

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

**MICROESTRUTURA E DURABILIDADE A CLORETOS
DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA DE
CASCA DE ARROZ COM E SEM MOAGEM PRÉVIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Bóris Casanova Sokolovicz

SANTA MARIA, RS, BRASIL

2013

**MICROESTRUTURA E DURABILIDADE A CLORETOS DE
PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE
ARROZ COM E SEM MOAGEM PRÉVIA**

Bóris Casanova Sokolovicz

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

Orientador: Prof. Geraldo Cechella Isaia

Santa Maria, RS, Brasil

2013

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

SOKOLOVICZ, Bóris Casanova
MICROESTRUTURA E DURABILIDADE A CLORETOS DE PROTÓTIPOS
DE CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ COM E SEM MOAGEM
PRÉVIA / Bóris Casanova SOKOLOVICZ.-2013.
164 p.; 30cm

Orientador: Geraldo Cechella ISAIA
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2013

1. Introdução. 2. Durabilidade a Cloretos de Concreto
com CCA. 3. Metodologia Experimental. 4. Análise dos
Resultados. 5. Conclusões. I. ISAIA, Geraldo Cechella
II. Título.

**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**

**MICROESTRUTURA E DURABILIDADE A CLORETOS DE
PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ
COM E SEM MOAGEM PRÉVIA**

elaborada por
Bóris Casanova Sokolovicz

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Eng. Geraldo Cechella Isaia, Dr. – UFSM
(Presidente/Orientador)

Prof. Arq. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr. – UFSM

Prof. Eng. André Tavares da Cunha Guimarães, Dr. – FURG

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2013.

Dedico este trabalho a minha irmã Valéria pelo apoio incondicional. Aos meus pais, Demétrio e Odete, meu sobrinho Dimíttri, meu cunhado Roberto, e meus sogros Livino e Maria de Fátima. A minha noiva Virgínia pelo amor e companheirismo. Vocês são pessoas muito especiais e é um grande prazer tê-los em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de ser uma pessoa cada vez melhor.

Agradeço ao Professor Dr. Eng. Geraldo Cechella Isaia, pela orientação neste trabalho, pela oportunidade concedida, pelo apoio nos momentos difíceis desta trajetória, pelo empenho dedicado e pelo conhecimento compartilhado. Foi uma honra trabalhar com o senhor, um homem com um grande caráter, que além de mestre é um grande amigo. Meu muito obrigado.

Ao Professor Dr. Arq. Antônio Luiz Guerra Gastaldini pelo conhecimento teórico, pela disponibilização dos equipamentos, pela amizade e pelo apoio nos momentos difíceis. Foi uma honra ter trabalhado com o senhor, um grande caráter.

Ao Professor Dr. Eng. André Tavares da Cunha Guimarães por aceitar gentilmente fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

Aos meus colegas do curso de pós-graduação Luiz Adelar Martinelli Júnior, Luciano Dellinghausen e Fábio Vanzin pela amizade.

Aos ex-mestrandos Eder Pedrozo e Marcelo Duart pelas dicas dos ensaios realizados.

Aos bolsistas de iniciação científica Andriago Kemel Zanella, Antônia Santa Moro, Dilnei Dornelles Severo, Fabrício Bolson, Guilherme Trevisan dos Santos, Ivan Palma, Karina Kozoroski Veiga, Marcela Kreutz Engel pelo auxílio na execução dos ensaios e pela amizade.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), ao grande amigo “Seu João”, Vitor, Zé Pedro, Eliomar, Marília, e a todos que fazem parte do LMCC e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC).

Ao CNPq, CAPES E FAPERGS pelo auxílio financeiro na realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Tecnologia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realizar o curso.

A todos, muito obrigado.

O concreto de alto desempenho deve ser caracterizado devido ao comportamento integrado das variáveis das propriedades mecânicas, da durabilidade, da microestrutura e das características do meio na qual o concreto está inserido.

(Igor Silva e Jefferson Libório)

RESUMO

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

MICROESTRUTURA E DURABILIDADE A CLORETOS DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ COM E SEM MOAGEM PRÉVIA

AUTOR: BÓRIS CASANOVA SOKOLOVICZ

ORIENTADOR: PROF. DR. ENG. GERALDO CEHELLA ISAIA

Data e local da defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2013.

O cimento é o principal componente do concreto, que é o segundo material mais utilizado pelo homem. O processo de fabricação do cimento é o maior responsável pela emissão de dióxido de carbono na atmosfera. A indústria da construção civil vem estudando a possibilidade de utilizar subprodutos agroindustriais em substituição ao cimento, cujo objetivo é reduzir o impacto ambiental da produção do cimento e promover melhorias no desempenho do concreto. Neste contexto, a cinza de casca de arroz é uma das adições minerais mais estudadas, pois além de ser um resíduo industrial amplamente disponível, geralmente proporciona uma vida útil maior às estruturas de concreto armado. O presente trabalho investiga a microestrutura e durabilidade da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento prévio, na produção de concreto estrutural. Foram estudados protótipos de concreto com dimensões de 20 x 20 x 75 cm com substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz moída e natural nos teores de 0%, 15% e 25%, nas relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65. Estes protótipos foram expostos em condições ambientais naturais, até 540 dias. Procederam-se os ensaios de resistência à compressão axial, água quimicamente combinada (AC), porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), penetração acelerada de cloretos (EAPC) pelo método da ASTM C 1202 e cloretos totais retidos. Os resultados obtidos demonstraram que a resistência à compressão axial aos 540 dias atingiram os maiores valores para as misturas com CCA moída, enquanto que as misturas contendo CCA natural apresentaram as menores resistências, sendo inferior à mistura referência. No ensaio de AC as misturas com CCA moída apresentaram o melhor desempenho. Para o ensaio de PIM, as misturas que apresentaram as maiores quantidades de poros de gel e mesoporos foram as misturas com CCA moída, onde observou-se o refinamento dos poros dos 91 dias para os 540 dias, reduzindo assim a porosidade destas misturas. Em relação ao ensaio de EAPC, as misturas com CCA moída apresentaram as menores cargas passantes, com destaque para a mistura com 25% de substituição. As misturas com CCA natural apresentaram cargas passantes inferiores à mistura referência, mostrando um bom desempenho. Para o ensaio do teor total de cloretos retidos, as misturas com CCA moída apresentaram os menores níveis, confirmando o melhor desempenho que a moagem da CCA promove no concreto. As misturas com CCA natural apresentaram valores muito próximos à mistura referência. Os resultados obtidos mostram a viabilidade técnica da CCA natural nos teores de 15% de substituição parcial de cimento.

Palavras-chave: concreto, cinza de casca de arroz, microestrutura e durabilidade.

ABSTRACT

Dissertation
Graduate Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

MICROSTRUCTURE AND DURABILITY OF A CHLORIDE PROTOTYPES WITH CONCRETE GRAY RICE HUSK WITH AND WITHOUT PRIOR GRIND

AUTHOR: Boris CASANOVA SOKOLOVICZ
COORDINATOR: TEACHER DR. ENG. GERALDO CECHELLA ISAIA
Date and place of defense: Santa Maria, February 27, 2013.

Cement is the main component of concrete, which is the second most common material used by man. The cement manufacturing process is largely responsible for the emission of carbon dioxide in the atmosphere. The construction industry has been studying the possibility of using agroindustrial byproducts for cement mortars, which aims to reduce the environmental impact of cement production and promote improvements in the performance of concrete. In this context, the rice husk ash is one of the most studied mineral additions, as well as being an industrial waste widely available, generally provides a longer service life of reinforced concrete structures. This paper investigates the microstructure and durability of rice husk ash and residual natural, unprocessed prior production of structural concrete. We studied prototypes of concrete with dimensions of 20 x 20 x 75 cm with partial replacement of cement by rice husk ash and milled in natural levels of 0%, 15% and 25% in the relations / ag 0.45; 0 55 and 0.65. These prototypes were exposed to natural environmental conditions, up to 540 days. We conducted tests of compressive strength, water chemically combined (AC), mercury intrusion porosimetry (MIP), accelerated penetration of chlorides (EAPC) by the method of ASTM C 1202 and total chlorides retained. The results showed that the compressive strength at 540 days showed the highest values for mixtures with crushed CCA, while mixtures containing natural CCA showed the lowest resistance being lower than the reference blend. In assay mixtures containing CCA AC ground showed the best performance. For testing PIM, mixtures that showed the highest amounts of mesopores and pores of gel mixtures were milled with CCA, where there was the refinement of the pores of the 91 days to 540 days, thereby reducing the porosity of these mixtures. For the test of EAPC, mixtures ground with CCA showed the lowest cargo bystanders, especially the mixture with 25% substitution. The blends with natural CCA showed loads passers below the reference mixture, showing a good performance. For the assay of the total content of chloride retained, mixtures with CCA ground showed the lowest levels, confirming that the best performance of CCA promotes grinding on concrete. The blends with natural CCA showed values very close to the reference mixture. The results show the technical feasibility of CCA natural levels in 15% of partial replacement of cement.

Keywords: concrete, rice husk ash, microstructure and durability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	– Esquema efeito estufa.....	24
Figura 1.2	– Produção de arroz no Rio Grande do Sul.....	29
Figura 2.1	– Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras.....	34
Figura 2.2	– Estrutura localizada na linha da maré severamente deteriorada.....	36
Figura 2.3	– Modelo de vida útil em função da corrosão proposto por Tuutti (1982).....	37
Figura 2.4	– Tipos de corrosão e fatores que as provocam.....	37
Figura 2.5	– Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado.....	39
Figura 2.6	– Variação do teor crítico em função da UR e da qualidade do concreto.....	43
Figura 2.7	– Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual - Pelotas - RS.....	50
Figura 2.8	– Micrografias de cinza de casca de arroz – (a) produzida em forno comum; (b) produzida em leito fluidizado.....	51
Figura 2.9	– Difração de Raios-X da CCA.....	52
Figura 2.10	– Micrografia concreto com 25% de substituição de cimento por CCAN, 3000X, 91 dias.....	53
Figura 2.11	– Relação entre o tempo de moagem e a finura da casca de arroz, queimadas a várias temperaturas por duas horas.....	54
Figura 2.12	– Variação do índice de atividade pozolânica (IAP) com o tempo de moagem.....	55
Figura 2.13	– Níveis de resistência à compressão: (a) Resistências à compressão das amostras compostas com CCA passantes na peneira 200. (b) Resistências à compressão das amostras compostas com CCA passantes na peneira 325.....	57
Figura 2.14	– Resistência à compressão <i>versus</i> relação a/ag, aos a) 7 dias, b) 28 dias, c) 91 dias e d) 182 dias.....	58
Figura 2.15	– Dimensões gerais dos componentes microestruturais do concreto.....	59
Figura 2.16	– Refinamento da pasta de cimento hidratada contendo CCA.....	61
Figura 2.17	– Estrutura provável dos silicatos hidratados.....	64
Figura 2.18	– Carga total passante em função das relações a/ag, para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias.....	66
Figura 2.19	– Influência da utilização da CCA na carga passante, aos 91 dias.....	67
Figura 3.1	– Distribuição granulométrica a laser dos aglomerantes.....	73
Figura 3.2	– Pozolanidade de cimento pozolânico.....	75
Figura 3.3	– Distribuição Granulométrica dos agregados miúdos.....	77
Figura 3.4	– Distribuição Granulométrica dos agregados graúdos.....	78
Figura 3.5	– Protótipos de concreto expostos ao ambiente natural.....	83
Figura 3.6	– Esquema do sentido da extração dos corpos de prova 10 x 20 cm.....	84
Figura 3.7	– Extração dos protótipos de concreto.....	84
Figura 3.8	– Rompimento do corpo-de-prova.....	85

Figura 3.9 –	Corpos de prova cortados (10 x 20 cm) para o ensaio de penetração acelerada de cloretos segundo a ASTM C 1202:2005	86
Figura 3.10 –	Corpos de prova no processo de saturação do dessecador a vácuo.....	86
Figura 3.11 –	Esquema do corte, numeração das fatias e interface com as soluções de NaCl e NaOH.....	87
Figura 3.12 –	Ensaio acelerado de penetração de cloretos.....	87
Figura 3.13 –	Retirada do pó de concreto a profundidade de 1,50 cm para o ensaio de cloretos retidos.....	89
Figura 3.14 –	Retirada do pó de concreto para o ensaio de água quimicamente combinada.....	90
Figura 3.15 –	Paralização das reações de hidratação através do agitador eletromagnético.....	91
Figura 4.1 –	Resultados de resistência à compressão axial (MPa) aos 540 dias	94
Figura 4.2 –	Resultados de resistência à compressão axial (MPa) <i>versus</i> idade (dias) para a relação a/ag 0,45.....	95
Figura 4.3 –	Resultados de resistência à compressão axial (MPa) <i>versus</i> idade (dias) para a relação a/ag 0,55	95
Figura 4.4 –	Resultados de resistência à compressão axial (MPa) <i>versus</i> idade (dias) para a relação a/ag 0,65.....	102
Figura 4.5 –	Água quimicamente combinada <i>versus</i> misturas.....	104
Figura 4.6 –	Água quimicamente combinada aos 91 dias.....	104
Figura 4.7 –	Variação da água quimicamente combinada em porcentagem com as respectivas relações resistências à compressão axial para 91 dias (DUART, 2008) e 540 dias.....	106
Figura 4.8 –	Relação da água quimicamente combinada para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa).....	106
Figura 4.9 –	Distribuição dos volumes de mercúrio intrudido dos macroporos, mesoporos e poros de gel aos 540 dias.....	109
Figura 4.10 –	Volume de mercúrio intrudido (mL/g) - Distribuição dos tamanhos dos poros, aos 91 dias (DUART, 2008).....	110
Figura 4.11 –	Distribuição dos tamanhos e porcentagem dos poros e porcentagem para as misturas para as relações a/ag a,45; 0,55 e 0,65.....	111
Figura 4.12 –	Médias das variáveis dos resultados dos ensaios de porosimetria aos 91 dias e aos 540 dias.....	119
Figura 4.13 –	Diâmetro crítico em $\mu\text{m} \times 10^{-4}$ aos 91 dias (DUART, 2008) e 540 dias com as respectivas resistências à compressão axial...	121
Figura 4.14 –	Relação do diâmetro crítico para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa	122
Figura 4.15 –	Volume total de mercúrio intrudido ($V_{tHg} \times 10^{-4}$) aos 91 dias (DUART, 2008) e 540 dias com as respectivas resistências à compressão axial.....	123
Figura 4.16 –	Relação do volume total intrudido para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa)	123

Figura 4.17 –	Carga passante (Coulombs) para as diferentes relações a/ag, aos 540 dias.....	125
Figura 4.18 –	Resultados da carga passante Q (Coulombs) <i>versus</i> idade (dias) para a relação a/ag 0,45	127
Figura 4.19 –	Resultados da carga passante Q (Coulombs) <i>versus</i> idade (dias) para a relação a/ag 0,55	127
Figura 4.20 –	Resultados da carga passante Q (Coulombs) <i>versus</i> idade (dias) para a relação a/ag 0,65	127
Figura 4.21 –	Acréscimo da carga passante <i>versus</i> aumento da relação a/ag aos 540 dias.....	129
Figura 4.22 –	Variação das cargas passantes em Coulombs com as respectivas relações resistências à compressão axial para 91 dias (PEDROZO, 2008) e 540 dias	134
Figura 4.23 –	Classificação da penetração de cloretos pela ASTM C 1202 para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa).....	135 137
Figura 4.24 –	Cloretos totais retidos (%) aos 540 dias x misturas.....	
Figura 4.25 –	Acréscimo dos cloretos retidos totais <i>versus</i> aumento da relação a/ag.....	137
Figura 4.26 –	Acréscimo do teor de cloretos totais retidos aos 540 dias para as misturas com CCA ao natural <i>versus</i> mistura referência.....	139
Figura 4.27 –	Relação dos cloretos retidos para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa) aos 540 dias.....	141
Figura 4.28a- 4.28h	Correlação entre os resultados de 91 e 540 dias em igualdade de resistência para todas as misturas.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	–	Porcentagem de cinza e sílica por parte da planta.....	26
Tabela 1.2	–	Produção mundial de arroz.....	27
Tabela 1.3	–	Produção brasileira de arroz por regiões na safra 2010/2011...	28
Tabela 2.1	–	Teor limite de cloretos (% em relação à massa de cimento).....	42
Tabela 2.2	–	Classificação das adições minerais.....	45
Tabela 2.3	–	Exigências da NBR 12653:2012.....	45
Tabela 2.4	–	Poder calorífico inferior dos principais combustíveis utilizados para produzir energia.....	49
Tabela 3.1	–	Características físicas dos aglomerantes.....	74
Tabela 3.2	–	Composição química dos aglomerantes.....	74
Tabela 3.3	–	Convenções adotadas no ensaio de pozolanicidade.....	75
Tabela 3.4	–	Índice de atividade Pozolânica (FRATINI).....	75
Tabela 3.5	–	Características físicas dos agregados.....	77
Tabela 3.6	–	Quantidades de materiais por metro cúbico.....	80
Tabela 3.7	–	Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira.....	80
Tabela 3.8	–	Custo dos materiais dos traços (R\$/m ³).....	81
Tabela 3.9	–	Classificação de concretos quanto ao risco de penetração dos íons cloretos de acordo com a carga passante (ASTM C 1202:2005).....	88
Tabela 4.1	–	Resistência à compressão axial, em MPa, de corpos-de-prova moldados por Pedrozo (2008) e testemunhos extraídos a 540 dias.....	93
Tabela 4.2	–	Acréscimo de resistência à compressão axial de 91 dias para 540 dias.....	96
Tabela 4.3	–	Porcentagem da variação de resistência à compressão em comparação ao concreto referência e das misturas CCA naturais em relação às CCA moídas (valores entre parêntesis).....	96
Tabela 4.4	–	Relações a/ag para $f_{c28} = 31,6$ MPa.....	100
Tabela 4.5	–	Resultados obtidos para o ensaio de água quimicamente combinada aos 28 e 91 dias Duart (2008).....	103
Tabela 4.6	–	Acréscimo de água quimicamente combinada de 91 dias (DUART, 2008) para 540 dias, em porcentagem e índices de evolução em relação a mistura R (entre parêntesis) e em relação à mistura CCA moída (entre colchetes).....	104
Tabela 4.7	–	Coefficientes de determinação r^2 das equações de potência $f_c = a.AC^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e a água quimicamente combinada (AC).....	105
Tabela 4.8	–	Resultado do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio aos 540 dias, em igualdade de relação a/ag.....	108
Tabela 4.9	–	Distribuição volume de Hg intrudido (em mL/g) dos tamanhos dos poros em relação ao traço R (índices entre parêntesis) e aos traços com CCA (índices em colchetes), para a relação a/ag 0,45 aos 540 dias.....	115

Tabela 4.10 – Distribuição volume de Hg intrudido (em mL/g) dos tamanhos dos poros em relação ao traço R (índices entre parêntesis) e aos traços com CCA (índices em colchetes), para a relação a/ag 0,55 aos 540 dias.....	116
Tabela 4.11 – Distribuição volume de Hg intrudido (em mL/g) dos tamanhos dos poros em relação ao traço R (índices entre parêntesis) e aos traços com CCA (índices em colchetes), para a relação a/ag 0,65 aos 540 dias.....	118
Tabela 4.12 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão de potência $f_c = a.\Phi_{cr}^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e o diâmetro crítico (Φ_{cr}).....	120
Tabela 4.13 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão $f_c = a.Vt_{HG}^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e o volume total de Hg intrudido (Vt_{HG}).....	122
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de penetração de cloretos (ASTM C 1202) a 91 dias (PEDROZO, 2008) em c.p. moldados e a 540 dias em testemunhos extraídos de protótipos (esta dissertação).....	124
Tabela 4.15 – Redução de carga passante nas misturas em comparação ao concreto referência (índices entre parêntesis) e das misturas de CCA natural em relação às CCA moída (índices entre colchetes), aos 540 dias.....	126
Tabela 4.16 – Classificação de concretos quanto ao risco de penetração dos íons cloretos de acordo com a carga passante (ASTM C 1202: 2005).....	131
Tabela 4.17 – Comparação Pedrozo (2008) versus autor no enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202.....	132
Tabela 4.18 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão $f_c = a.Q^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e carga passante (Q).....	133
Tabela 4.19 – Cloretos totais retidos (%) aos 540 dias.....	136
Tabela 4.20 – Acréscimo dos cloretos retidos totais versus aumento da relação a/ag.....	138
Tabela 4.21 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão de potência $f_c = a.Cl_{ret}^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e carga passante (Q).....	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Gastos em países desenvolvidos com manutenção.....	33
---	----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	–	.....	39
Equação 2.2	–	.....	39
Equação 2.3	–	.....	39
Equação 2.4	–	.....	39
Equação 2.5	–	.....	39
Equação 2.6	–	.....	46
Equação 2.7	–	.....	46
Equação 2.8	–	.....	47
Equação 2.9	–	.....	62
Equação 3.1	–	.....	81
Equação 3.2	–	.....	88
Equação 3.3	–	.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- #** – abertura da malha da peneira
- 15M** – mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto
- 15N** – mistura composta com 15% de CCA, natural, em substituição ao cimento no concreto
- 25M** – mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto
- 25N** – mistura composta com 25% de CCA, natural, em substituição ao cimento no concreto
- a/ag** – água (água + aditivo)/aglomerante (cimento + adição), em massa
- a/c** – água (água + aditivo)/cimento, em massa
- agl** – aglomerante
- ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AC** – água quimicamente combinada
- ACI** – American Concrete Institute
- Al²⁺** – íons alumínio
- Al₂O₃** – óxido de alumínio
- ASTM** – American Standart for Testing Materials
- BS** – British Standarts
- c.p.** – corpo de prova
- C/S** – relação entre cal (CaO) e sílica (SiO₂)
- C20** – resistência característica de 20 MPa
- C25** – resistência característica de 25 MPa
- C₂S** – silicato dicálcico
- C₃A** – aluminato tricálcico
- C₃S** – silicato tricálcico
- C₄AF** – ferro aluminato tetracálcico
- Ca(OH)₂** – hidróxido de cálcio
- Ca²⁺** – íons cálcio
- CaCl₂** – cloreto de cálcio

CaCO₃ – carbonato de cálcio
CAD – Concreto de Alto Desempenho
CAR – Concreto de Alta Resistência
CaSO₄ – sulfato de cálcio
CCA – cinza da casca do arroz
CCA's – cinzas da casca do arroz
CCAM – cinza da casca do arroz, moída
CCAN – cinza da casca do arroz, ao natural
CEB – Comité euro-international du béton
CH – hidróxido de cálcio
Cl⁻ – íons cloretos
Cl⁻/OH⁻ – relação iônica entre cloretos e hidroxilas
CO₂ – dióxido de carbono
CPII-F – Cimento Portland composto com filler calcário
CPII-Z – Cimento Portland composto com pozolana
C-S-H – silicato de cálcio hidratado
CV – cinza volante
e⁻ – elétrons
EAPC – Ensaio Acelerado de Penetração de Cloretos
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
f_c – resistência à compressão axial
Fe(OH)₂ – hidróxido ferroso
Fe²⁺ – íons ferro
4Fe(OH)₃ – hidróxido férrico
Fe₂O₃ – óxido de ferro
FeCl₂ – cloreto ferroso
GEPECON – Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto
H⁺ – íons hidrogênio
H₂O – molécula de água
HCl – ácido clorídrico
Hg – mercúrio
IAP – índice atividade pozolânica
IRGA – Instituto Rio-Grandense de Arroz

K⁺	– íons potássio
K₂O	– óxido de potássio
K₂SO₄	– sulfato de potássio
KCl	– cloreto de potássio
KOH	– hidróxido de potássio
LEMIT	– Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para La Investigación Tecnológica
MEV	– Microscopia Eletrônica por Varredura
MPa	– mega Pascal
Na⁺	– íons sódio
Na₂O	– óxido de sódio
NaCl	– cloreto de sódio
NaOH	– hidróxido de sódio
NBR	– Norma Brasileira
μm	– micrômetro
nm	– nanômetro
NM	– Norma Mercosul
Ø	– diâmetro
O₂	– gás oxigênio
°C	– graus célsius
Ø_{cr}	– diâmetro crítico
OH⁻	– íons hidroxila ou hidroxila
ONU	– Organização das Nações Unidas
PCI	– poder calorífico inferior
pH	– potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico
PIM	– Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
Q	– carga passante
R	– mistura de referência com 100% de cimento
r²	– coeficiente de determinação
RILEM	– Réunion Internationale des Laboratoires d' Essais et des Echerces sur lês Matériau et les Constructions
AS	– sílica ativa
Si⁴⁺	– íons silício
SiO₂	– dióxido de silício

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SO₂ – dióxido de enxofre

SO₃ – trióxido de enxofre

SO₄²⁻ – óxido de enxofre

UDELAR – Universidad de La Republica

UR – Umidade Relativa

v – coeficiente de variação

V_{tHg} – volume total de mercúrio intrudido

WWF – World Wildlife Fund

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Considerações iniciais.....	23
1.2 Justificativa da pesquisa.....	26
1.3 Objetivos.....	30
1.3.1 Objetivo geral.....	30
1.3.2 Objetivos específicos.....	30
1.4 Estrutura da dissertação.....	31
2 DURABILIDADE À CLORETOS DE CONCRETO COM CCA.....	32
2.1 Aspectos referentes à durabilidade do concreto.....	32
2.1.1 Corrosão das armaduras.....	35
2.1.1.1 Introdução.....	35
2.1.1.2 A corrosão eletroquímica.....	36
2.1.1.3 Morfologia da corrosão.....	37
2.1.1.4 Penetração de cloretos.....	38
2.1.1.5 Mecanismos de transporte de cloretos para o interior do concreto.....	40
2.1.1.6 Limite crítico de cloretos.....	41
2.2 Adições minerais.....	43
2.2.1 Considerações Iniciais.....	43
2.2.2 A reação pozolânica.....	46
2.2.3 A cinza de casca de arroz.....	48
2.2.3.1 A reatividade da cinza de casca de arroz.....	50
2.2.3.2 A finura da CCA.....	54
2.3 Influência da cinza de casca de arroz (CCA) no concreto frente às variáveis estudadas.....	56
2.3.1 Propriedades mecânicas.....	56
2.3.1.1 Resistência à compressão axial.....	56
2.3.2 Microestrutura do concreto.....	58
2.3.2.1 Estrutura de poros.....	59
2.3.2.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).....	62
2.3.2.3 Água quimicamente combinada.....	63
2.3.3 Durabilidade do concreto.....	64

2.3.3.1 Efeitos da CCA na penetração de cloretos.....	64
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	69
3.1 Considerações iniciais.....	69
3.2 Variáveis da pesquisa.....	70
3.3 Caracterização dos materiais.....	71
3.3.1 Materiais cimentícios.....	71
3.3.2 Agregados.....	76
3.3.3 Aditivo.....	78
3.3.4 Água.....	79
3.4 Método de dosagem.....	79
3.5 Moldagem dos protótipos.....	81
3.6 Ensaio realizados.....	83
3.6.1 Resistência à compressão axial de testemunhos.....	83
3.6.2 Ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202:2005.....	85
3.6.3 Cloretos totais retidos.....	88
3.6.4 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	89
3.6.5 Água quimicamente combinada.....	89
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	92
4.1 Considerações iniciais.....	92
4.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial.....	93
4.3 Análise dos resultados em igualdade de resistência à compressão axial.....	99
4.4 Análise dos resultados do ensaio de água quimicamente combinada.....	101
4.4.1 Análise em igualdade de relação a/ag.....	101
4.5 Água quimicamente combinada x resistência à compressão axial.....	105
4.6 Análise dos resultados do ensaio porosimetria por intrusão de Hg.....	107
4.6.1 Análise em igualdade de relação a/ag.....	107
4.6.2 Análise dos resultados em igualdade de resistência à compressão.....	120
4.7 Análise dos resultados do ensaio acelerado de penetração de cloretos (ASTM C 1202).....	124
4.7.1 Análise em igualdade de relação a/ag.....	124
4.7.2 Influência da relação água aglomerante.....	128
4.7.3 Influência utilização da CCA.....	130

4.7.4 Classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto.....	131
4.8 Resistência à compressão axial x penetração de cloretos.....	132
4.9 Análise dos resultados do ensaio cloretos totais retidos.....	136
4.10 Análise dos resultados do ensaio cloretos totais retidos em igualdade de resistência à compressão.....	131
4.11 Análise integrada dos resultados em igualdade de resistência à compressão axial.....	142
5 CONCLUSÕES.....	146
5.1 Considerações iniciais.....	146
5.2 Resistência à compressão axial.....	146
5.3 Água quimicamente combinada.....	147
5.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	149
5.5 Penetração acelerada de cloretos pela ASTM C 1202: 2005.....	150
5.6 Cloretos totais retidos.....	151
5.7 Considerações finais.....	152
5.8 Sugestões para pesquisas futuras.....	153
REFERÊNCIAS.....	154

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Desde os primórdios, em um processo natural, o ser humano sempre buscou melhorar as suas condições de vida. A primeira concepção de residência foram as cavernas, onde o homem buscou proteção contra os predadores e intempéries. Posteriormente houve a necessidade de infraestrutura, ou seja, de melhorar os acessos para transportar alimentos e outros víveres. Essa busca incessante do homem por melhorias, em todos os períodos da sua existência, promoveu grandes avanços tecnológicos em todas as áreas, principalmente após a Revolução Industrial na Europa nos séculos XVIII e XIX. A principal particularidade dessa revolução foi a substituição da mão de obra artesanal pelo uso de máquinas. Após esse período, o progresso deu-se de maneira muito intensiva, onde foi desenvolvida a grande maioria das tecnologias que usamos hoje. Porém, para conseguir esse progresso, o ser humano explorou de maneira indiscriminada os recursos naturais, ocasionando danos severos ao nosso planeta.

Segundo a ONU, no dia 31/10/2011, a população mundial atingiu a marca de sete bilhões de habitantes. A exploração dos recursos naturais para atender a demanda dessa população é muito elevada, gerando conseqüentemente, vários problemas, entre os quais está o aquecimento global, cuja principal causa é a alta concentração de gases que promovem o efeito estufa na atmosfera.

O efeito estufa é um fenômeno natural, onde uma parte da energia que incide sobre o planeta é absorvida pela superfície terrestre e pelos oceanos promovendo o seu aquecimento. A outra parte dessa energia incidente é refletida, onde a presença de gases na atmosfera absorve essa energia refletida tornando a terra habitável, pois se não fossem esses gases, a temperatura média do planeta seria em torno de 18 graus célsius negativos. Os principais gases do efeito estufa são o CO₂, o metano, e o óxido nitroso. Atualmente, a alta atividade industrial promove o incremento desses gases na atmosfera, aumentando a espessura da camada de gases, retendo o calor, que é uma radiação infravermelha, no planeta. Dessa maneira, ocorre uma elevação na temperatura do planeta, conhecido como aquecimento global. Este fenômeno promove o derretimento das geleiras,

aumentando o nível dos oceanos, além de promover atividades climáticas extremas, como excesso de chuvas e estiagem prolongada em algumas regiões. Easterling et al. (2000) e Nicholls (2001) afirmaram que já existem indícios alarmantes do aumento de eventos atmosféricos extremos em função do aquecimento global.

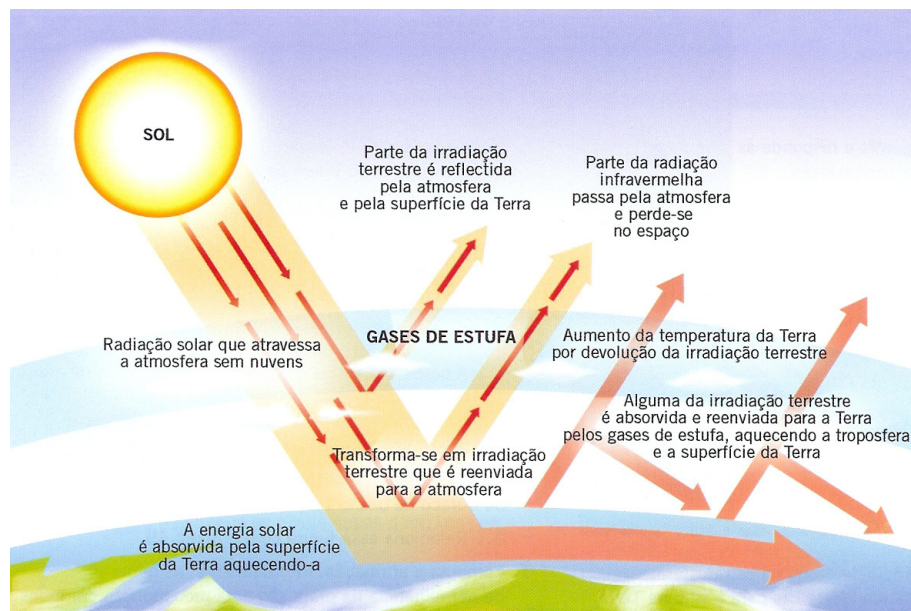


Figura 1.1 – Esquema efeito estufa
Fonte: Ambiente e Ecologia (2011).

Frente a grande expansão econômica e industrial vivida nos dias de hoje, cujos efeitos climáticos foram abordados em parágrafos anteriores, muito se fala em desenvolvimento sustentável. Segundo a WWF (World Wildlife Fund, 2013) desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Dessa maneira, é importante reduzir a exploração de matéria prima, reutilizar os recursos disponíveis e reduzir a emissão de poluentes, promovendo assim um menor impacto ambiental na produção de insumos.

Nesse contexto, concebe-se como muito significativo o consumo de concreto, que é o segundo material mais largamente utilizado pelo homem, perdendo apenas para a água. Mehta (1994) estima o consumo anual de concreto seja de 5,5 bilhões de toneladas/ano. As justificativas para o grande emprego estão na vantajosa relação custo/desempenho, nas propriedades que adquire quando utilizado em

conjunto com o aço, facilidade de emprego, diversidade de formas e tamanhos possíveis. O concreto permite a execução de estruturas nos mais variados ambientes agressivos, pois além do mesmo suportar os esforços provenientes do projeto, ele é um elemento que apresenta durabilidade. Mehta (1994) atribui a vida útil do concreto a sua durabilidade.

A durabilidade de uma estrutura é um fator que está ligado diretamente com impactos financeiros e ambientais, visto que estruturas que se deterioram antes do término de sua vida útil precisam ser reparadas ou reconstruídas, ocasionando um desperdício de matéria prima e dinheiro.

O principal componente do concreto é o cimento Portland, sendo que o processo de produção do mesmo gera um impacto ambiental muito grande, contribuindo para o efeito estufa. Mehta (1999) relata que a fabricação do cimento contribui com aproximadamente 5% da quantidade de CO₂ emitidas anualmente na atmosfera. Segundo Neville (1997), cada tonelada de cimento portland produzida resulta em uma tonelada de CO₂ liberada a atmosfera, sendo ambientalmente agressiva. Atualmente a indústria mundial e nacional obteve ganhos significativos na fabricação de cimento através de um processo mais eficaz com menor demanda de energia. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), em 2008 o Brasil apresentou a taxa de emissão de 560 Kg de CO₂ por tonelada de cimento, sendo a menor taxa em relação a todos os países.

Porém, o cimento é um produto indispensável na construção, utilizado desde a parte estrutural até os revestimentos. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2011), o consumo de cimento no Brasil foi de 64.972 mil toneladas. A previsão desse consumo é aumentar, principalmente em função do momento econômico vivido pelo país.

Nos dias de hoje, frente aos aspectos relacionados ao concreto, muitos pesquisadores buscam novas tecnologias e materiais para aliar a durabilidade e sustentabilidade. Nesse sentido, os usos de adições minerais (pozolanas e escórias de alto forno) em substituições parciais ao cimento no concreto têm sido uma alternativa viável, melhorando o desempenho do mesmo. Para Neville (1997), em diversas situações, o emprego das adições minerais no concreto justifica-se pelas vantagens técnicas, além das vantagens energética e ambiental. Dentre essas pozolanas está a cinza de casca de arroz, que é um resíduo agroindustrial gerado

pela queima da casca do arroz, usada como fonte de energia no beneficiamento do grão e até venda para terceiros.

Dessa maneira, a utilização da cinza de casca de arroz (CCA) em concretos vem sendo estudada por diversos pesquisadores, onde os resultados mostram a melhoria nas variáveis de durabilidade. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de casca, que por combustão origina 40 kg de cinza. A tabela 1.1 mostra os teores de sílica e cinza de diversos cereais.

Tabela 1.1 – Porcentagem de cinza e sílica por parte da planta

Cereal	Parte da planta	Cinza (% em peso)	Sílica (%)
Milho	Folha	12	64
Arroz	Casca	20	93
Arroz	Palha	14	82
Cana de açúcar	Bagaço	15	73
Girassol	Folhas e talo	11	25
Trigo	Folha	10	91

Fonte: Mehta (1992) e Cook (1986), apud Tiboni (2007).

No presente trabalho foram estudadas cinza de casca de arroz, moída e ao natural, queimadas sem controle de temperatura, em substituição parcial ao cimento. Em particular, foram estudados os efeitos desta adição em algumas propriedades do concreto. O estudo da CCA natural é de grande importância na pesquisa, visto que a mesma não sofre o processo de moagem, não gerando esse custo que é bastante elevado.

1.2 Justificativa da pesquisa

O arroz é uma cultura cultivada em todos os continentes, pois apresenta grande capacidade de adaptação a diferentes condições de solo e clima. A cultura do arroz desempenha um papel estratégico em diversos países, tanto em nível econômico com em nível social, servindo como o principal alimento para os habitantes das nações mais populosas da Ásia, África e América Latina. Segundo a Embrapa (2010), o arroz é alimento básico para cerca de 2,4 bilhões de pessoas. Os

grandes ecossistemas para a cultura são o de várzeas e o de terras altas, onde no país os principais são o irrigado por inundação e o de sequeiro.

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO apud Ministério da Agricultura, 2013), o arroz é capaz de suprir 20% da energia e 15% da proteína da necessidade diária de um adulto, além de conter vitaminas, sais minerais, fósforo, cálcio e ferro.

Atualmente o Brasil é o nono produtor mundial de arroz, com produção de 11.449,1 mil toneladas na safra 2011/2012 (Tabela 1.2). A média do consumo anual de arroz é de 25 quilos por habitante. O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz irrigado, seguido por Santa Catarina e Mato Grosso. De acordo com dados do Instituto Rio-Grandense de Arroz (IRGA, 2013), o Rio Grande do Sul produziu 7.042,50 mil toneladas na safra 2011/2012, sendo responsável por aproximadamente 63% da produção nacional.

Tabela 1.2 – Produção mundial de arroz

Posição	País	Produção (milhões toneladas)
1	China	197,21
2	Índia	143,96
3	Indonésia	66,47
4	Bangladesh	50,06
5	Vietnã	39,99
6	Mianmar	33,20
7	Tailândia	31,60
8	Filipinas	15,77
9	Brasil	11,24
10	Estados Unidos	11,03

Fonte: Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010).

Tabela 1.3 – Produção brasileira de arroz por regiões na safra 2010/2011

Posição	Região	Produção (mil toneladas)
1	Sul	10.110,2
2	Nordeste	1.168,7
3	Centro-oeste	1.018,0
4	Norte	985,8
5	Sudeste	173,7

Fonte: IRGA (2012).

Segundo a Assessoria de Gestão Estratégica do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2006), as projeções de produção e consumo de arroz, mostram que o Brasil vai colher 14,12 milhões de toneladas de arroz na safra 2019/2020, o que equivale ao aumento anual da produção de 1,15% nos próximos dez anos. O consumo deverá crescer a uma taxa média anual de 0,86%, alcançando 14,37 milhões de toneladas em 2019/2020.

A figura 1.1 apresenta os dados do Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2006), onde os municípios que mais se destacam na produção de arroz localizam-se nas regiões da Fronteira Oeste e Sul do Estado, principalmente junto ao rio Uruguai e na região das lagoas.

No período de 2004 a 2006, aproximadamente 66% da produção de arroz no Rio Grande do Sul foram produzidos por 19 municípios. O município de Uruguaiana foi o maior produtor gaúcho de arroz com 511.512 toneladas, seguido por Itaqui com 394.798 toneladas e por Santa Vitória do Palmar com 379.626 toneladas.

Conforme mostrado na tabela 1.1, a casca do arroz possui um teor elevado de cinza e sílica. Embora seja um resíduo agroindustrial, a CCA pode ser utilizada como adição mineral no concreto. Quando é produzida pela combustão controlada, é uma pozolana altamente reativa (RILEM, 1983; MEHTA e MONTEIRO, 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996) porque possui a habilidade de contribuir para o aumento da resistência mecânica nas idades iniciais do concreto e propiciar um aumento de durabilidade.

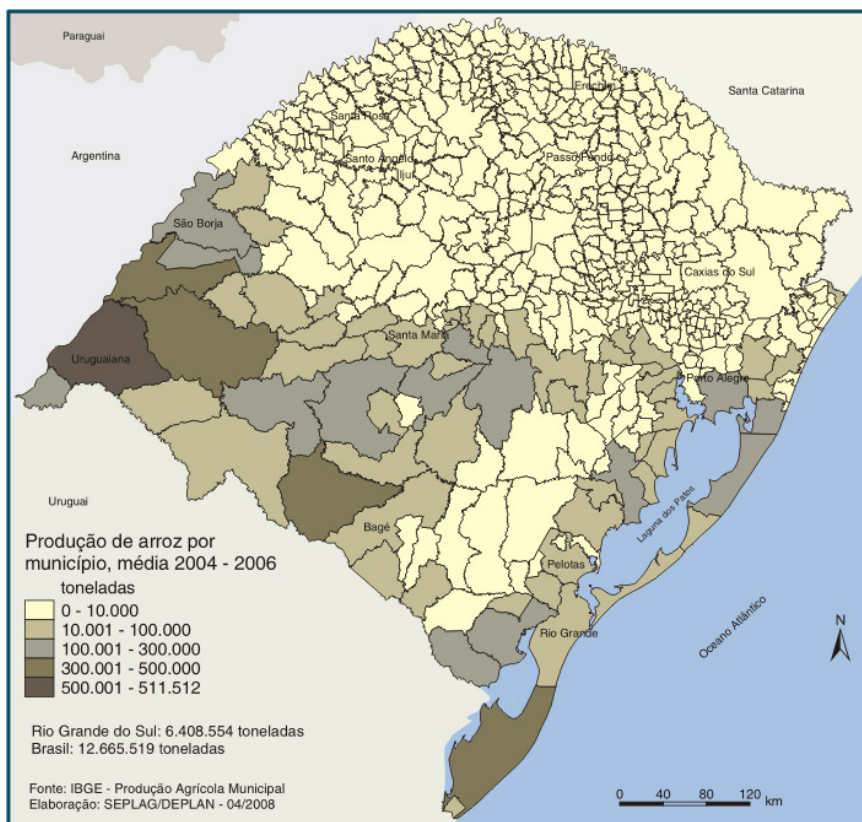


Figura 1.2 – Produção de arroz no Rio Grande do Sul
Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2004 a 2006).

De acordo com Mehta (1992 apud SANTOS), em alguns países o descarte da cinza de casca de arroz tornou-se um problema ambiental, tamanha é a quantidade deste resíduo.

Tendo em vista que o Brasil é o nono produtor mundial de arroz, e o Rio Grande do Sul produz aproximadamente 63% da produção nacional, a justificativa do presente trabalho é estudar a viabilidade técnica e econômica da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural.

Esse tema foi proposto devido ao pouco interesse da utilização da CCA em função do alto custo de produção das CCAs utilizando fornos com temperaturas controladas para obter a cinza amorfa. Outro ponto relevante que justificou a pesquisa é a necessidade de moagem para ativar sua pozolanicidade e consequente reatividade, pois esse beneficiamento consome energia e investimento financeiro relativamente elevado.

Esta dissertação está inserida em um projeto integrado entre a Universidade Federal de Santa Maria, (UFSM, Brasil), através do GEPECON, da Universidad de

La Republica (UDELAR/ Uruguai) e do Laboratório de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT/Argentina), por intermédio do Programa PROSUL com financiamento do CNPq, entre os anos 2005 e 2011.

Foram defendidas diversas dissertações no âmbito do GEPECON a respeito do tema, sendo que o presente trabalho dissertativo se insere na Fase III com o estudo de protótipos de concreto curados em ambiente descoberto, em longo prazo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação foi estudar a viabilidade técnica e econômica da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural. Foram abordadas as substituições de cimento por cinza de casca de arroz moída e natural, nas relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65.

O estudo pretendeu verificar o desempenho dos protótipos expostos em condições reais, na idade de 540 dias frente às variáveis de durabilidade, mais especificamente a penetração dos íons cloretos e teor total de cloretos retidos. Também foram estudados parâmetros de resistência à compressão axial correlacionadas com as demais variáveis do estudo, para efeito de comparação em igualdade de resistência. Foram realizadas comparações com integrantes do grupo de pesquisa GEPECON, que realizaram os ensaios em idades menores.

O propósito é comprovar a viabilidade técnica da cinza de casca de arroz nos teores estudados, para que este resíduo seja largamente utilizado na produção de concretos melhorando o seu desempenho.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da presente dissertação são os seguintes:

- a) Verificar o comportamento dos concretos (corpos de prova extraídos de protótipos aos 540 dias) frente à resistência à compressão axial, quando são empregadas cinza de casca de arroz, moída e natural, sem beneficiamento, nos teores de 15% e 25%, nas relações a/ag estudadas;

- b) Observar o desempenho das variáveis relacionadas com a microestrutura do concreto: água quimicamente combinada e estrutura dos poros nas mesmas composições do item a);
- c) Observar o desempenho das variáveis relacionadas com a durabilidade do concreto: penetração acelerada de cloretos e teor total de cloretos retidos nas mesmas composições da alínea a;
- d) Fazer a comparação dos resultados dos ensaios desta dissertação aos 540 dias com a dissertação de Pedrozo (2008), nas variáveis de resistência à compressão axial e penetração acelerada de cloretos e com a dissertação de Duart (2008) nas variáveis de água quimicamente combinada e estrutura de poros;
- e) Comparar o desempenho das misturas com substituição de cimento por cinza de casca de arroz nos teores de 15% e 25% nas relações a/ag estudadas com a mistura referência, assim como os efeitos da CCA natural em relação à CCA moída;
- f) Fazer uma análise integrada dos resultados obtidos nesta pesquisa.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos. O primeiro capítulo é a Introdução, onde é abordada a justificativa para substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz e os objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo, são abordados os fatores referentes à durabilidade do concreto, onde a penetração aos íons cloreto é analisada com destaque. São abordados também os efeitos que a cinza da casca de arroz promove no concreto frente às variáveis estudadas, enfatizando a importância da finura.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia experimental, onde são descritas as variáveis, os materiais empregados e os procedimentos de ensaios.

No quarto capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais. Estes são comparados com outros trabalhos e integrados entre si, para analisar a dependência das variáveis.

As conclusões são abordadas no quinto capítulo, fazendo um resumo dos resultados obtidos e apresentando as sugestões para futuras pesquisas.

2 DURABILIDADE À CLORETOS DE CONCRETO COM CCA

2.1 Aspectos referentes à durabilidade do concreto

A durabilidade do concreto é a capacidade que esse material/componente da construção possui frente à desagregação e deterioração, desempenhando as funções ao qual o mesmo foi projetado. Dizer que um concreto é durável, não significa dizer somente que o mesmo possui elevada resistência, mas sim que o concreto deve possuir uma microestrutura compacta, de tal maneira que a entrada de agentes agressivos externos através do mesmo seja impedida ou retardada até o cumprimento da sua vida útil.

Existem três grandes variáveis no estudo do concreto, sendo elas as propriedades mecânicas (na qual estão inseridas as principais variáveis que são as resistências às diversas solicitações atuantes), a durabilidade e a microestrutura. Todas essas variáveis têm sido amplamente estudada por pesquisadores, com o objetivo de verificar a influência que cada uma exerce no desempenho do concreto e como as mesmas se inter-relacionam.

Nesse contexto, primeiramente foram estudados os Concretos de Alta Resistência (CAR) e posteriormente os Concretos de Alto Desempenho (CAD). De acordo com Aitcin (1997), até a década de 70 o concreto era conhecido somente como concreto de alta resistência. Atualmente aborda-se o termo CAD, visto que existem outras variáveis intrínsecas no concreto concomitantemente com a resistência.

Silva e Libório (1999) destacam que o concreto de alto desempenho deve ser caracterizado devido ao comportamento integrado das variáveis das propriedades mecânicas, da durabilidade, da microestrutura e das características do meio na qual o concreto está inserido.

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011), durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Portanto não é uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto. Uma mesma estrutura pode ter diferentes comportamentos, ou seja, diferentes funções de durabilidade no tempo, segundo suas diversas partes, dependentes até da forma de utilizá-la. Para Neville (1997), o

concreto é considerado durável quando o mesmo resiste ao processo de deterioração ao qual está submetido. Deve-se considerar que a durabilidade é uma propriedade que depende das características do material em si e o desempenho é um conceito mais amplo, que abrange a durabilidade e o amplia sob o ponto de vista das necessidades dos usuários.

A durabilidade do concreto está ligada diretamente a sua vida útil, para resistir aos efeitos da agressividade dos ambientes que o mesmo é exposto.

De acordo com Medeiros, Andrade e Helene (2011), vários trabalhos demonstram o impacto econômico da consideração da durabilidade a partir de pesquisas que apresentam os significativos gastos com manutenção e reparo de estruturas em países desenvolvidos (UEDA; TAKEWAKA, 2007), conforme ilustrado no quadro 2.1.

país	gastos com construções novas	gastos com manutenção e reparo	gastos totais com construção
França	85,6 Bilhões de Euros (52%)	79,6 Bilhões de Euros (48%)	165,2 Bilhões de Euros (100%)
Alemanha	99,7 Bilhões de Euros (50%)	99,0 Bilhões de Euros (50%)	198,7 Bilhões de Euros (100%)
Itália	58,6 Bilhões de Euros (43%)	76,8 Bilhões de Euros (57%)	135,4 Bilhões de Euros (100%)
Reino Unido	60,7 Bilhões de Pounds (50%)	61,2 Bilhões de libras (50%)	121,9 Bilhões de Pounds (100%)

Nota: todos os dados se referem ao ano de 2004, exceto no caso da Itália que se refere ao ano de 2002.

Quadro 2.1 – Gastos em países desenvolvidos com manutenção

Fonte: Medeiros, Andrade e Helene (2011).

A NBR 6118:2007 (ABNT, 2007), item 6.2, define vida útil de projeto como o “período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, conforme itens 7.8 e 25.4, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais”. De acordo com a ISO 13823:2008, a vida útil é “o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo”. A figura 2.1 apresenta graficamente a conceituação das diversas formas de vida útil com que se pode classificar uma estrutura de concreto.

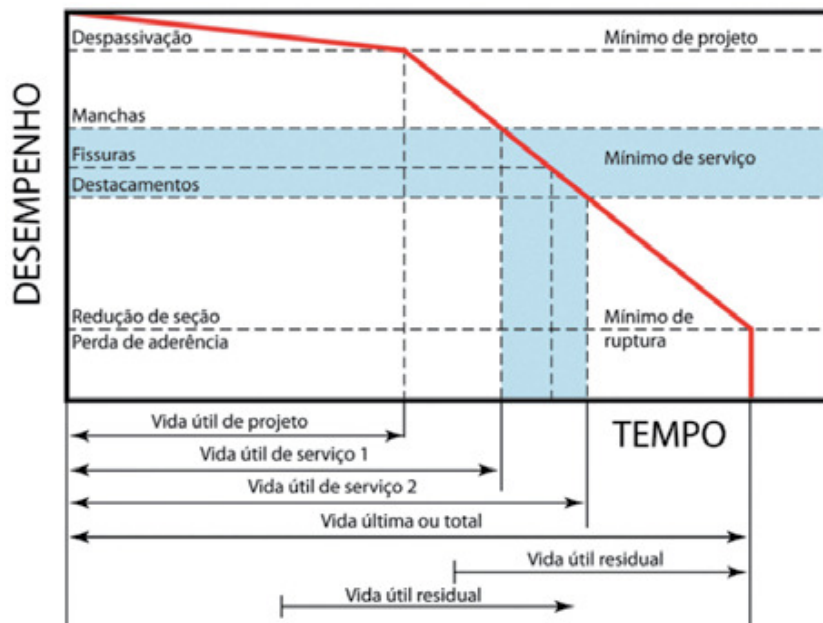


Figura 2.1 – Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras
Fonte: Helene (1997).

Segundo Helene (1997), pode-se classificar a vida útil de uma estrutura de acordo com os tópicos abaixo:

- a) *Vida útil de projeto*: Período de tempo até o término do processo de despassivação da armadura, não significando que necessariamente haverá corrosão importante;
- b) *Vida útil de serviço*: Período onde se começam a manifestar os efeitos dos agentes agressivos, desde o aparecimento de manchas na superfície do concreto até o destacamento do cobrimento;
- c) *Vida útil última ou total*: Período de tempo em que a estrutura entra em colapso parcial ou total.
- d) *Vida útil residual*: Período em que, a partir de uma vistoria, a estrutura ainda será capaz de desempenhar as funções para a qual foi projetada.

A vida útil de uma estrutura de concreto está condicionada de maneira muito efetiva a presença dos agentes agressivos, entre os quais se destacam os íons cloretos, o CO_2 e os sulfatos. Esses agentes podem promover inicialmente a despassivação da armadura, dando início ao processo de corrosão, que se manifesta através da mancha e/ou fissuração, expansão e posterior destacamento,

ou seja, a destruição da camada de cobrimento do concreto. Para impedir que o processo de corrosão se desencadeie, devem-se tomar precauções para que os agentes agressivos não atinjam o aço. Helene (1993) entende que a proteção do aço se dá por dois fatores: a proteção química pela alta alcalinidade do concreto e a proteção física dada pela camada de cobrimento. De acordo com Andrade (1992), o principal fator responsável pela alcalinidade do concreto é hidróxido de cálcio (CH) e outros hidróxidos alcalinos. A combinação do alto pH com o oxigênio forma uma camada de óxidos sobre o aço, tornando-o inerte (despassivado - não ativo).

2.1.1 Corrosão das armaduras

2.1.1.1 Introdução

A concepção de grandes obras de engenharia deve-se a introdução do aço no concreto, visto que o mesmo permitiu a execução de estruturas de maior porte e mais complexas, resistindo a esforços maiores e dando mais segurança em comparação aos sistemas construtivos até então utilizados.

Porém, como a matéria prima para a produção dos aços de construção está na natureza na forma de minério, é necessária uma grande energia para fazer a transformação do minério, sendo que a tendência natural do aço é voltar a sua forma original, se as condições ambientais forem propícias. Assim, o maior problema do concreto armado é a suscetibilidade da corrosão da armadura.

Para Helene (1993) a corrosão é o conjunto de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, onde essas reações são através da relação realizada com substâncias internas e com o meio ambiente, podendo estar associadas a ações físicas. Segundo Cascudo (1997), a corrosão da armadura é o processo de deterioração dos materiais devido à ação química (corrosão química ou oxidação) ou eletroquímica do meio (aquosa) no qual o material está exposto, podendo estar associado aos esforços na qual o material está submetido.

A corrosão química ou oxidação é a formação de uma película de óxido através das reações entre um metal e um gás ou líquido que não seja eletrólito. Esse tipo de corrosão não provoca alterações significativas na superfície do metal, visto que para isso acontecer deveriam existir gases muito agressivos no ambiente.

2.1.1.2 A corrosão eletroquímica

A corrosão das armaduras no concreto é de natureza eletroquímica (em meio aquoso). De acordo com Pólito (2006), 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. 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 a tensões elevadas, ocasionando, até, uma desagregação (desplacamento) do cobrimento de concreto. Também, devido ao processo corrosivo, há uma redução da seção de armadura e, conseqüentemente, uma diminuição da resistência, podendo, levar a estrutura ao colapso (TUUTTI, 1982; HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 1994; AİTICIN, 2000; ANDRADE, 2001). A figura 2.2 mostra um pier severamente danificado pela corrosão.



Figura 2.2 – Estrutura localizada na linha da maré severamente deteriorada
Fonte: Aguiar (2006).

No modelo proposto por Tuutti (1982), figura 2.3, observam-se dois períodos. O primeiro é período de iniciação, que compreende desde a entrada do agente agressivo até o processo de despassivação da armadura. Já o segundo período corresponde à propagação, onde o processo de corrosão uma vez consolidado aumenta gradualmente, em escala exponencial, ocasionando danos severos às armaduras.

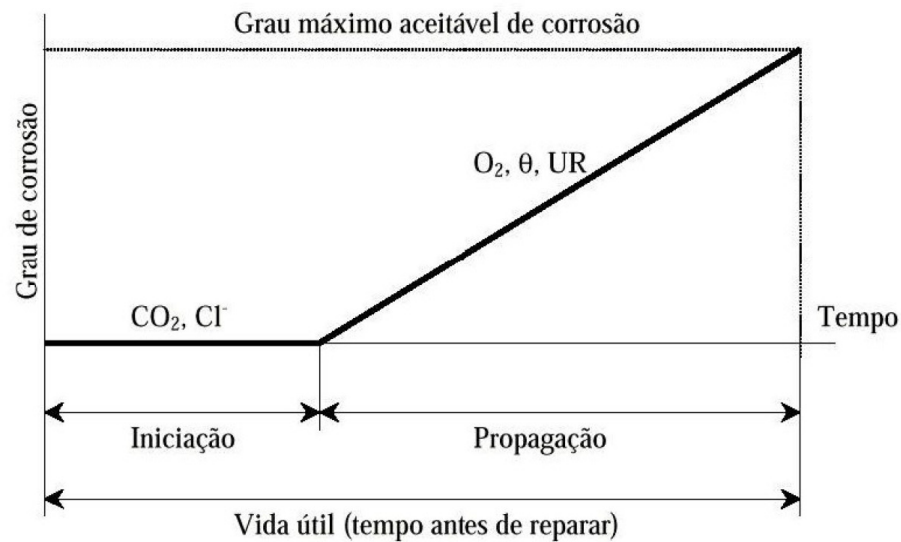


Figura 2.3 – Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982)
Fonte: Tuutti (1982).

2.1.1.3 Morfologia da corrosão

De acordo com Cascudo (1997), os principais agentes agressivos que desencadeiam a corrosão das armaduras são a ação dos íons cloretos (corrosão localizada por pite) e redução do pH do aço (corrosão generalizada → carbonatação) e corrosão localizada sobre tensão fraturante. Esta última embora pouco conhecida é muito perigosa, visto que promove ruptura brusca do aço sob tensão, sem deformações significativa e sem sintomas aparentes, principalmente, na presença de cloretos (PÓLITO, 2006).

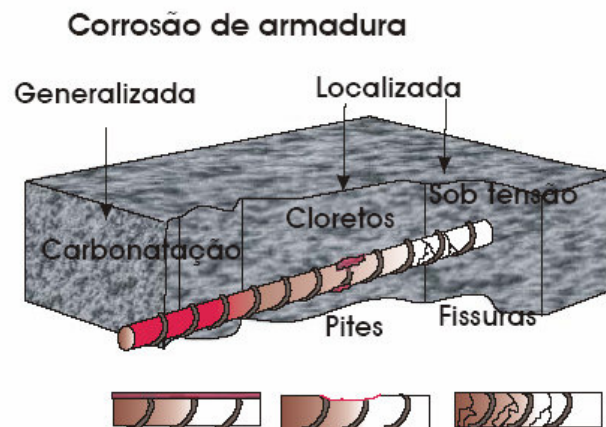


Figura 2.4 – Tipos de corrosão e fatores que as provocam
Fonte: Cascudo (1997).

2.1.1.4 Penetração de cloretos

Os íons cloreto são amplamente estudados devido ao fato de ser extremamente prejudicial à durabilidade do concreto e também por estar presente de maneira muito efetiva no meio ambiente.

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 a presença destes íons podem apresentar consequências gravíssimas. Os íons cloreto 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, ao menos nos países do cone sul, o ingresso de íons cloretos no concreto pode ocorrer por meio de:

- a) Difusão: nas estruturas submersas em águas marinhas;
- b) Absorção, difusão e permeabilidade: nas estruturas localizadas na orla marítima, sujeitas à maresia, a neblina ou, ainda, estruturas em zonas de respingos;
- c) Incorporação durante a mistura: pelo uso indevido de água de amassamento ou agregados contaminados com cloretos;
- d) Adição intencional: como aditivo acelerador. Atualmente a NBR 6118:2007 (ABNT, 2007) proíbe a utilização, em concreto armado ou protendido, de aditivos aceleradores que contenham cloretos em sua composição.

De acordo com Dotto (2006) as formas em que os íons cloretos são encontrados no interior do concreto são as seguintes:

- a) Combinados quimicamente com o C_3A formando cloroaluminatos (ARYA et al., 1990). Podem ainda estar associados a cátions como Si^{4+} e Al^{2+} ;
- b) Adsorvidos quimicamente na superfície dos poros da pasta hidratada;
- c) Livres na solução dos poros do concreto. Segundo Jensen et al. (2002), a porção livre de cloretos é a responsável pelos danos causados às armaduras.

Conforme Neville (1997, p. 556):

Quando existe uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos do aço no concreto, forma-se uma célula eletroquímica: surge uma região anódica e uma região catódica, ligadas pelo eletrólito na forma de água dos poros da pasta endurecida. Os íons Fe^{2+} , com carga elétrica positiva no ânodo passam para a solução, enquanto os elétrons livres e^- , com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito, combinando-se com a água e oxigênio formando íons de hidroxila, OH^- . Estes íons se deslocam pelo eletrólito combinando-se com os íons ferrosos e formando hidróxido férrico (ferrugem).

As reações são as seguintes:

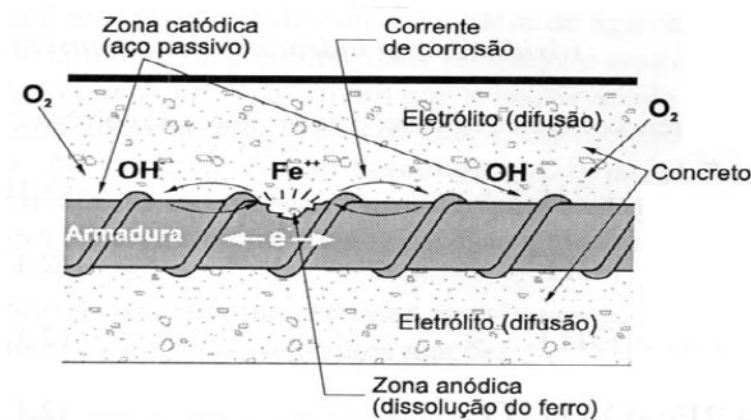
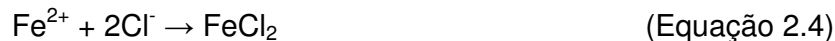


Figura 2.5 – Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado
Fonte: Cunha e Helene (2001).

Para Neville (1997), a superfície do aço é ativada pelos íons cloretos, formando o ânodo assim que atravessarem a camada de passivação, sendo o cátodo a superfície passiva. Em função disso acontecem as seguintes reações:



Observa-se que o Cl^- foi regenerado de modo que o produto de corrosão não contém cloreto. Assim o cloreto continua no concreto consumindo o aço fazendo com que o processo de corrosão se expanda rapidamente.

2.1.1.5 Mecanismos de transporte de cloretos para o interior do concreto

De acordo com Helene (1993) os cloretos nocivos ao concreto geralmente encontram-se 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. Os principais mecanismos de transporte de íons cloreto para o interior de uma estrutura de concreto são:

- a) **Permeabilidade:** é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão, onde esse fluxo depende da dimensão dos poros, sendo esta variável diretamente ligada com a relação a/ag . Para Cascudo (1997), esse fenômeno ocorre em condições especiais de tal maneira que deva ter o acúmulo de águas, onde esse fato se verifica em estruturas semienterradas onde há o contato com o lençol freático. Como a permeabilidade está diretamente relacionada com sua porosidade e, os fatores que influenciam esse processo são a relação a/ag , o consumo de cimento, o teor de agregados, o emprego de adições minerais e o grau de hidratação do concreto.
- b) **Absorção capilar:** está diretamente ligada ao transporte de líquidos através dos poros capilares onde devido a uma tensão superficial os líquidos podem ser transportados pelo concreto por meio de processos de sorção (absorção/dessorção). A viscosidade, a densidade e a tensão superficial do líquido são parâmetros fundamentais nesse tipo de transporte enquanto que as variáveis intrínsecas ao sistema são o teor de umidade e como os poros estão conectados. Segundo Helene (1993), o fenômeno da absorção não ocorre em concretos saturados. Para Santos (2000), estruturas que estejam sujeitas a ciclos de molhagem e secagem são mais propícias a esse fenômeno de transporte, principalmente em relação ao transporte de íons cloretos.
- c) **Difusão:** ocorre devido a gradientes de concentração iônica entre o meio externo e o meio interno (em concretos a estrutura de poros tem influência

significativa nesse processo). Silva Filho (2004) relata que esse fenômeno 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. Schneider (2005) entende que quando os íons cloretos ultrapassam a camada superficial ($\approx 1,0$ cm) e alcança o interior do concreto, a penetração passa a ser por difusão iônica.

- d) **Migração iônica:** é o processo de transporte que ocorre quando existe uma diferença de potencial elétrico, propiciando o deslocamento dos íons presentes. É o fenômeno de transporte que ocorre no processo de corrosão eletroquímica, onde os cloretos são induzidos a movimentar-se pela estrutura porosa do concreto pelo campo elétrico existente. Nepomuceno (2005) afirma que 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.

2.1.1.6 Limite crítico de cloretos

O teor limite crítico de cloretos para desencadear o processo de corrosão é um assunto bastante estudado por pesquisadores, porém não existe um consenso entre esses limites. Os teores são expressos em porcentagem de cloretos totais em relação à massa de cimento. Cascudo (1997) entende que o teor limite para a despassivação das armaduras é de 0,4% em relação à massa de cimento. Na tabela 2.1, Figueiredo (2005), apresenta o teor limite de cloretos de acordo com diversas normas.

Andrade (1992) afirma que, de modo geral, as quantidades de cloretos de 0,40% em relação à massa do cimento ou de 0,05% a 0,1% em relação à massa do concreto, são suficientes para provocar a despassivação da armadura.

De acordo com Figueiredo et. al. (1993), os cloretos podem ingressar no concreto por várias maneiras, sendo uma das principais através dos materiais utilizados no momento de sua confecção, entre os quais estão os agregados contaminados (principalmente em regiões litorâneas), águas excessivamente

cloradas, água salobras e até mesmo em cimentos, visto que os cloretos atuam de maneira positiva nas resistências iniciais.

Tabela 2.1 – Teor limite de cloretos (% em relação à massa de cimento)

Norma	País	Ano	Teor de cloretos recomendado
NBR 6118 (ABNT)	Brasil	2003	Não se reporta ao teor de cloretos.
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos.
			$\leq 0,30\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal.
			$\leq 1\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco.
			$\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos.
CEB	Europa	1991	$\leq 0,40\%$ em relação à massa de cimento.
ENV 2006	Portugal	1991	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE - SP2	Japão	1986	
			$\leq 0,60 \text{ kg/m}^3$ de concreto.

Fonte: Figueiredo (2005).

Os cloretos também podem ser incorporados no concreto através de aditivos acelerados de pega quando estes contiverem em sua composição química o cloreto de cálcio (CaCl_2), pois mesmo após a dissolução do aditivo na água de amassamento, os íons cloreto liberados nesse processo permanecem no interior do concreto.

Para Helene (1993) a maioria das patologias causadas pelos íons cloreto é proveniente da concentração destes no meio ambiente, principalmente em ambientes marinhos, onde os respingos de maré respondem pelos mais severos danos às estruturas de concreto.

A figura 2.6 mostra a variação do teor crítico de íons cloreto frente a alguns fatores que podem desencadear o processo de corrosão, sendo estes, a umidade relativa, a existência de carbonatação, a umidade ambiente, o consumo de cimento e a permeabilidade.

Para Mehta (1994), a umidade relativa ótima para o processo de corrosão ocorrer está entre 70% e 80%, pois em umidades relativas mais altas, a difusão do oxigênio através do concreto é consideravelmente reduzida.

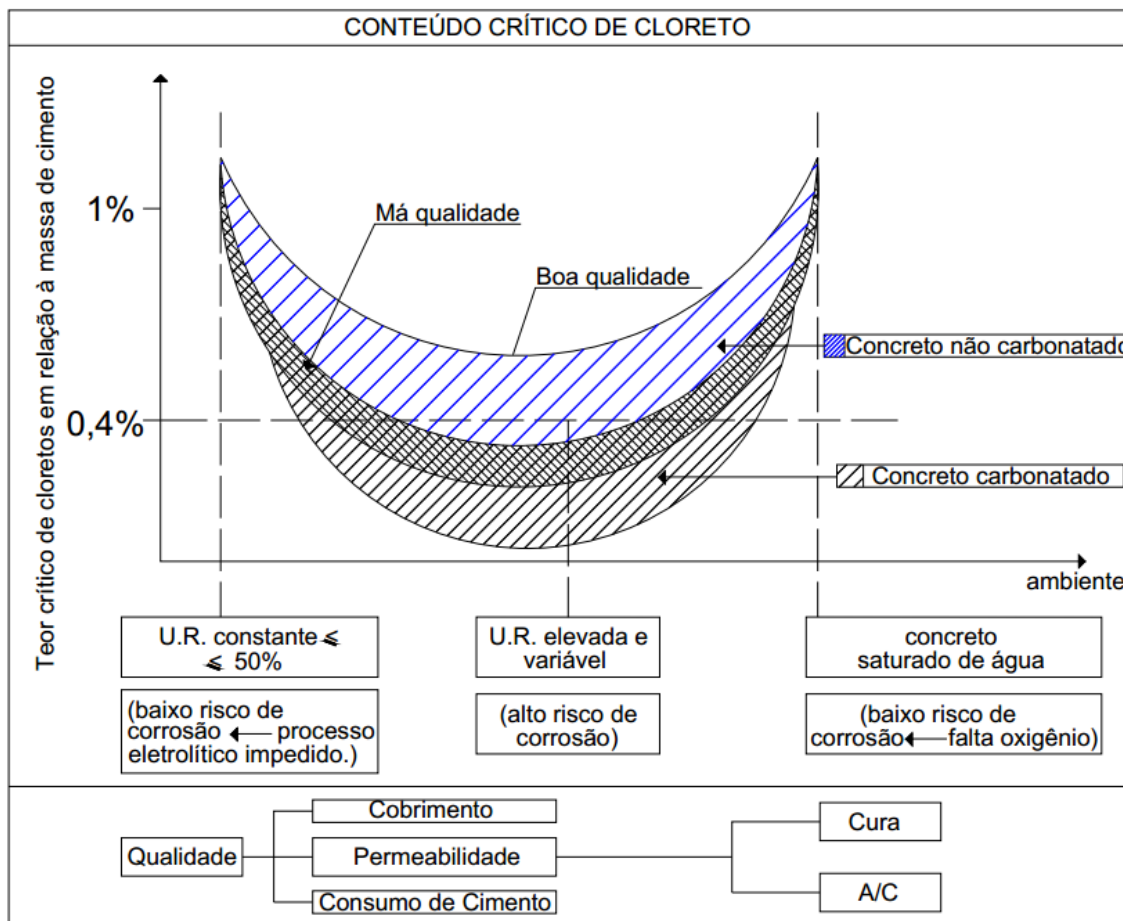


Figura 2.6 – Variação do teor crítico em função da UR e da qualidade do concreto
 Fonte: Andrade (1992).

2.2 Adições Minerais

2.2.1 Considerações Iniciais

As adições minerais são compostos inorgânicos, geralmente de natureza silico-aluminosa que adicionados ao concreto, promovem uma melhoria no desempenho deste frente às variáveis de durabilidade e propriedades mecânicas.

Atualmente a produção de cimento é um dos maiores emissores de CO_2 na atmosfera, que segundo Mehta (1999) contribui com aproximadamente 5% do total dessa emissão. Para amenizar o impacto ambiental e econômico da fabricação do cimento, as adições minerais têm se mostrado uma alternativa viável e eficiente para a substituição parcial do clínquer, visto que grande parte dessas adições é formada por resíduos agroindustriais.

Dessa maneira, consegue-se promover concomitantemente a redução de um passivo ambiental, a melhoria de desempenho de algumas variáveis do concreto, a redução de lançamento de CO₂ na atmosfera devido à produção do cimento e o ganho econômico da incorporação desses resíduos no concreto por serem, em geral, produtos mais baratos que o clínquer.

Silva (2007) define adições minerais a todos os materiais finamente moídos adicionados ao concreto. E afirma que os principais benefícios possíveis de serem alcançados são a trabalhabilidade e durabilidade frente aos agentes agressivos.

Para Mehta e Monteiro (1994), adições minerais são materiais silicosos, finamente moídos, adicionado ao concreto em quantidades relativamente grandes, geralmente na faixa de 20 a 100% de massa de cimento Portland. Mehta e Monteiro (2008) relatam que as adições minerais promovem efeitos favoráveis ao concreto, principalmente pelo fato de causar uma redução considerável na porosidade das pastas e refinar os grãos de hidróxido de cálcio. A redução de porosidade proporcionada pela alteração da microestrutura ocasiona um aumento da compactidade e, conseqüentemente, dificulta o ingresso de agentes agressivos ao interior do concreto.

Isaia (1995) afirma que a pozolanicidade e a finura são as principais propriedades que influem no desempenho das adições minerais, assim como a quantidade de pozolana e sua composição granulométrica também têm influência.

A tabela 2.2 apresenta a classificação das adições minerais de acordo com Mehta e Monteiro (2008).

As pozolanas, juntamente com a escória de alto forno, são as adições mais utilizadas no concreto, pois as mesmas têm a propriedade de reagir com o hidróxido de cálcio das reações de hidratação.

A NBR 12653 (ABNT, 2012) define materiais pozolânicos como:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

As pozolanas podem ser naturais (origem vulcânica) e as artificiais, que são provenientes de calcinação de rochas como o metacaulim, resíduos da queima do carvão e resíduos agroindustriais, como a cinza volante e a cinza de casca de arroz.

Tabela 2.2 – Classificação das adições minerais

Classificação	Tipos de Adições
Cimentantes	Escória granulada de alto forno
Cimentantes e Pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa Metacaulim Cinza de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio Argilas Calcinadas Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto forno resfriada lentamente Cinzas de forno Escória de caldeira Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes (filler)	Pó de cálcio, pó de pedra

Fonte: Metha e Monteiro (2008).

A tabela 2.3 apresenta as exigências da NBR 12653 (ABNT, 2012) para a classificação de uma pozolana. Tashima (2006) faz uma crítica à norma devido ao fato da mesma não apresentar pozolanas altamente reativas como a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz. Para Cordeiro (2009), o limite mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é contestável, uma vez que a atividade pozolânica está influenciada pelo teor de SiO_2 e/ou Al_2O_3 amorfos, sendo, portanto, incoerente fixar um limite que não contemple a forma do arranjo estrutural, ou seja, cristalino ou amorfo.

Tabela 2.3 – Exigências da NBR 12653:2012

Recomendações	Classe N	Classe C	Classe E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, % mín.	70	70	50
SO_3 , % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na_2O , % máx.	1,5	1,5	1,5

Notas: Classe N: pozolanas naturais e artificiais; Classe C: cinza volante e materiais resultantes da queima do carvão; Classe E: pozolana que não pertence às classes N e C.

Fonte: ABNT (2012).

Isaia (1995) relata que as pozolanas são adicionadas ao concreto de elevado desempenho para propiciar uma microestrutura mais uniforme e compacta, resultando em desempenho superior ao concreto normal sem adições, no que concerne à durabilidade, ao desempenho e vida útil da estrutura de concreto.

2.2.2 A reação pozolânica

De acordo com literatura, os quatro principais compostos do cimento são os silicatos de cálcio, aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio, denominados pela nomenclatura C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF . Durante o processo de hidratação do cimento, a primeira reação que acontece é da água de amassamento com os cristais de C_3A , que agem principalmente como fundente na mistura, sendo que esta reação seria praticamente instantânea se não fosse a ação do sulfato de cálcio promovendo o retardamento do pega. O C_4AF tem pega rápida, mas não é instantânea, sendo que o óxido de ferro age como fundente, fixando a alumina melhorando a resistência ao ataque de águas sulfatadas. Posteriormente ocorre a reação entre os cristais de C_3S , que é o principal responsável pela resistência nas idades iniciais. A partir dos 7 dias começam as reações do C_2S com a água, sendo que a mesma é lenta e se processa com mais efetividade após os 28 dias, sendo esse composto o responsável pela resistência da pasta em idades mais avançadas. Após a hidratação do cimento os dois principais compostos que se formam são os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (CH).

De acordo com Metha e Monteiro (2001), as equações 2.6 e 2.7 apresentam, (de modo simplificado), o processo de formação do hidróxido de cálcio:



Metha e Monteiro (1994) consideram que o C-S-H, o responsável mais importante para a resistência da pasta, não apresenta uma composição fixa e o CH tem influência direta na durabilidade da pasta, principalmente sujeita a meios ácidos, por ser um composto solúvel.

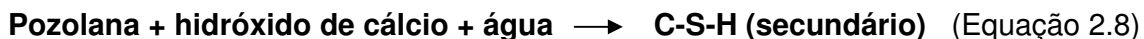
Para alguns pesquisadores a porcentagem de hidróxido de cálcio após a hidratação do cimento Portland pode chegar a 25%. Os cristais de CH são lixiviáveis quando acontece percolação de água pelo concreto, sendo então dissolvidos podem reagir com o CO₂ do ar, formando ácido carbônico que reage com alguns elementos da pasta hidratada formando o carbonato de cálcio. Esse composto consome os álcalis da pasta, conseqüentemente reduzindo o pH da mesma. Tal processo é conhecido como carbonatação, sendo deletério para o concreto armado.

Outra reação que pode acontecer envolvendo os cristais de CH é a combinação deste com os sulfatos presente na água do mar, formando o sulfato de cálcio que, combinando-se com a alumina do C₃A que gera o sulfoaluminato de cálcio, que é um composto expansivo, podendo gerar conseqüências catastróficas no concreto armado.

Dessa maneira, o cimento Portland comum pode apresentar algumas deficiências, principalmente sobre aspectos de durabilidade, podendo ocasionar gastos apreciáveis com recuperação de estruturas de concreto armado. Santos (2006) relata que o uso de pozolanas pode melhorar o desempenho dos aspectos de durabilidade de uma estrutura de concreto armado, sendo os cimentos com adições pozolânicas recomendados por seu uso específico.

Segundo Isaia, Furquim e Gastaldini (2009), quando se substitui parte de cimento por adições minerais, cada tipo atua de modo distinto, de acordo com a finura, atividade química, física ou ainda quantidade na mistura, tendo em vista que esses fatores proporcionam diferentes interações com a pasta. Alterações do tipo ou teor da adição mineral e da relação água/aglomerante (a/ag) influem na microestrutura dessas pastas e resultam em comportamento mecânico e de durabilidade distintos.

A equação 2.8 apresenta a reação pozolânica:



A grande importância das reações pozolânicas deve-se ao fato das mesmas consumir o hidróxido de cálcio (CH) dos produtos de hidratação do cimento e formar o C-S-H secundário (silicato de cálcio hidratado secundário) que possui menor densidade (menor relação C/S) quando comparado com o C-S-H formado nas reações de hidratação envolvendo o C₃S e o C₂S. Os produtos secundários de

hidratação contribuem para o refinamento dos poros e também promovem o refinamento dos grãos, onde a tendência é ocasionar o preenchimento dos vazios capilares grandes. Assim, aumenta-se a resistência da pasta de cimento e conseqüentemente a zona de transição pasta/agregado, que é ponto mais frágil da microestrutura do concreto.

Para que as reações pozolânicas ocorram de maneira eficiente, as pozolanas devem conter teores elevados de sílica amorfa, pois a mesma possui uma estrutura molecular na qual suas ligações são instáveis e vulneráveis ao hidróxido de cálcio, permitindo a reação entre eles. Acrescenta-se, ainda, a finura adequada desde que a velocidade das reações depende das dimensões dos grãos.

Mehta e Monteiro (2008), afirmam que a importância técnica dos cimentos pozolânicos deriva principalmente de três aspectos:

Primeiro, a reação é lenta, e, portanto, a taxa de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência são conseqüentemente lentas. Segundo, a reação consome óxido de cálcio, ao invés de produzi-lo, o que representa uma contribuição importante para a durabilidade da pasta endurecida de cimento frente a meios ácidos. Terceiro, estudos sobre a distribuição do tamanho dos poros dos cimentos de alto forno e pozolânico hidratados mostraram que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando assim a resistência e impermeabilidade do sistema. (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 220).

2.2.3 A cinza de casca de arroz

A cinza da casca do arroz é um resíduo agroindustrial proveniente da queima da casca do arroz, cuja energia se destina geralmente aos processos de secagem e beneficiamento dos grãos.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), cada tonelada de arroz gera 200kg de casca e conseqüentemente 40kg de cinza, onde a produção brasileira tem potencial para gerar aproximadamente 458 mil toneladas de cinza de casca de arroz (CCA) por ano, sendo um valor bastante considerável.

Outro ponto relevante da casca de arroz é o seu poder calorífico. De acordo com a tabela 2.4, a cinza possui o poder calorífico inferior (PCI) de 3000 kcal/kg, sendo um resíduo com bom potencial energético, atingindo mais de um terço da energia produzida pelo óleo diesel.

Tabela 2.4 – Poder calorífico inferior dos principais combustíveis utilizados para produzir energia

Combustível	Poder Calorífico Inferior	Unidade
Álcool de cana	5500	kcal/l
Casca de arroz (12% água)	3300	kcal/kg
Casca de soja	3300	kcal/kg
Bagaço de cana (20% H ₂ O)	3200	kcal/kg
Bambu (10% água)	3700	kcal/kg
Carvão mineral - Charqueadas/ RS	3100	kcal/kg
Borra de café	1750	kcal/kg
Lenha (40% água)	2400	kcal/kg
Óleo diesel	8620	kcal/kg
Gás GLP (50%)	11025	kcal/kg
Coque de lenha	7600	kcal/kg

Fonte: Poder calorífico inferior (AALBORG INDUSTRIES, 2013).

Em relação ao aspecto físico, a casca de arroz possui uma capa protetora lenhosa que se forma durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume. Já a em sua composição química, Mehta (1992) descreve que a casca do arroz possui alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra. O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98%, em massa, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca (HOUSTON, 1972). A lignina e a celulose são removidas durante a queima da casca (NETTO, 2006).

Segundo Neville (1997), a casca de arroz tem alto teor de sílica e com o tratamento a temperatura entre 500 °C e 700 °C resulta em um material amorfo com uma estrutura porosa e de baixa densidade. Assim, a área específica pode chegar a 50.000 m²/kg, mesmo com partículas relativamente grandes: 10 µm a 75 µm.

Não somente a casca como também a cinza de casca de arroz não são, na maioria das vezes aproveitadas para outros fins, sendo descartado em aterros ou em locais de mananciais aquíferos, o que pode resultar em danoso efeito de poluição para o ambiente, além de ser antiestético (Figura 2.7).



Figura 2.7 – Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual - Pelotas, RS
Fonte: Pouey (2006).

Para Prudêncio, Santos e Dafico (2003), é inaceitável o não reaproveitamento da CCA, visto que a mesma é disponibilizada em grande quantidade pela indústria de arroz em vários estados do país. A utilização da cinza de casca de arroz é um tema amplamente estudado por pesquisadores do mundo inteiro, tendo ganhado lugar de destaque nos últimos anos para uso não só da indústria da construção civil como em outros setores.

2.2.3.1 A reatividade da cinza de casca de arroz

Os principais fatores determinantes para a reatividade da cinza de casca de arroz (CCA) são o controle da temperatura de queima e a moagem da CCA (finura).

Santos (2006) entende que os parâmetros que definem uma CCA de boa reatividade são o tipo de queima empregado (a céu aberto, fornalha tipo grelha ou leito fluidizado), a temperatura de queima e tempo de exposição durante o processo. O autor ainda ressalta que a variação de superfície específica da CCA em função da temperatura da combustão e do tempo de exposição a essa temperatura, são os fatores que definem a reatividade da cinza para ser utilizadas em concretos.

Feng et al. (2003), constataram que realizando a queima controlada e moagem adequada da CCA, a mesma possui alta atividade pozolânica, melhorando as propriedades mecânicas e variáveis de durabilidade de concretos com determinados teores de substituição de cimento por CCA.

Segundo Silveira (1996), a CCA pode apresentar colorações que variam do cinza, preto ao branco rosado, que são determinadas pelo processo de combustão e pelas mudanças estruturais diante as mudanças de temperatura. Quanto maior o teor de carbono, mais escura é cinza e menor é a reatividade. Já a coloração branca indicaria a oxidação total do carbono.

Agopyan (1991 apud POUHEY, 2006) verificou que o tipo de queima altera significativamente a microestrutura da CCA. A figura 2.8 apresenta as micrografias de uma mesma cinza produzida em leito fluidizado e forno comum. A cinza comum possui uma fração de estrutura compacta em função do longo período no forno. Já a cinza obtida no leito fluidizado apresenta uma estrutura porosa, semelhante a da própria casca.

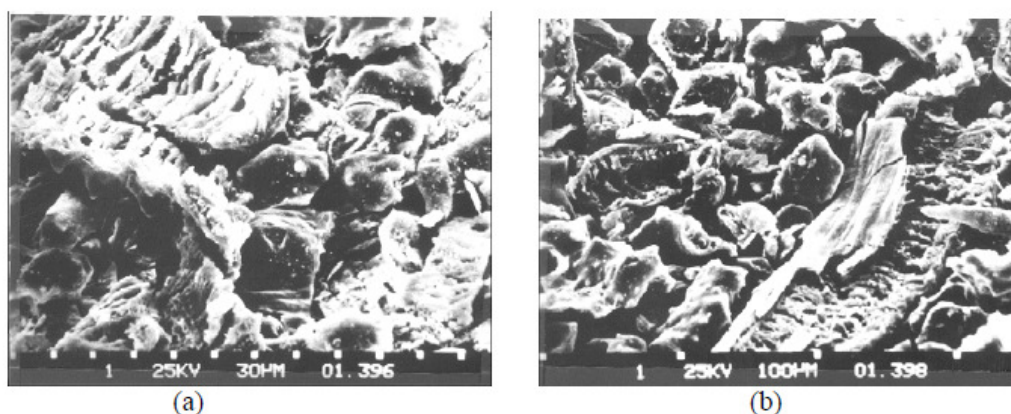


Figura 2.8 – Micrografias de cinza de casca de arroz – (a) produzida em forno comum; (b) produzida em leito fluidizado
Fonte: Agopyan (1991 apud POUHEY, 2006).

Isaia (1995) e Cordeiro (2009) citam autores que estudaram a influência das condições de temperatura e tempo de exposição no processo de combustão da CCA:

- Hanafi *et al.* (1980), estudando cinzas obtidas em temperaturas que variam de 500 °C a 1400 °C, constataram que a partir dos 800 °C ocorre um desenvolvimento de caráter cristalino;
- Hwang e Wu (1989) apresentaram as propriedades físicas e mecânicas das pastas e argamassas de cimento com cinza de casca de arroz queimadas entre 400 e 1200 °C;

- Boateng e Skeete (1990) relatam que a temperatura de queima deve se manter entre 800 e 900°C para a cinza se apresentar amorfa e reativa;
- Sugita (1992) patenteou dois diferentes processos de queima de casca de arroz, visando obter cinzas com cor branca e altamente reativas. Um dos processos emprega duas fornalhas rotativas ligadas em série, onde a queima é realizada em duas etapas e o outro, um dispositivo onde a casca é disposta em uma pilha de forma cônica em torno de uma chaminé central e então queimada. A função da chaminé é propiciar a circulação do ar na massa de casca em processo de queima, garantindo oxigênio necessário às reações de combustão;
- Sugita *et al.* (1993) obtiveram em seus estudos maior atividade pozolânica para temperaturas entre a 600 °C e 500 °C e por tempo não superior a 60 minutos. Para estes autores, a melhor temperatura de queima encontra-se na faixa de 400 °C a 660 °C.

Zhang e Malhotra (1995) verificaram que a cinza de casca de arroz possui alta pozolanicidade, principalmente por apresentar grande quantidade de sílica amorfa, podendo ser utilizada como substituição parcial ao cimento. Porém, devido ao fato da CCA apresentar elevada superfície específica, a mesma requer grandes quantidades de aditivo superplastificantes.

A figura 2.9 faz parte da pesquisa de Duart (2008), que foi integrante deste mesmo projeto de pesquisa desta dissertação, porém com idades menores. Nesta figura, observa-se o difratograma de uma CCA amorfa, onde a mesma apresenta picos cristalinos de Quartzo (Q) e de Cristobalita (C), resultado de uma queima não controlada da casca de arroz.

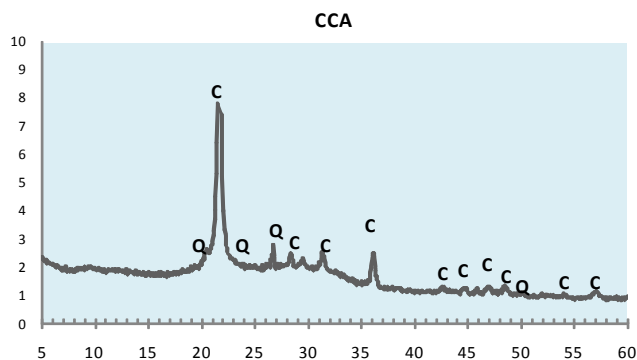


Figura 2.9 – Difração de Raios-X da CCA
Fonte: Duart (2008).

A figura 2.10, também complementa a pesquisa de Duart (2008) e refere-se à microscopia eletrônica por varredura (MEV), onde se observa a estrutura porosa da CCAN, semelhante a uma esponja. Esta característica da CCA é importante, pois é responsável pela absorção da água de amassamento e também implica em porosidade maior quando submetido o concreto ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

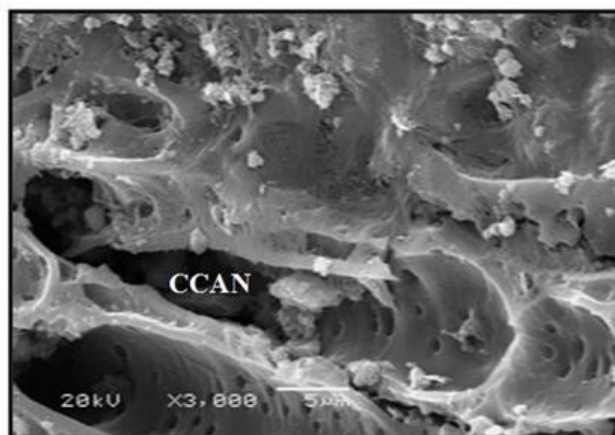


Figura 2.10 – Micrografia concreto com 25% de substituição de cimento por CCAN, 3000X, 91 dias
Fonte: Duart (2008).

James e Rao (1986) constataram que a temperatura da queima é o fator preponderante na reatividade da CCA com a cal, visto que as cinzas com áreas superficiais elevados e conseqüentemente, pequenos cristais e tamanho de partículas menores possuem alta reatividade com a cal. Já o tempo de queima não apresentou efeito significativo na reatividade.

Prudêncio e Santos (1996 apud TRINDADE, 2011), através dos resultados obtidos no ensaio de IAP com cimento, comprovaram que o índice de atividade pozolânica da CCA residual aumenta com o tempo de moagem, que ocasiona o aumento da superfície específica, até o limite de 4 horas. Depois desse período ocorre um decréscimo no índice, embora a superfície específica continue aumentando. Esse comportamento não era esperado, mas uma possível explicação é que o aumento da superfície específica dificulta a dispersão da cinza na argamassa. Dessa maneira, as partículas da cinza acabam se agrupando, formando grânulos acabam não reagindo plenamente com o hidróxido de cálcio (CH) liberado no processo de hidratação do cimento.

2.2.3.2 A finura da CCA

A moagem promove a modificação da estrutura da CCA, alterando suas propriedades físicas e químicas, onde se destaca a finura, pois juntamente com a temperatura e tempo de queima, é o principal parâmetro na atividade pozolânica dessa adição mineral. É consenso entre os pesquisadores que o processo de moagem é necessário para melhorar a reatividade da cinza de casca de arroz, porém devido ao maior custo desse processo, existe aparente pouco interesse por parte das empresas beneficiadoras do grão.

Guedert (1989 apud CORDEIRO, 2009) relata que o crescimento da área superficial está diretamente ligado ao tempo de moagem, e que este influencia no crescimento da resistência à compressão (Figura 2.11). Essa figura mostra que o aumento da temperatura de queima aumentaria a cristalinidade das partículas e, logo, maior dificuldade de moagem (maior dureza).

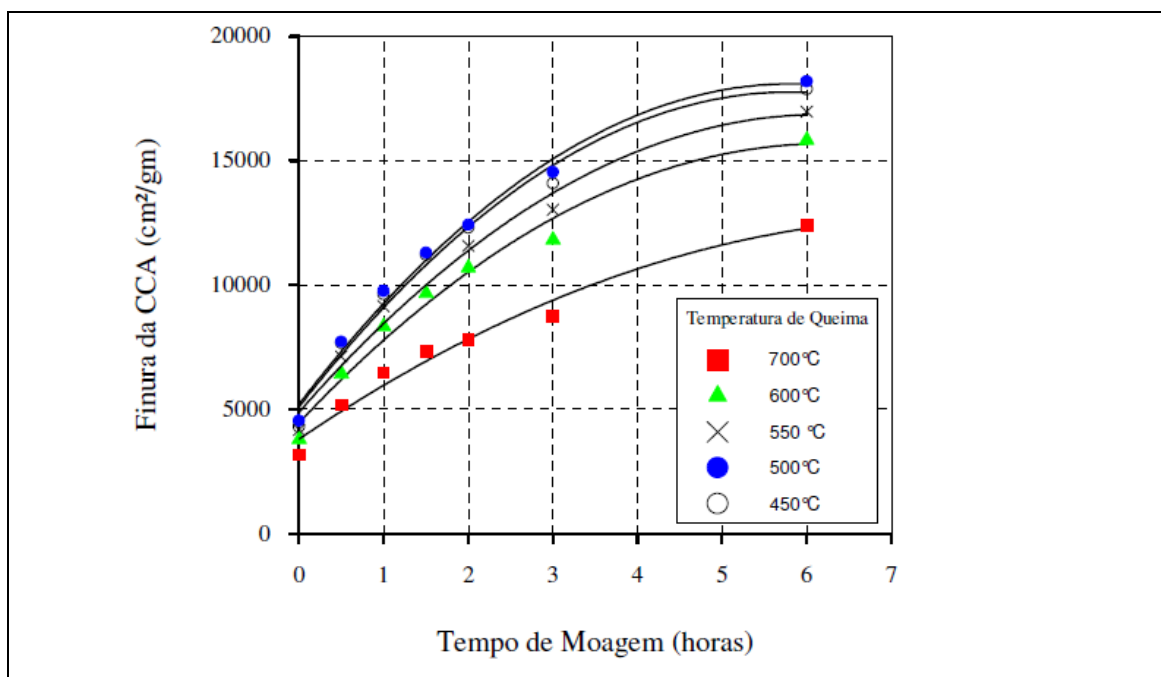


Figura 2.11 – Relação entre o tempo de moagem e a finura da casca de arroz, queimadas a várias temperaturas por duas horas
 Fonte: Al-Khalaf e Yousift (1984 apud SILVEIRA, 1996).

Al-Khalaf e Yousift (1984 apud SILVEIRA, 1996) e Cervo (2002) verificaram que a finura da cinza de casca de arroz aumenta com o aumento no tempo de

moagem da cinza (expressa em termos de superfície específica), sendo aplicada para todas as temperaturas de queima.

De acordo com a figura 2.11 as finuras mais elevadas ficaram entre os temperaturas de queima de 450 °C e 500 °C. Quando se tem um mesmo tempo de moagem, o aumento na temperatura de queima reduz consideravelmente a superfície específica da cinza, indicando que as partículas de carbono são mais finas e têm maior área específica do que as partículas de sílica.

Para Prudêncio Jr. et al. (2003), de acordo com a figura 2.12, a partir de um determinado tamanho da partícula, o índice de pozolanidade tende a cair. O autor relata que este é, provavelmente, consequência da dificuldade de dispersar partículas muito finas.

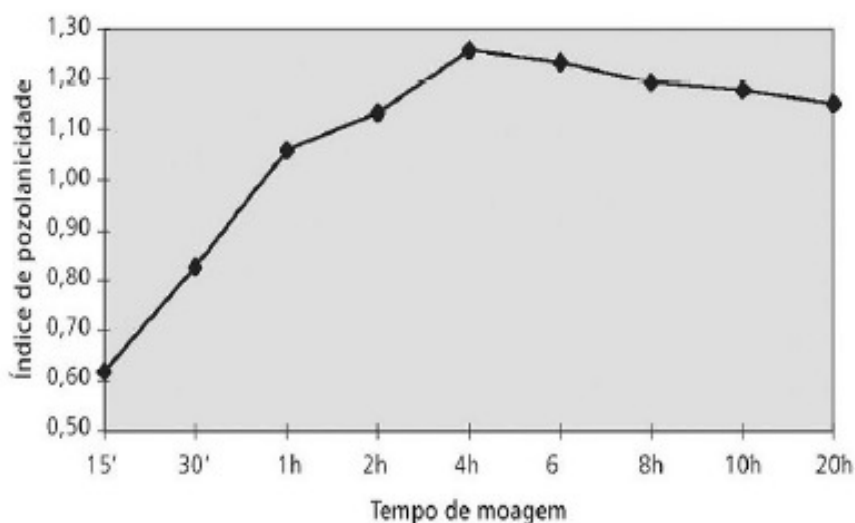


Figura 2.12 – Variação do índice de atividade pozolânica (IAP) com o tempo de moagem

Fonte: Santos (1997 apud PRUDÊNCIO JR., 2003).

Isaia (1995) afirma que a pozolanidade e a finura são as principais propriedades que influem no desempenho da cinza volante, da sílica ativa e da cinza de casca de arroz. Adicionalmente, está a influência da quantidade de pozolana e sua composição granulométrica, que podem compensar parcialmente a menor reatividade ou finura da pozolana.

Santos (1997) entende que o tempo de moagem define diferentes superfícies específicas e que existe um tempo ótimo de moagem para que a cinza de casca de arroz atinja a máxima pozolanidade. A partir do momento em que esse tempo

ótimo é ultrapassado, ocorre um grande aumento da área específica, podendo dificultar a dispersão de pozolana na pasta, comprometendo o desempenho final.

2.3 Influência da cinza de casca de arroz (CCA) no concreto frente às variáveis estudadas

2.3.1 Propriedades mecânicas

2.3.1.1 Resistência à compressão axial

Isaia (1995) relata que a ação química obtida pela reação pozolânica reforça a ação física, segmentando em maior grau os poros, e à medida que a idade aumenta, refinando os grãos de hidróxido de cálcio e os vazios da pasta. A partir de 1 a 3 dias já é possível observar as modificações na estrutura, devido à alta reatividade das partículas de cinza de casca de arroz, pois as mesmas induzem a formação mais rápida dos compostos hidratados. O autor relata que com a adição das partículas finas da cinza de casca de arroz no concreto ocorre a segmentação dos poros maiores e redução do teor de hidróxido de cálcio combinado com a sílica, resultando uma interface pasta/agregado mais uniforme, promovendo resistência mais elevadas nas primeiras idades.

Para quantificar os efeitos físicos em pozolânicos da CCA, quando esta é comparada ao filler calcário (adição mineral inerte), Isaia et al. (2003) realizou um estudo em concretos somente com cimento como material aglomerante (referência) e em concretos com substituição parcial de cimento por CCA e filler calcário, com os teores de 12,5%, 25% e 50%, nas idades de 28 e 91 dias, com dois níveis de resistência, sendo eles 35 e 65 MPa. Foram determinados os teores de água quimicamente combinada e o teores de CH remanescente, além da resistência à compressão axial em base unitária (MPa por kg de cimento). Os resultados obtidos nessa pesquisa demonstraram a existência de uma ação combinada e sinérgica entre a hidratação do cimento Portland, a ação pozolânica e o efeito filler (físico) da CCA, onde as misturas contendo CCA apresentaram resistência à compressão unitária superiores à mistura referência.

Ismail et al. (1996 apud MISSAU, 2004) estudaram a influência da CCA em substituição parcial ao cimento em concretos. Os teores de substituição utilizados

foram de 10%, 20% e 30%. A CCA utilizada na pesquisa foi proveniente de um processo de queima com temperaturas de queima entre 400 °C e 700 °C, durante 1 hora. Foi verificado também o efeito da finura na resistência à compressão, onde após a queima as CCAs foram moídas em um moinho de bolas e peneiradas nas peneiras adotadas no estudo, sendo estas da de bitola 200 μm e 325 μm .

Os resultados dos ensaios de Ismail et al. (1996 apud MISSAU, 2004) são mostrados na figura 2.13, onde se observa que com o aumento da finura os níveis de resistência à compressão aumentaram para adições de 10%, 20% e 30%, respectivamente: 1,70%, 24,41% e 26,91% aos 3 dias; 8,19%, 16,42% e 23,88% aos 7 dias; 4,08%, 18,37% e 24,28% aos 28 dias; 1,79% e 18,34%, 32,78% aos 150 dias. Dessa maneira, verificou-se a influência do aumento da finura, principalmente para os teores de substituição mais elevados.

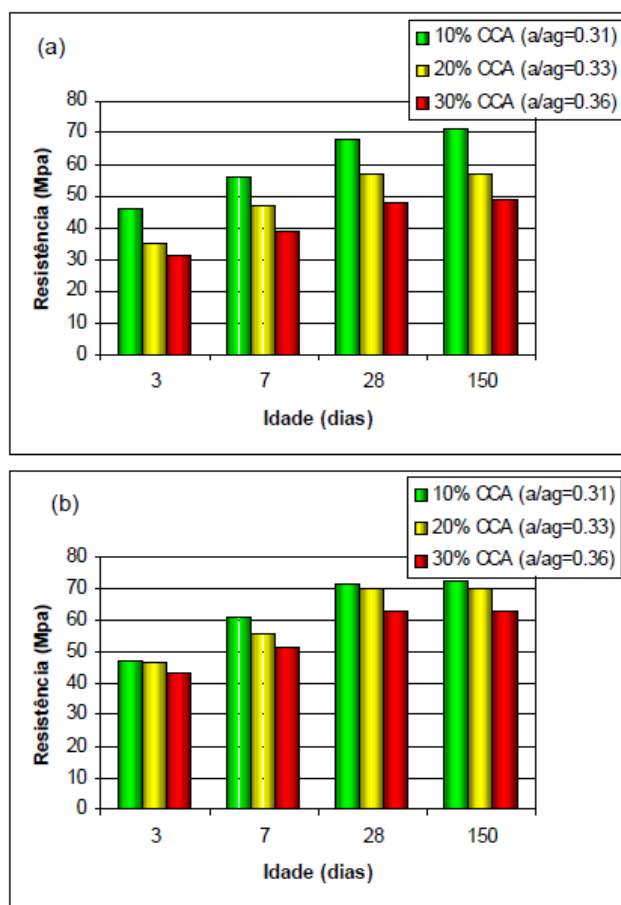


Figura 2.13 – Níveis de resistência à compressão: (a) Resistências à compressão das amostras compostas com CCA passantes na peneira 200. (b) Resistências à compressão das amostras compostas com CCA passantes na peneira 325
Fonte: Ismail et al. (1996 apud MISSAU, 2004).

Nilsen et al. (1992) realizaram pesquisa com pasta de cimento utilizando teor de substituição de cimento por CCA de 15%. Os resultados demonstraram que a CCA consome o CH na zona de transição, fato esse explicado pela reação rápida entre a sílica amorfa e o CH, reduzindo assim a espessura dessa interface.

Cesar (2011) realizou uma pesquisa em concretos com substituição de cimento nos teores de 20% para a cinza volante (em relação ao CII-Z), e 15% para a cinza de casca de arroz, natural e moída (em relação à mistura CII-Z + CV), sendo que a mistura com cinza de casca de arroz moída esta apresentou os maiores níveis de resistência aos 182 dias. A figura 2.14 apresenta os resultados, onde a autora ressalta que as misturas 15M e 15N são os valores de Pedrozo (2008).

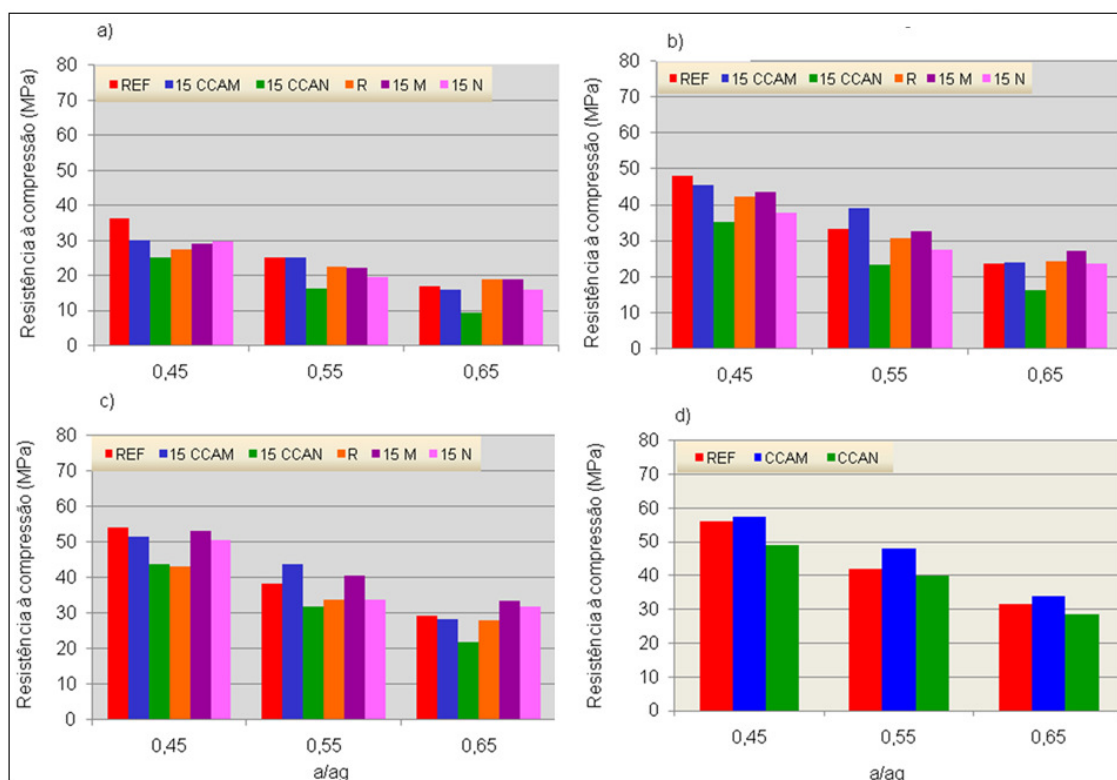


Figura 2.14 – Resistência à compressão *versus* relação a/ag, aos a) 7 dias, b) 28 dias, c) 91 dias e d) 182 dias

Fonte: Cesar (2011).

2.3.2 Microestrutura do concreto

O estudo da microestrutura do concreto é muito importante, onde se consegue verificar a nível micrométrico os compostos de hidratação do cimento e os

efeitos físico-químicos das adições minerais incorporadas ao concreto. Dessa maneira é possível avaliar de maneira mais efetiva a durabilidade das estruturas prevendo quais as manifestações patológicas que podem ocorrer no concreto, elaborando soluções para aumentar a sua vida útil, contribuindo com a segurança da estrutura, além de reduzir gastos com recuperação da mesma.

2.3.2.1 Estrutura de poros

As características do concreto são determinadas em função de elementos de dimensões em nível de micrômetro e nanômetro que compõem a pasta. A figura 2.15 apresenta os tamanhos característicos das fases sólidas e os vazios na pasta.

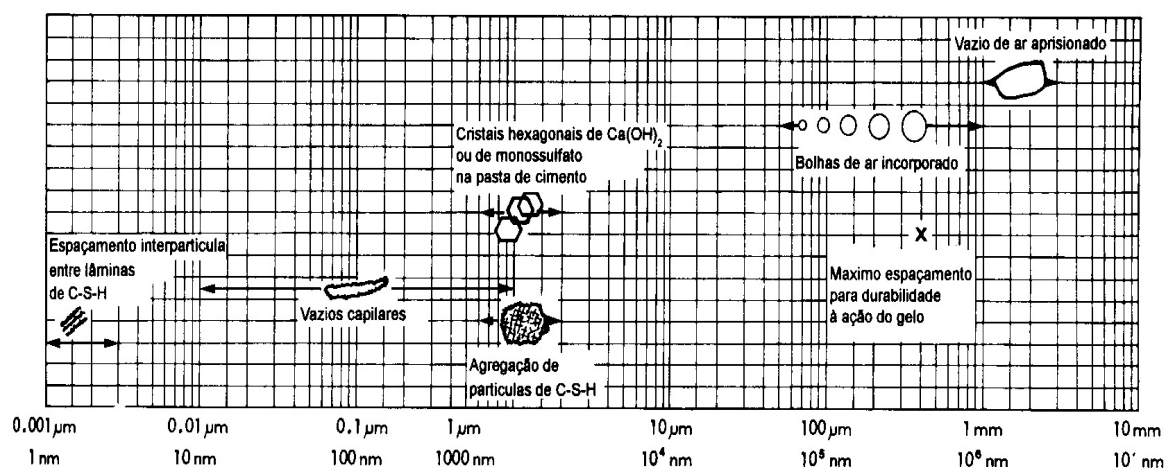


Figura 2.15 – Dimensões gerais dos componentes microestruturais do concreto
Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), os espaços que compõem a microestrutura do concreto são os seguintes:

- a) Espaço interlamelar de C-S-H: este tamanho de vazio é muito pequeno para ter um efeito desfavorável sobre a resistência da pasta, porém a água nesses pequenos vazios pode ser retidas por pontes de hidrogênio, e a sua remoção sob determinadas condições pode contribuir para a retração por secagem e para a fluência;
- b) Vazios capilares: representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta, sendo que quanto maior for o número de vazios capilares, maior é a porosidade da pasta. Possuem forma irregular;

- c) Ar incorporado: são de forma esférica e muito maiores que os vazios capilares. Podem ser induzidos propositadamente ao concreto com a finalidade de incorporar poros muito pequenos na pasta de cimento. São de dimensões que variam de 50 a 200 μm . Podem afetar negativamente a resistência e impermeabilidade da pasta;
- d) Vazios de ar aprisionado: são os vazios que se formam na pasta fresca de cimento durante a operação de mistura e podem afetar negativamente a resistência e impermeabilidade da pasta. As dimensões podem chegar a 3 mm.

O comportamento do concreto endurecido varia ao longo do tempo pela continuação do processo de hidratação, que resulta em uma estrutura complexa composta de grãos de cimentos anidros, produtos da hidratação e poros. A substituição parcial de cimento por adições minerais têm sido amplamente estudada por pesquisadores e a melhoria do desempenho nas variáveis da pasta endurecida é comprovada, inclusive na zona de transição do concreto, que segundo Mehta (1994) é o elo fraco da corrente e como a fase de limite de resistência do concreto.

Aitcin (2000) afirma que a microestrutura da zona de transição dos concretos convencionais, ou seja, concretos utilizando somente o cimento como material aglomerante é inerentemente fraca e impede o concreto de funcionar como um verdadeiro material composto.

Mehta e Malhotra (1994 apud SILVEIRA, 1996) constataram que as adições minerais, em especial a cinza de casca de arroz, promovem um considerável refinamento de poros, ou seja, transformam poros grandes em poros menores, reduzindo conseqüentemente a permeabilidade e a porosidade. Os resultados obtidos nessa pesquisa são apresentados na figura 2.16, onde se observa o grande refinamento dos poros no ensaio realizado na idade de um ano (365 dias) em comparação aos 28 dias.

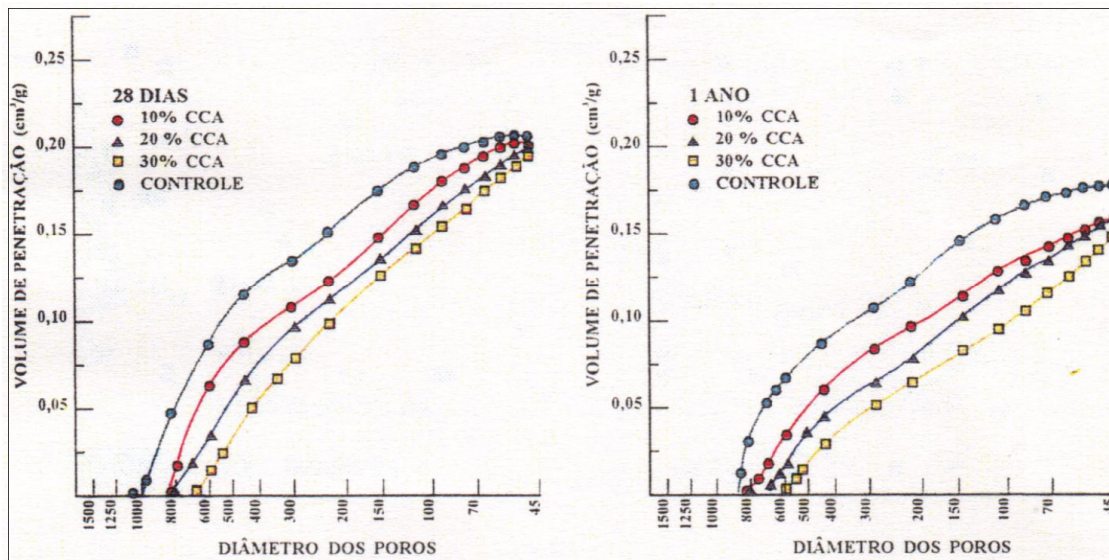


Figura 2.16 – Refinamento da pasta de cimento hidratada contendo CCA
 Fonte: Mehta e Malhotra (1994 apud SILVEIRA, 1996).

Segundo Jennings e Tennis (1994), a estrutura dos poros é complexa em função do próprio produto de hidratação do cimento, o C-S-H, é poroso. Assim, são definidos dois tipos de porosidade:

- a) Porosidade capilar: correspondente a grande porosidade remanescente entre as partículas de cimento hidratado, onde a mesma influência na permeabilidade e resistência mecânica;
- b) Porosidade do gel de C-S-H: é a porosidade mais fina geralmente menor que 10 μm , sendo que essa porosidade geralmente influencia nos mecanismos de fissuração e fluência.

De acordo com Calleja (1989 apud SILVEIRA, 1996), as matrizes de concreto que são originadas através da incorporação de cinza de casca de arroz ou sílica ativa, apresentam uma estrutura menos porosa, e conseqüentemente menos permeável, reduzindo a possibilidade do ataque de sulfatos.

Segundo Mindess e Young (1981), os poros se classificam baseados no diâmetro em capilares e poros de gel.

Os capilares são divididos em:

- a) Macroporos: diâmetros maiores que 50 μm ;
- b) Mesoporos: diâmetros maiores que 10 e menores que 50 μm ;
- c) Poros do gel: também conhecidos como microporos, onde os diâmetros são menores que 10 μm .

As características de resistência mecânica e permeabilidade são relacionadas aos macroporos e mesoporos enquanto que parâmetros como fluência são mais atribuídos aos poros do gel.

Neville (1997) afirma que além da porosidade total deve ser considerada a distribuição do tamanho dos poros. Geralmente, para uma mesma porosidade total, uma quantidade maior de poros menores resulta em uma maior resistência. Esse autor também afirma que os poros importantes para a permeabilidade são os de diâmetro no mínimo de 120 nm a 160 nm e contínuos. Poros descontínuos ou contendo água adsorvida não são importantes à permeabilidade.

2.3.2.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

A porosimetria por intrusão de mercúrio é baseada na lei da permeabilidade que domina o efeito de um líquido que penetra em pequenos poros.

Como o mercúrio é um material que não molha a superfície dos poros, a pressão de intrusão pode determinar o diâmetro dos poros, desde que se conheça o ângulo de contato entre o mercúrio e a amostra ensaiada (ROY et al., 1993).

O diâmetro do poro pela expressão de Washburn é dado pela equação 2.9, considerando líquidos como o mercúrio que não causam molhamento e que tenham poros cilíndricos:

$$D = - \left(\frac{1}{P} \right) 4 \gamma \cos \theta \quad (\text{Equação } 2.9)$$

Onde:

D - Diâmetro do poro.

P - Pressão aplicada.

γ - Tensão superficial.

θ - Ângulo de contato.

Como os poros raramente são cilíndricos, por isso, a equação acima constitui um modelo particular.

O mercúrio é forçado a entrar nos poros do material através da pressão

exercida no equipamento. O volume de mercúrio que penetra nos poros é obtido através de uma relação direta com a pressão aplicada.

A distribuição dos tamanhos dos poros é determinada pelo volume de mercúrio introduzido em cada incremento de pressão e a porosidade total é determinada pelo volume total introduzido (ABELL et al., 1999).

A PIM é muito usada, porém faz uma simplificação errônea de que o diâmetro dos poros é o mesmo dos canais que os interconectam, quando na realidade não são devido ao “efeito gargalo de garrafa”, em que o orifício de entrada é menor que o diâmetro interno do poro.

Outra limitação da PIM é que as amostras precisam ser secas para realização do ensaio o que muda a estrutura dos poros e o ângulo de contato.

2.3.2.3 Água quimicamente combinada

O ensaio de água quimicamente combinada é importante para verificações na microestrutura do concreto, visto a H_2O combinada está presente na estrutura dos compostos hidratados do cimento, sendo eles os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH), e demais compostos endurecidos da pasta cimentícia provenientes das reações de hidratação.

Mehta e Monteiro (2008) definem a água quimicamente combinada como:

É a água que é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Esta água não é perdida na secagem; é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento. (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 30).

Neville (1997) afirma que a água fica retida com diferentes graus de intensidade no cimento hidratado. Em um extremo, se tem água livre; em outro, água combinada quimicamente formando uma parte definida de compostos hidratados. Entre essas duas categorias existe água de gel retida de diversos outros modos. A água retida pelas forças superficiais das partículas de gel é denominada água de adsorção, e a parte dessa água retida entre as superfícies de certos planos de um cristal é denominada água intersticial ou zeolítica. A água da estrutura é a parte da água de cristalização não quimicamente associada com os principais constituintes da estrutura. A figura 2.17 apresenta a representação esquemática dos

tipos de água presente nos compostos hidratados do cimento.

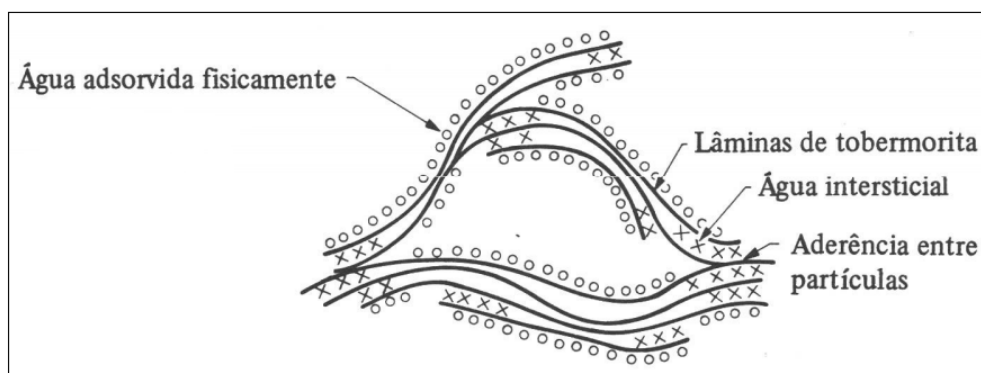


Figura 2.17 – Estrutura provável dos silicatos hidratados

Fonte: Neville (1997).

2.3.3 Durabilidade do concreto

2.3.3.1 Efeitos da CCA na penetração de cloretos

Conforme abordado anteriormente, os íons cloreto são os agentes agressivos mais comuns no que dizem respeito à corrosão os quais, para entrar em contato com a armadura, dependem da estrutura de poros e dos mecanismos de transporte de fluidos para penetrar no interior do concreto.

Nesse contexto, a CCA entra como um elemento que promove modificações na microestrutura do concreto, proporcionando o refinamento dos poros, uma maior compacidade na interface pasta/agregado (devido às partículas finas nessas adições) e pela formação de C-S-H secundário através do consumo de CH pelo efeito pozolânico da CCA. De acordo com Cerro (2002), o aumento na finura e do teor de pozolanas em substituição parcial ao cimento proporciona uma maior densificação e menor permeabilidade da pasta endurecida, e ainda diminui o teor de CH remanescente, proporcionando uma estrutura menos permeável e dificultando o ingresso de íons cloreto.

Um dos principais métodos para a determinação da penetração de cloretos é o proposto pela ASTM C 1202:2005, cujo mecanismo é de migração iônica que se baseia na carga elétrica que percorre o concreto durante o tempo de ensaio. Para Andrade et al. (1999), o ensaio pode ser influenciado pelos seguintes parâmetros:

- a) como vários íons formam a composição iônica, a corrente total não corresponderia somente aos íons cloreto;
- b) durante o ensaio pode ocorrer à elevação da temperatura da solução, influenciando a velocidade do fluxo dos íons;
- c) quando o fluxo de íons se inicia, os cloretos podem reagir com o C_3A do cimento, onde o fluxo constante seria conseguido somente após completadas todas as reações possíveis.

Mesmo com as críticas de alguns pesquisadores, o método ASTM é muito utilizado para determinar a penetração de cloretos. Neville (1997) acredita que esse método é uma boa ferramenta. Pedrozo (2008) sugere que o resultado obtido pelo método ASTM seja confirmado por um ensaio de longa duração como o ensaio de penetração de cloretos por imersão, pois segundo o autor esse ensaio expressa com maior precisão a realidade de campo.

Segundo Isaia (1996), a profundidade de penetração dos íons cloreto na matriz dos concretos possui uma relação inversa com a reatividade das pozolanas empregadas no traço e com a quantidade de pozolana presente na mistura.

Cesar (2011) investigou a penetração de cloretos pela ASTM C 1202:2005 em concretos com substituição parcial do cimento por 15% de CCA residual natural e moída e por 20% de cinza volante ao CII-Z. As misturas contendo CCA moída apresentaram menores cargas passantes enquanto que as misturas contendo CCA natural obtiveram desempenho inferior à mistura referência. A figura 2.18 apresenta os resultados obtidos por Cesar (2011), onde a autora ressalta que as misturas 15M e 15N são os valores de Pedrozo (2008).

Isaia (1995) investigou misturas compostas com 25% e 50% de cinza volante, 10% e 20% de sílica ativa e 10% e 30% de cinza de casca de arroz, com relações a/ag 0,3, 0,4 e 0,5, realizando as seguintes observações:

- a) o acréscimo na penetração de cloretos com o aumento da relação a/ag não é muito acentuada, quando comparada com igual variação da resistência à compressão;
- b) todas as misturas com pozolanas apresentaram decréscimo da corrente passante em relação ao concreto de referência, sendo esta diminuição de 1,2 a 10 vezes menor;
- c) para a CV, houve acentuado decréscimo na penetração de cloretos com a idade de 28 para os 91 dias, tendo a mistura com 50% de CV apresentado um

decréscimo de 1,5 para 3 vezes. O aumento no teor de substituição da CV de 25% para 50% diminuiu a penetração a estes íons;

d) os resultados obtidos com o uso de sílica ativa mostraram que tanto a evolução da idade quanto o aumento no teor de 10% para 20% não alterou significativamente a diminuição da penetração de cloretos, apresentando valores inferiores a 500 Coulombs. Esta adição se mostrou a mais efetiva, apresentando decréscimo de 5 a 10 vezes em relação à mistura de referência;

e) para as misturas com CCA, em níveis de substituição de 10% e 30%, os valores foram intermediários entre o da CV e da SA, sendo que o aumento na idade ou no teor de substituição de pozolana não afetou acentuadamente a diminuição da penetração de cloretos. O aumento de 10% para 30% de CCA diminuiu a penetração de 1,5 para 5,5 vezes.

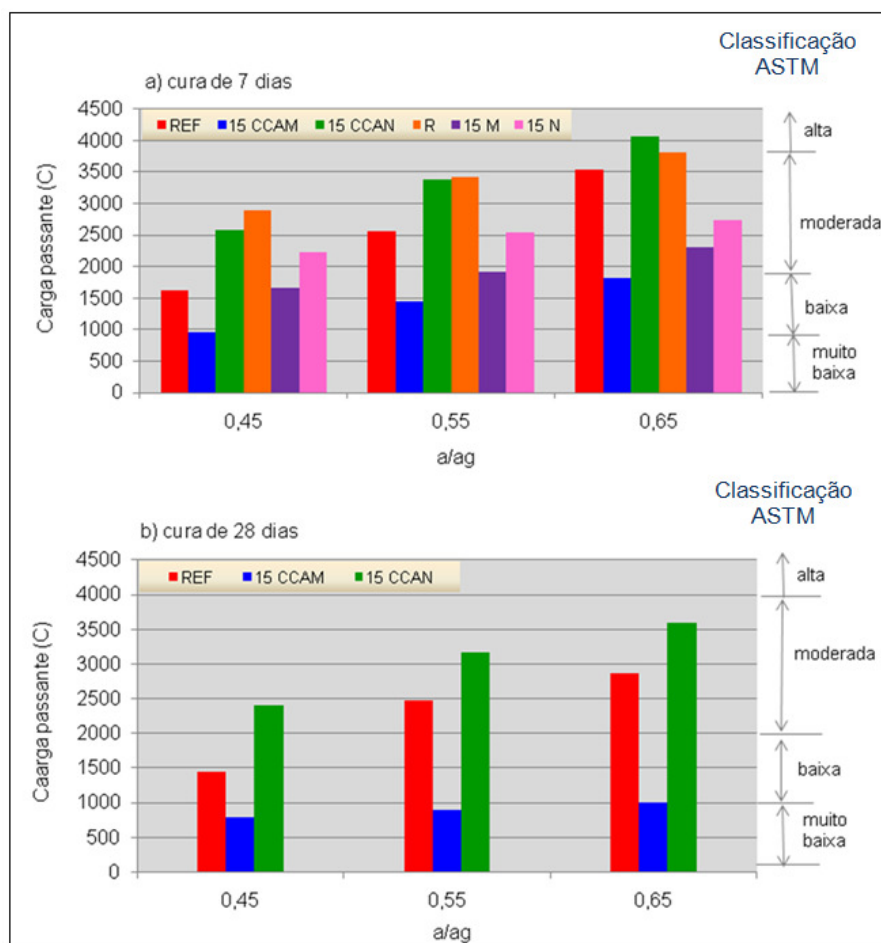


Figura 2.18 – Carga total passante em função das relações a/ag, para dois períodos de cura a) 7 dias e b) 28 dias – aos 91 dias
Fonte: Cesar (2011).

Pedrozo (2008) investigou a penetração acelerada de cloretos pela ATSM C 1202:2005 em concretos com 15% e 25% de substituição parcial de cimento por CCA moída e natural, sendo que este autor faz parte do mesmo projeto de pesquisa desta dissertação, realizando os ensaios em idades menores. De acordo com a figura 2.19, observa-se o efeito da finura nas quantidades de carga passante, sendo que as misturas contendo CCA moída apresentaram cargas passantes inferiores que as misturas com CCA natural.

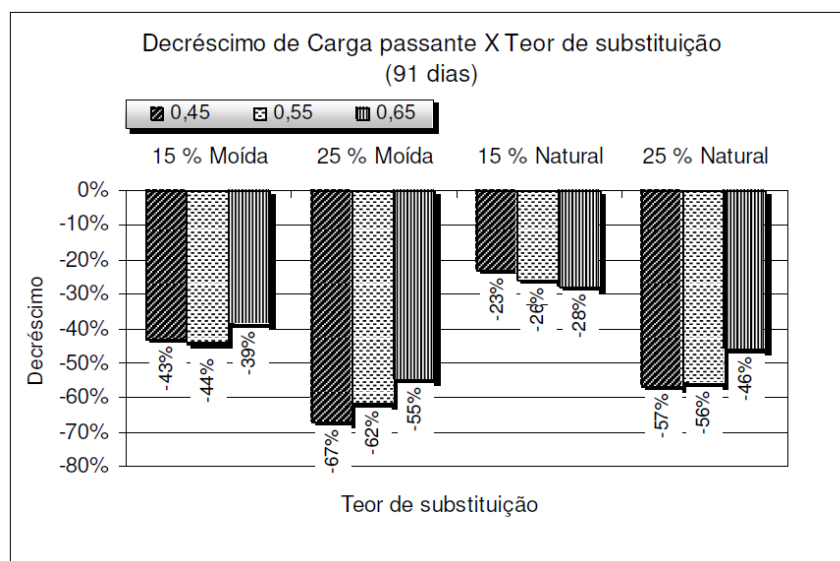


Figura 2.19 – Influência da utilização da CCA na carga passante, aos 91 dias
Fonte: Pedrozo (2008).

Isaia (1995) também determinou o teor total de cloretos retidos e observou que as misturas com sílica ativa apresentaram decréscimo de até 2 vezes na retenção de cloretos. As misturas contendo 10% e 30% de CCA apresentaram redução de 66% e 50%, respectivamente. A substituição do cimento por CV apresentou decréscimo de 66% em relação ao concreto sem adições. O aumento na idade de 28 para 91 dias proporcionou acréscimo no teor de Cl retido para as misturas com SA e 25% de CV, e decréscimo para as demais. A retenção de cloretos com o aumento no teor de pozolanas decresceu.

Para Talbot (1995), as adições minerais propiciam o refinamento da estrutura dos poros principalmente pela menor relação C/S do C-S-H formado, promovendo a inclusão dos íons Na^+ e K^+ na sua estrutura. Dessa forma, a penetração dos íons cloreto no concreto fica dificultada.

O efeito da cinza de casca de arroz frente à penetração de cloretos tem sido amplamente estudado por diversos pesquisadores, onde os resultados demonstram que a CCA promove melhorias no concreto, reduzindo consideravelmente as cargas dos íons passantes e a retenção de íons em geral, principalmente dos cloretos.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo apresenta a metodologia para a confecção dos protótipos de concreto utilizados na pesquisa. É abordada a caracterização dos materiais, o procedimento para a produção das misturas contendo cinza de casca de arroz e da mistura referência, contendo somente cimento como material aglomerante. Posteriormente são abordados os métodos de execução dos ensaios com o objetivo de determinar o comportamento dos concretos com adições minerais frente ao concreto referência.

A investigação experimental é o processo onde, através da manipulação de variáveis e condições que determinam os experimentos, se observa o efeito que as mudanças provocadas pelas variáveis do estudo causam em comparação à variável de referência ou paradigma.

A durabilidade das estruturas está ligada diretamente a sua capacidade de resistir à penetração dos agentes agressivos. A ação dos íons cloreto está diretamente ligada com a rede porosa do concreto. Dessa maneira, essa porosidade irá determinar a penetração dos íons cloreto, que pode provocar a despassivação da armadura e posterior instalação dos processos associados à corrosão.

Assim, como o intuito de avaliar o desempenho da cinza de casca de arroz *in natura* (não moída) e moída em concretos de cimento Portland realizaram-se os ensaios acelerado de penetração de cloretos, segundo ASTM C 1202:2005, e também o ensaio de determinação das quantidades de cloreto retido dos concretos submetidos ao ensaio acelerado de penetração de cloretos, segundo ASTM C 1152:2004. Simultaneamente a estes, foram realizados ensaios de resistência à compressão de acordo com os métodos de ensaio NBR 5738 e 5739 (ABNT, 1993 e 1994), ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, ensaio de água quimicamente combinada. Dessa forma, os ensaios possibilitaram a análise dos resultados conjuntamente para as diferentes misturas com cinza de casca de arroz e para a mistura referência.

Para avaliar as condições reais de exposição de uma estrutura de concreto, foram moldados protótipos com teores de substituição de cimento por CCA de 15%

e 25%, no estado natural e moída, totalizando com o concreto de referência, cinco misturas aglomerantes.

A presente pesquisa constou de três etapas. A Etapa I diz respeito aos Estudos Preliminares, onde foram escolhidas cinco empresas beneficiadoras de arroz da região de Santa Maria. Após ensaios prévios de compressão axial de argamassas produzidas utilizando as CCAs coletadas, foi escolhida a amostra de uma empresa beneficiadora de arroz que foi considerada como representativa de cinza de casca de arroz beneficiada em grande instalação industrial. A origem da cinza foi a queima da casca de arroz sem controle de temperatura, aeração e tempo de exposição ao fogo, justamente para verificar a viabilidade técnica e econômica do uso dessa cinza em concreto estrutural. Cada amostra coletada foi subdividida em duas subamostras, sendo uma delas moída em laboratório durante uma hora, segundo procedimento padrão em pesquisas anteriores no GEPECON e a outra (natural) sofreu somente secagem em estufa para remoção da umidade.

Na Etapa II, que se refere ao estudo do concreto em laboratório, foram realizados os ensaios de trabalhabilidade do concreto fresco, abordando desde a ordem de colocação dos materiais na betoneira até as quantidades de aditivo utilizadas. Nessa etapa, também foram moldados os protótipos de concreto que foram utilizados na Etapa III, objeto da presente pesquisa.

3.2 Variáveis da pesquisa

As variáveis envolvidas na pesquisa são definidas a seguir:

a) Variáveis independentes: Relacionam-se à constituição do concreto, determinando seu grau de compacidade. São elas:

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

- Idade de ensaio dos protótipos: 540 dias para ensaios de resistência à compressão, penetração de cloretos através do ensaio acelerado, água quimicamente combinada, porosimetria por intrusão de mercúrio e determinação do cloreto retido.

b) Variáveis intervenientes: Modificam o comportamento das variáveis independentes e, assim, alterando os resultados das variáveis dependentes. São elas:

- Teor de adição: foram adotados os teores de 15% e 25% de cinza de casca de arroz como substituição parcial, em massa, de cimento Portland.

- Finura: a cinza de casca de arroz foi utilizada no estado natural, sem moagem e moída por 1h em moinho de bolas.

c) Variáveis dependentes: São diretamente influenciadas pelas variáveis independentes. São elas:

- No concreto:

- Resistência à compressão axial (NBR 5738 e NBR 5739);
- Resistência à penetração de íons cloreto (ASTM C 1202);
- Cloretos totais retidos (ASTM C 1152);
- Água quimicamente combinada (MARSH; DAY, 1988; SELLEVOLD; JUSTNES, 1993 apud ISAIA, 1995);
- Porosimetria por intrusão de mercúrio.

3.3 Caracterização dos materiais

Com o objetivo de realizar as dosagens na Etapa II, foi realizada na Etapa I uma análise das propriedades físicas e químicas dos materiais envolvidos.

3.3.1 Materiais cimentícios

Foram utilizados dois tipos de materiais cimentícios: o cimento CII F – 32 e CCA queimada sem controle de temperatura, moída por uma hora e no estado natural.

Segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991), o cimento CII F – 32 possui em sua composição de 90 a 94% de clínquer + sulfatos de cálcio e 6 a 10% de material carbonático, sendo este o filler. O filler possui um efeito lubrificante e não reage quimicamente com a água, não apresentando propriedades cimentantes apreciáveis. Assim, o CII F – 32 não apresenta uma adição pozolânica que possa prejudicar a análise do desempenho da CCA nos ensaios, sendo o mesmo adotado na pesquisa. Esse cimento possui um calor de hidratação mais baixo do que o cimento Portland comum e o cimento Portland de alta resistência inicial, sendo que os mesmos também não possuem adições pozolânicas. É indicado para obras de concreto-

massa e para obras de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples e armado, não sendo recomendado para obras de desforma rápida sem cura térmica, concretos protendido pré-tensionados e meios fortemente agressivos.

A cinza de casca de arroz adotada na pesquisa foi escolhida através do melhor desempenho no ensaio resistência à compressão axial de argamassas, com 0%, 15% e 30 % de teores de substituição das CCAs pelo cimento CII F – 32, sendo que a mesma encontra-se em boa disponibilidade sazonal e fácil acesso. A casca de arroz cuja cinza é proveniente, é usada na secagem de grãos armazenados em silos, sendo descartada a céu aberto.

Após o recolhimento das amostras de CCA, as mesmas foram colocadas na estufa a 105°C durante 48 horas para retirar a umidade e serem utilizadas posteriormente na pesquisa. Para se obter a cinza moída, foi adotado uma moagem de 60min em moinho de bolas. No ensaio de caracterização a CCA ao natural passou por um processo de moagem na betoneira a seco com os agregados graúdos pelo mesmo intervalo de tempo das misturas. Tal fato foi adotado para simular o procedimento da betoneira quando se produz concreto.

Para a caracterização dos aglomerantes, foram realizados os ensaios cujos resultados estão nas tabelas 3.1 a 3.4 e nas figuras 3.1 e 3.2.

- Massa específica: NM 23:2000;
- Finura # 0,075 mm: ABNT NBR 11579:1991;
- 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: NM 65:2002;
- Resistência à compressão: ABNT NBR 7215:1997;
- Distribuição granulométrica à laser: ABCP/SP - Método PO-GT-1043;
- Pozolanidade de Cimento Portland Pozolânico – ABCP/SP - Método PO-GT-3004

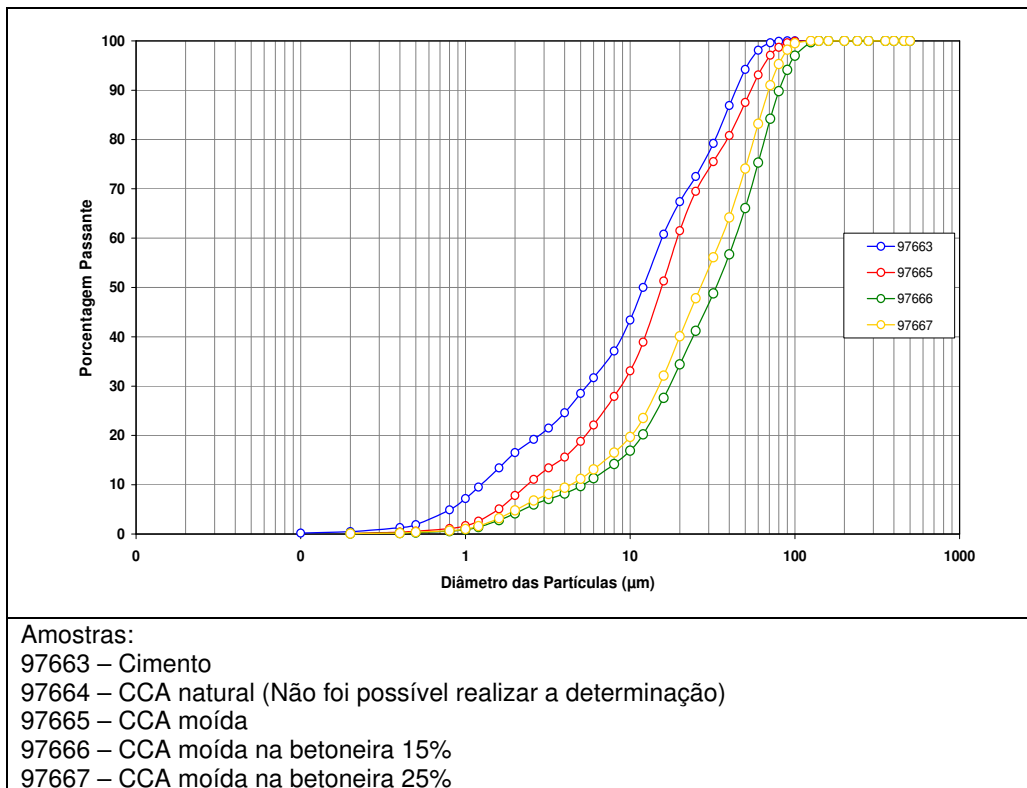


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica a laser dos aglomerantes

Pela figura 3.1 e tabela 3.1 observa-se que o cimento foi o material cimentício que apresentou maior finura, seguido da CCA moída e, subseqüentemente, com 25% e 15% de CCA natural. Observa-se também que há tendência de aumento do diâmetro médio das partículas à medida que reduz o teor de CCAN na mistura, devido à moagem em betoneira apresentar energia de moagem menor do que a produzida em moinho de bolas.

Tabela 3.1 – Características físicas dos aglomerantes

Grandeza física		Cimento	CCAN	CCAM	CCAN 15 % ¹	CCAN 25% ²
Massa específica (Kg/dm ³)		3,06	1,41	2,09	1,96	1,93
Área específica BET (m ² /g)		1,44	19,67	49,25	44,41	45,01
Resíduo na # 0,075mm (%)		2,98	82,18	4,97	9,09	4,84
Início de Pega (min)		157	-	-	-	-
Fim de pega (min)		205	-	-	-	-
Resistência a compressão (MPa)						
1dia		15,0	-	-	-	-
3 dias		26,3	-	-	-	-
7dias		32,2	-	-	-	-
28 dias		40	-	-	-	-
Dimensões características	Diâmetro médio (µm)	11,50	-	15,54	33,19	26,70
	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	1,28	-	2,38	5,19	4,34
	Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)	41,57	-	54,14	80,51	69,39

¹ CCAN, no teor de 15%, moída por 15 minutos na betoneira com agregados graúdos.

² CCAN, no teor de 25%, moída por 15 minutos na betoneira com agregados graúdos.

Tabela 3.2 – 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

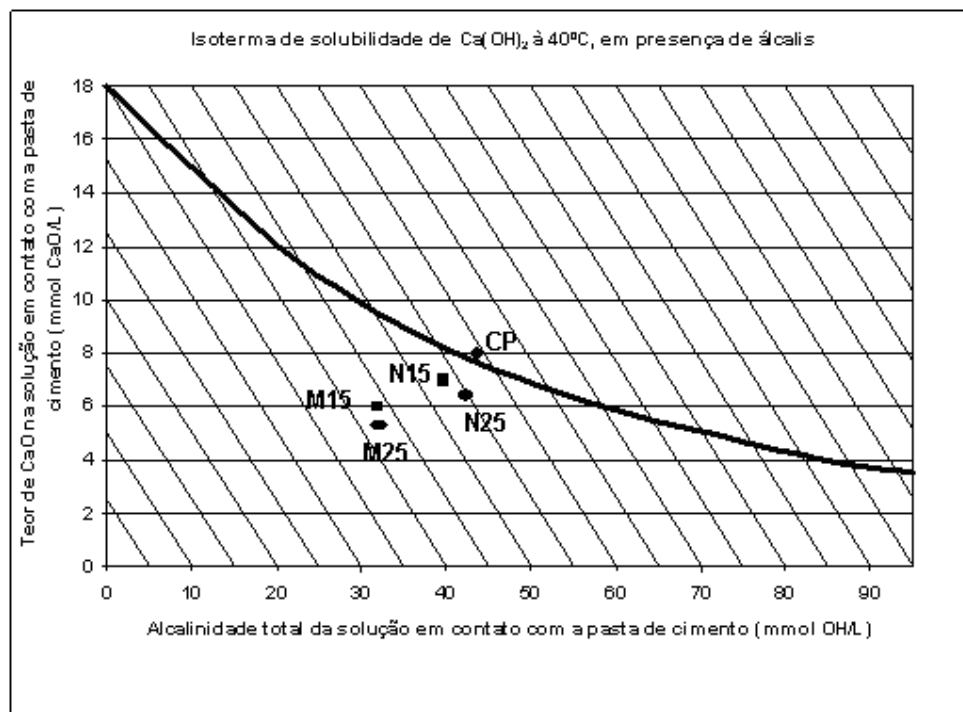


Figura 3.2 – Pozolanicidade de cimento pozolânico

Tabela 3.3 – Convenções adotadas no ensaio de pozolanicidade

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 3.4 – Índice de atividade Pozolânica (FRATINI)

Misturas	Atividade Pozolânica		Distância ("d" cm)	Índice de atividade pozolanica 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).

A figura 3.2 e tabela 3.4 mostram que os índices de atividade pozolânica (IAP) foram maiores para a CCAM com 25% do que com 15% e, ainda para a CCAN do mesmo modo, embora em menores valores. Este comportamento está de acordo com o exposto por Isaia (1995) em que o IAP é proporcional à quantidade de pozolana presente na mistura dos materiais cimentícios. Observa-se, ainda, conforme mostra a tabela 3.1, que quanto maior é a finura da CCA (menor dimensão dos grãos e maior superfície específica BET), maior é o índice de atividade pozolânica.

3.3.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado na confecção dos protótipos foi proveniente do município de Santa Maria – RS, sendo o mesmo areia natural de origem quartzosa. O agregado passou por peneiramento na peneira # 4,8mm, seco em estufa a 105 °C e posteriormente estocado em recipientes tampados. Com o objetivo de se obter a composição granulométrica mais adequada, foram utilizadas areia grossa e areia fina.

O agregado graúdo utilizado foi proveniente do município de Itaara – RS, constituído de pedra britada de rocha diabásica. Para se obter a melhor composição granulométrica, da mesma maneira que o agregado miúdo, foram utilizados dois tipos de agregados graúdos.

A composição granulométrica mais adequada é aquela em que é promovido o maior fechamento dos vazios do concreto fresco, com o menor consumo de pasta. As melhores porcentagens encontradas foram 50% de agregado A + 50% de agregado B, tanto para o agregado graúdo quanto para o miúdo, obtidas por meio de ensaios da massa unitária compactada seca conforme a norma NM 45:2006.

Os ensaios realizados com os agregados foram os seguintes:

- Composição granulométrica: NM 248:2003;
- Massa específica e massa específica aparente - agregado miúdo: NM 52:2003;
- Massa unitária e volume de vazios: NM 45:2006;
- Absorção de água do agregado miúdo: NM 30:2001;

- Índice de forma pelo paquímetro - agregado graúdo: ABNT NBR 7809:2006;
- Inchamento da areia: ABNT NBR 6467:2006.

Tabela 3.5 – 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

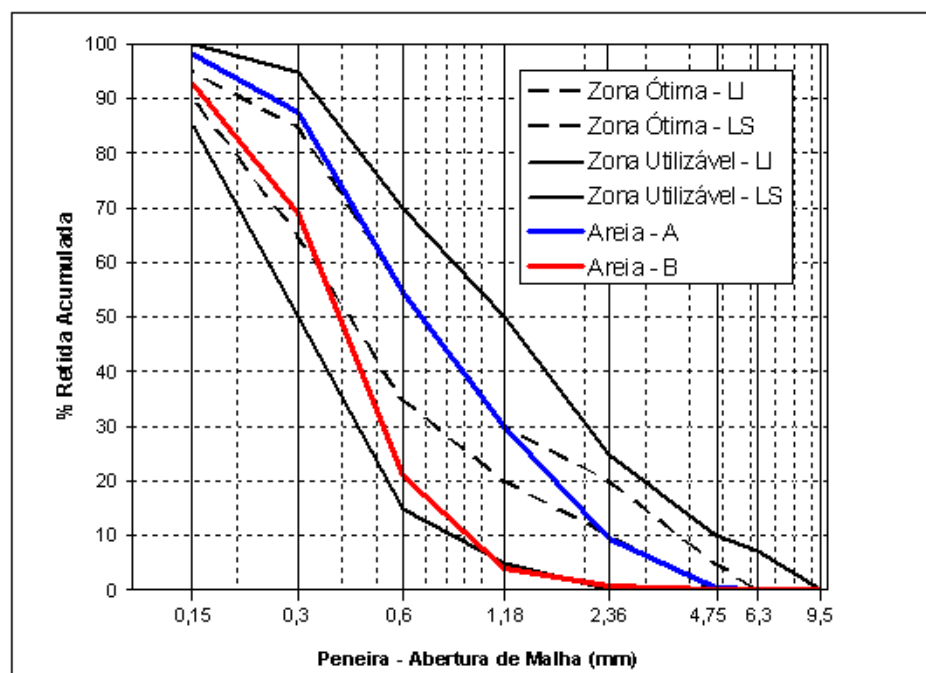


Figura 3.3 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos

Observa-se que a areia resultante da composição das areias A e B apresentou fração de grãos grossos (até 1,2 mm) dentro da zona utilizável e a fração de grãos finos (inferiores a 1,2 mm) na zona ótima da norma ABNT, conforme especificações da NBR 7211:2005.

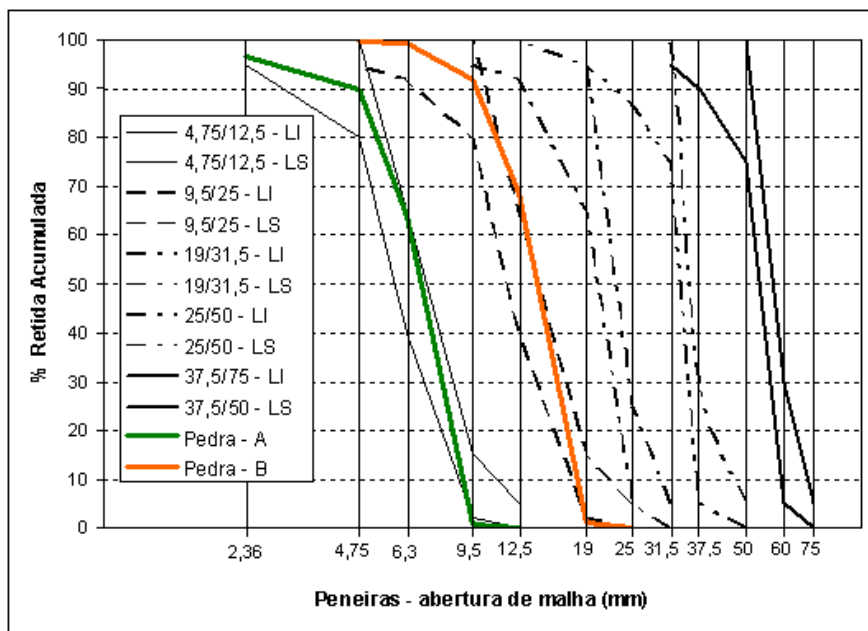


Figura 3.4 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos

Observa-se que a areia resultante da composição das areias A e B apresentou fração de grãos grossos (até 1,2 mm) dentro da zona utilizável e a fração de grãos finos (inferiores a 1,2 mm) na zona ótima da norma ABNT, conforme especificações da NBR 7211:2005.

3.3.3 Aditivo

Com o objetivo de manter a trabalhabilidade das misturas, foi utilizado o GLENIUM 51 da MBT, que é um aditivo superplastificante de 3ª geração, a base de policarboxilatos, isentos de cloretos conforme ASTM C 494 para que se alcançasse a faixa de consistência de 80 ± 20 mm, especificada para o concreto fresco. As consistências foram determinadas pelo abatimento do tronco de cone segundo NM 67:1996.

Para se obter a maior uniformidade nas misturas, optou-se por utilizar o aditivo em todas as misturas, visto que o aditivo pode influenciar na microestrutura do concreto, alterando as reações de hidratação. A dosagem do aditivo foi obtida através de ensaio experimental até chegar à consistência desejada. Conforme a tabela 3.6, os traços que possuem a maior quantidade de aditivos são os que apresentam a uma porcentagem maior de cinza e as menores relações a/ag.

3.3.4 Água

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

3.4 Método de dosagem

O método de dosagem adotado foi o procedimento proposto por Helene e Terzian (1992) e as quantidades de materiais são apresentadas na tabela 3.6. Foram moldadas cinco misturas, uma de referência com 100 % de cimento, duas com teor de 15% e 25% de CCA moída e duas com teor de 15% e 25% de CCA ao natural. Foram adotadas as relações a/ag nas proporções de 0,45; 0,55 e 0,65 com relações aglomerante/agregados de 1:4,38; 1:5,87 e 1:7,38. O teor de argamassa seca foi fixado em 50%, em volume.

A tabela 3.7 apresenta o resultado para a ordem da colocação dos materiais na betoneira, conforme estudo experimental realizado na Etapa II (item 3.2). As quantidades totais de (água + aditivo) permaneceram constantes para todos os traços em 183,2, 175,9 e 170,8 l/m³ respectivamente para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Nos traços com CCA natural ou moída foram realizadas correções nas quantidades de areia com o intuito de manter o volume de argamassa constante, devido às diferenças existentes entre as massas específicas das CCA e do cimento.

Tabela 3.6 – Quantidades de materiais por metro cúbico

Misturas	Teor de substituição (%)	a/ag	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de CCA (kg/m ³)	Consumo de areia (kg/m ³)	Consumo de pedra (kg/m ³)	Consumo de 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 aditivo superplastificante com densidade igual a 1,1g/cm³.

Tabela 3.7 – Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira

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

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.

De acordo com a tabela 3.8, observa-se que a mistura 25N apresenta os maiores custos, mesmo com maior substituição de cimento por CCAN. A razão do maior custo dos traços com cinza natural é decorrente do maior teor de aditivo empregado nos traços para obter-se a consistência com o abatimento requerido pela

especificação do concreto fresco. O aditivo, por ser o material com custo individual mais caro, tem um peso preponderante em especial para a cinza natural que possui partículas maiores e grãos mais ásperos que as cinzas moídas, razão pela qual, a demanda de aditivo para as primeiras é maior.

Tabela 3.8 – Custo dos materiais dos traços (R\$/m³)

f _c MPa	Traço	Cimento		CCAM e CCAN		Agregados		Aditivo + água		Custo total		Custo unitário
		Custo	%	Custo	%	Custo	%	Custo	%	Custo	I	R\$/MPa
30	R	113,2	63	-	-	62,95	35	2,57	2	178,72	100	5,96
	15M	81,2	49	1,26	1	64,63	39	19,36	12	166,45	93	5,55
	25M	80,4	48	2,35	2	62,84	37	22,17	13	168,76	94	5,63
	15N	90	48	0,22	-	62,5	33	35,04	19	187,76	105	6,26
	25N	119,2	51	0,59	-	56,36	24	59,31	25	235,46	132	7,85
40	R	151,6	70	-	-	59,78	28	4,7	2	216,08	100	5,4
	15M	106,4	55	1,65	1	64,63	33	21,35	11	194,03	74	4,85
	25M	101,2	53	2,94	2	59,97	31	26,47	14	190,58	88	4,76
	15N	117,2	55	0,28	-	59,3	28	35,87	17	212,65	98	5,32
	25N	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
50	R	190,4	75	-	-	57,58	23	6,35	2	254,33	100	5,09
	15M	131,6	60	2,03	1	62,27	28	23,01	11	218,91	86	4,38
	25M	128,8	58	3,54	2	57,92	26	29,94	14	220,2	87	4,44
	15N	138,4	60	0,35	-	57,07	25	36,54	15	232,36	91	4,65
	25N	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

*Valores não calculados por extrapolarem o intervalo de resistência à compressão axial obtido nos ensaios

3.5 Moldagem dos protótipos

Os protótipos utilizados na pesquisa foram moldados durante a Etapa II. As datas destas moldagens foram durante o inverno, onde foi convencionada uma temperatura mínima para a mistura do concreto em 19°C ± 2°C. Para se chegar nessa temperatura, foi realizado o controle da temperatura da água conforme equação proposta por Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1995).

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c) + M_a} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

T – Temperatura da massa de concreto (°F)

T_m – Temperatura dos agregados (°F)

T_c – Temperatura do cimento (°F)

T_a – Temperatura da água (°F)

M_m – Massa dos agregados (kg)

M_c – Massa de cimento (kg)

M_a – Massa de água (kg)

Os protótipos foram moldados na forma de prisma de dimensões 20 x 20 x 75 cm. Os mesmos foram vibrados em uma mesa vibratória em duas camadas com o tempo de 30 segundos por camada.

Foram realizados os seguintes ensaios, medições ou determinações com o concreto fresco:

- Consistência pelo abatimento do tronco de cone – NM 67:1996;
- Temperatura e umidade relativa do ambiente;
- Temperatura interna do concreto ao final da mistura;
- Massa específica do concreto por gravimetria: ABNT NBR 9833:2008;
- Moldagem de corpos de prova cilíndricos (10 x 20) cm – ABNT NBR 5738: 2003.

Depois de realizada a moldagem dos protótipos, em formas metálicas untadas com óleo, foram colocados sacos de aniagem molhados sobre os mesmos para realizar a cura úmida. Os protótipos foram desmoldados vinte e quatro horas depois, identificados e colocados em uma câmara úmida pelo período de sete dias com U.R > 95%. Depois desse processo, os mesmos foram expostos ao ambiente natural, no pátio descoberto do laboratório, nas mesmas condições de uma estrutura de concreto.



Figura 3.5 – Protótipos de concreto expostos ao ambiente natural

3.6 Ensaio realizados

Para fazer a avaliação do desempenho das misturas foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, penetração acelerada de cloretos, água quimicamente combinada, porosimetria por intrusão de mercúrio e cloretos totais retidos.

3.6.1 Resistência à compressão axial de testemunhos

A extração de testemunhos dos protótipos realizou-se conforme a norma NBR 7680:2007 (ABNT, 2007) e os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739:2007 (ABNT, 2007). Foram extraídos com máquina extratora serra-copo três corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm para a idade de ensaio de 540 dias, em direção perpendicular ao sentido de moldagem. Após a extração, os corpos de prova ficaram expostos a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa $>50\%$ por 48 horas, sendo posteriormente capeados com enxofre (Figuras 3.6, 3.7 e 3.8). Para a resistência final, adotou-se a média aritmética de três determinações.

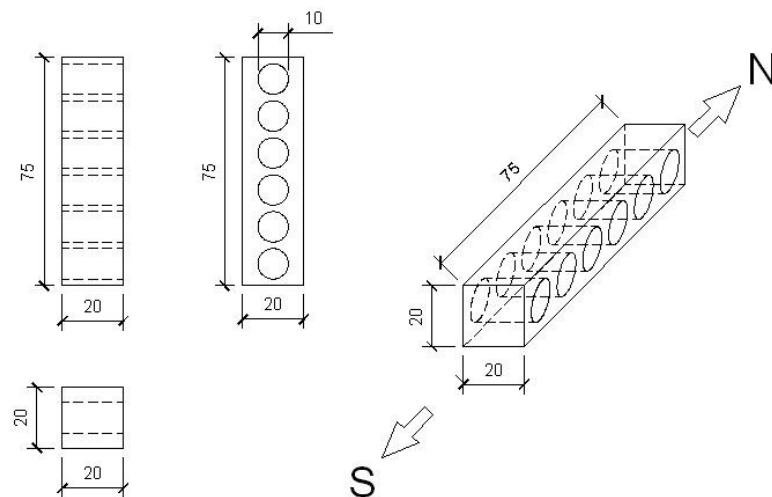


Figura 3.6 – Esquema do sentido da extração dos corpos de prova 10x20cm



Figura 3.7 – Extração dos protótipos de concreto



Figura 3.8 – Rompimento do corpo-de-prova

3.6.2 Ensaio acelerado de penetração de cloretos – ASTM C1202:2005

O ensaio acelerado de penetração de cloretos foi realizado conforme o método da ASTM C 1202:2005 e consiste na verificação da carga total (em Coulomb) 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.

Os corpos-de-prova utilizados na realização do ensaio foram retirados dos protótipos 100 x 200 mm aos 540 dias de idade. Após a extração os testemunhos foram cortados com serra diamantada em três partes iguais, nas dimensões de 100x51mm. O topo e a base do corpo de prova com 20 mm de espessura foram descartados (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Corpos de prova cortados (10 x 20 cm) para o ensaio de penetração acelerada de cloretos segundo a ASTM C 1202:2005

Procedeu-se, a seguir, a impermeabilização das superfícies laterais com resina epóxi, vácuo em dessecador seco (3 horas) e saturação (1 hora) (Figura 3.10), tendo o ensaio iniciado após $18 \pm 2h$. 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, sendo que nestas soluções foi instalado um eletrodo de cobre e conectado a uma fonte de energia contínua (Figura 3.11). Essa fonte aplicou uma tensão de $60,0 \pm 0,1 V A$ e as leituras foram realizadas conectando-se um multímetro nos dois eletrodos para verificar a carga passante (Figura 3.12). O ensaio estendeu-se por seis horas, com leituras a cada 30 minutos. Dessa forma, observa a diferença de potencial no concreto.

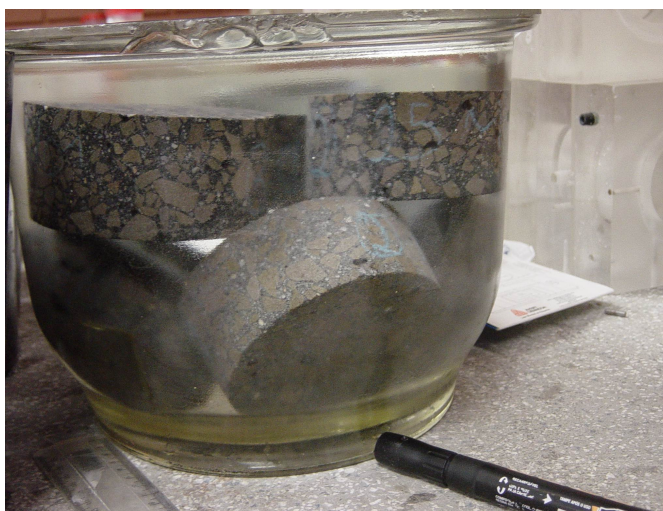


Figura 3.10 – Corpos de prova no processo de saturação do dessecador a vácuo

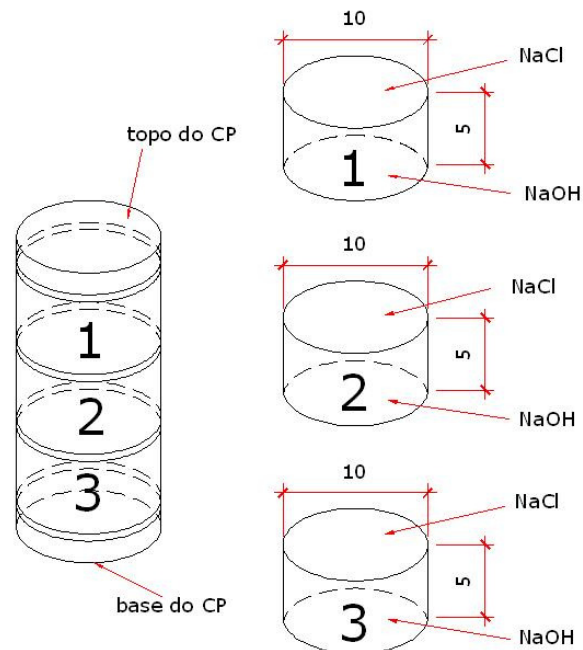


Figura 3.11 – Esquema do corte, numeração das fatias e interface com as soluções de NaCl e NaOH



Figura 3.12 – Ensaio acelerado de penetração de cloretos

Após a finalização do ensaio, foi calculada a carga total passante, onde se verifica a classificação do concreto, em relação ao risco de penetração dos íons cloretos conforme a tabela 3.9, segundo a ASTM C 1202:2005.

$$Q = 900.(I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{60} + \dots + 2.I_{330} + 2.I_{360}) \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

Q: carga total passante (Coulomb);

I_t : corrente medida nos tempos t (t em minutos) (Ampère).

Tabela 3.9 – Classificação de concretos quanto ao risco de penetração dos íons cloretos de acordo com a carga passante (ASTM C 1202:2005)

Carga Passante	Risco de penetração dos íons cloretos
> 4000	Alto
2000 a 4000	Moderado
1000 a 2000	Baixo
100 a 1000	Muito baixo
> 100	Desprezível

Neste ensaio também se adotou como valor representativo a média aritmética de três determinações, desde que atendidas às prescrições de norma referentes às diferenças nestes resultados, ou seja, coeficiente de variação dentro do ensaio inferior a 12,6%.

3.6.3 Cloretos totais retidos

As quantidades de cloretos totais retidos foram determinadas nos corpos-de-prova submetidos ao ensaio acelerado de penetração cloretos, de onde foram coletadas amostras de pó das faces de concreto que estiveram em contato com a solução de cloreto de sódio, na profundidade de 0 a 1,5 cm. A coleta do pó foi realizada em perfuratriz, com broca de vídia, sendo que o material recolhido foi peneirado na #100 e separado nas quantidades necessárias para o ensaio de teor de cloreto retido (Figura 3.13).

A quantidade total de cloretos retidos no concreto por kg de cimento foi determinado conforme a ASTM C 1152:2004.



Figura 3.13 – Retirada do pó de concreto a profundidade de 1,50 cm para o ensaio de cloretos retidos

3.6.4 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Após o ensaio de resistência a compressão axial no concreto aos 540 dias, como descrito anteriormente, retirou-se dos testemunhos extraídos, amostras cúbicas de argamassa com aproximadamente seis milímetros de aresta. Estas 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 porosimetria por intrusão de mercúrio em equipamento da marca Micromeritics, modelo Autopore II 9220, da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

3.6.5 Água quimicamente combinada

As amostras foram retiradas dos protótipos na região remanescente entre os testemunhos extraídos, tomando-se o cuidado para a perfuração ficar a mais de dois

centímetros da face do protótipo, com o objetivo de analisar o comportamento na região mais interna (Figura 3.14). Após a retirada do material paralisou-se as reações de hidratação, da mesma forma que para o ensaio de porosimetria (Figura 3.15).

O teor de água combinada foi determinado pela diferença de massa da amostra aos 105° (P105) e 550°C (P550), também denominada de água não evaporável.

Segundo Marsh e Day (1988) e Sellevold e Justnes (1993 apud ISAIA, 1995), o teor de água combinada é dado por:

$$AC = [(P105 - P550)] / P105 \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

- O valor P105 foi determinado pesando 20g de amostra a qual foi levada à estufa a 105°C, até que atingisse a constância de massa com tolerância de 0,01g.

- O valor P550 foi determinado levando em seguida as amostras para uma mufla com temperatura de 550°C, mantendo durante uma hora e depois colocadas num dessecador até atingir a temperatura ambiente, então foram pesadas com precisão de 0.01 gramas.



Figura 3.14 – Retirada do pó de concreto para o ensaio de água quimicamente combinada



Figura 3.15 – Paralisação das reações de hidratação através do agitador eletromagnético

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no programa experimental, sendo que os mesmos serão analisados e discutidos, fazendo-se a comparação com a bibliografia disponível. O objetivo será observar e analisar o desempenho dos concretos com substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz (moída e ao natural), em diferentes relações água/aglomerante frente resistência à compressão axial (NBR 5738 e NBR 5739), resistência à penetração de íons cloretos (ASTM C 1202), água quimicamente combinada (MARSH; DAY, 1988) e Sellevold e Justnes (1993 apud ISAIA, 1995), porosimetria por intrusão de mercúrio e cloretos totais retidos (ASTM C 1152). Posteriormente serão realizadas as apresentações, análises e discussões dos resultados e, sempre que possível, comparações com dados encontrados na literatura sobre o mesmo tema enfocado.

Os ensaios foram realizados com os protótipos na idade de 540 dias, sendo que os mesmos ficaram expostos ao tempo, no pátio do laboratório simulando as condições reais de exposição de uma estrutura de concreto.

Os resultados obtidos nesta pesquisa para os ensaios da resistência à compressão axial e resistência à penetração de íons cloretos serão comparados com os de Pedrozo (2008) e Duart (2008), visto que ambos fazem parte do mesmo projeto de pesquisa, com mesmos traços e moldagens simultâneas, embora os dois autores tenham realizado os ensaios de resistência à compressão axial para as idades de 7, 28 e 91 dias. Os resultados do ensaio de resistência à penetração de íons cloretos aos 540 dias serão comparados com os ensaios realizados aos 91 dias por Pedrozo (2008).

Os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de Hg e água quimicamente combinada serão comparados com os de Duart (2008), pois fazem parte desta pesquisa com os mesmos traços e moldagens simultâneas, embora este autor tenha realizado os ensaios de porosimetria para 91 dias de idade. Os resultados do ensaio de água quimicamente combinada serão comparados com os ensaios realizados aos 28 e 91 dias daquele autor.

As comparações com Pedrozo (2008) e Duart (2008) serão muito importantes, visto que os ensaios realizados nesta dissertação foram aos 540 dias, e dessa maneira será possível avaliar o desempenho de todas as misturas em longo prazo, expostas ao tempo, nas condições reais de exposição de uma estrutura de concreto.

Concomitantemente, os resultados obtidos serão comparados entre si aos 540 dias, em igualdade e relação a/ag e de resistência à compressão axial com o objetivo de verificar o desempenho de todas as misturas, analisando principalmente o comportamento entre as cinza de casca de arroz natural e moída, a fim de avaliar a viabilidade técnica e econômica dessa adição mineral.

4.2 Análise dos resultados de resistência à compressão axial

Os resultados para o ensaio de resistência à compressão axial para as diferentes misturas serão apresentados na tabela 4.1. A tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos por Pedrozo (2008), pois sua pesquisa é com as mesmas misturas e possui algumas variáveis iguais as do autor.

Tabela 4.1 – Resistência à compressão axial, em MPa, de corpos-de-prova moldados por Pedrozo (2008) e testemunhos extraídos a 540 dias

TRAÇO	a/ag	Corpos-de-prova moldados Pedrozo (2008)			Testemunhos extraídos 540 dias	
		7 dias	28 dias	91 dias	MPa	r ² eq. Abrams*
R	0,45	27,4	42,2	43,0	53,0	0,973
	0,55	22,6	30,6	33,6	39,8	
	0,65	18,8	24,3	28,0	34,0	
15M	0,45	29,2	43,6	53,1	62,5	0,940
	0,55	22,1	32,6	40,4	47,7	
	0,65	18,9	27,2	33,4	42,9	
25M	0,45	28,9	43,5	50,9	54,6	0,950
	0,55	19,5	30,3	36,9	40,0	
	0,65	12,7	22,4	29,6	35,0	
15N	0,45	29,8	37,7	50,5	53,0	0,854
	0,55	19,4	27,5	33,8	36,4	
	0,65	16,1	23,6	31,9	34,2	
25N	0,45	16,3	22,7	30,5	37,4	1,000
	0,55	12,5	17,5	24,2	30,1	
	0,65	10,0	13,9	19,0	24,0	

* Coeficiente de determinação r² calculado pela equação exponencial: $f_c = a \cdot b^{-a/ag}$

A figura 4.1 apresenta os resultados da resistência à compressão axial aos 540 dias e as figuras 4.2, 4.3 e 4.4 a comparação das resistências aos 91 e 540 dias em função das relações a/ag de 0,45; 0,55 e 0,65; respectivamente.

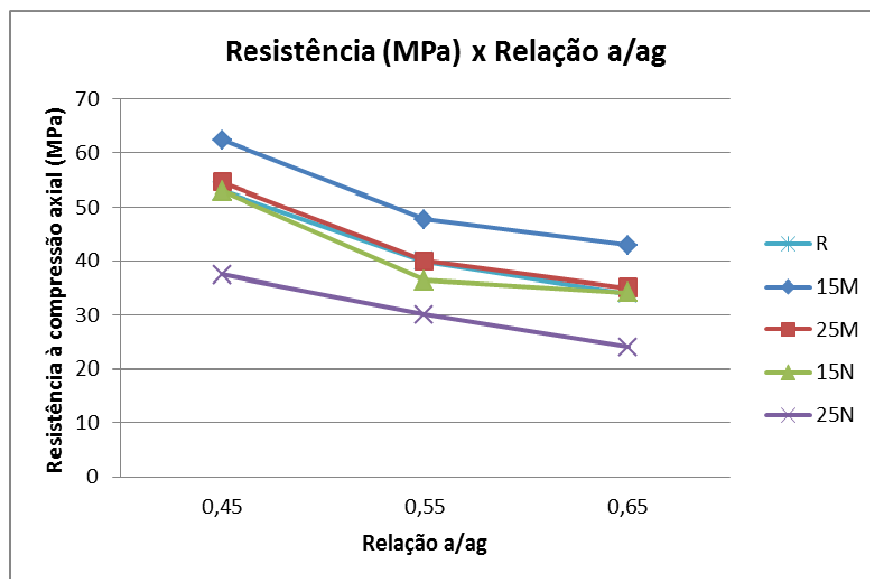


Figura 4.1 – Resultados de resistência à compressão axial (MPa) aos 540 dias

Como esperado, observa-se que todas as misturas apresentam maior resistência à compressão axial para menores relações a/ag, fato que se deve ao aumento da compacidade, do grau de hidratação e refinamento dos poros nas misturas com CCA, no caso dos traços com essas pozolanas.

De acordo com a tabela 4.1, observa-se que as misturas 15M e 25M ultrapassam os valores das resistências à compressão da mistura referência (somente com o cimento) em todas as relações a/ag. Observa-se também que a mistura 15N fica muito próxima dos valores de resistência da mistura referência.

A mistura 25N, composta por 25% de CCA natural apresentou para todas as relações a/ag resistências inferiores à mistura referência, mantendo uma linearidade no comportamento do gráfico f_c x relação a/ag. Embora a mistura 25N apresenta uma maior finura que a mistura 15N, o teor de substituição desempenha papel preponderante no desenvolvimento da resistência mecânica, onde ficou constatado que existe um teor ótimo de substituição parcial de cimento por CCA entre 15% e 25%.

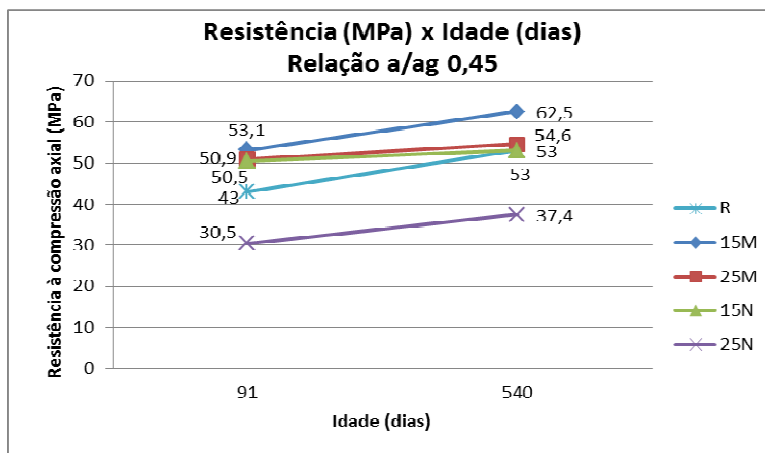


Figura 4.2 – Resultados de resistência à compressão axial (MPa) *versus* idade (dias) para a relação a/ag 0,45

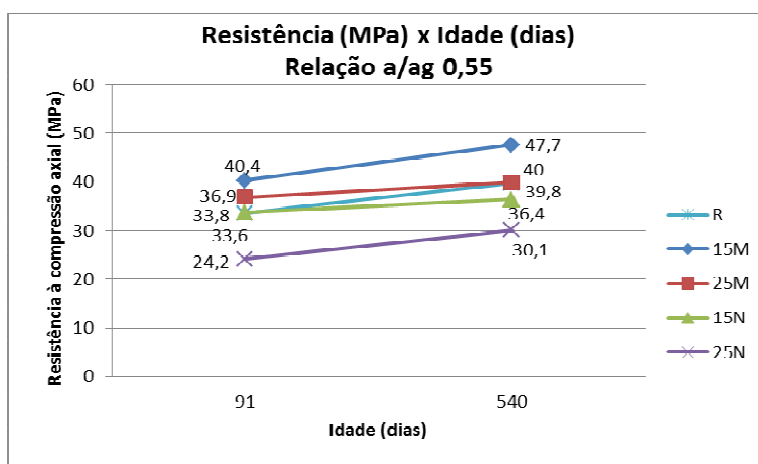


Figura 4.3 – Resultados de resistência à compressão axial (MPa) *versus* idade (dias) para a relação a/ag 0,55

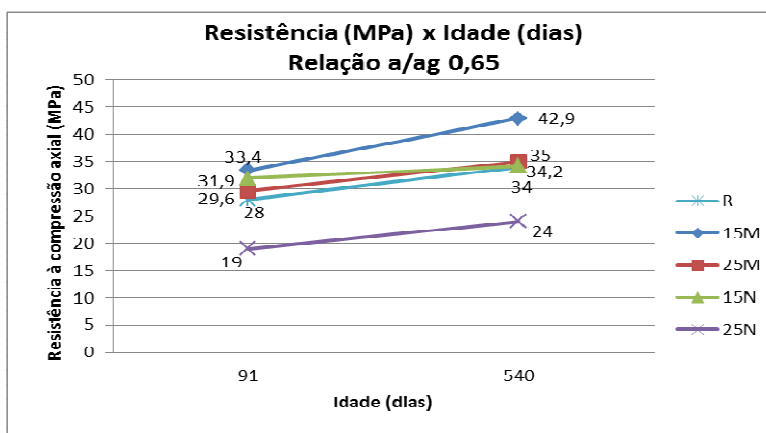


Figura 4.4 – Resultados de resistência à compressão axial (MPa) *versus* idade (dias) para a relação a/ag 0,65

A tabela 4.2 apresenta as variações dos resultados individuais da resistência à compressão axial a 91 dias e 540 dias. São apresentadas as médias aritméticas de cada mistura. A tabela 4.3 apresenta os resultados comparativos das misturas CCAM e CCAN com o traço de referência, assim como as variações das misturas de CCA natural em relação às CCA moídas.

Tabela 4.2 – Acréscimo de resistência à compressão axial de 91 dias para 540 dias

Mistura	a/ag	Resistência à compressão (MPa)		Acréscimo de resistência	
		Pedrozo (2008)	Autor	% individual	% média
		91 dias	540 dias		
R	0,45	43,0	53,0	23,3%	+21,1%
	0,55	33,6	39,8	18,5%	
	0,65	28,0	34,0	21,4%	
15M	0,45	53,1	62,5	17,7%	+21,4%
	0,55	40,4	47,7	18,1%	
	0,65	33,4	42,9	28,4%	
25M	0,45	50,9	54,6	7,3%	+11,3%
	0,55	36,9	40,0	8,4%	
	0,65	29,6	35,0	18,2%	
15N	0,45	50,5	53,0	5,0%	+6,6%
	0,55	33,8	36,4	7,7%	
	0,65	31,9	34,2	7,2%	
25N	0,45	30,5	37,4	22,6%	+24,4%
	0,55	24,2	30,1	24,4%	
	0,65	19,0	24,0	26,3%	

Tabela 4.3 – Porcentagem da variação de resistência à compressão em comparação ao concreto referência e das misturas CCA naturais em relação às CCA moídas (valores entre parêntesis)

Mistura	a/ag	Resistência à compressão 540 dias (MPa)	Acréscimo de resistência	
			% individual	% média
R	0,45	53,0	-	-
	0,55	39,8		
	0,65	34,0		
15M	0,45	62,5	17,9%	+21,3%
	0,55	47,7	19,9%	
	0,65	42,9	26,2%	
25M	0,45	54,6	3,0%	+2,2%
	0,55	40,0	0,5%	
	0,65	35,0	2,9%	
15N	0,45	53,0	0,0% (-15,2%)	-2,7% (-19,7%)
	0,55	36,4	-8,5% (-23,7%)	
	0,65	34,2	0,6% (-20,3%)	
25N	0,45	37,4	-29,4% (-31,5%)	-27,7% (-29,2%)
	0,55	30,1	-24,4% (-24,8%)	
	0,65	24,0	-29,4% (-31,4%)	

De acordo com a tabela 4.2 e com as figuras 4.2, 4.3 e 4.4; a mistura que apresentou a maior resistência à compressão foi a 15M, com acréscimo médio de 21,4% entre f_{c540} e f_{c91} . Quando o teor de CCA moída cresceu de 15% para 25% os acréscimos correspondentes foram menores, de 11,3%, em média, os traços com CCA natural aumentaram, em média, 6,6% e 24,4% respectivamente para 15% e 25%, quando a idade aumentou de 91 para 540 dias. Observa-se que para a finura mais fina da CCA os acréscimos com o tempo de cura (540 dias) aumentaram com a quantidade de pozolana na mistura, embora em níveis de resistência à compressão, mais baixos que os demais traços.

Os acréscimos de resistência à compressão de 91 a 540 dias estão relacionados com o aumento do grau de hidratação do cimento e das reações pozolânicas com o avanço da idade, assim como os menores teores de umidade interna dos testemunhos extraídos (umidade natural) em relação aos corpos de prova moldados (saturados) no momento do ensaio, conforme já constatado em outras pesquisas realizadas pelo GEPECON, nas mesmas condições.

A mistura R apresentou um acréscimo de resistência à compressão de 91 para 540 dias, de 21,1%, em média, valor similar ao da mistura 15M, embora em nível real mais inferior.

A tabela 4.3, apresenta a porcentagem da variação de resistência à compressão axial em comparação ao concreto referência, observando-se que a mistura 15M foi a que apresentou o maior nível de resistência, com acréscimos médios de 21,3%, confirmando a viabilidade técnica e econômica da CCA moída neste teor, visto que a mesma foi queimada sem controle de temperatura e aeração.

Os valores das resistências à compressão da mistura 25M foram muito próximos aos da referência, com acréscimo médio de +2,2%. Tal fato evidencia que existe um teor ideal de substituição de CCA entre 15 e 25% e mais próximo de 15%, pois a resistência decresce significativamente da mistura 15M para a 25M. Este comportamento está de acordo com os resultados obtidos por Sacilotto (2005) que encontrou os maiores níveis de resistência à compressão, aos 91 dias e período de cura úmida de 7 dias, para o teor de 20% de CCA moída.

Para a mistura 15N, observa-se que a mesma apresentou valores de resistência de compressão axial próximo a mistura referência, com um decréscimo médio de 2,7%.

As misturas com 25% de substituição ao cimento com CCA natural apresentaram redução média de resistência à compressão axial de 27,8%.

No caso das misturas 15N e 25N, nota-se que a 25N têm níveis de resistência inferior à mistura referência, fato esse explicado pelo teor de CCA e pela deficiência de moagem (maior finura), que promove maior reatividade pozolânica quando os grãos são mais finos. Observa-se que esse comportamento se acentua à medida que o teor de CCA natural aumenta na mistura de 15% para 25%. Com efeito, a tabela 4.3 mostra que houve queda média de, aproximadamente, 20% e 30% na resistência à compressão axial quando o teor passou de 15% a 25%, respectivamente, nas misturas CCA natural em relação às moídas.

Pela análise dos resultados, observa-se que os tamanhos dos grãos influenciaram diretamente a resistência a compressão. Como a CCA moída tem uma finura mais elevada e uma estrutura mais amorfa, com maior pozolanidade e reatividade química, melhora-se o desempenho de concretos principalmente das propriedades mecânicas a partir de microestrutura mais homogênea e compacta. Em contrapartida, a CCA natural com grãos mais grossos apresentou comportamento oposto, razão pela qual apresentou resistência mecânica inferior.

Saraswathy e Song (2007), analisaram misturas com 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de CCA, com relação a/ag igual a 0,53. Nesses ensaios, nas idades de 7, 14 e 28 dias, observaram que a mistura com 15% CCA apresentou resistência à compressão maior que a mistura de referência.

Possan, Venquiaruto e Dal Molin (2007) investigaram a influência de substituições de cinza de casca de arroz na ordem de 0%, 25% e 50%, com relações a/ag de 0,35; 0,50 e 0,65. Foi observado também o tempo de moagem, sendo que o mesmo foi de uma hora e quatro horas. Aos 91 dias, para o tempo de moagem de quatro horas, todas as misturas atingiram uma resistência muito próxima à mistura referência. Nesse caso, mesmo para um valor elevado de substituição de cimento por CCA, observou-se que o efeito de moagem da CCA aumenta a reatividade da mesma, fazendo com que se atinjam resistências próximas à mistura referência.

Os resultados de pesquisas com CCA de finuras diversas mostram que a atividade pozolânica da CCA é fortemente dependente da finura (superfície específica) e, conseqüentemente seu desempenho posterior às propriedades mecânicas e de durabilidade. Entretanto, os resultados obtidos com a CCA natural

com teor de 15% de substituição de cimento nesta pesquisa mostra que existe factibilidade de ser empregada sem moagem, desde que apresentou resistências à compressão axial similares às do concreto de referência.

4.3 Análise dos resultados em igualdade de resistência à compressão axial

O projeto estrutural de edificações tem como parâmetro básico para dimensionamento das peças que compõem o esqueleto resistente (lajes, vigas e pilares) a adoção de uma resistência característica à compressão axial, também conhecida por f_{ck} de projeto. A partir desta, será calculada a resistência de dosagem (f_{cj}) que será determinada em função das premissas do projeto, dos materiais componentes do concreto e da idade de controle.

O mesmo f_{ck} de projeto pode ser atingido de diversos modos, conforme seja a escolha dos materiais como tipo de cimento, características dos agregados, do tipo e teores de adições minerais, etc. Quando se dispõem de várias alternativas de materiais, a melhor forma de comparar o desempenho dos diversos traços com os materiais disponíveis é por intermédio do f_{cj} e não da relação a/ag . Com efeito, esta última é um parâmetro intermediário dos traços e pode variar conforme se modificam os materiais ou mesmo condições de execução, assim que o melhor modo de comparar as alternativas disponíveis é em igualdade de resistência à compressão axial, para a idade de controle fixada.

Para tanto, considerou-se nesta pesquisa que a estrutura de concreto hipotética onde as misturas investigadas seriam empregadas, estaria sujeita em ambiente urbano, o que corresponde à classe de agressividade ambiental moderada, conforme a NBR 12655:2006 (ABNT, 2006), o que corresponde à classe de concreto C25, de acordo com a NBR 8953:1992 (ABNT, 1992).

Adotando-se como premissa que o concreto seja pré-misturado em central de concreto, pode-se utilizar a condição A de preparo, conforme a NBR 12655:2006, ou seja, $s_d = 4,0$ MPa, e a resistência de dosagem: $f_{c28} = 25 + 1,65 \cdot 4,0 = 31,6$ MPa, para a idade padrão de 28 dias.

A tabela 4.4 apresenta os resultados das resistências à compressão axial obtidas a 7, 28 e 91 dias por Pedrozo (2008) em corpos de prova moldados com os mesmos traços e materiais dos protótipos estudados na presente pesquisa. Logo, serão consideradas essas resistências à compressão obtidas há 28 dias para

comparação das misturas estudadas, obtendo-se para cada uma delas as relações a/ag que conferem o valor $f_{c28} = 31,6$ MPa, aplicando-se a equação de Abrams aos dados obtidos em cada traço e, por interpolação estatística, a respectiva relação a/ag . A tabela 4.4 apresenta os valores calculados das resistências à compressão axial para 91 e 540 dias, a partir das relações a/ag a 28 dias de Pedrozo (2008), conforme dados da tabela 4.1.

Tabela 4.4 – Relações a/ag para $f_{c28} = 31,6$ MPa

Mistura	Relação a/ag_{28} (Pedroso, 2008)	f_{c91} (MPa) para a/ag_{28}	f_{c540} (MPa) para a/ag_{28}
R	0,54	34,6	41,9
15M	0,57	39,1	48
25M	0,54	38,6	42,8
15N	0,51	41,1	43,7
25N	0,40*	31,6	38,3*

*valores calculados para 91 dias porque extrapolam os limites estudados há 28 dias

Observa-se na tabela 4.4 que todas as relações a/ag calculadas cumprem com o requisito para a classe de agressividade II da NBR 12655: $a/ag \leq 0,60$ e consumo de material cimentício ≥ 280 kg/m³. No traço 25 N não foi possível atingir a resistência de dosagem fixada para 28 dias porque o valor de a/ag calculado (0,35) extrapolou em mais de 10% o limite inferior do estudo, razão pela qual se adotou a idade de 91 dias para essa mistura, para efeito de comparação com as demais, embora ainda com valor de a/ag fora da amplitude investigada, mas em valor menor (0,40), ou seja, -11% em comparação com $a/ag = 0,45$. Os baixos valores calculados para a/ag nos traços com 25% de CCA natural são devidos à acentuada queda de resistência à compressão observada, em função da baixa finura e elevado teor de substituição de cimento, conforme mostrado nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

Assim, para as variáveis de estudo dos testemunhos extraídos dos protótipos a 540 dias de idade, analisadas e discutidas a seguir, serão empregadas as relações a/ag constantes da tabela 4.4, para comparação das misturas em igualdade de resistência de 31,6 MPa a 28 dias.

4.4 Análise dos resultados do ensaio de água quimicamente combinada

4.4.1 Análise em igualdade de relação a/ag

O teor de água quimicamente combinada foi determinado segundo Marsh e Day (1988) e Sellevold e Justnes (1993 apud ISAIA, 1995). A figura 4.5 apresenta os resultados.

De acordo com a figura 4.5, observa-se que para todas as misturas a porcentagem de água quimicamente combinada foi progressiva com o aumento da relação a/ag. Este comportamento pode ser explicado pelo fato que em relações a/ag mais elevadas o espaço livre entre as partículas é maior, visto que para a mesma quantidade de água existe menos aglomerante, ocasionando dessa forma uma maior porosidade. Assim, existe mais espaço para a formação dos compostos hidratados que são maiores, destacando-se principalmente o hidróxido de cálcio melhor conformado e com moléculas cerca de 100 vezes maiores que o C-S-H, que se apresenta em formato de placas hexagonais. Para as relações a/ag menores, o teor de água quimicamente combinada é menor. A explicação para esse comportamento é o oposto acima enunciado, como os espaços livres são menores, os produtos hidratados se formam em tamanhos menores, mais compactos, acarretando um menor teor de água quimicamente combinada, porque a formação do C-S-H depende também, como subproduto, a formação de CH, que exige mais espaço por apresentar dimensões de pelo menos duas ordens de grandeza maior.

De acordo com a figura 4.5, observa-se que as misturas com 15 e 25% de substituição parcial do cimento por CCA moída, foram as que apresentaram os maiores teores de água quimicamente combinada. Este comportamento pode ser esclarecido pelo fato de as paredes internas da CCAM adsorver cristais de CH, onde se agrupam e formam C-S-H que ficam aderidos nas partículas de CCA.

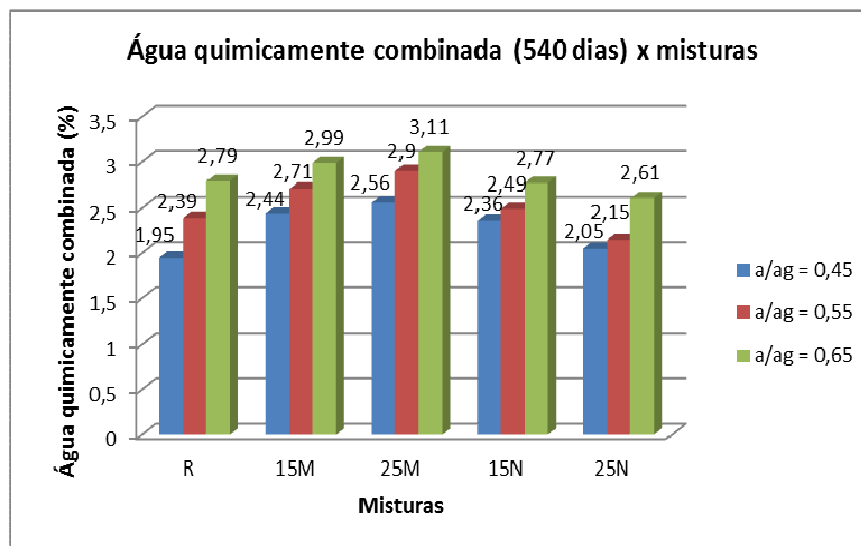


Figura 4.5 – Água quimicamente combinada versus misturas

Para as misturas binárias com cinza de casca de arroz moída, observou-se que com o aumento do teor de adição cresceu também o teor de água combinada. Esse comportamento também foi verificado por Duart (2008). Moraes (2001) pesquisou concretos com substituição parcial de cimento por CCA nos teores de 15,5%; 25% e 50% e verificou que concretos com maiores teores de CCA apresentam maior porcentagem de água quimicamente combinada.

Este comportamento está relacionado com o efeito de nucleação, ou seja, liberação de água realizada pelas partículas pozolânicas o que ocasiona defloculação dos grãos de cimento e melhor aproveitamento deste nas reações de hidratação, além das próprias reações pozolânicas que produzem C-S-H secundário. De acordo com Isaia *et. al* (2003), esta maior defloculação aumenta a superfície específica do cimento em contato com a água, sendo reforçada pelo potencial eletro-cinético (potencial zeta) entre as partículas. Estes mecanismos propiciam maior quantidade de pontos de nucleação para iniciar as reações de hidratação, e o resultado final seria uma maior quantidade de produtos hidratados e, por conseguinte, um maior consumo de hidróxido de cálcio, devido a maior atividade pozolânica e, finalmente, o ganho de força unitária (por unidade de massa de Portland cimento na mistura) ou o aumento de outras variáveis relacionadas com a durabilidade. A ação física aumenta a reatividade química, e o desempenho global do concreto é aumentada.

Os resultados foram comparados com os de Duart (2008), visto que o mesmo faz parte do mesmo projeto, participando da Etapa II, onde foram moldados os protótipos utilizados na pesquisa do autor. A comparação dos resultados é um ponto importante desta pesquisa, pois dessa forma consegue-se verificar o incremento da água quimicamente combinada dos 91 para os 540 dias. Assim, pode-se observar o desempenho de uma estrutura de concreto após 18 meses de execução, visto que os protótipos ficaram expostos ao ambiente natural. Dessa maneira, verifica-se o refinamento dos poros nesse período através da microestrutura das misturas, que são variáveis ligadas diretamente as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto.

A tabela 4.5 apresenta os resultados dos teores de água combinada obtidos por Duart (2008) a 28 e 91 dias, com os mesmos materiais e traços da presente pesquisa, por se tratar do mesmo projeto guarda-chuva. A figura 4.6 apresenta os resultados de 91 dias, os quais mostram comportamentos similares com os da figura 4.5 a 540 dias, embora em nível inferior por ter sido ensaiado em idade bem menor.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos para o ensaio de água quimicamente combinada aos 28 e 91 dias Duart (2008)

Mistura	a/ag	Água quimicamente combinada Duart (2008)	
		28 dias	91 dias
		%	%
R	0,45	0,97	1,07
	0,55	1,32	1,41
	0,65	1,34	1,52
15M	0,45	1,17	1,22
	0,55	1,21	1,35
	0,65	1,29	1,47
25M	0,45	1,19	1,29
	0,55	1,18	1,30
	0,65	1,21	1,39
15N	0,45	1,28	1,37
	0,55	1,30	1,39
	0,65	1,32	1,54
25N	0,45	1,03	1,09
	0,55	1,04	1,11
	0,65	1,15	1,32

Fonte: Duart (2008).

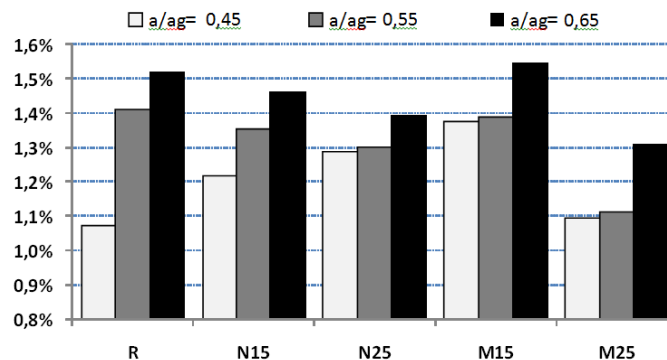


Figura 4.6 – Água quimicamente combinada aos 91 dias
Fonte: Duart (2008).

Tabela 4.6 – Acréscimo de água quimicamente combinada de 91 dias (DUART, 2008) para 540 dias, em percentagem e índices de evolução em relação a mistura R (entre parêntesis) e em relação à mistura CCA moída (entre colchetes)

Mistura	a/ag	Água quimicamente combinada		Acréscimo de água quim. comb.	
		Duart (2008)	Autor	540 dias	
		91 dias	540 dias	% individual	% média
		%	%	%	% (91) (540)
R	0,45	1,07 (100)	1,95 (100)	82,2%	78,4% (100) (100)
	0,55	1,41 (100)	2,39 (100)	69,5%	
	0,65	1,52 (100)	2,79 (100)	83,5%	
15M	0,45	1,22 (114) [100]	2,44 (125) [100]	100,0%	101,4 % (102) (115) [100] [100]
	0,55	1,35 (96) [100]	2,71 (113) [100]	100,7%	
	0,65	1,47 (97) [100]	2,99 (107) [100]	103,4%	
25M	0,45	1,29 (121) [100]	2,56 (131) [100]	98,4%	115,1 % (101) (121) [100] [100]
	0,55	1,30 (92) [100]	2,90 (121) [100]	123,1 %	
	0,65	1,39 (91) [100]	3,11 (111) [100]	123,7%	
15N	0,45	1,37 (128) [112]	2,36 (121) [96]	72,3 %	77,1 % (109) (108) [105] [94]
	0,55	1,39 (99) [103]	2,49 (104) [92]	79,1%	
	0,65	1,54 (101) [101]	2,77 (99) [93]	79,9 %	
25N	0,45	1,09 (102) [84]	2,05 (105) [80]	88,1 %	93,2 % (89) (79) [96] [79]
	0,55	1,11 (79) [85]	2,15 (90) [74]	93,7 %	
	0,65	1,32 (87) [101]	2,61 (94) [84]	97,7%	

A tabela 4.6 apresenta a evolução da água quimicamente combinada entre 91 dias, segundo dados de Duarte (2008) e 540 dias desta dissertação. Como esperado, os valores absolutos mostram que nessa última idade houve acréscimo de 78,4% (mistura R) até 115% (mistura 25M), evidenciando aumentos maiores para os traços com CCA moída e menores para a CCA natural, em vista da maior dimensão dos grãos e menor taxa de hidratação e de reações pozolânicas.

Observa-se também na tabela 4.6 que, em termos relativos há decréscimo do teor de água combinada, em cada mistura, à medida que a relação a/ag diminui, tendo em vista que à medida que crescem os vazios da pasta, há afastamento entre os grãos e, logo, as reações pozolânicas são dificultadas pelo maior tamanho das moléculas de CH e de seu menor teor em vista da menor quantidade de cimento. Sob este aspecto as misturas como CCA natural são as que têm maior decréscimo relativo, em vista da finura mais grossa dos grãos e menor taxa de reação. Este comportamento é evidenciado pelo índice médio de acréscimo da água combinada das misturas 15N e 25M, tanto em relação ao concreto referência quanto à CCA moída, em que o aumento da idade de 91 para 540 dias mostrou menor crescimento da AC, de +9% para +8% para 15N e de -11% e -21% para 25 N, respectivamente. Em relação à CCA moída esses índices apresentam a mesma tendência, embora em valores aproximadamente mais baixos.

4.5 Água quimicamente combinada x resistência à compressão axial

A tabela 4.7 apresenta os coeficientes r^2 das equações de regressão entre a resistência à compressão axial (f_c) e a água quimicamente combinada (AC).

Tabela 4.7 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de potência $f_c = a.AC^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e a água quimicamente combinada (AC)

Idade	R	15M	25M	15N	25N
91 dias (Duarte 2008)	0,950	1,000	0,740	0,470	0,830
540 dias	0,990	0,950	1,000	0,700	0,900

De acordo com a tabela 4.7 e com a figura 4.7, existe uma forte correlação entre f_c e AC, com exceção da mistura 15N a 91 dias onde deve ter havido algum erro de determinação da água combinada, associado também a resistência à compressão.

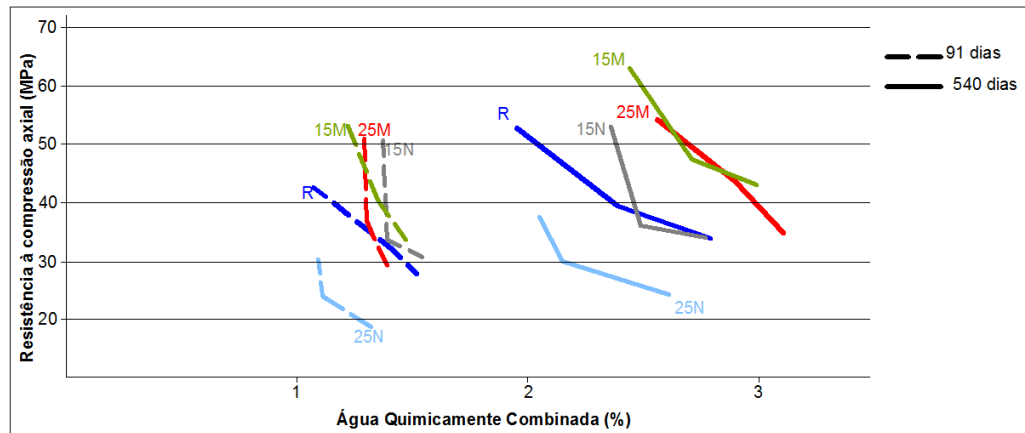


Figura 4.7 – Variação da água quimicamente combinada em porcentagem com as respectivas relações resistências à compressão axial para 91 dias (DUART, 2008) e 540 dias

A figura 4.8 mostra os acréscimos obtidos pela AC entre 91 e 540 dias, em igualdade de resistência de 31,6 MPa a 28 dias, conforme descrito no item 4.3.

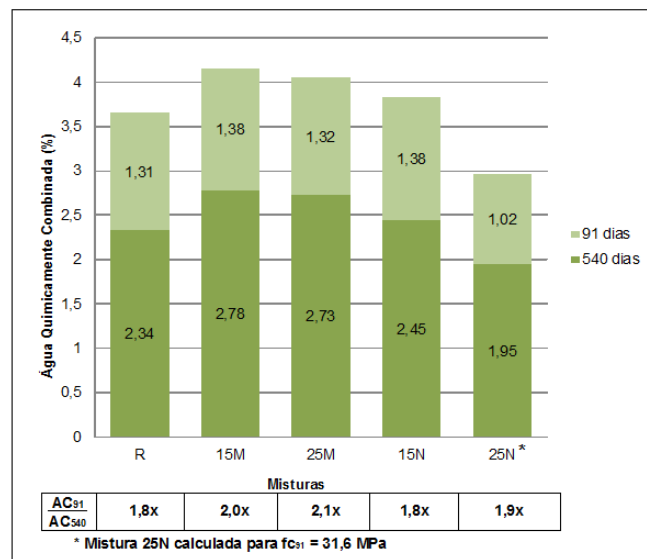


Figura 4.8 – Relação da água quimicamente combinada para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa)

Observa-se que, com exceção do traço 25N, todos os demais apresentaram aumento da AC em relação ao concreto referência, tanto a 91 quanto 540 dias. Nota-se tendência de diminuição da AC à medida que a idade avança (540 dias) para o traço 15N, provavelmente devido ao maior teor dos grãos e menor avanço do teor de hidratação do cimento. De modo geral, os acréscimos são praticamente o dobro a 540 dias em relação a 91 dias.

4.6 Análise dos resultados do ensaio porosimetria por intrusão de Hg.

4.6.1 Análise em igualdade de relação a/ag

A tabela 4.8 mostra os resultados de porosimetria por intrusão de Hg a 540 dias, que objetiva avaliar a distribuição dos poros que está relacionada diretamente com as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto. Nesta tabela são apresentados os volumes de intrusão de mercúrio, o diâmetro crítico e o volume de intrusão e dos diâmetros de poros maiores do que 50 ηm e menores do que 50 ηm . O diâmetro crítico é a menor dimensão de poros acima da qual se estabelece uma trajetória de poros mais conectados, sendo considerando na mudança brusca.

Mindess e Young (1981) classificam três faixas para os poros:

- a) Macroporos: com os diâmetros superiores a 50 ηm - ($\emptyset > 50 \eta\text{m}$);
- b) Mesoporos: com diâmetros entre 10 e 50 ηm - ($50 \eta\text{m} > \emptyset > 10 \eta\text{m}$);
- c) Poros do gel: com diâmetros entre 10 e 2 ηm - ($2 < \emptyset < 10 \eta\text{m}$).

De acordo com a tabela 4.8, os volumes de mercúrio intrudidos são menores para as misturas com CCA moída, sendo que as misturas 15M e 25M apresentaram volumes mais baixos para $\emptyset > 50 \eta\text{m}$, quando comparados com as outras misturas. Tal fato indica uma menor quantidade de macroporos, sendo que aumentou os volumes dos poros de gel e mesoporos. O aumento da quantidade dos poros menores que 50 ηm , significa que ocorreu o refinamento dos poros, reduzindo o tamanho do diâmetro médio.

Tabela 4.8 – Resultado do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio aos 540 dias, em igualdade de relação a/ag

Mistura	a/ag	Porosidade %	Ø Crítico ηm	Vol. total Intrudido (ml/g)/%	Ø > 50 ηm (ml/g)/%	50 > Ø > 10 ηm (ml/g)/%	Ø < 10 ηm (ml/g)/%
R	0,45	14,5	0,0146	0,0669 100%	0,0302 45%	0,0187 28%	0,0180 27%
	0,55	16,0	0,0187	0,0748 100%	0,0397 53%	0,0202 27%	0,0149 20%
	0,65	18,7	0,0194	0,0803 100%	0,0396 49%	0,0233 29%	0,0174 22%
15M	0,45	14,2	0,0110	0,0649 100%	0,0172 27%	0,0244 38%	0,0233 35%
	0,55	15,8	0,0130	0,0754 100%	0,0245 32%	0,0276 37%	0,0213 31%
	0,65	18,3	0,0136	0,0875 100%	0,0244 28%	0,0418 48%	0,0213 24%
25M	0,45	13,6	0,0098	0,0635 100%	0,0157 25%	0,0213 34%	0,0265 41%
	0,55	16,6	0,0129	0,0790 100%	0,0263 33%	0,0287 36%	0,024 31%
	0,65	16,4	0,0179	0,0745 100%	0,0202 27%	0,0438 59%	0,0105 14%
15N	0,45	17,1	0,0137	0,0815 100%	0,0305 37%	0,0232 29%	0,0238 34%
	0,55	19,9	0,0152	0,0975 100%	0,0570 58%	0,0253 26%	0,0152 16%
	0,65	22,0	0,0186	0,1105 100%	0,0523 47%	0,0378 34%	0,0204 19%
25N	0,45	14,1	0,0116	0,0650 100%	0,0282 43%	0,0233 36%	0,0135 21%
	0,55	15,4	0,0146	0,0710 100%	0,0229 32%	0,0303 43%	0,0178 25%
	0,65	20,1	0,0184	0,1029 100%	0,0336 33%	0,0356 35%	0,0337 32%

As misturas com 15% de CCA natural apresentaram valores de intrusão de mercúrio maior quando comparadas com as outras misturas. Verifica-se também a maior quantidade de macroporos comparados com as demais misturas. Tal fato evidencia que o teor de V_{Hg} mais alto e o efeito físico dos grãos com maiores dimensões não contribuíram para o refinamento dos poros, sendo que o desempenho frente a essa variável foi inferior em comparação com todas as demais misturas.

A mistura 25N apresentou volumes de intrusão de Hg muito próximos aos volumes da mistura referência, com exceção da mistura com relação a/ag 0,65. Para esta relação, os volumes intrudidos são inferiores em comparação com a mistura 15N, com exceção dos poros de gel que foram maiores, o que representa aparente

incongruência, em vista da mistura 25 N apresentar quantidade maior de poros mais grossos. Este fato deveria ser investigado com maior profundidade por meio de ensaios específicos.

A figura 4.9 apresenta os volumes de mercúrio intrudido segundo a classificação de Mindess e Young (1981). Para as misturas R e 15M observa-se que com o aumento da relação a/ag aumentou o quantidade de macroporos, sendo que na mistura 25M o volume maior de macroporos ficou na relação a/ag 0,55. A mistura 15N foi a que apresentou as maiores quantidades de macroporos, sendo o valor mais elevado para a relação a/ag 0,55. Já na mistura 25N a relação a/ag que apresentou as maiores quantidades de macroporos foi a 0,65, conforme já analisado.

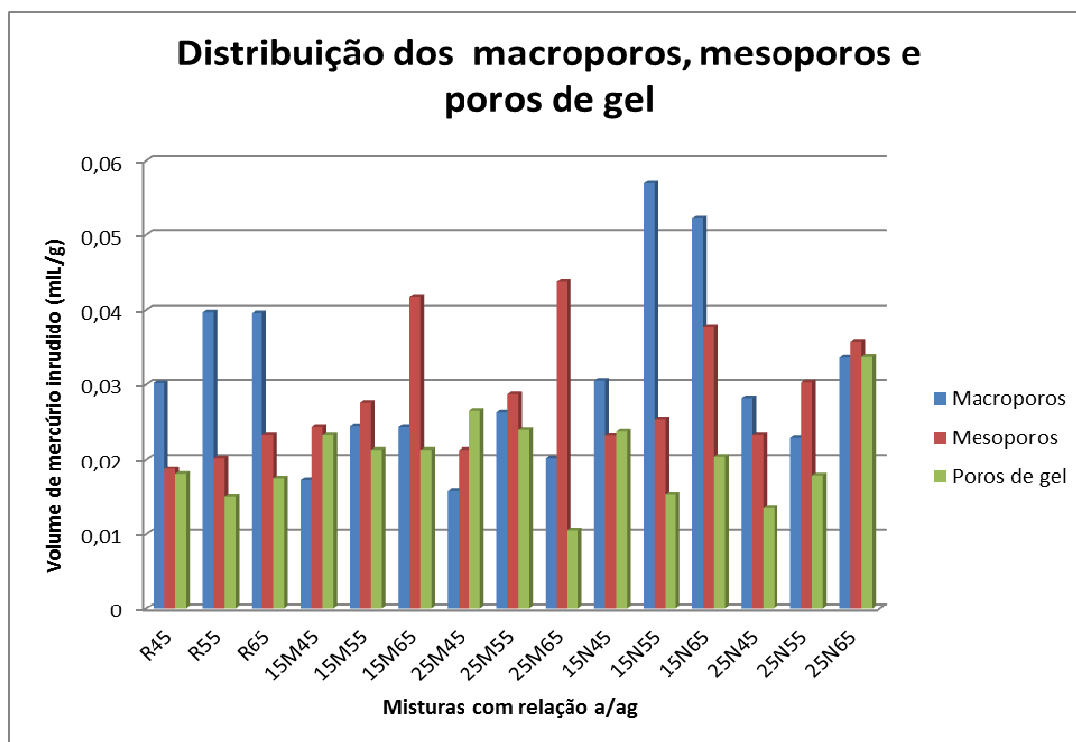


Figura 4.9 – Distribuição dos volumes de mercúrio intrudido dos macroporos, mesoporos e poros de gel aos 540 dias

Fazendo a análise das quantidades de poros de gel, com exceção da mistura 25N, observa-se que os teores são maiores que para relações a/ag menores indicando que o refinamento dos poros foi maior para essas misturas. Com efeito, quanto mais próximos os grãos maiores são as interações das reações químicas (hidratação e pozolânicas) e físicas, o que proporciona maior subdivisão dos espaços vazios. A mistura 25N apresentou a maior quantidade de poros de gel para

a relação a/g 0,65, ou seja, para haver o maior refinamento dos poros foi necessário uma maior relação a/ag (mais espaço), principalmente em função do efeito do teor de 25% de CCA natural que proporcionaria maior quantidade de reação pozolânica. Provavelmente esta poderia ser uma explicação para o comportamento incongruente enunciado acima para essa mistura.

A figura 4.10 apresenta os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de Duart (2008) que investigou os mesmos traços e as moldagens foram simultâneas, sendo que os seus ensaios foram realizados aos 91 dias de idade.

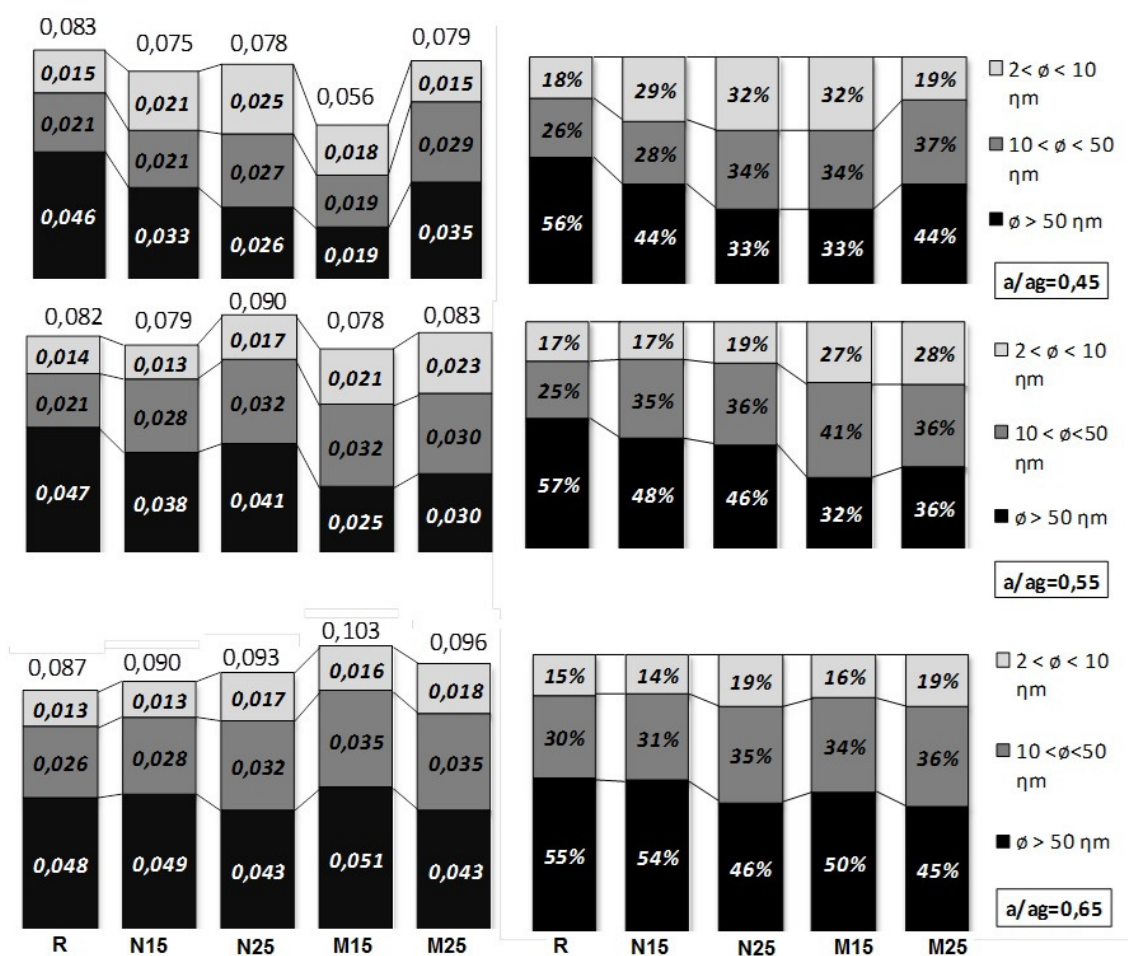


Figura 4.10 – Volume de mercúrio intrudido (mL/g), - Distribuição dos tamanhos dos poros, aos 91 dias
Fonte: Duart (2008).

Para comparar os resultados, o autor apresenta os resultados na figura 4.11 com a mesma organização da figura 4.10 (DUART, 2008). Dessa forma, possibilita-se uma melhor confrontação entre os resultados.

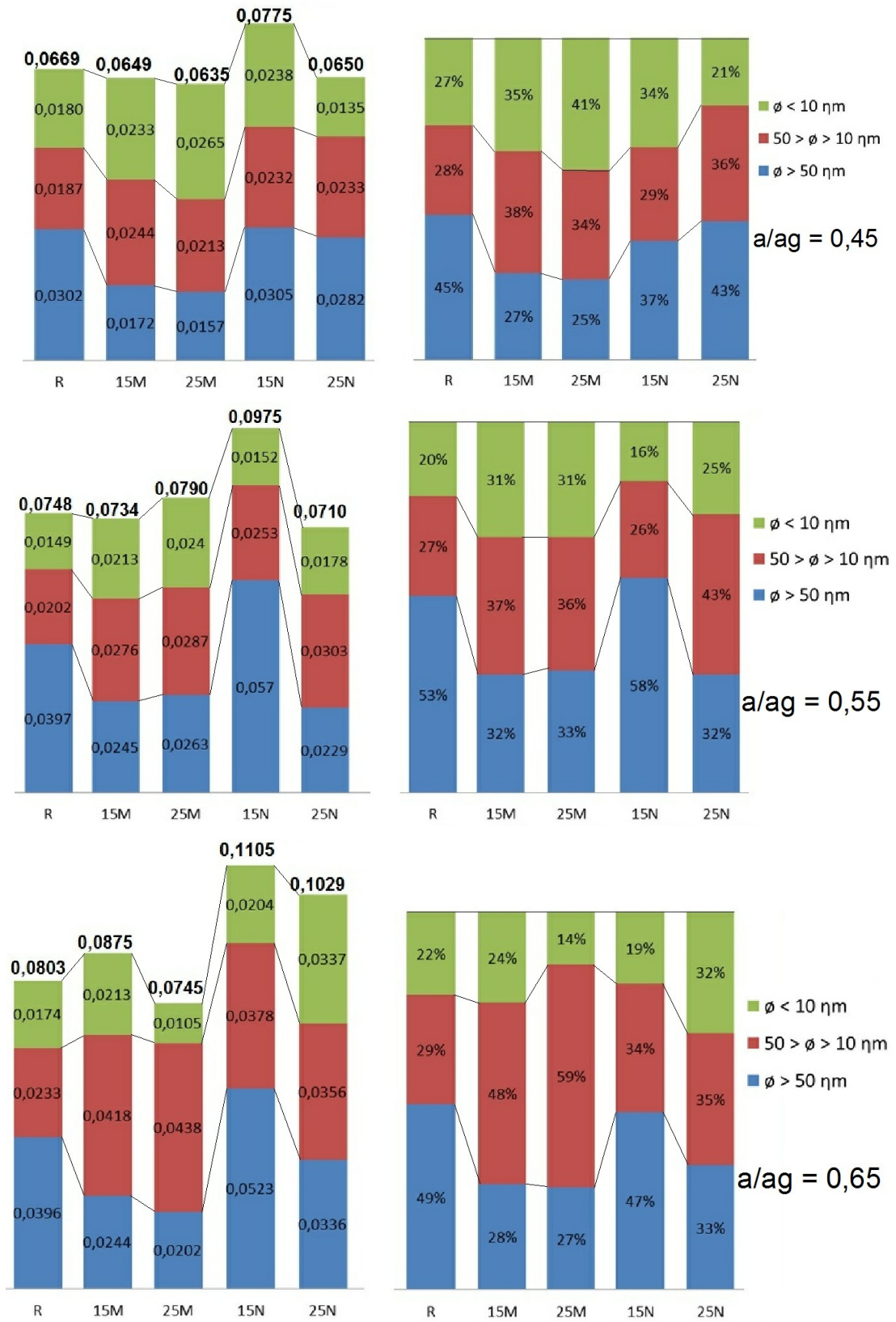


Figura 4.11 – Distribuição dos tamanhos e percentagem dos poros e percentagem para as misturas para as relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65 aos 540 dias

Nas figuras 4.10 e 4.11, os volumes totais de intrusão segundo classificação de Mindess e Young (1981) estão no centro de cada barra, sendo as mesmas localizadas à esquerda da figura. Os volumes totais de mercúrio intrudido estão na parte superior das barras. Na parte localizada à direita das figuras são apresentados os percentuais do volume total intrudido correspondente a cada faixa.

De acordo com a figura 4.11, fazendo-se a análise para a relação a/ag 0,45, todas as misturas com substituição parcial de cimento por CCA apresentaram valores de poros de gel e mesoporos superiores a mistura referência, estabelecendo um maior refinamento os poros.

Verificando-se os percentuais de volume total intrudido, nota-se que a mistura 15M apresentou o maior volume de Hg intrudido na faixa dos mesoporos, com 38% do volume total intrudido; os poros de gel somaram 35% e os macroporos 27%. A mistura 25M apresentou 41% do volume intrudido nos poros de gel, 34% nos mesoporos e 25% nos macroporos. Fazendo a comparação com a mistura referência, que apresentou 27% do volume intrudido nos poros de gel, 28% nos mesoporos e 45% nos macroporos, observa-se o maior refinamento dos poros nas misturas com CCA moída, onde o efeito da moagem influencia diretamente na reatividade da pozolana.

Examinando as misturas com CCA natural para a relação a/ag 0,45, observa-se os maiores volumes intrudidos nos macroporos. A mistura 15 N apresenta 34% do volume intrudido nos poros de gel, 29% nos mesoporos e 37% nos macroporos, enquanto que a mistura 25N apresenta os valores de volume intrudido para os poros de gel, mesoporos e macroporos de 21%, 33%, 46%, respectivamente. Dessa maneira, nota-se que o volume de macroporos é maior para a mistura 25N comparada com a mistura 15N. Tal fato pode ser explicado devido ao efeito físico do maior tamanho dos grãos, pois na mistura 25N para baixas relações a/ag uma parte da CCA pode não reagir completamente, não contribuindo para o refinamento dos poros.

Para a relação a/ag 0,45, realizando a comparação com Duart (2008), observa-se que para todas as misturas a quantidade de poros de gel aumentou. Conforme era esperado, este fato comprova que a evolução do refinamento dos poros da idade de 91 dias para a idade de 540 dias. Para as misturas com CCA natural, observa-se o aumento da quantidade de macroporos e a redução dos mesoporos em comparação com as respectivas misturas investigadas por Duart

(2008). Para a mistura 15N a porcentagem total de macroporos variou de 33% para 37% dos 91 dias para os 540 dias, ou seja, embora aumentasse a quantidade de poros de gel 32% para 34%, o aumento dos macroporos foi mais significativo indicando que não houve refinamento dos poros. Já a mistura 25N aos 540 dias apresentou uma porcentagem de macroporos de 43%, enquanto que aos 91 dias a porcentagem foi de 44% do total de volume intrudido, sendo que poros de gel passaram de 19% para 21% dos 91 para os 540 dias, indicando um ligeiro refinamento dos poros.

Verificando os resultados da figura 4.11 para as misturas nas relações a/ag igual a 0,55 comparadas com a relação 0,45; observa-se um aumento dos macroporos e mesoporos para todas as misturas, com exceção da mistura 25N. Na mistura 15M, relação a/ag 0,45, a porcentagem dos macroporos, mesoporos e poros de gel passaram de 27%, 38% e 35%, respectivamente, para 32%, 37% e 31% na relação a/ag 0,55. Observa-se que com o aumento da relação a/ag de 0,45 para 0,55, aumenta-se a quantidade de macroporos, e o concreto aumenta a porosidade de 14,2% para 15,1%, de acordo com a tabela 5.15. Para a mistura 25M, se mantém o comportamento da mistura 15M, onde a porosidade aumenta de 13,6% para a relação a/ag 0,45 para 16,6% na relação a/ag 0,55. Já na mistura 15N, a porcentagem de macroporos eleva-se de 37% para 58%, quando a relação a/ag varia de 0,45 para 0,55. Comparada com as outras misturas, a 15N apresentou o maior acréscimo de macroporos. Isto pode ser explicado devido à atuação concomitante do teor e reatividade da CCA natural, onde a porosidade da mistura variou de 17,1% para 19,9%, os valores mais altos observados nos ensaios, de acordo com a Tabela 4.15.

Um comportamento interessante foi observado na mistura 25N quando a relação a/ag variou de 0,45 para 0,55. A porcentagem dos macroporos, mesoporos e poros de gel passaram de 43%, 36% e 21%, respectivamente, para 32%, 43% e 25% na relação a/ag 0,55. Não há explicação plausível para a diminuição dos macroporos e aumento dos meso e microporos para uma relação a/ag mais elevada, no caso 0,55 em relação a 0,45. Porém, a porosidade na mistura 25N passou de 14,1% (relação a/ag 0,45) para 15,4% (relação a/ag 0,55), como esperado.

De acordo com a figura 4.11, comparando-se os resultados com Duarte (2008) para a relação a/ag 0,55; observa-se que para todas as misturas, com exceção da mistura 15N e 25N, a quantidade de poros de gel aumentou. Para a mistura

referência e as misturas com CCA moída, as porcentagens de macroporos reduziram de maneira significativa. Para o traço R a porcentagem de macroporos reduziu de para 53% do volume total de mercúrio intrudido. Já na mistura 15M, a redução foi de 48% para 32% e na mistura 25M o decréscimo foi de 46% para 36% do volume total de Hg intrudido. Esse comportamento mostra o refinamento dos poros dos 91 dias para os 540 dias, evidenciando o efeito da finura e reatividade da CCA moída, promovendo um refinamento dos poros.

Realizando a análise para a relação a/ag 0,65 de acordo com a figura 4.11, observa-se um aumento nas porcentagens dos macroporos e mesoporos em comparação com as relações a/ag 0,45 e 0,55. Esse comportamento era esperado, visto que para relações a/ag maiores o concreto fica mais poroso.

Comparando-se os dados do autor com Duarte (2008), verifica-se que para a mistura referência a redução dos macroporos foi de 55% para 49%, fato esse explicado pelo desenvolvimento das reações de hidratação do cimento dos 91 para os 540 dias. O comportamento das misturas 15M e 25M foram os mais relevantes. No caso da mistura 15M aos 91 dias, a porcentagens do volume de Hg intrudido foram de 54%, 31% e 14% para os macroporos, mesoporos e poros de gel, respectivamente. Já aos 540 dias as porcentagens foram de 28%, 48% e 24% para os macroporos, mesoporos e poros de gel, respectivamente. Confrontando a mistura 25M aos 91 dias e aos 540 dias, a porcentagens do volume de Hg intrudido para os macroporos, mesoporos e poros de gel foram 46%, 35% e 19%, respectivamente, para aos 540 dias de 27%, 59% e 14%. Dessa maneira, constata-se o efeito do teor e reatividade da pozolana, refinando de maneira efetiva os poros do concreto quando aumenta o teor da pozolana na mistura e da idade de ensaio, pois ambos os fatores contribuem para maior grau de reações pozolânicas e de refinamento dos poros e dos grãos de CH.

Vaghetti (2005) verificou o refinamento dos poros em função da influência de adições minerais como cinza de casca de arroz, cinza volante e escória granulada de alto forno, especialmente para as relações a/ag mais reduzidas.

Assim, a incorporação de CCA no concreto promoveu uma redistribuição dos poros, tornando a microestrutura mais compacta e melhorando algumas propriedades do concreto.

A seguir, por intermédio das tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 serão analisadas as distribuições de volume intrudido separadamente para as três dimensões dos poros:

macro, meso e poros do gel, para as relações 0,45, 0,55 e 0,65 aos 540 dias de idade.

Tabela 4.9 – Distribuição volume de Hg intrudido (em mL/g) dos tamanhos dos poros em relação ao traço R (índices entre parêntesis) e aos traços com CCA (índices em colchetes), para a relação a/ag 0,45 aos 540 dias

Mistura	Macroporos	Mesoporos	Poros de gel
a/ag 0,45	$\emptyset > 50 \text{ }\mu\text{m}$	$50 > \emptyset > 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\emptyset < 10 \text{ }\mu\text{m}$
R	0,0302 (100)	0,0187 (100)	0,0180 (100)
15M	0,0172 (57) [100]	0,0244 (130) [100]	0,0233 (129) [100]
25M	0,0157 (52) [100]	0,0213 (114) [100]	0,0265 (147) [100]
15N	0,0305 (101) [177]	0,0232 (124) [95]	0,0238 (132) [102]
25N	0,0282 (93) [180]	0,0233 (125) [109]	0,0135 (75) [51]

A tabela 4.9 apresenta a distribuição dos tamanhos dos poros das misturas contendo adição de CCA natural e moída nos teores de 15% e 25% em substituição parcial ao cimento em comparação à mistura referência, para a relação água/aglomerante de 0,45. Observa-se para as misturas 15M e 25M, comparadas com a mistura R, a redução na faixa do macroporos e o aumento significativo nos mesoporos e poros de gel. A mistura 15M apresenta uma redução de 43% na porcentagem de Hg intrudido nos macroporos e um acréscimo nos mesoporos e poros de gel de 30% e 29%, respectivamente. A mistura 25M apresenta um comportamento similar, reduzindo 48% nos macroporos e aumentando 14% e 47% nos mesoporos e poros de gel, respectivamente. Este fato evidencia o refinamento dos poros promovido pela CCA moída.

A mistura 15N apresentou um valor próximo na porcentagem de macroporos e valores mais elevados de porcentagem de Hg intrudido nos mesoporos e poros de gel. Já a mistura 25N apresentou uma redução de 7% na porcentagem de macroporos comparado com a mistura R e uma redução de 25% nos poros de gel.

De acordo com a tabela 4.9, fazendo-se a análise dos resultados dos ensaios com o mesmo teor de substituição parcial de CCA por cimento (valores entre colchetes), comparando-se as misturas 15M e 15N, observa-se que a mistura 15N

apresentou um acréscimo de 77% na porcentagem de macroporos, uma redução de 5% na porcentagem de mesoporos e um acréscimo de 2% na porcentagem de poros de gel em relação à mistura 15M. Realizando-se a comparação da mistura 25N em relação à 25M, verifica-se um acréscimo de 80% no teor de macroporos, redução de 9% na porcentagem de mesoporos e redução de 49% na porcentagem de poros de gel.

Dessa maneira, observa-se que para ambos os teores, de 15% e 25% de CCA natural em comparação com os respectivos teores de CCA moída, houve um acréscimo em torno de 80% nos macroporos, constatando-se um maior refinamento dos poros nas misturas com CCA moída. Já em relação aos mesoporos, houve uma redução de 5% para a mistura 15N e um acréscimo de 9% para a mistura 25N em relação às misturas com CCA moída, onde não houve uma variação significativa no refinamento dos poros. Confrontando os poros de gel das misturas com 15% de CCA, observa-se um acréscimo de 2% da mistura 15N em relação à 15M e uma redução de 49% da mistura 25N para a mistura 25M. Assim, comparando-se a mistura 15M e 15N, observa-se que a mistura 15M apresentou um maior refinamento dos poros, onde a porosidade da mistura 15M é de 14,1% e a da mistura 15N é de 17,1%. A mistura 25M, segundo tabela 4.14, apresenta porosidade de 13,6% enquanto que a mistura 25N apresenta porosidade de 14,1%.

Tabela 4.10 – Distribuição volume de Hg intrudido (em mL/g) dos tamanhos dos poros em relação ao traço R (índices entre parêntesis) e aos traços com CCA (índices em colchetes), para a relação a/ag 0,55 aos 540 dias

Mistura	Macroporos	Mesoporos	Poros de gel
a/ag 0,55	$\emptyset > 50 \text{ nm}$	$50 > \emptyset > 10 \text{ nm}$	$\Phi < 10 \text{ nm}$
R	0,0397 (100)	0,0202 (100)	0,0149 (100)
15M	0,0245 (62) [100]	0,0276 (137) [100]	0,0213 (143) [100]
25M	0,0263 (66) [100]	0,0287 (142) [100]	0,0240 (161) [100]
15N	0,0570 (144) [232]	0,0253 (125) [92]	0,0152 (102) [71]
25N	0,0229 (58) [88]	0,0303 (150) [106]	0,0178 (119) [74]

De acordo com a tabela 4.10, a mistura 25M é a que apresenta as maiores porcentagens de Hg intrudido para os mesoporos e poros de gel, evidenciando o efeito da CCA moída no refinamento dos poros. A mistura 25N, reduziu a porcentagem de macroporos em 42% e aumentou em 50% e 19% para os mesoporos e poros de gel, respectivamente. Neste caso, observa-se o efeito físico da CCA natural, pois a porosidade da mistura R é de 16% enquanto que para a mistura 25N a porosidade é de 15,4%, comprovando o refinamento dos poros. Este resultado pode ser considerado anômalo, uma vez que o traço 25N foi o que apresentou a menor resistência à compressão axial e, também, a menor intrusão de Hg para a relação $a/ag = 0,55$.

Fazendo-se a análise dos resultados para as misturas com mesmo teor de CCA (valores entre colchetes), comparando-se as misturas 15M e 15N, observa-se que a mistura 15N apresentou um aumento de 132% na porcentagem de macroporos e uma redução de 8% e 29% na porcentagem de mesoporos e poros de gel, respectivamente, em relação à mistura 15M. Conforme a tabela 4.8, a porosidade da mistura 15M comparada com a mistura 15N é menor, com valores de 15,8% e 19,9%, respectivamente. Tal fato é elucidado pelo aumento da porcentagem de macroporos e redução dos mesoporos e poros de gel.

Verificando-se a comparação dos resultados obtidos para a mistura 25N em relação à 25M, verifica-se uma redução na porcentagem de macroporos e poros de gel de 12% e 26%, respectivamente, e um acréscimo de 6% na porcentagem de mesoporos. Quando se observa a porosidade, conforme a tabela 4.8, assumindo os valores de 16,6% e 15,4% para as misturas 25M e 25N, respectivamente, constata-se um comportamento irregular, visto que a resistência à compressão axial para o traço 25M é 33% superior ao traço 25N.

Para a relação a/ag 0,65; comparando as misturas com CCA moída e *in natura*, conforme tabela 4.11, a mistura 25N, reduziu a porcentagem de macroporos em 15% e aumentou em 53% e 94% para os mesoporos e poros de gel, respectivamente. Neste caso, embora a porcentagem de volume de Hg intrudido nos mesoporos e poros de gel sejam mais elevados em comparação com a mistura referência, a porosidade da mistura R é 18,7% enquanto que na mistura 25N a porosidade é 20,1%. Como são os poros de maior diâmetro que podem promover a entrada de agentes agressivos para o interior do concreto, essa é uma circunstância conveniente para o mesmo.

De acordo com a tabela 4.11, analisando-se os resultados para as misturas com mesmo teor de CCA (valores entre colchetes), fazendo o confronto entre as misturas 15M e 15N, observa-se que a mistura 15N apresentou um aumento de 113% na porcentagem de macroporos e uma redução de 10% e 4% na porcentagem de mesoporos e poros de gel, respectivamente, em relação à mistura 15M. Conforme a tabela 4.8, comparando-se a porosidade das misturas 15M e 15N, cujos valores são 18,3% e 22%, respectivamente, observa-se que o aumento significativo da porcentagem de macroporos no traço 25N comparado com o 25M é o fator preponderante para o aumento da porosidade.

Tabela 4.11 – Distribuição volume de Hg intrudido (em mL/g) dos tamanhos dos poros em relação ao traço R (índices entre parêntesis) e aos traços com CCA (índices em colchetes), para a relação a/ag 0,65 aos 540 dias

Mistura a/ag 0,65	Macroporos $\emptyset > 50 \text{ }\mu\text{m}$	Mesoporos $50 > \emptyset > 10 \text{ }\mu\text{m}$	Poros de gel $\emptyset < 10 \text{ }\mu\text{m}$
R	0,0396 (100)	0,0233 (100)	0,0174 (100)
15M	0,0244 (62) [100]	0,0418 (179) [100]	0,0213 (122) [100]
25M	0,0202 (51) [100]	0,0438 (188) [100]	0,0105 (60) [100]
15N	0,0523 (132) [213]	0,0378 (162) [90]	0,0204 (117) [96]
25N	0,0336 (85) [167]	0,0356 (153) [81]	0,0337 (194) [323]

A figura 4.12 apresenta a média dos resultados do ensaio de porosimetria aos 91 e 540 dias. Observa-se que a porosidade reduziu para todas as misturas, com exceção da mistura 15N, que aumentou de 17,1% para 19,4% dos 91 dias para os 540 dias, não havendo explicação aparente para tal comportamento. As misturas que apresentaram as maiores reduções de porosidade foram as com CCA moída, onde no teor de 15% a redução foi de 2,7% e no teor de 25% apresentou redução de 2,5%.

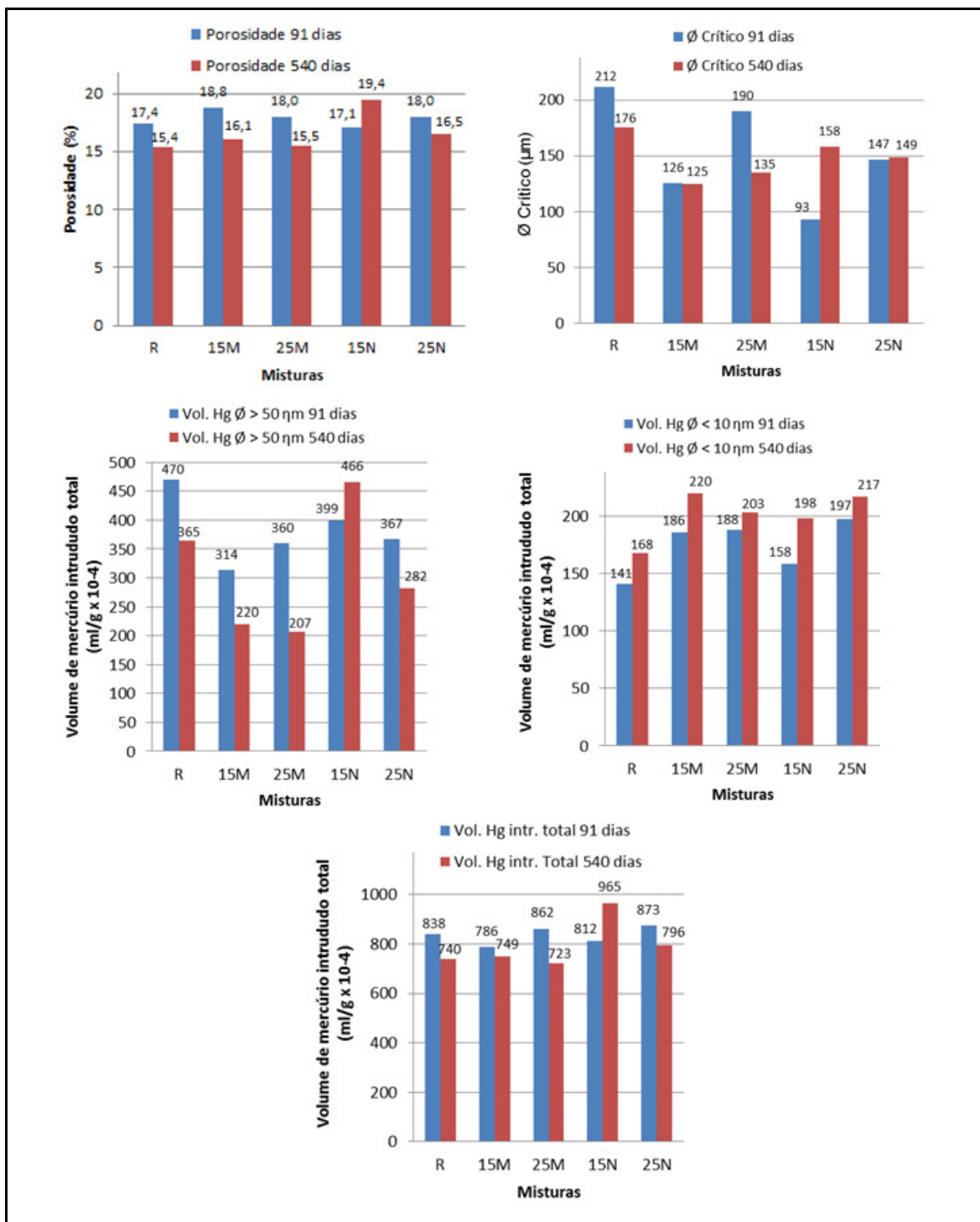


Figura 4.12 – Médias das variáveis dos resultados dos ensaios de porosimetria aos 91 dias e aos 540 dias

Fazendo a análise do diâmetro crítico, verifica-se que os menores valores são os encontrados para a mistura 15M. Este comportamento era esperado, pois a mistura apresentou uma redução significativa da porcentagem de macroporos e um

incremento considerável nos mesoporos e poros de gel. Já a mistura 25M foi a que apresentou a maior redução no diâmetro crítico dos 91 dias para os 540 dias, onde o mesmo passou de 190 μm para 135 μm . Tal fato comprova-se pelo maior incremento de todas as misturas nas porcentagens de mesoporos e poros de gel, como descrito nas tabelas 4.9, 4.10 e 4.11. O diâmetro crítico reduziu para todos os traços, com exceção do traço 15N, novamente com comportamento incongruente e sem explicação aparente.

Comparando-se os volumes de mercúrio intrudidos pela faixa de poros, observa-se que para todas as misturas, com exceção da 15N, os volumes nos diâmetros $\Phi \geq 50 \text{ nm}$ (macroporos) são maiores para os 91 dias em relação aos 540 dias. Fazendo-se análise para $\Phi \leq 10 \text{ nm}$ (poros de gel), observa-se que os maiores volumes intrudidos estão na faixa dos poros de gel. Esse comportamento era esperado, pois ao longo do tempo ocorre hidratação do cimento e da pozolana de CCA, onde os poros são refinados, diminuindo o volume de macroporos e aumentando os poros de gel.

Pela figura 4.12 somente a mistura 15N apresenta comportamento anômalo para todas as variáveis, o que pode ter acontecido por problema de ensaio aos 91 dias, conforme já comentado nos parágrafos anteriores.

4.6.2 Análise dos resultados em igualdade de resistência à compressão

Observando-se os coeficientes de determinação conforme tabela 4.12, verifica-se a correlação entre os resultados de resistência à compressão axial para o concreto classe C25 (31,6 MPa a 28 dias) e o diâmetro crítico, pois ambos os coeficientes para todas as misturas são valores próximos de 1,00 (um), indicando uma forte dependência entre as duas variáveis.

Tabela 4.12 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão de potência $f_c = a \cdot \Phi_{cr}^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e o diâmetro crítico (Φ_{cr})

Idade	R	15M	25M	15N	25N
91 dias (DUART, 2008)	0,95	1,00	0,98	0,87	0,84
540 dias	0,94	1,00	0,93	0,71	1,00

Observa-se pela figura 4.13 entre as resistências à compressão axial (classe C25) a 91 e 540 dias e os respectivos diâmetros críticos, que as misturas 15N e 25M dependeram pouco da variação da resistência, pois as retas se posicionam próximas à horizontal em relação às abscissas. Isto representa que o decréscimo de diâmetro crítico a 540 dias teve maior influência das reações pozolânicas do que do aumento da resistência à compressão. Para as demais misturas essa influência foi maior, pois as retas são mais verticais, principalmente para as misturas 15M e 25N.

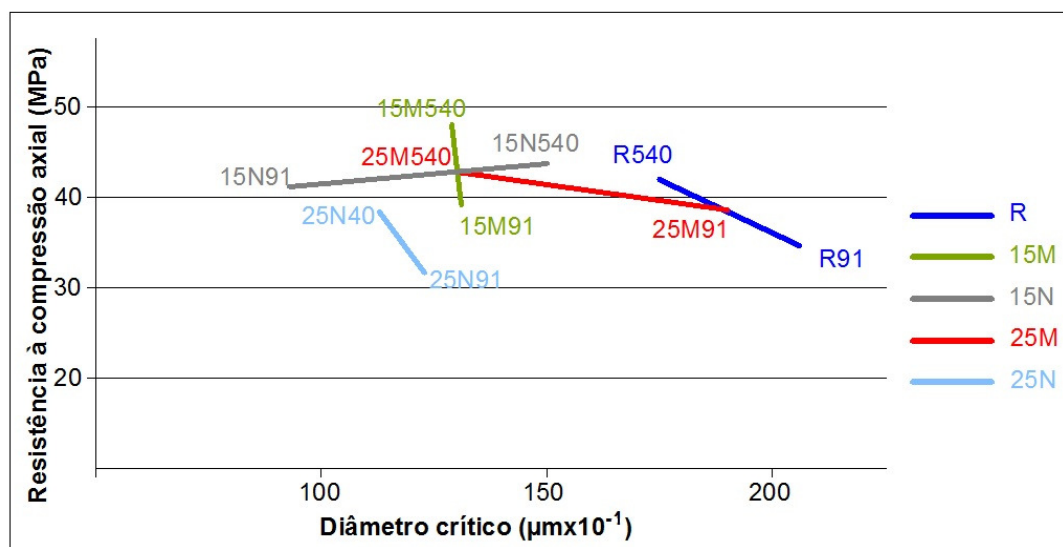


Figura 4.13 – Diâmetro crítico em $\mu\text{m} \times 10^{-4}$ aos 91 dias (DUART, 2008) e 540 dias com as respectivas resistências à compressão axial

A figura 4.14 mostra a variação dos diâmetros críticos entre 91 e 540 dias, mostrando o decréscimo havido entre ambos, com exceção da mistura 15N, conforme já comentado anteriormente, com problemas anômalos, provavelmente erro de ensaio a 91 dias. Os demais traços apresentaram um decréscimo médio de 15% no Φ_{cr} quando a idade aumentou de 91 para 540 dias.

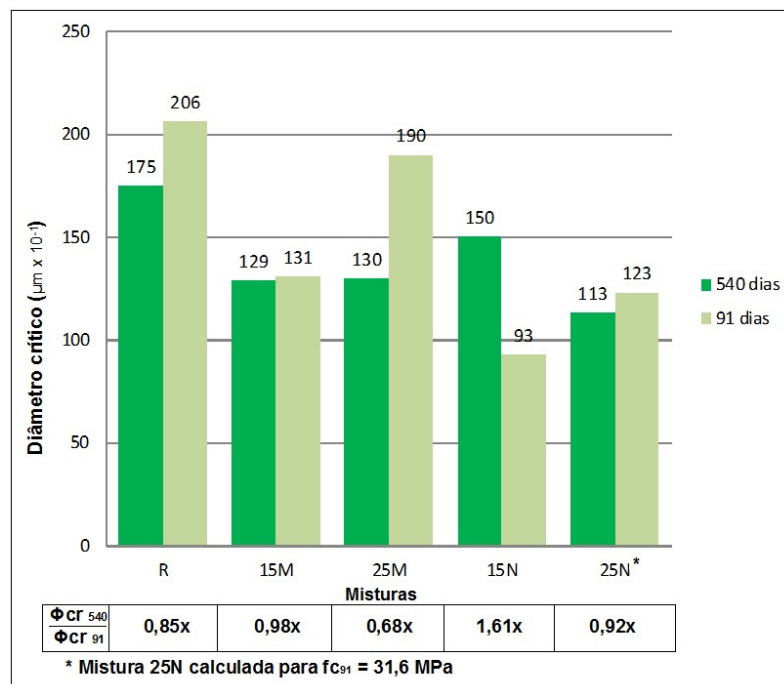


Figura 4.14 – Relação do diâmetro crítico para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa)

A tabela 4.13 mostra os coeficientes de determinação entre os volumes totais de Hg intrudido com as respectivas resistência à compressão axial para o concreto classe C25 (31,6 MPa a 28 dias), por meio de regressão de potência, observando-se que as correlações são muito fortes para ambas idades de ensaio.

Tabela 4.13 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão $f_c = a \cdot V_{tHG}^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e o volume total de Hg intrudido (V_{tHG})

Idade	R	15M	25M	15N	25N
91 dias (DUART, 2008)	0,98	1,00	0,86	0,90	0,92
540 dias	1,00	0,94	1,00	0,92	0,90

A figura 4.15 mostra as relações entre as resistências à compressão axial (classe C25) e os volumes totais de Hg intrudido. Com exceção da mistura 15M as demais apresentaram comportamento similar, com menor influência da resistência à compressão sobre a evolução do volume total de Hg, quando a idade aumenta de 91 para 540 dias. Observa-se o comportamento anômalo da reta 15N que aumenta apresentou menor valor de Hg a 91 dias.

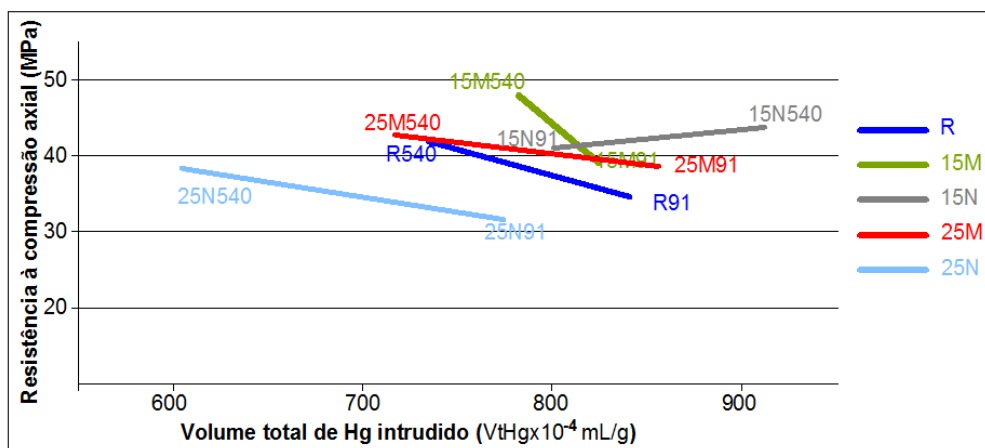


Figura 4.15 – Volume total de mercúrio intrudido ($V_{tHg} \times 10^{-4}$) aos 91 dias (DUART, 2008) e 540 dias com as respectivas resistências à compressão axial

A figura 4.16 apresenta os mesmos resultados em gráfico de barras. Observa-se o comportamento anômalo do traço 15N com inversão de valores de Hg intrudido entre 91 e 540 dias, já comentado anteriormente. Houve um decréscimo médio, para os demais traços, de 14% com o aumento da idade, similar ao do diâmetro crítico, evidenciando coerência entre estes resultados.

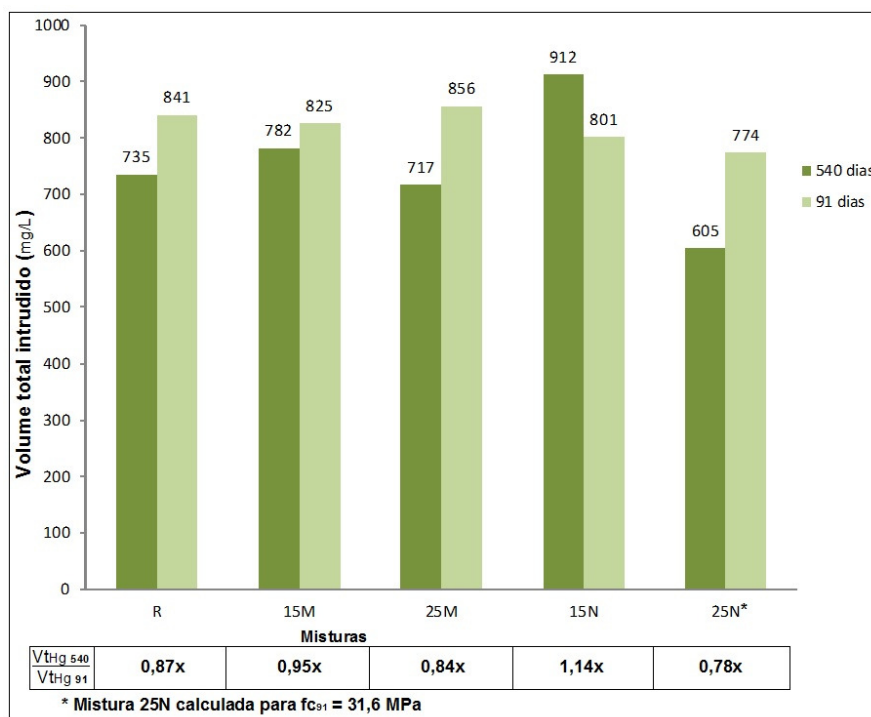


Figura 4.16 – Relação do volume total intrudido para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa)

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

4.7.1 Análise em igualdade de relação a/ag

Os resultados obtidos no ensaio, conforme a norma ASTM C 1202, estão apresentados na tabela 4.14, onde consta a carga total passante em Coulombs (Ampère.segundo) para todas as misturas aos 540 dias, determinados a partir de testemunhos extraídos. Nesta mesma tabela 4.14 constam os valores obtidos por Pedrozo (2008), com os mesmos traços e ensaio a 91 dias de idade, para corpos de prova moldados juntamente com os protótipos da presente pesquisa. São mostradas ainda as diferenças obtidas entre as duas idades de ensaio, em percentagem. A figura 4.17 mostra graficamente os resultados encontrados a 540 dias e as figuras 4.18, 4.19 e 4.20 a variação das cargas passantes entre 91 e 540 dias, respectivamente para as relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de penetração de cloretos (ASTM C 1202) a 91 dias (PEDROZO, 2008) em c.p. moldados e a 540 dias em testemunhos extraídos de protótipos (esta dissertação)

Mistura	a/ag	Q (Coulombs)		Redução da carga passante	
		Pedrozo (2008) c.p. moldados 91 dias	Dissertação testemunhos 540 dias	540 x 91 dias	
				% individual	% média
R	0,45	2885	2263	-21,6 %	-23,2 %
	0,55	3421	2564	-25,1 %	
	0,65	3809	2932	-23,0 %	
15M	0,45	1654	713	-56,9 %	-61,3 %
	0,55	1915	750	-60,8 %	
	0,65	2306	782	-66,1 %	
25M	0,45	940	435	-53,7 %	-59,2 %
	0,55	1288	534	-58,5 %	
	0,65	1696	586	-65,5 %	
15N	0,45	2231	1314	-41,1 %	-38,2 %
	0,55	2533	1594	-37,1 %	
	0,65	2746	1745	-36,5 %	
25N	0,45	1613	751	-53,4 %	-55,5 %
	0,55	1936	848	-56,2 %	
	0,65	2360	1016	-57,00 %	

A figura 4.17 mostra que as variações das penetrações de cloretos quando as relações a/ag cresceram de 0,45 para 0,65 não foram muito altas, permanecendo ao redor de 9% para os traços R e 15M, que mais se isolaram dos demais conforme mostra a figura, e de 29% para os três traços remanescentes que se encontram na parte inferior do gráfico.

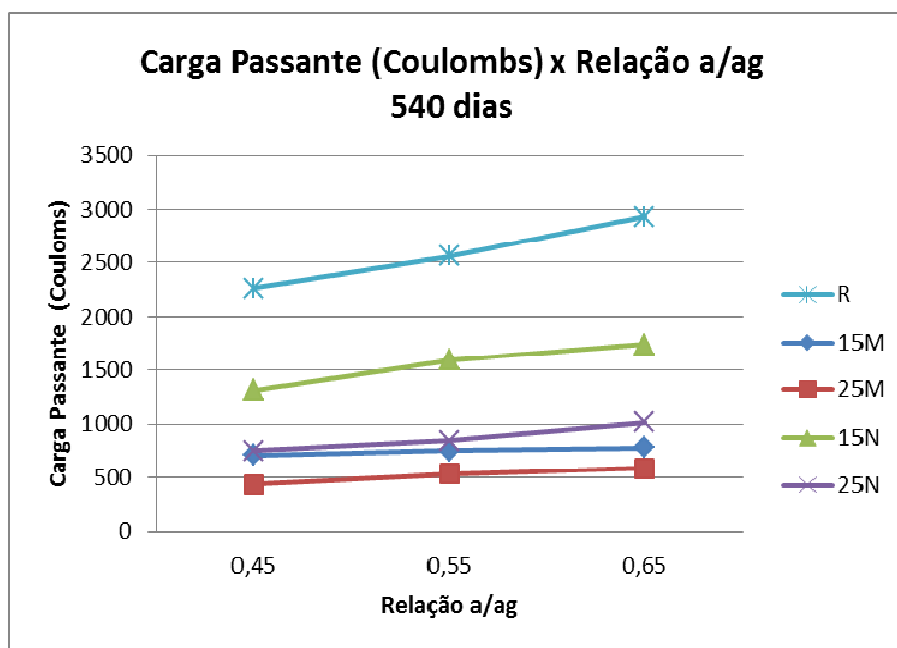


Figura 4.17 – Carga passante (Coulombs) para as diferentes relações a/ag, aos 540 dias

Comparando-se com a resistência à compressão axial (Figura 4.1) as variações foram mais elevadas (44%, em média), porque são mais sensíveis ao aumento do índice de vazios nos poros, como mostra a lei de Abrams, do que a penetração de cloretos submetidos ao mecanismo migração de íons.

A tabela 4.14 mostra decréscimo acentuado da penetração de Cl^- entre 91 e 540 dias, cerca de 23% para o traço R, de 60% para os traços 15% e 25%M, de 38% para 15N e de 56% para 25N. Este comportamento está no aumento da hidratação do cimento e das reações pozolânicas com a idade, principalmente nestas, quando o refinamento dos poros e dos grãos diminui as dimensões dos vazios e aumenta a compacidade da pasta.

A tabela 4.15 apresenta as variações de Q, em índices, a 540 dias de idade, em relação ao concreto de referência - índices entre parêntesis - e entre as misturas de CCA natural em relação às de CCA moída - entre colchetes.

As figuras 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam os resultados da carga passante Q (Coulombs) *versus* idade (dias) para as relações a/ag 0,45; 0,55 e 0,65; respectivamente. Fazendo a análise observa-se que para as três relações água aglomerante, as maiores reduções acontecem para as misturas com CCA moída, mostrando a maior reatividade e o efeito da finura.

Tabela 4.15 – Relação de carga passante nas misturas em comparação ao concreto referência (índices entre parêntesis) e das misturas de CCA natural em relação às CCA moída (índices entre colchetes), aos 540 dias

Mistura	a/ag	Q (Coulombs) (I) (índice)	Redução de carga passante	
		540 dias	540 dias	
			individual	média
R	0,45	2263 (100)	(1,0)	(1,0x)
	0,55	2564 (100)	(1,0)	
	0,65	2932 (100)	(1,0)	
15M	0,45	713 (32) [100]	(-3,2x)	(-3,4x) [1,0x]
	0,55	750 (29) [100]	(-3,4x)	
	0,65	782 (27) [100]	(-3,7x)	
25M	0,45	435 (19) [100]	(-5,2x)	(-5,0x) [1,0x]
	0,55	534 (21) [100]	(-4,8x)	
	0,65	586 (20) [100]	(-5,0x)	
15N	0,45	1314 (58) [184]	(-1,7x)	(-1,7x) [+2,1x]
	0,55	1594 (62) [213]	(-1,6x)	
	0,65	1745 (60) [223]	(-1,7x)	
25N	0,45	751 (33) [172]	(-3,0x)	(-3,0x) [+1,7x]
	0,55	848 (33) [159]	(-3,0x)	
	0,65	1016 (35) [173]	(-2,9x)	

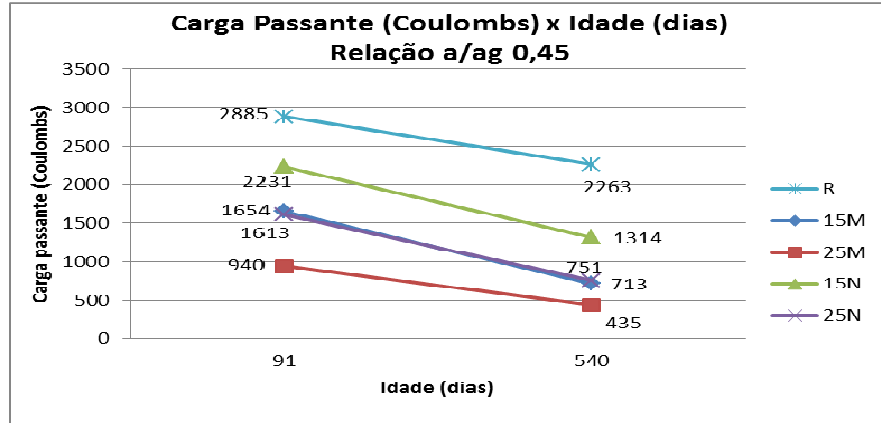


Figura 4.18 – Resultados da carga passante Q (Coulombs) *versus* idade (dias) para a relação a/ag 0,45.

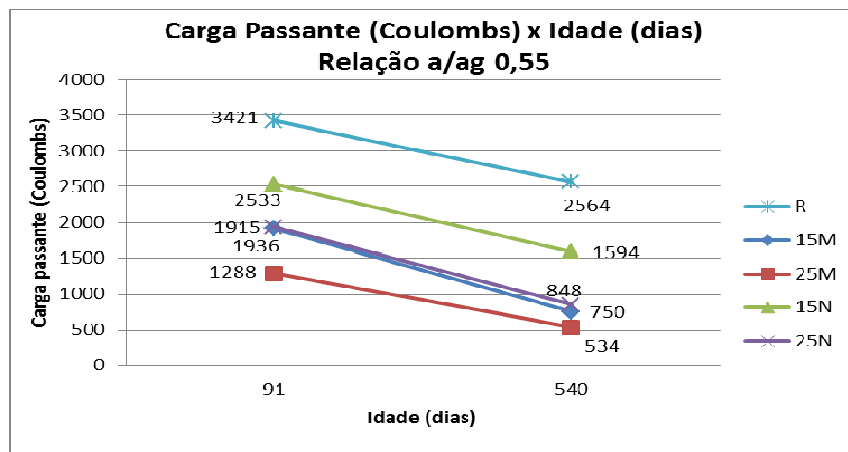


Figura 4.19 – Resultados da carga passante Q (Coulombs) *versus* idade (dias) para a relação a/ag 0,55

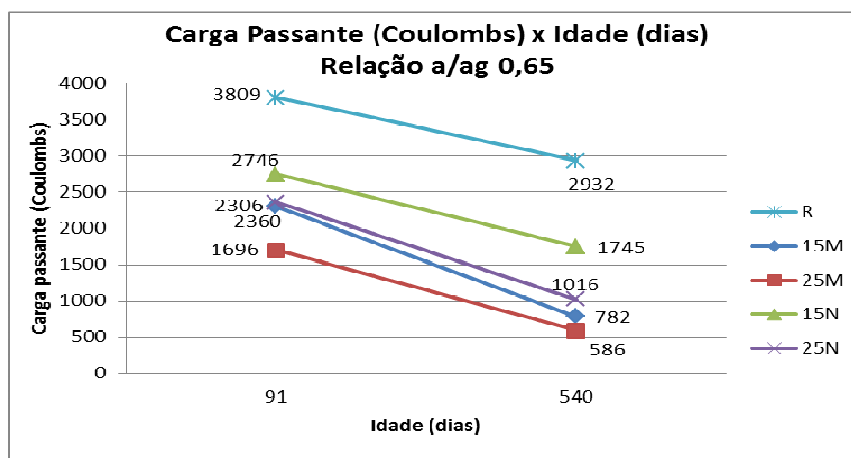


Figura 4.20 – Resultados da carga passante Q (Coulombs) *versus* idade (dias) para a relação a/ag 0,65

Analisando-se da tabela 4.15, se observam que todas as misturas apresentaram redução de carga passante superiores comparadas com a mistura referência. As misturas com CCA moída nos teores de 15% e 25% apresentaram reduções médias de -3,4x e -5,0x, respectivamente, na carga passante em comparação a mistura R. As misturas 15N e 25N apresentaram reduções médias de -1,7x e -3,0x, respectivamente, com a mistura referência.

Quando se realiza as comparações entre as misturas com CCA moída e natural (valores entre colchetes), comparando a mistura 15M com a 15N, verifica-se que a mistura 15N apresenta um acréscimo médio de carga passante de +2,1x em relação à mistura 15M. Já para as misturas com 25% de substituição parcial de CCA moída e ao natural em relação ao cimento, a mistura 25N apresenta um acréscimo médio de carga passante de +1,7x em relação à mistura 25M.

Dessa maneira, observa-se o melhor desempenho das misturas com CCA moída frente a variável de penetração acelerada de cloretos pela ASTM C 1202:2005. Tal fato pode ser explicado pela finura, teor de reatividade das misturas com CCA moída, promovendo uma maior hidratação dos compostos hidratados, refinando os poros do concreto.

Segundo Ngala, Page e Parrott (1995), o principal parâmetro que influencia a penetração de cloretos no concreto é a relação a/ag , em consequência do refinamento da porosidade capilar com baixas relações a/ag ser mais efetivo. Em concretos com baixa relação a/ag , devido a esse refinamento, os íons cloreto são obrigados a propagarem-se por caminhos mais tortuosos e desconectados, tornando assim mais difícil o seu ingresso para o interior do concreto.

4.7.2 Influência da relação água aglomerante

A figura 4.21 apresenta a variação da carga passante dos ensaios com o acréscimo das relações a/ag aos 540 dias. As misturas com relações a/ag menores foram a que obtiveram o melhor desempenho, com cargas passantes mais baixas pelo corpo de prova, cuja dimensão foi determinada pela ASTM C 1202. A figura 4.21 apresenta que com o aumento da relação a/ag ocorreu a diminuição da resistência à penetração de cloretos em todas as misturas, observado através do aumento provocado nas cargas passantes.

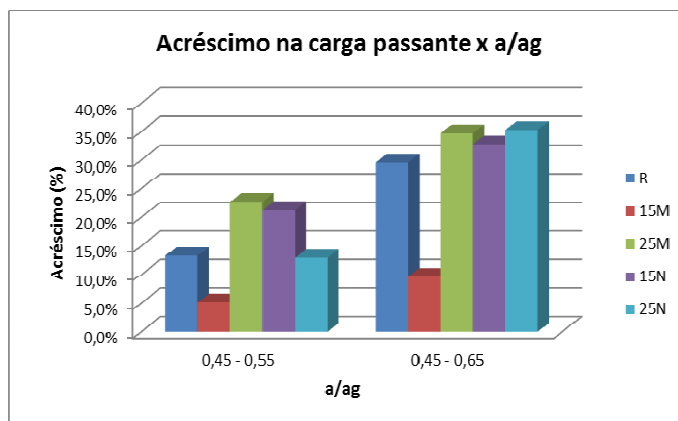


Figura 4.21 - Acréscimo da carga passante *versus* aumento da relação a/ag aos 540 dias

A mistura referência apresentou aumento de 13,3% para 29,6% de carga passante quando a relação água aglomerante passou de 0,45 para 0,55 e 0,45 para 0,65, respectivamente.

A mistura que apresentou o maior acréscimo de carga passante foi a 25N, variando de 12,9% para 35,3% quando a relação a/ag passou de 0,45 para 0,55 e 0,45 para 0,65, respectivamente. Já na mistura 15N, o acréscimo de carga passante foi de 21,3% quando a relação a/ag passou de 0,45 para 0,55 e o acréscimo foi de 32,8% quando a relação a/ag passou de 0,45 para 0,65.

As misturas com cinza de casca de arroz moída foram as que apresentaram o menor acréscimo de carga passante. A mistura 15M teve um acréscimo de carga passante de 5,2% quando a relação a/ag passou de 0,45 para 0,55 e quando a relação a/ag passou de 0,45 para 0,65 o acréscimo de carga passante de 9,7%.

Dessa forma, comprova-se que a relação água/aglomerante tem grande influência na carga passante.

Cesar (2011) também observou o acréscimo da carga passante com o aumento da relação a/ag, da mesma maneira que Missau (2004) e Schneider (2005). Sacilotto (2005) também encontrou o mesmo comportamento ao investigar concretos com teores de CCA beneficiada de 10%, 20% e 30%, nas relações a/ag de 0,35; 0,45 e 0,55.

De acordo com a tabela 4.14, Pedrozo (2008), também encontrou o mesmo comportamento em sua investigação experimental. As maiores reduções dessas cargas passantes verificam-se para as misturas 15M e 25M.

4.7.3 Influência da utilização da CCA

Segundo Shi, Stegemann e Caldwell (1998), as adições minerais promovem alterações na microestrutura do concreto, e são os principais parâmetros na carga passante no concreto.

De acordo com a tabela 4.14, comparando os resultados obtidos pelo autor com Pedrozo (2008), observa-se que a redução da carga passante aumentou com a elevação do teor de CCA de 15% para 25% de cinza de casca de arroz ao natural, reduzindo a carga passante de 38% para a mistura 15M e 55% para a mistura 25M. Esse comportamento também foi observado por Saraswathy e Song (2006), quando pesquisaram concretos com substituição entre 5% e 25% de cimento por CCA. Entretanto, quando se trata de concreto com teores acima de 30% de substituição, as cargas passantes aumentaram em relação às substituições de 20 e 25%.

Através da análise das misturas 15M e 25M, observa-se um comportamento muito próximo, sendo que a mistura 15M apresentou uma redução de cargas passante média de 61,3% enquanto que a mistura 25M apresentaram uma redução de 59,2%. Neste caso, o comportamento inverteu em comparação com Pedrozo (2008), que encontrou uma maior redução de carga passante para a mistura 25M do que na 15M. Essa inversão é um ponto muito importante para a presente pesquisa que avalia os dados com 540 dias, pois dessa maneira observa-se que o teor ideal de substituição é da CCA moída é, provavelmente, inferior a 25%.

A finura da CCA influencia de maneira muito efetiva a penetração de íons cloretos. Depois de realizado o processo de moagem, a cinza apresenta uma maior superfície específica, uma maior pozolanicidade e uma maior reatividade, promove um maior refinamento dos poros, dificultando assim a migração de íons cloreto no concreto.

Pedrozo (2008), para todos os teores de substituição, a mistura de referência foi a que apresentou o maior valor de carga passante, seguida pela mistura com CCA ao natural. O mesmo comportamento foi encontrado por Nedhi, Duquette e Damatty (2003) e Cervo (2002).

O efeito do teor de adição e finura da CCA se observa na tabela 4.15, onde para todas as misturas com CCA a redução da carga passante em relação à mistura referência foi bastante elevada, com destaque para a mistura 25M, que alcançou

uma redução média de cinco vezes. A mistura 15M também apresentou bom desempenho, com redução média de carga passante de três vezes. Em relação às misturas com CCA ao natural, a mistura 15N alcançou uma redução média de carga passante na faixa de 167%. Já a mistura 25N apresentou um desempenho melhor em relação a 15N, alcançando uma redução média de carga passante de três vezes.

4.7.4 Classificação das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto

A tabela 4.16 aborda a classificação quanto ao risco de penetração de íons cloretos conforme a ASTM C 1202:2005. Dessa forma, pode-se enquadrar o desempenho das misturas, conforme mostra a tabela 4.17 com os resultados de Pedrozo (2008) a 91 dias e dessa dissertação a 540 dias.

Tabela 4.16 – Classificação de concretos quanto ao risco de penetração dos íons cloreto de acordo com a carga passante (ASTM C 1202: 2005)

Carga Passante	Risco de penetração dos íons cloretos
> 4000	Alto
2000 a 4000	Moderado
1000 a 2000	Baixo
100 a 1000	Muito baixo
> 100	Desprezível

A tabela 4.17 mostra que as misturas 15M e 25M são classificadas com um risco **muito baixo** quanto à penetrabilidade aos íons cloretos segundo ASTM C 1202, a 540 dias. A mistura 15M aos 91 dias apresenta risco de penetração de íons cloretos considerado como **baixo** para as relações a/ag 0,45 e 0,55; e **moderado** para a relação a/ag 0,65. Já aos 540 dias todas as misturas são consideradas como risco **muito baixo**. Assim comprova-se o efeito e reatividade pozolânica dos diferentes teores de CCA moída em longo prazo frente a penetração de íons cloretos.

Tabela 4.17 – Comparação Pedrozo (2008) versus autor no enquadramento das misturas quanto à penetrabilidade aos íons cloreto segundo ASTM C 1202

Mistura	a/ag	Penetrabilidade aos íons cloretos	
		Pedrozo (2008) 91 dias - c.p.	Autor 540 dias - testemunhos
R	0,45	Moderada	Moderada
	0,55	Moderada	Moderada
	0,65	Moderada	Moderada
15M	0,45	Baixa	Muito Baixa
	0,55	Baixa	Muito Baixa
	0,65	Moderada	Muito Baixa
25M	0,45	Muito Baixa	Muito Baixa
	0,55	Baixa	Muito Baixa
	0,65	Baixa	Muito Baixa
15N	0,45	Moderada	Baixa
	0,55	Moderada	Baixa
	0,65	Moderada	Baixa
25N	0,45	Baixa	Muito Baixa
	0,55	Baixa	Muito Baixa
	0,65	Moderada	Baixa

Fazendo a análise da mistura 15N, a mesma aos 91 dias tem risco de íons cloreto considerado como **moderado**, e aos 540 dias o risco passa a ser baixo. Já a mistura 25N aos 91 dias apresenta risco **baixo** para as relações a/ag 0,45 e 0,55; e **moderado** para a relação a/ag 0,65. Aos 540 dias as relações a/ag 0,45 e 0,55 passam a ser de risco **muito baixo** e a relação a/ag 0,65 para um risco **baixo** de penetrabilidade aos íons cloretos.

Com exceção das mistura R, todas as demais tiveram queda do patamar de risco de pelo menos um grau, o que mostra os efeitos relevantes que, tanto a CCA moída quanto natural, apresentaram na obstrução da passagem dos íons cloretos, com o aumento da idade de 91 para 540 dias, pelo incremento dos compostos hidratados e pozolânicos nestas pastas cimentícias.

4.8 Resistência à compressão axial x penetração de cloretos

Conforme enunciado no item 4.3 a correlação entre as variáveis de estudo, no caso a penetração de cloretos com a resistência à compressão, em comparação

direta entre ambas é a modalidade mais adequada para analisar e discutir resultados de pesquisa, visto que é levado em consideração o parâmetro mais importante do cálculo estrutural, a resistência característica.

Como derivativo da lei de Abrams entre $f_c \times a/ag$, a grande maioria das variáveis que interferem nas propriedades do concreto são dependentes à relação a/ag como resistência à compressão axial. Com efeito, a tabela 4.18 mostra que existe alta correlação estatística, por meio de regressão simples de potência, entre as cargas passantes no concreto e suas respectivas resistências à compressão axial, porque todos os traços apresentaram coeficientes de determinação r^2 muito fortes.

Tabela 4.18 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão $f_c = a.Q^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e carga passante (Q)

Idade	R	15M	25M	15N	25N
91 dias (PEDROZO, 2008)	1,00	0,97	1,00	0,92	1,00
540 dias	0,97	0,96	1,00	0,97	0,99

A figura 4.22 apresenta com mais propriedade e clareza as variações entre as resistências à compressão axial e as cargas passantes a 91 e 540 dias onde se observa com maior evidência as modificações que ocorreram nas misturas à medida que foram substituídas na mistura referência teores de 15 e 25% de CCA moída e natural, ao longo do aumento da idade de ensaio de 91 para 540 dias. Observa-se que o aumento da idade trouxe decréscimos importantes para Q e acréscimos para f_c , à medida que a idade aumentou de 91 para 540 dias. Deve-se ainda considerar que as condições de cura não foram iguais, uma vez que para a primeira foi em c.p. em câmara úmida e para a segunda em protótipos curados em ambiente natural externo.

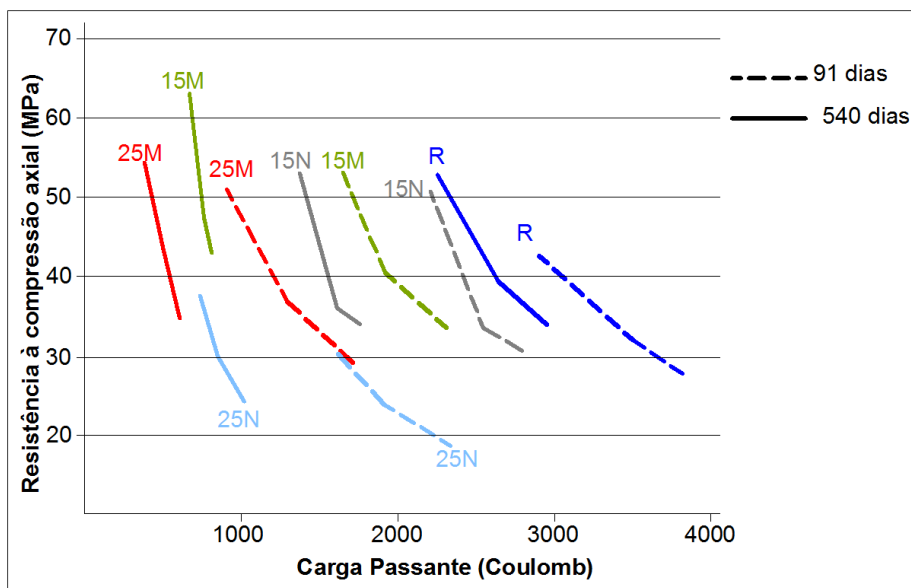


Figura 4.22 – Variação das cargas passantes em Coulombs com as respectivas relações resistências à compressão axial para 91 dias (PEDROZO, 2008) e 540 dias

A figura 4.22 mostra que o comportamento das misturas com 25% de CCA moída e natural fugiu ao padrão de comportamento dos teores de 15%, com respeito às cargas passantes Q . Apesar de haver decréscimo da resistência à compressão como o aumento do teor de CCAN, as cargas passantes não oscilaram do mesmo modo que o teor de 15%, quando houve decréscimos importantes a 91 e 540 dias. Para 25% nota-se que a 91 dias (para 540 dias também, em menor grau) as curvas praticamente seguem a mesma sequencia de decréscimo tanto para f_c quanto para Q , mostrando que para 25% de CCA natural não há modificações substanciais tanto para f_c quanto para Q , sugerindo que para teores mais elevados de CCA natural a menor finura dos grãos afetou mais a resistência à compressão que as cargas dos íons passantes do ensaio de penetração. Este comportamento poderia ser explicado pela maior retenção de cloretos pelos compostos hidratados (maior teor de cátions) quando aumenta o teor de CCAN, que possui grãos mais grossos, com maior quantidade de vazios internos aos grãos. Este comportamento não se constatou para 15% de CCAM e CCAN.

A figura 4.23 apresenta os resultados obtidos para as idades de 91 dias, em c.p. moldados (PEDROZO, 2008) e 540 dias, em testemunhos extraídos, das cargas passantes em Coulomb, considerando-se todos os traços com $f_{c28} = 31,6$ MPa (concreto classe C25), exceto para a mistura N25 com $f_{c91} = 31,6$ MPa, conforme

explanado em 4.3 (Tabela 4.14). Os cálculos das resistências foram realizados a partir da equação mencionada na tabela 4.1, utilizando-se para cada traço os valores de f_c e respectivos Q, realizando-se a interpolação estatística para as resistências calculadas pela tabela 4.4. Observa-se que somente a mistura R, em ambas as idades, permaneceu com a classificação da ASTM C 1202 com penetração moderada, enquanto que todas as demais com CCA caíram um degrau nesta classificação, quando a idade avançou de 91 para 540 dias. Os maiores decréscimos para concretos da classe C25 aconteceram para as misturas com CCA moída, com queda respectiva de 160% e 140% para os teores de 15% e 25%, enquanto que para a CCA natural o decréscimo foi menor, de 60% e 120%, respectivamente. Assim, sob o ponto de vista da penetração de cloretos existe factibilidade do emprego de CCA natural em até 25% de substituição ao cimento, embora as quedas de resistência à compressão axial com esse teor, não permitam alcançar o nível de resistência da classe C25 da NBR 12655. Neste caso, a resistência de dosagem deveria ser calculada para 91 dias ou, ainda, para 28 dias rebaixando a classe do concreto para C20.

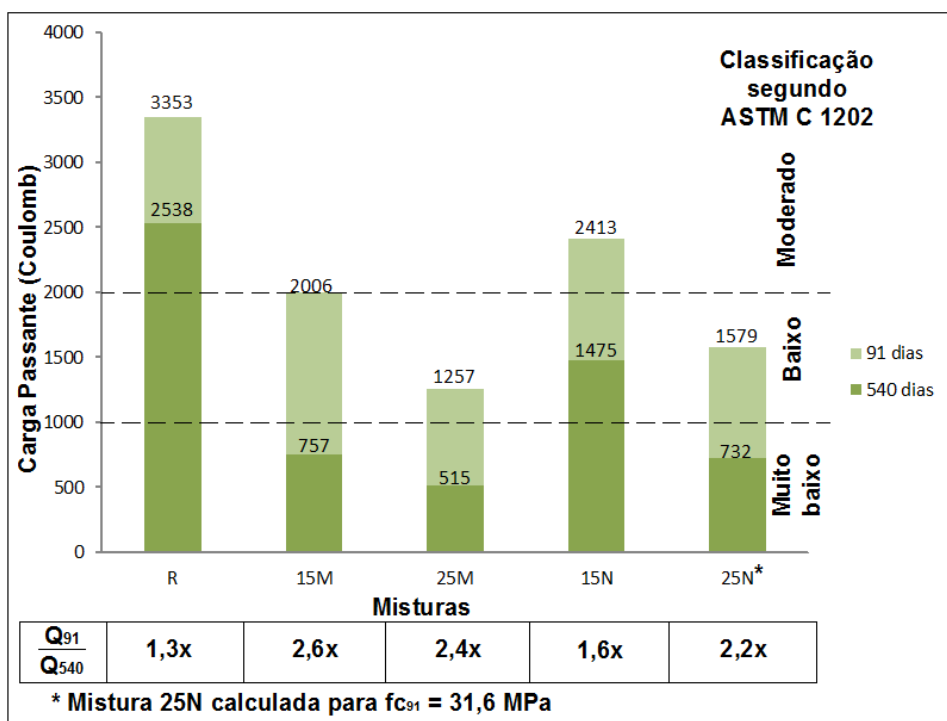


Figura 4.23 – Classificação da penetração de cloretos pela ASTM C 1202 para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa)

Assim, sob o ponto de vista de penetração de cloretos para a classe de concreto C25, há a possibilidade de se utilizar 15% de CCA natural, classificada como de penetração baixa, apesar de ter havido um acréscimo de 95% na carga passante em relação à mistura 15M, classificada como de penetração de cloretos muito baixa, para 540 dias. Para 91 dias, a mistura 15N apresentou decréscimo do valor de Q em 39% em relação ao traço R, permanecendo ambas as misturas classificadas na zona de penetração moderada.

4.9 Análise dos resultados do ensaio cloretos totais retidos

A tabela 4.19 e a figura 4.24 mostram os resultados para o ensaio de cloretos totais retidos.

De acordo com Neville (1997), a retenção de cloretos se processa nos compostos hidratados das fases aluminato e ferro-aluminato do cimento como também nos compostos iônicos de origem catódica, em especial a sílica, alumina e ferro presentes nas pozolanas. Em geral, as reações pozolânicas interferem no processo de retenção de Cl^- porque consomem sílica e outros minerais amorfos, diminuindo a tendência de fixação deste íon (ISAIA, 1995).

Tabela 4.19 – Cloretos totais retidos (Cl^-/agl) aos 540 dias

Mistura	a/ag	Cloretos retidos 540 dias %
R	0,45	0,095
	0,55	0,127
	0,65	0,148
15M	0,45	0,079
	0,55	0,095
	0,65	0,111
25M	0,45	0,047
	0,55	0,055
	0,65	0,063
15N	0,45	0,103
	0,55	0,142
	0,65	0,166
25N	0,45	0,095
	0,55	0,111
	0,65	0,119

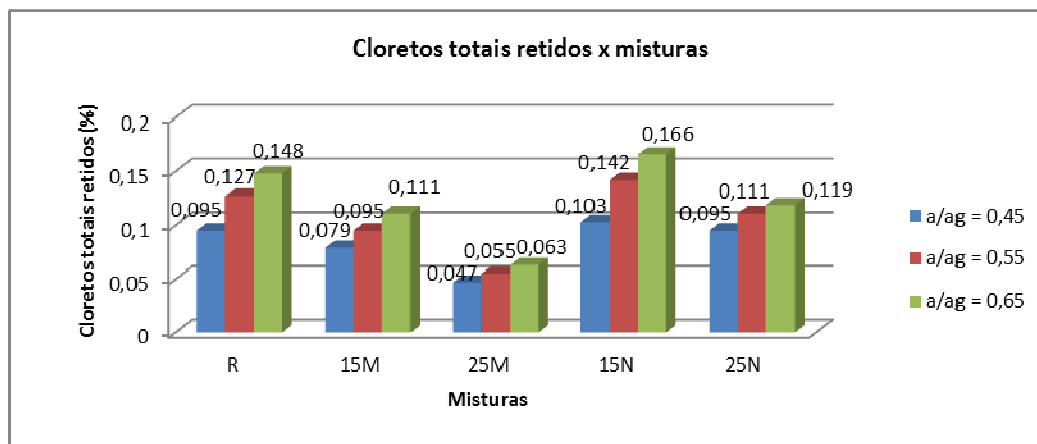


Figura 4.24 – Cloretos totais retidos (%) aos 540 dias x misturas

Os resultados mostram que o teor de cloretos retidos diminui com a redução da relação a/ag , apresentando o mesmo comportamento dos ensaios de f_c e Q . A mistura 15N apresenta os maiores valores no teor de Cl^- . Observa-se também que as misturas com CCAM apresentam menor quantidade de cloretos totais retidos, quem sabe pela maior reatividade das CCAs, onde se observa que o aumento na finura promove acréscimo no consumo de sílica amorfa, diminuindo a retenção de cloretos.

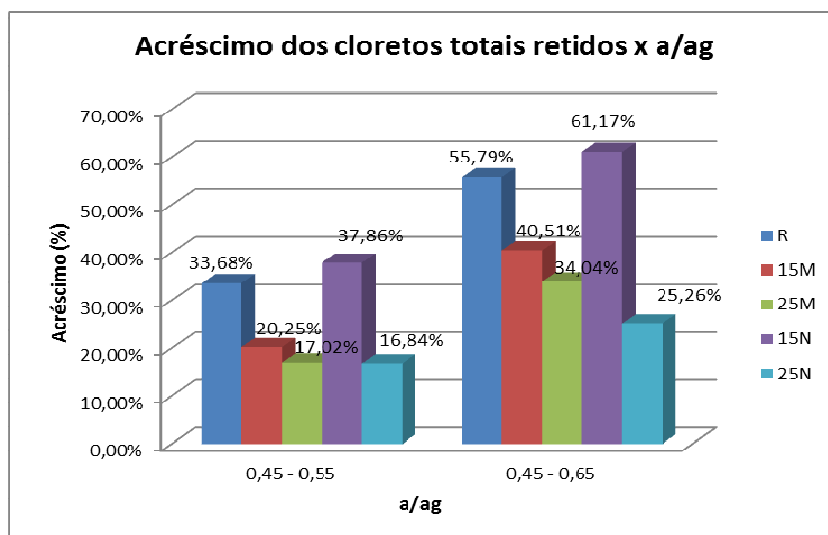


Figura 4.25 – Acréscimo dos cloretos retidos totais *versus* aumento da relação a/ag

A figura 4.25 apresenta os acréscimos dos teores dos cloretos em função do aumento da relação água/aglomerante. Verifica-se que as misturas 15M, 25M

apresentam os menores acréscimos dos teores de cloretos retidos totais devido ao efeito da finura, que aumenta a reatividade e promove um refinamento dos poros, dificultando a passagem dos íons cloretos. Quanto ao teor de cloretos fixados pelas relações a/ag mais altas, 0,45-0,65, nas misturas 15N e 25N, pode-se especular que acontece o fenômeno inverso citado no início deste item, em que a menor reatividade pozolânica proporcionada pela CCA natural, com grãos maiores, aumenta o teor da atividade iônica entre os compostos de silício nestas misturas, proporcionando acréscimos de retenção mais elevados, especialmente nas misturas 25N.

A tabela 4.20 e figura 4.26 apresentam os acréscimos nos teores de Cl⁻ retidos das misturas com CCAM e CCAN comparados com a mistura R. Os valores entre parêntesis são as variações nas porcentagens dos teores totais de cloretos retidos, onde se verifica que somente para a mistura 15N os teores de cloretos retidos são superiores a mistura referência.

Tabela 4.20 – Acréscimo dos cloretos retidos totais versus aumento da relação a/ag

Mistura	a/ag	Cloretos totais retidos	Acréscimo de cloretos	
		540 dias	totais retidos (%)	
		%	% individual	% média
R	0,45	0,095 (100)	-	(100)
	0,55	0,127 (100)		
	0,65	0,148 (100)		
15M	0,45	0,079 (83) [100]	-16,8%	-22,3% (78) [100]
	0,55	0,095 (75) [100]	-25,2%	
	0,65	0,111 (75) [100]	-25,0%	
25M	0,45	0,047 (49) [100]	-50,5%	-54,9% (45) [100]
	0,55	0,055 (43) [100]	-56,7%	
	0,65	0,063 (43) [100]	-57,4%	
15N	0,45	0,103 (108) [130]	+8,4%	+10,80% (111) [143]
	0,55	0,142 (112) [149]	+11,8%	
	0,65	0,166 (112) [150]	+12,2%	
25N	0,45	0,095 (100) [202]	0,0%	-10,7% (89) [198]
	0,55	0,111 (87) [202]	-12,6%	
	0,65	0,119 (80) [189]	-19,6%	

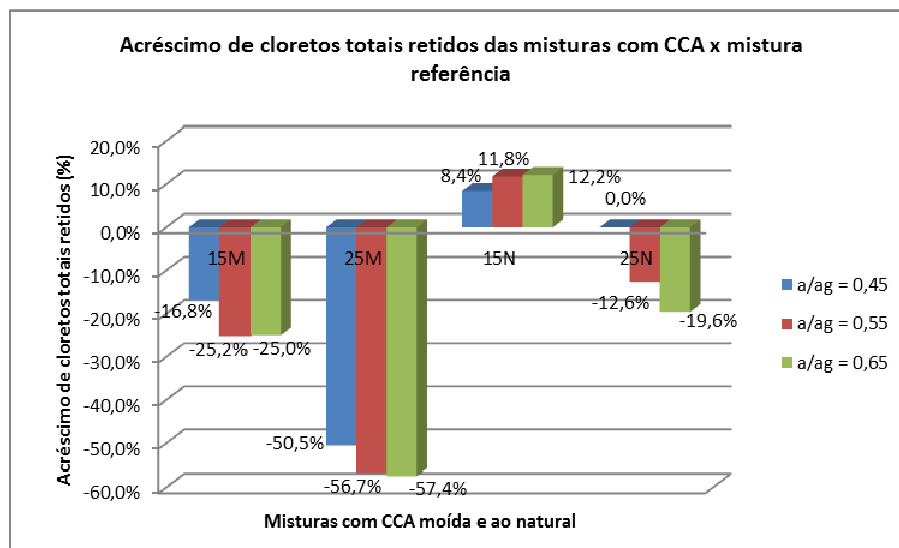


Figura 4.26 – Acréscimo do teor de cloretos totais retidos aos 540 dias para as misturas com CCA ao natural *versus* mistura referência

Fazendo a análise para a mistura 15M, observa-se uma redução média de -22,3% no teor total de cloretos retidos comparados com a mistura referência enquanto que a 25M obteve uma redução média de -54,9% com base na mesma comparação. Conforme comentado anteriormente, verifica-se que a finura da CCA influencia diretamente a penetração de íons cloretos, impactando nos teores totais de cloretos retidos, pois a coleta das amostras para o ensaio deu-se imediatamente após o ensaio acelerado de penetração de cloretos para as diferentes misturas. Dessa forma, a moagem (finura) é um parâmetro importante no beneficiamento da CCA, contemplando-a com maior pozolanicidade e conseqüente aumento da reatividade, onde a migração de íons cloretos no concreto fica dificultada.

As misturas com CCA natural apresentaram um desempenho inferior as CCAs moídas. A mistura 15N foi a única com teor Cl^- total superior a mistura referência, e obteve um acréscimo médio de +10,8% no teor total de cloretos retidos comparados com a mistura referência enquanto que a mistura 25N obteve uma redução média de -10,7% no teor de Cl^- total, com mesma base de comparação. Comparando as misturas 15N e 25N, observa-se que o aumento de 10% de CCA natural na mistura altera drasticamente o desempenho da mistura, onde se verifica que o acréscimo do teor de CCA ao natural reduziu em média -53,9% do teor dos cloretos totais retidos. Assim, o teor é o principal fator de influência, visto que ambas as CCAs natural não passaram por processo de moagem. Conforme o ensaio de

penetração acelerada de cloretos, a mistura 15N apresentou cargas passantes maiores que a mistura 25N, onde os dois resultados se correlacionam, o que mostra comportamento discrepante e aparentemente sem explicação.

Fazendo-se a comparação em igualdade de teores das CCAs moída em relação à CCA natural, observa-se que a mistura 15N apresentou um acréscimo de teor total de cloretos retidos de 43% em relação à mistura 15M. Já a mistura 25N apresentou um acréscimo de 98% de teor total de cloretos retidos em relação à mistura 25M. Dessa forma, contempla-se que o efeito da moagem ocasiona uma maior pozolanicidade e conseqüente reatividade, proporcionando a essas misturas uma maior resistência à migração de íons cloretos.

Depois de analisadas todas as misturas, nota-se que somente a mistura 15N ficou com teor de cloretos totais retidos mais elevados que a mistura referência.

Fazendo-se o enquadramento dos teores de cloretos totais retidos, verifica-se que todas as misturas são inferiores ao teor crítico de 0,40%, sendo o mesmo parâmetro entre os pesquisadores do assunto.

A carga passante (Coulomb) no ensaio de penetração acelerada de cloretos ASTM C 1202:2005 determina o fluxo iônico estabelecendo uma relação estatística com os cloretos retidos totais no corpo-de-prova conforme observado por Isaia (1995) e Cervo (2002). Entretanto no presente caso isto não se observou porque não houve correspondência entre as cargas passantes e os Cl^- retidos nas misturas 25N, por razões desconhecidas, ao menos no nível da presente pesquisa, devendo ser realizados mais ensaios com a CCA natural, principalmente em nível mineralógico, para encontrar as causas prováveis e conclusivas de tal fato.

Embora Pedrozo (2008), com os mesmos traços e materiais desta pesquisa, tenha pesquisado a penetração de cloretos por imersão e não por migração após os ensaios da ASTM C1202, também não encontrou correspondência estatística entre as cargas passantes em Coulomb e os coeficientes de penetração de cloretos, o que confirma a assertiva do parágrafo anterior a respeito do comportamento da CCA natural.

4.10 Análise dos resultados do ensaio cloretos totais retidos em igualdade de resistência à compressão

A tabela 4.21 apresenta os coeficientes de determinação r^2 para as equações de regressão por potência, onde se observa que as correlações são muito fortes entre as resistências à compressão axial e respectivos teores de cloretos retidos a 540 dias de idade.

Tabela 4.21 – Coeficientes de determinação r^2 das equações de regressão de potência $f_c = a.CI_{ret}^b$ entre a resistência à compressão axial (f_c) e carga passante (Q)

Idade	R	15M	25M	15N	25N
540 dias	1,00	0,96	0,97	0,96	0,95

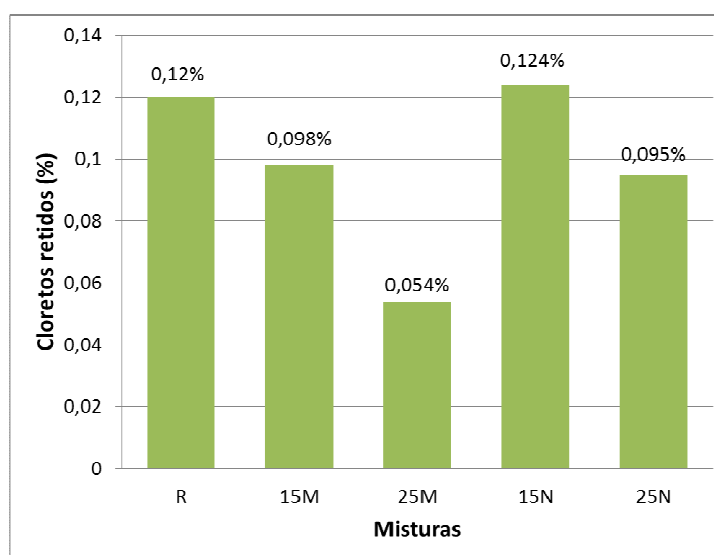


Figura 4.27 – Relação dos cloretos retidos para a resistência à compressão axial $f_{c28} = 31,6$ MPa (classe C25), exceto mistura 25 N ($f_{c91} = 31,6$ MPa) aos 540 dias

De acordo com a figura 4.27 todas as misturas apresentaram retenção de CI inferiores a referência, com exceção da 15N, novamente uma exceção como já constatado e comentado anteriormente para outras variáveis. Assim como o teor retido de 0,095% para 25N é inferior a 15M é um comportamento que necessita de mais estudos para elucidá-lo.

4.11 Análise integrada dos resultados em igualdade de resistência à compressão axial

Com o objetivo de complementar o presente trabalho, foram realizadas as análises integradas das variáveis dos ensaios realizados. Essa avaliação de dados possibilita verificar como as variáveis influenciam umas na outras. Foram realizadas as investigações da penetração de cloretos com a resistência à compressão axial, com a água quimicamente combinada e com a porosidade.

A figura 4.28a apresenta o consumo de cimento para igualdade de resistência de $f_c=31,6\text{MPa}$, onde observa-se que mistura 25M apresentou o menor valor de consumo de cimento, totalizando $231,5\text{Kg/m}^3$, sendo esse menor consumo em função do maior valor de substituição parcial por cimento. De acordo com a figura 4.28b, observa-se que a mistura 15M atingiu os maiores níveis de resistência à compressão axial devido a maior finura, reatividade química e efeito físico dos grãos menores dimensões. Os demais traços apresentaram variações pequenas de resistência, com exceção do 25N, quando houve decréscimo próximo a 30% em relação ao seu homônimo 25M, em razão da menor finura, da menor formação de C-S-H secundário e do maior teor de vazios na pasta. Observa-se que houve coerência de comportamento entre as resistências à compressão a 91 e 540 dias, em todos os traços.

A figura 4.28c mostra as relações a/ag calculadas para a resistência de dosagem de $31,6\text{MPa}$ a 28 dias, exceto para o traço 25N ($a/ag = 0,40$ a 91 dias), que variaram entre 0,51 e 0,57 (Tabela 4.4), com média de 0,54 e coeficiente de variação (v) de 3,7%. A 91 dias a resistência à compressão média dos 5 traços foi $37,0\text{MPa}$ ($v = 10,4\%$) e a 540 dias $43,0\text{MPa}$ ($v = 8,1\%$). Pela lei exponencial de Abrams a relação a/ag está no expoente, logo pequenas variações em seu valor numérico introduz maiores flutuações em f_c , conforme se observa nos dados acima. As dispersões mais elevadas a 91 e 540 dias são devidas as menores resistências apresentadas pelo traço 25N em ambas as idades.

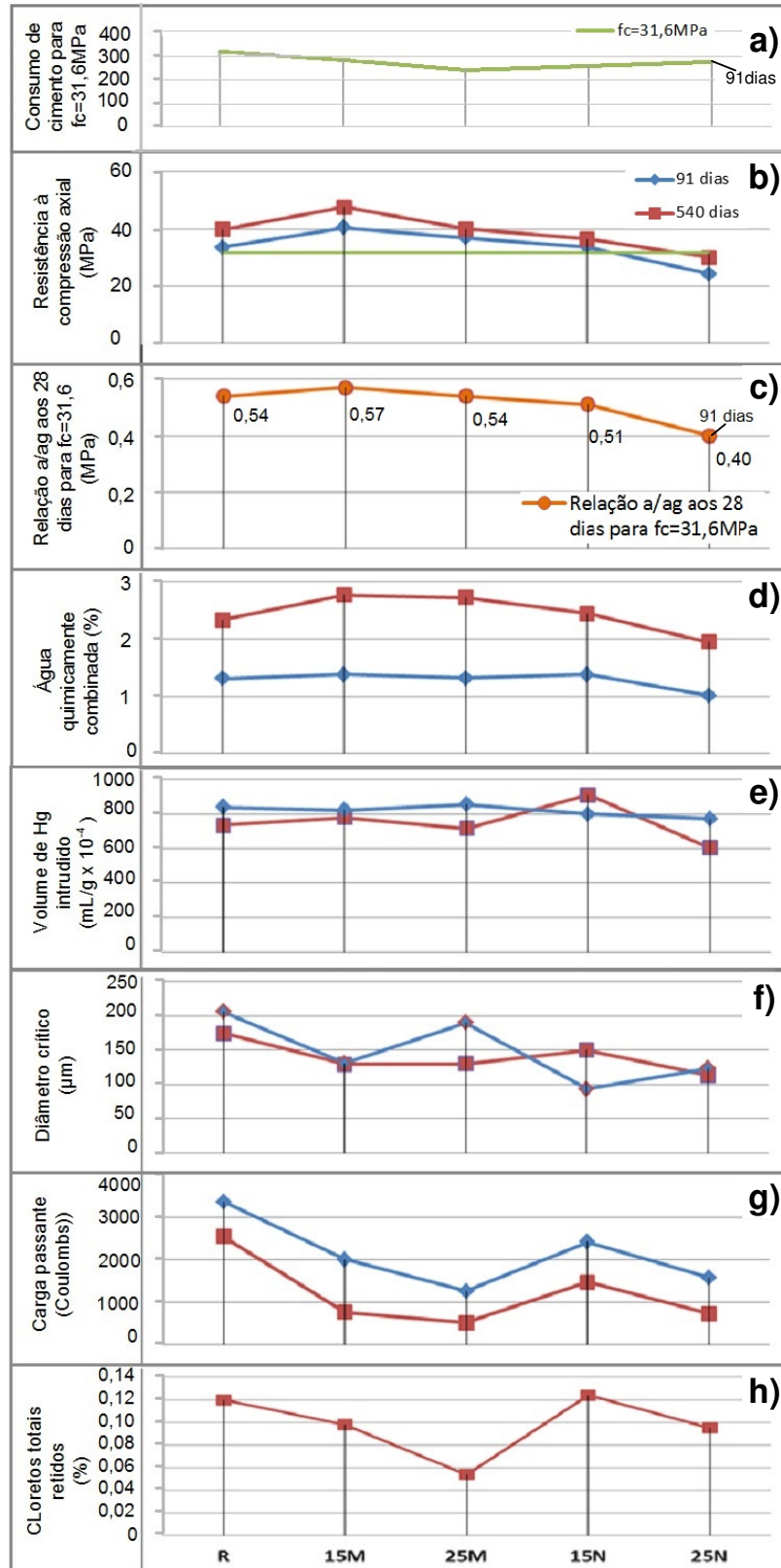


Figura 4.28a - 4.28h – Correlação entre os resultados de 91 e 540 dias em igualdade de resistência para todas as misturas

Na figura 4.28d observa-se que há coerência de comportamento entre f_c e a água combinada, embora a 91 dias as diferenças entre os traços 15N, 25M e 15N sejam bastante pequenas em razão das simultaneidade das reações de hidratação e pozolânicas. A 540 dias as diferenças são mais marcantes e com formato bastante parecido com as flutuações das resistências à compressão axial nessa idade.

Nas figuras 4.28e e 4.28f, relacionadas com o ensaio de porosimetria (volume total de Hg intrudido e diâmetro crítico, respectivamente), observa-se comportamento anômalo no traço 15N em ambas variáveis. Para a primeira, o V_{Hg} total a 540 dias está mais elevado que a 91 dias, enquanto que para o diâmetro crítico ocorre o inverso, menor valor a 91 dias e maior para 540 dias. Pelo que se conhece da evolução da microestrutura das pastas cimentícias, tanto as reações de hidratação quanto pozolânicas evoluem com o tempo, ocasionando essas últimas o refinamento dos poros e dos grãos o que confere microestrutura mais compacta. No entanto, este comportamento não se observou para essas duas variáveis com o passar do tempo.

Outro fato que chama a atenção são os baixos valores obtidos no traço 25N para essas duas variáveis, em relação à sua homônima 15N, com V_{Hg} e Φ_{cr} menores, quando se obtiveram perdas de 30% resistência (Tabela 4.3) entre o primeiro e segundo traços. Tais comportamentos não são, à primeira vista, lógicos ou passíveis de explicação à luz dos conhecimentos atuais sobre a microestrutura de pasta cimentícias. Deve-se considerar que o ensaio de porosimetria foi realizado com somente uma amostra e que estas poderiam não ser representativas, ou ainda a hipótese de troca de numeração das amostras por ocasião da remessa ao Laboratório da ABCP, embora a probabilidade de sua ocorrência seja mínima.

As figuras 4.28g e 4.28h apresentam as variáveis relacionadas com a penetração de cloretos por meio das cargas passantes Q e os teores totais de cloretos retidos, respectivamente. Observa-se que as suas evoluções estão coerentes entre si e também com a idade, no caso da primeira variável. Entretanto, nota-se novamente aqui o comportamento que poderia ser chamado de anormal entre os traços 15N e 25N, em que este último apresenta cargas passantes e teor de cloretos inferiores ao primeiro que apresenta menor teor de CCA de maior finura e resistência à compressão 30% mais elevada. Repete-se aqui a mesma inversão de valores das variáveis V_{Hg} total e Φ_{cr} comentados no parágrafo anterior.

O que se poderia intuir é que a CCA natural, sem moagem prévia, introduz alterações na microestrutura da pasta cimentícia que não puderam ser detectadas pelos ensaios elaborados e, portanto, trouxeram resultados aparentemente anormais, pelo conhecimento que se dispõem atualmente. É evidente que existe dicotomia entre o comportamento mecânico das misturas com CCA natural e a estrutura dos poros detectada por porosimetria, assim como com os ensaios de penetração e retenção de cloretos. Pode-se argumentar que os mecanismos que governam estes últimos dois ensaios são distintos, ou seja, por migração, enquanto que a resistência mecânica é governada pelas forças de coesão entre as moléculas de C-S-H e, também pelos vazios existentes na estrutura dos poros. Este último tópico é intrigante porque atua de modos distintos num e noutro caso (resistência x cloretos).

É importante ressaltar que estas pretensas anomalias acontecem somente com a CCA natural enquanto que para a CCA moída os resultados são coerentes em todas as variáveis analisadas. Trata-se de um tema importante para estudos futuros elucidar o comportamento da CCA previamente moída e a que sofre cominuição no próprio tambor da betoneira.

Apesar das possíveis incongruências constatadas, ficou evidenciado que o teor de 15% de CCA natural apresentou resultados compatíveis em todos os ensaios realizados, com desempenho praticamente similar com o seu traço homônimo 25M.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões obtidas com base nos resultados do estudo experimental e na bibliografia estudada a respeito do tema.

O objetivo da presente pesquisa foi investigar a viabilidade técnica e econômica da substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural. As variáveis analisadas foram a resistência à compressão axial, a água quimicamente combinada, a porosimetria por intrusão de mercúrio, a penetração acelerada de cloretos pela ASTM C 1202:2005 e os cloretos totais retidos. Os resultados foram apresentados, analisados e discutidos sob o ponto de vista de igualdade das relações a/ag e da resistência à compressão axial para a classe de concreto C25 ($f_{c28} = 31,6$ MPa), conforme a NBR 12655:2006.

5.2 Resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão axial indicaram que a substituição parcial por cimento por CCA moída nos teores de 15% e 25% aumentaram os níveis de resistência do concreto aos 540 dias, em 21,3% e 2,2%, respectivamente em relação à mistura referência. Ao contrário, as misturas contendo CCA natural apresentaram decréscimos de resistência de 2,7% e 27,7% para as misturas 15N e 25N, respectivamente.

O ganho de resistência em relação aos resultados obtidos por Pedrozo (2008) aos 91 dias para 540 dias, idade que foram realizados os ensaios do presente trabalho, observou-se que a mistura referência teve um acréscimo de resistência de 21,1% enquanto que as misturas com CCA moída apresentaram um acréscimo de 21,4% e 11,3% para os traços 15M e 25M, respectivamente, e as misturas com CCA natural apresentaram ganhos de resistência de 6,6% e 24,4% para os traços 15N e 25N, respectivamente. Quanto menores foram as resistências à compressão a 91 dias, maiores foram os ganhos relativos a 540 dias, conforme a literatura fartamente esclarece.

As misturas com 15% de substituição de cimento por CCA moída apresentaram níveis de resistência 18% mais elevados que as misturas contendo 25% da referida cinza. Já para as misturas com CCA natural, a mistura 15N apresentou resistência média 35% superior do que a mistura 25N. Observou-se então que a finura da CCA foi menos efetiva na resistência à compressão axial que o teor de CCA utilizado na mistura, para os resultados absolutos dos ensaios, embora para os ganhos relativos tenham se dado no inverso.

A comparação das misturas utilizando os mesmos teores de substituição da CCA moída e natural mostrou que a mistura 15N apresentou resistência à compressão axial média inferior em 19,7% em relação à 15M. Para o teor de 25% a mistura com CCA natural apresentou níveis de resistência médios 29,2% inferiores a mistura com CCA moída. O processo de moagem elevou a superfície específica, onde o mesmo ocasionou espaços maiores de nucleação para as reações de hidratação e pozolânicas, resultando assim C-S-H, primário e secundário, adicional nas misturas.

Acredita-se que com o aumento do tamanho dos grãos algumas partículas da CCA natural acabaram não reagindo com o CH, ficando inertes, dispersando as partículas do cimento e reduzindo a resistência do concreto. Verificou-se também que pode ocorrer a ação física em função do preenchimento dos poros dos grãos maiores, gerando dessa maneira, um refinamento dos poros, fato este observado no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. O efeito físico dos grãos maiores nos traços 15N explica, por exemplo, as maiores resistências aos 91 dias e 540 dias obtidas neste traço em relação à sua homônima 15M, em igualdade de resistência à compressão a 28 dias, conforme tabela 4.4.

5.3 Água quimicamente combinada

Os resultados obtidos mostram um acréscimo da água quimicamente combinada dos 91 dias, resultados obtidos por Duart (2008), para os 540 dias. A mistura 15M apresentou acréscimo médio de AC de 101,4% enquanto que o acréscimo da mistura 25M foi de 115,1%, sendo superiores ao acréscimo de AC da mistura referência que alcançou 78,4%. As misturas contendo 15% de CCA natural apresentaram desempenho inferior à mistura referência, onde o acréscimo médio de AC foi de 77,1%. Já a mistura 25N apresentou acréscimo médio de 93,2% de AC

dos 91 dias para os 540 dias, com desempenho superior à mistura referência. Observaram-se os maiores acréscimos de AC para as misturas com CCA moída, comportamento explicado pelo efeito de nucleação dos grãos de cimento pelas pozolanas, ocasionando um maior desenvolvimento das reações de hidratação, resultando em uma maior quantidade de compostos hidratados para essas misturas, com destaque para a mistura 25M. Observa-se o comportamento anômalo do traço 25N que apresentou acréscimo de AC um pouco inferior a 15N e superior a R, enquanto as quedas de resistências de 15N para 25N foram bastante acentuadas, em torno de 30%. Conforme citado no texto, este fato deve ser estudado com maior profundidade porque deve existir algum mecanismo que interfere nas reações da CCAN, sem provocar aumento de resistência. Da mesma maneira, a mistura 25N apresentou maiores ganhos de resistência dos 91 dias para os 540 dias em relação a mistura 15N.

Comparando-se as misturas com CCA moída e natural com a mistura referência aos 540 dias, observou-se que os traços contendo CCA moída foram o que apresentaram os maiores acréscimos nos teores de AC, alcançando valores de 15% e 21% para as misturas 15M e 25M, respectivamente. Aos 91 dias o acréscimo nos teores de AC para as misturas 15M e 25M foi de 2% e 1%, respectivamente. Observou-se então o elevado acréscimo no teor de AC para essas misturas em longo prazo, comprovando o aumento de reatividade pozolânica dessas adições minerais, aumentando a quantidade de silicatos de cálcio hidratado. As reações pozolânicas liberam água que pode ficar disponível para nuclear novos locais de hidratação de grãos de cimento.

Observando-se as misturas contendo CCA natural, aos 540 dias, em comparação com o traço referência, a mistura 15N apresentou um acréscimo de 8% no teor de AC enquanto que a mistura 25N apresentou um decréscimo de 21% no teor de AC. Já aos 91 dias as misturas apresentaram acréscimos nos teores de água quimicamente combinada de 9% e -11% para as misturas 15N e 25N, respectivamente. Verificou-se então o menor crescimento em porcentagem em longo prazo das misturas com CCA natural, onde o pior desempenho foi o da mistura 25N.

A comparação com os mesmos teores de substituição entre as misturas foi um fator relevante da pesquisa. Aos 540 dias a mistura 15N apresentou um decréscimo de 6% no teor de AC em relação à mistura 15M. Esse comportamento foi inverso aos resultados obtidos por Duarte (2008) aos 91 dias, sendo que o mesmo

encontrou um acréscimo de 5% no teor de AC na mistura 15N em relação à mistura 15M, onde provavelmente ocorreu um erro de ensaio, visto que o coeficiente de determinação r^2 foi de 0,40 para o traço 15N aos 91 dias, enquanto que aos 540 dias esse coeficiente foi de 0,70, onde se verificou uma melhor correlação. Já a mistura 25N apresentou uma redução no teor de AC de 21% aos 540 dias enquanto que aos 91 dias a redução foi de 4%, onde verificou que as reações pozolânicas ocorrem com menor intensidade nas misturas com CCA natural, devido a sua finura mais grossa.

Outro fator importante dos ensaios realizados foi verificar o efeito da CCA moída e natural em longo prazo. Duarte (2008) encontrou aos 28 dias os teores de AC mais baixos para a mistura 25M, embora esta tenha apresentado um dos melhores níveis de resistência, sendo que esta foi devido principalmente aos efeitos físico-químicos, em função da finura da CCA moída, e das reações pozolânicas. Já aos 540 dias a mistura 25M apresentou os maiores teores de água quimicamente combinada, desenvolvendo grandes níveis de resistência, fato este devido às reações de hidratação e pozolânica, em longo prazo.

5.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Observou-se que os traços com CCA moída apresentaram os valores mais baixos de porosidade, sendo que esta aumenta com a elevação da relação a/ag. A mistura com os valores mais baixos de porosidade foi a 25M, devido ao efeito das reações pozolânicas em longo prazo. Concomitantemente verificou-se essa mistura apresentou valores baixos de diâmetro crítico, com $\varnothing_{\text{médio}}$ de $135 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ e uma maior quantidade de mesoporos e poros de gel. Para a relação a/ag 0,45, que apresentou a menor porosidade, a mistura 25M apresentou 41% do volume intrudido nos poros de gel, 34% nos mesoporos e 25% nos macroporos. Quando a relação a/ag passou para 0,55, os volumes de macroporos, meso poros e poros de gel passaram para 31%, 33% e 36%, respectivamente. Na relação a/ag 0,65 o volume de poros de gel representaram 14% do total. Verificou-se que o aumento da relação a/ag influenciou diretamente na distribuição dos poros, aumentando também a porosidade e conseqüentemente reduzindo a resistência à compressão axial dos mesmos.

Já a mistura 15M, para a relação a/ag 0,45 apresentou o maior volume de Hg intrudido na faixa dos mesoporos, com 38% do volume total intrudido; os poros de gel somaram 35% e os macroporos 27%. Quando a relação a/ag passou para 0,55, os volumes de macroporos, mesoporos e poros de gel passaram para 31%, 37% e 32%, respectivamente. Dessa maneira, verificou-se o maior refinamento dos poros nas misturas com CCA moída em comparação com a mistura referência, que apresentou 27% do volume intrudido nos poros de gel, 28% nos mesoporos e 45% nos macroporos, onde se constatou que o efeito da moagem influenciou diretamente na reatividade da pozolana.

Para as misturas com CCA natural, o refinamento de poros foi mais efetivo para a relação a/ag 0,45. O traço 15N apresentou 34% do volume intrudido nos poros de gel, 29% nos mesoporos e 37% nos macroporos. Quando a relação a/ag passou para 0,55, os volumes de macroporos, mesoporos e poros de gel passaram para 16%, 26% e 58%, respectivamente. Já a mistura 25N, para a relação a/ag 0,65 apresentou 21% do volume intrudido nos poros de gel, 36% nos mesoporos e 43% nos macroporos.

Fazendo a comparação dos resultados obtidos aos 540 dias, com Duarte (2008) aos 91 dias, observou-se que para todas as misturas, com exceção da 15N (que apresentou um comportamento anômalo para todas as variáveis, o que leva a acreditar que pode ter acontecido um problema de ensaio aos 91 dias) os volumes nos diâmetros maiores que 50 nm (macroporos) são maiores para os 91 dias em relação aos 540 dias. Para os diâmetros menores que 10 nm (poros de gel), verificou-se que os maiores volumes intrudidos estão na faixa dos poros de gel. Esse comportamento era esperado, pois ao longo do tempo vai ocorrendo o processo de hidratação do cimento e das reações pozolânicas da CCA, onde os poros são refinados, diminuindo o volume de macroporos e aumentando o volume de poros de gel, sendo esta uma situação benéfica ao concreto.

5.5 Penetração acelerada de cloretos pela ASTM C 1202:2005

Os resultados obtidos no EAPC constataram que a utilização da CCA moída e natural melhora o desempenho do concreto frente à ação dos íons cloreto. Observou-se que à medida que a relação a/ag aumenta, eleva-se a carga passante

no concreto. Verificou-se também que todas as misturas contendo adição de CCA, moída e natural, apresentaram cargas passantes menores que a mistura referência.

Através da comparação dos dados do autor aos 540 dias, com os dados obtidos por Pedrozo (2008) que realizou os ensaios com 91 dias, ficou comprovado o efeito da pozolana em longo prazo, reduzindo intensamente a passagem de íons pelo concreto. As misturas com CCA moída foram as que apresentaram o melhor desempenho, onde os traços 15M e 25M apresentaram redução média na carga passante de 61,3% e 59,2% respectivamente. As misturas contendo CCA natural também apresentaram redução de carga passante, com reduções médias de 38,2% e 55,5%, respectivamente.

Fazendo-se a comparação com a mistura referência aos 540 dias, constatou que as misturas 15M e 25M apresentaram redução de 3,4x e 5x, respectivamente. Constatou-se que o fator preponderante frente à penetração de cloretos é o teor de substituição e a finura da CCA, sendo mais importante que a relação a/ag. As misturas com CCA natural, cujas misturas estudadas foram a 15N e 25N apresentaram redução de 1,7x e 3x, respectivamente, na passagem de íons cloreto pelo concreto.

Comparando as misturas com CCA moída e natural em relação aos mesmos teores, constatou-se que a mistura 15N apresentou um aumento de carga passante de 2,1x em relação à 15M. Já a mistura 25N teve um acréscimo de carga passante de 1,7x em relação à mistura 25M. Ficou comprovado que o teor e a finura da CCA influenciaram de maneira muito efetiva a passagem de íons cloreto no concreto.

Quanto à classificação das misturas relativas ao risco de penetração de íons cloreto conforme a ASTM C 1202:2005 comprovou-se que houve uma alteração significativa nessa classificação quando as amostras foram analisadas aos 91 dias e 540 dias. Aos 91 dias, a grande maioria das amostras classificou-se como risco moderado. Já aos 540 dias constatou-se que todas as misturas com CCA moída apresentaram risco baixo de penetração de íons cloreto e as misturas com CCA natural apresentaram risco baixo e muito baixo.

5.6 Cloretos totais retidos

Observou-se que todas as misturas, com exceção da mistura 15N, apresentaram teor total de cloretos retidos inferiores à mistura referência. Verificou-

se que as misturas com CCA moída apresentaram uma quantidade menor de cloretos totais retidos, fato este devido a maior reatividade das CCAs, pois o aumento na finura promoveu um acréscimo no consumo de sílica amorfa, diminuindo a retenção de cloretos.

As misturas 15M e 25M apresentaram, em comparação com a mistura referência, uma redução no teor total de cloretos retidos de 22,3 e 54,9%, respectivamente. A explicação para esse fato é preponderantemente através do efeito da finura, que ocasiona o aumento da reatividade da CCA, promovendo um refinamento dos poros, dificultando a passagem dos íons cloretos. Já a mistura 15N apresentou um acréscimo no teor de Cl^- de 11%, em comparação com a mistura referência, enquanto que a mistura 25N apresentou uma redução no teor total de cloretos retidos de 11%.

Comparando-se as misturas 15N e 25N, observou-se que o aumento de 10% de CCA natural na mistura muda drasticamente o desempenho da mistura, onde se verificou que o acréscimo do teor de CCA natural reduziu em média -53,9% do teor dos cloretos totais retidos. Assim, o teor é o principal fator de influência, visto que ambas as CCAs natural passaram apenas por processo de automoagem.

Conforme o ensaio de penetração acelerada de cloretos, a mistura 15N apresentou cargas passantes maiores que a mistura 25N, onde os dois resultados se correlacionam, mostrando o comportamento discrepante e aparentemente sem explicação.

Comparando-se em igualdade de teores das CCAs moída em relação à CCA natural, observou-se que a mistura 15N apresentou um acréscimo de teor total de cloretos retidos de 43% em relação à mistura 15M enquanto que a mistura 25N apresentou um acréscimo de 98% de teor total de cloretos retidos em relação à mistura 25M.

5.7 Considerações finais

Após a análise dos resultados obtidos no programa experimental, comprovou-se que a utilização da CCA moída e natural, proporciona uma maior resistência frente à penetração de íons cloretos. Verificou-se também essas adições com CCA moída promovem o aumento da resistência à compressão axial, o aumento da água quimicamente combinada e melhorias no diz respeito a porosidade dos concretos.

Quando se realizou a análise para a substituição do cimento por CCA natural em concretos, verificou-se que para o teor de 25% a resistência à compressão axial atingiu valores cerca de 30% mais baixos comparados com o concreto tendo somente o cimento como material aglomerante. Para o teor de 15% de CCA natural, os resultados mostram a viabilidade técnica da utilização desse resíduo, sendo que o mesmo também apresenta uma viabilidade econômica interessante, pois o mesmo não precisa de beneficiamento para ser utilizado.

De maneira geral, a pesquisa foi muito importante, pois além de verificar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da cinza de casca de arroz, também foi analisado o desempenho dessa adição mineral em longo prazo, sendo um estudo que foi realizado com os protótipos expostos em condições reais de uma estrutura de concreto, comparados com os resultados de curto prazo, a 91 dias de idade.

5.8 Sugestões para pesquisas futuras

Em trabalhos futuros sugere-se realizar os mesmos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho, com as mesmas condições de exposição ao ambiente real de uma estrutura de concreto, porém com outros teores de substituição de CCA moída e natural, sendo estes de 12,5%, 17,5% e 22,5%.

Outro estudo interessante sugerido seria a utilização de ativadores químicos para melhorar os desempenhos nas primeiras idades para concretos com CCA moída e natural.

É importante aprofundar os estudos com a CCA natural, nos teores de 15% e 25% para sanar incoerências que foram detectadas nos ensaios de microestrutura, quanto ao volume total de Hg intrudido e diâmetro crítico e teor total de cloretos retidos, em relação ao comportamento da resistência à compressão axial.

REFERÊNCIAS

AALBORG INDUSTRIES S. A. **Poder Calorífico Inferior**. Disponível em: <http://www.tiosam.com/links/Poder_Calor%C3%ADfico/>. Acesso em: 07 jan. 2013.

ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Perfil do cimento**, 2008. Disponível em: <www.mme.gov.br/>. Acesso em: 19 dez. 2010.

ABELL, A. B.; WILLIS, K. L.; LANGE, D. A. Mercury intrusion porosimetry and image analysis of cement-based materials. **Journal of Colloid and Interface Science**, n. 211, p. 39-44, 1999.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - Método de ensaio. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABCzAAA/nbr-5738-1993>>. Acesso em: 20 set. 2012.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**. Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Especificação. ABNT. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. ABNT. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680**. Concreto - Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. ABNT. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**. Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. ABNT. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Concreto – Determinação dos tempos de início e fim de pega. Rio de Janeiro, 2002.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

AGUIAR, C. A. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: Análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

AÏTCIN, P. C. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, Supplement March, 1997.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.

AL-KHALAF, M.; YOUSIFT, H. A. Use of rice husk ash in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 6, 1984.

AMBIENTE e Ecologia. Efeito de Estufa. Disponível em: <<http://ambienteecologia.blogspot.com.br/2011/06/efeito-de-estufa.html>>. Acesso em: 02 jan. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. ASTM D 3663-3: Standard Test Method for Surface Area of Catalysts and Catalyst Carries, Philadelphia, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. ASTM C 494: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Anual Book of ASTM Standards**. ASTM C 1152: Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. Philadelphia, 2004.

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

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

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

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G. T. Panorama da indústria mundial de ferroligas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 10, p. 57-114, set. 1999.

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

ATLAS Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Produção de arroz no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS/FARSUL. 2004 a 2006. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/ATLAS/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A. Incineration of Rice Hull for use as a Cementitious Material: The Guyana Experience. **Cement and Concrete Research**, v. 20, 1990.

BRASIL. **Assessoria de Gestão Estratégica do MAPA**. Brasília, DF, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **FAO – Propriedades do arroz**. Brasília, DF, 2013.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. São Paulo: Pini, 1997.

CERVO, T. C. **Influência da finura e do teor de pozzolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Santa Maria, RS: UFSM, 2002.

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

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

CUNHA DA, A. C. Q.; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. 13p. +anexos. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001.

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 pozzolana. 2006. 331f. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PPGEC/ Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.

EASTERLING, D. R.; MEEHL, G. A.; PARMESAN, C.; CHANGNON, S. A.; KARL, T. R.; MEARN, L. O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. **Science**, v. 289, 2000.

EMBRAPA. **Embrapa Arroz**. Dieta básica. São Paulo, 2010.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<https://www.fao.org.br/>>. Acesso em: 19 dez. 2010.

FENG, H. Q.; YAMAMICHI, M.; SHOYA, M.; SUGITAS, S. Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. **Cement and Concrete Research**, 2003.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. (E.). **Concreto: Ensino, pesquisa e realização**. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 27, v. 2, p. 829-855, 2005.

FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P. R. L.; ANDRADE, C. Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo BT/PCC/121**. São Paulo, 1993.

HANAFI, S. et al. Surface Properties of Silicas Produced by Thermal Treatment of Rice Husk Ash. **Thermochimica Acta**, v. 37, p. 137-143, 1980.

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

HELENE, P. R. L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 45-57, jul./dez. 1997.

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

HOUSTON, D. F. Rice Hulls. Rice Chemistry and Technology. **Am. ASS. Cereal Chem**, Ins. St. Paul, Minesota, USA, 1972.

HWANG, C. L.; WU, P. S. Properties of cement paste containing rice husk. In: MALHOTRA, V. M. (ed.). International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 3rd, Trondheim, 1989. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1989. 2 v. n. 2, p. 733-762. (SP-114).

IRGA. Instituto Riograndense do Arroz. **Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária**, 2 jul. 2012. Disponível em:<www.fepagro.rs.gov.br/.../20120702100451revista_pag_v17_n1_on>. Acesso em: 15 set. 2012.

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

ISAIA, G. C. Validade do ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) para a avaliação da durabilidade de concretos de elevado desempenho com pozolanas. In: International Congress on High- Performance Concrete e Performance and Quality of 179 Concrete Structures, Florianópolis, SC, 05-07 jun.1996. **Anais...** Florianópolis, UFSC/UFRGS/USP, 1996.

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

ISAIA, G. C.; FURQUIM, P.; GASTALDINI, A. L. G. Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 07-23, jan./mar. 2009.

ISMAIL, M. S.; WALIUDDIN, A. M. Effect os rice husk ash on high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 7, p. 521-526, 1996.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13823**: General principles on the design of structures for durability. Corrosion & preventions, 2008.

JAMES, J.; RAO, M. Reactivity of rice husk ash. **Cement and Concrete Research: Pergamon Press, Ltd.**, v. 16, n. 3, 1986.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F.; COATS, A. M.; GLASSER, F. P. Chloride Ingress in cement paste and mortar. **Proceedings of the IFIP WG 7.5 Conference**, Osaka, Japan, 2002

JENNINGS, H.; TÊNENIS, P. D. A Multi-Technique Investigation of the Nanoporosity of Cement Paste. **Cement and Concrete Research**, 1994.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials, Advances in Concrete Technology**. Canadá: Gordon and Breach Publishers, 1996. v. 1.

MARSH, B. K.; DAY, R. L. Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash and blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 18, p. 301-310, 1988.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Florianópolis: IBRACON, 2011. v. 2, cap. 22, p. 1.327-1365.

MEHTA, P. K. **Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material**, Advances in Concrete Technology. Ottawa: Canmet, 1992.

MEHTA, P. K. Concrete technology at the crossroads – Problems and opportunities. In: V MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE, 1993. Berkeley, California. **Papers...** Detroit: American Concrete Institute, 1994. p. 1-32. (ACI Special Publication, 144).

MEHTA, P. K. In: **Proceedings of II Intern. Conference on High-performance Concrete and...**, Gramado, RS, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2001). Concreto: estrutura, propriedades e materiais. In: LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo: USP, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. P. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. London: Prentice-Hall, 1981.

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

MORAES, R. C. **Efeitos físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. Dissertação de mestrado, PPGEC/ Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2001.

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

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto. In: ISAIA, G. C. (E.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, p.793-827.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos**. Belo Horizonte, 2006, 149p. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da UFMG, 2006.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1995 e 1997.

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

NICHOLLS, N. Atmospheric and climatic hazards: improved monitoring and prediction for disaster mitigation. **Natural Hazards**, n. 23, p. 137–155, 2001.

NILSEN, O.; SANDBERG, P.; FOLLIARD, K. Influence of mineral admixtures on the transition zone in concrete. In: MASO, J. C. (E.). RILEM International Conference on Interface in Cementitious Composites, Toulouse, 1992. **Proceedings**. London: E&FN SPON, 1993. p. 65-70. (RILEM Proceedings 18).

PEDROZO, E. C. **Estudo da utilização de cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PPGEC/ Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.

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

POSSAN, E.; VENQUIARUTO, S. D.; DAL MOLIN, D. C. C. **Adição de cinza de casca de arroz no concreto: benefícios de durabilidade**. VI Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. ENTECA, 2007.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BR-RS, 2006.

PRUDÊNCIO, L. R. J.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. In: HABITARE (Coletânea, v. 4), Porto Alegre, 2003, Ilustrado ISBN 85-89478-05-X.

RILEM, T. C. Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials.

AAC 15.1: Determination of the adhesion of mortars and other surface coatings, 1983.

ROY, R. N.; VOGEL, K. M.; MOORE, C. P. et al. The dissociation constants of carbonic acid in seawater at salinities 5 to 45 and temperatures 0 to 45°C. **Marine Chemistry**, n. 44, p. 249-267, 1993.

SACILOTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** 2005, 179 p. 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - 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 em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SARASWATHY, V.; SONG, H-W. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, 2006. 184

SARASWATHY, V.; SONG, H-W. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review. **Int. J. Electrochem. Sci.**, n. 2, p. 1-28, 2007.

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

SELLEVOLD, E.; JUSTNES, H. High strength concrete binders, part B: nonevaporable water, self-desiccation and porosity of cement pastes with and without condensed silica fume. In: MALHOTRA, V. M. (E.). **International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, 4th, Istanbul, 1992. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 1993. 2 v. V. 2, p. 891-902. (SP-132).

SHI, C.; STEGEMANN, J. A.; CALDWELL, R. J. Effect of supplementary cementing materials on the specific of pore solution and its implications on the rapid chloride Permeability test (AASHTO T277 and ASTM C 1202) Results. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 4, March-April, 1998

SILVA, A. **Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2007.

SILVA FILHO, L. C. P. et al. Uso do cimento branco estrutural: Museu Iberê Camargo. In: II Seminário de Patologia das Edificações. 2004. Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre, RS. 1 CD-ROM.

SILVA, I. J.; LIBÓRIO, J. B. L. A estrutura porosa de pasta, argamassa e concreto de cimento Portland e sua influência na durabilidade do concreto. In: 43° Congresso Brasileiro de Cerâmica. 10p. **Anais...** Florianópolis, 1999.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos:** Estudo do ataque por Sulfatos. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SNIC. SINDICATO DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. O cimento no Brasil – consumo em 2011. **Press Kit 2012.** Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2012.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2012.

SUGITA, S. **Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement,** Gothenburg, 1992.

SUGITA, S.; SHOYA, M.; TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash. In: 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istambul, 1992. **Proceedings.** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v. 2, n. 1, p. 495-511. (SP 132-28).

TALBOT, M. A synthetic sisterhood: False friends in a teenage magazine. In: K. HALL, K.; BUCHOLTZ, M. **Gender Articulated.** London: Routledge, 1995.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa:** método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2006.

TIBONI, R. **A utilização da cinza de casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósito à base de cimento Portland.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem:** mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos. 2011. 198 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2011.

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

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. **Structural Engineering International,** v. 4, p. 359-366, 2007.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais**. Porto Alegre: 2005. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

WWF. WORLD WILDLIFE FUND-United States. Global Programme, 2013.

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V.M. Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement and concrete research**, v. 25, n. 8, p. 1713-1725, 1995.

Links:

<http://www.irga.rs.gov.br/index.php?principal=1&secao=999&id=120&menuP=120&key=3>

Acesso em 31/12/2012 as 14:00hs.

http://www.irga.rs.gov.br/uploads/anexos/1329418135Area_Producao_e_Produtividade.pdf

Acesso em 05/01/2013 as 14:33hs.

http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2012.pdf

Acesso em 31/12/2012 as 14:03hs.

<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz/saiba-mais>

Acesso em 31/12/2012 as 14:28hs.

<http://www.scp.rs.gov.br/atlas/atlas.asp?menu=264>

Acesso em 31/12/2012 as 15:55hs.

<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/Abertura.html>

Acesso em 31/12/2012 as 16:52hs.

<http://www.agrolink.com.br/culturas/arroz/historico.aspx>

Acesso em 31/12/2012 as 17:27hs.

<http://www.sohistoria.com.br/resumos/revolucaoindustrial.php>

Acesso em 02/01/2013 as 14:53hs.

<http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-em-acao/a-onu-e-a-populacao-mundial/>

Acesso em 02/01/2013 as 14:58hs.

<http://www.mma.gov.br/clima/ciencia-da-mudanca-do-clima/efeito-estufa-e-aquecimento-global>

Acesso em 02/01/2013 as 15:28hs.

<http://ambienteecologia.blogspot.com.br/2011/06/efeito-de-estufa.html>

Acesso em 02/01/2013 as 15:29hs.

http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/

Acesso em 05/01/2013 as 15:00hs.

<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/cimento-de-qualidade-e-ambientalmente-amigavel>

Acesso em 05/01/2013 as 16:00hs.