando estes se encontram na forma de cristais têm dimensões muito elevadas, o que impossibilita sua penetração pela rede porosa do concreto.

A literatura consultada refere-se tradicionalmente a quatro mecanismos de transporte de fluidos quando se trata de estruturas de concreto, os quais são:

- **Permeabilidade:** que é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão. Esta propriedade caracteriza a facilidade com que um fluido passa através de um sólido poroso quando há uma certa diferença de pressão (SANTOS, 2006). De acordo com Stanish et al. (2000) se houver um gradiente de pressão na superfície do concreto e houver cloretos disponíveis, estes podem penetrar no concreto por permeabilidade. Entretanto, esse fenômeno é muito raro devido à pressão necessária para que possa ocorrer, segundo relatam os autores. Geralmente há o ingresso de cloretos por permeabilidade quando estão dissolvidos em água. Sabe-se que a permeabilidade do concreto está relacionada a sua porosidade e, por conseguinte, é influenciada pelos fatores que alteram o volume e a conectividade dos poros capilares do concreto, como: a relação a/ag, o consumo de cimento, o teor de agregados, o emprego de adições minerais e o grau de hidratação do concreto.
- **Absorção capilar:** que é um fenômeno de transporte, devido a uma tensão superficial, no qual os líquidos podem ser transportados pelo concreto via poros capilares. O ingresso de água por absorção capilar depende dos fatores intrínsecos ao fluido, como a sua viscosidade e a sua densidade, da tensão superficial, e de características intrínsecas ao concreto que são a sua estrutura de poros e o seu teor de umidade. Segundo Helene (1993), o fenômeno da absorção não ocorre em concretos saturados. O autor afirma que para ocorrer à absorção de água por capilaridade nos concretos estes devem estar com seus poros secos ou parcialmente secos. O transporte de

íons cloretos pelo mecanismo de absorção capilar, segundo Santos (2000), é mais significativo em estruturas sujeitas a ciclos de molhagem e secagem, pois quando acontece o umedecimento os íons dissolvidos na água penetram no concreto.

- Difusão: que, segundo relata Silva Filho (1994), pode ser um fenômeno entendido como o mecanismo pelo qual o fluido se movimenta em função da existência de um diferencial de potencial químico ou de um gradiente de temperatura/umidade. É o movimento de substâncias de zonas de elevada concentração para zonas de baixa concentração (TANG, 1999). Este fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meios líquidos quanto para aquelas presentes em meio gasoso. De acordo com Delagrave (1996), os íons cloreto normalmente penetram no concreto por capilaridade ou difusão. Mas quando os cloretos ultrapassam a camada superficial e alcançam o interior do concreto, a penetração passa a ser por difusão iônica (SCHNEIDER, 2005).
- Migração iônica : que é entendida como o processo de transporte que ocorre quando existe uma diferença de potencial elétrico que possibilita o deslocamento dos íons presentes. Assim, o transporte acontece pela ação de campos elétricos que induzem a movimentação dos íons. Nepomuceno (2005) afirma que em estruturas de concreto esse fenômeno pode ocorrer em estruturas suporte de veículos que utilizam corrente elétrica para a sua movimentação, em estruturas de concreto com proteção catódica por corrente impressa ou em estruturas submetidas à extração de cloretos e a realcalinização pela aplicação de uma diferença de potencial.

1.4.6 Limites críticos de cloretos

Ainda não há um consenso na comunidade científica a respeito dos limites aceitáveis de cloretos para o concreto. O tema é muito debatido no sentido de evitar-se a despassivação da armadura e a posterior corrosão. Algumas normas ou recomendações apresentam valores orientativos para esses limites como apresentado na tabela 1.1 e na figura 1.7, na qual é apresentado um esquema de variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade ambiental, conforme CEB – FIB (1992).

Uma distinção deve ser feita entre os limites de cloreto encontrados em norma, um critério ajustado pelo homem, e os valores que limitam os pontos iniciais de corrosão, que é a quantidade real de cloreto necessária a iniciar a corrosão no concreto, sob variadas circunstâncias, determinadas pela natureza. Os dois não são necessariamente iguais. O limite deve ser ajustado e o ponto inicial de corrosão deve ser investigado de modo que os limites racionais retratem com fidelidade os pontos iniciais (WHITING, 1997).

Tabela 1.1- Teor limite de cloretos (% em relação à massa de cimento).

Norma	Tipo de concreto		
	Concreto massa	Concreto armado	Concreto protendido
EH-88 ¹	1,5 - 2	0,4	-
EM 206 ²	1	0,4	0,2
BS-8110 ³	-	0,2 - 0,4 *	0,1
ACI-222R ⁴	-	0,25 - 0,08 **	0,08 - 0,06**
ABNT ⁵	-	-	-

* O limite varia em função do tipo de cimento

** O limite varia em função das condições de exposição.

¹ Comisión Permanente Del Hormigón.

² Comité Européen de Normalization.

³ British Standards.

⁴ American Concrete Institute.

⁵ Associação Brasileira de Normas Técnicas (as normas NBR 6118 e NBR 14931 não permitem o uso de aditivo que contenha cloretos em sua composição e a NBR 9062 limita o teor de cloretos em 500mg/l nas estruturas de concreto pré-moldado, em relação à água de amassamento, incluindo contribuição dos agregados. Para uma relação a/ag= 0,40 com consumo de 400Kg/m³ o limite passa a ser de 0,02% em relação à massa de cimento.

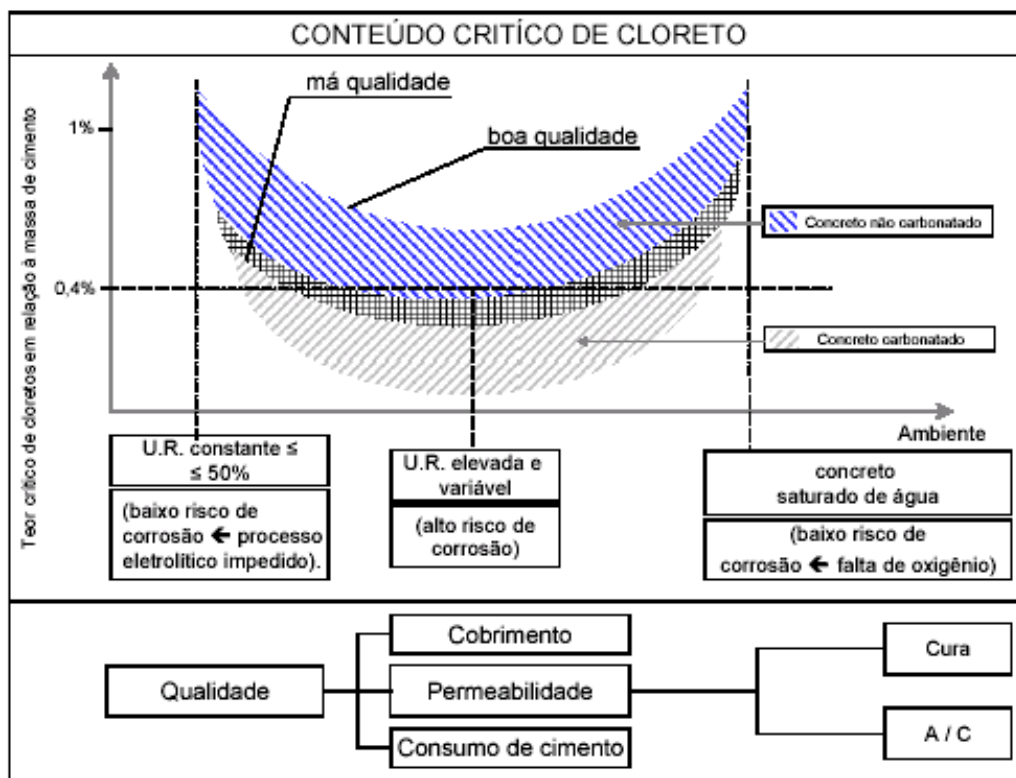


Figura 1.7 - Variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade ambiental.
Fonte: Figueiredo (2005)

2 A cinza da casca do arroz

2.1 Considerações preliminares

No Brasil, como em muitos outros países, o arroz é um dos alimentos mais consumidos pela população, impondo o plantio deste cereal como uma das principais culturas agrícolas. É esperada para a safra 2008, segundo dados do IBGE (2007), uma produção de aproximadamente 12.000.000 (t) de arroz em casca, sendo que, somente no estado do Rio Grande do Sul, a produção foi estimada em aproximadamente 7.000.000 (t), perfazendo, aproximadamente, 59% da produção nacional (CONAB, 2007). Essa elevada produção anual estabelece ao País destaque mundial na produção de arroz, tornando-o num dos principais produtores do grão, como é apresentado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais produtores mundiais de arroz (FAO, 2005).

Ranking	País	Produção (t)
1º	China	182.055.140
2º	Índia	137.620.000
3º	Indonésia	53.984.590
4º	Bangladesh	39.795.620
5º	Vietnã	35.790.800
6º	Tailândia	29.427.540
7º	União de Mianmar	25.364.000
8º	Filipinas	14.603.010
9º	Brasil	13.192.860
10º	Japão	11.342.000

Das primeiras operações de beneficiamento do grão, obtém-se a casca como o principal subproduto, numa razão de aproximadamente 200 gramas por quilograma de arroz, em casca. O resíduo gerado, por possuir alto poder calorífico (~ 3000Kcal/kg), é largamente utilizado como fonte de energia, sendo que, no Brasil,

geralmente, a casca é aproveitada pelas próprias empresas beneficiadoras, que, normalmente, as queimam para a secagem ou parbolização dos grãos (POUEY, 2006). Na tabela 2.2 são apresentadas algumas das características físicas da casca do arroz.

Tabela 2.2 – Principais características físico-químicas da casca de arroz (HOUSTON, 1972).

Parâmetro	Descrição / valor
Coloração	Amarelo ouro
Tamanho	4,5mm (em média)
Massa unitária	96-160 kg/m ³
Condutividade térmica	3,3kcal.cm/g.m ² /°C
Valor calorífico	2800-3700 kcal/kg

Do ponto de vista morfológico, a casca do arroz constitui-se de quatro camadas, que podem ser fibrosas, esponjosas ou celulares, e que são ricas em sílica. Segundo Houston (1972), acredita-se que esta sílica é transportada pela planta a partir do solo, como ácido monossílico, que acaba concentrando-se na casca e no caule devido à evaporação da água, e que, por último, polimeriza-se, formando uma membrana sílico-celulósica. A composição química média da casca, em base anidra, é de 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica (SiO₂), sendo que, a lignina e a celulose, podem ser removidas através da combustão. Se houver controle da temperatura na combustão da casca obtém-se sílica, em um estado amorfo e microporoso, altamente reativa. (MEHTA E PITT, 1977). Para que isso aconteça, à temperatura de queima deve ser mantida entre 500°C e 700°C, (MEHTA, 1992).

Após a queima da casca, com ou sem controle de temperatura, a quantidade de CCA, gerada, gira em torno de 20%, em massa, e o teor de sílica presente neste resíduo é elevado. Houston (1972) apresenta análises químicas, que foram realizadas entre 1870 e 1970, de amostras de CCA nas quais os teores de sílica variam de 87% a 97% e os teores de álcalis de 1% a 5%, sendo que os álcalis, juntamente com o carbono, são as maiores impurezas encontradas no resíduo. O álcali encontrado em maior quantidade na CCA é o potássio K₂O, com seus teores variando em função do tipo e da quantidade de fertilizante utilizado no plantio, podendo chegar a 2,5%.

O elevado teor de sílica amorfa presente na cinza da casca do arroz, quando queimada com controle de temperatura, proporciona a este resíduo, devido a sua alta reatividade, diversas aplicações na construção civil, podendo ser utilizada como pozolana agregada a cimentos, concretos e argamassas, como também, na indústria cerâmica para a fabricação de tijolos prensados, porcelanas e isolantes térmicos (POUEY, 2006). Entretanto, ainda há outros usos para a CCA. Houston (1972) apresenta uma relação com mais de 260 referências bibliográficas sobre as possíveis aplicações da cinza e, também, da casca do arroz.

Segundo Coutinho (2003) quando a CCA, constituída por sílica não cristalina, é utilizada no concreto produz efeitos semelhantes ao da sílica ativa, porém, ao contrário desta, as partículas da CCA possuem estrutura celular (reflexo da estrutura da casca), o que é responsável pela elevada superfície específica do resíduo, conforme é apresentado na figura 2.1.

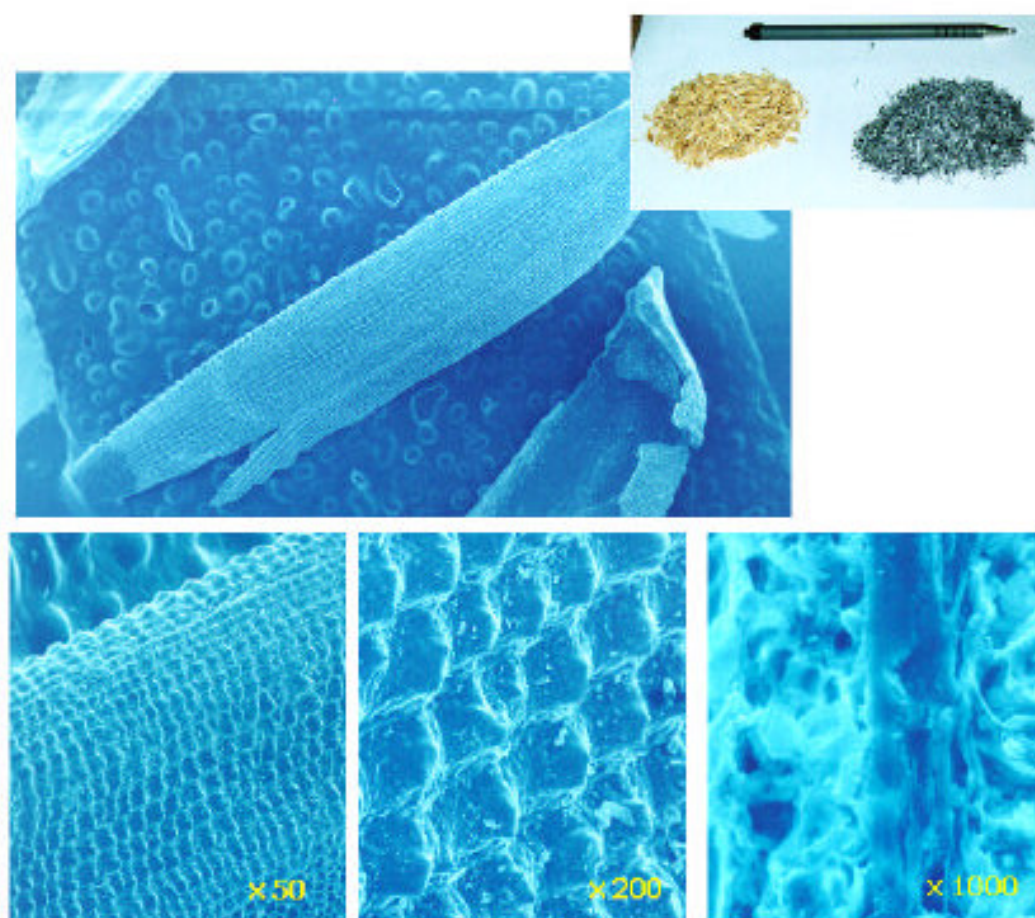


Figura 2.1 – Estrutura celular da casca de arroz (Coutinho, 2003)

Com isso, alguns pesquisadores chegam a considerá-la como uma *superpozolana* (Mehta, 1992). Conseqüentemente, há o interesse de vários países em investigar as vantagens da utilização da CCA como adição mineral em concretos e argamassas, de modo que se vêm estudando largamente os efeitos da utilização do resíduo sobre as propriedades do concreto fresco e endurecido, principalmente nos países que possuem produção substancial do grão. Dentre os estudos mais destacados, em âmbito internacional, estão os de pesquisadores como P. K. Mehta (Universidade de Berkeley), P.C. Kapur (Instituto Tecnológico de Kampur), J. Payá (Universidade Politécnica de Madri), D. D. Bui (Faculdade de Engenharia Civil de Hanói), Q. Fenge (Instituto de Tecnologia de Hachinohe), S. A. Rizwan (Universidade de Engenharia & Tecnologia de Lahore). No Brasil, também há grande interesse no aproveitamento do resíduo no que diz respeito à utilização em concretos e argamassas. Podem-se destacar trabalhos como os de Guedert (1989), Cincotto et al. (1990), Farias e Recena (1990), Isaia (1995), Silveira (1996), Santos (1997), Ferreira (1999), Weber (2001), Prudêncio Jr. (2002), Cervo (2002), Silva (2004), Pouey (2006), entre outros.

Como comentado na introdução do trabalho, segundo Sensale & Dal Molin (2002), a obtenção das CCAs no Brasil e Uruguai, em grande maioria, faz-se por intermédio do resgate do resíduo acumulado no processo de secagem dos grãos nas indústrias beneficiadoras de arroz. Porém, ao contrário da queima controlada, o processo de queima sem o controle da temperatura pode produzir cinzas com características bastante variadas. Assim, Isaia (1995), afirma haver certo preconceito no meio técnico quanto à utilização da CCA, obtida a temperaturas elevadas, mesmo que não haja evidências de mau desempenho quando adicionadas a concretos e argamassas. Ocorre que, a queima em altas temperaturas dá origem a formas cristalinas de sílica (SiO_2), que não possuem a mesma reatividade que a sílica em estado vítreo. Contudo, as pesquisas brasileiras sobre a utilização de CCA, sem a queima controlada, em concretos e argamassas, vêm apresentando bons resultados, mesmo no caso de cinzas com picos cristalinos de sílica, contrariando a opinião de muitos pesquisadores internacionais (PRUDÊNCIO Jr. *et al.*, 2003).

2.2 Influência da queima e da moagem na qualidade da CCA

De acordo com a bibliografia consultada, as principais modificações exercidas nas propriedades físicas e químicas da CCA, como no teor de sílica, no teor de carbono e na superfície específica, estão associadas à sua queima (temperatura, tempo e tipo). A qualidade da CCA, também está intrinsecamente ligada às propriedades físicas e químicas, na medida em que estas podem influenciar no desempenho da CCA, principalmente, se utilizada como adição mineral em concretos.

Segundo Pouey (2006), a influência da temperatura e do tempo de queima sobre a composição química (propriamente dita) da CCA não é grande, entretanto, são fatores que determinam a estrutura mineralógica da CCA, fato que é de suma importância. Na figura 2.2 são apresentadas micrografias nas quais Agopyan (2000) apud Pouey (2006) constata que a microestrutura da CCA varia conforme o tipo de queima. Enquanto que, a CCA produzida em leito fluidizado possui uma estrutura porosa como a da própria casca, aquela que, é produzida em forno comum possui uma fração mais compacta e granulada devido ao longo período no forno.

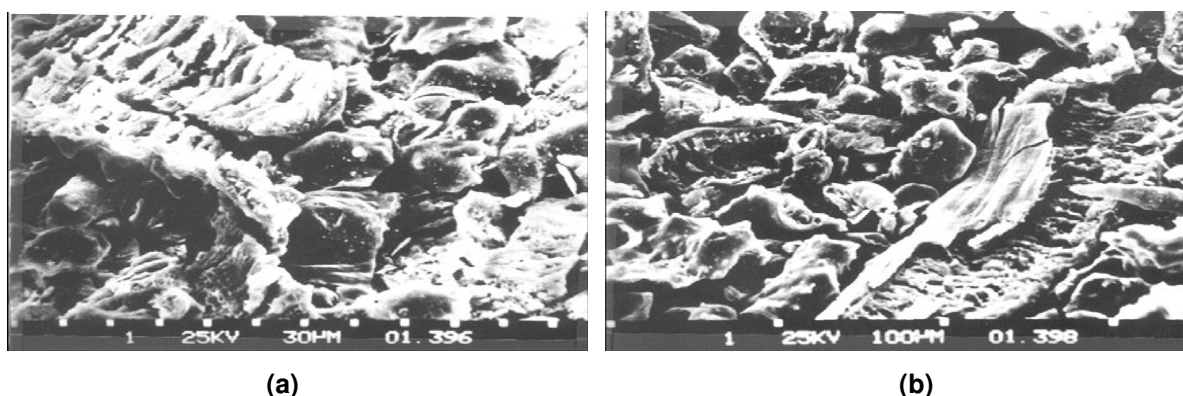


Figura 2.2 – Micrografias da CCA. (a) CCA produzida em forno comum; (b) CCA produzida em leito fluidizado.

Já, nas figuras 2.3 e 2.4 são apresentados difratogramas de raios X de CCAs queimadas com e sem queima controlada. Das figuras, é possível verificar as diferenças morfológicas causadas por diferentes temperaturas de queima. A figura 2.3 representa uma CCA queimada sem o controle de temperatura na qual se observa formação dos picos cristalinos de sílica, enquanto que, na figura 2.4 está

representado um difratograma típico de uma amostra de CCA com sílica totalmente amorfa.

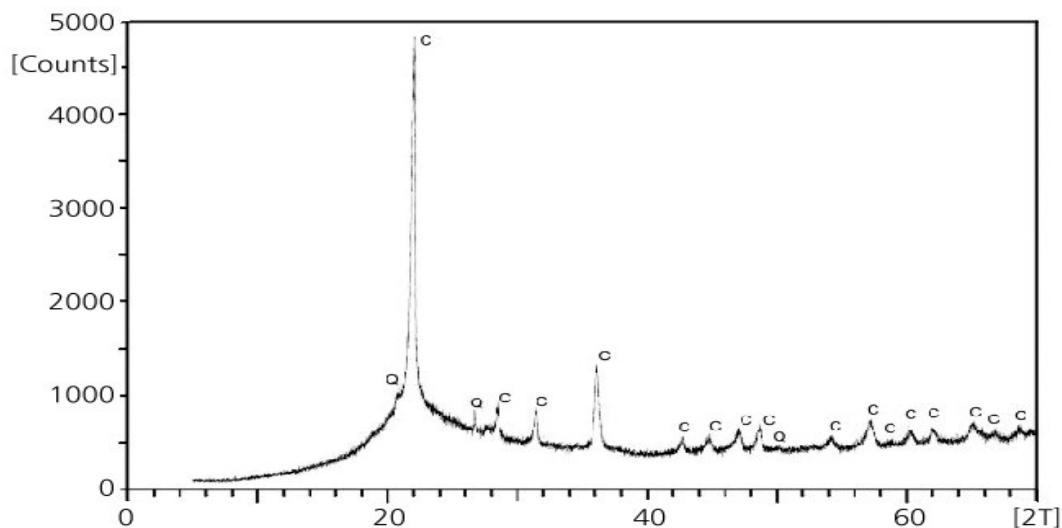


Figura 2.3 – DRX de uma amostra de CCA obtida sem o controle da temperatura.
Fonte: Santos (1997) apud Prudêncio Jr (2003).

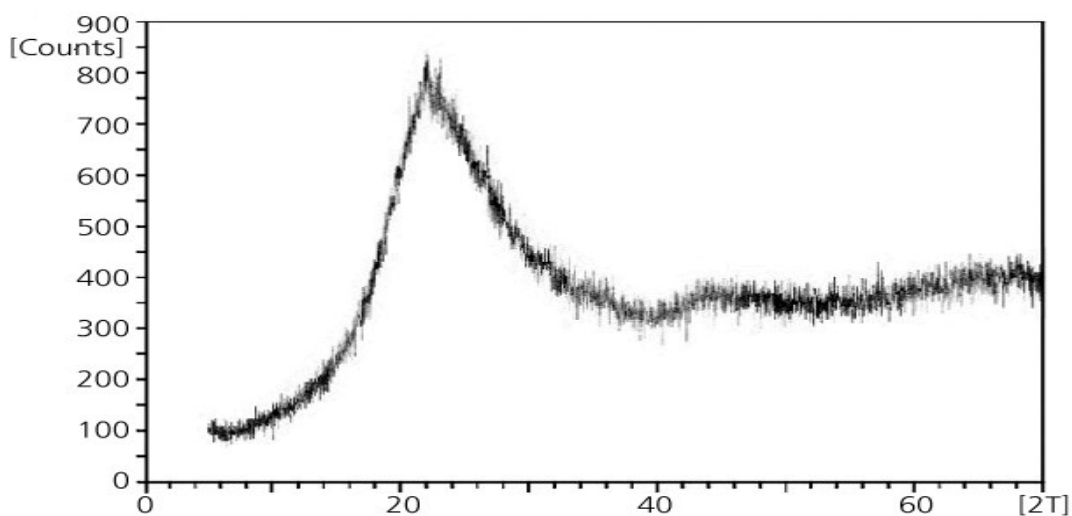


Figura 2.4 – DRX de uma amostra de CCA obtida com o controle da temperatura.
Fonte: Santos (1997) apud Prudêncio Jr (2003).

Segundo Della (2001), as CCAs obtidas a altas temperaturas possuem superfície específica menor do que as CCAs obtidas com o controle de temperatura. O autor relata que o decréscimo desta grandeza relaciona-se com o fato de que as partículas agregam-se entre si devido a um processo de fusão. Para compensar este fenômeno, a moagem da CCA pode ser uma solução eficaz. Segundo Prudêncio Jr. (2003), alguns autores nacionais constataram a influência do grau de

moagem sobre o desempenho da CCA, no que diz respeito a sua pozolanicidade, conforme a figura 2.5. Fica evidente que à medida que o tempo de moagem aumenta, a pozolanicidade também aumenta. Nota-se, da figura 2.5, por outro lado, que a partir de um certo período de moagem, o índice de pozolanicidade tende a diminuir. Segundo Prudêncio Jr (2003), isso provavelmente ocorre devido uma dificuldade de dispersar as partículas muito finas na argamassa.

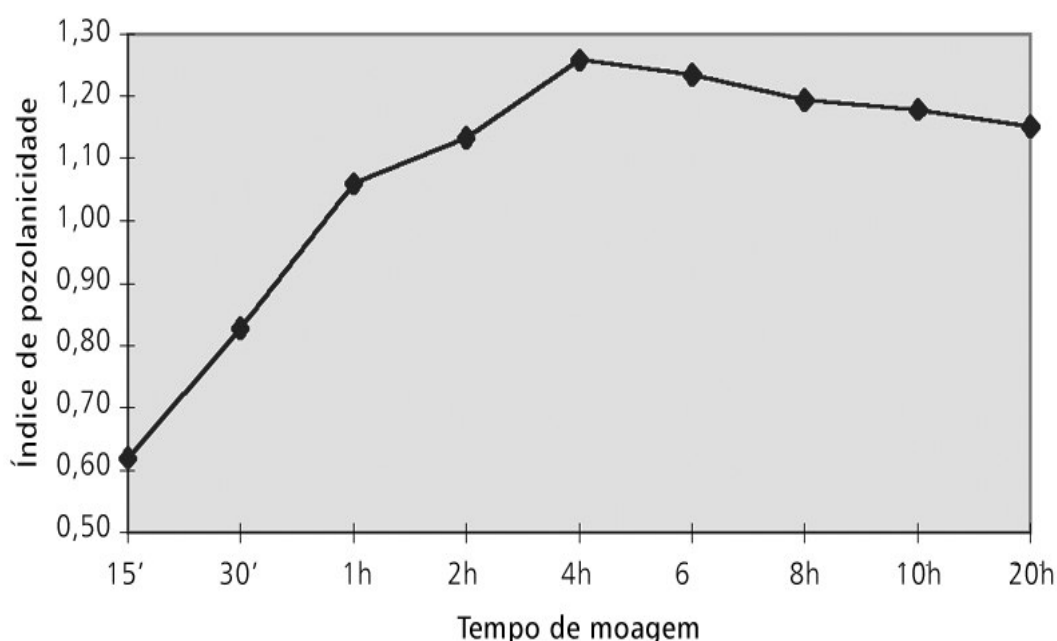


Figura 2.5 – Variação do IAP (índice de atividade pozolânica) com o tempo de moagem.
Fonte: Santos (1997) apud Prudêncio Jr (2003).

2.3 A eficiência cimentícia da CCA

Um aspecto importante, associado à CCA, quando adicionada a concretos e argamassas, é a sua capacidade de aumentar a resistência mecânica destes. Um modelo eficiente, na comparação do desempenho de materiais cimentícios e pozolânicos, quanto à influência na resistência mecânica, é a eficiência cimentícia. Segundo Payá *et al.* (2002) nos últimos anos tem havido crescente interesse em determinar-se o coeficiente de eficiência cimentícia (E_i). Este fator corresponde à diferença das relações a/a_g , para igual resistência, entre o concreto de referência e o com pozolana, em igualdade de consistência, dividida pelo conteúdo de pozolana

(FIP, 1988 apud ISAIA, 1995). Paya et al. (2002) comparou a eficiência cimentícia de diversas pozolanas e, dentre elas, da CCA e da sílica ativa (SA). Na figura 2.6 são apresentados, os coeficientes de eficiência para estas duas pozolanas. Foram utilizadas, pelo autor, uma SA comercial, e uma CCA, com queima controlada, na produção das argamassas, com teores de 10% de substituição ao cimento e relações a/ag variando de 0,3 a 0,6.

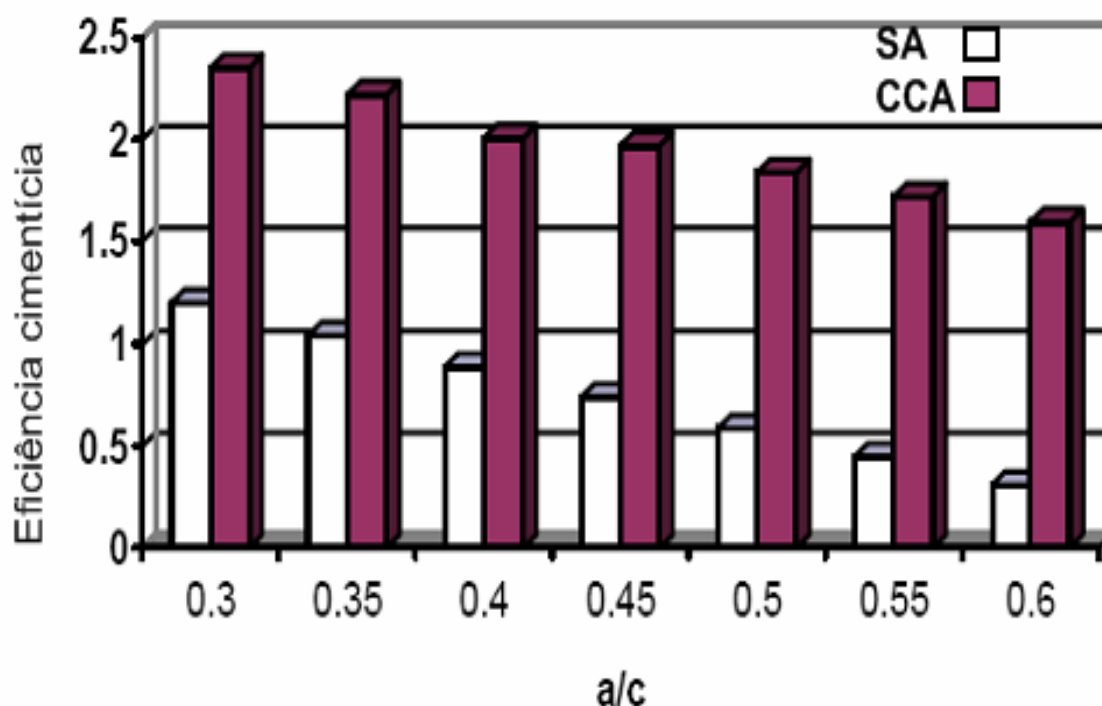


Figura 2.6 – Fatores de eficiência cimentícia da SA e da CCA, aos 28 dias, à temperatura de 20 °C.

Fonte: Payá (2002)

Da figura, há que se destacar os desempenhos superiores que as argamassas com CCA apresentaram em comparação das argamassas com SA, em todas as relações a/ag. Os coeficientes de eficiência foram sempre maiores. Este comportamento reflete uma pozolânica mais ativa da CCA, o que pode ser explicado pela textura mais irregular da CCA e pela maior superfície específica. Por outro lado a SA utilizada era densificada o que, segundo o pesquisador, pode ter limitado a sua atividade pozolânica (PAYÁ et al., 2002).

Contudo, embora neste caso os resultados tenham demonstrado um desempenho superior da CCA, queimada com controle de temperatura, no incremento da resistência, em relação à sílica ativa, isto geralmente não é observado pelos pesquisadores.

2.4 O papel da CCA como adição mineral

Normalmente, as pesquisas têm demonstrado que a utilização da CCA produz efeitos benéficos em concretos e argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Em se tratando de concreto fresco, a adição da pozolana, em pequenas quantidades, proporciona ao concreto maior estabilidade e trabalhabilidade, devido à sua elevada superfície específica e a forma das suas partículas, reduzindo a tendência à segregação e à exudação, do material. Entretanto, a grande absorvidade à água da CCA pode diminuir a trabalhabilidade, se um elevado teor de pozolana for utilizado, a menos que um aditivo superplastificante seja empregado na mistura (KUNTZ, 2006).

No caso do concreto endurecido, a adição da CCA aumenta a resistência à compressão, devido a uma densificação da matriz de pasta e da interface matriz-agregado, e, também, diminui a permeabilidade, devido a um fechamento dos vazios do concreto e a um refinamento da estrutura dos poros. Essa redução na permeabilidade promove, principalmente, maior durabilidade aos concretos (KUNTZ, 2006). Mas, é necessário que se proceda a um balanço do teor de adição, devido ao fato de que teores muito elevados de CCA podem prejudicar o desempenho das misturas. Alguns pesquisadores recomendam um teor de substituição abaixo de 30% em massa (SARASWATHY & SONG, 2006).

Há, também, outros aspectos importantes, ligados ao desempenho de concretos com adição da CCA. Nos próximos itens, por conveniência, serão destacados dois deles: a influência que a cinza exerce nos mecanismos de penetração de cloretos dos concretos; e a importância da utilização do resíduo na contextura da sustentabilidade, que são dois dos aspectos ligados diretamente a este trabalho.

2.4.1 A influência da utilização da CCA na penetração de cloretos em concretos:

Muitas pesquisas, tanto nacionais quanto internacionais, têm demonstrado que a adição de CCA melhora o desempenho dos concretos frente à penetração de íons cloreto. Porém, como foi relatado anteriormente, os resultados apresentados, por diferentes pesquisadores, em diferentes métodos de ensaio, sugerem que deve haver um balanceamento do teor de adição, ou seja, deve ser encontrado um teor que seja o ideal, no sentido de maximizar o desempenho das misturas.

Na tabela 2.3 são apresentados alguns resultados de penetração de cloretos, apresentados por outros pesquisadores, em concretos com diferentes tipos e, também, com diferentes teores de CCA.

Tabela 2.3 - Cargas passantes, segundo ASTM C 1202, encontradas por outros pesquisadores.

Bouzoubaâ & Fournier (2001)

Mistura	Teor de CCA	Carga Passante aos 28 dias (Coulomb)	
		Cura ¹	Cura ²
1	0%	2470	3940
2	7,5%	1210	2300
3	10%	830	1500
4	12,5%	600	1100

¹ Cura de 28 dias à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e U.R. de 100%.

² Cura de 03 dias à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e U.R. de 100% e 25 dias a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e U.R. de 50%.

Cervo (2002)

Mistura	Teor de CCA	Carga Passante aos 91 dias (Coulomb)		
		a/ag		
		0,35	0,50	0,65
1	0%	1351	2048	2462
2	25% A	340	521	696
3	25% B	247	396	536
4	50% A	114	124	136
5	50% B	92	104	118

A: superfície específica equivalente a $23\text{m}^2/\text{g}$.

B: superfície específica equivalente a $36,3\text{m}^2/\text{g}$.

Saraswathy & Song (2006)

Mistura	Teor de CCA	Carga Passante aos 28 dias (Coulomb)
1	0%	1161
2	5%	1108
3	10%	653
4	15%	309
5	20%	265
6	25%	213
7	30%	273

Bouzoubaâ & Fournier (2001) estudaram o comportamento frente a cloretos, segundo ASTM C 1202, de concretos com adição de CCA, nos teores de substituição de 0%, 7,5% e 12,5%, relação a/ag igual a 0,40 e diferentes períodos de cura, aos 28 dias de idade. Os resultados que os pesquisadores apresentam demonstram que os concretos com CCA possuem maior resistência à penetração de cloretos do que concretos sem adição, sendo que, à medida que o teor de adição aumenta, a carga passante diminui, ou seja, os concretos com teores de CCA mais elevados apresentaram maiores resistências à penetração de cloretos. Os diferentes métodos de cura, que os pesquisadores utilizaram, também influenciaram nas cargas passantes. As misturas que foram curadas à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 100%, durante todo o período que precedeu o ensaio (28 dias), apresentaram maior resistência à penetração de cloretos que as misturas curadas durante 3 dias, nessas condições, e que, posteriormente, foram curadas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e 50% de umidade relativa, pelos 25 dias restantes.

Cervo (2002), ao investigar concretos com 0%, 25% e 50% de CCA, com diferentes superfícies específicas, com relações a/ag iguais a 0,35, 0,55 e 0,65, e 91 dias de idade, constatou, através do ensaio acelerado de penetração de cloretos (EAPC), a mesma tendência que os pesquisadores citados anteriormente. Entretanto, os teores de CCA, utilizados neste caso foram mais elevados, chegando a 50%. Outro aspecto relevante do trabalho da pesquisadora foi o de que as misturas compostas com CCA de finura mais elevada, ou seja, aquelas com maiores superfícies específicas, apresentaram maiores resistências à penetração de cloretos, confirmando o que foi relatado anteriormente.

Saraswathy & Song (2006), realizaram uma investigação em misturas com teores de CCA de 0%, 5%, 10%, 15%, 25%, 30%, relação a/ag igual a 0,53 e idade de ensaio de 28 dias, sendo as amostras curadas por 28 dias. Nessas condições, para os teores de CCA de 0% a 25%, também houve redução nas cargas passantes com o aumento do teor de substituição, entretanto, os pesquisadores constataram um acréscimo na carga passante quando o teor de substituição aumentou de 25% para 30% de CCA, fato que os levou a concluir que teores de substituição menores de 30% são recomendáveis para concretos.

Na figura 2.7 são apresentados os resultados de um estudo no qual Nehdi *et al.*, (2003) investigaram as cargas passantes misturas com CCAs que obtidas diferentes formas. Neste estudo foram investigadas, a utilização de uma CCA com

sílica cristalina, bem como, a utilização de uma CCA residual sem moagem. Os teores de substituição foram de 0%, 7,5%, 10% e 12,5%, a relação a/ag igual a 0,4 e a idade de ensaio de 28 dias. Houve ainda, uma comparação em relação ao comportamento da SA. Dos resultados, o autor relata que a CCA residual sem moagem não apresentou mudança significativa da penetração de cloretos, em relação à mistura sem adição, entretanto, todas as outras CCAs investigadas apresentaram mudança de penetrabilidade, segundo ASTM C 1202, conforme a figura. Quanto aos teores de adição o comportamento foi idêntico ao observado anteriormente, ou seja, também houve redução da carga passante com o aumento do teor de adição.

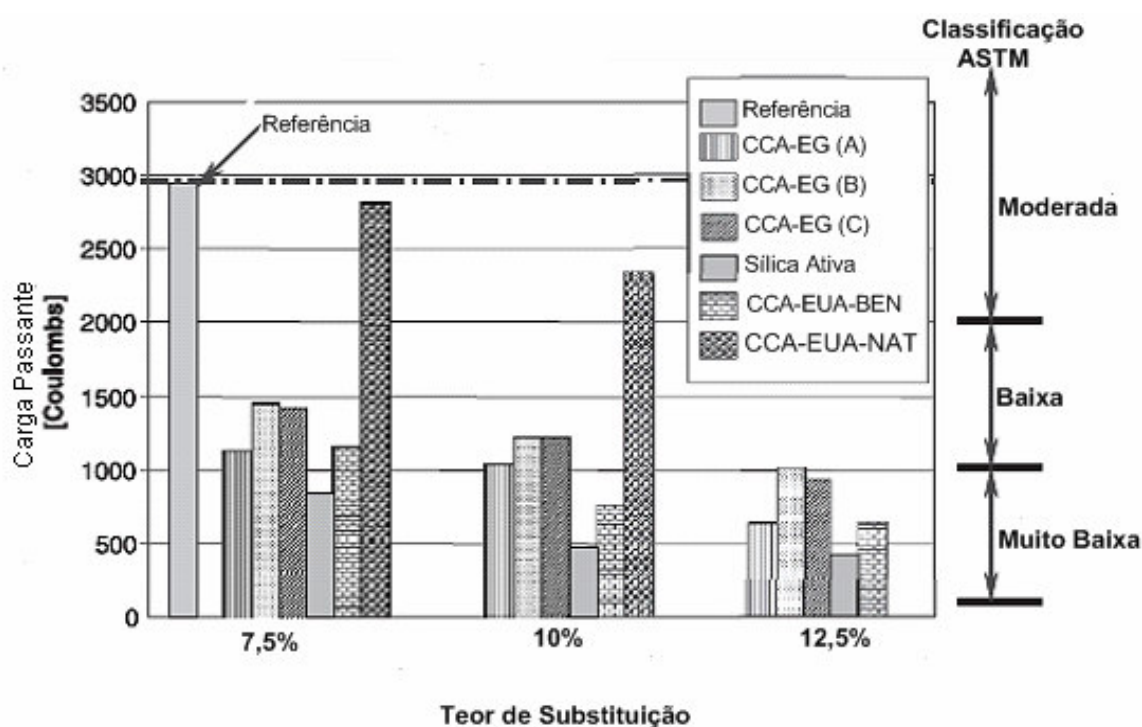


Figura 2.7 – Penetração acelerada de cloretos aos 28 dias (NEHDI *et al.*, 2003).

Na figura 2.7 entenda-se:

- CCA-EG (A) = CCA egípcia, moída, queimada a 750°C;
- CCA-EG (B) = CCA egípcia, moída, queimada a 830°C;
- CCA-EG (C) = CCA egípcia, moída, queimada a 750°C com injeção de ar;
- CCA-EUA-BEN = CCA americana, amorfa;
- CCA-EUA-NAT = CCA americana, residual, não moída.

Outro aspecto que também deve ser levado em consideração, quanto à penetração de cloretos, diz respeito ao mecanismo de penetração. Alguns pesquisadores têm criticado o ensaio acelerado de penetração de cloretos ASTM C 1202, cujo mecanismo é o da migração iônica (ANDRADE *et al*, 1999; WEE *et al*. 2000; SHI, 2003). Este teste especifica uma avaliação dos concretos, quanto à resistência à penetração de cloretos, baseada na carga elétrica que passa durante o tempo de ensaio (SHI, 2003). Andrade et al. (1999), relatam vários parâmetros que podem influenciar nos resultados deste ensaio. Os principais são:

- A composição iônica da solução dos poros é composta por vários íons, sendo possível que todos participem da migração. Assim, a corrente total medida no ensaio não corresponderia exclusivamente ao fluxo de íons cloreto.
- No momento em que se estabelece o fluxo de íons, os cloretos podem reagir com o C_3A do cimento, fazendo com que o fluxo constante seja atingido somente depois de completadas todas as reações possíveis. Entretanto, o cálculo da carga total passante, desde o início do experimento, não distingue o fluxo simples do fluxo de cloretos em conjunto com as reações.
- Devido à elevada diferença de potencial aplicada durante o ensaio, pode ocorrer à elevação da temperatura da solução (efeito *Joule*), o que também pode ter influência sobre a velocidade no fluxo de íons.

Para SHI *et al* (1998), o teste da ASTM é, essencialmente, uma medida de condutividade elétrica do concreto. O uso de materiais pozolânicos pode ter influência marcante na composição iônica da solução dos poros, alterando, notavelmente, as concentrações dos íons Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- e SO_4^{2-} , presentes na

solução dos poros e, conseqüentemente, na condutividade elétrica dos poros, o que pode gerar distorções na corrente que é medida no ensaio.

De fato, pode haver distorções nos resultados do EAPC, segundo ASTM C 1202, quando houver adições minerais nos concretos. Uma comparação realizada por Pfeifer et al. (1994) apud Shi (2007), indicou que os concretos convencionais, feitos com somente cimento Portland, podem exibir cargas passantes de 6 a 15 vezes maiores que os concretos com adição de sílica ativa, enquanto que o ingresso real de cloretos das misturas, correspondente ao ensaio de imersão, aos 90 dias, apresenta valores de uma a duas vezes maiores.

Wee *et al.* (2000) compararam os resultados que diversos concretos, contendo vários tipos de adições minerais, em diversas proporções e finuras, apresentaram no EAPC, com os índices de penetração de cloretos (k) determinados através do método colorimétrico, no qual a profundidade de penetração é medida após aspensão de uma solução contendo AgNO_3 . Os resultados que os pesquisadores encontraram sugerem que os ensaios seguem tendências diferentes. Enquanto que o ensaio ASTM C 1202 é controlado pelo mecanismo de migração iônica, o ensaio de imersão é controlado pelo mecanismo da difusão. A carga passante depende da microestrutura e da condutividade da solução dos poros. Já o índice k depende, principalmente, da microestrutura e das alterações que nela ocorrem, bem como da fixação de íons cloreto, que restringem ou dificultam a mobilidade desses íons através da rede de poros.

Apesar das críticas, o método ASTM, como pode ser visto, é muito utilizado na determinação da resistência a penetração de cloretos e segundo Neville (1997) pode ser uma boa ferramenta qualitativa na análise de concretos frente aos cloretos. Contudo, acredita-se que o ensaio da ASTM, principalmente quando se tratar de diferentes famílias de concreto, deve ter seus resultados confirmados por um ensaio de longa duração, como o ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI), que expressa com maior precisão a realidade de campo.

Saciloto (2005), investigou a penetração de cloretos de concretos com adição de diferentes tipos de pozolanas, dentre elas a CCA, que foi estudada nos teores de 10%, 20% e 30%, nas relações a/ag de 0,35, 0,50 e 0,65 e nos períodos de cura de 3, 7 e 28 dias. O pesquisador utilizou o EAPC, conforme ASTM C 1202, e o EPCI, pelo método colorimétrico, para avaliar a penetração de cloretos. Confirmando o que havia sido proposto por Pfeifer et al. (1994) apud Shi (2006), não houve o mesmo

comportamento nos dois métodos de ensaio. Enquanto que no EAPC as cargas passantes tiveram reduções de até 70%, os índices de penetração apresentaram reduções menos acentuadas, chegando no máximo aos 20%. Outro fato interessante foi o de que no ensaio acelerado a carga passante reduziu com o acréscimo no teor de adição, enquanto que no EAPC não houve essa tendência. Os índices K reduziram quando o teor aumentou de 0% para 10%, aumentou quando o teor de CCA passou de 10% para 20% e voltou a reduzir quando teor de CCA passou de 20% para 30%.

Embora hajam algumas diferenças nos resultados dos diferentes métodos de ensaio, de um modo geral, a CCA proporciona melhoria no comportamento dos concretos frente a penetração de cloretos, em ambos os casos.

2.4.2 A utilização da CCA e a sustentabilidade:

A importância da utilização da CCA em concretos pode ir além dos benefícios que o resíduo provém às propriedades do material. Sabe-se que o concreto é o material de construção mais consumido pela indústria da construção civil. Somente o consumo global de cimento, que é o principal constituinte do concreto, estimado no ano de 2006, foi de $2,29 \times 10^9$ ton (SNIC, 2008), perfazendo um consumo aproximadamente duas vezes maior do que o de aço, que foi estimado em $1,1 \times 10^9$ ton (ABCEM, 2008), sendo que, do total de aço produzido, aproximadamente 10% é empregado na fabricação de armaduras para concreto (HUMPHREYS & MAHASANAN, 2002 apud JOHN, 2003).

Ainda em comparação com o aço, o cimento consome menor quantidade de energia per capita. Segundo Mehta (1994) o cimento consome o equivalente 1300kWh/t enquanto que o aço consome aproximadamente 8000kWh/t, ou seja, o consumo do cimento é cerca de 6 vezes menor. (MEHTA, 1994). Entretanto, os dados referentes à emissão de gases são preocupantes. Como relatado anteriormente, a emissão anual de CO₂, devido à produção de cimento, é estimada em aproximadamente 5%. Mas, o que mais preocupa, é que o cimento, em alguns casos, provoca uma emissão de CO₂, per capita, maior do que a provocada pelo aço. Enquanto que, a emissão do cimento pode variar de 0,81kg a 0,89kg, de CO₂

por kg de cimento produzido, a emissão do aço varia de 0,6kg, no caso das indústrias que processam sucata de aço reciclado, a 2,2kg, no caso das indústrias siderúrgicas que processam o minério de ferro, por kg de aço produzido (HUMPHREYS & MAHASENAN, 2002; GALE & FREUND, 2000 apud JOHN, 2003).

Assim, a utilização de resíduos agro-industriais, como a CCA, podem ser eficientes alternativas, no que diz respeito a reduções nos consumos de cimento e, conseqüentemente, nas emissões de gases e nos gastos energéticos, promovendo maior sustentabilidade ao concreto. Outra consideração que se tem a fazer é referente ao acúmulo da CCA no meio ambiente, o que causa, geralmente, poluição. No Brasil, após a queima da casca, não há uma destinação certa para a CCA, sendo que, muitas vezes, este resíduo é descartado a céu aberto, em aterros ou nas margens de estradas vicinais, conforme é apresentado nas figuras 2.8 e 2.9. Esse problema ganha proporções ainda maiores em regiões onde há grande produção de arroz, como no estado do Rio Grande do Sul. Para serem minimizados os efeitos ambientais poderia ser considerada a hipótese de se implementar uma política tratando do aproveitamento da CCA residual em concretos, na qual, após a comprovação da eficácia do material, haja incentivos para que os bons resultados das pesquisas cheguem efetivamente ao mercado, contribuindo, assim, notavelmente, com as questões ambientais. Nesse contexto uma abordagem referente à utilização da CCA residual ao natural (sem beneficiamento) também deve ser considerada nas pesquisas tendo-se em vista que a viabilidade de utilização do resíduo "in natura" propicia vantagens em relação a CCA moída, uma vez que se estaria eliminando mais uma etapa de beneficiamento (moagem) e, com isso, reduzindo-se o custo agregado e o gasto energético, envolvidos no processo de produção do concreto.



**Figura 2.8 – Depósito de CCA a céu aberto, em aterro.
Fonte: Pouey (2006).**



**Figura 2.9 – Depósito de CCA a céu aberto, na beira de estrada vicinal.
Fonte: Santos (1997).**

3 Programa experimental

3.1 Introdução

A iniciação da corrosão em estruturas submetidas à ação de cloretos está relacionada ao ingresso destes íons através da rede porosa do concreto. Por sua vez, este ingresso está relacionado à absorção e a difusividade iônica do concreto que são determinadas pelas características dos poros do concreto e da solução aquosa neles presente.

Assim, para investigar a influência da incorporação de CCA residual, ao natural e moída, como substituto parcial do cimento na capacidade de proteção estruturas de concreto armado, frente à ação de cloretos, foi necessária a investigação sobre a penetração destes íons e a composição iônica da solução aquosa dos poros.

Realizaram-se os ensaios de penetração de cloretos por imersão (método colorimétrico) e o ensaio acelerado de penetração de cloretos, ASTM C 1202, respectivamente, bem como, determinou-se a composição iônica da solução dos poros. Concomitantemente a estes, foram realizados os ensaios de resistência à compressão de acordo com os métodos de ensaio NBR 5738 e 5739, o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e o ensaio de absorção de água por imersão segundo NBR 9778, para as diferentes misturas, possibilitando assim a análise dos resultados em conjunto.

Em simultâneo, produziu-se um concreto com 100% cimento Portland denominado concreto de referência, que serviu de parâmetro para a comparação com as outras misturas aglomerantes.

Os teores de substituição de cimento por CCA foram 15% e 25%, ao natural e moída, totalizando assim, com o concreto de referência, cinco misturas aglomerantes.

3.2 Variáveis da pesquisa

Para se alcançar os objetivos propostos pela pesquisa, tornou-se necessário definir as variáveis utilizadas no experimento, as quais são:

a) Variáveis independentes:

- Relação água/aglomerante: foram adotados os valores nominais em massa iguais a 0,45; 0,55 e 0,65.

- Idade de ensaio: 7, 28 e 91 dias para os ensaios de resistência à compressão; 7, 14, 28, 56, 91 para penetração de cloretos por imersão; 91 dias para penetração de cloretos através do ensaio acelerado, absorção de água, porosímetria e solução aquosa dos poros.

- Tipo de adições minerais (utilizadas como substituição em massa de cimento): Utilizou-se a cinza de casca de arroz residual por esta pozolana ser abundante e representativa, na região sul do Brasil.

- Teor de adição: Foram adotados os teores de 15% e 25%, por estes teores encontrarem-se dentro da faixa, geralmente, estudada por outros pesquisadores.

- Finura: A CCA residual (proveniente de queima sem o controle da temperatura) foi utilizada ao natural (sem moagem) e, também, moída por 1h em moinho de bolas. Determinou-se 1h, devido ao fato de que, como demonstrado anteriormente (figura 2.5), um tempo de moagem superior a este, provavelmente, não resultaria em grandes acréscimos na pozolanicidade da CCA.

b) Variáveis dependentes:

- No concreto:

- Resistência à compressão axial.
- Absorção de água.
- Resistência à penetração de íons cloreto.
- Porosidade.

- Na pasta:

- Solução aquosa dos poros.

3.3 Caracterização dos Materiais

Antes de iniciar o desenvolvimento dos experimentos, foi realizada uma investigação das propriedades físicas e químicas dos materiais envolvidos, visando à caracterização e seleção destes, para que se procedessem as dosagens posteriores.

3.3.1 Aglomerantes

Utilizou-se como aglomerante hidráulico a mistura de um cimento CII F – 32 e de uma CCA queimada a altas temperaturas, ao natural e, também, moída. O cimento escolhido, assim o foi, por não possuir adição pozolânica em sua composição a qual poderia influenciar nos resultados. O cimento CII F – 32, em conformidade com a NBR 11578 (ABNT, 1991) possui apenas adição de filler calcário em sua composição, em teores que variam de 6% a 10%. O filler não reage quimicamente com a água e, portanto, não possui propriedades pozolânicas ou cimentantes.

A CCA investigada é proveniente de uma cooperativa arroseira da região de Santa Maria - RS e decorrente de queima efetuada sem o controle da temperatura. A empresa utiliza-se desta queima apenas para a secagem dos grãos armazenados em silos, sendo que, após a queima, a cinza é transportada por via úmida até seu destino final, o descarte a céu aberto.

Com o intuito de avaliar o desempenho das misturas compostas com CCA frente aos questionamentos propostos na pesquisa, optou-se pela utilização da cinza ao natural sem beneficiamento e, também, moída por 60min em moinho de bolas.

Nos ensaios de caracterização, para simular a moagem que acontece no interior da betoneira quando se produz concreto, a CCA ao natural passou por moagem na betoneira a seco, com os agregados graúdos, pelos mesmos intervalos de tempo utilizados, posteriormente, nas misturas.

Os ensaios realizados na caracterização dos aglomerantes, cujos resultados são apresentados nas tabelas 3.1 a 3.5 e nas figuras 3.1 e 3.2, foram os seguintes:

- Massa específica: NBRNM 23;
- Finura # 0,075 mm: NBR 11579;
- Área específica BET: ASTM D-3663;
- Análise química completa de matéria-prima – ABCP/SP - Método ABCP/SP PO-GT-3051 Revisão 02
- Tempo de início e fim de pega: NBRNM 65;
- Resistência à compressão: NBR 7215;
- Distribuição granulométrica à laser: ABCP/SP - Método PO-GT-1043
- Pozolanidade de Cimento Portland Pozolânico – ABCP/SP - Método PO-GT-3004

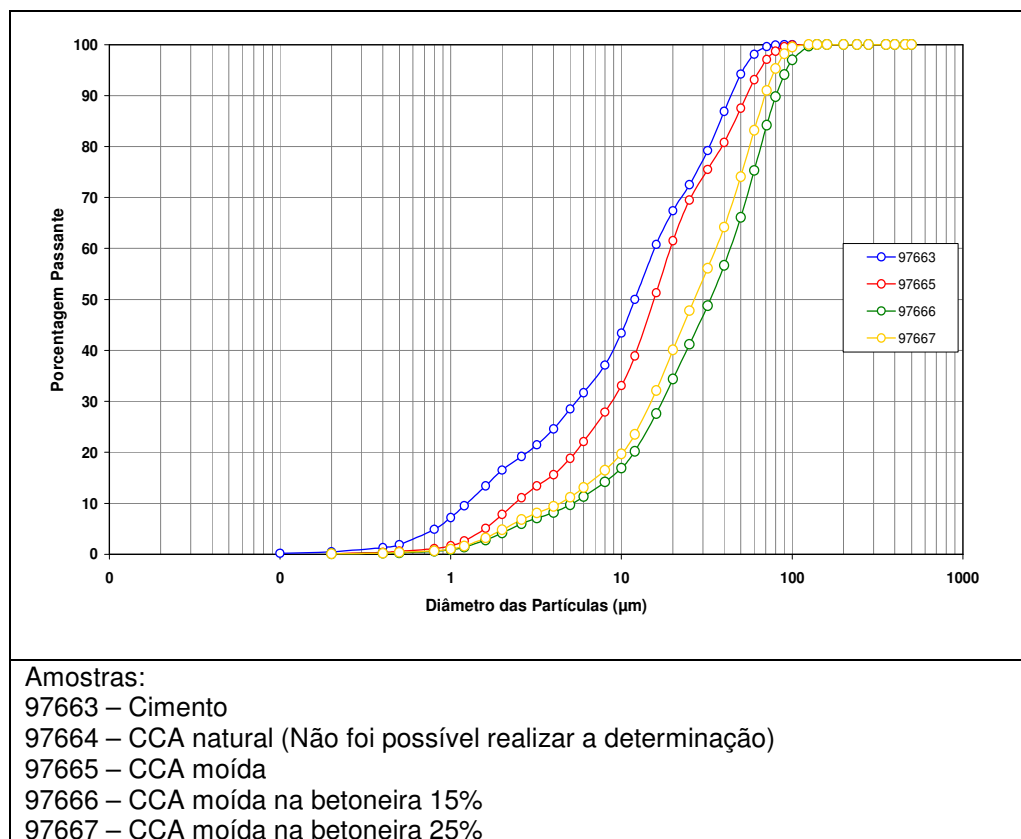


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica a laser dos aglomerantes

Tabela 3.1 - Características físicas dos aglomerantes.

Grandeza física		Cimento	CCAN	CCAM	CCAN 15% ¹	CCAN 25% ¹
Massa específica (Kg/dm ³)		3,06	1,41	2,09	1,96	1,93
Área específica BET (m ² /g)		1,44	9,67	49,25	44,41	45,01
Resíduo na # 0,075mm (%)		2,98	2,18	4,97	9,09	4,84
Dimensões características* (µm)	D _m	11,50	**	15,54	33,19	26,70
	D ₁₀	1,28	**	2,38	5,19	4,34
	D ₉₀	41,57	**	54,14	80,51	69,39

¹ CCA "in natura", moídas na betoneira com os agregados graúdos, a seco, por 15 minutos nas mesmas proporções utilizadas nas misturas compostas, de 15% e 25%.

* D_m – Diâmetro médio. D₁₀ – Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas. D₉₀ – Diâmetro acima do qual encontram-se 90% das partículas.

** Não procedeu-se à determinação pois não é possível dispersar a amostra durante o ensaio.

Tabela 3.2 – Ensaio em argamassa de CII F - 32.

Grandeza física		Resistência à compressão (MPa)			
Início de pega	Fim de pega	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
157 min	205 min	15,0	26,3	32,2	40

Tabela 3.3 - Composição química dos aglomerantes.

Componentes	Porcentagem em massa dos materiais (%)		
	CP II-F-32	CCAN	CCAM
Perda ao fogo	1,31	0,51	0,25
SiO ₂	18,92	95,04	94,84
Al ₂ O ₃	4,32	0,00	0,39
Fe ₂ O ₃	2,58	0,44	0,54
CaO	60,15	1,25	1,32
MgO	4,91	0,45	0,40
SO ₃	3,19	0,01	0,01
Na ₂ O	-	0,09	0,11
K ₂ O	-	1,40	1,45

Durante a caracterização, determinou-se, também, o índice de atividade pozolânica (IAP) através do método proposto por Isaia (1995). Mediu-se no gráfico do ensaio Fratini, a distância “d”, que é a diagonal entre a origem dos eixos até o ponto em questão, e a partir desta, calculou-se o IAP em porcentagem.

Tabela 3.4 – Convenções adotadas no ensaio de pozolânicidade.

Misturas	Composição
CP	100% cimento Portland
N15	85% cimento Portland + 15% CCA natural (moída na betoneira)
N25	75% cimento Portland + 25% CCA natural (moída na betoneira)
M15	85% cimento Portland + 15% CCA moída (em moinho por 60 min.)
M25	75% cimento Portland + 25% CCA moída (em moinho por 60 min.)

Tabela 3.5 – Índice de atividade Pozolânica (Fratini)

Misturas	Atividade Pozolânica		Distância ("d" cm)	Índice de atividade pozolânica ¹ IAP
	mmol CaO/l	mmol OH ⁻ /l		
CP	8	59	6,8	14,7
N15	9	48	6	16,7
N25	8,5	49	5,8	17,2
M15	6	43	5,2	19,2
M25	5,5	42	5	20

Nota: ¹ Obtenção do índice (IAP=1/d %) conforme Isaia (1995).

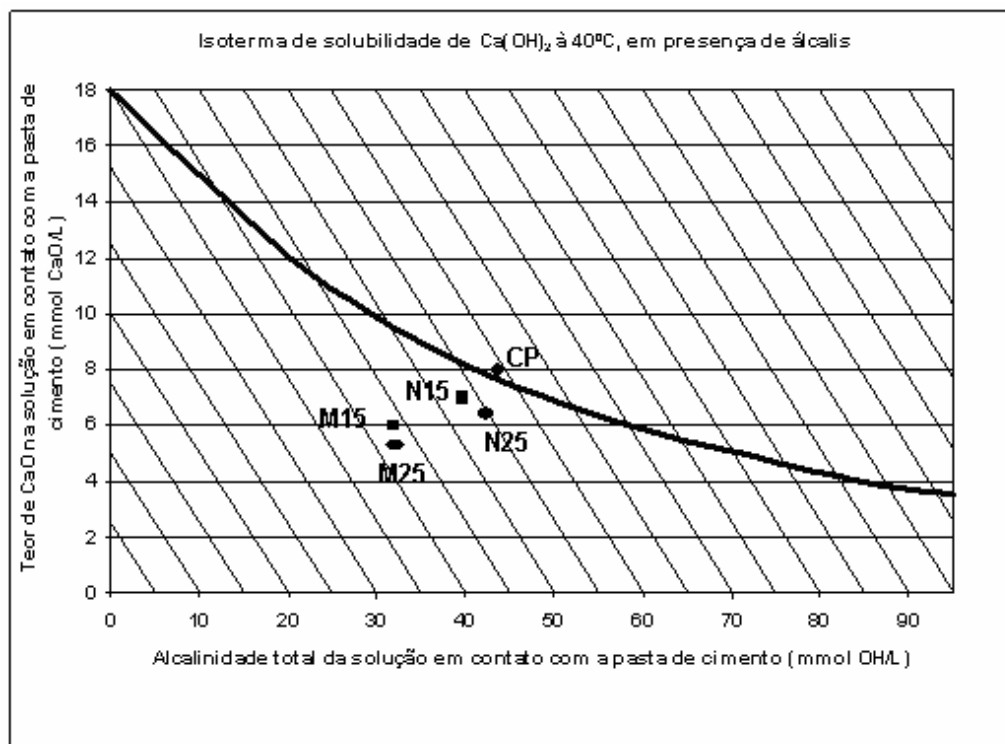


Figura 3.2 –Pozolanicidade de cimento pozolânico

3.3.2 Agregados

Os agregados miúdos utilizados na pesquisa foram areias naturais de origem quartzosa, provenientes do município de Santa Maria-RS. Procederam-se nestas, a secagem em estufa, peneiramento na peneira # 4,8mm e, também, estocagem em cubas de alvenaria devidamente tampadas.

O agregados graúdos utilizados foram pedras britadas de rocha diabásica, provenientes do município de Itaara-RS. Procederam-se nestes, o peneiramento na peneira de abertura # 19mm e a lavagem na peneira de abertura 6,3mm para eliminar possíveis impurezas que de alguma forma pudessem influenciar nas propriedades do concreto. Posteriormente as britas foram secas ao ar e estocadas em cubas, semelhante ao procedimento adotado para as areias. A Tabela 3.6 apresenta as características físicas dos agregados e nas Figuras 3.3 e 3.4 são apresentadas às curvas granulométricas para os agregados.

Com o intuito de promover maior fechamento dos vazios presentes no concreto fresco e, desta forma, diminuir o consumo de pasta, procedeu-se também, uma composição de agregados graúdos e miúdos com diferentes dimensões

máximas características, determinando-se porcentagens que resultaram em massas unitárias no estado solto maiores, ou seja, com um menor índice de vazios. As porcentagens ótimas foram 50% de agregado A + 50% de agregado B, tanto para a areia quanto para a pedra, e os valores para as massas unitárias são apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Características físicas dos agregados.

Grandeza física	Agregados graúdos		Agregados miúdos	
	Pedra - A	Pedra - B	Areia - A	Areia - B
Massa específica	2,55 Kg/dm ³	2,49 Kg/dm ³	2,60 Kg/dm ³	2,63 Kg/dm ³
Massa unitária no estado solto	1,40 Kg/dm ³	1,39 Kg/dm ³	1,51 Kg/dm ³	1,57 Kg/dm ³
Massa unitária no estado solto da composição (50% A + 50% B)	1,45 Kg/dm ³		1,61 Kg/dm ³	
Módulo de finura	5,42	6,91	2,81	1,89
Índice de forma	-	2,31	-	-
Absorção de água	3,03%	2,87%	-	-
Coef. de Inchamento	-	-	1,37	1,33
Dimensão máxima característica	9,5 mm	19 mm	4,75 mm	1,18 mm

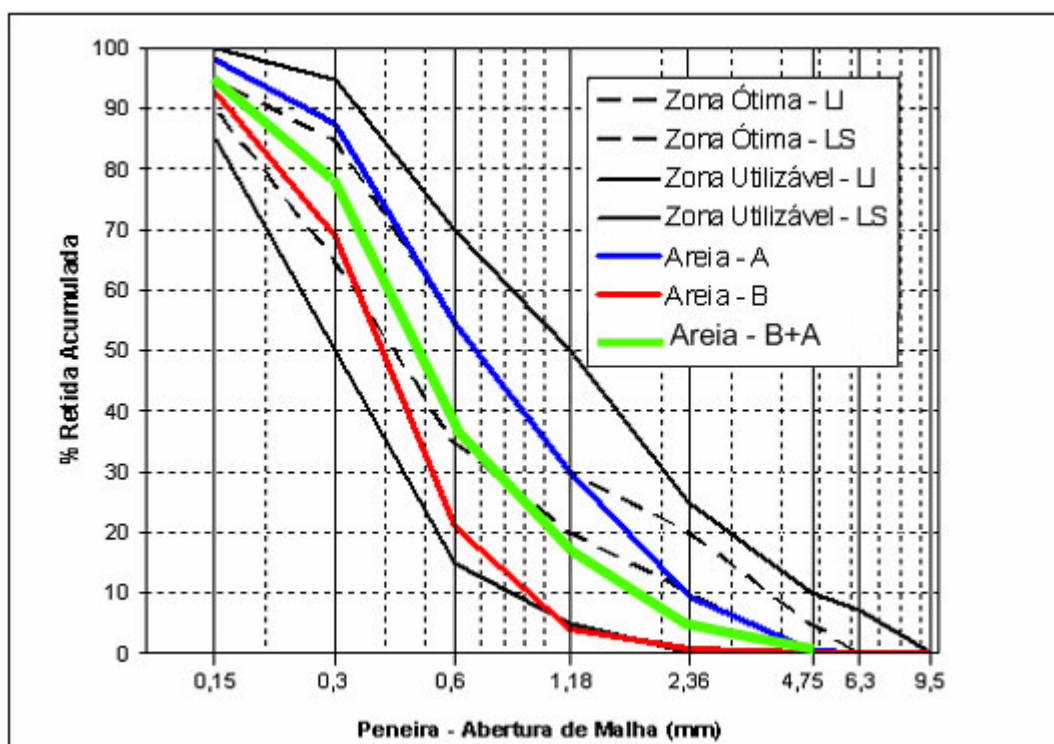


Figura 3.3 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.

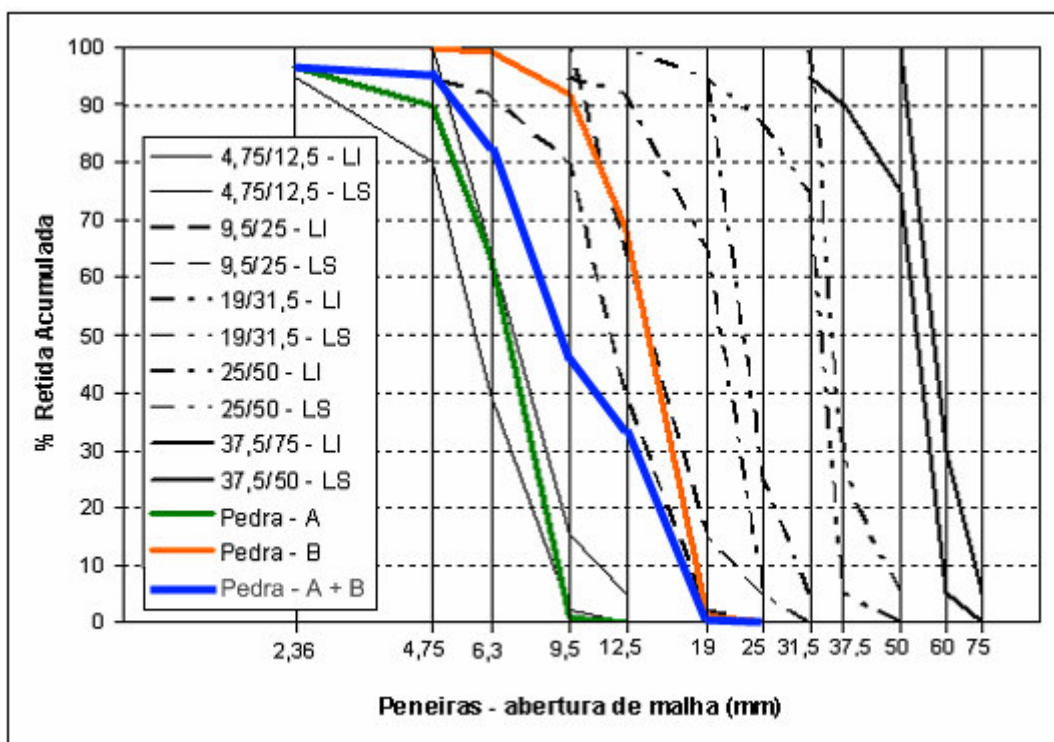


Figura 3.4 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos.

3.3.3 Aditivo

Nas misturas com baixa relação a/ag , bem como nas compostas com CCA, foi necessária a utilização de aditivo superplastificante de 3ª geração, a base de policarboxilatos, isento de cloretos conforme ASTM C 494 para que se alcançassem as consistências desejadas. Estas consistências foram fixadas nos valores de 80 ± 20 mm, determinados através do abatimento do tronco de cone segundo NBRNM 67.

Na medida em que os aditivos, inclusive o utilizado, podem influenciar nas condições de hidratação, modificando a microestrutura dos concretos, optou-se por utilizá-lo em todas as misturas aglomerantes, possibilitando maior homogeneidade dos concretos. A quantidade de aditivo por metro cúbico de concreto está apresentada na tabela 3.5.

3.3.4 Água

Para moldagem dos corpos-de-prova utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento da Universidade Federal de Santa Maria.

3.4 Proporcionalamento das misturas

O proporcionalamento dos concretos foi realizado segundo procedimento proposto por Helene & Terzian (1992) e as quantidades de materiais são apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Quantidades de materiais.

Misturas	Teor de CCA (%)	a/ag	Cimento (Kg/m ³)	CCA (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Pedra (Kg/m ³)	Aditivo ¹ (l/m ³)
R	-	0,45	407,2	-	688,1	1095,3	0,1
	-	0,55	319,8	-	779,3	1098,6	0,3
	-	0,65	262,7	-	838,0	1100,8	0,1
15 M	15	0,45	346,1	61,1	663,7	1095,3	1,3
	15	0,55	271,5	47,9	760,1	1098,6	1,4
	15	0,65	223,3	39,4	822,3	1100,8	1,2
25 M	25	0,45	305,4	101,8	647,4	1095,3	1,8
	25	0,55	239,5	79,8	747,3	1098,6	1,8
	25	0,65	197,0	65,7	811,8	1100,8	1,3
15 N	15	0,45	346,1	61,1	627,1	1095,3	2,2
	15	0,55	271,5	47,9	731,7	1098,6	2,1
	15	0,65	223,3	39,4	798,6	1100,8	2,2
25 N	25	0,45	305,4	101,8	586,3	1095,3	3,6
	25	0,55	239,5	79,8	699,4	1098,6	3,2
	25	0,65	197,0	65,7	772,4	1100,8	3,1

Nota: ¹ Adotou-se densidade igual a 1,1g/cm³

Foram investigadas cinco misturas aglomerantes, uma composta com 100% cimento Portland e outras quatro com CCA em teores de substituição de 15% e 25%, ao natural e moída. Estes teores de substituição figuram dentre os teores empregados por outros autores, conforme visto em bibliografia.

Para o traçado da curva de Abrams foram adotados três níveis de relação a/ag para cada uma das misturas estudadas: 0,45; 0,55 e 0,65, com proporções aglomerante/agregado de 1:4,38; 1:5,87 e 1:7,38.

Uma correção na quantidade de agregado miúdo foi realizada nos traços compostos com CCA, devido sua menor massa específica, no sentido de manter aproximadamente constante o volume de argamassa seca, cujo valor foi de 50%.

Realizaram-se, também, estudos referentes à ordem de colocação e o tempo de mistura dos materiais que satisfizeram aos critérios de trabalhabilidade com a menor demanda de superplastificante. Os resultados considerados ótimos, utilizados para todas as misturas, são apresentados na tabela 3.8

Tabela 3.8 - Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira.

Mistura	Ordem / Tempo	Materiais							Tempo de mistura
		CCAN	Pedra	Água	Aditivo	CCAM	Cimento	Areia	
R ¹	Ordem	-	1 ^o	1 ^o	3 ^o	-	2 ^o	4 ^o	10min
	Tempo	-	2min		2min	-	2min	4min	
15 M ²	Ordem	-	1 ^o	1 ^o	3 ^o	2 ^o	2 ^o	4 ^o	10min
	Tempo	-	2min		2min	2min		4min	
25 M ³	Ordem	-	1 ^o	1 ^o	3 ^o	2 ^o	2 ^o	4 ^o	10min
	Tempo	-	2min		2min	2min		4min	
15 N ⁴	Ordem	1 ^o	1 ^o	2 ^o	2 ^o	-	3 ^o	4 ^o	15min
	Tempo	2min		2min		-	2min	9min	
25 N ⁵	Ordem	1 ^o	1 ^o	2 ^o	2 ^o	-	3 ^o	4 ^o	15min
	Tempo	2min		2min		-	2min	9min	

Notas: ¹Mistura com 100% de cimento. ²Mistura com 15% de CCAM em substituição parcial (S.P.) ao cimento.

³Mistura com 25% de CCAM em S.P. ao cimento. ⁴ Mistura com 15% de CCAN em S.P. ao cimento.

⁵Mistura com 25% de CCAN em S.P. ao cimento.

3.5 Moldagem e cura

Em virtude de não haver câmara climatizada para a moldagem, foi necessário controlar a temperatura do concreto fresco. Portanto, utilizou-se a equação (1), proposta por Metha e Monteiro (1994) e Neville (1995) para efetuar tal controle.

Dependendo da temperatura dos materiais, aqueceu-se ou resfriou-se a água de amassamento procurando-se manter a temperatura do concreto aproximadamente constante em $19^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

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

Na qual,

T – Temperatura da massa de concreto ($^{\circ}\text{F}$)

T_m – Temperatura dos agregados ($^{\circ}\text{F}$)

T_c – Temperatura do cimento ($^{\circ}\text{F}$)

T_a – Temperatura da água ($^{\circ}\text{F}$)

M_m – Massa dos agregados (Kg)

M_c – Massa de cimento (Kg)

M_a – Massa de água (Kg)

Procedeu-se moldagem conforme NBR 5738 em fôrmas metálicas 10x20cm. Os corpos-de-prova foram adensados em mesa vibratória, em duas camadas, permanecendo nos moldes à temperatura ambiente pelas primeiras 24 horas, sendo posteriormente removidos de suas fôrmas e acondicionados em câmara úmida com temperatura em $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade $> 95\%$.

Para o ensaio de resistência à compressão os corpos-de-prova permaneceram nesta condição até completarem o seu tempo de cura que foi de 7, 28 e 91 dias, quando então foram retiradas e encaminhadas ao ensaio.

Os corpos-de-prova com idade de 91 dias, rompidos no ensaio de resistência à compressão, foram também utilizados para realização do ensaio de porosímetria

por intrusão de mercúrio. Retiraram-se destes, logo após o ensaio de resistência à compressão, amostras cúbicas de argamassa com aproximadamente 6mm de aresta.

Para os ensaios acelerado de penetração de cloretos (EAPC), ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI) e absorção de água por imersão, os corpos-de-prova permaneceram em câmara úmida por apenas 7 dias, completando seu tempo de cura em ambiente de laboratório quando então foram encaminhados aos seus respectivos ensaios. No EAPC, os corpos de prova foram, ainda, mantidos imersos por 3 dias (dos 87 aos 90 dias), para depois serem encaminhados ao ensaio.

Foram também moldadas em fôrmas metálicas cilíndricas de 4x8cm, pastas para extração da solução aquosa dos poros com proporção a/ag e teores de aditivo idênticos aos dos concretos estudados. Estas permaneceram nos moldes por 24 horas à temperatura ambiente e depois de desmoldadas foram imersas em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, até completarem o seu tempo de cura de 91 dias.

3.6 Ensaios realizados

Nos subitens subseqüentes são descritos os ensaios que foram utilizados para avaliarem-se as misturas. Em concreto, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, penetração de cloretos, absorção de água, porosímetria. Em pasta, foi realizada a composição iônica da solução dos poros.

3.6.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com as NBR 5738 e NBR 5739. Moldaram-se três corpos-de-prova cilíndricos de 10x20cm para cada idade de ensaio (7, 28 e 91 dias) que foram capeados com enxofre antes da realização do ensaio. Para a resistência final, adotou-se a média aritmética das três determinações.

3.6.2 Ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI)

Ao completarem seu período de cura, os corpos-de-prova 10x20cm foram serrados com dimensões 10X10cm, tiveram as faces transversais impermeabilizadas com três demãos de verniz poliuretânico e foram imersos em um tanque com solução saturada de cloreto de sódio (NaCl), com concentração de íons cloreto semelhante a existente na água do mar (20.000 mg/l) conforme Metha e Monteiro (1994).

Utilizaram-se três corpos-de-prova por relação a/ag e nas idades adotadas para o ensaio (0, 7, 14, 28, 56, 91 dias) estes foram retirados do tanque e rompidos por compressão diametral. Após essa ruptura, procedeu-se aspersão com solução de Nitrato de Prata (AgNO_3) e as amostras foram fotografadas com máquina digital. Na figura 3.5 está representado de forma esquemática o procedimento adotado.

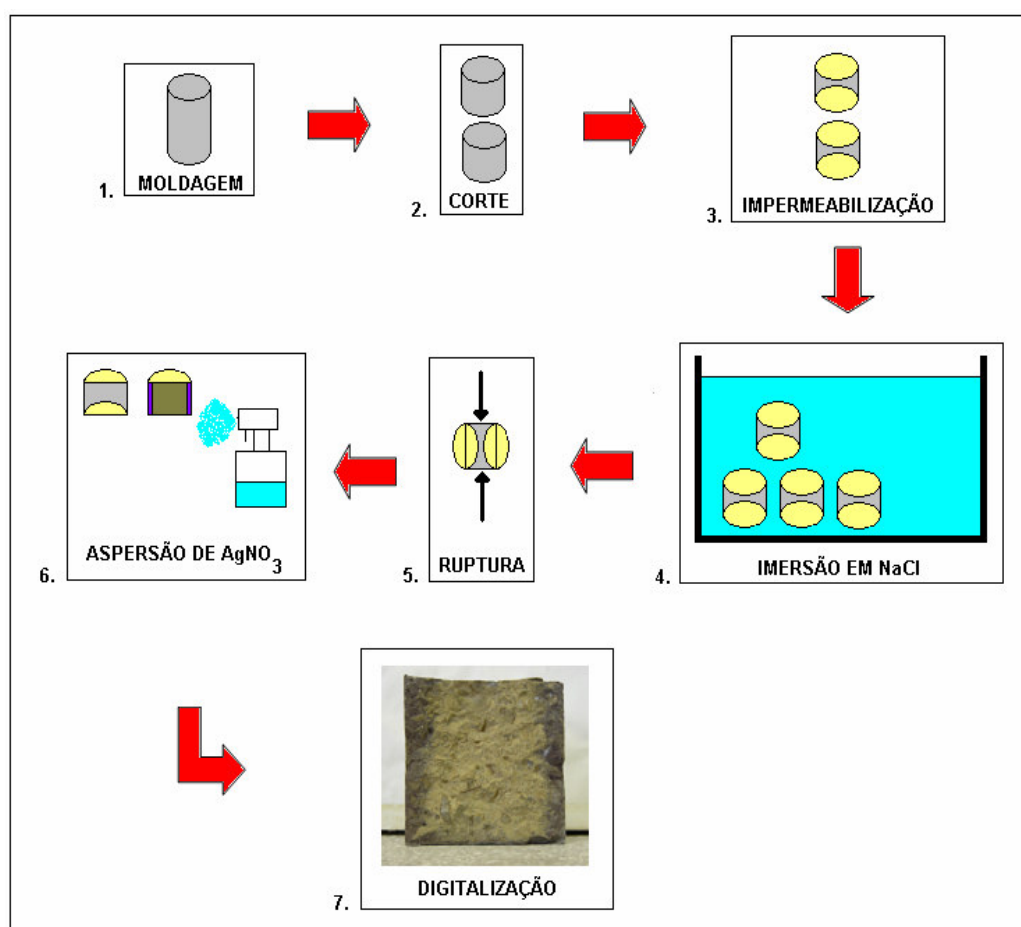


Figura 3.5 – Esquema do ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI).

Após este procedimento, a zona contaminada de cloretos foi claramente delimitada conforme figura 3.5 e para a determinação da profundidade de penetração de cloretos, as imagens foram editadas e cotadas com o auxílio do programa autoCAD R14. Utilizaram-se aproximadamente 200 valores de profundidade por corpo-de-prova, os quais resultaram em 600 valores por relação a/ag. A partir destes, foram confeccionadas as médias aritméticas de profundidade para cada idade de ensaio sendo o coeficiente de variação (C.V.) fixado abaixo de 10% e, para tal, procedeu-se à eliminação de alguns valores discrepantes.

De posse destas médias foi possível determinar o coeficiente de difusão de cloretos (K) para cada mistura aglomerante. Segundo BAKKER (1988), o coeficiente de difusão, que representa o índice de penetração de cloretos no EPCI, pode ser determinado através da equação 3.2.

$$x = a + k(t)^{1/2} \quad (3.2)$$

x: profundidade média de penetração no CP, em mm;

a: ponto de intersecção da reta com o eixo y. Por ser, normalmente, um valor muito pequeno, este foi desconsiderado;

t: tempo em que o CP permaneceu imerso até a data do ensaio, em semanas

Para chegar-se aos respectivos coeficientes de difusão de cloretos, os valores de profundidade média de cada série foram plotados em gráficos em função dos tempos de imersão nos quais as inclinações das retas representam os coeficientes de difusão de cloretos do concreto.

3.6.3 Ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202

O ensaio acelerado de penetração de cloretos (EAPC) foi realizado conforme o método da ASTM C 1202. Este método de ensaio consiste na verificação da carga total que passa pelas amostras de concreto (carga passante) e avalia a resistência à penetração de cloretos através de uma relação com a condutância elétrica em corpos-de-prova de concreto.

Foram moldados corpos-de-prova com dimensões de 95x200mm, sendo estes posteriormente cortados em três discos, com serra diamantada, nas dimensões de 95x51mm.

Aos 91 dias, após proceder-se impermeabilização das superfícies laterais com resina epóxi, vácuo em dessecador e saturação, as amostras de concreto foram fixadas a duas células de acrílico preenchidas com uma solução de 3% de NaCl numa face e 0,3N de NaOH na outra. Ao sistema montado foi aplicada uma tensão de 60V e realizadas leituras a cada 30min durante as 6h de ensaio conforme a figura 3.6.

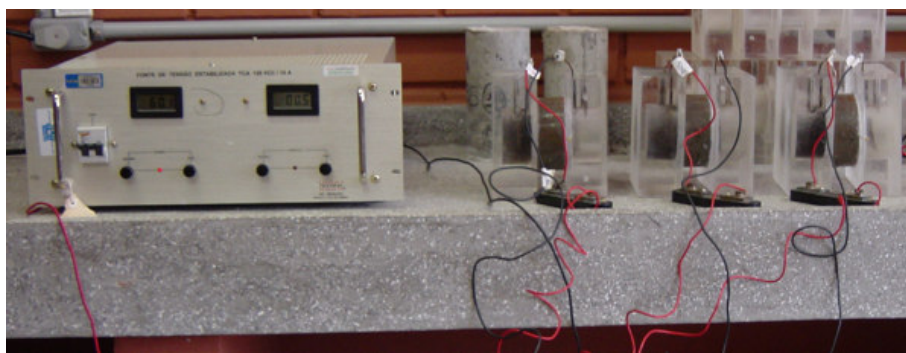


Figura 3.6- Ensaio acelerado de penetração de cloretos.

Neste ensaio também se adotou como valor representativo, a média aritmética de três determinações, desde que atendidas as prescrições de norma referentes às diferenças nestes resultados. Após a realização do EAPC, de posse das amostras ensaiadas, foi realizado numa delas a aspersão de AgNO_3 , seguida de medição da profundidade de penetração semelhante ao procedimento descrito anteriormente.

3.6.4 Absorção de água por imersão

Para complementar-se a análise proposta no trabalho procedeu-se à verificação da absorção de água através do método prescrito pela NBR 9778. Foram moldados dois corpos-de-prova 10x20cm para cada mistura aglomerante, sendo

estes ensaiados aos 91 dias de idade conforme o esquema apresentado na figura 3.7.

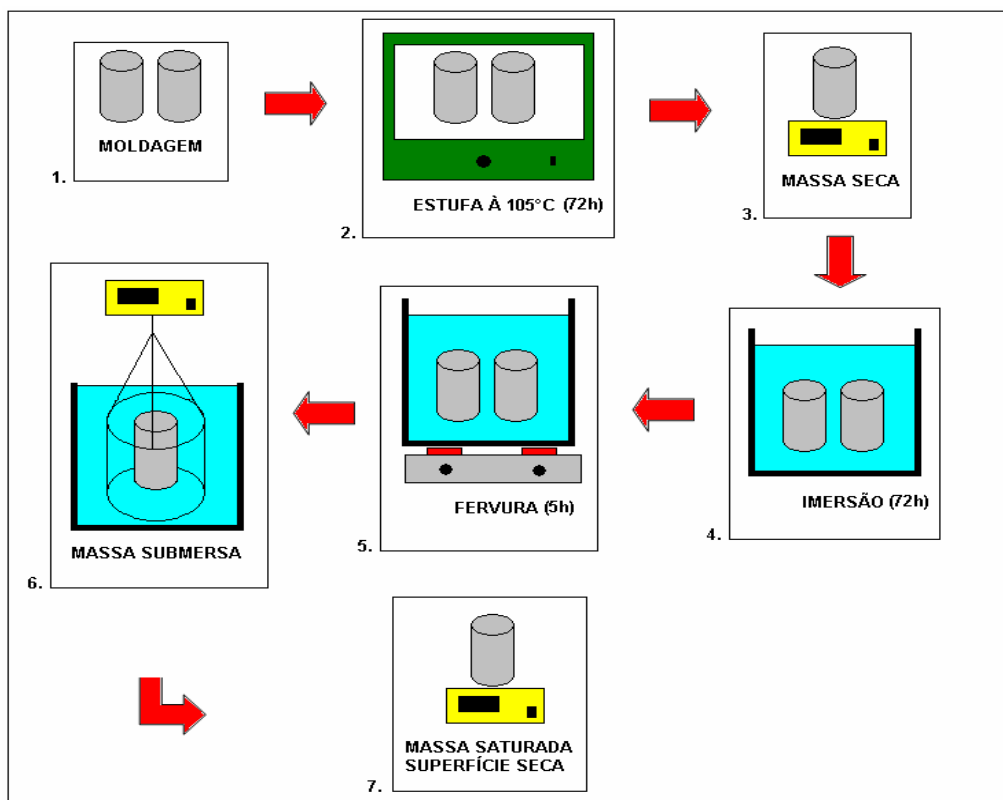


Figura 3.7- Esquema do ensaio de absorção de água por imersão.

3.6.5 Composição iônica da solução aquosa dos poros

Os corpos-de-prova cilíndricos de pastas 4x8cm foram lavados superficialmente, quando completaram o seu período de cura submersa de 91 dias, e pulverizados. O material pulverizado foi peneirado na peneira #100 e misturado com água deionizada na proporção de 1:1, em misturador magnético, até a estabilização do pH (30 minutos). Em seguida a solução obtida foi filtrada e utilizada para a determinação das concentrações de íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} e OH^- .

As concentrações dos íons foram determinadas da seguinte forma:

- Ca^{2+} → titulação complexométrica;
- Na^+ , K^+ → espectrometria de absorção atômica;

- SO_4^{2-} → cromatografia iônica;
- OH^- → titulação de neutralização (HCl).

A condutividade elétrica para cada mistura e idade de cura foi calculada utilizando as equações propostas por Shi et al. (1998):

$$\rho = \rho_{\text{água}} + \sum C_i \lambda_i / 1000 \quad (3.3)$$

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 .

$$\lambda_i = \lambda_{i,0} - A_i \sqrt{C_i} \quad (3.4)$$

$\lambda_{i,0}$ = é a condutividade equivalente à concentração infinita.

A_i = Constante da equação determinada teoricamente pela equação (3.5)

$$A_i = 0,2289 \lambda_{i,0} + 60,12 \quad (3.5)$$

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^+	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	OH^-	Cl^-
Condutividade equivalente $\text{M}^2 \cdot \text{equiv.}^{-1} \cdot \text{ohm}^{-1}$	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,0198	0,00763

3.6.6 Ensaio de porosímetria de mercúrio

Após o ensaio de resistência a compressão axial no concreto, como descrito anteriormente, retirou-se dos corpos-de-prova ensaiados, amostras cúbicas de argamassa com aproximadamente 6mm de aresta. Essas amostras foram imersas em álcool isopropílico para paralisação da hidratação e posteriormente submetidas a um processo de secagem gradativo sendo então encaminhadas para a determinação da porosidade através do ensaio de porosímetria por intrusão de mercúrio em equipamento da marca Micromeritics, modelo Autopore II 9220.

4 Análise dos resultados

4.1 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados de resistência à compressão.

Mistura	a/ag	Resistência à compressão (MPa)		
		7	28	91
R	0,45	27,4	42,2	43
	0,55	22,6	30,6	33,6
	0,65	18,8	24,3	28
15 M	0,45	29,2	43,6	53,1
	0,55	22,1	32,6	40,4
	0,65	18,9	27,2	33,4
25 M	0,45	28,9	43,5	50,9
	0,55	19,5	30,3	36,9
	0,65	12,7	22,4	29,6
15 N	0,45	29,8	37,7	50,5
	0,55	19,4	27,5	33,8
	0,65	16,1	23,6	31,9
25 N	0,45	16,3	22,7	30,5
	0,55	12,5	17,5	24,2
	0,65	10	13,9	19

Da análise desta, verifica-se que as misturas compostas com 15% e 25% de CCA moída e 15% CCA natural apresentaram, já aos 7 dias, valores superiores ou muito próximos àqueles obtidos pela mistura de referência, em todas as relações a/ag, confirmando uma tendência anteriormente observada por outros autores ao estudarem concretos compostos com CCA. (ZHANG et al, 1996; FENG et al, 2003; BUI et al, 2005)

A mistura composta com 15% de CCA moída, comparada à de referência, apresentou valores superiores de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias, exceto para a relação a/ag = 0,55 que, aos 7 dias, apresentou valor 2% inferior ao de referência (ver tabelas 4.1 e 4.2).

As misturas com teores de substituição de 25% CCA moída e 15% de CCA ao natural apresentaram resistências superiores às de referência somente aos 91 dias, exceto para a relação $a/ag=0,45$ na qual a mistura com 25% de CCA moída apresentou resistências mais elevadas aos 7, 28 e 91 dias, e a mistura com 15% de CCA natural apresentou resistência mais elevada aos 7 e 91 dias e inferior aos 28 dias.

A mistura composta com 25% de CCA natural apresentou resistência à compressão inferior à mistura de referência em todas as idades de ensaio e relações a/ag adotadas.

Sensale e Dal Molin (2001), investigaram concretos com 10% e 20% de CCA moída, sem queima controlada, relações a iguais a 0,40 e 0,50, e também encontraram valores, de resistência à compressão, superiores aos concretos de referência, com 100% cimento Portland, aos 91 dias.

Na tabela 4.2 são apresentadas as taxas de variação da resistência à compressão, em comparação aos concretos de referência.

Tabela 4.2 – Taxa de variação de resistência à compressão em comparação ao concreto de referência.

Mistura	a/ag	Variação da resistência (%)		
		7 dias	28 dias	91 dias
15 M	0,45	+7%	+3%	+23%
	0,55	-2%	+7%	+20%
	0,65	+1%	+12%	+19%
	<i>Média</i>	<i>+2%</i>	<i>+7%</i>	<i>+21%</i>
25 M	0,45	+5%	+3%	+18%
	0,55	-14%	-1%	+10%
	0,65	-32%	-8%	+6%
	<i>Média</i>	<i>-14%</i>	<i>-2%</i>	<i>+11%</i>
15 N	0,45	+9%	-11%	+17%
	0,55	-14%	-10%	+1%
	0,65	-14%	-3%	+14%
	<i>Média</i>	<i>-6%</i>	<i>-8%</i>	<i>+11%</i>
25 N	0,45	-41%	-46%	-29%
	0,55	-45%	-43%	-28%
	0,65	-47%	-43%	-32%
	<i>Média</i>	<i>-44%</i>	<i>-44%</i>	<i>-30%</i>

Da análise desta, verifica-se nas misturas compostas com CCA quais foram os percentuais médios de variação, por idade, da resistência à compressão axial, em

relação à mistura de referência. Em consonância ao esperado, todas as misturas com utilização de CCA apresentaram os melhores desempenhos em idades mais avançadas, embora a mistura 15M tenha evidenciado percentuais superiores em todas as idades estudadas e, pelo contrário, a mistura 25N tenha apresentado percentuais sempre inferiores. Assim, as misturas 15M 15N e 25M apresentaram, aos 91 dias, resistências em média 21%, 11% e 11%, superiores aos concretos de referência, respectivamente, perfazendo as maiores diferenças. De modo análogo, a mistura 25N, aos 91 dias, apresentou a menor diferença em relação à mistura de referência, com um percentual de resistência em média 30% inferior.

Estas constatações determinam, ainda, que os concretos com 15% de substituição apresentaram resultados superiores aos com 25% de substituição, para as relações a/ag e idades de ensaio investigadas, e que os concretos com CCA moída levam vantagem em relação aos concretos com CCA ao natural.

Nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam a evolução da resistência à compressão das misturas investigadas.

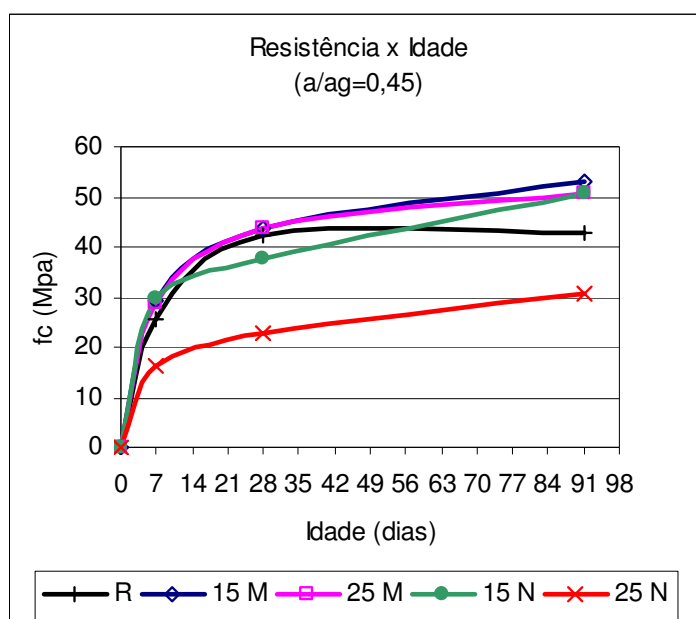


Figura 4.1 – Evolução da resistência à compressão nas misturas com relação $a/ag=0,45$.

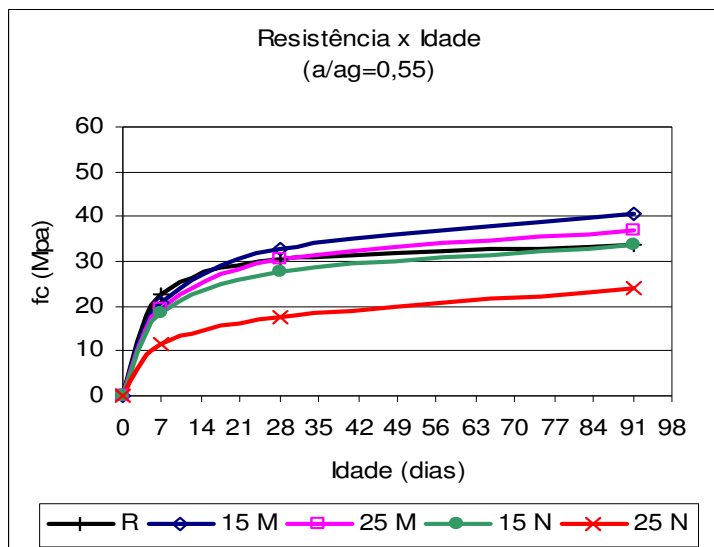


Figura 4.2 – Evolução da resistência à compressão nas misturas com relação a/ag= 0,55.

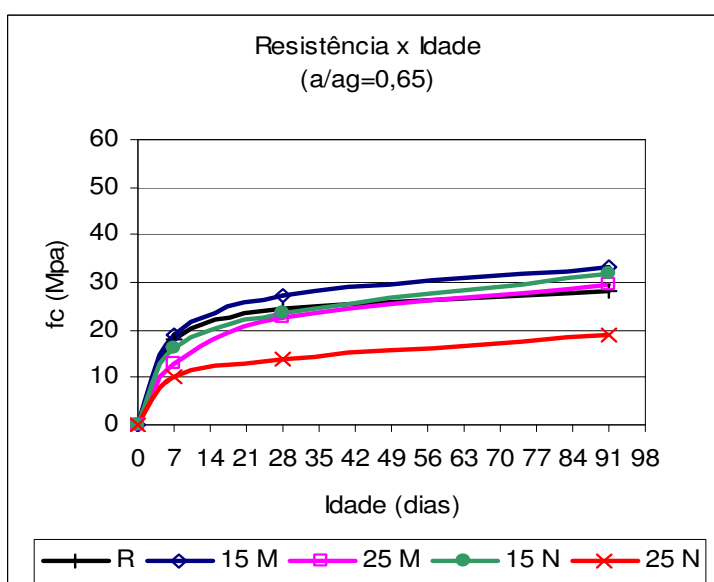


Figura 4.3 – Evolução da resistência à compressão nas misturas com relação a/ag= 0,65.

Para a relação $a/ag = 0,45$ observa-se que a partir dos 7 dias as misturas compostas com 15% e 25% de CCA moída apresentaram incremento de resistência maior do que as outras misturas, que se acentuou após os 28 dias. Para a mistura composta com 15% de CCA natural ocorreu um comportamento variável. Até os 7 dias, houve um incremento de resistência similar ao das misturas 15M e 25M, entretanto dos 7 para 28 dias esta misturas apresentou um ganho de resistência inferior ao das misturas R, 15M e 25 M. Porém dos 28 aos 91 dias o incremento de

resistência foi o mais acentuado dentre as misturas, sendo que o valor nesta idade foi superior ao apresentado pelo concreto de referência.

Para a relação a/ag igual a 0,55, a mistura de referência apenas é ultrapassada pela mistura composta com 15% de CCA moída, aos 28 dias e pelas misturas composta com 25% de CCA moída e 15 % de CCA ao natural, aos 91 dias.

Para a relação $a/ag = 0,65$ a mistura composta com 15% de CCA moída, a partir dos 7 dias, apresentou um maior incremento de resistência do que a mistura de referência. Como também ocorreu para a relação $a/ag=0,55$, para a relação $a/ag= 0,65$, a mistura com 100% cimento Portland teve sua resistência ultrapassada somente aos 91 dias pelas misturas compostas com 15% de CCA natural e 25% de CCA moída.

As misturas, compostas com 25% de CCA natural, apresentaram evolução de resistência sempre inferior às outras misturas, para todas as relações a/ag investigadas.

4.1.1 Determinação das curvas de Abrams.

A partir dos valores de resistência à compressão foi possível determinarem-se as constantes de Abrams das misturas investigadas. Devido ao fato de que na maioria dos outros ensaios estudados a idade escolhida foi a de 91 dias, neste caso a determinação foi também procedida a partir das resistências obtidas nesta idade.

Na tabela 4.3 são apresentados as equações e os coeficientes de determinação encontrados através da análise de regressão.

Tabela 4.3 – Equações de Abrams aos 91 dias.

Mistura	R^2	$f_c = A/B^x$
R	0,99	$f_c = 112,25e^{-2,1538(a/ag)}$
15 M	0,99	$f_c = 148,41e^{-2,3153(a/ag)}$
25 M	0,99	$f_c = 169,37e^{-2,7083(a/ag)}$
15 N	0,84	$f_c = 134,61e^{-2,3045(a/ag)}$
25 N	0,99	$f_c = 88,998e^{-2,3743(a/ag)}$

De posse das equações de Abrams, determinaram-se às diferentes relações a/ag das misturas em igualdade de resistência à compressão, para os níveis de 30MPa, 40MPa e 50MPa, que foram fixados previamente.

A análise das variáveis de estudo em igualdade de resistência à compressão, possibilita uma visão do desempenho das diferentes misturas pela ótica do parâmetro (f_c) que é o mais utilizado no dimensionamento das estruturas de concreto armado convencionais, porém, um parâmetro muito contestado, quando utilizado como único critério de dimensionamento, por não garantir durabilidade às estruturas (OBLA, 2005).

Na tabela 4.4 são apresentados os valores das a/ag , encontrados através das equações de Abrams, para os níveis de resistência escolhidos.

Tabela 4.4 – Relações a/ag em igualdade resistência à compressão.

Mistura	a/ag		
	30MPa	40MPa	50MPa
R	0,6127	0,4791	*
15 M	0,6905	0,5663	0,4699
25 M	0,6391	0,5329	0,4505
15 N	0,6514	0,5266	0,4297
25 N	0,4580	*	*

* Os valores foram suprimidos por encontrarem-se fora da faixa de observação.

Observa-se da análise da tabela 4.4, que as misturas compostas com CCA, em comparação as de referência, geralmente, apresentam maiores relações a/ag para um mesmo nível de resistência, o que pode ser explicado pela maior eficiência cimentícia do aglomerante que possui a CCA, como substituição parcial ao cimento, em sua composição.

4.2 Análise dos resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C 1202)

Os resultados do ensaio acelerado de penetração de íons cloreto (EAPC), segundo ASTM C 1202, são apresentados na tabela 4.5. Nesta, estão indicadas as cargas totais passantes em Coulombs (Ampere.segundo), aos 91 dias, para todas misturas investigadas.

Tabela 4.5- Resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C 1202).

Mistura	a/ag	Q (coulombs)
R	0,45	2885
	0,55	3421
	0,65	3809
15 M	0,45	1654
	0,55	1915
	0,65	2306
25 M	0,45	940
	0,55	1288
	0,65	1696
15 N	0,45	2231
	0,55	2533
	0,65	2746
25 N	0,45	1613
	0,55	1936
	0,65	2360

Observa-se que as diferentes relações a/ag, os diferentes teores de substituição e as diferentes finuras influenciaram na resistência à penetração de cloretos, o que pode ser expresso pelas diferenças apresentadas nas cargas passantes.

Nos próximos subitens serão realizadas análises sobre a influência que cada um desses fatores exerce na carga passante. Também será feita uma classificação das misturas, segundo a norma ASTM C 1202, quanto à penetrabilidade aos íons cloretos, uma avaliação das cargas passantes em igualdade de resistência à compressão e uma verificação da profundidade de penetração de cloretos, pelo método colorimétrico, após o ensaio acelerado.

4.2.1 Influência da relação água aglomerante

Na figura 4.4 observa-se a influência da relação a/ag na penetração de cloretos das misturas investigadas. Dos resultados, verifica-se que o aumento da relação a/ag promoveu diminuição da resistência à penetração de cloretos em todas as misturas, o qual pode ser observado pelo aumento provocado nas cargas passantes.

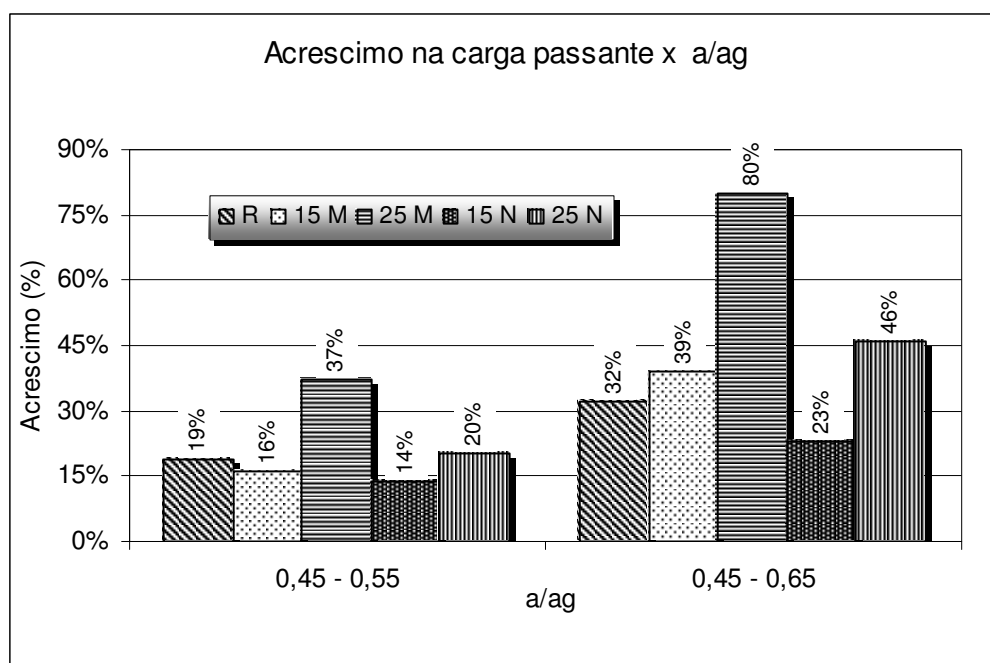


Figura 4.4 - Acréscimo da carga passante versus aumento da relação a/ag.

As misturas compostas com 25% de CCA, moída ou natural, apresentaram os maiores acréscimos na carga passante por influência da relação a/ag. Quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,55 o acréscimo na carga passante foi de 37% e 20%, respectivamente. Quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,65, estas misturas apresentaram acréscimos de 80% e 46%, respectivamente.

A mistura de referência e a misturas composta com 15 % de CCA natural apresentaram acréscimos de 19% e 14% quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,55 e acréscimos de 32% e 23% quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,65, respectivamente, representando as menores diferenças na carga passante por influencia da relação a/ag, dentre as misturas investigadas.

Assim, pode-se dizer que, com exceção da mistura com 15 % de CCA natural, a relação a/ag exerceu maior influência sobre a carga passante das misturas compostas com CCA. Castro et al (2004) encontraram comportamento semelhante na carga passante ao investigar concretos compostos com 10% de CCA, diferentes relações a/ag (0,4, 0,55, 0,7) e cura de 28 dias. Sacilotto (2005) também encontrou esse comportamento ao estudar concretos com 10%, 20% e 30% de CCA beneficiada, relações a/ag iguais a 0,35, 0,50, 0,65 e diferentes períodos de cura úmida (3,7 e 28 dias).

4.2.2 Influência da utilização da CCA

As alterações na microestrutura e na composição iônica da solução dos poros, promovidas pelas adições minerais, são os principais parâmetros a influenciar na carga passante (SHI *et al*, 1998).

Na figura 4.5 apresenta-se uma comparação entre as misturas compostas com CCA e a de referência com relação ao decréscimo na carga passante.

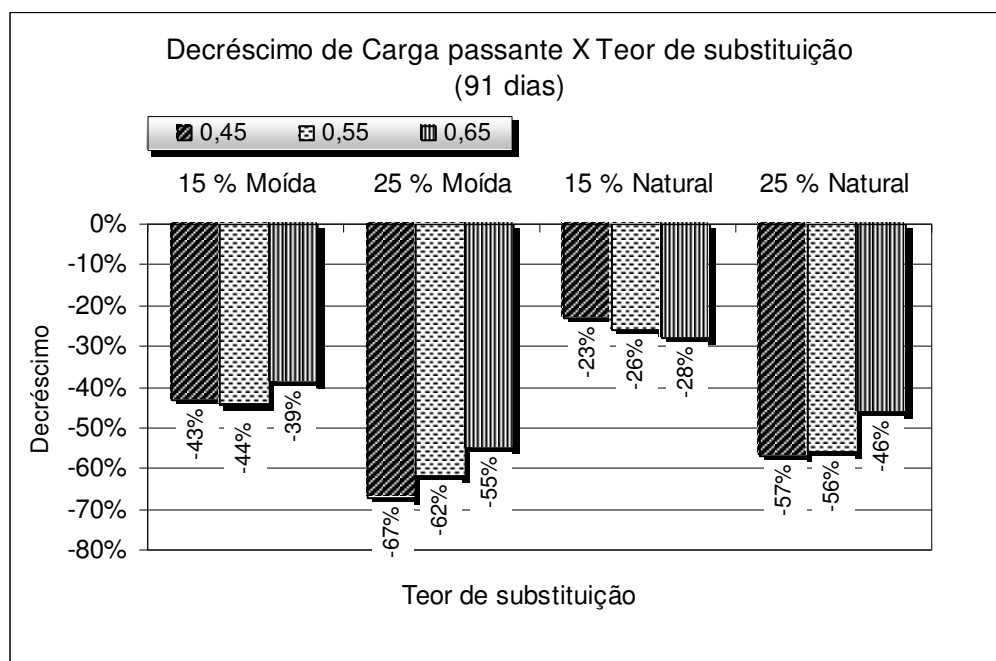


Figura 4.5 – Influência da utilização da CCA na carga passante, aos 91 dias.

Verifica-se que a utilização da CCA exerce grande influência sobre as cargas passantes das misturas. Todas as misturas que foram compostas com CCA apresentaram cargas passantes menores do que as misturas de referência. Outro aspecto importante diz respeito aos teores de substituição utilizados. À medida que se elevou o teor de CCA as misturas apresentaram maiores reduções nas cargas passantes.

As misturas compostas com 25% CCA apresentaram as menores cargas passantes. Quando confrontadas com as misturas de referência observa-se um decréscimo em média de 61%, nas misturas com CCA moída, e 42%, nas misturas com CCA natural, para as relações a/ag estudadas. Nas mesmas condições, as misturas com 15% de CCA apresentaram um decréscimo na carga passante em média de 42% (mistura com CCA moída) e 26% (misturas com CCA natural).

Bouzoubaâ & Fournier (2001) encontraram o mesmo comportamento, aos 28 dias, em concretos compostos com 7,5%, 10% e 12,5% de CCA moída, queimada com controle de temperatura. Saraswathy & Song (2006), também encontraram comportamento idêntico em concretos com teores de substituição variando entre 5% e 25%. Contudo, para concretos com 30%, ainda que tenham encontrado cargas passantes bem inferiores aos concretos de referência, as cargas passantes aumentaram em relação aos concretos com 20% e 25% de substituição levando-os a concluir que substituições menores que 30% são recomendadas.

Como esperado, o efeito da moagem sobre a carga passante é outro fator relevante, uma vez que todas as misturas com CCA moída apresentaram cargas passantes menores que as misturas com CCA ao natural. Para as relações a/ag estudadas as misturas com teor de 25% de CCA moída apresentaram cargas passantes, em média 34% menores que as misturas com 25 % de CCA ao natural. Para as misturas com 15% de substituição, as misturas com CCA moída apresentaram cargas passantes em média 22% menores que as misturas com CCA ao natural. Isso provavelmente ocorreu devido à finura mais elevada da CCA moída, em relação a CCA natural, promover um maior refinamento dos poros, o que dificulta a migração dos íons cloreto. Cervo (2002), estudando teores de substituição de 25% e 50% de CCA, com diferentes finuras, também verificou maior redução na carga passante em concretos que continham CCA de finuras mais elevadas, aos 91 dias.

4.2.3 Classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto.

A tabela 4.6 apresenta a classificação quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202. Com base nesta classificação, na tabela 4.7 é apresentado o enquadramento das misturas investigadas. Observa-se que as misturas com CCA moída apresentaram os melhores desempenhos dentre as misturas investigadas.

Tabela 4.6 - Classificação dos concretos quanto à penetrabilidade aos íons cloreto ASTM C 1202.

Penetrabilidade e aos íons cloreto	Alta	Moderada	Baixa	Muito Baixa	Desprezível
Carga passante (Coulombs)	> 4000	2000 a 4000	1000 a 2000	100 a 1000	< 100

Tabela 4.7 - Enquadramento das misturas quanto a penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202.

Mistura	a/ag	Penetrabilidade aos íons cloreto
R	0,45	Moderada
	0,55	Moderada
	0,65	Moderada
15 M	0,45	Baixa
	0,55	Baixa
	0,65	Moderada
25 M	0,45	Muito Baixa
	0,55	Baixa
	0,65	Baixa
15 N	0,45	Moderada
	0,55	Moderada
	0,65	Moderada
25 N	0,45	Baixa
	0,55	Baixa
	0,65	Moderada

A mistura com 25% de CCA moída enquadrou-se na penetrabilidade muito baixa para a relação $a/ag = 0,45$ e baixa para as relações $a/ag = 0,55$ e $a/ag = 0,65$. A mistura composta com 15% de CCA moída enquadrou-se na penetrabilidade baixa para as relações $a/ag = 0,45$ e $a/ag = 0,55$.

Das misturas compostas com CCA ao natural constata-se melhor desempenho para a mistura com teor de substituição de 25%, que se enquadrou com penetrabilidade baixa para as relações a/ag iguais a 0,45 e 0,55. A mistura com teor de substituição de 15% de CCA ao natural comportou-se da mesma maneira que as misturas de referência, sendo que ambas apresentaram classificação moderada para todas as relações a/ag investigadas.

Para a relação $a/ag = 0,65$ praticamente todos os concretos, apresentaram classificação de penetrabilidade moderada. A exceção foi o concreto com 25% de CCA moída que apresentou classificação baixa para esta relação a/ag .

4.2.4 Análise das cargas passantes em igualdade de resistência a compressão

Na tabela 4.8 são apresentados os valores das cargas passantes, em igualdade de resistência à compressão, e os enquadramentos quanto à penetrabilidade aos íons cloreto, das misturas investigadas. São apresentadas também, as equações que foram utilizadas nas determinações. Adotaram-se nos cálculos, as relações a/ag que foram determinadas através das equações de Abrams para os níveis de resistência à compressão de 30MPa, 40MPa e 50MPa e que foram apresentadas anteriormente, na tabela 4.4.

Para o nível de 30MPa, as misturas compostas com 25% de CCA apresentaram as maiores resistências à penetração de cloretos, obtendo classificação baixa quanto à penetrabilidade aos íons cloreto. Todas as outras misturas apresentaram classificação moderada para este nível de resistência a compressão.

Para o nível de 40MPa, as classificações das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto foram idênticas ao nível de 30MPa, exceto para mistura 25 N que não foi classificada devido à relação a/ag , obtida na curva de Abrams, estar fora da faixa de observação.

Os concretos apresentaram melhoria na classificação quanto à penetrabilidade aos íons cloreto ao nível de 50MPa, exceto para a mistura 15 N que manteve a classificação moderada. As misturas 15 M e 25 M apresentaram classificações Baixa e Muito Baixa, respectivamente. As misturas R e 25 N não foram classificadas, pois também apresentaram valores fora dos limites confiáveis.

Tabela 4.8 – Carga passante e classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto em igualdade de resistência à compressão.

Mistura	Parâmetro	Equação	Nível de resistência		
			30MPa	40MPa	50MPa
R	Carga Passante (Coulombs)	$Q=5317,5(a/ag)^{0,7587}$ $R^2= 0,994$	3667	3043	*
	Penetrabilidade aos íons cloreto	-	Moderada	Moderada	*
15 M	Carga Passante (Coulombs)	$Q=3352,5(a/ag)^{0,898}$ $R^2= 0,985$	2404	2012	1701
	Penetrabilidade aos íons cloreto	-	Moderada	Moderada	Baixa
25 M	Carga Passante (Coulombs)	$Q=3375,5(a/ag)^{1,6037}$ $R^2= 0,999$	1646	1230	940
	Penetrabilidade aos íons cloreto	-	Baixa	Baixa	Muito Baixa
15 N	Carga Passante (Coulombs)	$Q=3523,2(a/ag)^{0,5671}$ $R^2= 0,994$	2763	2449	2182
	Penetrabilidade aos íons cloreto	-	Moderada	Moderada	Moderada
25 N	Carga Passante (Coulombs)	$Q=3645,8(a/ag)^{1,0308}$ $R^2= 0,974$	1630	*	*
	Penetrabilidade aos íons cloreto	-	Baixa	*	*

* Os valores foram suprimidos por encontrarem-se fora da faixa de observação.

Embora as misturas compostas com CCA, natural ou moída, tenham apresentado as menores cargas passantes também em igualdade de resistência à compressão (tendência semelhante ao encontrado em igualdade de a/ag), verifica-se, como já esperado, que o desempenho das misturas quanto à penetração de cloretos, quando confrontadas ao mesmo nível de resistência à compressão, foi

diferente do desempenho registrado em igualdade de relação a/ag. As misturas compostas com 15% de CCA, moída ou natural, apresentaram classificações, quanto à penetrabilidade aos íons cloretos, idênticas à mistura de referência nos níveis de 40MPa e 50MPa. Assim pode-se dizer que em igualdade de resistência à compressão houve uma subestimação do que ocorreu quando as misturas foram investigadas em igualdade de relação a/ag.

Apesar do caso estudado tratar-se de uma interpolação matemática, o comportamento encontrado, confirma o que muitos autores vêm relatando há bastante tempo: a resistência à compressão, embora seja utilizada com muita frequência para especificar concretos, não deve ser utilizada como o único parâmetro de dimensionamento destes, quando o objetivo for fabricar concretos com durabilidade, sobretudo, em ambientes agressivos.

4.2.5 Determinação da profundidade de penetração nos concretos submetidos ao teste rápido de penetração de cloretos.

Após a realização do ensaio acelerado de penetração de cloretos, foram determinadas as profundidades de penetração dos íons cloreto através do método colorimétrico. Na figura 4.6 é apresentado o confronto entre as profundidades encontradas e as respectivas cargas passantes, em todos os concretos estudados. Observa-se que a profundidade de penetração nas misturas aumenta com a diminuição de resistência à penetração de cloretos e que houve uma correlação linear entre os valores, com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,84.

A figura 4.6 também apresenta faixas nas quais é possível visualizar a classificação dos concretos quanto à penetrabilidade aos íons cloreto. Como apresentado anteriormente, praticamente todas as misturas estudadas figuraram dentro das classificações baixa ou moderada.

Na tabela 4.9 apresentam-se os limites de profundidades e os respectivos enquadramentos quanto à penetrabilidade aos íons cloreto. Calcularam-se esses limites a partir da tendência apresentada na figura 4.6. Não foi possível calcular o limite de profundidade para a classe Desprezível (carga passante < 100C) através da equação de correlação obtida no gráfico.

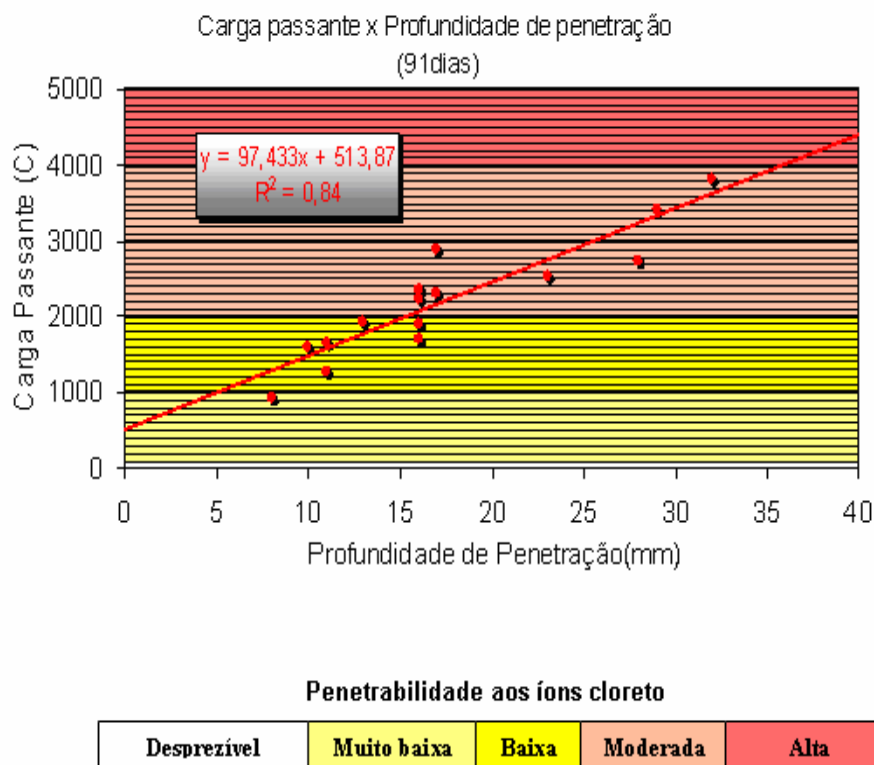


Figura 4.6 – Carga passante versus profundidade de penetração.

Tabela 4.9 – Classificação dos concretos baseados na carga passante e profundidade de penetração de cloretos.

Carga Passante (C)	Penetrabilidade aos íons cloreto	Profundidade de penetração de Cloretos (mm)
> 4000	Alta	> 35,8
2000 a 4000	Moderada	15,3 a 35,8
1000 a 2000	Baixa	5,0 a 15,3
< 1000	Muito baixa	< 5,0

4.3 Análise dos resultados do ensaio de penetração de cloretos por imersão (EPCI).

Os coeficientes de difusão de cloretos (k) determinados para cada mistura investigada através do Ensaio de Penetração de Cloretos por Imersão (EPCI), conforme o método colorimétrico, descrito no capítulo 3, bem como, os respectivos

coeficientes de determinação encontrados através da regressão linear, são apresentados na tabela 4.10. Nas figuras 4.7 a 4.9 são apresentados os gráficos dos quais foram obtidos os valores expressos na tabela.

Tabela 4.10 – Coeficientes de penetração de cloretos das misturas investigadas.

Mistura	a/ag	k (mm/semana ^{1/2})	R ²
R	0,45	8,23	0,984
	0,55	9,29	0,993
	0,65	10,06	0,954
15 M	0,45	5,66	0,904
	0,55	7,47	0,921
	0,65	7,89	0,901
25 M	0,45	6,08	0,950
	0,55	8,62	0,962
	0,65	10,98	0,969
15 N	0,45	5,86	0,943
	0,55	8,36	0,942
	0,65	9,72	0,944
25 N	0,45	11,80	0,965
	0,55*	20,25	0,998
	0,65*	22,71	0,994

Nas misturas compostas com 25 % de CCA ao natural (25 N), relações a/ag= 0,55* e a/ag= 0,65*, não foi possível determinar às profundidades de penetração de cloretos nas idades de 56 e 91 dias, devido às amostras apresentarem-se completamente contaminadas por cloreto. Foram utilizadas, neste caso, apenas as profundidades encontradas nas outras idades de ensaio, 0, 7,14 e 28 dias.

Ao analisarem-se os dados da tabela 4.10, verifica-se que a utilização da adição mineral aumentou a resistência à penetração de cloretos em comparação aos concretos de referência, na medida que houve a diminuição nos índices k das misturas, às exceções dos concretos 25 N, para todas as relações a/ag estudadas, e da mistura 25M65, que apresentaram índices superiores aos de referência.

Conforme se procedeu na análise dos resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos, será realizada nos subitens posteriores, uma análise da influência das principais variáveis envolvidas, de modo individual, sobre a penetração de cloretos por imersão. São elas: a relação a/ag, a utilização de CCA e a moagem da CCA

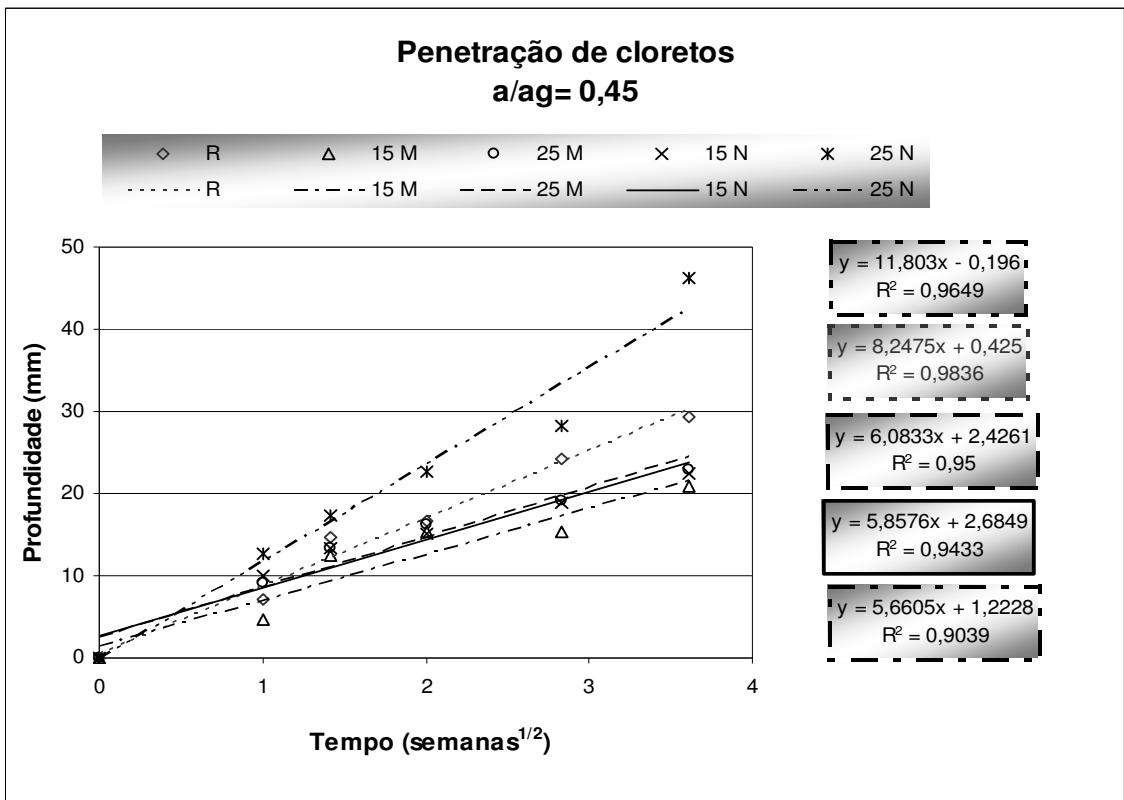


Figura 4.7 – Análise de regressão das misturas com relação a/ag= 0,45.

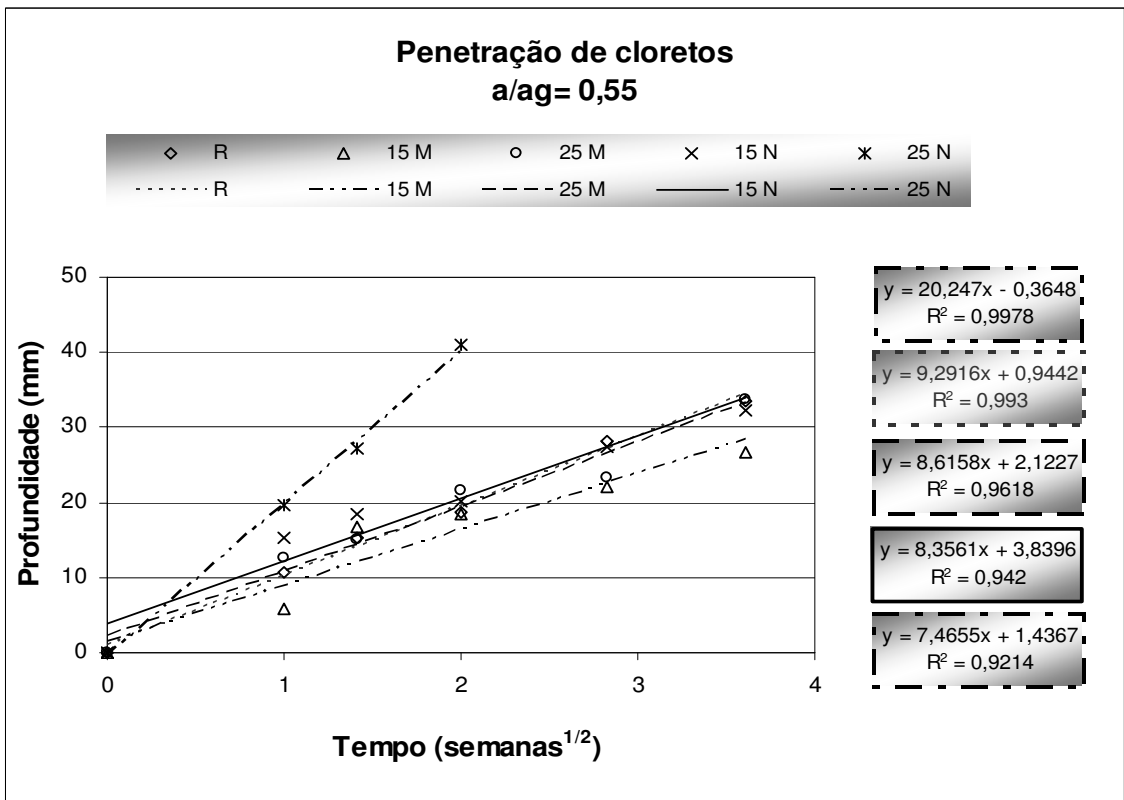


Figura 4.8 – Análise de regressão das misturas com relação a/ag= 0,55.

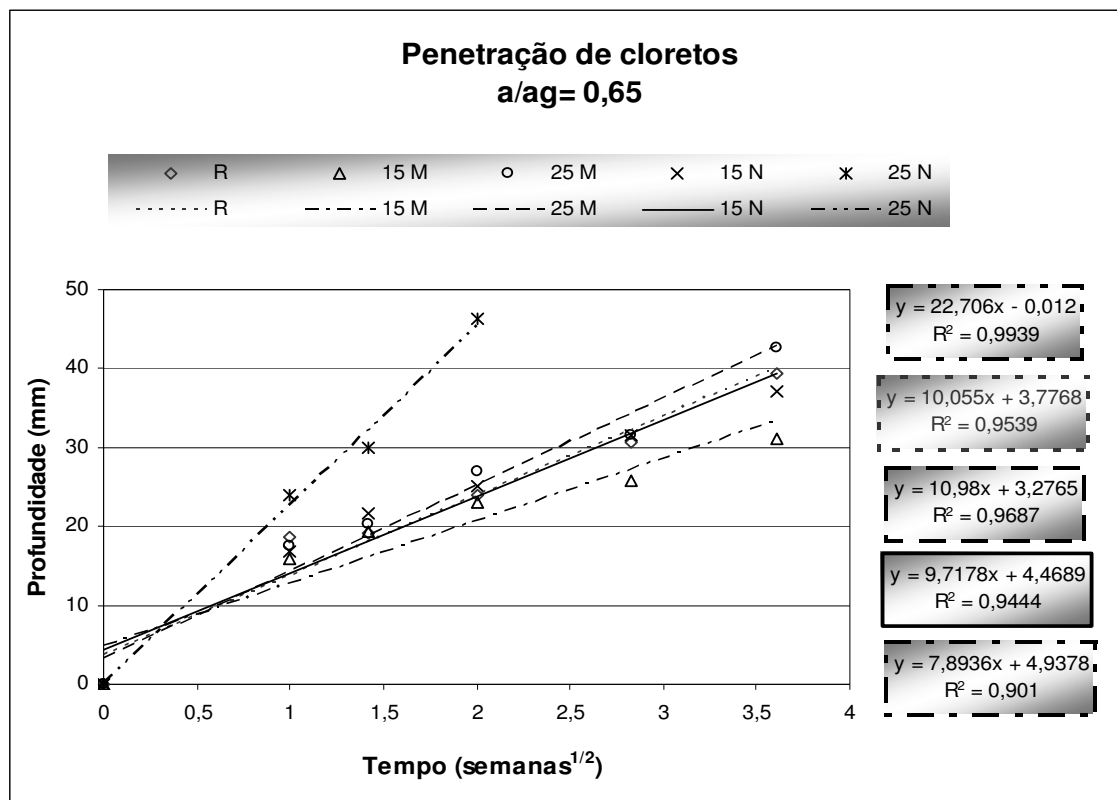


Figura 4.9 – Análise de regressão das misturas com relação a/ag= 0,65.

4.3.1 Influência da relação a/ag

Na figura 4.10 é apresentado o comportamento das misturas investigadas em função da elevação do fator a/ag. Como esperado, quando se elevou a relação a/ag das misturas, houve diminuição na resistência à penetração de cloretos em todas as misturas investigadas, o que é expresso pelos acréscimos dos índices k.

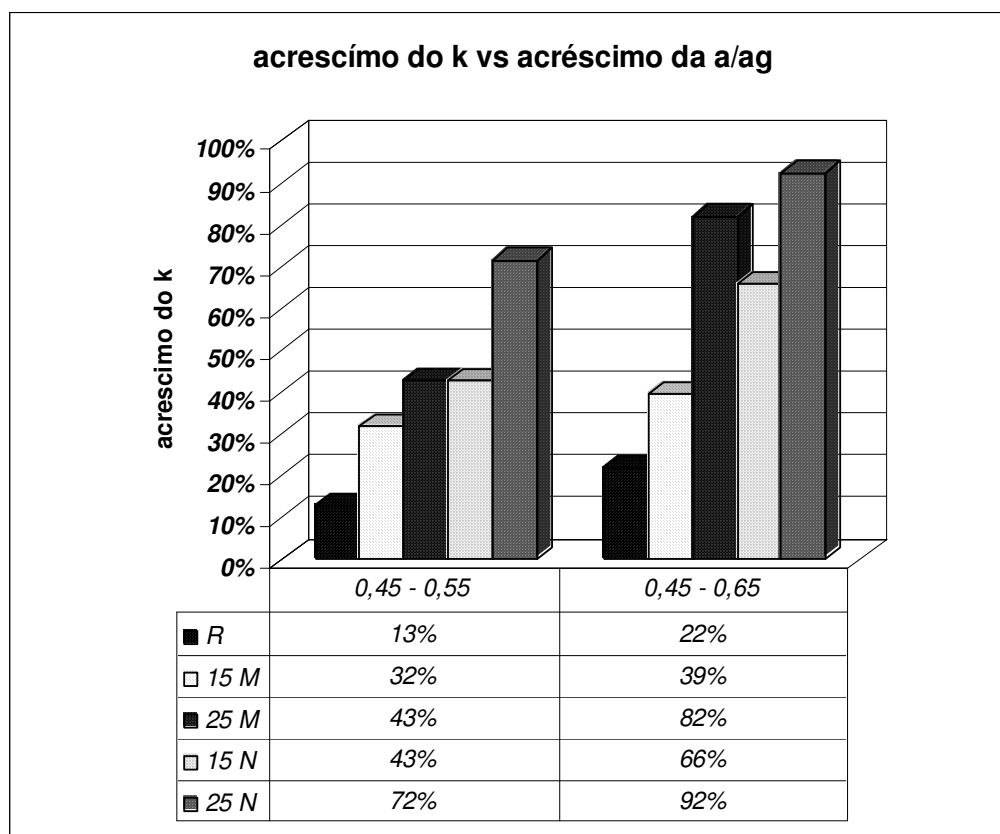


Figura 4.10 - Influência da relação a/ag no coeficiente de difusão de cloretos.

Os resultados demonstram, como já havia sido observado no ensaio acelerado de penetração de cloretos, que as misturas compostas com CCA apresentaram maior interdependência dos índices de penetração com as relações a/ag, ou seja, as misturas com substituição parcial apresentaram maior redução de desempenho quando se aumentou a relação a/ag.

As maiores variações foram apresentadas pelas misturas compostas com 25% de substituição de CCA, ao natural e moída (25N e 25M). As misturas 25N tiveram um aumento no índice de penetração de 72%, quando a relação a/ag foi elevada de 0,45 para 0,55 e um aumento de 92%, quando a elevação foi de 0,45 para 0,65. Nestas mesmas condições, as misturas 25M apresentaram acréscimos de 43% e 82%.

No caso das misturas compostas com 15 % de CCA, ao natural e moída (15N e 15M), embora tenham apresentado quedas de desempenho menores que as misturas com teor de CCA de 25%, as quedas foram mais elevadas que aquelas registradas pelas misturas de referência. As misturas 15 N apresentaram

acréscimos no índice K de 43% e 66% e a mistura 15 M de 32% e 39%, quando as relações a/ag passaram de 0,45 para 0,55 e de 0,55 para 0,65, respectivamente.

As mistura com 100% cimento Portland (R), embora tenham apresentado maiores índices de penetração, quando confrontadas às misturas 15M, 15N e 25M, foram as que sofreram menor influência da elevação no fator a/ag, de todas as que foram investigadas. Estas misturas apresentaram elevação no índice k de 13 % e 22%, nas mesmas condições que as misturas anteriores.

Embora tenha havido, nas misturas compostas com CCA, redução de desempenho mais acentuada com a elevação da relação a/ag, que nas misturas de referência, tal redução não causou nestas um desempenho inferior ao apresentado pelas misturas de referência na medida que os índices K das misturas compostas mantiveram-se inferiores aos das misturas R, exceto a mistura 25 M, relação a/ag igual a 0,65, e a mistura 25 N, para todas as relações a/ag, que apresentaram índices K superiores aos dos concretos de referência.

4.3.2 Influência da utilização de CCA

A influência da substituição de parte do cimento Portland por cinza de casca de arroz é observada a partir da análise dos dados apresentados na tabela 4.11 e na figura 4.11.

Constata-se, a exceção da mistura 25 N, que a utilização de CCA promoveu o aumento da resistência à penetração de cloretos em comparação à mistura de referência haja vista as reduções percentuais apresentadas pelos coeficientes de penetração de cloretos.

Tabela 4.11 – Coeficientes de penetração de cloretos das misturas investigadas.

Mistura	a/ag	Taxa de variação de k	Média
R	0,45	0%	0%
	0,55	0%	
	0,65	0%	
15 M	0,45	-31%	-27%
	0,55	-23%	
	0,65	-25%	
15 N	0,45	-29%	-15%
	0,55	-12%	
	0,65	-4%	
25 M	0,45	-27%	-8%
	0,55	-9%	
	0,65	11%	
25 N	0,45	43%	74%
	0,55	32%	
	0,65	147%	

Em consonância ao comentado anteriormente, as taxas de redução do índice K, obtidas nos concretos compostos com CCA, em comparação aos concretos de referência, foram mais acentuadas para a relação $a/ag=0,45$. Nesta relação a/ag as misturas 15M, 15N e 25M, atingiram reduções de 31%, 29% e 27%, respectivamente, o que sugere um desempenho muito próximo entre si, para a relação $a/ag=0,45$, com relação à resistência a penetração de cloretos.

Para a relação $a/ag=0,55$ os concretos compostos com CCA continuaram apresentando desempenhos superiores aos de referência, porém com reduções menos acentuadas nos índices K. As reduções apresentadas pelas misturas 15M, 15 N e 25 M foram respectivamente de 23%, 12% e 9%.

Ao se observar os resultados das misturas compostas com CCA, em relação aos concretos de referência, para a relação $a/ag=0,65$, observa-se a acentuada intervenção da relação a/ag no seu desempenho, a exceção da mistura 15M. O desempenho da mistura 15N65 foi semelhante ao da mistura R65, apresentando uma ligeira redução no índice k que foi de 4%. Já a mistura 25M65 apresentou menor resistência à penetração de cloretos que a mistura de referência na medida que seu índice k teve um aumento de 11%.

Ao contrário das outras misturas compostas, a mistura 25N apresentou, em todas as relações a/ag investigadas, desempenho sempre inferior ao dos concretos

R, em relação à resistência a penetração de cloretos por imersão. Tal ocorrência não havia sido observada na análise do ensaio ASTM C 1202.

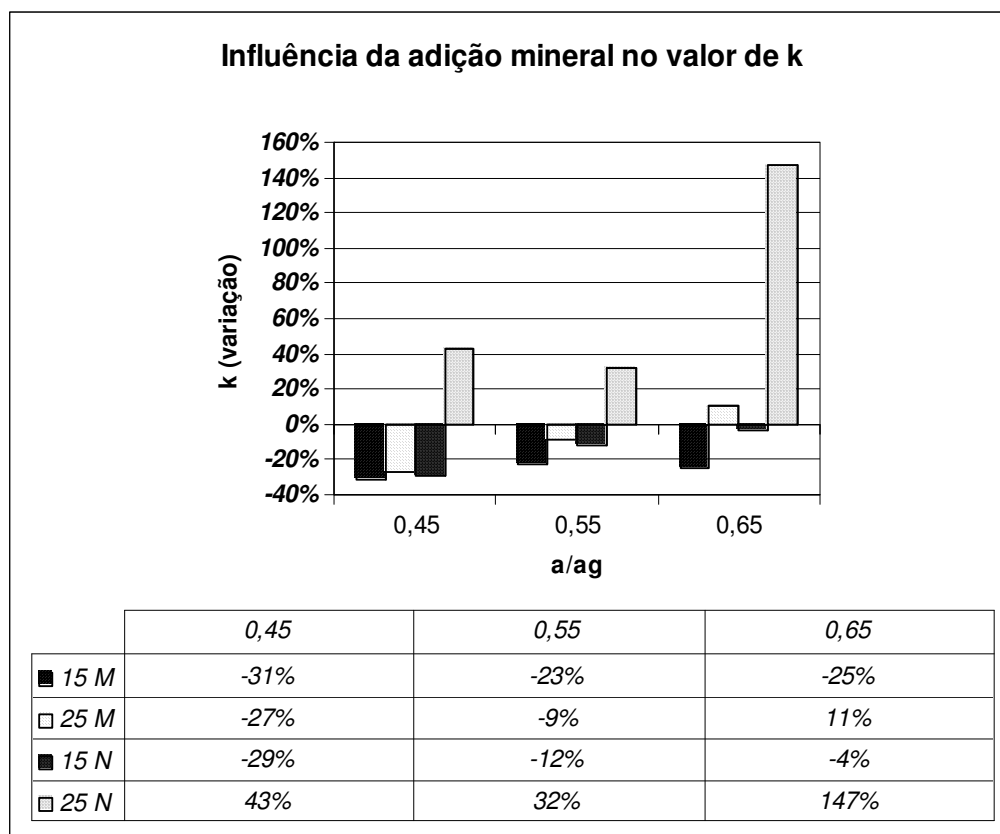


Figura 4.11- Influência da CCA no índice K em comparação ao concreto de referência.

As misturas 25N apresentaram índices K sempre superiores àqueles das outras misturas investigadas. Em comparação aos concretos de referência, os índices k foram acrescidos em 43%, 32% e 147% para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Acredita-se que este comportamento seja devido à baixa reatividade da CCA não moída que, no caso, consequentemente, não alterou de forma significativa a estrutura de poros. Há também, para o teor de 25%, maior diminuição no teor de cimento, reduzindo, assim, as combinações químicas.

Embora a mistura 25N tenha apresentado desempenho inferior, todas as outras misturas compostas com CCA superaram o desempenho das misturas de referência. Na tabela 4.11 é apresentada uma média aritmética dos índices K, das misturas investigadas, referentes aos valores encontrados em todas as relações

a/ag que foram estudadas. As misturas 15M, 15N e 25M superaram, também em média, o desempenho das misturas R em 27%, 15%, e 8%, respectivamente. Já para mistura 25N o desempenho foi em média 74% inferior, ou seja, os coeficientes de penetração de cloretos destas misturas, nas três relações aa/ag estudadas, foram em média 74% maiores.

4.3.3 Cinza de casca de arroz moída x Cinza de casca de arroz ao natural.

A partir da tabela 4.11 e da figura 4.11, também é possível realizar uma análise sobre o efeito da moagem realizada na pozolana, em relação à penetração de cloretos, a partir de uma comparação entre as misturas com CCA moída e ao natural. Esta análise será restringida as misturas com 15 % de substituição visto que a mistura 25N obteve desempenho muito inferior a todas outras misturas.

Verifica-se para a relação igual a 0,45, grande semelhança de desempenho entre as misturas com utilização de CCA moída e de CCA ao natural, quanto a penetração de cloretos por imersão. Tal semelhança é sugerida pela pequena variação dos índices K apresentada pelas misturas 15M e 15N. A diferença entre os índices destas misturas foi de apenas 2%, em comparação aos valores de referência. Essa diferença demonstra que a utilização, no teor de 15%, de CCA sem processos de beneficiamento em concretos promove um desempenho similar ao apresentado pela CCA moída, com relação à penetração de cloretos. À medida que se elevou o fator a/ag, a diferença de desempenho entre as misturas moídas e naturais foi mais evidente. Para a relação a/ag igual a 0,55, a diferença entre os índices K das misturas 15M e 15N, em relação aos concretos de referência, aumentou para 11% e para a relação a/ag igual a 0,65 a diferença aumentou para 21%.

4.3.4 Análise dos coeficientes de penetração de cloretos em igualdade de resistência à compressão axial.

De modo análogo ao realizado no EAPC, determinaram-se, através de regressão linear, as equações que correlacionam o índice de penetração de cloretos com a relação a/ag . Assim, a partir destas equações, apresentadas na tabela 4.12, foi possível determinar coeficientes de penetração de cloretos em igualdade de resistência à compressão, para os níveis de resistência de 30MPa, 40MPa e 50MPa (utilizaram-se níveis idênticos aos anteriores) e os coeficientes de penetração calculados são apresentados na figura 4.12.

Tabela 4.12 – Equações de correlação entre os índices K e as relações a/ag , aos 91 dias.

Mistura	R ²	K = Ax + B
R	0,992	$K = 9,0375(a/ag) + 4,2274$
15 M	0,89	$K = 11,165(a/ag) + 0,8655$
25 M	0,999	$K = 24,733(a/ag) - 5,0604$
15 N	0,972	$K = 19,301(a/ag) - 2,6384$
25 N	0,909	$K = 54,515(a/ag) - 11,731$

Observa-se, como esperado, que à medida que o nível de resistência das misturas aumenta, o índice de penetração de cloretos diminui. Todas as misturas apresentaram redução do índice de penetração com o aumento da resistência, porém, nas misturas, 15% ao natural e 25% moída, as reduções foram mais acentuadas que nas demais. A mistura com 15% de CCA natural teve uma redução de 43% no índice de penetração, quando a resistência aumentou de 30MPa para 50MPa, diminuindo de 9,91 mm/semana^{1/2} para 5,66mm/semana^{1/2}.

Em contrapartida, as misturas, com 15% de CCA moída e a de referência, apresentaram as menores reduções com o acréscimo do nível de resistência. A

mistura com 15 % de CCA moída, por exemplo, teve uma redução de 29%, quando a resistência passou de 30MPa para 50MPa, tendo o seu índice reduzido de $8,57\text{mm/semana}^{1/2}$ pra $6,11\text{mm/semana}^{1/2}$. As misturas de referência e as misturas com 25% de CCA natural, não puderam ser analisadas nos três níveis de resistência, devido a alguns de seus valores localizarem-se fora do intervalo considerado confiável. Contudo, a mistura de referência apresentou, ao nível de 30 MPa, $9,74\text{mm/semana}^{1/2}$, sendo o segundo menor índice de penetração neste nível, porém, devido a uma redução de apenas 12%, teve o maior índice dentre as misturas ao nível de 40MPa, com $8,57\text{mm/semana}^{1/2}$. A mistura com 25 % de CCA natural, foi analisada apenas ao nível de 30MPa, apresentando o pior desempenho, com um índice de penetração que foi de $13,35\text{mm/semana}^{1/2}$, o maior dentre todos.

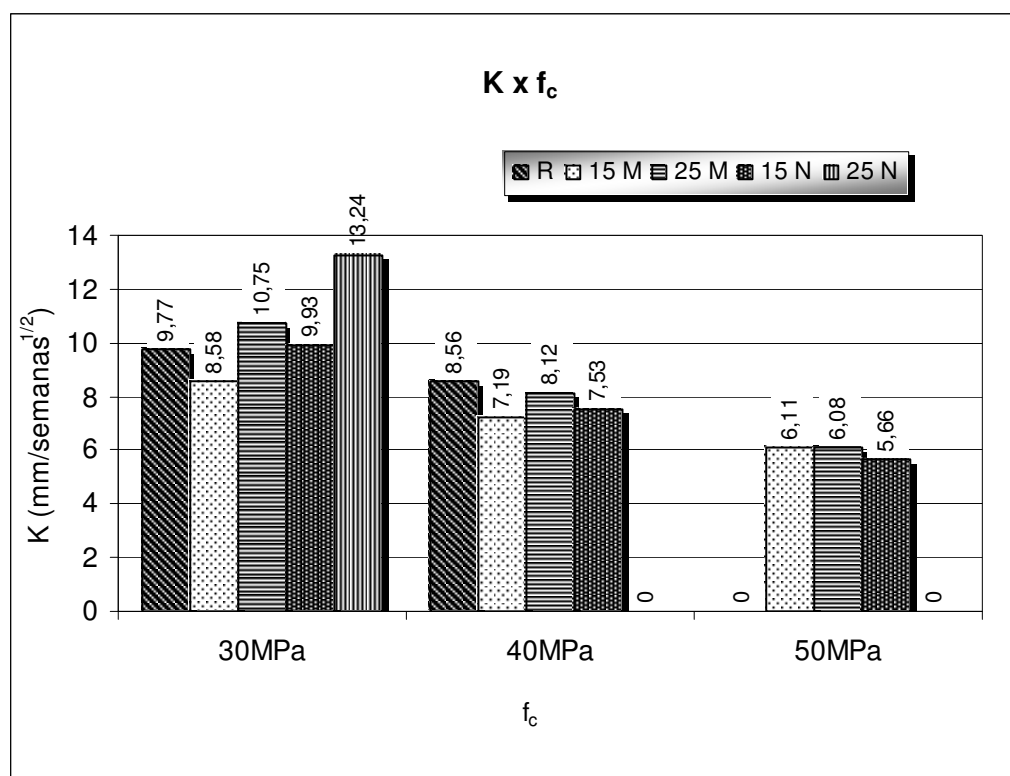


Figura 4.12 – Índice de penetração de cloretos versus nível de resistência à compressão aos 91 dias.

De um modo geral, notaram-se tendências diferentes nos desempenhos das misturas quando os índices de penetração de cloretos foram estudados a partir de um nível de resistência pré-estabelecido e quando foram estudados em igualdade de relação a/ag.

Como foi relatado anteriormente, alguns pesquisadores criticam o fato de que nível de resistência (f_{ck}) é um dos parâmetros mais utilizados pelos engenheiros para se especificar concretos. Acredita-se que o nível de resistência não deva ser usado como o único parâmetro para o dimensionamento de concretos duráveis, pois há uma distorção dos valores, principalmente nos concretos com adições minerais.

4.4 Absorção de água

Os resultados de absorção de água, segundo NBR 9778 são apresentados na figura 4.13.

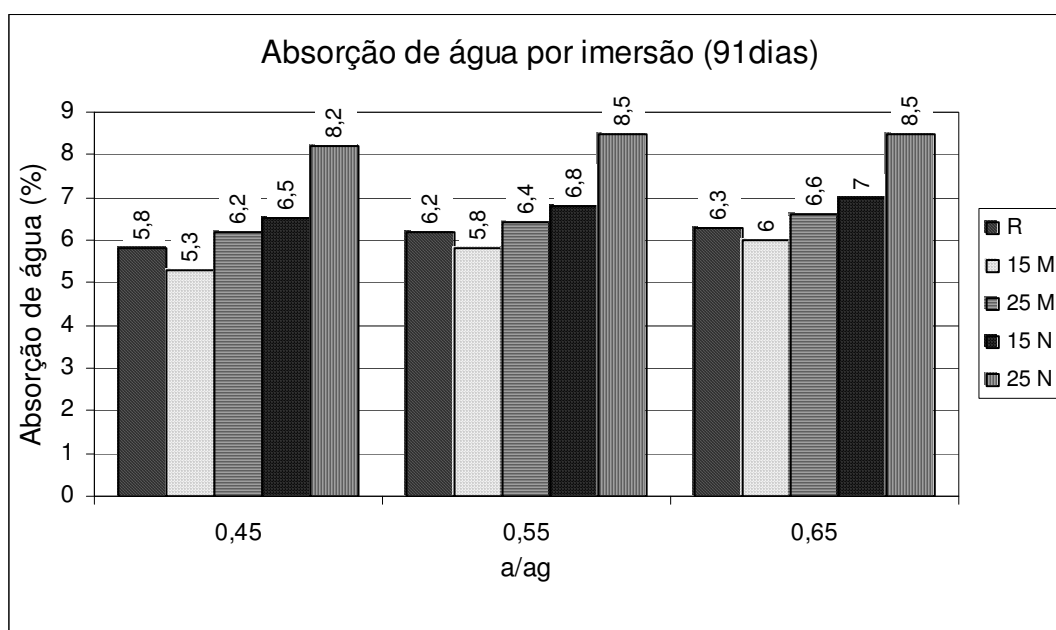


Figura 4.13 - Resultados de absorção de água por imersão para as misturas investigadas.

Da análise desta, constata-se que, em geral, a absorção de água das misturas sofreu pouca influência da relação a/ag, ou seja, para uma mesma mistura, não houve grande variação da absorção com a mudança na relação a/ag. Alsayed & Amjad (1996), estudaram concretos com diferentes tipos de agregados e diferentes relações a/ag (0,4, 0,45, 0,5, 0,55 e 0,6) e também encontraram tal comportamento. Ferreira (2004) também estudou concretos com CCA e diferentes relações a/ag (0,4, 0,55 e 0,7). Embora, na pesquisa do autor, a absorção tenha aumentado com o

aumento da relação a/ag, a variação foi pequena, o que também foi encontrado no presente trabalho. Neste, a maior variação na absorção ocorreu na mistura 15M quando a relação a/ag aumentou de 0,45 para 0,65. Sob tais condições a absorção aumentou de 5,3% para 6,0%, em massa, o que equivale a um acréscimo percentual na absorção de 13%. Da mesma maneira, as misturas R, 15N, 25M e 25N, apresentaram acréscimos percentuais de 8,6%, 7,7%, 6,5%, e 3,7%, respectivamente.

De modo semelhante, as alterações na absorção de água por imersão decorrentes da utilização da CCA, em geral, também foram pequenas, com exceção da mistura 25N na qual a alteração foi bem mais acentuada. Na figura 4.14 é apresentado o desempenho das misturas compostas com CCA em comparação as respectivas misturas de referência.

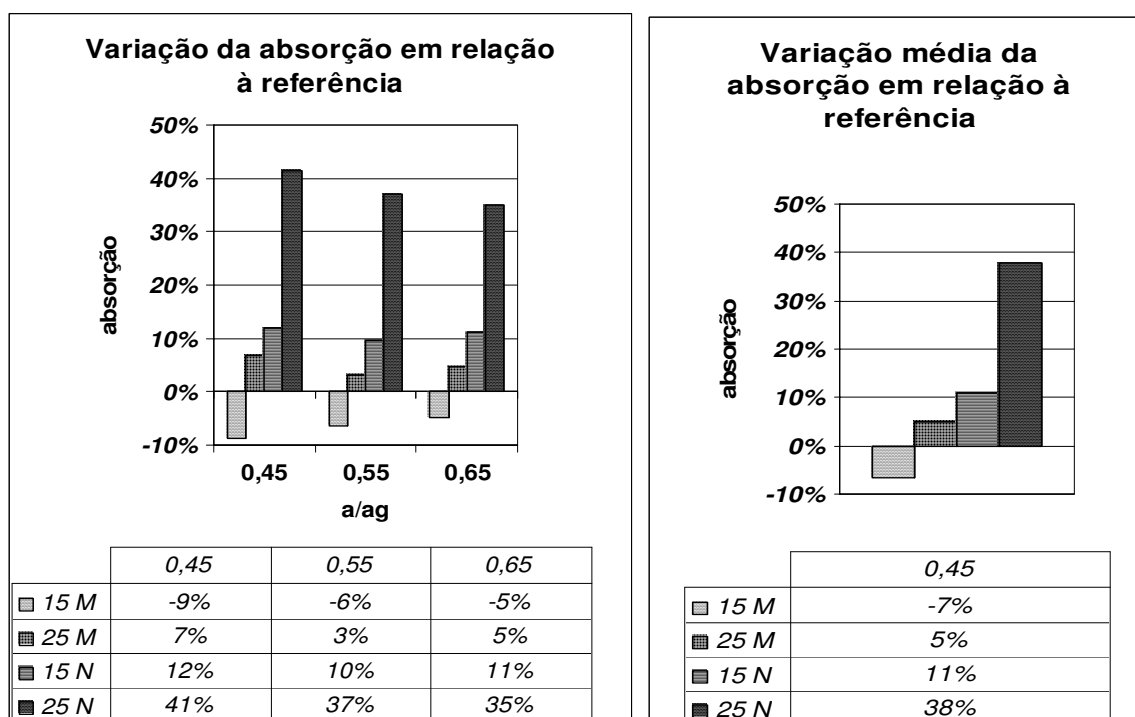


Figura 4.14 – Desempenho das misturas compostas com CCA em comparação a de referência.

Verifica-se que a mistura 15M apresentou desempenho ligeiramente superior ao da mistura de referência em todas as relações a/ag, apresentando uma redução na absorção de água em média de 7%, em relação à mistura de referência. Entretanto, todas as outras misturas apresentaram desempenhos ligeiramente inferiores às respectivas misturas de referência, em todas as relações a/ag estudadas. As misturas 25M e 15N apresentaram absorções em média de 5% e de

11% maiores do que a de referência, respectivamente. A mistura 25 N foi a que apresentou maior absorção de água dentre todas que foram investigadas, absorvendo em média 38% mais água que a mistura de referência.

Encontrou-se na bibliografia consultada certa controvérsia com relação ao efeito da CCA frente à absorção de água através do ensaio de imersão. Alguns pesquisadores encontraram, em concretos com a utilização da CCA, desempenhos superiores aos de referência, enquanto que outros encontraram desempenhos inferiores. Nascimento (2002), investigando concretos compostos com de 5% e 10% de CCA moída, curados em câmara úmida por 91 dias, observou, aos 91 dias, valores de absorção ligeiramente superiores que os valores dos concretos de referência. Contudo, Ferreira (2004), investigando concretos compostos com 10 % de CCA, curados por 28 dias em câmara úmida, observou aos 91 dias valores de absorção ligeiramente inferiores aos de referência.

Essa variabilidade dos resultados pode ser decorrente do método de ensaio. Neville (1997) faz uma crítica à determinação da absorção de água através da imersão, afirmando que este método pode ocasionar variações nos resultados.

Embora a maioria das misturas com a utilização da CCA tenha apresentado desempenho inferior às de referência, em geral, os decréscimos foram relativamente pequenos, girando em torno de 10%. Contudo, para as misturas 25 N, houve um decréscimo de desempenho mais acentuado, sendo a absorção em torno de 40% mais elevada que nos concretos de referência. Mas, apesar destes resultados, os valores de absorção de água encontrados na maioria dos concretos estudados neste trabalho, figuram dentro da faixa na qual Neville (1997) considera aceitável para o ensaio de imersão. Segundo o autor: “a maioria dos bons concretos tem absorção de água bem abaixo de 10%, em massa”.

4.4.1 Absorção de água em igualdade de resistência a compressão axial

Na tabela 4.13 são apresentadas às equações que correlacionam a absorção com a relação a/a_g e na figura 4.15 são apresentados os resultados de absorção de água por imersão obtidos para as misturas a partir destas equações, em igualdade

de resistência à compressão axial. Embora tenha havido variações nos valores de absorção de água, por influência da utilização da CCA e por influência da mudança do nível de resistência à compressão, estas variações foram de pequena magnitude, como ocorreu em igualdade de relação a/ag. No caso das misturas 25N não foi possível analisar sua absorção perante os três níveis de resistência adotados, entretanto, para o nível de 30MPa constata-se que a absorção apresentou um acréscimo bem maior do que as outras misturas investigadas, sendo 8,3%, em massa. Para este mesmo nível de resistência, as outras misturas apresentaram valores de absorção variando entre 6,2% e 7%. Entre um nível de resistência e outro, as misturas também apresentaram pequenas variações de absorção. Dentre todas que puderam ser analisadas nos três níveis de resistência, a mistura que apresentou maior variação foi a 15M, cuja absorção diminuiu de 6,2% para 5,4% quando a resistência aumentou de 30MPa para 50MPa.

De modo análogo ao que ocorreu para o ensaio acelerado de penetração de cloretos, no caso da absorção de água, as misturas apresentaram tendências similares tanto em igualdade de relação a/ag quanto em igualdade de resistência à compressão, entretanto, também neste caso, o desempenho das misturas com CCA em relação às de referência, na maioria dos casos, ficou aquém do apresentado em igualdade de relação a/ag.

Tabela 4.13 – Equações de correlação entre a absorção de água por imersão e as relações a/ag, aos 91 dias.

Mistura	R ²	Absorção = ax ^b
R	0,873	Absorção = 7,0257(a/ag) ^{0,2295}
15 M	0,89	Absorção = 7,0505(a/ag) ^{0,3564}
25 M	0,999	Absorção = 7,0545(a/ag) ^{0,1707}
15 N	0,972	Absorção = 7,8024(a/ag) ^{0,2381}
25 N	0,909	Absorção = 8,8814(a/ag) ^{0,0923}

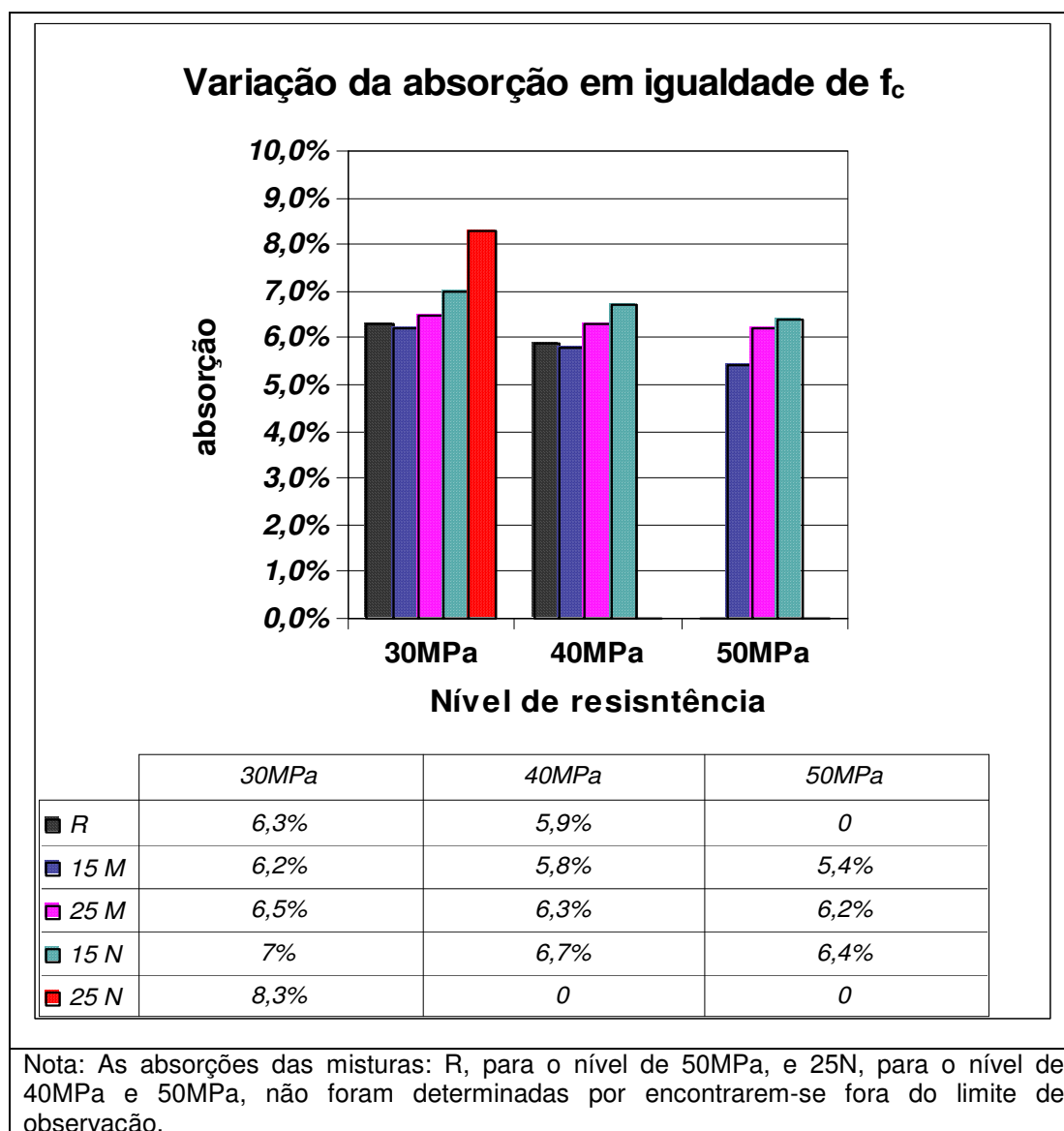


Figura – 4.15. Absorção de água para os níveis de resistência de 30MPa 40MPa e 50MPa.

4.5 Condutividade elétrica específica da solução dos poros

Na figura 4.16 são apresentados os valores de condutividade elétrica da solução dos poros, calculados a partir das equações apresentadas por SHI *et al* (1998), de todas as misturas investigadas. As misturas compostas com CCA apresentaram menores condutividades elétricas específicas, estando esta constatação em consonância ao encontrado por outros pesquisadores que estudaram concretos com o uso de adições minerais. (SHI *et al.*, 1998; DAL RI, 2002; HOPPE, 2005).

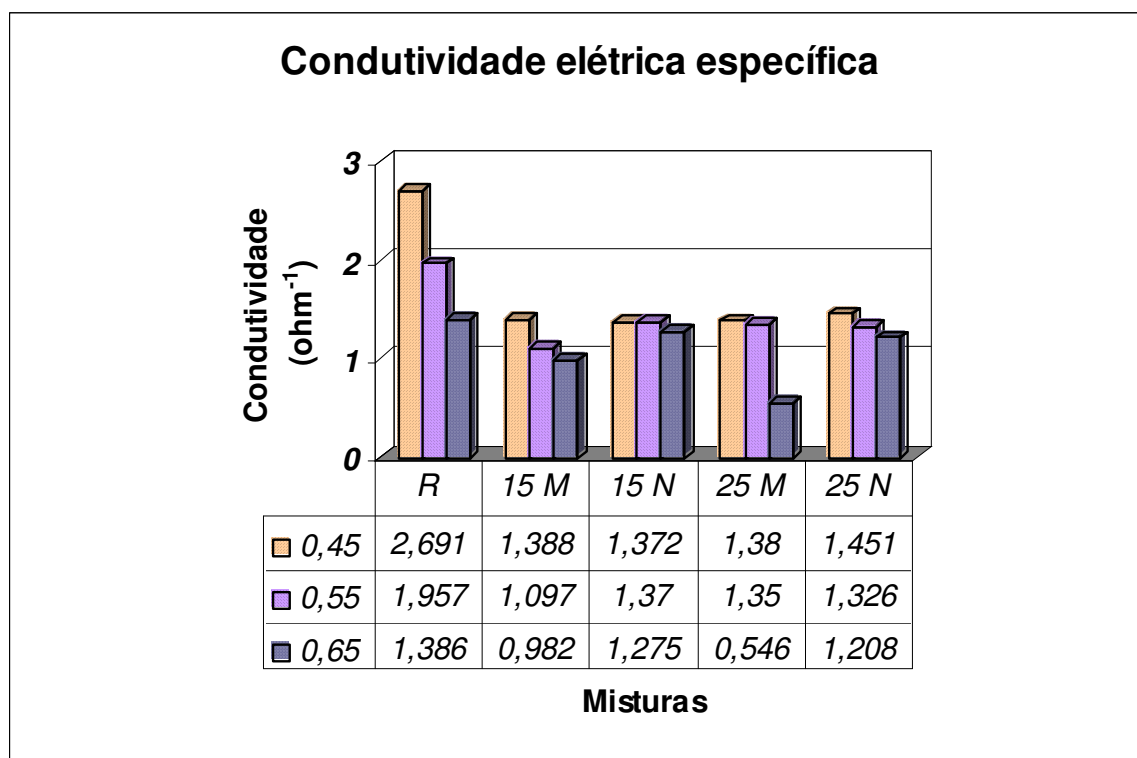


Figura 4.16- Condutividade elétrica específica das misturas investigadas.

Atribui-se este fato, principalmente, a uma redução no teor de hidróxidos alcalinos provocada pela utilização da CCA. Durante a hidratação do cimento portland apreciáveis concentrações de Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- e SO_4^{2-} introduzem-se em solução, entretanto, após a hidratação inicial, os íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} reduzem até níveis negligenciáveis (SHI et al., 1998). Dos íons restantes, a hidroxila, por possuir condutividade elétrica específica muito superior, influência em maior proporção na condutividade elétrica da solução dos poros e, também, na corrente elétrica que passa durante o EAPC (ANDRADE, 1993). Assim, a utilização de pozolanas como a CCA, pode reduzir consideravelmente a concentração de hidróxidos da solução dos poros, sem reduzir em grandes proporções o pH, proporcionando redução na condutividade elétrica específica desta solução.

Constata-se, ainda, que o teor de adição, a utilização da CCA, ao natural ou moída, e a relação a/ag, também influenciaram na condutividade elétrica específica. Apesar da ocorrência de alguns resultados considerados anômalos, que não foram revisados em virtude do custo envolvido no processo, um teor mais elevado de CCA, em geral, significou uma diminuição na condutividade elétrica específica da solução dos poros, como pode ser observado na mistura de relação a/ag igual a 0,65. Neste

caso as condutividades foram totalmente coerentes com a tendência encontrada por outros pesquisadores, sendo os valores, em ordem decrescente: $1,39\text{ohm}^{-1}$, $1,28\text{ohm}^{-1}$, $1,21\text{ohm}^{-1}$, $0,98\text{ohm}^{-1}$, $0,55\text{ohm}^{-1}$, para as misturas R, 15N, 25N, 15 M, 25M, respectivamente.

No caso da utilização da CCA moída em relação a CCA ao natural. As misturas com CCA moída, em geral, apresentaram menor condutividade elétrica na solução dos poros do que as misturas com mesmo teor de CCA, ao natural. Isso ocorre, possivelmente, devido ao fato de que a CCA moída possui finura mais elevada o que pode representar um maior refinamento dos poros.

No caso da influência que as diferentes relações a/ag exerceram na condutividade, observa-se que à medida que a relação a/ag aumentou, houve, também, uma diminuição na condutividade elétrica específica. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que uma maior relação a/ag, diminui a concentração de íons devido ao efeito solvente, causando, entretanto, uma diminuição da condutividade elétrica da solução dos poros.

4.6 Correlações entre os resultados.

Para complementar o estudo do presente trabalho, os dados coletados nos diferentes ensaios foram analisados de forma integrada. Assim, procedeu-se o cruzamento dos resultados de penetração cloretos com a porosidade, com a condutividade elétrica específica da solução dos poros, como a resistência à compressão e com a absorção de água por imersão, através de uma correlação. Também foi realizada uma análise de regressão com o intuito de elucidar matematicamente esse cruzamento, quando se julgou conveniente. A correlação entre as variáveis torna-se importante devido ao auxílio que pode exercer na compreensão do modo como as variáveis interatuam.

4.6.1 Correlação dos resultados de penetração de cloretos com a porosidade (volume total de intrusão)

4.6.1.1 Penetração de cloretos acelerada.

Nas figuras 4.17 e 4.18, são apresentados os confrontos das cargas passantes e dos volumes totais de intrusão obtidos nos ensaios de penetração de cloretos ASTM C 1202 e de porosímetria por intrusão de mercúrio, respectivamente. As duas figuras ilustram as análises de regressão que foram realizadas no estudo. Na figura 4.17 está representado o diagrama de dispersão dos dados, enquanto que, na figura 4.18 foram determinadas às curvas de correlação para cada família de concreto. Ao se analisar a figura 4.17 verifica-se que ocorreu grande dispersão dos resultados, ou seja, os dados não apresentaram boa correlação quando se faz uma análise sem levar em consideração os diferentes tipos de concreto. Esse comportamento já era esperado visto que o tipo e o teor de adição exercem grande influência na penetração de cloretos, como relatado anteriormente. Isto fica evidente quando se analisam as misturas individualmente.

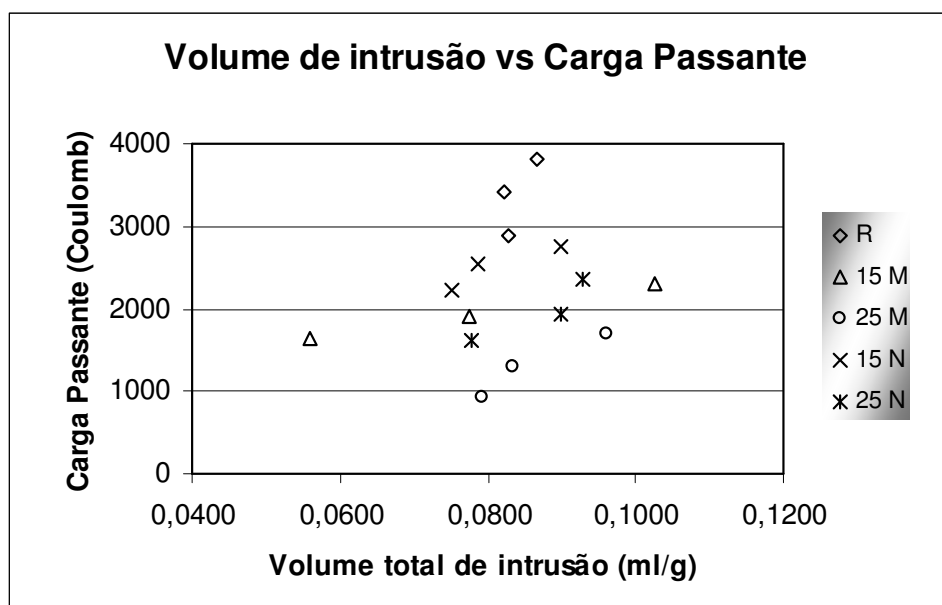


Figura 4.17 – Diagrama de dispersão entre as cargas passantes e os volumes totais de intrusão de todas as misturas investigadas.

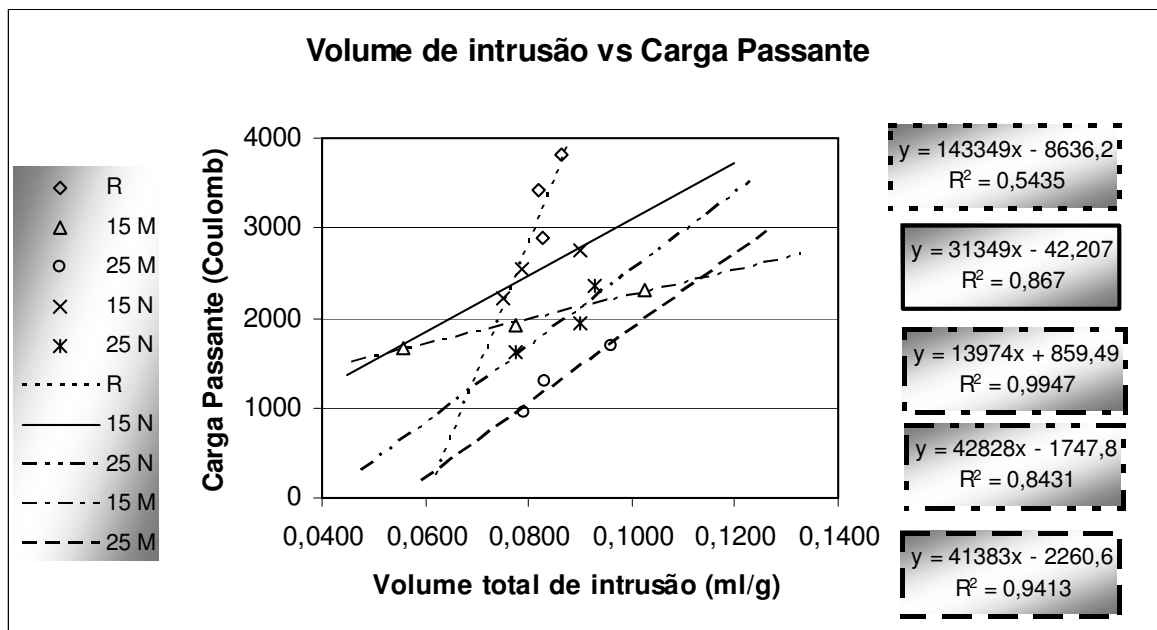


Figura 4.18 – Correlação entre a carga passante e o volume total de intrusão para cada mistura aglomerante.

Na figura 4.18, observa-se que há forte correlação linear entre o volume de intrusão e a carga passante quando se eliminam as variáveis: teor e tipo de adição. Exceto no caso das misturas R e 25 N nas quais os coeficientes de determinação foram relativamente mais baixos. Os valores encontrados para estas duas misturas foram iguais a 0,54 e 0,76, respectivamente. Já nas demais misturas 15M, 25M e 15N os coeficientes de determinação encontrados demonstram forte correlação linear, sendo iguais a 0,99, 0,94 e 0,87, respectivamente.

4.6.1.2 Penetração de cloretos por imersão

De maneira análoga ao que foi procedido para os resultados do ensaio ASTM C 1202, foi realizada, também para o caso da penetração de cloretos por imersão, um confronto dos índices de penetração de cloretos determinados, com os volumes totais de intrusão. Com exceção da mistura 25N, observa-se, neste caso, comportamento distinto ao anterior. Nota-se uma certa tendência (correlação) dos dados quando analisados em conjunto, como pode ser visto na figura 4.19.

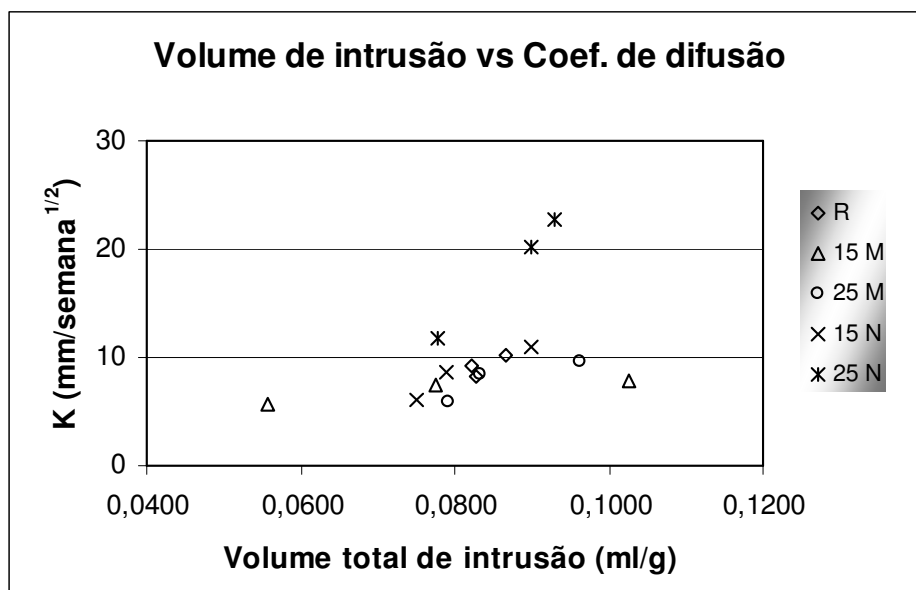


Figura 4.19 – Diagrama de dispersão entre os índices de penetração e os volumes totais de intrusão de todas as misturas investigadas.

Entretanto, essa tendência não ficou muito clara. Acredita-se que possa haver alguns resultados de porosidade anômalos, em virtude da sensibilidade e da dificuldade do ensaio.

Para o caso da análise por mistura (figura 4.20), foram encontradas boas correlações lineares, exceto para a mistura de referência que apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,54 e para a mistura 25M na qual o coeficiente de determinação foi igual a 0,79. Nas demais misturas (15M, 15N e 25N), os coeficientes de determinação iguais a 0,85, 0,91, e 0,99, respectivamente.

Yang (2006), ao estudar a correlação entre o volume de intrusão e a difusão de cloretos em estado estacionário e não-estacionário, também encontrou forte correlação entre os coeficientes de difusão e os volumes totais de intrusão, para concretos de uma mesma mistura aglomerante.

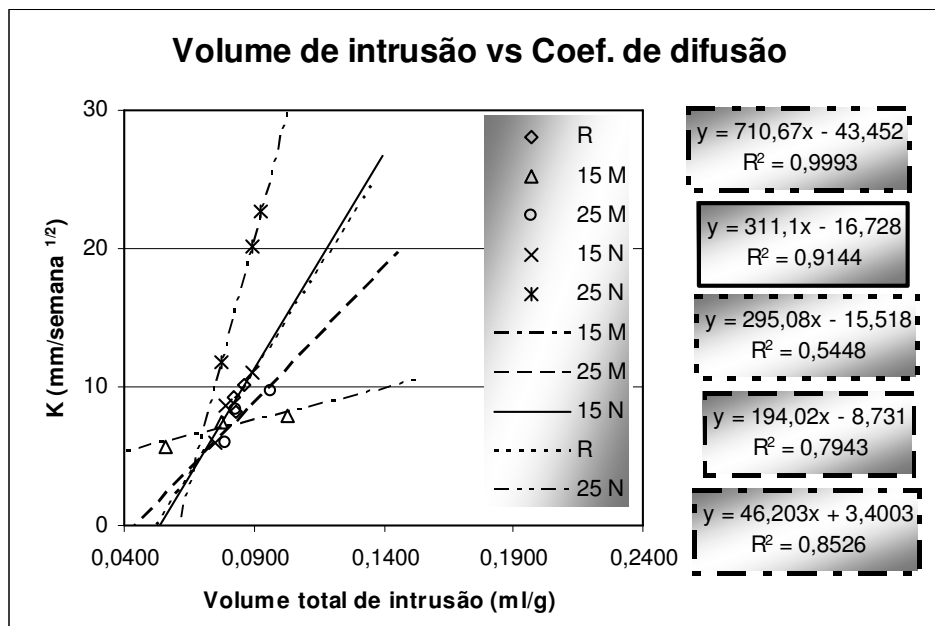


Figura 4.20 – Correlação entre os coeficientes de difusão de cloretos e o volume total de intrusão para cada mistura aglomerante.

4.6.2 Correlação dos resultados de penetração de cloretos com a condutividade elétrica da solução dos poros.

Nas figuras 4.21 e 4.22 são apresentadas as correlações dos resultados da EAPC e do EPCI, com a condutividade elétrica específica da solução dos poros.

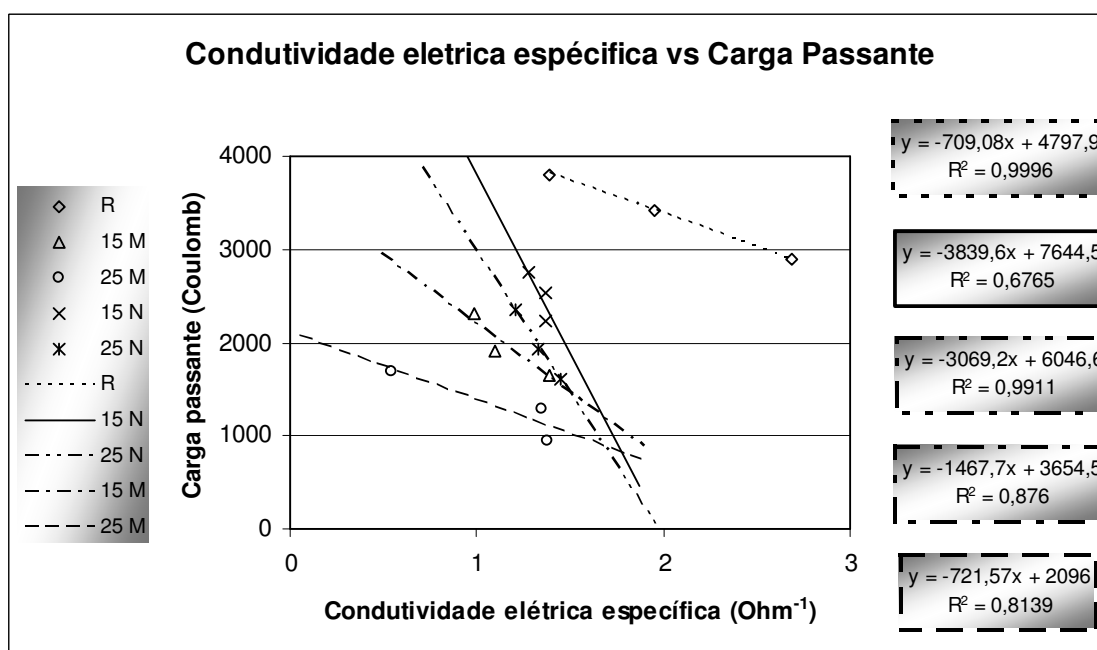


Figura 4.21 - Correlação entre a condutividade elétrica específica e a penetração de cloretos acelerada.

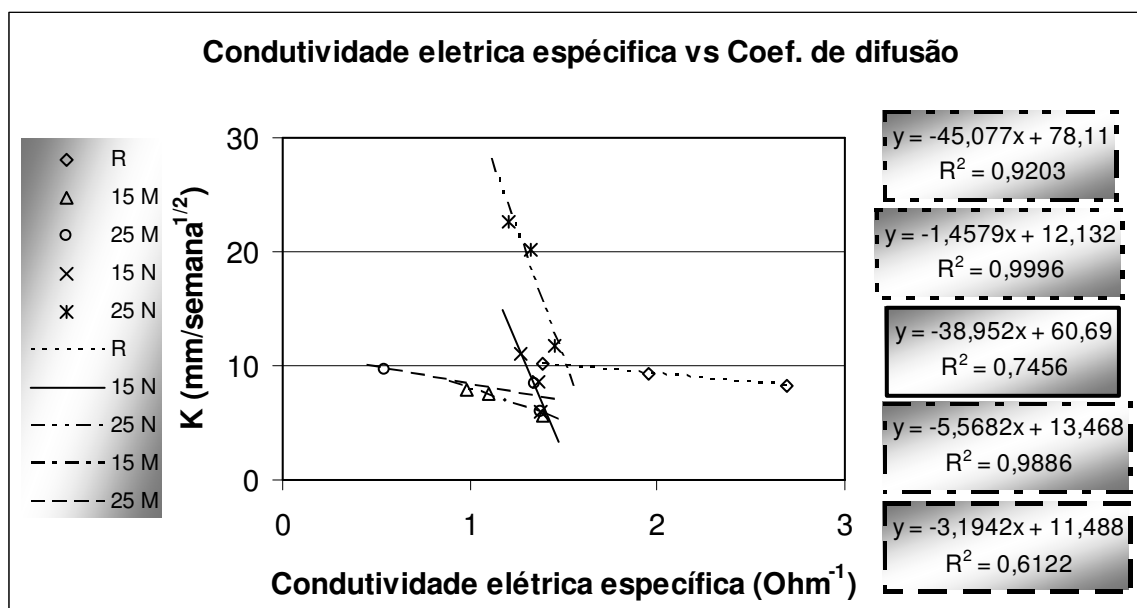


Figura 4.22 - Correlação entre a condutividade elétrica específica e a penetração de cloretos por imersão.

Observam-se boas correlações nos dois casos, quando as misturas são analisadas individualmente. Entretanto fica evidente que as cargas passantes das misturas sofrem maior influência da condutividade elétrica específica do que os coeficientes de penetração. Em geral, é verificada uma maior inclinação nas retas da figura 4.21 do que nas retas da figura 4.22, ou seja, uma alteração da condutividade elétrica proporciona uma alteração mais acentuada nas cargas passantes do que nos índices de penetração de cloretos.

Embora a condutividade elétrica específica da solução dos poros exerça influência na carga passante, há, também, uma ação conjunta de outros fatores sobre esta. Na figura 4.21 percebe-se um comportamento aparentemente contraditório. Houve diminuição na carga passante com o aumento da condutividade elétrica específica da solução dos poros. Entretanto há que se considerar, que a diminuição da relação a/ag provoca o aumento da condutividade elétrica específica devido a uma maior concentração de íons, embora provoque também uma maior densificação da estrutura de poros o que dificulta a passagem de íons.

4.6.3 Correlação dos resultados de penetração de cloretos com a resistência à compressão axial.

Nas figuras 4.23 e 4.24 são apresentadas as correlações dos dados de penetração de cloretos com os dados de resistência à compressão axial, das misturas investigadas. Notam-se comportamentos bem distintos nos dois métodos estudados.

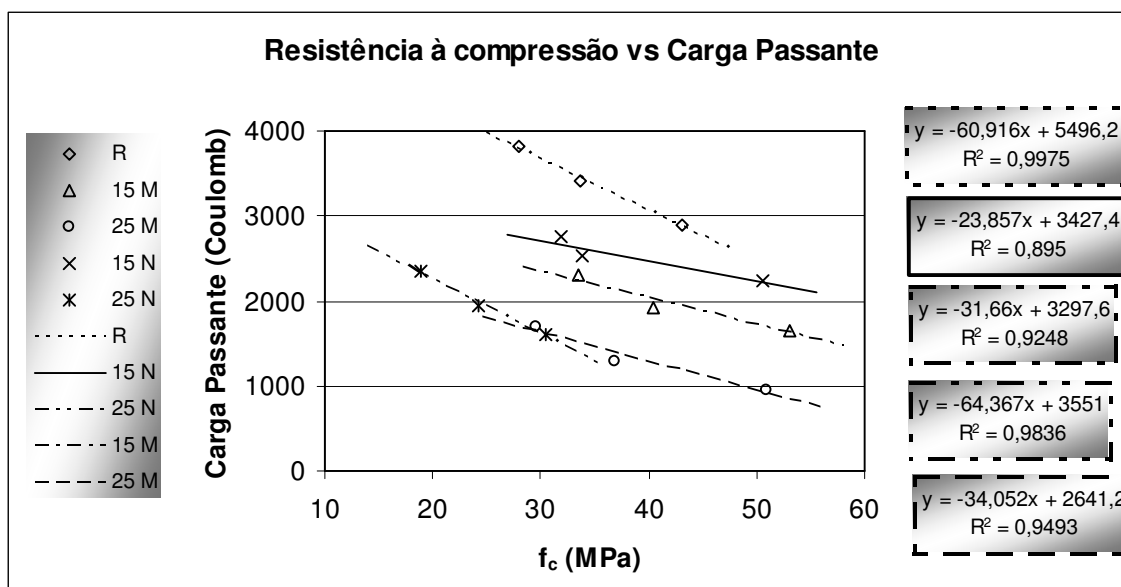


Figura 4.23 - Correlação entre a resistência à compressão e a penetração acelerada de cloretos.

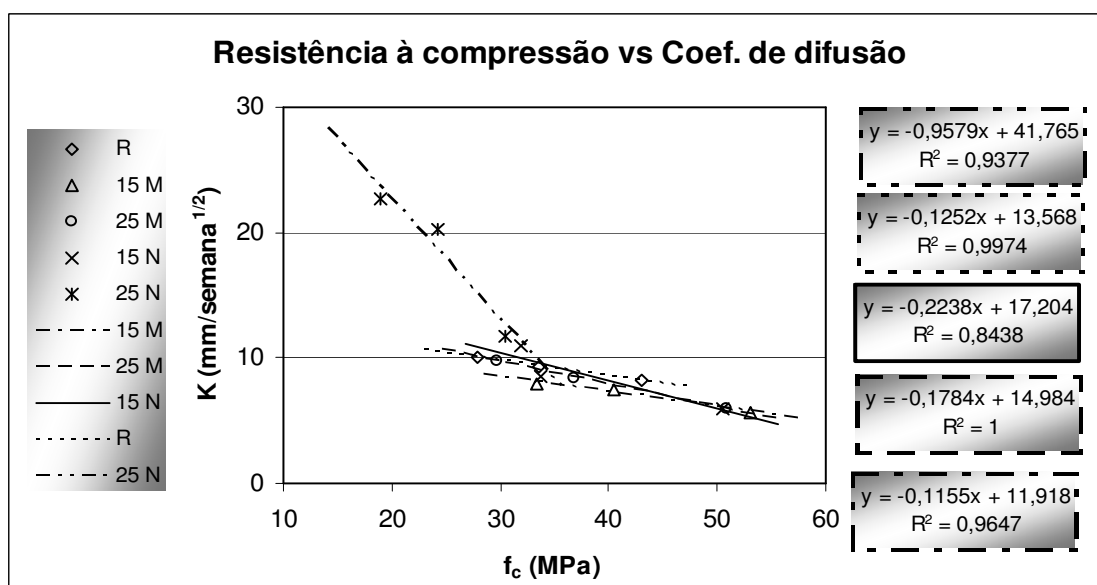


Figura 4.24 - Correlação entre a resistência à compressão e a penetração de cloretos por imersão.

Embora a resistência à compressão exerça influência sobre a penetração de cloretos em ambos os casos, no caso do EAPC (fig. 4.23) houve grande dispersão do conjunto de dados, o que se atribui a forte influência que a CCA exerce sobre as cargas passantes. Contudo, quando as famílias são analisadas separadamente há boa correlação entre os dados, sendo que as cargas passantes apresentam queda com o aumento da resistência o que já era esperado.

No EPCI, houve um comportamento inusitado. Independente do tipo e do teor de adição, os dados apresentaram boa correlação com a resistência à compressão axial (figuras 4.24 e 4.25), apresentando um coeficiente de correlação igual a 0,88 (figura 4.25).

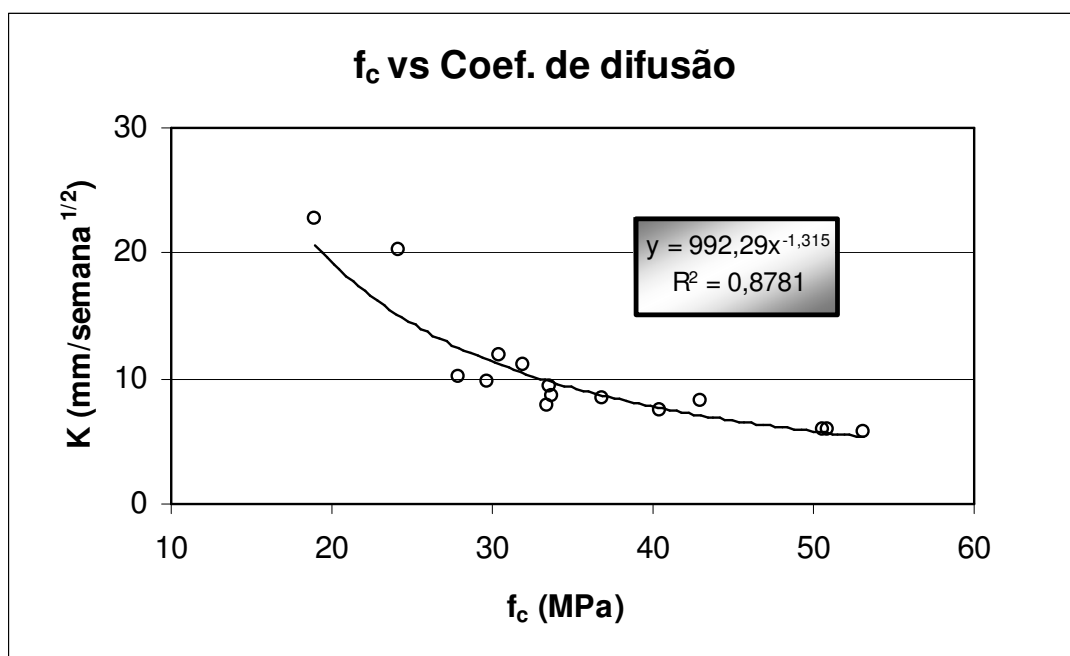


Figura 4.25 – Análise de regressão entre a resistência à compressão e a penetração de cloretos por imersão.

No trabalho de Saciloto (2005) houve a mesma tendência nos concretos com CCA e com o mesmo período de cura. Porém para concretos que continham outros tipos de pozolanas esse comportamento não ficou evidenciado na investigação do pesquisador. Já num estudo conduzido por Stark (2001), no qual o autor analisou o desempenho de concretos imersos em ambientes marinhos, foi constatado que os concretos com adição de pozolanas (cinza volante e escória) apresentaram o mesmo desempenho dos concretos de referência, quanto à deterioração por

cloretos. Outro fato que também chamou atenção dos pesquisadores, foi o de que os concretos que apresentaram resistências inferiores a um determinado valor (aproximadamente 30MPa) tiveram redução mais acentuada de desempenho que os concretos que apresentaram resistência acima deste valor, ou seja, a penetração de cloretos sofreu forte influência da resistência à compressão nos concretos abaixo de 30 MPa, enquanto que nos concretos acima deste valor a influência foi menos acentuada. Este comportamento também pode ser observado na figura 4.24 e 4.25.

4.6.4 Correlação dos resultados de penetração de cloretos com a absorção de água por imersão.

Nas figuras 4.26, 4.27 e 4.28 são apresentadas às correlações entre a penetração de cloretos e a absorção de água por imersão.

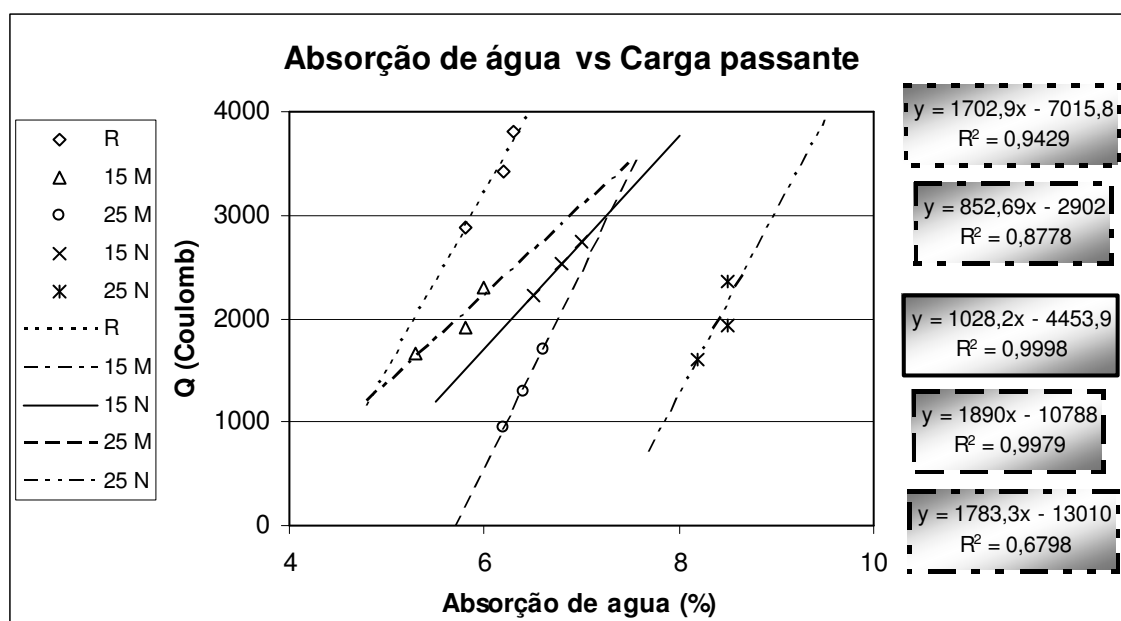


Figura 4.26 - Correlação entre a resistência à compressão e a penetração acelerada de cloretos.

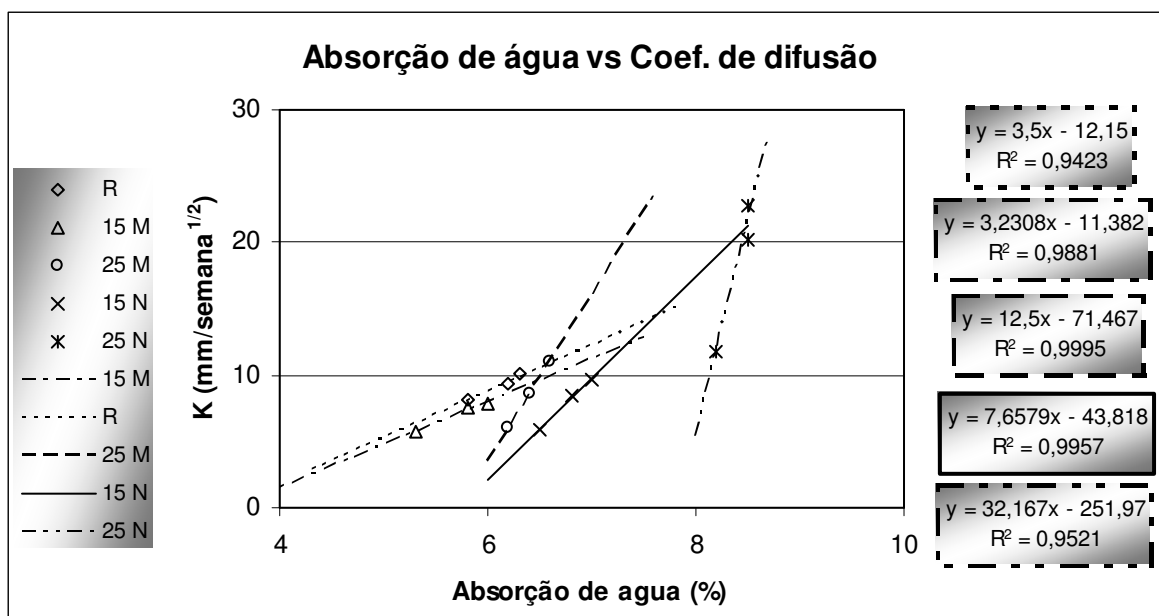


Figura 4.27 - Correlação entre a absorção de água e a penetração de cloretos por imersão.

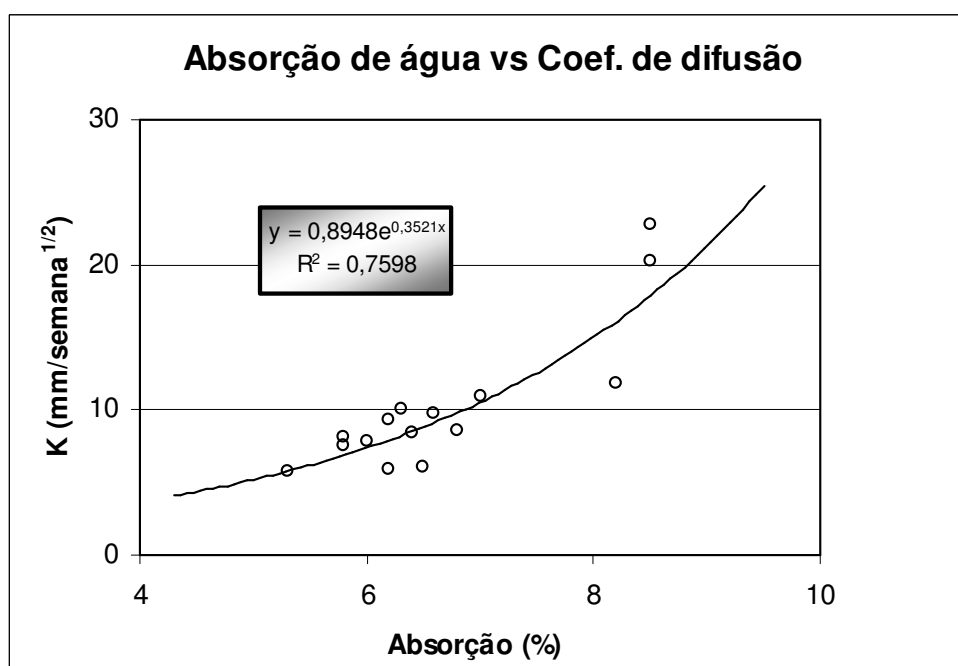


Figura 4.28 – Análise de regressão entre a absorção de água e a penetração de cloretos por imersão.

Confirmando o que já era esperado, verifica-se forte correlação entre a absorção de água e a penetração de cloretos haja vista que nos dois métodos de ensaio de penetração de cloretos, os íons cloretos estão dissolvidos em água.

Observa-se da figura 4.26, que correlaciona a absorção de água com as cargas passantes, que houve dispersão dos resultados em conjunto, mas quando as famílias são analisadas individualmente há forte correlação. As retas também apresentaram acentuada inclinação o que significa que uma pequena variação na absorção proporcionou elevada variação na carga passante.

Para o caso da correlação entre absorção de água e penetração de cloretos por imersão (fig. 4.27) verifica-se, como no caso anterior, forte correlação entre os parâmetros, sendo que, as retas, também apresentaram forte inclinação. Entretanto observa-se que as inclinações das retas aumentam gradativamente com a absorção, ou seja, tornam-se mais acentuadas à medida que a absorção aumenta, alcançando uma inclinação extremamente elevada para valores de absorção maiores que 8%, aproximadamente. Outra observação que se pode extrair da correlação entre a absorção e a penetração de cloretos por imersão, já havia sido notada anteriormente. Parece que os coeficientes de difusão de cloretos tendem a se agrupar de forma menos dispersa neste caso do que no caso do ensaio acelerado de penetração de cloretos. Na figura 4.28 foi realizada uma análise de regressão na qual o coeficiente de determinação foi relativamente elevado, igual a 0,76.

5 Conclusões

Baseado nas interpretações obtidas a partir da análise dos resultados é possível tirar as seguintes conclusões no que diz respeito aos objetivos que foram propostos na introdução deste estudo:

5.1 Com relação às alterações ocorridas nas propriedades estudadas

5.1.1 Resistência à compressão axial

A utilização de CCA queimada sem controle de temperatura, nos teores de 15% e 25%, nos concretos com a CCA moída, e no teor de 15%, nos concretos com a CCA ao natural, proveu, em média, resistências muito próximas ou até superiores aquelas dos concretos com 100% cimento Portland em todas as idades. Mas, embora algumas misturas tenham evidenciado resistências superiores mesmo aos 7 dias, geralmente, as misturas com CCA apresentam maiores ganhos a partir dos 28 dias, sendo que, aos 91 dias, as misturas 15M, 25M e 15N apresentaram resistências, em média 20,7%, 11,3% e 10,7%, respectivamente, superiores as resistências encontradas para os concretos de referência, nas relações a/ag investigadas. Já as misturas compostas com teores de substituição de 25% de CCA ao natural apresentaram desempenho inferior ao das misturas de referência quanto à resistência à compressão axial. Houve decréscimo nesta grandeza, em relação aos concretos de referência em todas as idades e relações a/ag estudadas, apresentando um decréscimo, em média, de 29,7%, aos 91 dias.

Outro aspecto relevante foi o de que as misturas com teores de substituição de 15% apresentaram valores de resistências superiores aos da mistura com 25% de substituição. Para o caso das misturas com CCA moída os valores foram em média 8% maiores nas misturas com 15% de substituição, aos 91 dias. Para as misturas com CCA ao natural a diferença foi mais acentuada, sendo que as

resistências foram em média 36% maiores para as misturas com 15% de substituição em comparação às misturas com 25%.

Numa comparação direta entre a CCA natural versus a CCA moída, constata-se que os concretos com a CCA moída apresentaram desempenho superior aos concretos com CCA ao natural. Para o teor de 15% de substituição, a mistura moída apresentou resistência à compressão em média 8,6% superior a da mistura ao natural, aos 91 dias. Para o teor de 25%, a resistência à compressão das misturas com CCA moída foi em média 36,8% mais elevada, aos 91 dias, em comparação às misturas ao natural.

5.1.2 Penetração de cloretos

Foi constatado a partir da investigação da penetração de cloretos através do ensaio acelerado e do ensaio de imersão (longa duração) que a utilização de CCA queimada sem controle de temperatura melhora o desempenho dos concretos frente à penetração de cloretos.

Para o caso do EAPC, as misturas com 25% de substituição apresentaram as maiores reduções nas cargas passantes em relação às misturas de referência, aos 91 dias. Para a mistura com CCA moída a redução foi em média de 61% e para as misturas com CCA ao natural em média de 53%. As misturas compostas com 15% de CCA também apresentaram reduções nas cargas passantes em relação às misturas de referência, porém, menos acentuadas. A mistura 15 M apresentou redução na carga passante em média de 42% enquanto que a mistura 15N apresentou redução em média de 26%, aos 91 dias.

Devido a essas reduções nas cargas passantes das misturas, em geral, houve melhoria nas classificações das misturas quanto à penetrabilidade aos ions cloretos, segundo ASTM C 1202. As misturas 25M, 15M e 15N passaram da classificação moderada (misturas de referência) para a classificação baixa. A exceção foi por conta da mistura 25M45, que passou para a classificação muito baixa, e, também, por conta da mistura 25N65, que continuou na classificação moderada, igual à apresentada pela mistura de referência. As misturas 15N, apesar das reduções nas cargas passantes, apresentaram as mesmas classificações

quanto à penetrabilidade aos íons cloretos das misturas de referência, com classificação moderada para todas as relações a/ag.

Para o caso do EPCI o comportamento em relação à penetração de cloretos foi distinto ao apresentado no ensaio acelerado, entretanto, em geral, a utilização da CCA, queimada sem controle de temperatura, também promoveu melhorias no desempenho das misturas, em comparação às misturas de referência, com reduções nos coeficientes de penetração de cloretos. Ao realizar-se uma média aritmética dos resultados obtidos no EPCI (índices de penetração de cloretos) para as três relações a/ag estudadas obtêm-se os seguintes desempenhos, em relação aos concretos de referência: as misturas 15M, 15N e 25M apresentaram reduções no coeficiente de penetração de cloretos em média de 27%, 15% e 8%, respectivamente. Já a mistura 25N apresentou acréscimo no coeficiente de penetração, em relação à mistura de referência, sendo em média 74% mais elevado.

5.1.3 Absorção de água por imersão

Em geral, constatou-se que a utilização de CCA nas misturas representou pequenas variações na absorção de água em relação à mistura de referência. A mistura 15M apresentou redução na absorção de água, em relação à mistura de referência, com uma variação de 7% na absorção, aos 91 dias. Todas as outras misturas estudadas apresentaram absorções mais elevadas que a absorção da mistura de referência. As misturas 25M e 15N apresentaram acréscimos na absorção de água, com variações que foram em média de 5% e de 11%, se comparadas às misturas de referência, aos 91 dias, respectivamente. Nota-se que para as misturas 15M, 15N e 25M a variação ficou na faixa aproximada dos 10% para mais ou para menos. Entretanto a mistura 25N apresentou um acréscimo mais elevado na absorção de água, apresentando uma variação em média de 38% em relação à mistura de referência.

5.2 Com relação a interatuação da penetração de cloretos com as outras propriedades estudadas.

De um modo geral, ao correlacionarem-se os dados dos ensaios de penetração de cloretos com os dados dos ensaios de porosidade (volume total de intrusão), composição iônica da solução dos poros, absorção de água por imersão e resistência à compressão axial constatou-se que no ensaio acelerado de penetração de cloretos a influência exercida pela utilização da CCA, bem como, a exercida pelos diferentes teores de substituição é bem mais acentuada do que no ensaio de imersão em solução salina. Essa constatação é sugerida pelo fato de que no EAPC, quando as misturas aglomerantes investigadas são analisadas conjuntamente há grande dispersão dos dados, enquanto que quando estas são analisadas individualmente, eliminando-se as variáveis: tipo e teor de adição, em geral, apresentam boa correlação entre os resultados. Já no EPCI, o comportamento é diferente. Há uma certa tendência dos dados se agruparem, apresentando uma melhor correlação, mesmo quando os concretos são analisados em conjunto, embora, quando se analisam as famílias individualmente, haja maior correlação.

Há ainda, outras constatações que podem ser tiradas ao se analisar as correlações entre as grandezas. Verifica-se que a penetração acelerada de cloretos (migração iônica) e a penetração de cloretos por imersão (difusão iônica), por serem ensaios cujos mecanismos de transporte são diferentes, apresentam, em alguns casos, relações diferentes com as outras grandezas estudadas. A análise que foi realizada é qualitativa e, portanto, a taxa que varia uma grandeza em função da outra não é precisada. Entretanto, pela observação da inclinação da reta que correlaciona as grandezas, em relação ao eixo das abscissas, foi possível ter noção de como a penetração de cloretos varia em função das outras grandezas.

No caso da correlação com a porosidade, se pode observar, que as inclinações das retas são relativamente acentuadas, em relação ao eixo das abscissas, tanto para o ensaio EAPC quanto para o EPCI. Assim, os resultados dos dois ensaios são consideravelmente influenciados pela porosidade, ou seja, nos dois ensaios, a penetração de cloretos aumentou, a uma taxa marcante, com o aumento da porosidade. Da mesma forma, nas correlações da penetração de cloretos com a resistência à compressão axial e com a absorção de água, houve considerável

inclinação das retas de correlação em relação às abscissas, demonstrando relevante interdependência, nos dois ensaios de cloretos realizados. Na correlação da penetração de cloretos com a resistência à compressão axial, à medida que a resistência à compressão aumenta, a penetração de cloretos diminui a uma taxa considerável. No caso da correlação da penetração de cloretos com a absorção de água, à medida que a absorção aumenta, a penetração de cloretos também aumenta. Há que destacar a grande inclinação das retas, o que representa que uma pequena variação da absorção pode induzir a uma grande variação na penetração de cloretos.

No caso da correlação entre a penetração de cloretos e a condutividade elétrica da solução dos poros, verifica-se pelas inclinações das retas, em geral, que no EAPC as misturas sofreram maior influência da condutividade elétrica específica da solução dos poros do que no EPCI. Entretanto, como discutido anteriormente, isso se trata de um contra-senso que possivelmente foi causado pela dissolução dos íons que ocorreu com o aumento da relação a/ag . Mesmo assim, ao analisarem-se os resultados para uma mesma relação a/ag , constata-se que a utilização da CCA resultou numa diminuição da condutividade elétrica da solução dos poros e conseqüente redução da carga passante.

É evidente que nestas considerações não se está tomando em conta a ação mútua dos mecanismos que influenciam na penetração de cloretos. Portanto, pode ser que a alteração de apenas uma das grandezas envolvidas, não represente, efetivamente, uma grande alteração na penetração de cloretos, pois os parâmetros atuam de forma integrada.

5.3 Com relação às alterações nas propriedades estudadas em igualdade de resistência à compressão axial.

Em geral, ao comparar-se os comportamentos das misturas quanto às propriedades estudadas, para os níveis de 30MPa, 40MPa e 50MPa, constatam-se desempenhos diferentes ao apresentado pelas mesmas em igualdade de relação a/ag . Uma explicação deste fato provém das distintas relações a/ag encontradas para as diferentes misturas em um mesmo nível de resistência à compressão. Como

comentado anteriormente, por ação física e pozolânica, a maioria das misturas aglomerantes compostas com CCA, ao natural ou moída, apresentaram maior eficiência cimentícia e, por isso, maiores relações a/ag, para uma mesma resistência. Assim, as misturas compostas com CCA, geralmente, apresentaram quedas de desempenho quando as variáveis de durabilidade foram analisadas em igualdade de resistência à compressão e comparadas aos concretos de referência. Esse comportamento encontrado confirma o que muitos autores vêm relatando há bastante tempo: a resistência à compressão, embora seja utilizada com muita frequência para especificar concretos, não deve ser utilizada como o único parâmetro de dimensionamento das estruturas de concreto quando o objetivo for fabricar concretos com durabilidade, sobretudo, em ambientes agressivos, principalmente para os concretos com adições minerais.

No caso da penetração de cloretos, para o EAPC, embora as cargas passantes tenham apresentado, em igualdade de resistência à compressão, tendência semelhante à verificada em igualdade de relação a/ag, ou seja, as cargas passantes também diminuiriam com o aumento do teor de adição, houve quedas no desempenho das misturas o que, em alguns casos, resultou numa classificação quanto à penetrabilidade a cloretos idêntica as das misturas de referência, o que não havia ocorrido em igualdade de relação a/ag. As misturas compostas com 15% de CCA, moída ou natural, apresentaram classificações, quanto à penetrabilidade aos íons cloretos, idênticas à mistura de referência nos níveis de 40MPa e 50MPa. Assim pode-se dizer que em igualdade de resistência à compressão houve uma subestimação do ocorrido quando as misturas foram investigadas em igualdade de relação a/ag. Para o EPCI, também ocorreram modificações nos desempenhos das misturas quando se estimou os coeficientes de difusão em igualdade de resistência a compressão para o nível de 30MPa. As misturas de referência, ao contrario do que ocorreu em igualdade de relação a/ag, apresentaram índices de penetração de cloretos menores que as misturas 15N e 25M. Neste caso específico, se pode concluir que houve uma superestimação das misturas de referência e uma subestimação das misturas com utilização CCA. Para os níveis de 40MPa e 50MPa isto não se verifica.

No caso da absorção de água por imersão, de modo análogo ao que ocorreu para o ensaio acelerado de penetração de cloretos, as misturas apresentaram tendências similares frente à absorção tanto em igualdade de relação a/ag quanto

em igualdade de resistência à compressão. Entretanto, também neste caso, o desempenho das misturas com CCA, em relação às de referência, na maioria dos casos, ficou aquém do apresentado em igualdade de relação a/ag.

5.4 Considerações finais

Após a análise dos resultados da pesquisa experimental, fica claro que a utilização de CCA residual, ao natural ou moída, proporciona maior durabilidade aos concretos frente aos íons cloretos. Para o caso da CCA moída, os dois teores de substituição estudados, 15% e 25%, proveram melhorias aos concretos frente à resistência mecânica e à penetração de cloretos. Já para o caso da CCA ao natural, somente o teor de 15% apresentou melhorias, neste sentido. A mistura com teor de 25% teve desempenho bem abaixo do apresentado pelas outras misturas aglomerantes. Assim para o caso da utilização da CCA ao natural, somente o teor de 15% é recomendado.

Em suma, ficou evidenciado, frente às propriedades estudadas, que é viável tecnicamente a utilização da CCA residual, moída (nos teores de 15% e 25%) e ao natural (no teor de 15%). A constatação desta viabilidade representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de um resíduo que até agora vem sendo descartado de forma prejudicial ao meio ambiente. Além disso, a descoberta de que mesmo a CCA ao natural, que não sofreu nenhum tipo de beneficiamento, pode ser utilizada em baixos teores, representa um avanço significativo para o setor produtivo, possibilitando que se agregue mais valor aos concretos produzidos na medida em que há um menor consumo de energia.

Sugestões para pesquisas futuras

Em trabalhos futuros se podem realizar, em elementos estruturais de concretos com as mesmas proporções e materiais aos que foram estudados neste trabalho, porém, pré-moldados ou moldados “in loco” (protótipos), os mesmos ensaios que foram feitos no presente trabalho, visando-se comparar os resultados com os que foram apresentados em laboratório. Assim, a eficácia da CCA residual poderia ser verificada, também, em serviço, sob a ação das intempéries e dos agentes que podem deteriorar o material.

Além disso, pode, ainda, ser estudado, em laboratório, o comportamento de misturas com teores de adição diferentes aos estudados no presente trabalho, menores que 25%, buscando a otimização dos bons resultados que aqui foram encontrados.

Por fim, pode-se, no sentido de melhorar o comportamento dos concretos com a utilização de CCA residual nas primeiras idades, analisar o comportamento dos concretos, frente à utilização de ativadores químicos.

Referências bibliográficas

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para construção civil nos países em desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. Tese (Livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991. 99 p.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1ª Ed. PINI. São Paulo, 2000. 667p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Protection of Metals in Concrete Against Corrosion**. ACI 222R. Detroit, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. Specification for Chemical Admixtures for Concrete: ASTM C 494/C 494M – 05a, Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration: ASTM C 1202, Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. Standard Test Method for Surface Area of Catalysts and Catalyst Carriers: ASTM D 3663-03, Philadelphia, 2003.

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

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

ANDRADE, C. **Ultimos avances en el calculo de la vida util del hormigon estructural**. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 2000. Memórias...[CD-ROM]. Punta del Este 2000.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. (Dissertação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, T. **Tópicos sobre Durabilidade do Concreto** In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, cap. 25, p. 752-792.

ARYA, C.; BUENFELD, N. R. and NEWMAN, J.B. **Factor influencing chloride-binding in concrete**. *Cement and Concrete Research*. V.20, n.º 2, 1990. p. 291-300.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 5743**: Cimento Portland: determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5744**: Análise química de cimento Portland: determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 5745**: Análise química de cimento Portland: determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 5747**: Análise química de cimento Portland: determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 6474**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7217**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7223**: Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone – ensaio de abatimento. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7224**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da área específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7227**: Análise química de cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre por etileno glicol. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 7251**: Agregados em estado solto: determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 9203**: Cimento Portland comum e clínquer: análise química por complexometria. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 9776**: Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9937**: Agregados: determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 11575** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro. 1991

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira 75µm (n° 200). Rio de Janeiro, 1991.

BOUZOUBAË N. & FOURNIER B., **Concrete Incorporating Rice-Husk Ash: Compressive Strength and Chloride-Ion Penetrability**. Materials Technology Laboratory, Ottawa, Canada. 2001. In: <http://www.ecosmartconcrete.com/> acesso em : 27/082007.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Structural use of concrete. Code of practice for design and construction**. BS 8110-1. London,1997.

CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5ª ed. LTC Editora. Rio de Janeiro, 2002. 589 p.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; JONH, V. M. **Optimization of rice husk ash production**. In: International RILEM Symposium on vegetables plants and their fibers as Building Materials, 2nd Salvador, 1990. Proceedings. London: Chapman & Hall, 1990, p.334-342.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado**. EH-88. Madrid, 1988.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **New Approach to Durability design: An Example for Carbonation Induced Corrosion**. Bulletin D'informacion nº 238. Lausanne, 1997. 142p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION. **Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity**. EN 206-1. Brussels, 2000.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB) In: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/estudo_safra.pdf Acessado em: 17/12/2007.

COSTA, C. N. et al **O fenômeno do lascamento (spalling) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica**. In: Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC, 44.º, 2002, Belo Horizonte - MG. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002 (CD Rom).

COUTINHO, M. J. S. **Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento de Cofragem**. 1998. Tese (Doutorado). Faculdade de Economia da Universidade do Porto. Cidade do Porto, 1998.

COUTINHO, J. S. **Cinza de casca de arroz portuguesa – Ensaios de laboratório**. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. Anais. Vitória, 2003. IBRACON, São Paulo, 2003.

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

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto.** 2002. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2002.

DALFRÉ FILHO, J. G. & GENOVEZ, A. I. B. **Métodos para avaliação do desgaste em amostras de concreto submetidas à abrasão e à cavitação.** Ingeniería Del Agua · vol. 11 · Nº 4. Córdoba. Diciembre, 2004.

DELLA, V. P. **Processamento e caracterização de sílica ativa obtida a partir de cinza de casca de arroz.** 2001. 70 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

DELAGRAVE, A.; PIGEON, M.; MARCHAND, J. et al. **Influence of chloride ions and pH level on the durability of high performance cement pastes (part II).** Cement and Concrete Research. V.26 No. 5 p. 749-760. 1996.

DOTTO, J. M. R. **Corrosão do aço induzida por íons cloreto – Uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana.** 2006. 331f. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

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. p. 360-369.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE. **Condensed silica fume in concrete.** London: Thomas Telford, 1988.

FERREIRA, A. A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** 1999. 154 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

FERREIRA, R. M. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

FIGUEIREDO, E. P. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto,** Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 27, p.829 – 855, V. 2, ed.Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) In: <http://faostat.fao.org/site/336/DesktopDefault.aspx?PageID=336>. acessado em: 4/12/2007

GALE, J.; FREUND, P. . **Papers presented at GHGT-5 on work carried out by IEA GHG** (Cairns, Australia, 13 - 16 August 2000). Available on the Internet <http://www.ieagreen.org.uk/GHGT5-3.pdf>

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1996. 345p.

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

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

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

HUMPHREYS, K. & MAHASANAN, M. **Climate Change**. (Toward a Sustainable Cement Industry, Substudy 8). Battelle - World Business Council for Sustainable Development, March, 2002

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) In: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/shtm>. acessado em: 17/12/2007.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura**. 1995. 280f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C. **Sustentabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? uma questão de durabilidade** In: Congresso Brasileiro do Concreto– REIBRAC, 44.º, 2002, Belo Horizonte - MG. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002 (CD Rom)

JOHN, V. M. **On the sustainability of concrete**. Industry and Environment, Paris, v. 26, n. 2-3, p. 62-63, 2003.

JENSEN, O. M.; COATS, A. M. and GLASSER, F. P. **Chloride ingress profiles measured by electron probe micro analysis**. Cement and Concrete Research, v.26, n.º 11, 1996. p. 1695-1705.

KUNTZ, L. M. **The “Greening” of the Concrete Industry: Factors contributing to Sustainable Concrete**. 2006. 41f. Thesis (Master of Engineering). Massachusetts Technology Institute. Cambridge, 2006.

MEHTA, P. K. & PITT, N. A. **A new process of rice husk utilization**. In: International Conference on the Utilization of Rice by-products. Valencia, 1974. Proceedings...Valencia IATA 1977. p.p. 45-58.

MEHTA, P. K. **Sulfate attack on concrete: a critical review**, **Materials Science of concrete**. III, Ed. J. Skalny, American Ceramic Society, pp 105-30, 1993.

METHA, P. K. **Rice Husk Ash - a unique supplementary cementing material**. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) *Advances in concrete technology*, Ottawa, Energy Mines and Resources, 1992. p. 407- 432.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Tradução de Paulo Helene *et al.* 1ª ed. São Paulo, PINI, 1994. 580p.

METHA, P. K. **Point of view durability – critical issues for the future**. Concrete International. American Concrete Institute. Detroit. v.19, n.7, p. 27-33, 1997.

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

NASCIMENTO, W. N.; *et al.* **Adição de cinza de casca de arroz CCA no concreto, sob o aspecto da durabilidade**. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002.

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

NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismos de transporte de fluidos no concreto**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, p.793 – 827, V. 2, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Trad. de Salvador Giamusso. 2. ed. São Paulo: PINI 1997.

OBLA, K.; LOBO, C.; LEMAY, L. **Specifying Concrete for Durability**. NRMCA'S Concrete In Focus. Florida, December 2005.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; SERNA, P.; VELÁZQUEZ, S.; ORDÓÑEZ, L.M. **El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas**. In: VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos. Anais. Gandía, 2002. p. 591-600.

PFEIFER, D.; MCDONALD D.; AND KRAUSS, P. **The rapid Chloride Test and Its Correlation to the 90-Day Chloride Ponding Test**. PCI Journal. pp.38-47, 1994.

PINHEIRO, S. M. M. **Impacto da colonização do fungo cladosporium sphaerospermum na argamassa do concreto**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. 191f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do sul. Porto Alegre, 2006.

PRUDÊNCIO Jr, L. R; Santos, S.; DAFICO, D. A. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Coletânea HABITARE - vol 4, ROCHA, J. C. & JOHN, V. M. (ed.). Porto Alegre, 2003. 272p.

REGO, J. H. S. ; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos**. In: 44^º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. Anais. São Paulo: IBRACON, 2002.

SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** 2005. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** 1997. 113f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** 2006. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

SARASWATHY, V. & SONG, H-W. **Corrosion performance of rice husk ash blended concrete.** Construction and Building Materials. 2006.

SARJA, A. & VERSIKARI, E. **Durability design of concrete structures.** Report of RILEM Technical Committee 130 – CLS, RILEM Report !4. London ; E & FN SPON., 1994.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura.** 2005. 137f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz.** In: 44^o CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. Anais. São Paulo, 2002. IBRACON. São Paulo, 2002.

SHI, C.; STEGEMANN, J.A.; CALDWELL, R.J. **Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and this implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results.** ACI Materials Journal, v. 95, n. 4, p. 389-394, Farmington Hills, 1998.

SHI, C. **ANOTHER LOOK AT THE RAPID CHLORIDE PERMEABILITY TEST (ASTM C1202 or ASSHTO T277).** Disponível em: [http://knowledge.fhwa.dot.gov/cops/HPCX.nsf/All+Documents/57F9C6118110DFB085256D4E005DF356/\\$FILE/RAPCL202RHime.pdf](http://knowledge.fhwa.dot.gov/cops/HPCX.nsf/All+Documents/57F9C6118110DFB085256D4E005DF356/$FILE/RAPCL202RHime.pdf). Acesso em: 17/12/2007.

SILVA, C. R. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz.** 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2004.

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

SINDICATO DA INDUSTRIA DE MINERAÇÃO DE PEDRA BRITADA DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Reação álcali-agregado – entenda do que se trata.** 2005. Disponível em: www.sindipedras.org.br/noticias.php?id_not=30. Acessado em: 9/10/2007.

TANG, L. **Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions. Part 1- Theoretical considerations** . Cement and Concrete Research, V.29, p. 1463-1468, 1999.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 469p.

VAGHETTI, M. A. O.; SARKIS, P. J.; SARKIS, J. M. **Ação dos cloretos incorporados: um estudo de caso.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 44., 2002. Brasília-DF. Anais... Brasília: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. 1 CD-ROM.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concretos de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** 2001. 98 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

WEE, T.H.; SURYAVANSHI, A.K.; TIN, S.S. **Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) results for concrete containing Mineral Admixtures.** ACI Materials Journal, American Concrete Institute, v. 97, p. 221-232, Farmington Hills, 2000.

WHITING, D. **Origins of Chloride Limits for Reinforced Concrete.** Concrete Technology Today, Vol. 18, No. 3, Portland Cement Association, Skokie, December 1997. 3 p.

Anexos

Anexo A – Resultados de ensaios

Tabela A.1 – Penetração de cloretos por imersão (profundidades médias)

Mistura	a/ag	Profundidade de penetração (mm)					
		0 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias
R	0,45	0	7,160993	14,57048	16,71452	24,21891	29,35567
	0,55	0	10,72108	15,35047	18,68076	28,15872	33,55175
	0,65	0	18,57954	19,02123	24,06904	30,54998	39,5153
15 M	0,45	0	4,691461	12,46178	15,33369	15,37248	20,88345
	0,55	0	5,896183	16,6278	18,41027	22,01188	26,66124
	0,65	0	15,85323	19,36292	23,12151	25,89383	31,02713
25M	0,45	0	9,205234	13,27776	16,14572	19,00613	22,91464
	0,55	0	12,66136	15,04641	21,579	23,21296	33,70247
	0,65	0	17,42591	20,19148	26,86258	31,63556	42,65496
15N	0,45	0	9,963591	13,27861	15,19107	18,7965	22,42332
	0,55	0	15,33664	18,53692	20,19107	27,38208	32,2398
	0,65	0	16,79311	21,65836	25,19107	31,57389	37,01761
25N	0,45	0	12,55947	17,42708	22,60187	28,12548	46,14845
	0,55	0	19,77339	27,20844	40,93285	> 50	> 50
	0,65	0	23,90512	29,99104	46,2855	> 50	> 50

Tabela A.2 – Porosimetria por intrusão de mercúrio

Mistura	a/ag	Volume total intrudido (ml/g)
R	0,45	0,0827
	0,55	0,0821
	0,65	0,0865
15 M	0,45	0,0558
	0,55	0,0775
	0,65	0,1026
25M	0,45	0,0792
	0,55	0,0833
	0,65	0,0962
15N	0,45	0,0750
	0,55	0,0788
	0,65	0,0898
25N	0,45	0,0929
	0,55	0,0898
	0,65	0,0929