

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

**DURABILIDADE DO CONCRETO COM CINZA DE
CASCA DE ARROZ NATURAL SEM MOAGEM:
MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA E
PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Guilherme Höehr Trindade

**Santa Maria, RS, Brasil
2011**

**DURABILIDADE DO CONCRETO COM CINZA DE CASCA
DE ARROZ NATURAL SEM MOAGEM: MITIGAÇÃO DA
REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA E PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

por

Guilherme Höehr Trindade

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

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia

Santa Maria, RS, Brasil

2011

T833d Trindade, Guilherme Höehr
Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem :
mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos / por Guilherme Höehr
Trindade. – 2011.
198 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Geraldo Cechella Isaia
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2011

1. Engenharia civil 2. Cinza da casca de arroz 3. Reação álcali-sílica
4. Argamassa 5. Concreto 6. Ensaio acelerado 7. Difusão de cloretos
I. Isaia, Geraldo Cechella II. Título.

CDU 624.012.4

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

**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

**DURABILIDADE DO CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE
ARROZ NATURAL SEM MOAGEM: MITIGAÇÃO DA REAÇÃO
ÁLCALI-SÍLICA E PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

elaborada por
Guilherme Höehr Trindade

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia
(Presidente/Orientador)

Raúl Luis Zerbino, Dr. (LEMIT/UNLP, Argentina)

Gemma Paula Rodríguez Baccino de Sensale, Dra. (UDELAR, Uruguay)

Santa Maria, 06 de maio de 2011

A Dra. Cristiane Luchese, pelo apoio pessoal e ajuda profissional de extrema importância. Pois, com essa pessoa atravesso por caminhos desconhecidos na busca de um futuro cada vez melhor.

A minha família que torna possível minha vida acadêmica, dedico.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Dr. Eng. Geraldo Isaia, pela orientação neste trabalho e, principalmente, pela passagem do seu valioso conhecimento e tempo despendido em nossa pesquisa. Espero ter correspondido à altura com o meu trabalho a tarefa a mim designada. Foi uma honra ter trabalhado com o senhor.

Ao Professor Dr. Antônio Gastaldini, pelos conhecimentos teóricos, dicas nos ensaios e disponibilização dos equipamentos.

A Professora Dra. Tatiana Cervo e ao Ms. Régis Morais que contribuem de forma bastante afetiva para que as pesquisas do GEPECON se realizem.

Aos colegas de mestrado: Camila Crauss, Daiana Cesar, Karina Kozoroski, Monique Pafiadache, Roger Mazza, Daniel Rosado e André Pereira, pela troca de conhecimentos.

Aos iniciação científica: Fabrício Bolson, Andriago Zanella, Pedro Borges, Lucas Lamberti, Jéssica Nemitz, Felipe e Guilherme Trevisan pela ajuda no trabalho, camaradagem, sem vocês o trabalho se tornaria muito difícil.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil: Vítor, José Pedro, Eduardo e João, pela ajuda.

Ao Doutorando em física Matheus Gomes e ao Professor Eng. Aleir pelos ensaios de DRX e MEV.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos órgãos de fomento (CAPES, CNPq e FAPERGS), pelo auxílio financeiro durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realização deste curso.

“É melhor tentar e falhar do que se preocupar em ver a vida passar, é melhor tentar, embora em vão, do que ficar sem fazer nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar do que em dias tristes em casa me esconder, prefiro ser feliz embora louco do que em conformidade viver...”

Martin Luter King

RESUMO

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

DURABILIDADE DO CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ NATURAL SEM MOAGEM: MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA E PENETRAÇÃO DE CLORETOS

AUTOR: GUILHERME HÖEHR TRINDADE

ORIENTADOR: GERALDO CEHELLA ISAIA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 06 de maio de 2011

O emprego de cinza de casca de arroz (CCA) natural no concreto visa contribuir para a sustentabilidade da construção civil, destinando de maneira adequada, esse material que antes seria considerado um resíduo poluente. Porém, é necessária a investigação das consequências em substituir parte do cimento por CCA natural para produzir concreto com finalidade estrutural. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a durabilidade de concretos produzidos com teor de 15 % de substituição parcial do aglomerante por CCA natural, frente à expansão devido à reação álcali-sílica (RAS) e à penetração de íons cloretos, assim como, sugerir medidas preventivas através do uso de adições minerais. No presente estudo, a CCA natural foi utilizada em substituição parcial ao cimento Portland no estado em que se encontra ao sair dos fornos de queima (sem controle de temperatura), diretamente na betoneira para sofrer auto-moagem com os agregados. Foi investigada a neutralização das RAS da CCA natural pelo emprego de cimentos com adições minerais (CPIIZ, CPIII e CPIV), assim como foram realizadas as substituições adicionais de parte do cimento CPIIZ por cinza volante (10, 15, 20, 30 e 40 %). Na investigação da RAS foram empregados os métodos de expansão acelerado a 80 °C em barras de argamassa acompanhado pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX), e os métodos de longa duração a 38 °C e acelerado a 60 °C em prismas de concreto. Na investigação da resistência a penetração de íons cloretos foi empregado o método de penetração de íons cloretos por imersão em solução salina (EPCI) dos concretos produzidos com CCA natural e cimento CPIIZ adicionados de cinza volante (0; 12,75 ou 17 %) e nas relações água/aglomerante(a/ag) de 0,45; 0,55 e 0,65. A análise dos resultados do EPCI foi realizada com base no coeficiente angular da equação da reta (K') obtido a partir das profundidades médias de penetração dos períodos investigados. Neste trabalho verificou-se que, no ensaio em barras de argamassa a CCA natural gerou expansão acima do permitido por norma nas misturas com cimento padrão, enquanto o cimento CPIIZ com adição a partir de 20 % de cinza volante se mostrou mitigador da RAS. Através desses resultados pode-se verificar que o efeito mitigador da RAS aumentou proporcionalmente com a adição de cinza volante. Além disso, o cimento CPIV mostrou excelência em mitigar a reação expansiva. A análise de MEV identificou os produtos característicos da RAS nas amostras contendo CCA natural e a DRX verificou que as amostras retiradas das misturas com maior teor de adição mineral apresentaram picos de hidróxido de cálcio (CH) com menor intensidade e ainda, que as misturas com CCA natural apresentaram maior quantidade de carbonato de cálcio. Em relação aos prismas de concreto moldados a 60 °C, os resultados mostraram maior expansão na mistura de CPIIZ com CCA natural, mas ela se manteve abaixo do limite máximo de expansão preconizado pelo ensaio. As misturas de CPII-Z com CCA natural adicionadas de 10 e 15 % de cinza volante mostraram melhor eficiência em mitigar a expansão. Em relação aos prismas de concreto moldados a 38 °C os resultados ainda não são conclusivos aos 12 meses, porém as misturas que apresentaram maior expansão em 12 meses foram as de CPII-Z com CCA natural e 15 % de cinza volante, de CPII-Z com CCA natural e CPII-Z com CCA natural e 10 % de cinza volante, respectivamente, entretanto, todas abaixo do limite máximo de expansão aos 24 meses, preconizado pela norma brasileira. Através das análises dos resultados do EPCI concluiu-se que as adições minerais proporcionaram melhorias ao concreto com maiores idades devido ao efeito pozolânico. Além disso, os melhores resultados obtidos foram nos traços com menor relação a/ag, provavelmente devido ao maior consumo de cimento que aumenta a quantidade de CH para interagir com a CCA e a cinza volante. Portanto, as misturas de cimento Portland com CCA natural e cinza volante atendem aos parâmetros de durabilidade do concreto, e com isso o uso da CCA natural seria um importante contribuinte na sustentabilidade e preservação do meio ambiente pela construção civil.

Palavras-chave: cinza de casca de arroz natural; reação álcali-sílica; argamassa; concreto; ensaio acelerado; difusão de cloretos.

ABSTRACT

Dissertation of Master's Degree
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

DURABILITY OF CONCRETE WITH NATURAL RICE HUSK ASH WITHOUT GRINDING: MITIGATION OF ALKALI-SILICA REACTION AND CHLORIDE PENETRATION

AUTHOR: GUILHERME HÖEHR TRINDADE

ADVISOR: GERALDO CEHELLA ISAIA

Date and Place of the defense: Santa Maria, May 06, 2011

Natural rice husk ash (RHA) used in concrete contributes to civil construction sustainability. In fact, RHA is considered a residual pollutant and then it is necessary to destine this material correctly. However, it is necessary to investigate the consequences of replacing part of cement by natural RHA to produce concrete for structural purposes. In this context, the aim of this study was to evaluate the concrete durability produced with 15 % of blinder partial replacement by natural RHA in the expansion due to alkali-silica reaction (ASR) and penetration of chloride ion, as well as to suggest preventive measures with the use of mineral additions. In the present study, natural RHA was used as partially replacement of Portland cement. This natural RHA has been obtained without temperature control burning and placed directly into the mixer to suffer self-grinding with aggregates. We investigated the RAS neutralization of natural RHA by the use of cement with mineral additions (CPIIZ, CPIII e CPIV), as well as, we performed additional replacements of part from CPIIZ cement by fly ash (10, 15, 20, 30 and 40 %). We employed accelerated expansion method at 80°C in mortar bars followed by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), and long term at 38 °C and accelerated at 60 °C methods in concrete prisms. To investigate concrete resistance in the chloride ion penetration, we used chloride ions penetration method by immersion in saline solution (CPT) of concrete produced with natural RHA and CPIIZ cement added of fly ash (0, 12.75 or 17 %) and water-binder ratios of 0.45, 0.55 and 0.65 were adopted. Analyses of results were based in slope (K') **obtained from the average depths of penetration**. In this study, we verified that in mortar bars assay the natural RHA generated expansion above of results allowed by norm in mixtures with standard cement, while CPIIZ cement with addition from 20 % of fly ash showed to mitigate the ASR. These results demonstrated that effect of mitigation of RAS proportionally increased with fly ash addition. Moreover, CPIV cement demonstrated excellence in mitigate the expansive reaction. The SEM analysis identified the characteristic products of ASR in the samples containing natural RHA. XRD analysis showed that the samples of mixtures with higher content of mineral addition showed peaks of calcium hydroxide (CH) with less intensity and mixtures with natural RHA presented greater calcium carbonate content. In relation to concrete prisms molded at 60°C, results showed an increase in expansion for mixture of CPIIZ with natural RHA, but these results remained below of maximum expansion predicted by test. Mixtures of CPII-Z with natural RHA added of 10 and 15% fly ash demonstrated better efficiency in expansion mitigation. In relation to concrete prisms molded at 38°C, the results are not conclusive to 12 months, but mixtures that presented a great expansion were of CPII-Z with natural RHA and 15% fly ash, the CPII-Z with RHA natural and CPII-Z with natural RHA and 10% fly ash, respectively. However, all mixtures had expansion below the maximum limit suggested by the Brazilian standard at 24 months. Through of results CPT, we can conclude that mineral additions provided improvements to the concrete with higher ages due to pozzolanic effect. Moreover, the best results obtained were in trace with lowest water-binder ratios, probably due to increased consumption of cement, which increases the CH amount to interact with the RHA and the fly ash. Therefore, mixtures of Portland cement with fly ash and natural RHA meet the durability of concrete, and also the use of natural RHA would be an important contribution to sustainability and preservation of environment by civil construction.

Keywords: natural rice husk ash; alkali-silica reaction; mortar bars; concrete; acelerated test; chloride diffusion.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Produção de cinza por material	27
TABELA 2 - Valores estimados da produção anual de arroz, casca e cinza da casca de arroz	38
TABELA 3 - Características físico-química das CCAs	40
TABELA 4 - Composição química da CCA em %, segundo diversos autores.....	42
TABELA 5 - Frações granulométricas do agregado.....	68
TABELA 6 - Frações granulométricas do agregado graúdo.....	70
TABELA 7 - Caracterização física dos cimentos, cinza volante e CCA.....	85
TABELA 8 - Análise química dos cimentos, CV e CCA.....	86
TABELA 9 - Convenções ensaio de pozolânicidade.....	88
TABELA 10 - Índice de atividade Pozolânica.....	88
TABELA 11 - Características dos agregados usados neste trabalho.....	89
TABELA 12 - Traços unitários obtidos no estudo de dosagem para EPCI fase 3...	105
TABELA 13 - Consumo de materiais por m ³ de concreto.....	106
TABELA 14 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com cimento padrão.....	108
TABELA 15 - Expansão média das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPIII.....	111
TABELA 16 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPII-Z	113
TABELA 17 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativas da CCA nas misturas com CPII-Z com 10 % cinza volante.....	114
TABELA 18 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPII-Z + 15 % cinza	

volante.....	117
TABELA 19 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPII-Z com 20 % cinza volante.....	118
TABELA 20 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPII-Z com 30 % cinza volante.....	120
TABELA 21 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPII-Z com 40 % cinza volante.....	122
TABELA 22 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPIV.....	124
TABELA 23 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das areia usada na confecção dos prismas de concreto....	126
TABELA 24 - Expansão dos prismas de concreto a 1 e 2 anos e classificação da potencialidade reativa das misturas com CCA natural.....	153
TABELA 25 - Porcentagem de expansão dos prismas de concreto aos 3 e 6 meses e classificação da potencialidade reativa das misturas com CCA natural....	155
TABELA 26 - Profundidades médias de penetração dos traços de CPII-Z - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	159
TABELA 27 - Profundidades médias de penetração dos traços de CPII-Z com CCA natural e 12,75 % cinza volante - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	160
TABELA 28 - Profundidades médias de penetração dos traços de CPII-Z com CCA natural e 17 % cinza volante - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	161
TABELA 29 - Profundidades médias de penetração dos traços de CPII-Z com CCA moída - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	162
TABELA 30 - Coeficientes de Penetração de Cloretos por Imersão (K') e resistência a compressão aos 28 dias dos traços estudados.....	163
TABELA 31 – Períodos das coletas das amostras para ensaio de MEV e DRX.....	193

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual no bairro do município de Pelotas – RS. Fonte: Pouey (2006).....	28
FIGURA 2 - Idealização do ciclo do arroz para não gerar resíduos.....	29
FIGURA 3 - Variações nas características mineralógicas e físicas de CCA provenientes de processos de queima diferentes. Fonte: Hara et al. (1989)	39
FIGURA 4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma cinza volante. Fonte: Isaia (2010).....	48
FIGURA 5 - Estrutura degradada pela RAA possível RAS em Recife, Brasil. Fonte: Andrade (2006).....	51
FIGURA 6 - Estrutura degradada pela RAA possível RAS no Viaduto Robert-Bourassa - Charest, Québec, Canadá. Fonte: Sanches (2010).....	52
FIGURA 7 - Representação esquemática das formas cristalina (A) e amorfa (B) da sílica. Fonte: Kingery e colaboradores (1976).....	54
FIGURA 8 - Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, segundo o conceito da dupla camada difusa. Fonte: Mitchell (1992).....	57
FIGURA 9 - Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento. Fonte: Paulon (1981).....	58
FIGURA 10 - Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas. Fonte: Turriziani (1986).....	60
FIGURA 11 - Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas. Fonte: Turriziani (1986).....	61
FIGURA 12 - Corrosão em estruturas executadas com aditivo com cloretos. Fonte: Vaghetti et al. (2002).....	74
FIGURA 13 - Estrutura localizada na linha da maré severamente deteriorada. Fonte: Aguiar (2006).....	74
FIGURA 14 - DR-X da CCA natural (A) e moída (B).....	87

FIGURA 15 - Areia limpa (A), areia após peneiramento (B) e areia com CCA moída (C).....	90
FIGURA 16 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o estudo com cimento padrão.....	92
FIGURA 17 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CII-Z.....	93
FIGURA 18 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CIII.....	94
FIGURA 19- Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CIV.....	94
FIGURA 20 - Material coletado para análise da MEV e ED-S.....	95
FIGURA 21 - Material coletado para análise de DR-X.....	96
FIGURA 22 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CII-Z.....	98
FIGURA 23 - Expansão das barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577 4/5 utilizando cimento padrão.....	108
FIGURA 24 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577 4/5 utilizando CIII	110
FIGURA 25 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5 utilizando CII-Z	112
FIGURA 26 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5 utilizando CII-Z + 10 % cinza volante	114
FIGURA 27 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 15 % cinza volante	116
FIGURA 28 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 20 % cinza volante.....	118
FIGURA 29 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 30 % cinza volante.....	119
FIGURA 30 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 40 % cinza volante.....	121
FIGURA 31 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CIV.....	123
FIGURA 32 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT	

NBR 15577-4, contendo cimento padrão e areias usadas na confecção dos prismas de concreto.....	125
FIGURA 33 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa com cimento padrão visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia aproximada no poro (ponto 1) da amostra (B).....	128
FIGURA 34 - Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).....	128
FIGURA 35 - Micrografia (A) e EDS (B) na interface pasta agregado (ponto 2)...	128
FIGURA 36 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa com cimento padrão e CCA moída visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia ampliada do aglomerado de CCA moída (ponto 1) (B).....	129
FIGURA 37 - Micrografia (A) e ED-S (B) no aglomerado aproximado de CCA moída da amostra (ponto 1.1).....	129
FIGURA 38 - Micrografia do poro da amostra (ponto 2) (A) e micrografia do poro aproximado (ponto 2.1) (B).....	130
FIGURA 39 - Micrografia (A) e EDS (B) do poro (ponto 2.2) aproximado da amostra.....	130
FIGURA 40 - Micrografia geral das amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de cimento padrão com CCA natural visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).....	131
FIGURA 41 - Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).....	131
FIGURA 42 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa com cimento padrão e CCA natural visualizando-se o ponto 3 (A) e micrografia aproximada do poro da amostra (ponto 3) (B).....	131
FIGURA 43 - Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 3.1).....	132
FIGURA 44 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CII-Z com 20 % cinza volante visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1).....	133
FIGURA 45 - Micrografia aproximada no poro da amostra (ponto 1.1) (A) e micrografia da etringita no poro da amostra (ponto 1.2) (B).....	134
FIGURA 46 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da	

mistura de CPII-Z adicionada de 20 % cinza volante com CCA moída visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).....	135
FIGURA 47 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).....	135
FIGURA 48 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CPII-Z adicionada de 20 % cinza volante com CCA natural visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).....	135
FIGURA 49 - Micrografia no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).....	136
FIGURA 50 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.4).....	136
FIGURA 51 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.2).....	136
FIGURA 52 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.3).....	137
FIGURA 53 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa somente com CPIV visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).....	138
FIGURA 54 - Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).....	138
FIGURA 55 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.2).....	139
FIGURA 56 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CPIV com CCA moída visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).....	139
FIGURA 57 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).....	140
FIGURA 58 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CPIV com CCA natural visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1).....	140
FIGURA 59 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).....	141
FIGURA 60 - Micrografia no poro da amostra (ponto 2).....	141
FIGURA 61 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra	

(ponto 2.1).....	141
FIGURA 62 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 2.2).....	142
FIGURA 63 - Difratoograma da amostra de cimento padrão. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico, CSH ⁺ - Silicato de cálcio hidratado - alto cálcio.....	144
FIGURA 64 - Difratoograma da amostra de cimento padrão com CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, CSH - Silicato de cálcio hidratado, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico, CSH ⁺ - Silicato de cálcio hidratado - alto cálcio, AN – Anidrita.....	144
FIGURA 65 - Difratoograma da amostra de cimento padrão com CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, CSH - Silicato de cálcio hidratado, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	145
FIGURA 66 - Difratoograma da amostra de CII-Z. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	146
FIGURA 67 - Difratoograma da amostra de CII-Z com CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	147
FIGURA 68 - Difratoograma da amostra de CII-Z com CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	147
FIGURA 69 - Difratoograma da amostra de CII-Z com 20 % de cinza volante. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	148
FIGURA 70 - Difratoograma da amostra de CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	149
FIGURA 71 - Difratoograma da amostra de CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico, AN –	

Anidrita.....	149
FIGURA 72 - Difratoograma da amostra de CPIV. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	150
FIGURA 73 - Difratoograma da amostra de CPIV com CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	151
FIGURA 74 - Difratoograma da amostra de CPIV com CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, , CSH - Silicato de cálcio hidratado, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO ₃), BE - Belita – (C ₂ S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.....	151
FIGURA 75 - Expansão em prismas de concreto pelo método ABNT NBR 15577-6, a temperatura de 38°C, utilizando cimento padrão e CII-Z com CCA natural adicionados 0, 10 e 15 % de cinza volante.....	153
FIGURA 76 - Expansão em prismas de concreto pelo método acelerado (Touma et al., 2001; Fournier et al., 2004) a 60°C com cimento padrão e CII-Z com CCA natural adicionados 0, 10 e 15 % de cinza volante.....	155
FIGURA 77 - Gráfico para obtenção do coeficiente K' dos traços de CII-Z - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	159
FIGURA 78 - Gráficos para obtenção do coeficiente K' dos traços de CII-Z com CCA natural e 12,75 % cinza volante - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	160
FIGURA 79 - Gráfico para obtenção do coeficiente K' dos traços de CII-Z com CCA natural e 17 % cinza volante - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	161
FIGURA 80 - Profundidades médias de penetração dos traços de CII-Z com CCA moída - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.....	162
FIGURA 81 - Coeficientes de Penetração de Cloretos por Imersão (K') dos traços investigados.....	164
FIGURA 82 - CCA natural sem moagem (A) e CCA natural moída na betoneira (B).....	188
FIGURA 83 - CCA moída em moinho de bolas (A) e cinza volante (B).....	188
FIGURA 84 - Areia fina (A) e areia média (B).....	189
FIGURA 85 - Brita zero (A) e brita 1 (B).....	189
FIGURA 86 - Aspecto final da argamassa fresca.....	190

FIGURA 87 - Conferência do comprimento efetivo de medida na forma das barras de argamassa.....	190
FIGURA 88 - Barras de argamassa no estado fresco.....	191
FIGURA 89 - Recipiente de acondicionamento das barras de argamassa.....	191
FIGURA 90- Estufa empregada no acondicionamento dos recipientes.....	191
FIGURA 91 - Aparelho usado como medidor do comprimento das barras.....	192
FIGURA 92 - Aparelho umidificador usado no controle da climatização da sala de leitura.....	192
FIGURA 93 - Aparelho usado no controle da climatização da sala de leitura.....	192
FIGURA 94 - Microscópio óptico de varredura.....	194
FIGURA 95 - Aparelho metalizador.....	194
FIGURA 96 - Porta amostra.....	195
FIGURA 97 - Equipamento de DRX usado na investigação.....	195
FIGURA 98 - Aparelho medidor do comprimento dos prismas.....	196
FIGURA 99 - Prismas cobertos com plástico para acondicionamento em câmara úmida (A) e no recipiente de acondicionamento (B).....	196
FIGURA 100 - Corpos de prova imersos em solução salina.....	197
FIGURA 101 - Corpo de prova, rompido diametralmente, aspergido com nitrato de prata (A) e após tratamento feito no AutoCad, para obtenção das profundidades de penetração (B).....	197
FIGURA 102- Expansão nos prismas de concreto pelo método EAPC até o período de 12 meses.....	198

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1.....	36
EQUAÇÃO 2.....	36
EQUAÇÃO 3.....	37
EQUAÇÃO 4.....	37
EQUAÇÃO 5.....	61
EQUAÇÃO 6.....	81
EQUAÇÃO 7.....	98
EQUAÇÃO 8.....	99
EQUAÇÃO 9.....	99
EQUAÇÃO 10.....	99
EQUAÇÃO 11.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS

- a/ag** – relação entre água e aglomerante, em massa
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AgNO₃** – Nitrato de prata
- Al₂O₃** – óxido de alumínio
- CaCO₃** – carbonato de cálcio
- Ca²⁺** - íons cálcio
- Ca(OH)₂** – hidróxido de cálcio
- Ca/Si** - relação entre cálcio e sílica
- C₃S** – silicato tricálcico
- C₂S** – silicato dicálcico, Belita
- C₃A** – aluminato tricálcico
- C-A-H** – aluminato de cálcio hidratado
- CC** – carbonato de cálcio
- CCA** – cinza da casca do arroz
- CCAM** – cinza da casca do arroz, moída
- CCAN** – cinza da casca do arroz, ao natural
- CH** - hidróxido de cálcio
- Cl⁻** - íons cloretos
- CO₂** – dióxido de carbono
- CP** – corpo de prova
- CSH** – silicato de cálcio hidratado
- CPIII** – Cimento Portland de alto forno
- CPIV** – Cimento Portland com pozolânico
- CPII-Z** – Cimento Portland com pozolânico
- e⁻** – elétrons
- EDX** – espectrometria por energia dispersiva de Raios X

EPCI – Ensaio de Penetração de Cloretos por imersão

FAC – ferro-aluminato tetracálcico

Fe²⁺ – íons ferro

Fe₂O₃ – óxido de ferro

GEPECON – Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto

H⁺ – íons hidrogênio

H₂O – molécula de água

IAP - índice atividade pozolânica

K⁺ - íons potássio

K₂O – óxido de potássio

MEV – microscópio eletrônico de varredura

MgO – óxido de magnésio

MnO₂ – óxido de manganês

Na⁺ - íons sódio

NaCl – cloreto de sódio

NaOH – hidróxido de sódio

NBR - Norma Brasileira

O²⁻ – gás oxigênio

OH⁻ - íons hidroxila ou hidroxila

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

pH – potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico

R² - coeficiente de determinação

RAA - reação álcali-agregado

RAS – reação álcali-sílica ou álcali-silicato

Si – sílica

SiO₂ – dióxido de silício

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	24
1 INTRODUÇÃO	24
2 OBJETIVOS	31
2.1 Objetivo Geral	31
2.2 Objetivos Específicos	31
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	33
CAPÍTULO II	34
3. REFERENCIAL TEÓRICO	34
3.1 Cimentos Portland	34
3.1.1 Introdução.....	34
3.1.2 Cimento Padrão.....	34
3.1.3 Cimento Portland Composto.....	34
3.1.4 Cimento Portland Pozolânico.....	35
3.1.5 Cimento Portland de Alto Forno.....	35
3.2 Adições Minerais no Concreto	36
3.2.1 Introdução.....	36
3.2.2 Cinza de Casca de Arroz.....	37
3.2.2.1 Características Físico-químicas da CCA.....	38
3.2.2.2 Pozolanicidade da CCA.....	42
3.2.2.3 Efeitos Gerais da CCA no Concreto.....	45
3.2.3 Cinza Volante	48
CAPÍTULO III	51
3.3 Reação Álcali-Sílica	51
3.3.1 Introdução.....	51
3.3.2 A RAS ocasionada por Adições Minerais.....	52

3.3.3 Fundamentos da RAS causada pela CAA.....	53
3.3.4 Mecanismos de Expansão.....	55
3.3.4.1 Teoria da Dupla Camada.....	56
3.3.4.2 Partícula em Ambiente Propício.....	58
3.3.4.3 Reação Ácido-Base.....	59
3.3.5 Adições Minerai s Redutoras das Expansões causadas pela RAS.....	61
3.3.5.1 Efeito da CCA na RAS.....	63
3.3.5.2 Cinza Volante e seu Efeito na RAS.....	64
3.3.6 Métodos de investigação da RAS.....	66
3.3.6.1 Método acelerado em barras de argamassa (MABA)	67
3.3.6.2 Método Acelerado em Barras de Argamassa com Inibidores da RAS.....	69
3.3.6.3 Método dos prismas de concreto (EPC).....	69
3.3.6.4 Método Acelerado de Prismas de Concreto (MAPC)	71
3.3.6.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	72
3.3.6.6 Difração de raio X (DRX)	72
CAPÍTULO IV	73
3.4 A corrosão da Armadura devido a Cloretos	73
3.4.1 Introdução.....	73
3.4.2 Penetração de Cloretos.....	75
3.4.3 Mecanismos de Transporte de Cloretos para o Concreto.....	76
3.4.4 Influência das Pozolanas na Penetração de Cloretos.....	77
3.4.5 Influência da Cinza Volante na Penetração de Cloretos.....	78
3.4.6 Influência da Casca de Arroz na Penetração de Cloretos.....	79
3.4.7 Ensaio de Penetração de Cloretos por Imersão (EPCI)	80
CAPÍTULO V	83
4 MÉTODO EXPERIMENTAL	83
4.1 Materiais	83
4.1.1 Aglomerantes e Adições.....	83
4.1.2 Agregados.....	89
4.1.3 Aditivo Redutor de Água.....	91
4.2 Protocolo Experimental	91
4.2.1 Fase 1 – Ensaio Acelerado em Barras de Argamassa.....	91
4.2.1.1 Ensaio s MEV, EDS e DRX.....	95

4.2.2 Fase 2 – Ensaio normal e acelerado em prismas de concreto.....	96
4.2.2.1 Procedimentos de dosagem ensaio EPC e EAPC.....	98
4.2.2.1.1 Determinação dos traços de cada mistura para análise no EPC e EAPC.....	99
4.2.3 Fase 3 – Ensaio de Penetração de cloretos.....	101
4.2.3.1 Procedimentos de dosagem ensaio EPCI.....	103
CAPÍTULO VI.....	107
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	107
5.1 Fase 1 – Ensaios em Barras de Argamassa.....	107
5.1.1 Expansão das Barras de Argamassa com Cimento Padrão.....	107
5.1.2 Expansão em barras de argamassa com cimento CPIII.....	110
5.1.3 Expansão das barras de argamassa com cimento CPII-Z.....	112
5.1.4 Expansão das barras de argamassa com cimento CPII-Z e 10 % de cinza volante..	113
5.1.5 Expansão das barras de argamassa com cimento CPII-Z e 15 % de cinza volante..	116
5.1.6 Expansão nas barras de argamassa com cimento CPII-Z e 20 % de cinza volante..	117
5.1.7 Expansão nas barras de argamassa com cimento CPII-Z e 30 % de cinza volante..	119
5.1.8 Expansão nas barras de argamassa com cimento CPII-Z e 40 % de cinza volante..	121
5.1.9 Expansão nas barras de argamassa com cimento CPIV.....	123
5.1.10 Expansão das barras de argamassa com cimento padrão e areia local para EPC...	125
5.1.11 Ensaio de MEV e EDS em argamassa.....	126
5.1.11.1 Misturas com cimento padrão.....	127
5.1.11.2 Mistura com CPII-Z e 20 % de cinza volante.....	133
5.1.11.3 Mistura com CPIV.....	136
5.1.12 Difração por raios-X.....	144
5.1.12.1 Cimento Padrão.....	144
5.1.12.2 CPII-Z.....	146
5.1.12.3 CPII-Z com 20 % de cinza volante.....	148
5.1.12.4 CPIV.....	150
5.2 Fase 2 – Ensaios em prismas de concreto.....	153
5.2.1 Ensaio em prisma de concreto realizado a temperatura de 38 °C.....	153
5.2.2 Ensaio EAPC realizado a temperatura de 60 °C.....	155
5.3. Fase 1 x Fase 2 – Ensaio em barras de argamassa x Ensaio em prisma de concreto.....	157
5.4 Fase 3 – Ensaio de Penetração de cloretos.....	158

CAPÍTULO VII	167
6 CONCLUSÕES	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171
ANEXOS	188
Anexo A	188
Anexo B	190
Anexo C	193
Anexo D	194
Anexo E	196
Anexo F	197
Anexo G	198

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Em tempos de consciência ambiental é cada vez mais visível a preocupação com o planeta em que vivemos. O uso intensivo e extensivo da Terra e de seus recursos naturais nos trouxe riquezas e desenvolvimento, porém as respostas por nossa irresponsabilidade no passado já estão sendo sentidas no presente. As mudanças climáticas que observamos no planeta inteiro, com o gradual e contínuo aquecimento da atmosfera e dos oceanos, estão ocorrendo devido à alta concentração dos gases estufa em nossa atmosfera.

A poluição por gás carbônico (CO₂) e outros gases nocivos como NO_x e metano, devido à grande atividade industrial humana, tornou mais espessa a camada de gases estufa existente na atmosfera. Essa camada impede a dispersão da energia luminosa proveniente do Sol, que aquece e ilumina a Terra, e também retém a radiação infravermelha (calor) emitida pela superfície do planeta. O aumento exagerado dos gases responsáveis pelo efeito estufa provoca o fenômeno conhecido como o aquecimento global. O aquecimento global torna a atmosfera mais ativa, intensificando e aumentando a ocorrência de eventos climáticos extremos, assim como prolongando os períodos de chuvas ou secas, os ciclones e as tempestades.

Apesar de não existir ainda um consenso sobre a relação direta entre as instabilidades atmosféricas e as mudanças climáticas globais no século XX (LIGHTHILL, 1994; MCBEAN, 2004), entende-se que o aumento das tempestades nas últimas décadas também foi significativo. Easterling et al. (2000) & Nicholls (2001) afirmaram que em algumas partes do globo já existem indícios alarmantes do aumento de eventos atmosféricos extremos. Webster et al. (2005) demonstraram que houve um acréscimo significativo no número de tempestades tropicais nas últimas temporadas, principalmente de furacões severos.

No Brasil, os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul têm sofrido com maior intensidade os efeitos do aquecimento global. Em 2005, o Rio Grande do Sul sofreu um grande ciclo de secas que deteriorou bastante a economia agropecuária da região (AQUECIMENTO GLOBAL, 2010). Em novembro de 2008 ocorreu a maior enchente que Santa Catarina já sofreu e, em 2009 fortes tornados atingiram o oeste do estado (DEFESA

CIVIL - SC, 2008). Em 2010, no interior do Rio Grande do sul, uma enchente causou alagamento em toda a região, culminando com a queda da ponte da RSC-287 sobre o Rio Jacuí (HIDROVIAS INTERIORES - RS, 2009).

A Organização das Nações Unidas (ONU), em suas últimas conferências sobre as mudanças climáticas, tenta buscar acordos entre os chefes de Estado e de Governo de países industrializados. Com o propósito de encontrar soluções para as mudanças climáticas, as decisões da COP-15 (2009) foram voltadas para o controle de emissão de CO₂ na atmosfera, enquanto a COP-16 (2010) retoma esse tema e também enfatiza as propostas de mais investimento em economia verde.

O especialista da *United Nations Conference on Trade and Development (Unctad)*, Lucas Assumpção, afirmou que "Alguns países inclusive vêm na 'Economia Verde', nesse novo conceito, novas oportunidades. A função da *Unctad* é avaliar tudo o que está relacionado com novos produtos, fabricados de uma maneira mais leve, tecnologias que implicam em menor intensidade de material na produção" (ONU, 2010).

Devido à crescente necessidade mundial em reduzir as cargas poluentes e a retirada de matéria-prima do ambiente, tem-se pesquisado em vários campos da construção civil formas de se manter o crescimento, porém diminuindo o custo ambiental. Segundo dados do CBCS (2010), a construção e a manutenção da infra-estrutura do Brasil consomem até 75 % dos recursos naturais extraídos, sendo a cadeia produtiva do setor a maior consumidora destes recursos.

Um dos vértices da cadeia produtiva da construção civil é a indústria do concreto, pois o concreto é o segundo material mais consumido no planeta, superado somente pela água. O concreto é um material indispensável à sociedade e em 2006 ele teve um consumo mundial estimado entre 21 e 31 bilhões de toneladas com 2,55 bilhões de toneladas de cimento (WBCSD, 2009). Em função de sua vasta aplicação, este tem sido alvo de pesquisas cada vez mais avançadas com o objetivo de se obter um melhor desempenho, durabilidade e sustentabilidade de suas estruturas.

Além disso, Isaia & Gastaldini (2009) atestaram as potencialidades técnicas, econômicas e ambientais do uso de misturas de concreto com até 90 % de cinza volante e escória, tendo como objetivo obter um concreto sustentável. O concreto sustentável é mais do que uma simples substituição de parte do cimento por adições ou dos agregados por materiais residuais. Ele é um exemplo importante e significativo de atitude, que objetiva reduzir o consumo de matérias-primas e industriais.

Grande parte destas pesquisas em concreto é realizada no cimento, que é o seu principal constituinte. A indústria do cimento é umas das maiores do mundo, produzem muito e está em pleno crescimento. Dados da indústria indicam que as vendas de cimento para o mercado interno brasileiro, acumuladas nos meses de janeiro a dezembro de 2010, atingiram 59121 milhões de toneladas, que representa um crescimento de 14,8 % em relação ao mesmo período de 2009 (SNIC, 2011).

O controle das emissões de CO₂, um dos principais gases causadores do efeito estufa e representa um dos maiores desafios do setor na área ambiental. A indústria do cimento contribui com aproximadamente 5 % das emissões antrópicas de CO₂ do mundo (CIMENTO ORG., 2010). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2011), mais da metade da emissão de CO₂ da indústria do cimento deve-se ao processo de produção, e isso ocorre durante a transformação físico-química do calcário em clínquer (principal componente do cimento), sendo essa reação denominada descarbonatação.

Os esforços da indústria nacional têm resultado em progressos significativos, mediante a adoção de processos de produção mais eficientes e com menor consumo energético. Com isso, o Brasil atingiu atualmente um fator de emissão de aproximadamente 610 kg de CO₂/tonelada de cimento, abaixo de diversos países como por exemplo, a Espanha (698 kg de CO₂/tonelada de cimento), Inglaterra (839 kg de CO₂/tonelada de cimento) e China (848 kg de CO₂/tonelada de cimento) (CIMENTO ORG., 2010).

A sociedade vai continuar consumindo grandes quantidades de cimento, em obras de infra-estrutura e renovação, principalmente com os programas de aceleração do crescimento (PAC), que gastaram até o final do ano de 2010, cerca de R\$ 619 bilhões no país em obras de habitação e saneamento (SINDUSCON-RS, 2010).

Sendo assim, para utilizar o cimento de forma sustentável, é preciso controlar e reduzir o consumo de clínquer e aumentar o consumo de adições minerais. Esta medida reduziria a emissão de carbono e, conseqüentemente, promoveria ganhos ambientais.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), cerca de 50 a 70 % da massa de clínquer presente no cimento Portland pode ser substituída por diversos materiais complementares. Estes materiais são provenientes de rejeitos industriais e agroindustriais que podem sofrer ou não beneficiamento. Dentre eles se enquadram a cinza volante, a sílica ativa, a escória de alto forno, a cinza de casca de arroz (CCA) (especialmente a obtida com queima controlada), etc. Neste sentido, Isaia (1995) verificou os efeitos à durabilidade do concreto de misturas binárias e ternárias em comparação ao cimento puro e demonstrou que as adições melhoraram a durabilidade do concreto de elevado desempenho com foco na corrosão das armaduras.

A CCA, mesmo sendo um resíduo agro-industrial, pode ser empregada como adição mineral na produção de concreto conforme atestam inúmeras pesquisas realizadas nas duas últimas décadas. Quando é produzida pela combustão controlada, é uma pozolana altamente reativa (RILEM, 1983; MEHTA & MONTEIRO, 1984; MALHOTRA & 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.

Quando não é produzida por combustão controlada, é denominada de cinza residual. Tradicionalmente para ser utilizada como adição mineral no concreto, ela necessita ser beneficiada, isto é, moída para obtenção de finura adequada, e assim ser utilizada como material cimentício. Este tipo de cinza tem origem dos engenhos beneficiadores, das olarias e das termoelétricas que usam a casca do cereal para secagem e parboilização do arroz, bem como biomassa para queima em seus fornos. A queima ocorre de forma descontrolada, produzindo uma cinza residual rica em sílica (teor maior que 90 %), normalmente em forma cristalina e não amorfa (CHANDRASEKHAR et al., 2005), como seria desejado para ser empregada como pozolana de alta reatividade com cimento.

Para que a CCA residual seja usada como adição mineral no cimento, são necessários alguns fatores determinantes. Dente esses fatores destaca-se o volume produzido e a porcentagem de sílica da cinza. Na tabela 1 pode-se verificar a produção de cinza por partes das plantas. Através desta tabela observa-se que a CCA gera uma maior porcentagem de cinza e de sílica, evidenciando assim sua vantagem quando comparada com outros resíduos agrícolas como milho, cana-de-açúcar, girassol e trigo.

Tabela 1- Produção de cinza por material

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)

A CCA normalmente é descartada em locais impróprios e na maioria das vezes contra as normas ambientais, sendo ela lançada a céu aberto em valas, mananciais, leitos de rios e às margens de rodovias, gerando assim, poluição ambiental e risco a saúde. Carneiro & Algrant (2000) salientam que as poeiras silicosas, como no caso da CCA, são exemplos típicos de contaminantes que podem ser respirados e que durante exposição prolongada podem gerar grandes problemas para a saúde, como a Pneumoconiose. A figura 1 evidencia esse problema ambiental.



Figura 1 - Vistas de um aterro com cinza de casca de arroz residual no bairro do município de Pelotas – RS.

Fonte: Pouey (2006).

Poucos estudos utilizam a CCA residual sem controle de queima. No entanto, as pesquisas desenvolvidas por Dafico Alves na UFG, Geraldo Isaia e Antonio L. Gastaldini na UFSM, João H. Silva na UnB, Silvia Santos na UFSC, Maria T. Pouey na UFRGS utilizam este material. Os resultados obtidos nestes trabalhos mostram a viabilidade técnica e econômica do uso destas cinzas residuais em concreto, proporcionando um desempenho adequado, embora não no mesmo nível da cinza com queima controlada. Os resultados dos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa em concreto (GEPECON), que fazem parte das dissertações de Moraes (2001), Duart (2008), Hoppe (2008) e Pedrozo (2008), comprovam este comportamento com uso de CCA residual e natural em misturas binárias ou ternárias.

O aumento contínuo da demanda por alimentos deve estar associado a medidas que mitiguem possíveis impactos ambientais negativos. Buscando contribuir com a problemática do destino adequado aos resíduos gerados por empresas que produzem e beneficiam arroz, inúmeras pesquisas comprovaram a viabilidade da utilização de sua casca como insumo

energético, acabando por tornar este fato uma prática industrial comum. O foco das atuais pesquisas está em encontrar um destino para essa cinza residual obtida sem controle de queima, tornando assim, o ciclo do arroz fechado e sem resíduos. A presente pesquisa propõe que esta CCA residual seja utilizada ao natural em substituição parcial ao cimento para produzir concreto. A figura 2 representa um organograma do ciclo do arroz idealizado por este parágrafo.

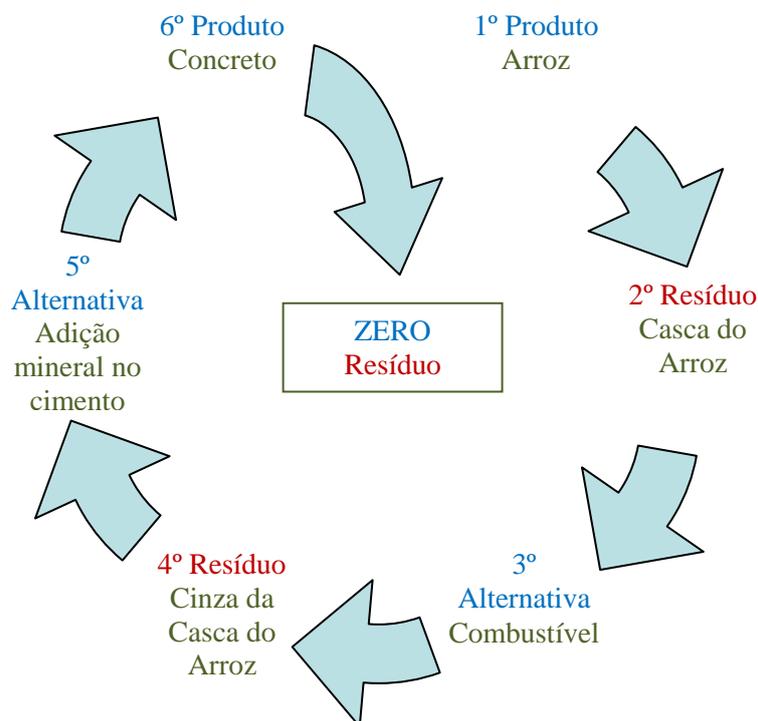


Figura 2 - Idealização do ciclo do arroz para não gerar resíduos.

Em grande parte dos casos, não há interesse das indústrias em beneficiar a CCA residual, devido ao alto investimento necessário de implantação e, sobretudo, pela sazonalidade da produção de arroz, o que poderia trazer problemas de abastecimento ao mercado. A diretriz que levou ao estudo desta cinza no estado natural, denominada CCA natural, foi utilizá-la sem moagem como material cimentício em substituição parcial ao cimento Portland, ou seja, utilizá-la no estado em que se encontra ao sair dos fornos de queima, diretamente na betoneira para sofrer auto-moagem com os agregados.

Essa é uma proposta sustentável e ecológica de destino para esse material, que antes seria considerado um resíduo poluente se descartada no meio ambiente. Porém, torna-se

necessário investigar as consequências de substituir parte do cimento por CCA natural para produzir concreto com finalidade estrutural. Essas investigações ocorreram a fim de se evitar problemas de durabilidade nas estruturas de concreto.

O presente trabalho está inserido em uma pesquisa ampla denominada: “Estudo da viabilidade técnica e econômica da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural”, que objetiva verificar a possibilidade do uso da CCA natural sem moagem e diretamente na betoneira, para produção de concreto estrutural e produtos estruturais pré-moldados de concreto. Em fases anteriores (fases I, II e III) que integram o projeto, verificou-se que para o teor de 15 e 25 % (parcialmente) de substituição de cimento por CCA natural ocorreu a produção de concretos que obtiveram resultados satisfatórios em ensaios referentes à durabilidade. No entanto, os ensaios de RAS (ASTM C1260/C1567 - argamassa e C1293 - concreto) demonstraram que a CCA natural é potencialmente reativa com os álcalis do cimento. Este comportamento levou a elaboração de um estudo complementar para pesquisar a mitigação desta reação deletéria, por meio de uso de cimentos pozolânicos CPIV e CII-Z, cimento de alto forno CIII, assim como a substituição adicional de parte do cimento CII-Z por cinza volante. Esse estudo da mitigação da reação álcali-sílica em concretos contendo CCA natural originou a presente dissertação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar a durabilidade de concretos produzidos com teor de 15 % de substituição parcial do aglomerante por CCA natural, frente à expansão devida à reação álcali-sílica e à penetração de cloretos, assim como sugerir medidas preventivas através do uso de adições minerais.

2.2 Objetivos Específicos

O objetivo específico deste trabalho que possibilitou a realização do objetivo geral está dividido em fase 1, 2 e 3 conforme a dinâmica proposta na metodologia.

Fase 1:

- Pesquisar a reatividade potencial da RAS gerada pela CCA natural e moída, pelo método acelerado a 80 °C em barras de argamassa conforme ABNT NBR 15577-4:2008;
- Verificar se os cimentos pozolânicos CPIV e CII-Z, cimento de alto forno CIII, assim como a substituição adicional de parte do cimento CII-Z por cinza volante são capazes de combater a RAS, reduzindo assim a expansão das barras de argamassa, pelo método acelerado a 80 °C conforme ABNT NBR 15577-5:2008;
- Analisar a microestrutura por meio de amostras retiradas dos corpos de prova das barras de argamassas, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX).

Fase 2:

- Pesquisar a reatividade potencial da RAS gerada pela CCA natural, pelo método de longa duração a 38 °C em prismas de concreto conforme ABNT NBR 15577-6:2008;
- Verificar se o cimento pozolânico CII-Z, assim como a substituição adicional de parte do cimento CII-Z por cinza volante é capaz combater a RAS reduzindo assim a

expansão nos prismas de concreto, pelo método de longa duração a 38 °C conforme ABNT NBR 15577-6:2008;

- Pesquisar a reatividade potencial da RAS gerada pela CCA natural, pelo método acelerado a 60 °C em prismas de concreto conforme proposto por Touma et al. (2001) e Fournier et al. (2004);

- Verificar se o cimento pozolânico CII-Z, assim como a substituição adicional de parte do cimento CII-Z por cinza volante é capaz combater a RAS reduzindo assim a expansão nos prismas de concreto, pelo método acelerado a 60 °C conforme proposto por Touma et al. (2001) e Fournier et al. (2004).

Fase 3:

- Investigar a penetração de íons cloretos em concretos imersos em solução salina nos traços contendo 15 % de CCA natural sobre o aglomerante e relação água/aglomerante 0,45; 0,55 e 0,65. O aglomerante foi composto de cimento CII-Z e cinza volante nos teores 12,75 e 17 %; também se utilizou concretos somente com CII-Z e com cinza residual pré-moída no teor de 15 % em substituição ao CII-Z, para efeito comparativo.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em 7 capítulos, de acordo com a discriminação a seguir.

No capítulo I (Introdução), apresentam-se os problemas ambientais, a justificativa da substituição parcial de cimento por CCA natural, que se coloca como uma proposta de solução para alguns desses problemas com uso de CCA residual, e os objetivos referentes à durabilidade de concretos produzidos com esse resíduo, tais como a mitigação das RAS e a resistência à corrosão pelo estudo da difusão de cloretos.

No capítulo II são apresentados os cimentos usados, as principais características e os estudos realizados com a CCA, a cinza volante e, os quais são os materiais cimentícios escolhidos para a solução da questão da mitigação da RAS.

No capítulo III são apresentados os problemas causados pela RAS, seus mecanismos de expansão e medidas de mitigação. Além disso, neste capítulo também estão demonstradas as metodologias atualmente adotadas na investigação da RAS.

O capítulo IV está subdividido em itens onde está apresentado o problema causado pela penetração de íons cloretos no concreto armado, a influência das adições no concreto especialmente a CCA

O programa experimental está apresentado detalhadamente no capítulo V, no qual são fornecidas informações sobre os materiais empregados, as variáveis de ensaio adotadas e os métodos de ensaio utilizados na pesquisa.

O capítulo VI contém a análise e discussão dos resultados obtidos segmentadas por fases, sendo as fases 1 e 2 são referentes a RAS e a fase 3 a penetração de cloretos por imersão. E, para finalizar, o capítulo VII apresenta as conclusões e considerações finais, destaca os comentários sobre os resultados obtidos e as sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cimentos Portland

3.1.1 Introdução

Neste capítulo será feito um breve comentário sobre a composição básica dos cimentos usados neste trabalho.

Os tipos de cimentos utilizados nessa investigação são classificados conforme as especificações das normas Brasileiras como: Cimento Padrão segundo (NBR 5732/91), Cimento Portland Composto CP II-Z (NBR 11578/91), Cimento Portland Pozolânico CP IV (NBR 5736/91) e Cimento Portland de Alto Forno CP III (NBR 5735/91).

3.1.2 Cimento Padrão

É um tipo de cimento puro usado nos ensaios laboratoriais para identificação de agregados reativos.

3.1.3 Cimento Portland Composto

No Cimento Portland CP II-Z, os teores de pozolana podem variar entre 6 e 14 %, em massa. Este tipo de cimento é empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais, na produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos

pré-moldados e artefatos de cimento. O concreto feito com este produto é menos permeável e por isso mais durável.

Nos casos em que o cimento se destine a emprego em concretos com agregados potencialmente reativos, são necessários estudos específicos para o uso de materiais pozolânicos ou de escória granulada de alto-forno para a inibição da reação, visando garantir a durabilidade do concreto.

3.1.4 Cimento Portland Pozolânico

O Cimento Portland Pozolânico CP IV, segundo a norma NBR 5736/91, “é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado”. Os teores de material pozolânico podem variar de 15 a 50 % em massa da constituição do cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), este tipo de cimento é indicado para uso quando se deseja um baixo calor de hidratação. O concreto feito com este produto se torna menos permeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum, nas idades avançadas. Apresenta características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação, também é especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos (ABCP, 2005).

3.1.5 Cimento Portland de Alto Forno

O cimento Portland de alto forno é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto forno, moídos em conjunto ou em separado. O conteúdo de escória granulada de alto forno deve estar compreendido entre 35 e 70 % da massa total de aglomerante. O subproduto do tratamento de minério de ferro em alto forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, é constituído em sua maior parte por silicatos e aluminos silicatos de cálcio. Sua composição química está entre a do cimento e a das pozolanas. Ela deve obedecer à relação conforme equação 1.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1 \quad (1)$$

As escórias podem ser classificadas como ácidas quando a relação $C/S < 1$, estas são usadas como pozolana quando resfriadas bruscamente, ou básicas (mais comum) quando a relação $C/S > 1$, estas apresentam propriedades cimentícias.

Diferente das pozolanas, a escória forma produtos pela hidratação semelhantes ao do cimento, mesmo sem a presença de CH. Entretanto, a velocidade das reações de hidratação das escórias de alto forno é muito lenta, devido ao fato da relação C/S ser próxima a 1 e menor que a do cimento que é próximo a 2, e a quantidade de produtos hidratados formados não é o suficiente ao seu uso como material cimentício sem nenhuma de ativação. O próprio clínquer do cimento Portland serve como ativador. Os ativadores reagem com os íons da escória em solução e modificam a composição química e mineralógica dos produtos hidratados. Esta reação está representada de forma simplificada na equação 2.



3.2 Adições Mineraiis no Concreto

3.2.1 Introdução

Os efeitos benéficos proporcionados pelas adições mineraiis ao concreto são de grande importância, porque causam uma redução considerável na porosidade das pastas e propiciam um refinamento dos grãos de CH (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Além disso, tamponam os poros capilares, distribuem de forma mais homogênea os produtos de hidratação do cimento Portland, em relação a um concreto tradicional, e diminuem o transporte de fluidos para o interior do concreto.

A redução da porosidade implica uma menor permeabilidade do concreto a fluidos, proporcionada pela alteração da microestrutura da pasta. A redução da permeabilidade do concreto é decorrente de ações físicas (filler) e químicas (pozolânicas) que ocorrem no

processo de hidratação dos aglomerantes. A pozolanicidade e a finura são as principais propriedades que influem no desempenho das adições minerais. As principais adições minerais empregadas são as cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa e metacaulim.

Elas são constituídas de óxidos, silício (Si), alumínio (Al), Fe, Ca, anidrido sulfúrico, entre outros. A sílica amorfa é a principal constituinte das pozolanas. Ela reage principalmente com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ (CH) formado na hidratação dos silicatos de cálcio do cimento. O silicato de cálcio hidratado (CSH) formado após as reações pozolânicas apresenta relação cálcio sílica (C/S) pouco menor que do no cimento puro, conforme equação 3.



Pequenas quantidades de alumina (A) reativa na composição química de uma pozolana geralmente substituem parte da sílica do CSH. Quando existe grande quantidade de alumina reativa, podem ocorrer reações secundárias resultando no aluminato de cálcio hidratado, conforme demonstrado na equação 4.



3.2.2 Cinza de Casca de Arroz

De acordo com a ONU para Agricultura e Alimentação (FAO, 2010), a produção mundial de arroz no ano de 2010 aumentou em torno de 4 %, chegando a 710 milhões de toneladas. Aproximadamente 90 % de todo o arroz do mundo é cultivado e consumido na Ásia. A América Latina ocupa o segundo lugar em produção e o terceiro em consumo. Somente na Ásia, principalmente na China, Tailândia e Birmânia, a produção atingiu no ano de 2010 cerca de 643 milhões de toneladas, 29 milhões a mais que em 2009. O Brasil se destaca como o maior produtor de fora do continente asiático com uma produção em 2010 de 11,31 milhões de toneladas (IBGE, 2010). A produção brasileira de arroz representa cerca de

2 % do total mundial, e cerca de 50 % da América Latina. O Rio Grande do Sul foi o maior produtor nacional de arroz em casca em 2009, tendo sido responsável por 63,1 % do total produzido, que atingiu 12,65 milhões de toneladas (IBGE, 2010).

Na região Sul, segundo o Instituto Riograndense do Arroz (IRGA, 2010), a casca de arroz é quase totalmente aproveitada. Segundo estimativas, são quase 2 milhões de toneladas da biomassa produzidas por safra. Boa parte das indústrias cerâmicas ao longo da BR-101 compram a casca de arroz para abastecer as caldeiras. Além disso, há o aproveitamento dessa casca como biomassa na geração de energia elétrica nas usinas. Todo este processo produz uma grande quantidade de cinzas. A casca representa aproximadamente 20 % em peso do, arroz e a cinza representa aproximadamente 20 % em peso da casca de arroz. Os valores estimados da produção anual (ano de 2010) de arroz, casca e cinza estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Valores estimados da produção anual de arroz, casca e cinza da casca de arroz

Produção	Arroz (t)	Casca (t)	Cinza (t)
Mundial	710.000.000	142.000.000	28.400.000
Mercosul	22.630.000	4.526.000	905.200
Brasil	11.310.000	2.262.000	452.400
RS	7.130.000	1.426.000	285.200

Fonte: IRGA, 2010

3.2.2.1 Características Físico-químicas da CCA

Com a queima da casca, a lignina e a celulose são removidas, resultando uma estrutura celular e porosa. Além do alto teor de sílica, essas cinzas geralmente contêm carbono, óxido de potássio (K_2O), óxido fosfórico (P_2O_5), CaO , pequenas quantidades de magnésio (Mg), ferro (Fe) e sódio (Na) (ARMESTO et al., 2002). Segundo Prudêncio & Santos (1998), as principais impurezas presentes são os álcalis, K_2O e óxido de sódio (Na_2O). Estes álcalis podem reagir com alguns minerais presentes nos agregados. Esta reação é conhecida como reação álcali-agregado (RAA) e provocam a deterioração do concreto. O teor de K_2O

encontra-se entre 1 e 5 % e depende da quantidade de fertilizante usado na plantação de arroz. Pequenas quantidades (inferiores a 1 %) de outras impurezas como CaO, MgO, e P₂O₅ também foram encontradas.

Estudos realizados mostram que as cinzas apresentam morfologias diferentes conforme a temperatura de queima. Dentre eles, Mehta (1992) demonstra que para temperaturas de queima entre 400 e 600 °C, a sílica contida na cinza é do tipo amorfa, com forma angular e elevada superfície específica (de 40 a 110 m²/g – por ensaio BET). De acordo com Della et al. (2001), quando a temperatura ou o tempo de queima da CCA é baixa, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa, ou seja, ocorre menos cristalização. Akasaki (2005), afirma que a CCA produzida a partir de uma combustão controlada, com temperatura de queima inferior a 600 °C, resulta numa composição morfológica com a presença marcante de sílica (SiO₂) em estado amorfo, garantindo maior reatividade com a com a cal.

Quanto à composição mineralógica, Hara et al. (1989) analisando CCA provenientes de processos diferentes de queima, constataram variações nas suas características mineralógicas e físicas, conforme mostra na figura 3.

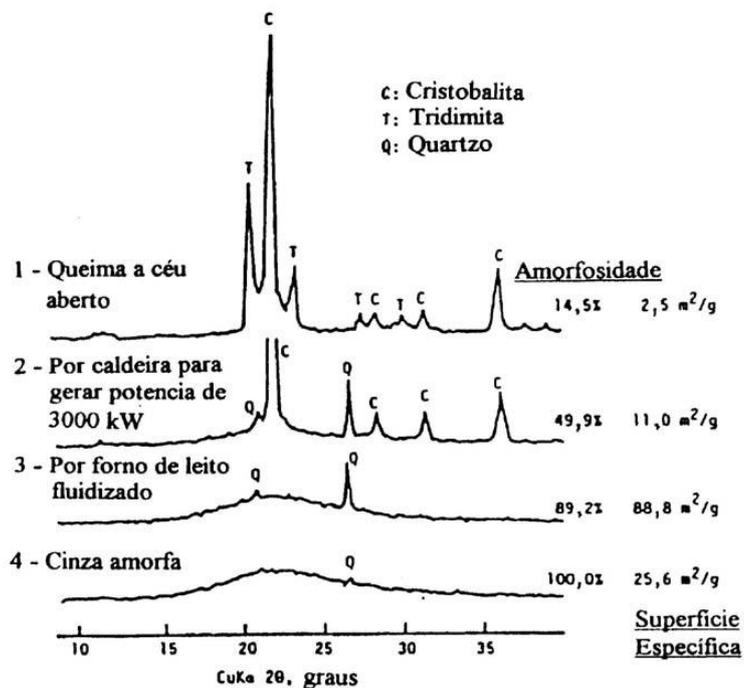


Figura 3 - Variações nas características mineralógicas e físicas de CCA provenientes de processos de queima diferentes. Fonte: Hara et al. (1989).

Quando a CCA é obtida com controle de combustão e temperatura entre 400 e 500 °C, esta é composta essencialmente de matéria não cristalina, sendo considerada uma cinza amorfa, podendo ser detectado a formação de quartzo em temperaturas acima de 600 °C. Entretanto, quando queimada sem esse controle de temperatura, apresentam-se fases cristalinas com a formação de tridimita na CCA e, em temperaturas mais altas, detecta-se a cristobalita.

Barbosa (2006) demonstrou a influência do tempo e da temperatura na queima da casca de arroz. Além disso, seu estudo mostrou as características das CCA cristalina e amorfa obtida (Tabela 3).

Tabela 3 - Características físico-química das CCAs.

Análise Físico-química das CCAs		CCA	CCA
		Cristalina	Amorfa
Densidade absoluta (g/cm ³)		2,18	2,15
Finura peneira 325 (% retida)		1,3	3,40
Superf. Espec. Blaine (cm ³ /g)		6376	17302
Diâmetro dos grãos (micras)		13,44	12,38
Reatividade c/álcalis	Redução expansão (%)	12,38	-
	Expansão argamassa (%)	0,017	-
Índice atividade pozolânica	Água requerida (%)	100,6	114,6
	Com cimento (%)	90,8	60,7
	Com cal (MPa)	3,50	4,90
Análise química (%)	Perda ao fogo	6,17	2,36
	SiO ₂	88,50	92,99
	SO ₃	0,03	0,10

Fonte: Barbosa (2006).

Os fatores determinantes da qualidade da cinza são a temperatura da combustão, o tempo de combustão e o ambiente da combustão (COOK, 1984). A CCA queimada parcialmente contém alto teor de carbono e é de cor preta. A CCA completamente queimada pode ser cinza, púrpura ou branca, dependendo das impurezas presentes e das condições de

queima (MEHTA, 1992). Quanto mais escura a CCA, maior o teor de carbono, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada. Segundo Boatening e Skeete (1990), as mudanças na coloração são associadas com o desenvolvimento do processo de combustão, assim como pelas transformações estruturais da sílica na cinza. A cor branca é a indicação da completa oxidação do carbono da cinza, pelas altas temperaturas ou longos períodos de retenção, com a formação de sílica na forma de cristobalita e tridimita. De acordo com Cook (1984), a quantidade de carbono é limitada em torno de 10 %. Valores maiores do que 15 % podem prejudicar a reatividade da cinza.

Entretanto Houston (1972) avaliou a composição química de diversas CCA, de vários países do mundo, e concluiu que as variações da sua composição não são significativas e, os teores de sílica geralmente encontram-se entre 90 e 95 %. Segundo Malhotra & Mehta (1996) o teor de sílica presente na CCA, está correlacionado com o teor de carbono não queimado, e pode variar entre 80 a 95 %, sendo que quanto maior teor de sílica, melhor para sua atividade pozolânica.

Este fato é confirmado ao se comparar a composição química de cinzas distintas, utilizadas por diversos autores (Tabela 4). Silveira (1996) observou que, de modo geral, os resultados obtidos com cinzas de diferentes origens mostram-se semelhantes, independente do tipo de queima ao qual foi submetida à casca.

Tabela 4 - Composição química da CCA em %, segundo diversos autores.

Amostras / Autores	Composição típica em óxidos (% em peso)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	PF
Cook (1976)	93,15	0,41	0,2	0,45	0,41	0,08	2,31	2,77
Salas (1986)	91,26	0,94	0,37	0,88	2,15	nd	nd	nd
Cincotto (1988)	94,7	0,09	1,46	0,95	0,99	0,04	1,75	7,29
Gueder (1989)	93,11	0,92	0,40	0,85	0,52	0,12	1,12	nd
Farias (1990)	91,78	0,60	0,34	0,52	0,50	0,11	1,30	nd
Sugitaetal.(1992)	90	0,10	0,40	0,30	0,4	0,06	2,41	4,2
Isaia (1995)	78,6	2,30	2,30	0,80	1,00	0,01	0,56	11,80
Fonseca (1999)	83,68	0,17	0,17	nd	1,03	nd	3,65	8,54
Della (2001)	72,1	0,3	0,15	0,7	0,43	0,5	0,72	24,3
Rego (2004)	89,2	0,50	0,42	0,66	0,91	0,04	0,89	4,85
Quinge (2005)	92,4	0,3	0,4	0,3	0,7	0,07	2,54	2,31
Pouey (2006)	85,81	0,06	0,05	0,46	0,51	0,11	1,7	10,5

Isaia = CCA 50 % à 650°C + 50 % sem controle; Rego (2004) = CCA 8; Pouey (2006) = CCA 7; nd = não determinado. Fonte: Pouey (2006), adaptado e complementado.

Dependendo do processo de queima da casca, as características da cinza podem variar. De acordo, Pouey (2006) analisando as CCA residuais provenientes de diferentes sistemas de queima constatou variações nas suas características mineralógicas. Ela também identificou que as CCA residuais, mesmo as mais cristalinas, têm potencial para serem empregadas na produção de cimentos, quando ao menos submetidas a um tratamento físico para redução de sua granulometria.

3.2.2.2 Pozolanicidade da CCA

O efeito pozolânico da CCA tem apresentado um desempenho bastante satisfatório, sendo comparável com a sílica ativa quando beneficiada. Ainda que presente em baixas quantidades (da ordem de 30 %) é capaz de consumir quase que completamente o CH

presente na pasta de cimento, melhorando assim a resistência do concreto tanto ao ataque por ácido, quanto por sulfatos (MEHTA, 1994).

Em 1988, o *RILEM Technical Reports* (apud Tiboni, 2007) incluiu a CCA produzida por combustão controlada como altamente pozolânica quando adicionada ao concreto juntamente com a sílica ativa de ferro-silício, sendo que o formato das partículas da CCA é angular e o da sílica de ferro-silício é esférica.

Devido ao seu efeito pozolânico ela reage com o Ca(OH)_2 (CH) e forma silicato de cálcio hidratado (CSH). Essa reação por ser mais lenta que a reação de hidratação do C_3S do cimento Portland, apresenta um ganho de resistência também mais lento. De acordo com Mehta & Monteiro (1994), as reações pozolânicas ocorrem em taxas mais lentas que as reações normais de hidratação do cimento, mas podem ser aceleradas quimicamente ou pelo aumento da temperatura.

Em geral, a pozolanicidade é medida através do chamado índice de atividade pozolânica (IAP) que é determinado experimentalmente por de diferentes tipos de ensaios.

James & Rao (1986) concluíram que a reatividade da CCA com a cal depende significativamente da temperatura em que a cinza foi produzida, já o tempo de queima registrou pequeno efeito na reatividade. Cinzas com elevada área superficial, pequenos cristais e tamanhos pequenos de partículas são altamente reativos com a cal. Em contraste, as cinzas de baixa área superficial contendo sílica cristalina mostraram reação inicial baixa.

Segundo Silveira & Dalmolin (1996), pode-se constatar que a temperatura de queima e o tempo de moagem influenciam diretamente as características físicas e o IAP da CCA. Autores como Mehta & Monteiro (1994) classificaram a CCA residual como sendo uma pozolana pouco reativa, e sugerem que este material deve ser finamente moído para desenvolver certa atividade pozolânica. Santos (1997) e Pouey (2006), utilizando diferentes CCA residuais, verificaram que diferentes tempos de moagem levaram a diferentes áreas superficiais do material, concluindo que cada CCA produzida por um determinado processo de queima possui seu tempo de moagem ótimo para atingir maior pozolanicidade.

Pelos resultados obtidos no ensaio de IAP com cimento, Prudencio & Santos (1996) demonstraram que o índice de atividade pozolânica da CCA residual aumenta com o tempo de moagem (aumento da superfície específica) até o limite de 4 horas. Daí em diante há um decréscimo no índice apesar da superfície específica continuar aumentando. Este comportamento inesperado talvez possa ser atribuído ao fato de que o aumento da superfície específica dificulta a dispersão da cinza na argamassa. As partículas da cinza acabam se

agrupando, formando grumos que não reagem na sua totalidade com o Ca(OH)_2 liberado no processo de hidratação do cimento.

Rego (2001) não obteve a mesma relação entre o aumento da superfície específica e o crescimento da atividade pozolânica da CCA residual. Nesse trabalho, a superfície específica não aumentou com o aumento do tempo de moagem. Esse fator seria o principal responsável pelas melhorias das propriedades pozolânicas desse material. De acordo com Rego (2001) a diminuição do diâmetro médio das partículas contribui para as propriedades pozolânicas da CCA residual. Nesta mesma pesquisa ele constatou que a queima sem controle de temperatura apresentou o valor de IAP com cimento de aproximadamente 85 %, considerado segundo a ABNT NBR-12653:1992 como material pozolânico, já que esta norma estipula o valor mínimo de 75 % para a qualificação do material como pozolana.

Esse resultado de 85 % no IAP foi obtido mesmo com a CCA tendo o diâmetro médio de 15,19 μm , sendo este muito maior que o diâmetro médio de 4 μm de uma CCA que foi usada como referência. A CCA residual, mesmo com essa granulometria mais grossa, alcançou um alto índice de atividade pozolânica com cimento, viabilizando assim sua utilização como adição mineral ao cimento.

Agopyan (1991), empregando o método de Chapelle modificado, encontrou para a cinza produzida em forno comum um consumo da cal de 606 mg CaO/g de cinza, e para cinza produzida em leito fluidizado um consumo de 623 a 699 mg CaO/g de cinza. Quando as cinzas foram moídas ($\phi < 0,045$ mm), estes resultados passaram, respectivamente, para 700 e 730 mg CaO/g .

Souza et al. (2000) empregaram o ensaio de Chapelle modificado para medir o grau da reação pozolânica das CCA produzidas a partir de tratamento químico da casca de arroz com posterior queima e moagem. Os resultados indicaram que as cinzas são altamente reativas, atingindo percentuais de reação com CaO que variou de 85 a 94 %.

Ao avaliar as CCA tratadas termicamente e moídas por diferentes tempos, Weber (2001) empregou os métodos de Lúxan e IAP com o cimento (ABNT NBR 5752:1992). Foram obtidos valores de IAP quase todos menores que 100 %, mas superiores ao limite mínimo estabelecido pela norma brasileira para pozolanas destinadas à fabricação de cimentos pozolânicos, que é de 75 %. Quanto aos resultados do ensaio de Lúxan, estes contradizem os resultados de IAP, pois são consistentemente superiores aos da cinza com tratamento térmico. O autor entende que as prováveis explicações possam ser: a influência da presença do carbono nas medidas de condutividade feitas no ensaio e/ou a estrutura mineralógica da cinza com

tratamento térmico que sofreu alguma alteração em relação ao estado “*in natura*” com a presença de picos mais definidos de cristais de cristobalita.

Dafico & Prudêncio (2002), avaliando as CCA tratadas termicamente, também empregaram os métodos de Lúxan e IAP com o cimento (NBR 5752/92). Foi avaliada a influência da granulometria nos resultados ao utilizarem amostras sem moagem e moídas por duas horas em moinho de bolas. Os resultados obtidos mostraram que pelo método de Lúxan, ambas as amostras têm a mesma classificação (pozolanicidade variável), já pelo método IAP, a cinza sem moagem não é considerada pozolânica (IAP < 75 %).

Rego (2004) avaliou a pozolanicidade de duas CCA residuais com diferentes mineralogias (amorfa e cristalina) através de diferentes métodos de determinação de pozolanicidade. Os métodos empregados foram: IAP com o cimento ABNT NBR 5752:1992, com a cal ABNT NBR 5751:1992, Fratini e Chapelle modificado. O autor concluiu que existe um aumento da atividade pozolânica com a redução do diâmetro médio e que, quanto mais finamente moídas, menores as diferenças de reatividade entre as cinzas amorfa e cristalina.

Silveira (2007) na avaliação da reatividade pozolânica das cinzas identificadas pela DR-X, com presença de fases cristalinas e predominantemente amorfa, constatou que ambas foram consideradas pozolânicas. O autor supõe que reatividade pozolânica das CCA está mais relacionada com a quantidade e com a área superficial do que com a composição química, finura e grau de amorfismo.

Cordeiro (2009) afirma que a diferença no IAP entre a CCA obtida por uma queima a 650 °C de uma CCA obtida por uma queima a 950 °C está na energia de moagem despendida. O autor supõe que a cristalização da sílica presente na CCA ocorre de fora para dentro, sendo assim, quanto maior a temperatura de queima, mais espesso será o encapsulamento, por finas camadas de cristais, do material amorfo. Assim, é necessário um maior tempo de moagem para liberação da sílica amorfa que estava encapsulada.

3.2.2.3 Efeitos gerais da CCA no concreto

As adições minerais têm influência benéfica sobre os aspectos relacionados com a durabilidade do concreto, principalmente com a porosidade e permeabilidade. Diversos autores (MEHTA, 1983; MALHOTRA, 1993; ISAIA, 1995), mostraram os benefícios que a

utilização de adições minerais promovem na resistência mecânica e na durabilidade do concreto.

Para Mehta (1987), os efeitos da adição de CCA ao cimento Portland são de natureza física e química, ou seja, a introdução de partículas finas na pasta de cimento, mesmo não totalmente pozzolânicas, ocasiona segmentação dos poros maiores e incrementa os locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações e formando cristais de hidróxido de cálcio menores. A ação química via reações pozzolânicas reforça a ação física, segmentando poros e refinando, à medida que a idade aumenta os grãos de hidróxido de cálcio.

Pesquisa realizada por Nilsen et. al. (1992), com pastas de cimento contendo 15 % de CCA demonstra que esta pozzolana diminui a concentração de CH na zona de transição em maior intensidade que as demais adições minerais testadas. Tal fato é explicado pelos autores devido à rápida reação entre o CH e a sílica amorfa da CCA para produzir silicato de cálcio hidratado, diminuindo assim a espessura da interface. Os resultados obtidos por Zhang et al. (1996) indicaram que a incorporação de CCA reduz a porosidade na zona de transição.

Conforme observado por Hwang & Wu (1989), a maior reatividade das partículas de CCA induz a formação mais rápida de produtos hidratados, em pastas de cimento com 15% de CCA e relação a/ago igual a 0,4, da seguinte forma: após um dia - o silicato de cálcio hidratado apresentou-se sob a forma de matriz densa e esponjosa, a maior parte do CH se combinou com a cinza e alguns cristais hexagonais semelhantes ao monossulfoaluminato apareceram na superfície dos grãos; após 3 dias - a superfície fibrosa dos grãos não era mais lisa, com formação de densas fibras ligadas com a matriz; após 7 dias - os cristais pareceram-se com um feixe amarrado ao meio, como um buquê de fibras; após 28 dias - a matriz se mostrou mais densa e os cristais de CH não decompostos obstruíam a matriz da pasta; aos 60 dias - a matriz se mostrou totalmente interligada não aparecendo mais cristais visíveis de CH.

Isaia (2003) tenta quantificar os efeitos físicos e pozzolânicos da CCA quando comparada a um filler calcário que é uma adição mineral considerada inerte. Na pesquisa foram realizadas diferentes misturas de concreto, sendo uma com cimento Portland (referência), outras com 12,5, 25 e 50 % de substituição do cimento por CCA e filler calcário, em duas idades (28 e 91 dias), com dois níveis de resistência (35 e 65 MPa). A resistência à compressão foi calculada em base unitária, isto é, MPa por kg de cimento. Também foram calculados os teores remanescentes de CH e de água combinada. Os resultados desta pesquisa evidenciam a existência de uma ação combinada e sinérgica entre o efeito da hidratação do cimento Portland (referência) e a ação pozzolânica e o efeito físico (filler) da CCA sobre o

comportamento da resistência à compressão unitária quando comparadas às misturas com cimento Portland.

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

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

Estudos de Sensale (2000) sugerem a existência do efeito pozolânico gerado pela CCA produzida com o processo de queima controlado (amorfa), pois quanto maior o teor desta CCA, maior a resistência à compressão dos concretos, enquanto para a CCA residual observa-se um teor ótimo (no caso 10 %) acima do qual a resistência diminui, indicando a predominância do efeito microfíler sobre o efeito pozolânico já que a eficiência reduz quando aparentemente ocorreu o preenchimento dos vazios existentes.

Segundo Rego (2001), todos os concretos fabricados com substituição do cimento Portland por CCA residual apresentaram resultados de resistência à compressão maiores que o concreto de referência para suas respectivas relações a/ag. O maior aumento de resistência à compressão se deu com teor de substituição de 5%, no qual a resistência à compressão aumentou em cerca de 17 %. Com teores de substituição de 10 % houve um aumento na resistência à compressão de cerca de 10 %, o que reforça a idéia da utilização desse material tanto do ponto de vista da melhoria das propriedades mecânicas quanto de economia e sustentabilidade do processo de produção.

No concreto, a zona de transição entre a pasta e o agregado tornou-se uma parte importante na determinação das propriedades mecânicas e na durabilidade. Em concretos de

cimento Portland, a zona de transição é geralmente mais porosa do que a pasta e contém uma larga quantidade de cristais de CH. A incorporação de adições minerais, portanto, assume um papel importante, uma vez que as adições são capazes de alterar e melhorar as características da zona de transição.

3.1.3 Cinza Volante

A cinza volante, também conhecida como cinza volante pulverizada, é a cinza obtida por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão, sendo a pozolana artificial mais comum. As partículas de cinza volante são esféricas (o que é uma vantagem do ponto de vista de demanda de água), são muito finas (diâmetro entre 1 e 100 μm), e a área específica Blaine tem normalmente valores entre 250 e 600 m^2/kg e massa específica ao redor de 2,35 g/cm^3 . A grande área específica da cinza volante significa que o material está prontamente disponível para reação com o CH.

As cinzas volantes mais comuns são provenientes de carvão betuminoso, sendo predominantemente silicosas e conhecidas como cinzas volantes Classe F. Os carvões subbetuminosos e a lignita resultam cinzas volantes ricas em cal, classificadas como Classe C. Na figura 4 estão representadas pela MEV as partículas de cinza volante.

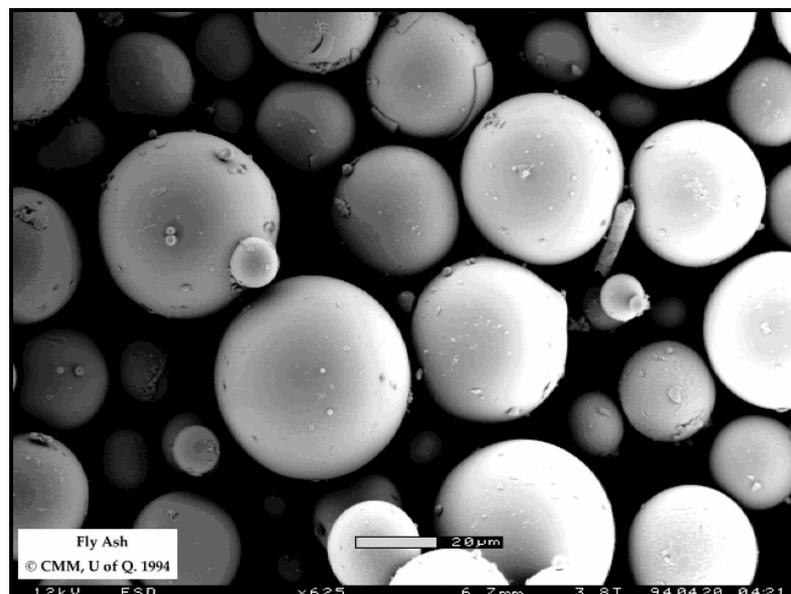


Figura 4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma cinza volante. Fonte: Isaia (2010).

Além de diminuir o prejuízo ambiental, as adições minerais tendem a melhorar as propriedades do concreto e também funcionam como inibidoras de algumas reações deletérias provocadas por reações químicas indesejadas.

Segundo Neville (1997) o melhoramento da resistência do concreto pela cinza volante não é apenas em consequência de sua pozolanicidade, mas também da capacidade das partículas bem pequenas e esféricas se acomodarem entre as partículas de cimento. O efeito benéfico da acomodação das partículas sobre a resistência é a redução do ar aprisionado no concreto e a redução do volume de poros capilares grandes.

Com isso, pode-se verificar que a resistência à compressão e a impermeabilidade pode ser aumentada significativamente pelos mecanismos físicos de redução da exsudação, do refinamento dos grãos por inclusão de partículas finas de uma adição mineral. Porém, as melhorias provocadas pelas reações pozolânicas são significativas na densificação da zona de transição e, assim, no comportamento mecânico do concreto endurecido.

Bijen & Selst (1993) pesquisaram quatro tipos de cinzas volantes combinadas com três tipos de cimento diferentes em mesmos teores de 33 % de substituição. Os autores concluíram que as resistências mecânicas de cada uma das misturas dependeram da qualidade das cinzas utilizadas. Para as cinzas com melhores características físicas e químicas, as misturas com cimento de pega rápida resultaram nas melhores eficiências, inclusive, com resistências superiores aos concretos de referência para as mesmas idades. Com isto, através dos resultados Bijen & Selst (1993) concluíram que a contribuição desta pozolana na resistência é fortemente dependente do tipo de cimento, da relação água/aglomerante, do teor utilizado, da qualidade das cinzas e da idade dos concretos. Além disso, os autores observaram também que é de fundamental importância o processo de cura para os concretos com este tipo de pozolana e que sem os cuidados necessários, as misturas apresentaram menores eficiências.

Quanto às partículas maiores de cinza volante, Idorn & Thaulow (1985) sugerem que podem ser consideradas como "microagregado" que melhora a compacidade da pasta de cimento hidratada de modo semelhante ao efeito das partículas de cimento Portland que permanecem não hidratadas. Isso é benéfico com relação à resistência mecânica que é a resistência à propagação de fissuras e rigidez. O sistema de poros capilares resultante tem mais capacidade de reter a água que estará disponível para a hidratação em longo prazo.

Sarkar (1992), ressalta que a cinza volante possui partículas muito maiores, comparáveis às do cimento, com tamanhos variando de menos do que 1 μm até 150 μm . Sua substituição ao cimento mostrou ter um efeito significativo nas propriedades do concreto, conduzindo a resistências à compressão maiores em idades mais avançadas, tendo em vista

sua baixa reatividade. A sua lenta reatividade sugere que o processo de aumento da resistência pode continuar por meses ou, até mesmo, por anos.

CAPÍTULO III

3.3 Reação Álcali-Sílica

3.3.1 introdução

A RAS é uma reação química que ocorre internamente no concreto, argamassa ou pasta cimentícia de cimento Portland, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e algumas formas minerais de sílica reativas presentes no agregado ou adições minerais. Como resultados da reação, são formados produtos que na presença de umidade são capazes de expandir gerando fissurações, deslocamentos e, podendo assim levar a um comprometimento das estruturas de concreto. É um fenômeno patológico que pode desencadear problemas tanto em nível estrutural como operacional. As figuras 5 e 6 mostram algumas estruturas degradadas pela RAA possível RAS, evidenciando a gravidade desse problema.



Figura 5 - Estrutura degradada pela RAA possível RAS em Recife, Brasil. Fonte: Andrade (2006).



Figura 6 - Estrutura degradada pela RAA possível RAS no Viaduto Robert-Bourassa - Charest, Québec, Canadá. Fonte: Sanches (2010).

A RAA engloba três tipos reações deletérias: álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato, sendo as duas primeiras geradas por sílica reativa. A classificação em álcali-sílica, álcali-silicato fica a cargo da mineralogia e do tempo, já que a primeira ocorre mais rapidamente do que a segunda. O termo RAS usado neste trabalho engloba os dois tipos de reação gerada por sílica reativa.

3.3.2 A RAS ocasionada por Adições Minerais

A RAS identificada primeiramente como um tipo de RAA é uma reação deletéria ao concreto que também pode ser causada pelo uso de adições minerais ricas em sílica. As condições em que ocorrem a RAS pelo uso da CCA em substituição parcial ao cimento ainda são pouco conhecidas, uma vez que pode ocorrer a interação de vários fatores que podem acelerar ou inibir a reação.

Diamond (2004) e Silveira (2007) constataram a formação de gel sílico-alcálico, semelhante ao da RAA, em concretos e argamassas com adições ricas em sílica (sílica ativa e CCA), as quais estariam atuando como um “agregado reativo”. Este efeito ocorre por não haver dispersão suficiente do material na matriz cimentícia.

Batic et al. (2010) identificaram o potencial reativo frente à RAS da CCA natural. Os autores acreditaram que esse efeito está associado ao tamanho das partículas de CCA natural. Além disso, Chandra (1997) demonstrou que o efeito da floculação da sílica ativa em pastas de cimento pode levar a uma RAS, sendo este efeito válido também para a CCA. Estas

partículas muito grandes (ϕ médio $>10\mu\text{m}$) ou aglomeradas (ϕ médio $30\mu\text{m}$), não dispersas, podem induzir uma reação dos álcalis da pasta cimentícia com a sílica da adição.

Segundo Tibone (2007), altas porcentagens de CCA também podem resultar em fissuração causada pelas reações expansivas do tipo álcali-sílica. Este fato ocorre porque a quantidade de sílica disponível na matriz torna-se maior. No entanto, Hasparyk (1999) avalia como benéfica a sílica ativa e a CCA altamente reativas funcionarem como um “agregado” reativo. O autor demonstra que quando finamente dividida elas são capazes de reagir rapidamente com os álcalis, impedindo ou reduzindo a difusão destes na argamassa, e conseqüentemente, o seu contato com os minerais reativos presentes nos agregados. Como resultado, uma menor concentração do gel expansivo é formada no contato com os agregados.

3.3.3 Fundamentos da RAS causada pela CAA

No presente item será feita uma conceituação da RAS causada pela adição de CCA natural em substituição ao cimento. Essa apreciação está relacionada ao efeito da RAS causada por agregados, pois se acredita que os mecanismos químicos em que ambas ocorram e geram os efeitos expansivos no concreto sejam os mesmos. Essa relação se faz necessária pois não foram encontrados na literatura estudos referentes à investigação da RAS causada por adições minerais.

A RAS é o tipo de RAA mais conhecida e relatada no meio técnico, sendo a reação que, normalmente, ocorre mais rapidamente em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas. Entre as formas minerais mais comuns destacam-se: a opala ou sílica amorfa, a calcedônia, a cristobalita, a tridimita, os vidros naturais e artificiais e o quartzo microcristalino/criptocristalino e deformado (DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986; HOBBS, 1988; KIHARA, 1993; RODRIGUES, 1994).

Estruturalmente a sílica pura pode ser amorfa ou cristalina. De acordo com Carman (apud Paulon, 1981), “nas várias formas cristalinas de sílica os tetraedros estão unidos para formar uma rede tridimensional orientada, enquanto que na sílica vítrea os tetraedros estão unidos para produzir uma rede tridimensional ao acaso, ou seja, sem orientação. A figura 7 mostra a diferença entre as estruturas cristalina e amorfa, comparando um esquema de rede cristalina (A) com o esquema de um retículo aleatório de sílica vítrea (B).

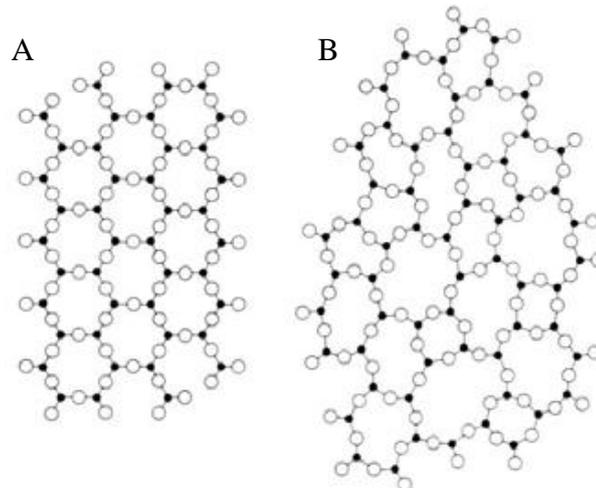


Figura 7 - Representação esquemática das formas cristalina (A) e amorfa (B) da sílica. Fonte: Kingery et al. (1976).

Os principais fatores que interferem na velocidade e na intensidade da RAS, de uma forma geral, são:

- Quanto maior o teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento no concreto, maior será a expansão (BICZOK, 1972; POOLE, 1992);

- Quanto mais desorganizada e instável é a estrutura do mineral presente no agregado, mais reativa será a fase. Em ordem decrescente de reatividade encontram-se os minerais com estrutura amorfa (opala e vidro), microcristalina e criptocristalina (calcedônia), metaestável (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados). (Bulletin 79, 1991; GLASSER, 1992; POOLE, 1992; KIHARA, 1993);

- Em ambientes com umidade relativa entre 80 a 85 %, ocorre um aumento na magnitude da reação. As estruturas localizadas em ambientes úmidos, tais como as barragens, as fundações de pontes e as estruturas marinhas, estão mais sujeitas a este tipo de deterioração (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Por outro lado, na falta de água ou umidade, a RAA pode ser limitada, mesmo na presença de agregados reativos e álcalis (BICZOK, 1972; TOMOSAWA, TAMURA & ABE, 1989; BULLETIN 79, 1991; POOLE, 1992)

- Quanto maior a temperatura ambiente, mais rapidamente ocorrerá à reação. Isto pode ser explicado em decorrência da lei de Arrhenius, ou seja, as reações químicas são ativadas ou aceleradas por temperaturas mais elevadas (BICZOK, 1972; Bulletin 79, 1991).

Glasser (1992) afirma que o processo físico de expansão da RAA, conseqüentemente a RAS, é conseqüência das reações químicas, em função disto torna-se importante o entendimento dos processos químicos envolvidos.

Normalmente, os álcalis envolvidos provêm das argilas ou de compostos silicosos presentes na matéria prima do cimento (DIAMOND, 1975). Segundo Glasser (1992) e Taylor (1997), os álcalis (sódio e potássio) se encontram presentes no cimento na forma de sulfatos ou incorporados nas fases silicatos e aluminatos no clínquer, mas também podem ser fornecidos por fontes externas, como soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e cloreto de sódio (NaCl), adições minerais ou agregados.

Os álcalis do cimento podem se encontrar em duas formas: solúveis e insolúveis. Os álcalis solúveis encontram-se presentes nos sulfatos enquanto os insolúveis encontram-se nas fases sólidas presentes no clínquer (DIAMOND, 1975).

Glasser (1992) comenta que, durante a hidratação do cimento, o fornecimento dos álcalis para a solução ocorre de forma mais rápida a partir daqueles presentes nos sulfatos, sendo que os demais, incorporados nos grãos do clínquer, só ficam disponíveis à medida que se processa a hidratação e de forma mais lenta. De qualquer forma, o pesquisador deixa registrado que, independente da fonte dos álcalis, uma vez que a RAA ocorre lentamente, todos os álcalis existentes poderão participar da reação.

De acordo com Glasser (1992), a alcalinidade da solução dos poros do concreto é dominada principalmente pelos álcalis sódio e potássio, e não pelo cálcio. Assumindo uma completa dissociação dos compostos do tipo NaOH por exemplo, o pH calculado pode chegar a elevados valores (>12) com concentrações acima de 0,01 M de NaOH . De qualquer forma, são os íons hidroxila, presentes na solução dos poros do concreto, que vão reagir com as formas de sílica reativas presentes nos agregados ou adições minerais.

Os compostos que contém os álcalis, ao participarem das reações de hidratação do cimento, formam produtos de baixa solubilidade, tais como a etringita, o C-S-H e as fases aluminato, liberando íons hidroxila. Os álcalis (sódio e potássio) participam nesta etapa apenas para balanceamento das cargas negativas sendo incorporados ao gel, e uma vez que os seus hidróxidos são solúveis, permitem que os íons hidroxila (OH^-) entrem na solução dos poros (VIVIAN, 1951; HOBBS, 1988; GLASSER, 1992; TAYLOR, 1997).

3.3.4 Mecanismos de Expansão

A primeira teoria para explicar o mecanismo de expansão do gel, produto da reação, foi elaborada por Hansen, em 1944. Hansen elaborou a teoria da pressão osmótica, onde

hipoteticamente produtos da reação ficavam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento, a qual devido a pressões hidráulicas causava expansão na estrutura.

Em outra teoria, desenvolvida por Vivian em 1950, a da adsorção, a autora relata que as expansões e fissurações ocorrem devido às pressões mecânicas que produtos no estado sólido ou semi-sólido exercem na estrutura. A expansão dependerá da concentração volumétrica do gel, de sua taxa de crescimento e de suas propriedades físicas. Caso a taxa de crescimento ocorra lentamente, o gel pode migrar ao longo do concreto dissipando as tensões. Por outro lado, se ocorrer rapidamente, as tensões internas são capazes de aumentar a ponto de causar fissuração e expansão do gel (HOBBS, 1988).

Prezzi et al. (1997) basearam-se no conceito da dupla camada elétrica para estabelecer uma correlação entre a intensidade da expansão e a composição química do gel.

3.3.4.1 Teoria da Dupla Camada

Segundo o modelo proposto por Prezzi, Monteiro & Sposito (1997), é possível explicar melhor as expansões ou variações volumétricas causadas pela RAS proveniente da RAA a partir dos conceitos básicos da química de superfície. As expansões causadas pelo inchamento do gel são atribuídas às forças de repulsão da dupla camada elétrica.

Segundo esses pesquisadores, quando uma fase sólida entra em contato com uma fase líquida, a superfície do sólido carrega excesso de carga ficando a interface polarizada. Este excesso de carga altera as propriedades das duas fases. A RAS está relacionada com a interação entre superfície da sílica altamente carregada presente no agregado ou adição mineral e a solução dos poros do concreto. Esta reação promove a dissolução da sílica e a formação de um gel, que é expansivo na presença de água.

Uma dupla camada elétrica de cátions se desenvolve na superfície da sílica para neutralizar sua carga negativa (OLIVEIRA, 2000), sendo composta basicamente por íons sódio, potássio e cálcio. Os íons alcalinos são adsorvidos nos locais onde o oxigênio possui ligações incompletas na superfície da sílica amorfa, através de “forças eletrostáticas”. Esta troca iônica é similar ao comportamento ácido-base (PREZZI et al., 1997). Quanto maior o pH do meio, maior a tendência de ocorrer dissociação em água dos íons hidroxila na superfície da partícula, ficando a mesma mais polarizada (Mitchell, 1992).

À medida que as reações vão ocorrendo, é gerado um sistema de fissuras, alterando a configuração dos poros do concreto e permitindo o ingresso mais fácil de água (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997). Segundo Mitchell (1992), a superfície carregada e a carga distribuída na fase adjacente são denominadas “dupla camada difusa”. Na figura 8 está apresentada a parte difusa de uma dupla camada elétrica em uma solução eletrolítica monovalente.

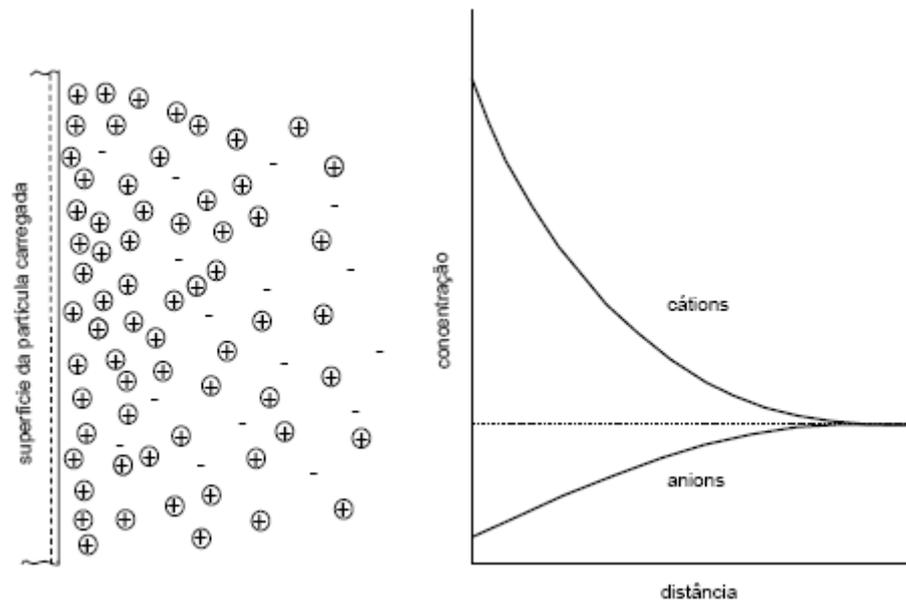


Figura 8 - Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, segundo o conceito da dupla camada difusa. Fonte: Mitchell (1992).

As cargas negativas na superfície da partícula atraem os cátions e repelem os ânions. O campo elétrico criado pela partícula, o excesso localizado de cátions e a deficiência de ânions se combinam para criar uma força elétrica que interfere na espessura da dupla camada (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997). A força de atração ocorre provavelmente devido às forças de Van der Waals, sendo esta conhecida como a ligação que une as moléculas entre si, já a força de repulsão é atribuída ao complexo de adsorção (SOUZA, 1980).

Segundo Mitchell (1992), outro fator que interfere na expansão é a temperatura. De acordo com a teoria da dupla camada, quanto maior a temperatura, maior será a espessura da camada.

A pressão no concreto devido à RAS, calculada com base no modelo Gouy-Chapman na parte difusa da dupla camada elétrica, pode variar de 2,2 MPa a 10,3 MPa (PREZZI,

MONTEIRO & SPOSITO, 1997; HASPARYK, 1999) sendo estes valores coerentes com as medidas na prática que foram da ordem de 6 a 7 Mpa (DIAMOND, 1989).

Com relação ao poder de expansão do gel formado pela reação, considera-se que um gel com maior teor de íons sódio ou potássio terá maior expansão que um gel rico em cálcio, pois a valência e a concentração de íons determinarão a espessura da dupla camada elétrica e as forças de repulsão (íons monovalentes sódio e potássio produzem maior espessura na dupla camada (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997; HASPARYK, 1999).

3.3.4.2 Partícula em Ambiente Propício

Segundo Paulon (1981), a quantidade de moléculas de água que se mantém na ligação é proporcional à área de superfície e não à quantidade total de sílica. Outro fator importante é que os íons hidroxilas estão mais fortemente ligados do que os íons de hidrogênio, os quais podem ser liberados em meio aquoso, produzindo íons de hidrogênio livres, tornando as partículas da superfície de sílica ácidas. Portanto, a reatividade dependerá da superfície específica da sílica: quanto maior for à subdivisão da partícula macroscópica, maior será o número de moléculas de água de absorção, aumentando o número de íons de hidrogênio livres e ocasionando um aumento de reatividade.

De acordo com Plum, Paulsen & Idorn (apud Paulon, 1981), a figura 9 mostra o mecanismo da RAS.

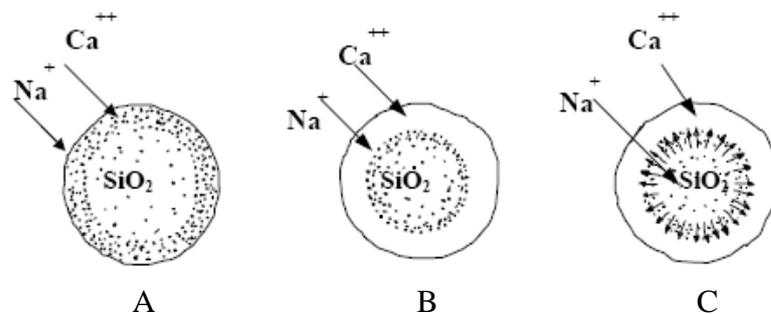


Figura 9 - Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento. Fonte: Paulon (1981).

Inicialmente, na figura 9A, nota-se a partícula de sílica reativa circundada por íons Na^+ e Ca^{2+} contidos na pasta de cimento em solução básica. Devido à alta concentração de Ca^{2+} na pasta, forma-se, segundo a figura 9B, uma fina camada de um gel de cal-álcali-sílica de caráter não expansivo ao redor da sílica, sendo essa fase considerada inócua.

Na fase seguinte, figura 9C, os íons de Na^+ e Ca^{2+} penetram na membrana semipermeável, onde reagirão com a sílica. Esta reação será inócua se a concentração de cálcio for alta o suficiente para assegurar a contínua formação do gel não-expansivo, uma vez que há o consumo de álcalis durante a reação, havendo uma redução na concentração alcalina. Porém, se a concentração de cálcio não for suficiente, os álcalis reagirão formando um gel de álcali-sílica, que em presença de água, se expandirá e ocasionará fissuras quando as forças de expansão do gel forem superiores à resistência à tração da pasta de cimento. Estas expansões cessarão somente quando os álcalis ou a sílica reativa forem consumidos.

3.3.4.3 Reação Ácido-Base

Outro mecanismo bastante aceito para a RAS, segundo Glasser & Kataoka (1981a,b) e diversas outras publicações (TURRIZIANI, 1986; STIEVENARD - GIREAUD, 1987; BULLETIN, 1991; HELMUTH & STARK, 1992; CAPRA ET AL., 1995; FURNAS, 1997) é de que, inicialmente ocorre a reação ácido-base, quando os íons hidroxilas (OH^-) atacam as ligações do grupo silanol (Si-OH), neutralizando-as. Em seguida ocorre a associação do cátion (Na^+) à estrutura, balanceando assim a carga negativa dos átomos de oxigênio, formando o gel sílico alcalino. Este mecanismo pode ser observado na figura 10.

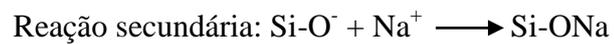
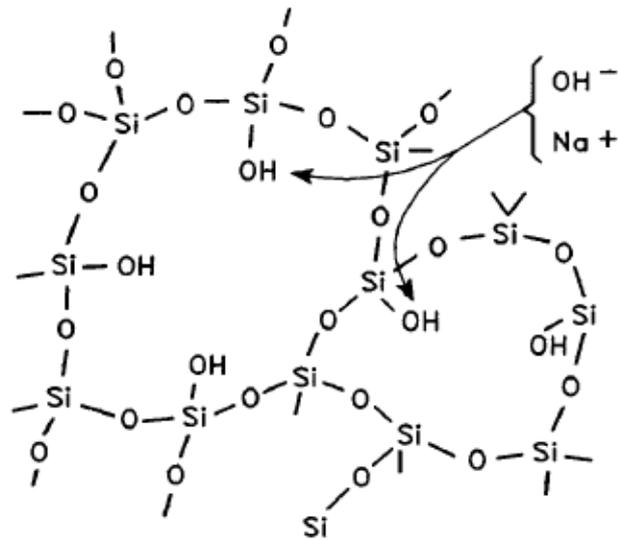


Figura 10 - Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas. Fonte: Turriziani (1986).

Um segundo estágio da reação ocorre através do ataque do grupo siloxano pelos íons hidroxilas em excesso levando à desintegração de sua estrutura, ficando em solução os monômeros de silicatos (H_2SiO_4), permitindo a adsorção de água e dos íons alcalinos. A figura 11 apresenta esta reação.

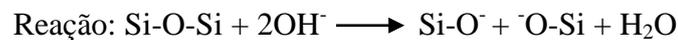
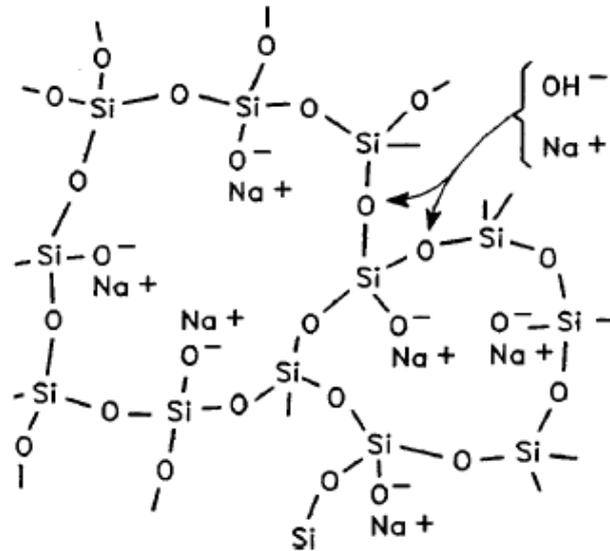


Figura 11 - Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas. Fonte: Turruziani (1986).

Os resultados desta reação são: expansão, fissuração, exsudação de gel e deterioração da estrutura de concreto (BULLETIN 79, 1991).

3.3.5 Adições Minerais Redutoras das Expansões Causadas pela RAS

Verifica-se que o teor ideal de adição necessário para reduzir as expansões geradas pela RAS varia em função do tipo da adição e de seu grau de reatividade tornando-se, portanto, imprescindível a investigação experimental dos cimentos e das adições. Em palestra ministrada pelo Prof. Dr. Benoit Fournier no 52º Congresso Brasileiro do concreto IBRACON, elucidou-se quais as medidas que estão sendo adotadas atualmente a esse respeito (FOURNIER, 2010).

O protocolo para a prevenção da RAS do Departamento de Transportes dos EUA, por meio da Administração Federal de Rodovias (FHWA), faz uma abordagem prescritiva, para impedir que novas construções em concreto sofram com esta patologia. A FHWA propõem que sejam utilizados níveis mínimos de adições minerais em substituição ao cimento Portland, conforme o nível de prevenção exigido para determinada estrutura, sendo estas substituições proporcionais ao consumo e a concentração de álcalis do cimento.

Conforme o nível de reatividade do agregado, indentificado através de ensaios laboratoriais, e a classificação da estrutura, se determina o risco da patologia e se determina o teor mínimo necessário de adição mineral. Essas medidas preventivas também permitem o uso das adições minerais combinadas.

Um exemplo de como são calculados as adições quando usadas em conjunto, está representado na equação 5.

- O teor mínimo individual necessário de adição: 30 % cinza volante (A) ou 50 % escória (B) ou 10 % sílica ativa (C).
- Os valores 30, 50 e 10 % sendo as constantes da equação entram como o denominador e as variáveis A, B e C % entram como o numerador na montagem da equação.

$$\frac{A}{30} + \frac{B}{50} + \frac{C}{10} \geq 1 \quad (5)$$

- O somatório das adições combinadas deve ser maior ou igual a 1. Esse valor unitário corresponde a totalidade da utilização de uma única adição.

De qualquer forma, para se ter uma idéia da faixa que normalmente tem sido empregada, os teores de adição utilizados na prática ou sugeridos a partir de experimentações estão apresentados a seguir (MEHTA & MONTEIRO, 1994; ACI 221, 1998; HASPARYK, 1999; MALVAR et al., 2002): sílica ativa de 10 a 15 %, CCA amorfa acima de 12 %, metacaulim de 10 a 25 %, todos em substituição ao cimento e na presença de aditivo superplastificante; pozolana natural entre 20 e 30 %, cinza volante entre 25 e 50 % e escória de alto-forno moída entre 40 e 65 %. Cabe ressaltar que a eficiência da adição dependerá principalmente do teor utilizado, da sua qualidade e das características físico-químicas, bem como do nível de reatividade (Bulletin 79, 1991).

No caso da RAS, acredita-se que as adições finamente moídas são capazes de reter os álcalis, reduzindo a concentração dos íons hidroxilas e, conseqüentemente, o pH da solução nos poros das argamassas ou concretos, ou também alterar a taxa de difusão dos álcalis e cal levando à formação de produtos não expansivos (HELMUTH, 1993; STARK, 1994).

De acordo com Urhan (1987), para um determinado teor de álcalis presente no cimento, existe um consumo específico de material pozolânico capaz de produzir C-S-H a um nível máximo; entretanto, também existe um determinado consumo (“teor péssimo”) capaz de

produzir o gel da reação (silicato alcalino) a um nível máximo. Portanto cuidados devem ser tomados em relação ao consumo ideal de pozolana, caso contrário, ao invés de estar reduzindo as expansões, poderá ocorrer um efeito inverso.

3.3.5.1 Efeito da CCA na RAS

São escassos os trabalhos publicados sobre o efeito da CCA residual na RAA. Um estudo sobre a RAA realizado por Furnas (1997) utilizou a CCA sem controle no processo de queima. Foram investigados teores de 20 e 30 % de CCA em substituição parcial ao cimento de alto-forno (contendo cerca de 35 % de escória moída). Os resultados indicaram que a CCA foi capaz de gerar menores expansões na presença do quartzito reativo. Entretanto, não houve diferença significativa entre 20 e 30 % de adição mineral na redução das expansões, alcançando-se uma eficiência de aproximadamente 50 % em ambos os casos.

Em função das características abordadas anteriormente e principalmente da pozolanicidade da CCA, quando a queima é bem controlada, acredita-se que o efeito desta pozolana possa ser similar ao da sílica ativa, ou seja, ser benéfica no combate da reação expansiva. Hasparyk (1999) investigou o uso de uma CCA especial, como proposta por Metha (1994), em comparação com uma sílica ativa, e identificou que a CCA e a sílica ativa podem ser consideradas adições minerais pozolânicas eficientes no combate da RAA. Hasparyk (1999) identificou que 15 % de CCA e sílica ativa representaram um teor “ótimo” uma vez que proporcionaram maior eficiência na redução das expansões tanto na presença do quartzito quanto na presença do basalto. Não foi observado nenhum teor prejudicial ou crítico de pozolana nas amostras contendo basalto, capaz de manter as expansões a níveis elevados, o que não ocorreu na presença do quartzito. Portanto, cuidados devem ser tomados com o agregado quartzito em relação ao teor de adição a ser utilizado na prática, com o intuito de se evitar que um efeito inverso ao desejado ocorra. Ainda na pesquisa realizada por Hasparyk (1999) identificou-se que 4 % de sílica ativa e 8 % de CCA apresentaram-se como teores críticos na presença deste agregado.

3.3.5.2 Cinza Volante e seu Efeito na RAS

Nixon & Gaze (1981) estudaram o efeito de diferentes tipos de cinza volante na RAS. Eles verificaram que, de uma maneira geral, quanto mais pozolânica é a cinza, mais intensa é a redução das expansões. Entretanto, observaram que um determinado tipo de cinza contendo baixo teor de álcalis foi bastante eficiente, apesar de ter sido classificado como de baixa pozolanicidade.

Ensaio laboratoriais realizados por Hoobs (1982) indicaram que a eficiência da cinza volante é bastante variável, dependendo principalmente do teor de álcalis e da finura da pozolana. Se o teor total de álcalis solúveis em ácido ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) presente na mistura for superior a 3 kg/m^3 , a RAS pode causar sérios danos. Segundo Helmuth (1987), menores expansões ocorrem quando há a presença de partículas mais finas de cinza associadas a um baixo teor alcalino.

Ming-shu et al. (1983) acreditaram que o controle da RAS através do uso de pozolanas está diretamente ligado com a alcalinidade do meio. Ou seja, a pozolana promove uma redução do pH uma vez que consome o CH, além de reter os álcalis. Um teor de 30 % de cinza volante foi capaz de reduzir a expansão causada pela reação em aproximadamente 95 % dos estudos realizados pelos pesquisadores.

De acordo com Tenoutasse & Marion (1986a), os álcalis totais não determinam a intensidade da reação. Entretanto, os álcalis solúveis é que podem ser liberados para reagir. Os autores verificaram que os produtos cristalizados (sob a forma hexagonal), formados a partir da reação pozolânica com a cinza volante belga, contêm um elevado teor de álcalis, sendo, portanto, eficientes na reação expansiva, uma vez que diminuem os álcalis disponíveis para reagir com os minerais reativos presentes no agregado.

Carrasquillo & Snow (1987) e Farbiarz et al. (1989) observaram que à medida que o teor de álcalis disponíveis da cinza volante aumenta (valores acima de 1,5 %), existe um teor mínimo de substituição ao cimento, abaixo do qual são causadas expansões superiores àquelas causadas em uma mistura sem adição. Substituições acima deste limite já são capazes de causar menores expansões.

Segundo Carrasquillo & Snow (1987), abaixo de 1,5 % de álcalis disponíveis na cinza volante, o efeito é muito mais benéfico. A eficiência da cinza volante também foi investigada por Davies & Oberholster (1987) verificando que 22 % do material pozolânico foram suficientes para prevenir a expansão deletéria em ensaios acelerados, no caso da RAS.

De uma maneira geral, a cinza volante pode contribuir para redução das expansões, entretanto investigações experimentais devem ser realizadas com o objetivo de verificar o teor ideal de substituição ao cimento, caso contrário um efeito negativo pode ocorrer. Adicionalmente, a quantidade de álcalis presente na pozolana também deve ser determinada uma vez que em excesso pode contribuir para o desenvolvimento da reação (HOBBS, 1988).

Thomas, Nixon & Pettifer (1991) investigaram uma areia reativa proveniente do rio Tâmis e constataram que 5 % de cinza volante causou um efeito péssimo. Entretanto, 20 e 30 % de substituição mantiveram as expansões dos concretos abaixo do limite ($< 0,03$ %), sem causar nenhuma fissuração após sete anos de exposição. Diversas porcentagens de cinza volante em substituição ao cimento também foram investigadas por Chen, Soles & Malhotra (1993). Os resultados dos autores indicaram que, similarmente à sílica ativa, a eficiência na RAS e silicato é bem maior do que no caso da reação álcali-carbonato. Teores de 40 a 50 % de substituição parcial ao cimento foram suficientes para inibir as reações supracitadas. O teor péssimo para todos os tipos de reação foi de 10 %.

Soroushian & Alhozaimy (1993) estudaram dois tipos de cinza tipo F, contendo diferentes teores de álcalis e verificaram que ambos se comportaram de forma similar. Para baixos teores de álcalis no cimento (0,53 %), a redução das expansões foi muito pequena na presença da cinza volante. Já para um elevado teor de álcalis no cimento, representando 1,21 %, os dois tipos de cinza se comportaram de maneira eficiente no combate da reação. Os pesquisadores acreditaram que apesar de uma das cinzas possuir elevado teor alcalino, a sua finura compensou o efeito benéfico proporcionada pela pozolana. Os teores ideais encontrados foram de 20 e 30 % de substituição, na presença de baixo e elevado teor de álcalis no cimento, respectivamente.

No caso dos agregados reativos tais como o arenito, siltito e quartzito, teores de cinza de 30, 20 e 15 %, respectivamente foram suficientes para manter as expansões abaixo dos limites aceitáveis pelo método NBRI (FONTOURA et al., 1990). Além disso, verifica-se que o teor ideal varia em função do tipo de agregado. Mehta & Monteiro (1994) consideram que teores de 30 a 40 % de cinza volante com baixo teor de cálcio têm-se mostrado eficientes no combate à RAA.

As pesquisas realizadas por Shayan, Diggins & Ivanusec (1996) demonstraram que a adição da cinza volante é capaz de reduzir a alcalinidade da solução dos poros de argamassas, resultando na prevenção da reação deletéria, quando na presença de 7,0 kg de $\text{Na}_2\text{O}/\text{m}^3$. Entretanto, um efeito retardador pode ocorrer na presença de elevados teores (12,5 kg) de $\text{Na}_2\text{O}/\text{m}^3$. Estes estudos envolveram diversos tipos de agregados tais como basalto, grauvaca e

quartzito. Segundo os pesquisadores, este atraso pode variar de dois a seis anos dependendo do tipo de agregado reativo. Os ensaios acelerados através do método NBRI indicaram que a reatividade do arenito e quartzito foi praticamente eliminada (expansões abaixo dos limites) quando ocorreu a substituição de 30 % do cimento por cinza volante (FURNAS, 1997).

Monteiro et al. (1997) também estudaram o efeito da cinza volante na redução da reatividade causada pelo quartzito através do ensaio acelerado. Os resultados indicam que 15 % de substituição não alteraram as expansões, e que 25 % atuaram de maneira eficiente reduzindo as expansões abaixo da amostra de referência, a qual não tinha adição.

3.3.6 Métodos de Investigação da RAS

O Brasil já dispõe de uma norma própria, a ABNT NBR 15577:2008, que serve como um guia para avaliação da reatividade potencial e das medidas preventivas frente à RAS para o uso de agregados em concretos. Essa norma será usada na investigação de agregados reativos como guia de investigação da CCA natural, já que a sílica sob a forma microcristalina contida na CCA natural é a provável responsável pela RAS. Esta norma diagnostica a RAS através de ensaios laboratoriais, tais como o método acelerado em argamassa (ABNT NBR 15577-4:2008) e o método de longa duração em prismas de concreto (ABNT NBR 15577-6:2008).

Observa-se que no Brasil os métodos de investigação normalizados da RAS são relativamente recentes, havendo ainda discordâncias sobre seus resultados serem ou não confiáveis. Essa incerteza se deve ao fato que os valores obtidos pelas diferentes técnicas que avaliam essa manifestação patológica muitas vezes divergem.

Pelo fato da investigação da adição mineral, dentre elas a CCA natural, frente à RAS se tratar de um fato novo, ela ocorrerá tanto em argamassa quanto em concreto, sendo os ensaios em concreto mais fidedigno ao que acontece “*in loco*”. Outro fator que deve ser levado em conta é a demora da obtenção dos resultados nos ensaios em concreto (1 e 2 anos), necessitando assim de um método mais rápido e ainda assim confiável. Entretanto, esses ensaios ainda são experimentais.

Nos itens a seguir serão expostos os métodos utilizados neste trabalho.

3.3.6.1 Método acelerado em barras de argamassa (MABA)

O MABA foi desenvolvido por Oberholster & Davies (1986) no *National Building Research Institute* (NBRI), sendo atualmente o método mais difundido e utilizado no Brasil e no mundo. Existem muitas normas que preconizam este método, dentre elas está a norma americana (ASTM C 1260).

A tentativa de desenvolvimento de um método acelerado começou quando Van Aardt & Visser (1982) (apud Oberholster & Davies, 1985), baseados no trabalho de Chatterji, propuseram que o ensaio em barras de argamassa fosse acelerado a partir da imersão das barras em solução alcalina (NaOH – 1N) a 80°C. Segundo a ASTM C 1260 expansões inferiores a 0,10 % aos 16 dias de ensaio indicam um comportamento inócuo, iguais ou superiores a 0,10 % e inferiores a 0,20 % aos 16 dias indicam um comportamento potencialmente reativo, iguais ou superiores a 0,20 % aos 16 dias indicam um comportamento reativo do agregado.

No Brasil, o comitê de estudos da norma brasileira CB-18/ABNT, optou por levar o ensaio até os 30 dias, acreditando que os agregados lentamente reativos teriam mais tempo para apresentar comportamento expansivo.

Os procedimentos operacionais da ABNT NBR 15577-4:2008, baseada na ASTM C 1260-07, são os seguintes:

- O ensaio torna-se acelerado quando após 24 horas de imersão em água a 80°C, as barras são depositadas em solução de hidróxido de sódio (NaOH-1N) a uma temperatura também de 80°C durante pelo menos 30 dias. São confeccionadas três barras de argamassa prismáticas nas dimensões de (25 x 25 x 285 mm) e comprimento efetivo de medida igual a (250 ± 2,5 mm) de traço 1:2,25 com relação a/ag de 0,47 em massa. O agregado empregado deve ser preparado segundo as frações granulométricas descritas na tabela 5.

Tabela 5 - Frações granulométricas do agregado.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: ABNT NBR 15577-4:2008

- Este método tem por objetivo investigar a RAS por meio do estudo da variação de comprimento de barras de argamassa estocadas em recipientes hermeticamente fechados. Os resultados são expressos em porcentagem de expansão, sendo o valor médio das três barras apresentado como resposta do ensaio em uma determinada idade.

Segundo a ABNT NBR 15577-4:2008, o ensaio pode ser interpretado através dos seguintes limites de expansão:

- Expansões inferiores a 0,19 % aos 30 dias de ensaio indicam um comportamento inócuo.
- Expansões iguais ou superiores a 0,19 % aos 30 dias indicam um comportamento potencialmente reativo. Neste caso pode ser realizado o ensaio em prisma de concreto (NBR 15577-6), prevalecendo seu resultado sobre o anterior.

Ainda não existe um consenso no que tange a limites e períodos de análise para agregados mediante o MABA. Segundo Lee et al. (2004), esse método é muito rigoroso, podendo penalizar agregados que possuem desempenho em campo satisfatório.

Segundo Fournier et al. (2006), a verificação da confiabilidade do MABA é feita através de sua comparação com o ensaio de prismas de concreto (EPC). Normalmente, o MABA é mais agressivo do que o EPC para um dado agregado, portanto, a taxa de reatividade de um mesmo agregado através dos dois ensaios não é a mesma, o que gera uma correlação muito baixa entre eles.

Segundo Bellew (1997), devido à agressividade do meio ambiente ocasionada no MABA, este ensaio não pode ser utilizado para rejeitar agregados, podendo ser utilizado somente para aceitá-los.

3.3.6.2 Método Acelerado em Barras de Argamassa com Inibidores da RAS

De forma a mitigar a RAS, a ABNT NBR 15577-5:2008 estabeleceu o método de ensaio acelerado para determinar a suscetibilidade de cimentos Portland em combinação ou não com adições minerais. Essa mitigação é comprovada quando a variação de comprimento das barras de argamassa não ultrapassar o limite proposto por norma.

O procedimento operacional da ABNT NBR 15577-5:2008 é quase o mesmo proposto pela ABNT NBR 15577-4:2008. Os fatores que não se alteram nessas normas são as granulometrias dos agregados, os procedimentos de moldagens, as condições de armazenamento e cura. Porém, se necessário, será utilizado o aditivo de forma a manter a consistência da argamassa em torno de $\pm 7,5\%$, daquela preparada com cimento original.

Outro fator modificado é o tempo de ensaio que, segundo a ABNT NBR 15577-5:2008, pode ser interpretado através dos seguintes limites de expansão:

- Expansões inferiores a 0,10 % aos 16 dias de ensaio indicam um comportamento inócuo.
- Expansões iguais ou superiores a 0,10 % aos 16 dias indicam um comportamento potencialmente reativo. Neste caso são necessários novos ensaios com novas misturas.

Este método analisa com eficiência da introdução de adições minerais no controle da RAS.

3.3.6.3 Método dos prismas de concreto (EPC)

Segundo Thomas et al. (2006), o método EPC foi desenvolvido devido à não-confiabilidade transmitida pelo método Método das Barras de Argamassas preconizado pela ASTM C 227. O teste foi calibrado para que o comportamento dos corpos de prova em

laboratório fosse similar ao comportamento em campo de estruturas de concreto. Em 1994, foi desenvolvido e adotado o procedimento que é utilizado até hoje.

Os corpos de prova de concreto são confeccionados possuindo consumo de cimento de 420 kg/m^3 e um equivalente alcalino de $1,25 \% \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (conseguido pela introdução de NaOH na água de amassamento), totalizando um teor de álcalis de $5,25 \text{ kg/m}^3$. Esse aumento é realizado devido à necessidade de maiores teores alcalinos para iniciar expansão em prismas de concreto (em laboratório), quando comparado com estruturas reais.

O método apresenta o valor limite de $0,04 \%$ em 1 ano, devendo o ensaio ser levado até 2 anos quando emprega-se adições minerais. O EPC vem demonstrando grande confiabilidade devido aos resultados obtidos em laboratório demonstrarem o mesmo efeito em campo, referentes aos agregados (THOMAS et al., 2006).

O método EPC preconizado pela ABNT NBR 15577-6:2008 tem como referência a norma canadense (CSA. A23. 2-14A) e a Americana (ASTM C 1293), e permite a avaliação da potencialidade reativa de um dado agregado frente à RAS, através da variação do comprimento de prismas de concreto.

O agregado graúdo deve possuir dimensão máxima de 19 mm e ser previamente analisado mediante análise petrográfica. O volume de agregado graúdo utilizado neste método representa 70% do volume do concreto no estado compactado seco. Este deve ser graduado nas frações mediante a tabela 6.

Tabela 6 - Frações granulométricas do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISO 3310-1)		Proporção individual em massa
Passante	Retido	
19,0 mm	12,5 mm	1/3
12,5 mm	9,5 mm	1/3
9,5 mm	4,75 mm	1/3

Fonte: NBR 15577-6 (2008).

A relação a/ag utilizada deve ser de $0,45$ em massa. O cimento deve possuir $0,9 \pm 0,1$ % de equivalente alcalino ($\% \text{ Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{ K}_2\text{O}$) e seu consumo de cimento por m^3 de

concreto deve ser de $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$. Com o objetivo de aumentar o equivalente alcalino para um teor de 1,25 % (em massa de cimento), deve ser adicionado NaOH na água de amassamento.

Para realização do ensaio, são confeccionados três corpos de prova prismáticos de concreto de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm. A cura, o armazenamento e a remoção dos moldes dos prismas devem ser feitos de acordo com NBR 9479.

A primeira leitura é feita logo após a desmoldagem dos prismas (após 24 horas em câmara úmida). Em seguida os prismas são armazenados em recipiente especial (que permite umidade relativa de 100 %), permanecendo a uma temperatura de $38 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ durante um ano.

Leituras subsequentes devem ser feitas a 7, 28 e 56 dias, bem como a 3, 6, 9 e 12 meses. Antes de cada leitura, os corpos de prova devem ser retirados do recipiente de armazenamento e depositados em câmara úmida com umidade relativa superior a 95 % por 18 ± 2 horas. A câmara úmida deve ter temperatura de $23 \pm 12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Os resultados são expressos em porcentagem de expansão. Segundo a ABNT NBR 15577-6:2008, expansões a 1 ano iguais ou maiores a 0,04 % indicam o comportamento deletério. Quando inibidores são usados, esse tempo de investigação se prolonga para 2 anos, sendo comprovada a mitigação da reação quando a expansão for menor que 0,04 %.

3.3.6.4 Método Acelerado de Prismas de Concreto (MAPC)

Ranc & Debray (1992) propuseram acelerar a taxa de expansão no EPC pelo aumento da temperatura a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, e com isso, diminuir a duração do ensaio. Fournier et al. (2004), analisando os resultados obtidos por diversas pesquisas que investigaram a RAS referente à RAA no MAPC, perceberam (empiricamente) que existia uma correlação bastante significativa entre os métodos EPC e MAPC aos três meses.

Com os limites e datas definidos, estes pesquisadores propuseram um programa interlaboratorial onde dois agregados de conhecido comportamento pudessem ser testados com o propósito de ser verificada a reprodutibilidade e a repetitividade do MAPC. Através dos resultados obtidos, foi demonstrado que estes dois parâmetros foram atingidos. Ou seja, que o limite de expansão de 0,04 % proposto no EPC, em um ano, equivale aproximadamente a três meses no MAPC.

Touma et al. (2001) propuseram que quando usadas adições inibidoras da RAS, o limite de expansão de 0,04 % de dois anos proposto no EPC seja reduzido a seis meses no MAPC. Embora atualmente existam muitas pesquisas sobre esse método, o ensaio vem se mostrando com bastante potencial, mas ainda não foi normatizado (THOMAS et al., 2006).

3.3.6.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras são analisadas através do MEV, utilizando em conjunto a técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS), para possibilitar uma correlação entre as diversas morfologias características dos produtos encontrados e seus componentes químicos (HASPARYK, 1999). Para Gomes (2005), os métodos de análise qualitativa e semiquantitativa encontram-se disponíveis no sistema EDS e são usualmente utilizados, pois permitem de forma rápida a identificação e determinação da composição dos elementos presentes na amostra.

O gel que é produto da RAA pode ser observado, através do MEV, nas bordas das interfaces pasta/agregado. No entanto, o mesmo também pode ser observado nos poros das amostras, assim como disperso na argamassa, nas interfaces e/ou depositados nas fissuras dos agregados (HASPARYK, 1999). A partir desta análise, pode-se verificar a deterioração da amostra mediante a concentração de produtos, e classificar os vários tipos de géis formados (KIHARA, 1988; KERRICK & HOOTON, 1992).

3.3.6.6 Difração de Raio X (DRX)

A DRX é um tipo de ensaio que permite a identificação de fases cristalinas, as informações sobre a estrutura cristalográfica de amostras de materiais, e permite a quantificação das fases cristalinas e amorfas dos materiais (GOMES, 2005 apud Silva, 2001). Ela também é uma das ferramentas que auxilia na caracterização mineralógica e na determinação da reatividade potencial dos materiais.

CAPÍTULO IV

3.4 A corrosão da Armadura devido a Cloretos

3.4.1 Introdução

Atualmente tem se dado importância a interdependência entre a agressividade do meio e a durabilidade do concreto e da armadura através de normas técnicas e pesquisas científicas. As estruturas em concreto armado localizadas em ambientes agressivos podem sofrer deterioração afetando sua durabilidade. O agente agressivo mais comum é o íon cloreto, o qual é considerado como um dos maiores causadores de corrosão prematura das armaduras das estruturas de concreto, influenciando em sua resistência e estabilidade dimensional.

Nas estruturas de concreto armado a corrosão do aço é de natureza eletroquímica (em meio aquoso), ou seja, o processo físico-químico gerador dos óxidos e hidróxidos de ferro é devido à formação de uma célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre pontos da superfície (PÓLITO, 2006). Na medida em que os óxidos e hidróxidos formados no processo de corrosão ocupam um volume maior que as barras de aço originais há a ocorrência de um fenômeno expansivo no interior do concreto, o que pode levar a tensões elevadas, ocasionando, até, uma desagregação do cobrimento de concreto (Figuras 12 e 13). Também, devido ao processo corrosivo, há uma diminuição 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).



Figura 12 - Corrosão em estruturas executadas com aditivo com cloretos. Fonte: Vaghetti et al. (2002).

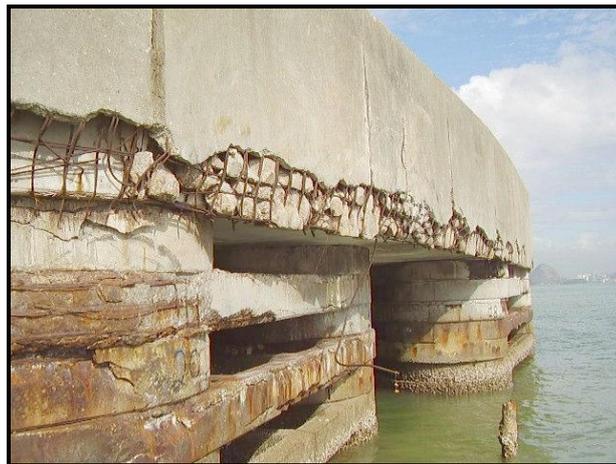


Figura 13 - Estrutura localizada na linha da maré severamente deteriorada. Fonte: Aguiar (2006).

Quando se trata de obras públicas de grande porte, situadas em ambiente marinho ou industrial, o problema é mais grave, pois nem sempre existe um plano de manutenção e conservação destas estruturas, acarretando assim um grande prejuízo econômico. Este prejuízo é devido ao alto custo na manutenção e reparo emergencial, e em alguns casos, a substituição por completo da estrutura. Também há custos indiretos, tais como interrupção, fechamento e risco a segurança da população usuária da obra.

3.4.2 Penetração de Cloretos

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

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

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

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

Dotto (2006) afirma, ainda, que as formas em que os íons cloretos são encontrados no interior do concreto são as seguintes:

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

3.4.3 Mecanismos de Transporte de Cloretos para o Concreto

Helene (1993) relata que os cloretos nocivos ao concreto encontram-se, geralmente, na forma de íons dissolvidos em água, pois quando estes se encontram na forma de cristais têm dimensões muito elevadas, o que impossibilita sua penetração pela rede porosa do concreto. A literatura consultada refere-se tradicionalmente a quatro mecanismos de transporte de fluidos quando se trata de estruturas de concreto, os quais são:

- **Permeabilidade:** que é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão. Esta propriedade caracteriza a facilidade com que um fluido passa através de um sólido poroso quando há uma diferença de pressão (SANTOS, 2006). De acordo com Stanish et al. (1997), se houver um gradiente de pressão na superfície do concreto e houver cloretos disponíveis, estes podem penetrar no concreto por permeabilidade. Entretanto, segundo Cascudo (1997), esse fenômeno é muito raro devido à pressão necessária para que possa ocorrer. Geralmente há o ingresso de cloretos por permeabilidade quando estão dissolvidos em água. Sabe-se que a permeabilidade do concreto está relacionada à sua porosidade e, por conseguinte, é influenciada pelos fatores que alteram o volume e a conectividade dos poros capilares do concreto, como: a relação a/ag, o consumo de cimento, o teor de agregados, o emprego de adições minerais e o grau de hidratação do concreto.

- **Absorção capilar:** é um fenômeno de transporte, devido a uma tensão superficial, no qual os líquidos podem ser transportados pelo concreto via poros capilares. O ingresso de água por absorção capilar depende dos fatores intrínsecos ao fluido, como a sua viscosidade e a sua densidade, da tensão superficial, e de características intrínsecas ao concreto que são a sua estrutura de poros e o seu teor de umidade. Segundo Helene (1993), o fenômeno da absorção não ocorre em concretos saturados. O autor afirma que para ocorrer a absorção de água por capilaridade nos concretos, estes devem estar com seus poros secos ou parcialmente secos. O transporte de íons cloretos pelo mecanismo de absorção capilar é mais significativo em estruturas sujeitas a ciclos de molhagem e secagem, pois quando acontece o umedecimento, os íons dissolvidos na água penetram no concreto (SANTOS, 2000).

- **Difusão:** segundo relatado na literatura (SILVA FILHO, 2004), 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. Este fenômeno é o movimento de substâncias de zonas de elevada

concentração para zonas de baixa concentração (TANG, 1999). Este fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meios líquidos, quanto para aquelas presentes em meio gasoso. De acordo com Delagrave (1996), os íons cloreto normalmente penetram no concreto por capilaridade ou difusão. Mas quando os íons cloretos ultrapassam a camada superficial e alcançam o interior do concreto, a penetração passa a ser por difusão iônica (SCHNEIDER, 2005).

- Migração iônica: é entendida como o processo de transporte que ocorre quando existe uma diferença de potencial elétrico que possibilita o deslocamento dos íons presentes. Assim, o transporte acontece pela ação de campos elétricos que induzem a movimentação dos íons. Nepomuceno (2005) afirma que esse fenômeno pode ocorrer em estruturas suporte de veículos que utilizam corrente elétrica para a sua movimentação, em estruturas de concreto com proteção catódica, por corrente impressa, ou em estruturas submetidas à extração de cloretos; e a realcalinização pela aplicação de uma diferença de potencial.

3.4.4 Influência das Pozolanas na Penetração de Cloretos

A vulnerabilidade de um concreto à ação de qualquer agente agressivo, como o íon cloreto, depende do volume de poros, da distribuição dos tamanhos dos poros e, principalmente da interconexão entre eles. Estas são características que influenciam na penetrabilidade do concreto.

Por isso, usar cimentos compostos e adições minerais provocam um melhoramento das propriedades do concreto com relação à resistência a penetração de cloretos. Isto ocorre porque há um refinamento dos poros do concreto, através da redução de seus tamanhos, da diminuição na interconexão entre eles e da obstrução pelas pequenas partículas de pozolana (efeito físico ou efeito filler), o que dificulta bastante a difusão e ou penetração de qualquer fluido através do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

3.4.5 Influência da Cinza Volante na Penetração de Cloretos

Os efeitos dos produtos das reações pozolânicas foram quantificados por Isaia et al. (2003) que comprovaram a importância para a melhoria da propriedade de transporte de gases, água e agentes dissolvidos, os quais são governados pela porosidade do concreto. A modificação da micro-estrutura do concreto, proporcionada pela presença da pozolana, retarda o tempo para o início do processo de corrosão (DHIR et al., 1994).

Por outro lado, devido ao consumo do CH liberado pelas reações de hidratação do cimento e fixado pelas reações pozolânicas, ocorre uma pequena queda no pH da solução dos poros do concreto com pozolana com a idade devido ao consumo de CH (ZHANG et al., 1996; PANE & HANSEN, 2004). Contudo, os estudos feitos por Shehata et al. (1999) demonstraram que a alcalinidade da solução dos poros do concreto com cinza volante pode variar dependendo da composição química da cinza utilizada. Com o aumento do teor de cálcio (CaO) e de álcalis (K_2O e Na_2O) na composição da cinza volante, ocorre um aumento do pH, e um decréscimo do mesmo, com o aumento no teor de sílica (SiO_2).

O mérito do concreto contendo cinza volante está no aumento da capacidade de fixar íons cloreto (DHIR et al., 1994) e na razão direta do teor de substituição (ARYA et al., 1990), pois se acredita que o gel C-S-H formado pela reação pozolânica teria mais facilidade para reter os íons cloreto.

Por proporcionar o refinamento dos poros dando lugar a uma densa micro-estrutura (MASLEHUDDIN et al., 1987), a presença da cinza volante diminui a permeabilidade a água (ELLIS, 1992) e, conseqüentemente, a difusão dos íons cloreto, tanto para baixos como para altos teores de substituição (DHIR et al., 1993a).

Os concretos de médio desempenho com substituição de 30 % de cinza volante (33 MPa) proporcionaram uma redução de 44 % na concentração de íons cloreto livres na solução dos poros, quando comparados com a concentração deste mesmo íon na solução dos poros dos concretos sem cinza volante e de mesma performance, avaliados depois de um período de cura de 7 dias adicionado de 28 dias imersos em solução com 3,5 % NaCl (HAQUE E KAYYALI, 1995).

Teores de substituição entre 25 e 30 % de cinza volante, após 6 meses de exposição em ambiente com íons cloreto, apresentaram uma redução de 35 % dos íons cloreto solúveis livres na solução dos poros (DHIR et al., 1994). Além disso, substituições de 54 a 58 %

(MALHOTRA, 1990) e de 50 % (ISAIA, 1995) mostraram-se efetivas no controle da permeabilidade aos íons cloreto determinado por meio do ensaio (AASHTO T277-89).

Segundo Dhir et al. (1994), o teor de substituição de cinza volante nos concretos é mais importante do que o nível de resistência mecânica, quando o mesmo se encontra exposto em meio contaminado com íons cloreto. Assim, um concreto com substituição de 50 % de cinza volante e resistência de 20 MPa é mais resistente ao ingresso de íons cloreto do que um sem cinza volante e com resistência de 60 MPa, ambos expostos ao mesmo ambiente contaminado.

3.4.6 Influência da Casca de Arroz na Penetração de Cloretos

Dal Molin (1995) afirma que pozolanas ultrafinas (como sílica ativa e CCA), além do efeito químico, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição, reduzindo significativamente a penetrabilidade e aumentando a resistência mecânica do concreto. A profundidade de penetração dos íons cloreto na matriz dos concretos tem uma relação inversa com a reatividade das pozolanas empregadas no traço e com a quantidade de pozolana presente na mistura (ISAIA, 1996).

Zhang & Malhotra, (1996) e Coutinho (2003) confirmaram que concretos produzidos com substituição parcial de cimento por 10, 15 e 20 % de CCA provocaram um aumento da resistência à penetração de íons cloreto, quando comparados com concretos sem esta pozolana.

Saciloto (2005) investigou a penetração de cloretos em concretos com adição de diferentes tipos de pozolanas, dentre elas a CCA, que foi estudada nos teores de 10, 20 e 30 %, nas relações a/ag de 0,35; 0,50 e 0,65 e nos períodos de cura de 3, 7 e 28 dias. O coeficiente de penetração de cloretos (K') reduziu quando o teor de CCA aumentou de 0 para 10 %; o valor de K' aumentou quando o teor de CCA passou de 10 para 20 %; e o valor de K' voltou a reduzir quando teor de CCA passou de 20 para 30 %. Com isso o estudo concluiu que a CCA proporciona uma melhoria no comportamento dos concretos frente à penetração de cloretos.

Dotto (2006) verificou que embora as adições minerais pozolânica, principalmente a CCA, empregadas em seu estudo não tenham aumentando a resistência mecânica dos concretos devido a sua baixa qualidade (pequena superfície específica, grande diâmetro médio,

baixo índice de pozolanicidade), não se pode ignorar que tiveram um efeito benéfico quando aplicadas nos concretos com baixas relações a/ag, pois proporcionaram concretos viáveis sob o ponto de vista da sustentabilidade. Além disso, os concretos com cinza volante, com CCA e com baixas relações a/ag, mostraram-se eficientes no controle do tempo de iniciação do processo de corrosão ativa no aço embutido nos mesmos, quando induzido pelos íons cloreto oriundo dos ciclos de imersão e secagem.

Cesar (2011) investigou concretos com a substituição parcial do aglomerante (CPII-Z adicionado de 20 % de cinza volante) por 15 % de CCA residual natural ou moída pelo ensaio acelerado de penetração de cloretos. O autor identificou que as misturas com CCA moída apresentaram menor penetrabilidade aos íons cloretos, e que as demais misturas com CCA natural obtiveram resultados semelhantes à mistura de referencia, ou seja, moderado. Porém a mistura de CCA natural com relação a/ag de 0,65 e cura úmida de 7 dias apresentou penetrabilidade superior as demais misturas.

3.4.7 Ensaio de Penetração de Cloretos por Imersão (EPCI)

A difusividade dos cloretos é uma importante característica do concreto que afeta a durabilidade da estrutura. Esta propriedade pode ser determinada pela imersão do concreto em soluções salinas (normalmente com concentrações de NaCl semelhantes as encontradas nas águas marinhas).

Dentre os ensaios que fazem uso desta técnica estão:

- *AASHTO T 259: Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (Salt Ponding Test)*: após determinados os prazos de cura e pré-condicionamentos, as amostras (> 75 mm de espessura) tem uma das suas faces expostas por 90 dias a uma solução de 3 % de NaCl, e após, é medida a concentração de cloretos em cada fatia de 0,5 polegadas (1,27 cm).

- *Bulk Diffusion Test (NordTest NTBuild 443)*: é um ensaio semelhante ao AASHTO T 259, com algumas modificações. Uma dessas modificações é que antes de ser colocado em contato com a solução de cloretos, a amostra é saturada com água de cal, para evitar uma sorção inicial (STANISH, 1997), além de serem seladas as laterais e uma das faces, deixando a outra em contato com uma solução 2,8 M NaCl.

- *Soaking Test* (EPCI – Ensaio de penetração de cloretos por imersão): também é um ensaio baseado na AASHTO T 259, relatado por Wee et al. (2000). As amostras são submetidas a determinados tempos de cura, e após, imersas em solução de NaCl (com concentração de Cl^- de 19,38 ppm). Nos prazos determinados (até 90 dias) os corpos de prova são retirados do tanque e aspergidos com uma solução de nitrato de prata (AgNO_3), determinando a profundidade de penetração dos íons cloretos.

Na presente dissertação foi utilizado o EPCI para a avaliação da penetração dos íons cloretos, pois ele apresenta uma situação próxima da real. Este método tem por finalidade investigar a resistência do concreto com diferentes tipos de aglomerantes e traços frente à penetração de cloretos, a fim de compará-los. Esse ensaio tenta simular em laboratório o fenômeno que ocorre principalmente em estruturas marinhas, obtendo assim informações sobre traços que proporcionam melhor desempenho em estruturas frente a esse ataque.

A metodologia deste ensaio caracteriza-se pela preparação de corpos de prova, que após completarem seu período de cura, são imersos em um tanque com solução saturada na proporção de 31,94 g de NaCl para cada litro de água destilada. Nas idades adotadas para o ensaio (0, 7, 14, 28, 56, 91 dias) estes corpos de prova são retirados do tanque e rompidos por compressão diametral. Após essa ruptura, é aspergida a solução de nitrato de prata (17 g de AgNO_3 para cada litro de água deionizada), tornando visível a região de penetração de íons cloretos após a secagem da solução sobre a face rompida.

De acordo com Otsuki, Nagataki & Nakashita (1992), a profundidade de penetração de cloretos é claramente indicada por um limite de mudança de cor. A solução de AgNO_3 reage preferencialmente com os cloretos livres presentes na matriz cimentícia endurecida, e forma uma precipitação branca de cloreto de prata (AgCl); em profundidades maiores, onde não há cloretos livres, o AgNO_3 reage com os hidróxidos e forma uma precipitação marrom de óxido de prata (Ag_2O). A coloração esbranquiçada é percebida nos locais onde a concentração de íons cloretos livres é superior a 0,15 % do peso de cimento. As características das soluções de NaCl e de AgNO_3 estão em conformidade com o método utilizado por Wee, Suryavanshi & Tin (2000). Devido a essa diferença na coloração é possível obter a média de penetração nos corpos de prova em cada data do ensaio.

De posse destas médias é possível proceder com a investigação. A análise inicial dos dados, quanto ao EPCI, é realizada com base no coeficiente angular da equação de regressão linear, propostas por Bakker et al. (1988) e Wee et al. (2000), chamado coeficiente de penetração. A partir do gráfico (profundidade de penetração $\times \sqrt{\text{tempo}}$), é obtida a equação de regressão (Equação 6), correspondente a linha reta de tendência traçada entre os pontos

obtidos (profundidades médias de penetração para cada uma das 6 idades) em cada mistura investigada.

$$y = K' x + a \quad (6)$$

A partir da equação é obtido o coeficiente de penetração por imersão (K') e do gráfico é obtido o seu coeficiente de determinação (R^2). Onde y é a profundidade média de penetração no corpo de prova (mm); a é o ponto de intersecção da reta com o eixo y e x é o tempo em que o corpo de prova permaneceu imerso até a data do ensaio, em raiz de semanas.

CAPÍTULO V

4 MÉTODO EXPERIMENTAL

Primeiramente, este trabalho investigou, através de ensaios laboratoriais, o comportamento quanto à durabilidade de misturas em argamassa e concreto contendo CCA natural em substituição parcial aos cimentos Portland, frente à RAS. Em continuidade ao tema da durabilidade, também foi investigada a resistência a penetração de cloretos em concretos contendo CCA natural em substituição ao aglomerante. Para efeito comparativo tanto no ensaio de RAS quanto no ensaio de cloretos também se utilizou CCA moída em substituição ao aglomerante.

O protocolo experimental adotado descrito a seguir se divide em três fases intituladas: Fase 1 (ensaio acelerado em barras de argamassa e microscopia), Fase 2 (ensaios em Prismas de Concreto) e Fase 3 (ensaio em concreto de penetração de cloretos). As fases 1 e 2 são referentes à RAS e a fase 3 se refere a penetração de cloretos por imersão.

4.1 Materiais

4.1.1 Aglomerantes e Adições

Os Aglomerantes e Adições utilizados no protocolo experimental foram:

- a) Aglomerantes hidráulicos: cimento-padrão segundo ABNT NBR 5732/5733 (1991), ABNT NBR NM 76 (1980), ABNT NBR NM 17 (2004) e ASTM C 151 (1997); CPII-Z-32 (Votorantim, Brasil); CPIII (CSN, Brasil) e CPIV (Cimpor, Brasil);
- b) Adição mineral: cinza volante proveniente da usina termoeétrica de Candiota, RS;
- c) CCA natural: obtida através de uma pré-moagem feita diretamente na betoneira por 15 minutos com os agregados que fariam parte do traço em concreto. O processo de

simulação do traço em concreto para obter essa CCA natural está descrito no item que descreve os agregados;

d) CCA moída: obtida através da moagem por uma hora de CCA em um moinho de bolas de aço. Em pesquisas anteriores do GEPECON verificou-se que um maior tempo na moagem melhorava suas as características pozolânicas. Apesar desse fato, essa melhoria não compensava o gasto energético empregado nesse processo.

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

Os ensaios realizados na caracterização dos aglomerantes foram os seguintes:

- NBR NM 23/01 Cimento Portland – Determinação da massa específica.
- NBR NM 76/98 Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método blaine).
- NBR 146556/01 Cimento Portland e Matérias Primas – Análise Química por Espectometria de Raios X.
- NBR NM 22/04 Cimento Portland com adições de materiais pozolânico – Análise Química

As propriedades físicas e químicas dos cimentos, cinza volante, CCA moída e CCA natural estão resumidas nas tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 - Caracterização física dos cimentos, cinza volante e CCA.

Composição Química	Cimento Padrão	CPIIZ	CPIII	CPIV	CCA natural	CCA moída	Cinza Volante
Massa específica (g/cm ³)	3,09	2,96	2,95	2,68	1,96	2,09	1,96
Área específica (cm ² /g)	4920	5240	4190	4940	4441	4501	2310
Dimensão média (µm)	-	7,70	9,30	8,18	33,19	15,54	41,32
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	-	0,97	1,01	1,06	5,19	2,38	4,98
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)	-	27,52	26,40	25,59	80,51	54,14	261,14
Expansibilidade em autoclave (%)	0,02	-	-	-	-	-	-

(-) não determinado.

Tabela 8 - Análise química dos cimentos, cinza volante e CCA.

Composição Química	Cimento Padrão	CPIIZ	CPIII	CPIV	Cinza Volante	CCA natural	CCA moída
CaO	-	50,84	54,95	34,18	2,85	1,25	1,32
SiO ₂	-	21,92	23,97	35,37	67,08	95,04	94,84
Al ₂ O ₃	-	6,33	7,66	10,17	21,29	0,00	0,39
Fe ₂ O ₃	-	3,27	2,13	5,17	4,44	0,44	0,54
SO ₃	-	2,53	1,39	2,04	0,14	0,01	0,01
MgO	-	5,70	3,10	4,30	0,87	0,45	0,40
K ₂ O	0,87	1,17	0,43	1,67	2,05	1,40	1,45
TiO ₂	-	0,26	0,37	0,51	-	-	-
Na ₂ O	0,32	0,16	0,14	0,16	0,40	0,09	0,11
SrO	-	0,10	0,19	0,06	-	-	-
P ₂ O ₅	-	0,09	0,07	0,10	-	-	-
MnO	-	0,10	0,34	0,14	-	-	-
PF	-	5,46	4,02	4,45	0,60	-	-
Total	-	97,93	98,76	98,32	99,72	-	-
Resíduo insolúvel	-	10,42	0,53	41,80	-	-	-
CaO livre	-	2,00	2,35	1,43	-	-	-

(-) não determinado; (PF) perda ao fogo; Os teores de cada constituinte estão apresentados em % de massa.

A figura 14 apresenta os difratogramas das CCA natural (Figura 14 A) e moída (Figura 14 B), porém com alguns picos cristalinos de Quartzo (Q) e Cristobalita (C) em destaque, resultado de uma queima não controlada da casca de arroz. Acredita-se que o maior pico de quartzo no ângulo 26,642° presente no difratograma da CCA natural (Figura 14 A) se deva a contaminação no processo de pré-moagem com agregados. A análise de DRX da CCA natural e moída foi realizada no Laboratório de Física da UFSM.

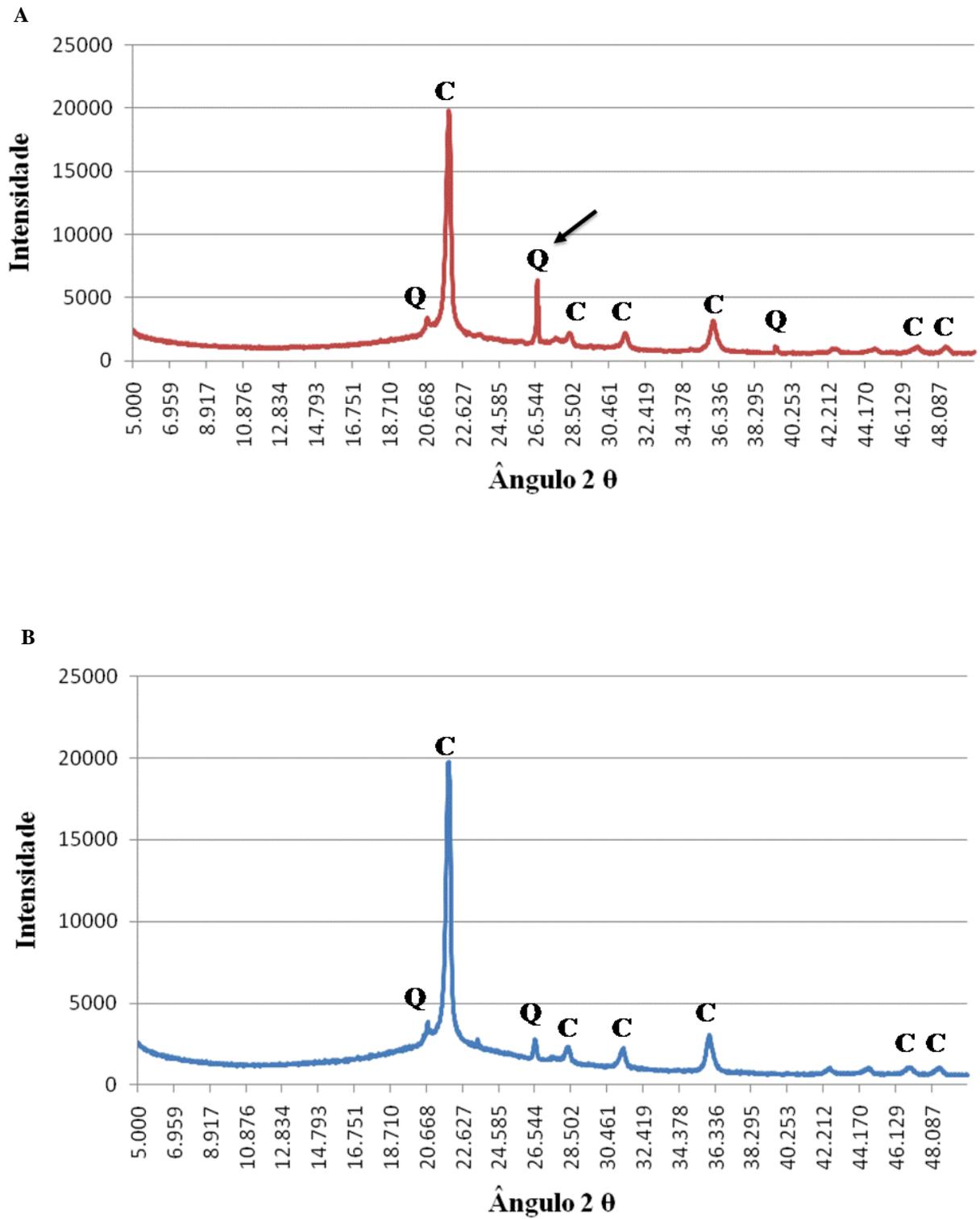


Figura 14 – DR-X da CCA natural (A) e moída (B).

A caracterização da CCA natural e moída que determinou seus índices de atividade pozolânica (IAP) foi feita através do método proposto por Isaia (1995). As convenções adotadas para o ensaio de pozolânicidade estão representadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Convenções ensaio de pozolânicidade.

Misturas	Composição
CP	100 % Cimento Portland
N15	85 % Cimento Portland + 15 % CCA natural
M15	85 % Cimento Portland + 15 % CCA moída

Através do gráfico do ensaio Fratini mediu-se a distância “d”, que é a reta que une a origem dos eixos até o ponto em questão, e a partir desta, calculou-se o IAP em porcentagem (Tabela 10).

Tabela 10 - Índice de atividade Pozolânica.

Misturas	Atividade Pozolanica		Distância (“d”cm)	IAP¹
	mmol CaO/l	mmol OH⁻/l		
CP	8	59	6,8	14,7
N15	9	48	6,0	16,7
M15	6	43	5,2	19,2

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

Os resultados demonstram um aumento da pozolanicidade da CCA em relação ao cimento Portland, e também que a CCA moída tem o maior IAP.

4.1.2 Agregados

Os agregados miúdos utilizados na pesquisa foram: areia normal brasileira segundo NBR 7214 (1982) procedente do IPT São Paulo e a areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria, RS. A areia de Santa Maria foi lavada, seca em estufa, peneirada na peneira com malha 4,8 mm e armazenadas em cubas de alvenaria devidamente tampadas.

O agregado graúdo utilizado foi à pedra britada de rocha diabásica, proveniente do município de Itaara, RS. Procederam-se neste, o peneiramento na peneira de abertura 19mm e a lavagem na peneira de abertura 6,3mm para eliminar possíveis impurezas que de alguma forma pudessem influenciar nas propriedades do concreto. Posteriormente, a pedra foi seca em estufa e estocada em cubas, semelhante ao procedimento adotado para a areia.

A tabela 11 apresenta as características físicas dos agregados. Foi realizado um estudo de composição granulométrica do agregado graúdo e do agregado miúdo que possibilitasse uma granulometria mais fechada possível. As porcentagens ótimas obtidas foram de 50 % de agregado A + 50 % de agregado B, tanto para a areia quanto para a pedra (Tabela 11).

Tabela 11 - Características dos agregados usados neste trabalho.

Agregados	Modulo de finura	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária solta (g/cm³)	Massa unitária compactada (g/cm³)
Areia fina A	1,97	2,64	1,62	1,73
Areia grossa B	2,09	2,63	1,68	1,77
Areia 50 % de cada	-	2,635	1,65	1,78
Brita 0	5,85	2,52	1,39	1,43
Brita 1	6,9	2,54	1,40	1,48
Brita 50 % de cada	-	2,53	1,45	1,52

Os ensaios realizados na caracterização dos agregados foram os seguintes:

- NBR 7211/2005: Agregado miúdo – Determinação de massa específica;

- NBR NM 52/2003: Agregado miúdo – Determinação de massa específica;
- NBR NM 53/2003: Agregado graúdo – Determinação de massa específica;
- NBR NM 45/2006: Agregados – Determinação da massa unitária;

A CCA natural utilizada no ensaio em argamassa foi obtida no laboratório através de um processo de simulação do traço utilizado em concreto.

Nessa simulação a quantidade de CCA adicionada na betoneira equivale aos 15 % de substituição ao cimento. A sequência do processo foi:

1º - As britas 0 e 1 foram colocadas, 50 % de cada, junto com a CCA na betoneira. A CCA foi moída por 5 min;

2º - As areias fina e média, 50 % de cada, previamente peneiradas numa malha de 0,149 mm (Tyler 100), foram adicionadas à CCA e às britas na betoneira. Neste segundo processo, a CCA foi moída por mais 10 min;

3º - Após o término do tempo total de 15 min, esses materiais foram retirados da betoneira. Eles foram peneirados para se obter somente a CCA passante na malha de 0,074mm (Tyler 200). As areias que passaram por esse processo estão mostradas na figura 15.



Figura 15 - Areia limpa (A), areia após peneiramento (B) e areia com CCA moída (C)

4.1.3 Aditivo Redutor de Água

Nas misturas, tanto em concreto quanto em argamassa, foi empregado, quando necessário, um aditivo tipo superplastificante a base de policarboxilatos, com teor de cloretos < 0,1 %. O aditivo superplastificante adotado foi o Power flow 1059 fabricado pela indústria MC-bauchemie.

O anexo A ilustra através de documentos fotográficos os materiais usadas na pesquisa.

4.2 Protocolo Experimental

4.2.1 Fase 1 – Ensaio Acelerado em Barras de Argamassa

Este programa experimental teve como objetivo investigar o mecanismo da RAS nas misturas de cimento padrão com CCA natural e moída. Além disso, outro objetivo foi verificar o efeito da substituição parcial das CCA nos cimentos Portland CPII-Z, CPIII e CPIV, assim como a substituição adicional de parte do cimento CPII-Z por cinza volante no controle das expansões geradas em argamassas.

Os materiais empregados nesta fase foram:

- a) Agregado: areia normal e areia local silicosa;
- b) Aglomerantes hidráulicos: cimento-padrão, CPII-Z-32 e CPIV;
- c) Adição mineral: cinza volante; CCA natural obtida na simulação de pré-moagem e CCA moída;
- d) aditivo: superplastificante.

Os ensaios laboratoriais da fase 1 envolveram investigações com as misturas através do método acelerado em barras de argamassa conforme as ABNT NBR 15577-4/5:2008. Nesta fase, foram realizadas investigações na microestrutura dos compostos formados pela RAS através da MEV, EDS e DRX.

Os traços investigados no presente estudo estão relacionados abaixo, onde 27 traços foram investigados:

- Com 100 % de cimento padrão para teste de expansão da areia (ABNT NBR 15577-4:2008), e com 15 % de substituição de cimento por CCA natural ou moída (3 traços).
- Com 100 % de cimento CPII-Z para mitigação das reações de expansão (ABNT NBR 15577-5: 2008) e com substituição de 15 % de cimento por CCA natural ou moída, acrescidas de substituições de 10, 15, 20, 30 e 40 % de cimento por cinza volante (18 traços).
- Com 100 % de CPIII para mitigação das reações de expansão (ABNT NBR 15577-5: 2008) e com substituição de 15 % de cimento por CCA natural ou moída (3 traços).
- Com 100 % de CPIV para mitigação das reações de expansão (ABNT NBR 15577-5:2008) e com substituição de 15 % de cimento por CCA natural ou moída (3 traços).

Os traços somente com cimento padrão, CPII-Z, CPIII e CPIV (0 % de substituição) são de referência e funcionaram como controle das reações. Esses traços controle foram utilizados na comparação do efeito das adições das CCA frente à RAS. Primeiramente, foi investigada a possível reatividade das adições da CCA natural ou moída, somente utilizando cimento padrão normalizado. A metodologia foi realizada conforme a ABNT NBR 15577-4: 2008 e foi comparada à expansão limite proposta pela ABNT NBR 15577-1:2008 para agregados.

O fluxograma apresentado na figura 16 detalha as diversas variáveis empregadas no protocolo experimental para o estudo com cimento padrão.

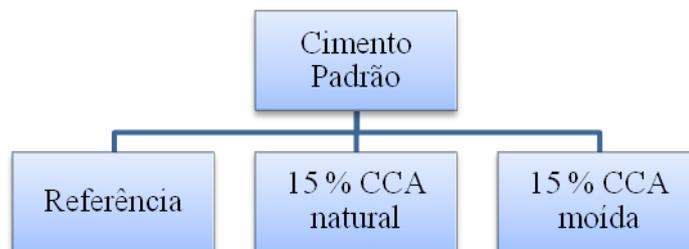


Figura 16 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o estudo com cimento padrão.

De acordo com a figura 16, as variáveis estudadas foram:

- Cimento: Padrão;
- Adição mineral: dois tipos, CCA natural e CCA moída;
- Teor de adição: 15 % CCA.

As investigações das misturas com o intuito de mitigar à RAS gerada pelas CCA foram realizadas conforme a ABNT NBR 15577-5:2008 e comparadas à expansão limite proposta pela ABNT NBR 15577-1:2008 para agregados. Os fluxogramas a seguir representaram as diversas misturas e variáveis empregadas.

O fluxograma apresentado na figura 17 detalha as diversas variáveis empregadas no protocolo experimental para o CII-Z.

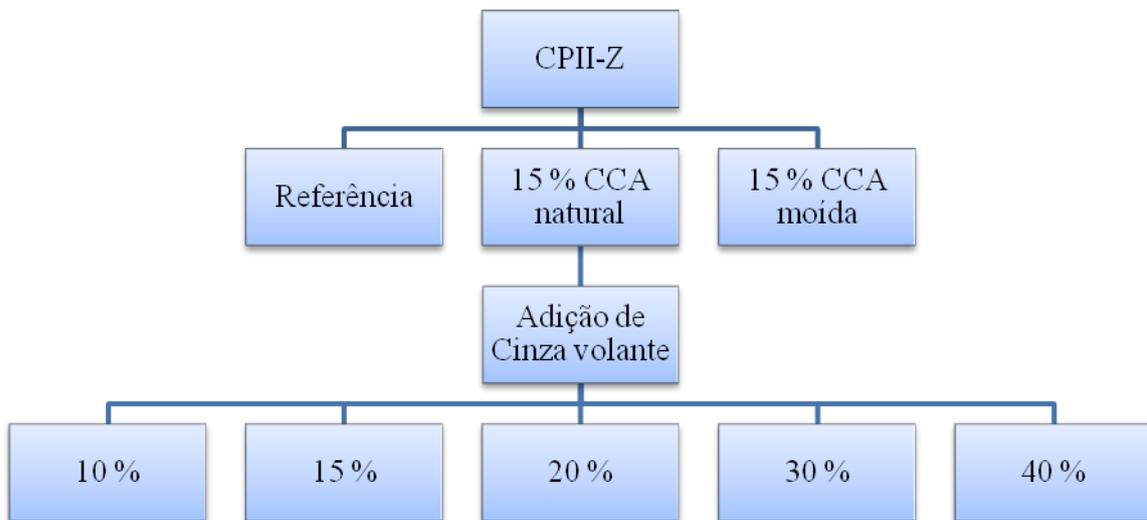


Figura 17 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CII-Z.

De acordo com a figura 17, as variáveis estudadas foram:

- Cimento: CII-Z;
- Adição mineral: três tipos, CCA natural, CCA moída e a cinza volante;
- Teor de adição: percentagens 10, 15, 20, 30 e 40 % de cinza volante e 15 % CCA natural ou moída.

As barras de argamassa que foram moldadas conforme as misturas binárias supracitadas tiveram o teor de substituição da adição em cima do valor total do teor do cimento. Portanto, a mistura com 15 % de CCA e 10 % de cinza volante é constituída de um teor de 75 % de cimento, as demais misturas binárias seguem este modelo.

O fluxograma apresentado na figura 18 detalha as diversas variáveis empregadas no protocolo experimental para o CIII.

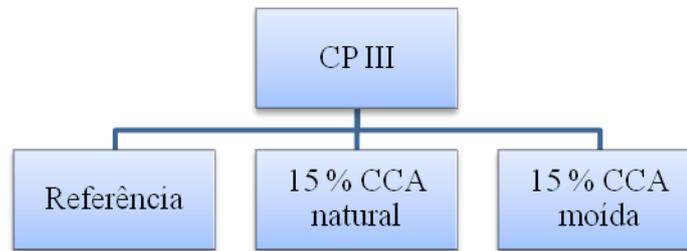


Figura 18 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CPIII.

De acordo com a figura 18, as variáveis estudadas foram:

- Cimento: CPIII;
- Adição mineral: dois tipos, CCA natural e CCA moída;
- Teor de adição: 15 % CCA.

O fluxograma apresentado na figura 19 detalha as diversas variáveis empregadas no protocolo experimental para o CPIV.

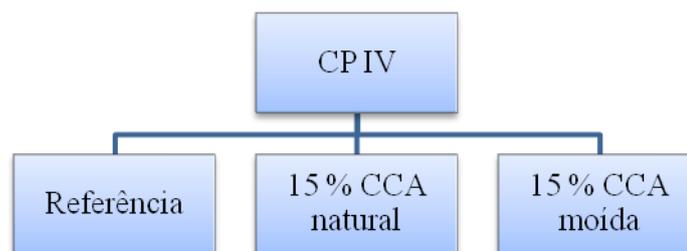


Figura 19 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CPIV.

De acordo com a figura 19, as variáveis estudadas foram:

- Cimento: CPIV;
- Adição mineral: dois tipos, CCA natural e CCA moída;
- Teor de adição: 15 % CCA.

Os parâmetros deste ensaio foram executados conforme as ABNT NBR-4/5:2008, sendo a dosagem da argamassa realizada em relação à massa de aglomerante, inclusive a do

aditivo superplastificante, quando necessária. A consistência da argamassa foi obtida conforme ensaio normalizado ABNT NBR 7215:1991.

Foram moldados três corpos de prova (CP) para cada um dos 27 traços. Portanto, o protocolo experimental contou com um total de 81 barras de argamassa. Dos CP submetidos à expansão, foram retiradas amostras de cada traço para análise através de MEV, EDS e DRX.

O anexo B ilustra através de documentos fotográficos as etapas do ensaio em barras de argamassa frente à RAS.

4.2.1.1 Ensaios MEV, EDS e DRX

As amostras coletadas das barras de argamassa para os ensaios de MEV, EDS e DRX foram preparadas conforme apresentado abaixo. Todas elas tiveram suas reações paralisadas com o uso de álcool 100 volumes, ficando imersas durante 2 horas. Após esse período de imersão, essas amostras foram colocadas em estufa a 45 °C durante 24 horas para secar.

As amostras para a MEV e, conseqüentemente, para o EDS foram obtidas pela fratura da parte central da barra. Essas barras apresentavam forma cúbica de aproximadamente 1 x 1 x 1 cm. A figura 20 mostra a amostras coletadas.



Figura 20 - Material coletado para análise da MEV e ED-S.

Para as amostras a serem investigadas na análise de DRX, foram pulverizadas por meio de uma furadeira de bancada e em seguida peneiradas na peneira com abertura de malha de 75 μm (ABNT nº 200). O equipamento utilizado na investigação da DRX foi o *D 8 Advance Bruker AXS*, radiação $\text{CuK}\alpha$, geometria do Goniômetro do tipo $\theta - 2\theta$ Bragg – Brentano, incremento: passo de 0,02 (2θ) e tempo de coleta 1 segundo por passo. A figura 21 mostra a amostras coletadas.



Figura 21 - Material coletado para análise de DR-X.

No anexo C está representada uma tabela com os períodos em que ocorreram as coletas das amostras.

O anexo D ilustra através de documentos fotográficos os ensaios de MEV e DR-X.

4.2.2 Fase 2 – Ensaio normal e acelerado em prismas de concreto

Uma vez encontrados os cimentos e/ou teores de cinza volante que mitigaram a RAS no ensaio acelerado em argamassa, foi dado início a segunda fase, relacionada aos ensaios em prismas de concreto.

Os materiais empregados nesta fase foram:

- a) Agregado graúdo: brita local basalto;
- b) Agregado miúdo: areia local silicosa;

- c) Aglomerantes hidráulicos: CII-Z-32 e cimento-padrão;
- d) Adição mineral: Cinza volante, CCA ao natural e moída;
- e) Aditivo: superplastificante

Nesta fase foram empregados os métodos de Ensaio de Prismas de Concreto (EPC) (ABNT NBR 15577-6: 2008) e o acelerado baseado no EAPC conforme o método proposto por Touma et al. (2001) e Fournier et al. (2004). O procedimento operacional destes dois ensaios são iguais, a mudança encontra-se na redução do tempo de investigação passando de 1 e 2 anos para 3 e 6 meses, devido ao aumento da temperatura de 38 °C para 60 °C, respectivamente. Estes dois ensaios foram realizados simultaneamente porque o ensaio EAPC ainda não foi normalizado, embora seja bastante aceito no meio acadêmico.

Nesta etapa foram verificados os traços com cimento padrão e os traços das misturas de CII-Z com CCA natural acrescidos da adição de 0, 10 e 15 % de cinza volante. Esses dois métodos foram realizados juntos a fim de verificar a correlação de seus resultados.

Os traços investigados estão apresentados abaixo:

- Com 100 % de cimento-padrão para teste de expansão dos agregados ABNT NBR 15577-6:2008: 1 traço.
- Com substituição parcial de 15 % de cimento CII-Z por CCA natural, acrescidas de substituições de 0, 10 e 15 % de cinza volante para mitigação das reações de expansão ABNT NBR 15577-6:2008: 3 traços.

Três CP foram moldados para cada um dos 4 traços totalizando 12 CP.

Essa primeira análise com cimento padrão foi necessária para conhecer o potencial reativo dos agregados locais utilizados frente ao ensaio em prismas de concreto.

Baseado nos ensaios em argamassa, os ensaios em concreto foram realizados para verificar se realmente essas misturas não atingem o limite máximo de expansão proposto por norma, porque segundo a ABNT NBR 15577-1:2008 os resultados obtidos pelo ensaio em concreto (ABNT NBR 15577-6:2008) prevalecem sobre os resultados obtidos pelo ensaio em argamassa (ABNT NBR 15577-4/5:2008).

O Anexo E ilustra através de documentos fotográficos as etapas do ensaio em prismas de concreto frente à RAS.

O fluxograma apresentado na figura 22 detalha as diversas variáveis empregadas no protocolo experimental para o cimento CII-Z.

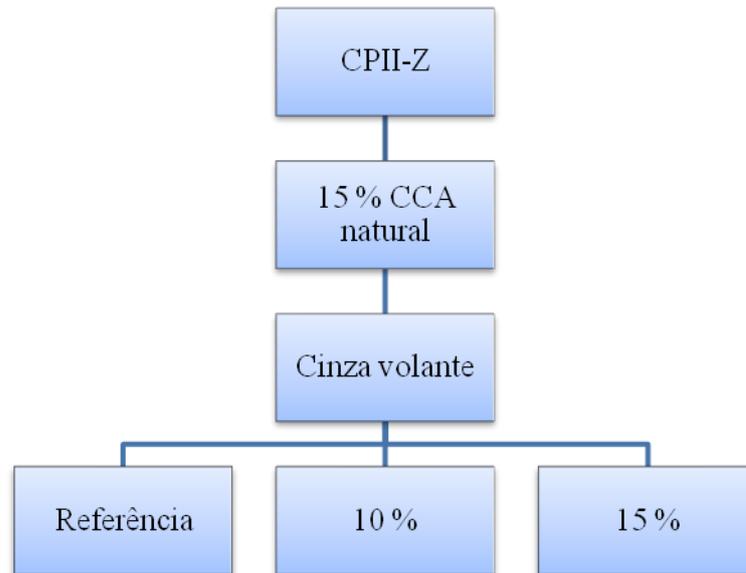


Figura 22 - Fluxograma das variáveis de ensaio do protocolo experimental para o CII-Z.

De acordo com a figura 22 as variáveis estudadas foram:

- Cimento: CII-Z;
- Adição mineral: dois tipos, CCA natural e cinza volante;
- Teor de adição: 15 % CCA natural e 10 e 15 % cinza volante.

Os prismas de concreto que foram moldadas conforme as misturas binárias supracitadas tiveram o teor de substituição da CCA em cima do valor total do teor de aglomerante (cimento + cinza volante).

4.2.2.1 Procedimentos de dosagem ensaio EPC e EAPC

Os procedimentos de dosagem dos traços utilizados nos ensaios CPT a 38 °C e ACPT a 60 °C em prismas de concreto são os mesmos, e estão descritos abaixo.

Dimensão dos moldes: 75 x 75 x 285 mm

- Volume = 0,0016 m³
- Total do volume de 3 moldes = 0,00481 m³

As determinações da norma ABNT NBR 15577-6: 2008 são:

- a) Consumo de cimento = 420 ±10 kg/m³
- b) a/ag = 0,45

- c) volume de agregado graúdo compactado $70 \pm 0,2\%$
- d) teor de argamassa $50 \pm 3\%$

O procedimento adotado para obter o volume do agregado graúdo compactado seco igual a $70 \pm 0,2\%$ do volume total do concreto conforme especificação da norma procedeu-se da seguinte forma:

- Os agregados graúdos foram colocados no próprio molde prismático e compactados. Após sua compactação obteve-se o peso desse material correspondente ao volume do prisma.

- Volume do prisma = $0,0016 \text{ m}^3$, peso total das britas compactadas = 2,52 kg

A partir desse procedimento encontrou-se a massa unitária compactada para este caso específico foi:

- Massa unitária compactada das britas = 1575 kg/m^3

Sendo o volume total de concreto igual ao volume total do prisma, encontrou-se 70 % desse valor.

- Volume de 70 % do prisma = $0,00112 \text{ m}^3$, que corresponde ao peso = 1,764 kg de britas compactadas

Pelo consumo fixo de cimento, encontra-se o traço unitário da brita que será adotado em todas as misturas investigadas.

- Consumo de cimento = $420 \text{ kg/m}^3 \times 0,0016 \text{ m}^3 = 0,672 \text{ kg}$
- Traço unitário brita = $1,764/0,672 = 2,625$

4.2.2.1.1 Determinação dos traços de cada mistura para análise no EPC e EAPC:

I. Cimento padrão:

Através das massas específicas dos materiais e com o auxílio da fórmula do consumo de cimento (Equação 7), se obtém o traço unitário para a areia.

$$C = \frac{100}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/aglo} \quad (7)$$

Onde **a** é relação agregado miúdo seco/cimento, em massa (kg/kg); **p** é relação agregados graúdos secos/cimento, em massa (kg/kg); **C** é consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³); **γ** é a massa específica dos materiais.

Através da equação 8, esta foi preenchida com os valores do presente ensaio (Equação 8).

$$420 = \frac{1000}{\frac{1}{3,09} + \frac{a}{2,615} + \frac{2,625}{2,520} + 0,45} \quad (8)$$

- Resultado: traço unitário areia (a) = 1,45

Com os traços unitários pré-estabelecidos, obtém-se o traço em peso para fazer a conferencia do teor de argamassa da mistura (Equação 9).

$$Arg = \frac{1+a}{1+m} * 100 \quad (9)$$

Onde **a** corresponde a quantidade de areia na mistura em massa = 0,672 x 1,45 = 0,9744 kg; e **m** corresponde a quantidade de areia mais brita em massa = 0,9744 + 1,764 kg.

Através da equação 9, esta foi preenchida com os valores do presente ensaio (Equação 10).

$$Arg = \frac{1+0,9744}{1+0,9744+1,764} * 100 \quad (10)$$

Com equação 10 pode-se obter o seguinte resultado: teor de argamassa = 52,8 %, estando de acordo com as exigências da norma.

Através do procedimento acima descrito obteve-se o seguinte traço unitário adotado para o cimento padrão: 1; 1,45 e 2,625.

Abaixo está descrito o cálculo para determinar a quantidade do reagente NaOH adicionado na água de amassamento:

- Consumo de cimento = 420 kg/m^3
- Quantidade de álcalis no concreto = $420 \text{ kg/m}^3 \times 0,89 \% = 3,74 \text{ kg/m}^3$
- Quantidade de álcalis específica para o concreto = $420 \text{ kg/m}^3 \times 1,25 \% = 5,25 \text{ kg/m}^3$
- Quantidade de álcalis a ser adicionado no concreto = $5,25 - 3,74 = 1,51 \text{ kg/m}^3$

O fator de conversão de Na_2O para NaOH foi:

- Na_2O , peso molecular = $61,98 \text{ mol/g}$
- NaOH , peso molecular = $39,997 \text{ mol/g}$
- Fator de conversão = $2 \times 39,997/61,98 = 1,291$
- Quantidade de NaOH necessário = $1,51 \times 1,291 = 1,95 \text{ kg/m}^3$

O cálculo da quantidade de materiais utilizados na confecção do traço medido em peso foi:

- Cimento = $420 \text{ kg/m}^3 \times 0,00481 = 2,02 \text{ kg}$
- Areia = $2,02 \times 1,45 = 2,93 \text{ kg}$
- Brita = $2,02 \times 2,625 = 5,30 \text{ kg}$
- Água = $2,02 \times 0,45 = 0,909 \text{ kg}$
- NaOH = $1,95 \times 0,00481 = 0,00938 \text{ kg} = 9,38\text{g}$

As demais misturas seguem os mesmos procedimentos de dosagem.

4.2.3 Fase 3 – Ensaio de Penetração de cloretos

No EPCI foi investigada a viabilidade de utilizar a CCA natural ou moída em concretos estruturais, em substituição parcial ao cimento Portland, a partir da análise da durabilidade por meio do ensaio de penetração de íons cloretos.

Os materiais empregados nesta fase foram:

- a) Agregado graúdo: brita local basalto;
- b) Agregado miúdo: areia local silicosa;
- c) Aglomerantes hidráulicos: CII-Z-32;
- d) Adição mineral: Cinza volante, CCA ao natural e moída;
- e) Aditivo: superplastificante.

Seguindo a descrição da metodologia deste ensaio apresentada na revisão bibliográfica optou-se pelo tempo de cura em câmara úmida de 7 dias. Sendo o objetivo dessa pesquisa

investigar a influência das adições minerais e não a influência do tempo de cura no desenvolvimento da resistência a penetração de íons cloreto no concreto, optou-se por este tempo de cura reduzido, suficiente para que ele adquira suas características iniciais. Primeiramente, foram moldados os CP cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm, que serrados ao meio geraram 2 fatias de 10 x 10 cm. Em seguida, duas das três faces dos CP foram impermeabilizadas com três demãos de verniz poliuretânico, permitindo assim que ocorresse penetração de íons cloretos somente em uma das faces (10 cm de diâmetro). A face exposta ao ambiente agressivo do ensaio foi a de corte. Após a preparação, as fatias foram colocadas em um reservatório com solução salina, onde ficaram totalmente imersas até o dia de suas leituras. Os períodos avaliados foram de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Ao completar cada uma dessas idades, três fatias foram retiradas do reservatório, lavadas com água potável e rompidas na direção de penetração dos íons cloretos. Em seguida, foi aspergido solução de AgNO_3 para a percepção visual da região de penetração de íons cloretos. Após a secagem da solução sobre a face rompida, foi realizado o registro fotográfico com máquina digital.

Através de inserção da fotografia digitalizada no programa computacional *AutoCAD*, foi possível colocar a imagem em escala e sobre ela traçar um contorno ao redor da região penetrada por íons cloretos. Esta região foi dividida por linhas paralelas traçadas ao longo da profundidade de penetração e espaçadas 1 mm uma da outra. Através de uma rotina chamada *COTA*, foi medido o comprimento de cada uma dessas linhas. Essa rotina gerou automaticamente um arquivo em formato *Excel*, do qual se obtiveram os valores, que depois foram transferidos para uma planilha onde foi dado um tratamento estatístico e obtida a distância média de penetração de íons cloretos, na qual os valores discrepantes, com coeficiente de variação superior a 20 %, foram excluídos.

Através das médias de penetração e do respectivo tempo de imersão é possível gerar um gráfico (profundidade de penetração x $\sqrt{\text{tempo}}$). A partir do gráfico é obtida a equação correspondente a linha reta de tendência traçada entre os 6 pontos, correspondentes as médias de penetração nas 6 idades avaliadas (0, 7, 14, 28, 56 e 91 dias).

A análise do EPCI foi realizada com base no coeficiente angular de uma função de primeiro grau representa pela equação 11.

$$y = K' x + a \quad (11)$$

Da equação é obtido o coeficiente de penetração por imersão (K') e do gráfico seu coeficiente de determinação (R^2). Onde y é a profundidade média de penetração da reta (mm); a é o ponto de intersecção da reta com o eixo y e x é o tempo de imersão, em raiz de semanas.

O Anexo F ilustra através de documentos fotográficos as etapas do ensaio em concreto de difusão de cloretos.

Os traços investigados com os percentuais já calculados em relação ao aglomerante (cimento mais cinza volante) foram:

- Referência: somente com cimento CII-Z (3 traços);
- Mistura: 72,25 % CII-Z + 12,75 % Cinza Volante + 15 % CCA natural (3 traços);
- Mistura: 68 % CII-Z + 17 % Cinza Volante + 15 % CCA natural (3 traços);
- Mistura: 85 % CII-Z + 15 % CCA moída (3 traços).

Os CP de concreto que foram moldados conforme as misturas binárias supracitadas tiveram o teor de substituição da CCA em cima do valor total do teor de aglomerante (cimento + cinza volante).

Foram adotadas as relações a/ag de 0,45; 0,55 e 0,65 nas quatro misturas investigadas, totalizando 12 traços. Para cada traço foram moldados 3 CP extras, destinados ao ensaio a compressão aos 28 dias. Os CP para ensaio de compressão permaneceram na câmara úmida por 28 dias, somente sendo retirados momentos antes do ensaio para seu capeamento com enxofre.

4.2.3.1 Procedimentos de dosagem ensaio EPCI

Para a dosagem, em termos gerais, foram adotados os procedimentos recomendados por Helene e Terzian (1995). Foi mantido, em todos os traços, o volume de argamassa seca constante e igual a 53 %.

A consistência do concreto foi mantida mediamente plástica, para permitir a perfeita moldagem dos CP. Para a manutenção da relação a/ag , fixou-se o teor de água constante e variou-se a quantidade de aditivo superplastificante. Em todos os traços foi adicionado o aditivo respeitando a consistência desejada. Com o concreto fresco foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67: 1998), respeitando o abatimento de 80 ± 20 mm.

As moldagens dos CP cilíndricos para o ensaio de EPCI e resistência mecânica à compressão seguiram os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5738:2003.

A colocação dos materiais na betoneira obedeceu à ordem proposta por pesquisas anteriores feitas pelo GEPECON, para otimizar a auto-moagem da CCA “*in natura*” (DUART, 2008).

De acordo com os ensaios de trabalhabilidade, os concretos empregados na pesquisa foram produzidos com as seguintes ordens de colocação dos materiais no interior da betoneira: 100 % do agregado graúdo mais a CCA natural (2 min), 25 % da água (2 min), 100 % do cimento + 100 % de cinza volante + 55 % da água (2 min), 100 % do agregado miúdo + 20 % da água com aditivo superplastificante (9 min).

Os valores fixos adotados na dosagem dos concretos estão descritos abaixo:

- $a/ag = 0,45; 0,55 \text{ e } 0,65$
- H (porcentagem água materiais secos) = 8,5 %
- α (teor de argamassa) = 53 %

Optou-se por essas relações a/ag por serem as estudadas em pesquisas anteriores pelo grupo de pesquisa GEPECON. Tanto o valor do H quanto o do α foram adotados devido a trabalhabilidade que eles proporcionaram as misturas contendo CCA natural. Visto que a maior quantidade de carbono está presente na CCA residual, as partículas de carbono tendem a aumentar tanto o consumo de água para uma dada consistência, como a de aditivo (METHA, 1994). Além disso, a presença desse tipo de cinza faz com que as argamassas e concretos com ela produzidos possuam uma coesão excessiva (aspecto “pegajoso”) (PRUDÊNCIO, 2003).

Através das equações próprias para dosagem do concreto, e as massas específicas dos materiais utilizados nesta pesquisa, foram encontrados os traços unitários representados na tabela 12 e o consumo de materiais por m^3 representados na tabela 13.

Tabela 12 - Traços unitários obtidos no estudo de dosagem para EPCI fase 3.

Misturas	a/ag	CPIIZ	CCA natural	CCA moída	Cinza volante	Areia	Brita	Aditivo
	0,45	1,0	-	-	-	1,806	2,49	0,03
Referência	0,55	1,0	-	-	-	2,43	3,04	0,08
	0,65	1,0	-	-	-	3,05	3,59	0,13
	0,45	0,7225	0,15	-	0,1275	1,672	2,49	0,4
12,75 % cinza volante	0,55	0,7225	0,15	-	0,1275	2,296	3,04	0,5
	0,65	0,7225	0,15	-	0,1275	2,92	3,59	0,6
	0,45	0,68	0,15	-	0,17	1,65	2,49	0,4
17 % cinza volante	0,55	0,68	0,15	-	0,17	2,27	3,04	0,5
	0,65	0,68	0,15	-	0,17	2,90	3,59	0,6
	0,45	0,85	-	0,15	-	1,75	2,49	0,07
CCA Moída	0,55	0,85	-	0,15	-	2,37	3,04	0,08
	0,65	0,85	-	0,15	-	2,998	3,59	0,13

Os valores do consumo de aglomerante para cada relação a/ag obtido neste estudo de dosagem estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Consumo de materiais por m³ de concreto.

Misturas	Materiais (Kg / m ³ de concreto)							
	a/ag	CPIIZ	CCA natural	CCA moída	Cinza volante	Areia	Brita	Aditivo
	0,45	407	-			735,042	1013,43	0,12
Referência	0,55	332	-			806,76	1009,28	0,27
	0,65	280	-			854	1005,2	0,36
	0,45	294,058	61,05		51,8925	680,504	1013,43	1,63
12,75 % cinza volante	0,55	239,87	49,8		42,33	762,272	1009,28	1,66
	0,65	202,3	42		35,7	817,6	1005,2	1,68
	0,45	276,76	61,05		69,19	671,55	1013,43	1,63
17 % cinza volante	0,55	225,76	49,8		56,44	753,64	1009,28	1,66
	0,65	190,4	42		47,6	812	1005,2	1,68
	0,45	345,95		61,05		712,25	1013,43	0,28
CCA Moída	0,55	282,2		49,8		786,84	1009,28	0,27
	0,65	238		42		839,44	1005,2	0,36

Aditivo (% sobre o peso do cimento); Foi usado aditivo superplastificante respeitando o abatimento de 80 ± 20 mm.

CAPÍTULO VI

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Fase 1 – Ensaios em Barras de Argamassa

Este ensaio é utilizado para avaliar o potencial reativo dos agregados frente à RAS. No entanto, como o objeto de análise deste estudo é a CCA natural foram usados dois limites de norma como critério para classificação da reatividade desse material

Os resultados das expansões investigadas em barras de argamassa, segundo o ensaio de reatividade acelerado conforme a ABNT NBR 15577: 2008 serão apresentadas a seguir.

5.1.1 Expansão das Barras de Argamassa com Cimento Padrão

A figura 23 ilustra, comparativamente, o comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de cimento padrão e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento.

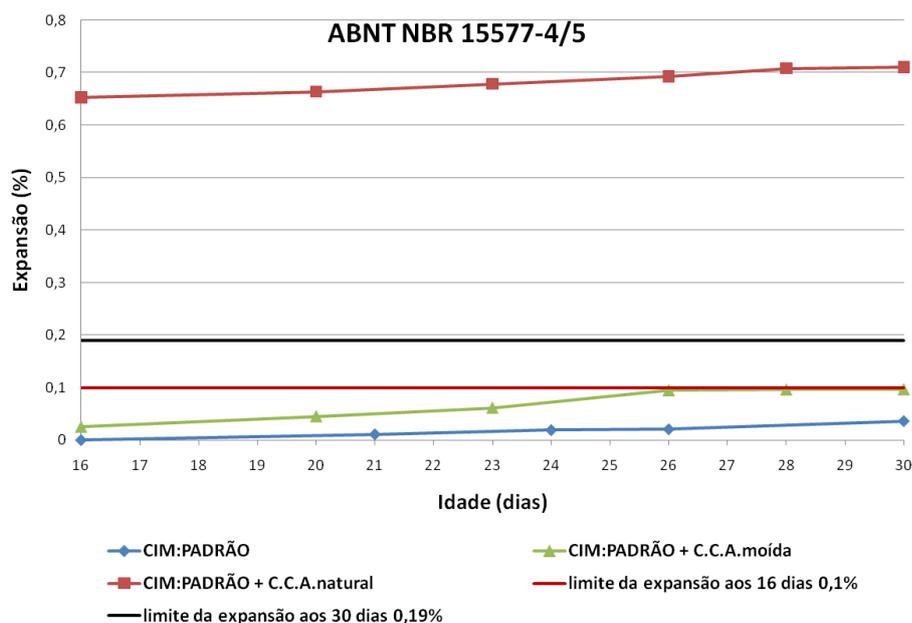


Figura 23 - Expansão das barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577 4/5 utilizando cimento padrão.

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras de argamassa confeccionadas com cimento padrão conforme exigência das ABNT NBR's 15577-4/5:2008 estão mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com cimento padrão.

Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-5	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-4
Cimento padrão	0,00013	Inócuo	0,036	Inócuo
Cimento Padrão + CCA moída	0,02480	Inócuo	0,096	Inócuo
Cimento Padrão + CCA natural	0,65000	Reativo	0,710	Reativo

Os resultados apresentados na figura 23 e na tabela 14 mostram que o traço com cimento padrão sem adição da CCA natural e moída em barras de argamassa pelo método acelerado não atingiu o limite de expansão proposto pela ABNT NBR 15577:2008, pois o agregado utilizado foi areia normal. Segundo a ABNT NBR 15577:2008, o limite de expansão aos 16 dias é de 0,1 %, enquanto aos 30 dias é de 0,19 %. Na tabela 14, pode-se verificar que o traço de cimento padrão sem adição de CCA foi considerado inócuo para as duas idades avaliadas.

A mistura de cimento padrão com CCA moída apresentou uma expansão um pouco maior que o traço com cimento padrão puro, mas a sua expansão foi muito inferior que o limite estabelecido pela norma (Figura 23). Assim como os resultados apresentados para o traço com cimento padrão, as barras de argamassa com CCA moída mostraram-se inócuas para as duas idades avaliadas. Esses resultados estão de acordo com Metha & Monteiro (1994), que avaliam a CCA obtida sem queima controlada, quando finamente moída, apresenta atividade pozolânica.

Ao contrário, a mistura de cimento padrão com CCA natural se mostrou extremamente reativa, porque aos 16 dias ultrapassou os limites estabelecidos pela norma (Figura 23), tendo sido considerada reativa para as duas idades avaliadas (Tabela 14). Entretanto, 15 % de CCA não configura uma alta porcentagem de adição que disponibilizaria na matriz uma maior quantidade de sílica, resultando assim em expansão causada pela RAS (TIBONE, 2007). Então, acredita-se que essa expansão tenha ocorrido pelo efeito de floculação da sílica (CHANDRA, 1997; DIAMOND, 2004; SILVEIRA, 2007) ou devido à maior dimensão das partículas de sílica provenientes da CCA natural (CHANDRA, 1997).

Tendo em vista os resultados acima relatados com as barras de argamassa contendo a mistura de cimento padrão e CCA natural, buscaram-se materiais inibidores da RAS, para assim, diminuir a expansão nas barras de argamassa. Dessa forma, foram utilizados cimentos com adições minerais, assim como a substituição adicional de parte do cimento CIIIZ por cinza volante.

5.1.2 Expansão em barras de argamassa com cimento CPIII

A figura 24 ilustra, comparativamente, o comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CPIII e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento.

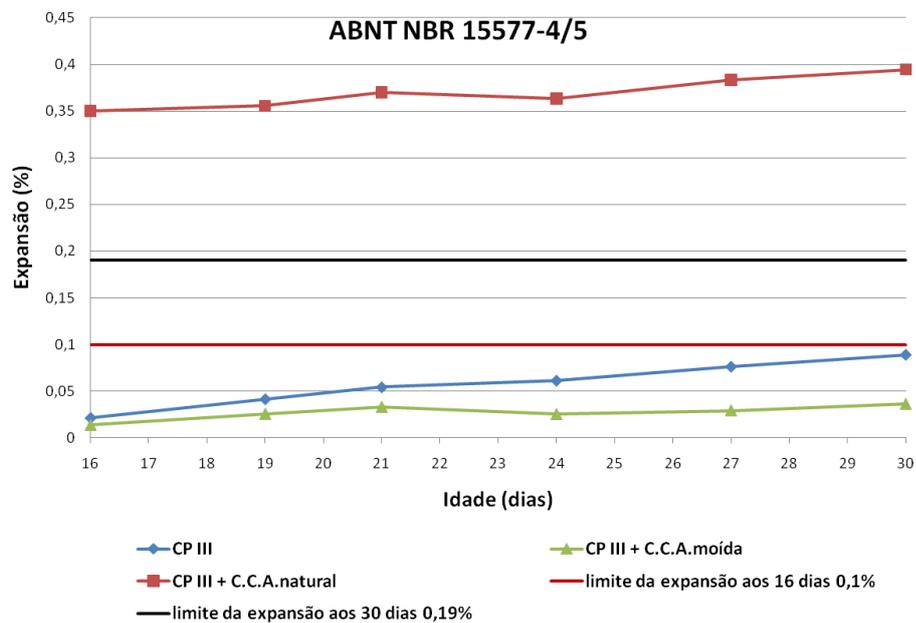


Figura 24 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577 4/5 utilizando CPIII

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras de argamassa confeccionadas com cimento CPIII conforme exigência das NBR 15577-4/5 estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Expansão média das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPIII.

Misturas	Expansão	Classificação NBR 15577-5	Expansão	Classificação NBR 15577-4
	média (%) 16 dias		média (%) 30 dias	
CPIII	0,0216	Inócuo	0,089	Inócuo
CPIII + CCA moída	0,0136	Inócuo	0,036	Inócuo
CPIII + CCA natural	0,3500	<i>Reativo</i>	0,400	<i>Reativo</i>

A figura 24 mostra que o traço com CPIII sem adição da CCA natural e moída não atingiu o limite de expansão proposto pela ABNT NBR 15577:2008. Além disso, a mistura somente com CPIII foi classificada como inócua nas duas idades avaliadas (Tabela 15).

A mistura de CPIII com CCA moída apresentou uma menor expansão (- 37 %) que o traço somente com CPIII (Figura 24). Na tabela 15, pode-se verificar que essa mistura foi considerada inócua para as duas idades avaliadas.

Entretanto, a mistura de CPIII com CCA natural se mostrou reativa pelo método de expansão acelerado em barras de argamassa (Figura 24), porém a expansão foi menor (em torno de 45 %) em comparação com a mistura de cimento padrão com CCA natural (Figura 23). No entanto, mesmo o CPIII se tratando de um cimento rico em adição (até 70 % de escória), a redução da expansão não foi suficiente para cumprir com o limite estabelecido pela norma (0,1 % em 16 dias e 0,19 % em 30 dias). Além disso, segundo a ABNT NBR 15577:2008 essa mistura de CPIII com CCA natural foi classificada como reativa para as duas idades avaliadas (Tabela 15).

Dados da literatura mostram que a hidratação da escória pode reduzir a taxa de difusão dos álcalis até os minerais reativos presentes no agregado utilizado, produzindo um gel menos ou não expansivo (STARK,1994). Além disso, Hobbs (1982) verificou que a escória é mais eficiente do que a cinza volante no combate à RAS, agindo como diluidor dos álcalis. De fato, a escória é capaz de combater a RAS, entretanto, os álcalis presentes na mesma devem ser investigados e limitados na mistura para que não contribuam negativamente para a reação (HOOBS, 1988). Ensaios acelerados desenvolvidos por Furnas (1997) também demonstraram que no caso do basalto, 25 % de escória adicionada no cimento reduzem muito pouco as expansões, mantendo-as em valores críticos. Teores acima de 50 % de escória reduziram as

expansões abaixo do limite prescrito pela norma. No caso do cloritaxisto e arenito reativos, foram necessários 55 % de escória de alto-forno. Estes fatos foram contrários aos resultados obtidos no presente estudo, pois um cimento rico em adição não foi capaz de reduzir as expansões nas misturas com CCA natural.

5.1.3 Expansão das barras de argamassa com cimento CII-Z

Na figura 25 pode-se observar comparativamente o comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CII-Z e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento.

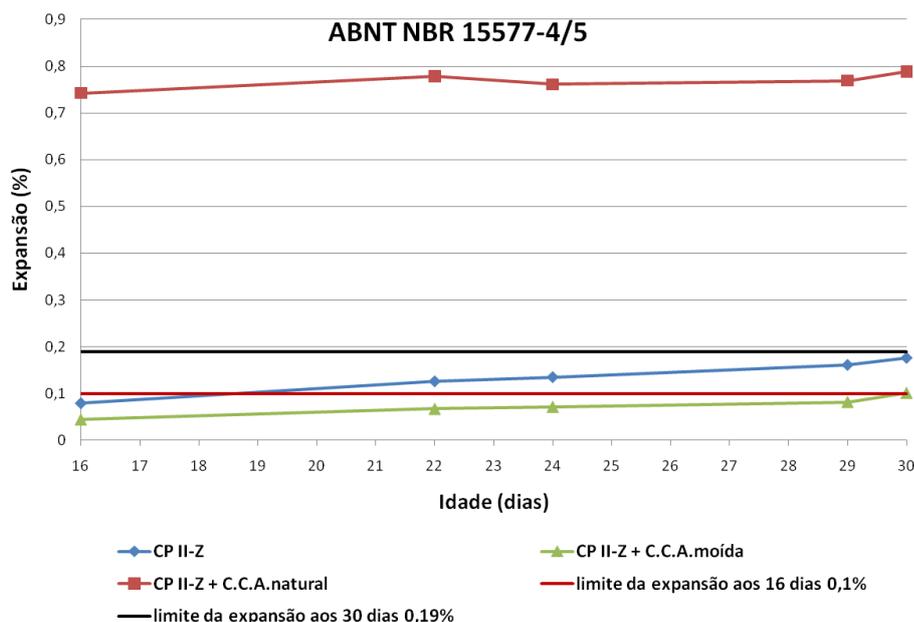


Figura 25 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5 utilizando CII-Z

Na tabela 16 estão apresentados os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras de argamassa confeccionadas com cimento CII-Z conforme exigência das ABNT NBR 15577-4/5:2008.

Tabela 16 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CII-Z.

Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-5
CII-Z	0,079	Inócuo	0,18	Inócuo
CII-Z + CCA moída	0,044	Inócuo	0,10	Inócuo
CII-Z + CCA natural	0,740	Reativo	0,79	Reativo

A mistura de CII-Z com CCA moída apresentou menor expansão que o traço somente com CII-Z (Figura 25). Na tabela 16, pode-se verificar que essas duas misturas foram consideradas inócuas nas duas idades avaliadas. Porém, o traço somente com CII-Z teve as expansões aos 16 e 30 dias muito próximas aos limites de norma (Figura 25). Portanto, os resultados demonstraram que o CII-Z apresentou comportamento adequado frente ao ensaio acelerado em barras de argamassa. Com efeito, Munhos (2007) utilizou o cimento tipo CII-Z nos ensaios acelerados em barras de argamassa para a investigação de agregados reativos, cujos resultados identificaram que o emprego deste tipo de cimento não foi suficiente para mitigar as reações expansivas, tanto para a reação álcali-silicato quanto para reação álcali-sílica.

Além disso, o presente estudo mostrou que a mistura de CII-Z com CCA natural apresentou-se reativa pelo método de expansão acelerado em barras de argamassa (Figura 25). A expansão desta mistura foi semelhante àquela ocorrida pelas misturas com cimento padrão e CCA natural (Figura 23). Segundo a ABNT NBR 15577:2008, o traço de CII-Z com CCA natural foi classificada como reativa nas duas idades avaliadas (Tabela 16).

5.1.4 Expansão das barras de argamassa com cimento CII-Z e 10 % de cinza volante

Na figura 26, observa-se comparativamente o comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CII-Z com 10 % de cinza volante e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento.

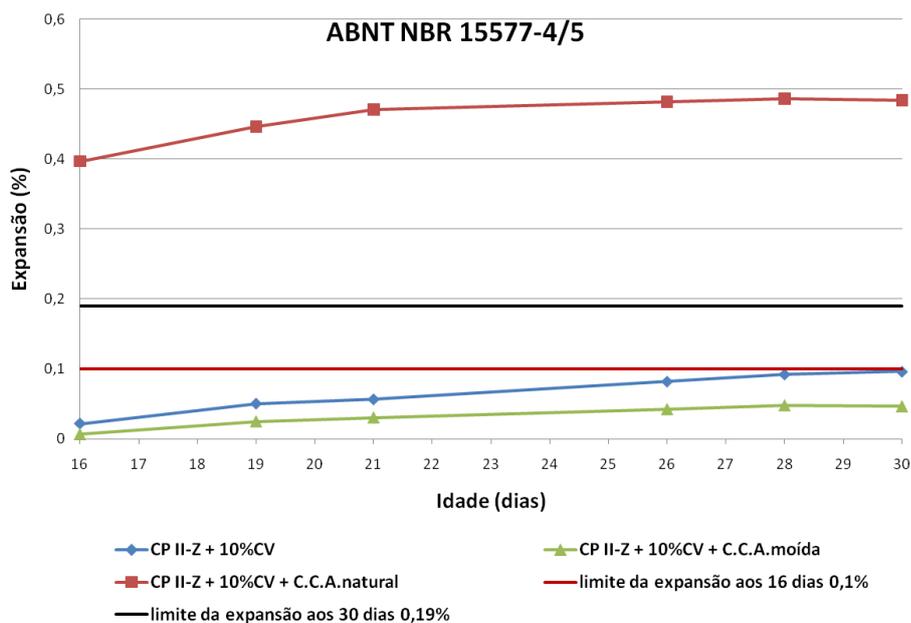


Figura 26 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5 utilizando CPII-Z + 10 % cinza volante

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras de argamassa confeccionadas com cimento CPII-Z com 10 % cinza volante conforme exigência da NBR 15577-4/5 estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativas da CCA nas misturas com CPII-Z com 10 % cinza volante.

Misturas	Expansão média (%)	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%)	Classificação NBR 15577-5
	16 dias		30 dias	
CPII-Z + 10 % cinza volante	0,0220	Inócuo	0,096	Inócuo
CPII-Z + 10 % cinza volante + CCA moída	0,0068	Inócuo	0,046	Inócuo
CPII-Z + 10 % cinza volante + CCA natural	0,4000	<i>Reativo</i>	0,480	<i>Reativo</i>

A mistura de CII-Z com 10 % de cinza volante e CCA moída apresentou menor expansão que a mistura de CII-Z com 10 % de cinza volante (Figura 26). Na tabela 17, pode-se verificar que essas duas misturas foram consideradas inócuas para as duas idades avaliadas. O acréscimo de 10 % de cinza volante ao CII-Z diminuiu a expansão desse cimento, melhorando seu comportamento frente a esse ensaio acelerado (Figura 26), quando comparados esses resultados com a expansão obtida somente com cimento CII-Z (Figura 25).

Os resultados apresentados na figura 26 mostram ainda que a mistura de CII-Z com 10 % de cinza volante e CCA natural diminuiu a expansão nas barras de argamassa, em comparação com as misturas de cimento padrão com CCA natural (em aproximadamente 35 %) (Figura 23). Além disso, a adição de 10 % de cinza volante na mistura de CII-Z com CCA natural reduziu a expansão (em torno de 40 %), quando comparada com as misturas contendo CII-Z e CCA natural (Figura 25). No entanto, a redução da expansão nas barras de argamassa não foi suficiente para atingir os limites propostos pela norma, mesmo o cimento CII-Z sendo um cimento pozolânico e ainda acrescido da adição de cinza volante. A mistura de CII-Z com 10 % de cinza volante e CCA natural foi classificada como reativa para as duas idades avaliadas, segundo a ABNT NBR15577: 2008 (Tabela 17).

O cimento CII-Z é um cimento com adições pozolânicas, e esse teor pode variar de 6 a 14 % na sua composição, permitindo assim a adição da cinza volante na mistura do traço, para a realização do ensaio acelerado em barras de argamassa. A cinza volante é uma pozolana utilizada como adição mineral ao cimento, que melhora suas propriedades frente ao ataque de agentes agressivos. Segundo pesquisadores que investigam a RAS gerada por agregados reativos em concretos, a utilização dessa adição, com prévio estudo de proporções, mitiga a reação deletéria. Acredita-se que a formação de gel somente ocorra na presença de íons Ca^{+2} . Dessa forma, a inclusão de pozolanas no concreto se torna importante para impedir as reações expansivas álcali-sílica, pois consomem o Ca(OH)_2 antes da sílica reativa (DIAMOND, 1989; HELMUTH, 1993).

5.1.5 Expansão das barras de argamassa com cimento CII-Z e 15 % de cinza volante

O comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CII-Z com 15 % de cinza volante e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento está apresentado na figura 27.

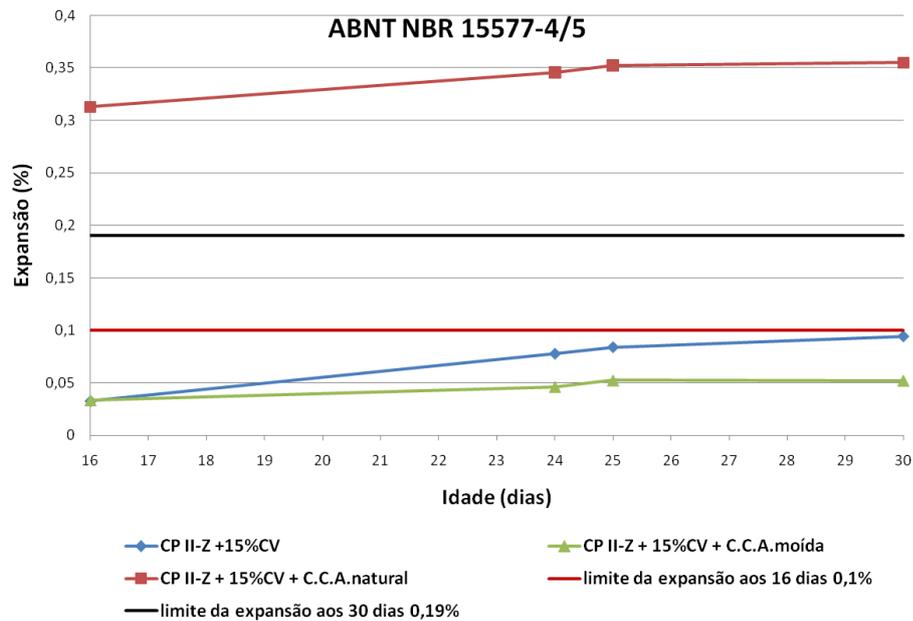


Figura 27 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 15 % cinza volante

Na tabela 18 são mostrados os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras de argamassa confeccionadas com cimento CII-Z + 15 % cinza volante conforme exigência das ABNT NBR 15577-4/5: 2008.

Tabela 18 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CII-Z + 15 % cinza volante.

Misturas	Expansão	Classificação NBR 15577-4	Expansão	Classificação NBR 15577-5
	média (%) 16 dias		média (%) 30 dias	
CII-Z + 15 % cinza volante	0,032	Inócuo	0,094	Inócuo
CII-Z + 15 % cinza volante + CCA moída	0,033	Inócuo	0,052	Inócuo
CII-Z + 15 % cinza volante + CCA natural	0,310	Reativo	0,350	Reativo

Os resultados apresentados na figura 27 mostram que a mistura de CII-Z com 15 % de cinza volante e CCA moída apresentou uma expansão semelhante à mistura de CII-Z adicionada com 15 % de cinza volante aos 16 dias, enquanto a expansão foi significativamente menor aos 30 dias. Na tabela 18, pode-se verificar que essas duas misturas foram consideradas inócuas para as duas idades avaliadas.

Além disso, a mistura de CII-Z com 15 % de cinza volante e CCA natural diminuiu a expansão nas barras de argamassa (em torno de 50 %), quando comparado com os traços contendo cimento padrão com CCA natural (Figura 27). Entretanto, assim como mostrado na expansão das barras com CII-Z com 10 % de cinza volante e CCA natural, a redução da expansão não foi suficiente para atingir os limites estabelecidos pela norma, mesmo que o cimento CII-Z seja pozolânico acrescido da adição de cinza volante. Essa mistura foi classificada como reativa para as duas idades avaliadas, segundo a NBR15577 (Tabela 18).

5.1.6 Expansão nas barras de argamassa com cimento CII-Z e 20 % de cinza volante

O comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CII-Z com 20 % de cinza volante e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento está apresentado na figura 28.

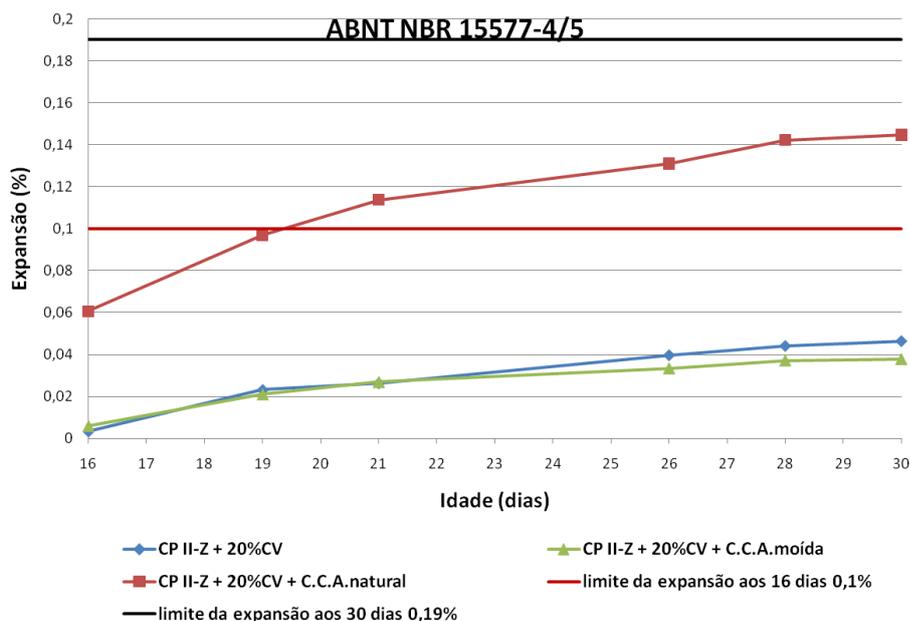


Figura 28 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 20 % cinza volante.

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras com cimento CII-Z com 20 % de cinza volante conforme exigência das ABNT NBR 15577-4/5: 2008 estão apresentados na tabela 19.

Tabela 19 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CII-Z com 20 % cinza volante.

Misturas	Expansão média (%)	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%)	Classificação NBR 15577-5
	16 dias		30 dias	
CII-Z + 20 % cinza volante	0,0035	Inócuo	0,046	Inócuo
CII-Z + 20 % cinza volante + CCA moída	0,006	Inócuo	0,038	Inócuo
CII-Z + 20 % cinza volante + CCA natural	0,060	<i>Inócuo</i>	0,140	<i>Inócuo</i>

A mistura de CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA moída apresentou maior expansão que a mistura de CII-Z adicionada com 20 % de cinza volante aos 16 dias e menor

aos 30 dias (Figura 28). Na tabela 19, pode-se verificar que essas duas misturas foram consideradas inócuas para as duas idades avaliadas.

A mistura de CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural diminuiu a expansão nas barras de argamassa (Figura 28), em comparação a de cimento padrão com CCA natural (aproximadamente 91 e 80 % em 16 e 30 dias, respectivamente) (Figura 23). Dessa forma, ao contrário dos resultados obtidos com CII-Z com 10 e 15 % de cinza volante e CCA natural, as misturas com CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural apresentaram uma redução da expansão que foi abaixo dos limites exigidos por norma. Por isso, o presente resultado assegura que 20 % de cinza volante adicionada à mistura de CII-Z com CCA natural foi capaz de mitigar a RAS, classificando essa mistura como inócuo para as duas idades avaliadas, segundo a ABNT NBR 15577:2008 (Tabela 19).

5.1.7 Expansão nas barras de argamassa com cimento CII-Z e 30 % de cinza volante

O comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CII-Z com 30 % de cinza volante e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento está apresentado na figura 29.

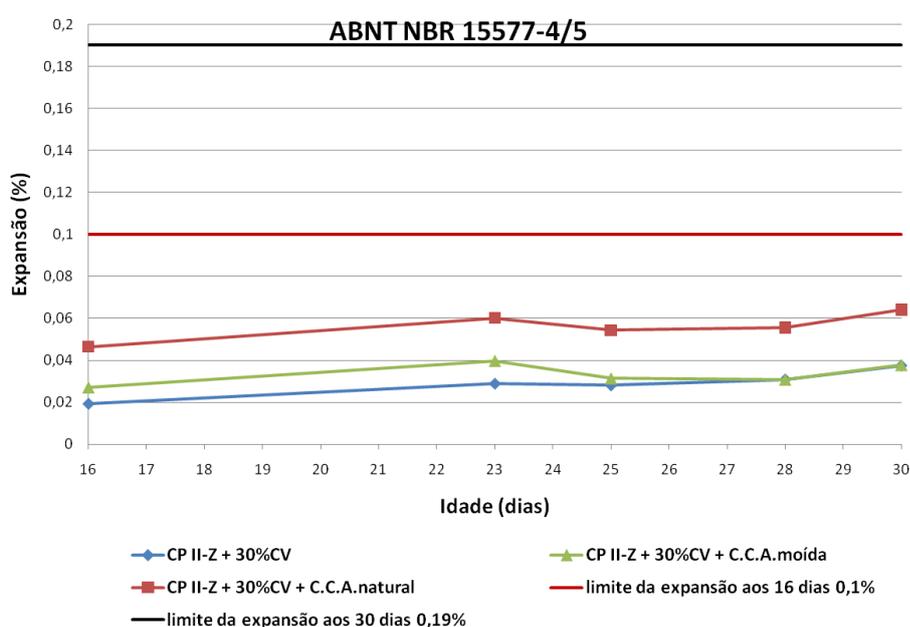


Figura 29 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 30 % cinza volante.

Na tabela 20 estão apresentados os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras com cimento CII-Z com 30 % de cinza volante conforme exigência das NBR 15577-4/5.

Tabela 20 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CII-Z com 30 % cinza volante.

Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-5
CII-Z + 30 % cinza volante	0,019	Inócuo	0,037	Inócuo
CII-Z + 30 % cinza volante + CCA moída	0,027	Inócuo	0,038	Inócuo
CII-Z + 30 % cinza volante + CCA natural	0,046	<i>Inócuo</i>	0,064	<i>Inócuo</i>

A mistura de CII-Z com 30 % de cinza volante e CCA moída apresentou maior expansão que a mistura de CII-Z adicionada com 30 % de cinza volante nas duas idades avaliadas (Figura 29). Na tabela 20, pode-se verificar que essas duas misturas foram consideradas inócuas para as duas idades avaliadas.

Os resultados apresentados na figura 29 evidenciam ainda que a mistura de CII-Z com 30 % de cinza volante e CCA natural diminuiu a expansão nas barras de argamassa, em comparação com as misturas de cimento padrão com CCA natural (aproximadamente 90 %) (Figura 23). Com isso, os resultados com 30 % de cinza volante adicionada à mistura de CII-Z com CCA natural foi capaz de mitigar a RAS. Esses resultados foram semelhantes aos obtidos com a adição de 20 % de cinza volante no CII-Z com CCA natural. A mistura foi classificada como inócua para as duas idades avaliadas, segundo a NBR15577 (Tabela 20).

5.1.8 Expansão nas barras de argamassa com cimento CII-Z e 40 % de cinza volante

A figura 30 ilustra comparativamente o comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CII-Z com 40 % de cinza volante e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento.

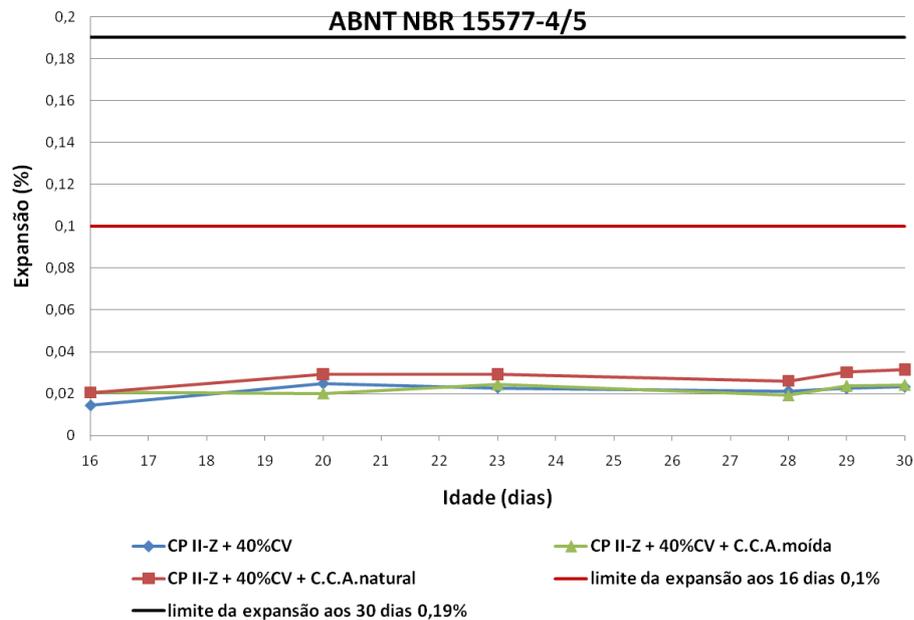


Figura 30 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CII-Z + 40 % cinza volante

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras com cimento CII-Z com 40 % cinza volante conforme exigência das NBR 15577-4/5 estão na Tabela 21.

Tabela 21 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CII-Z com 40 % cinza volante.

Misturas	Expansão	Classificação NBR 15577-4	Expansão	Classificação NBR 15577-5
	média (%) 16 dias		média (%) 30 dias	
CII-Z + 40 % cinza volante	0,014	Inócuo	0,023	Inócuo
CII-Z + 40 % cinza volante + CCA moída	0,021	Inócuo	0,024	Inócuo
CII-Z + 40 % cinza volante + CCA natural	0,020	<i>Inócuo</i>	0,031	<i>Inócuo</i>

Os resultados apresentados na figura 30 evidenciam que a mistura de CII-Z com 40 % de cinza volante e CCA moída apresentou uma expansão muito próxima a mistura de CII-Z adicionada com 40 % de cinza volante nas duas idades avaliadas. Na tabela 21, pode-se verificar que essas duas misturas foram consideradas inócuas para as duas idades avaliadas.

A mistura de CII-Z com 40 % de cinza volante e CCA natural diminuiu a expansão nas barras de argamassa (Figura 30), em comparação a expansão do cimento padrão com CCA natural (aproximadamente 96 %) (Figura 23). Tendo em vista esses resultados pode-se dizer que 40 % de cinza volante adicionada à mistura de CII-Z com CCA natural foi capaz de mitigar à RAS. De acordo, esses resultados foram semelhantes aos obtidos com a adição de 20 e 30 % de cinza volante no CII-Z com CCA natural. A mistura foi classificada como inócua para as duas idades avaliadas, segundo a ABNT NBR 15577:2008 (Tabela 21).

Portanto, os resultados das expansões médias das três misturas com 40 % de cinza volante ficaram muito próximos entre si (Tabela 21), mostrando que, à medida que o teor aumentou de 20 a 40 %, as expansões foram cada vez menores, mitigando com maior intensidade as expansões.

A eficiência da cinza volante em mitigar à RAS também foi investigada por Davies & Oberholster (1987). Os pesquisadores verificaram que 22 % do material pozzolânico foram suficientes para prevenir a expansão deletéria em ensaios acelerados. Além disso, Soroushian & Alhozaimy (1993) estudaram dois tipos de cinza tipo F, contendo diferentes teores de álcalis e verificaram que os teores ideais encontrados foram de 20 e 30 % de substituição na presença de baixo e elevado teor de álcalis no cimento, respectivamente. No caso dos

agregados reativos arenito, siltito e quartzito, teores de cinza de 30, 20 e 15 %, respectivamente foram suficientes para manter as expansões abaixo dos limites aceitáveis pelo método NBRI (FONTOURA et al., 1990). Com isso, verifica-se que o teor ideal varia em função do tipo de agregado. Os ensaios acelerados através do método NBRI indicaram que a reatividade do arenito e quartzito foi praticamente eliminada (expansões abaixo dos limites) quando substituído 30 % do cimento por cinza volante (FURNAS, 1997).

Monteiro et al. (1997) também estudaram o efeito da cinza volante na redução da reatividade causada pelo quartzito através do ensaio acelerado. Os resultados indicam que 15 % de substituição não alteraram as expansões e que 25 % atuaram de maneira eficiente, com expansões bastante inferiores à amostra de referência, sem adição.

5.1.9 Expansão nas barras de argamassa com cimento CPIV

O comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de CPIV e 15 % de CCA moída ou natural em substituição parcial ao cimento estão apresentadas na figura 31.

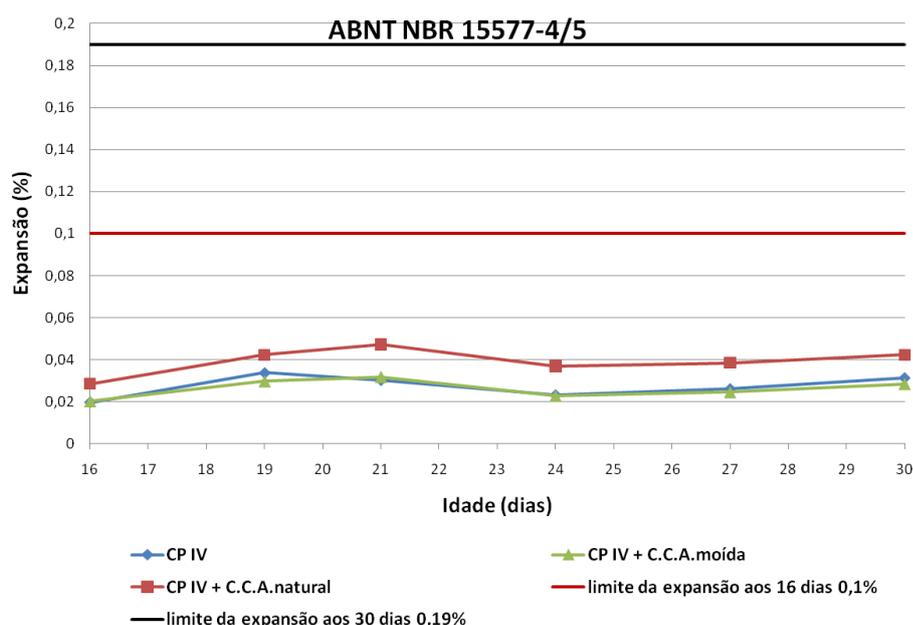


Figura 31 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-5, utilizando CPIV.

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras com cimento CPIV conforme exigência das ABNT NBR 15577-4/5:2008 estão demonstrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das CCA nas misturas com CPIV.

Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-5
CPIV	0,020	Inócuo	0,031	Inócuo
CPIV + CCA moída	0,020	Inócuo	0,028	Inócuo
CPIV + CCA natural	0,028	<i>Inócuo</i>	0,042	<i>Inócuo</i>

A mistura de CPIV com CCA moída mostrou uma expansão muito próxima ao traço de CPIV nas duas idades avaliadas (Figura 31). Na tabela 22, pode-se verificar que essas duas misturas foram consideradas inócuas para as duas idades avaliadas.

Da mesma forma, a mistura de CPIV com CCA natural diminuiu a expansão (Figura 31), em comparação com a mistura de cimento padrão com CCA natural (aproximadamente 95 %) (Figura 23). Com isso, pode-se dizer que o cimento CPIV com CCA natural foi capaz de mitigar à RAS, já que os limites de expansão foram menores que os exigidos pela norma. A mistura foi classificada como inócua para as duas idades avaliadas, segundo a ABNT NBR 15577:2008 (Tabela 22).

No presente estudo, os resultados de expansão nas barras de argamassa das três misturas ficaram muito próximos e bem abaixo do limite de norma (Tabela 22), o que mostra o cimento CPIV como um excelente mitigador da reação expansiva. Esse poder benéfico ocorre porque o cimento CPIV possui grande quantidade de pozolana em sua composição (o teor pode variar de 15 a 50 %). Esses resultados corroboram com os dados encontrados anteriormente nas misturas de cimento CII-Z com cinza volante. Dessa forma, quanto maior o teor de cinza volante, mais elevado foi o poder de mitigação da expansão. Os resultados do presente trabalho estão de acordo com Munhoz (2007), que investigou a mitigação da expansão causada pela RAS no agregado reativo de basalto combinado com 15 cimentos

experimentais preparados a partir da substituição parcial do CPV-ARI por adições ativas, sendo estes ensaios realizados pela norma ASTM C1567. As barras de argamassa preparadas com os cimentos Portland pozolânico com adição de 25 e 35 % de cinza volante (tipo CPIV) apresentaram expansão aos 14 dias de cura em solução alcalina de 0,04 e 0,03 %, respectivamente, indicando que esses teores são adequados para mitigar a RAS do basalto.

5.1.10 Expansão das barras de argamassa com cimento padrão e areia local para EPC

O ensaio em barras de argamassa com cimento padrão foi realizado para investigar a reatividade da areia local utilizada na confecção dos prismas de concreto tanto no EPC quanto no EAPC. Essa investigação foi realizada com o desígnio de correlacionar os resultados obtidos pelo método em barras de argamassa com os métodos em prismas de concreto. A figura 32 ilustra o comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo utilizando cimento padrão e areia local usada na confecção dos prismas de concreto.

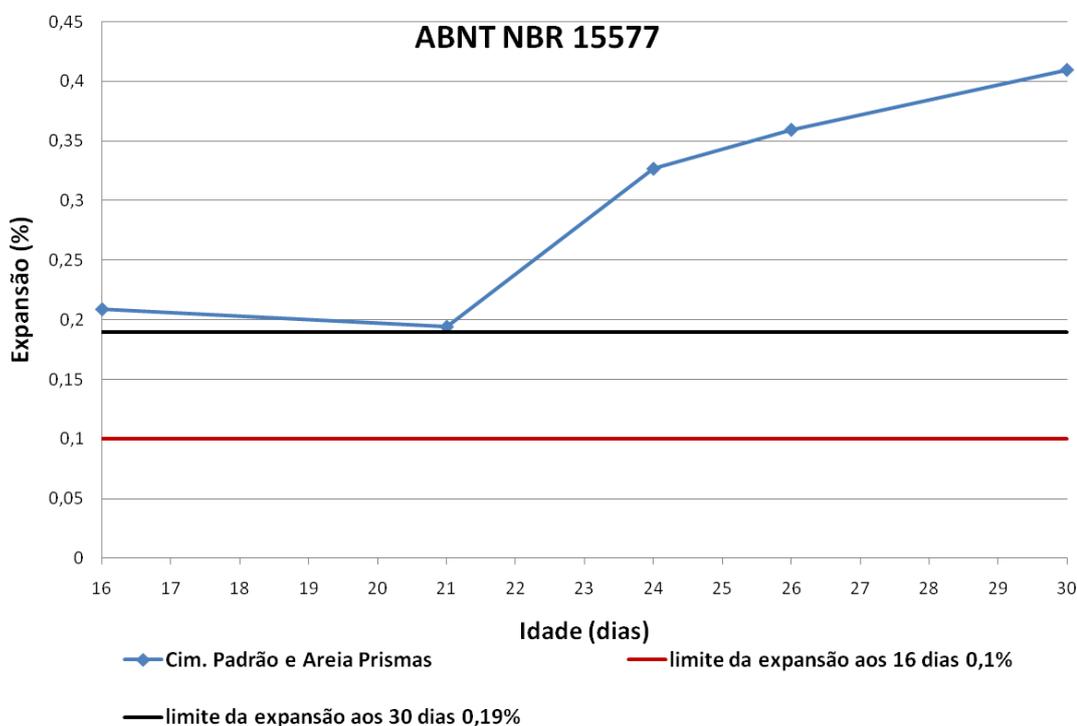


Figura 32 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado ABNT NBR 15577-4, contendo cimento padrão e areias usadas na confecção dos prismas de concreto

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias das barras de argamassa com cimento padrão e areia usada na confecção dos prismas de concreto conforme exigência das NBR 15577-4 estão demonstrados na tabela 23.

Tabela 23 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias e classificação da potencialidade reativa das areia usada na confecção dos prismas de concreto.

Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-5
Areia	0,209	<i>Reativa</i>	0,409	<i>Reativa</i>

Os resultados apresentados na figura 32 mostram que essa areia pelo método acelerado ultrapassou o limite de expansão proposto pela ABNT NBR 15577:2008, cujo limite de expansão aos 30 dias é de 0,19 % e serve como classificação dos agregados. No entanto, esse ensaio foi avaliado na idade de 16 dias e classificada também conforme seu limite de expansão de 0,10 %. Na tabela 23, pode-se verificar a areia usada na confecção dos prismas de concreto foi considerada reativa para as duas idades avaliadas, apresentando expansões de 0,209 e 0,409 % aos 16 e aos 30 dias, respectivamente..

De acordo, Kormann & Valduga (2006) identificaram um comportamento bastante semelhante, onde a maioria das areias naturais da região metropolitana de Curitiba, foram classificadas como reativas, apresentando expansões entre 0,2 e 0,4 % aos 16 e aos 28 dias, respectivamente.

5.1.11 Ensaio de MEV e EDS em argamassa

As amostras das barras de argamassa que passaram pelo ensaio ABNT NBR 15577-4:2008 foram coletadas para análise de MEV e consecutivamente para EDS. A investigação foi realizada para identificar os compostos das reações geradas pela adição de CCA no cimento.

Os principais pontos de observação nas amostras foram os poros, pois é neles que o gel oriundo da RAS se deposita. Sendo assim, é importante verificar essa região, comparando visualmente e quimicamente as diferentes microestruturas formadas, como forma avançada de caracterização das reações.

5.1.11.1 Misturas com cimento padrão

As misturas selecionadas para análise de sua microestrutura foram:

- Cimento padrão puro
- Cimento padrão + CCA moída
- Cimento padrão + CCA natural

As análises nestas misturas ocorreram para verificar a formação do gel sílico-alcalino oriundo da RAS. O principal alvo nessa investigação foi à mistura de cimento padrão com CCA natural que apresentou alto índice de expansão, muito além do limite permitido por norma.

A investigação feita pela MEV identificou que a amostra com cimento padrão, mesmo quando usado um agregado não reativo e a areia normalizada, apresentou o gel gretado composto principalmente por sílica (Si), cálcio (Ca) e Sódio (Na) típico da RAS em torno do agregado (Figura 35).

As figuras 33, 34 e 35 representam a micrografia das amostras coletadas das barras de argamassa da mistura somente com cimento padrão puro.

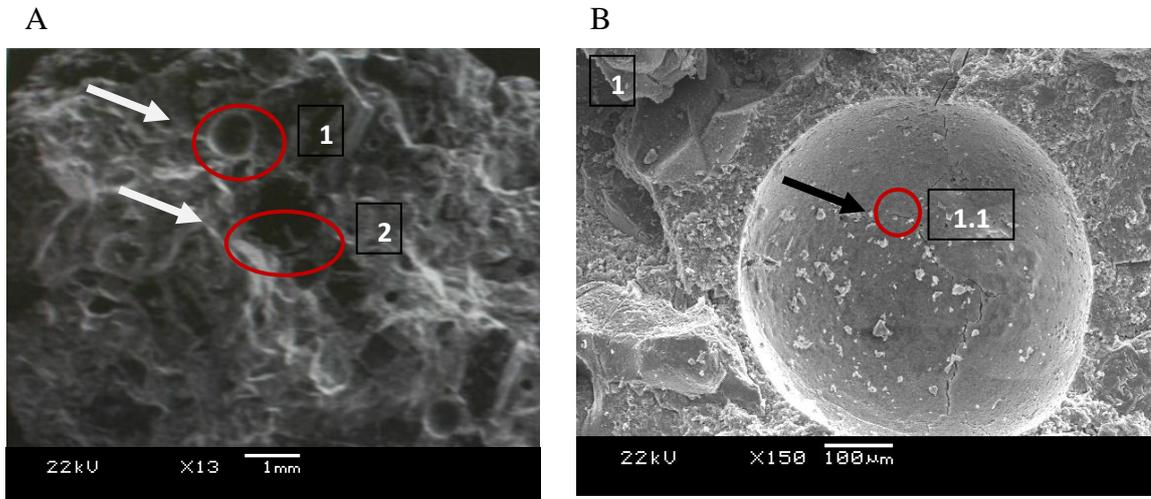


Figura 33 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa com cimento padrão visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia aproximada no poro (ponto 1) da amostra (B).

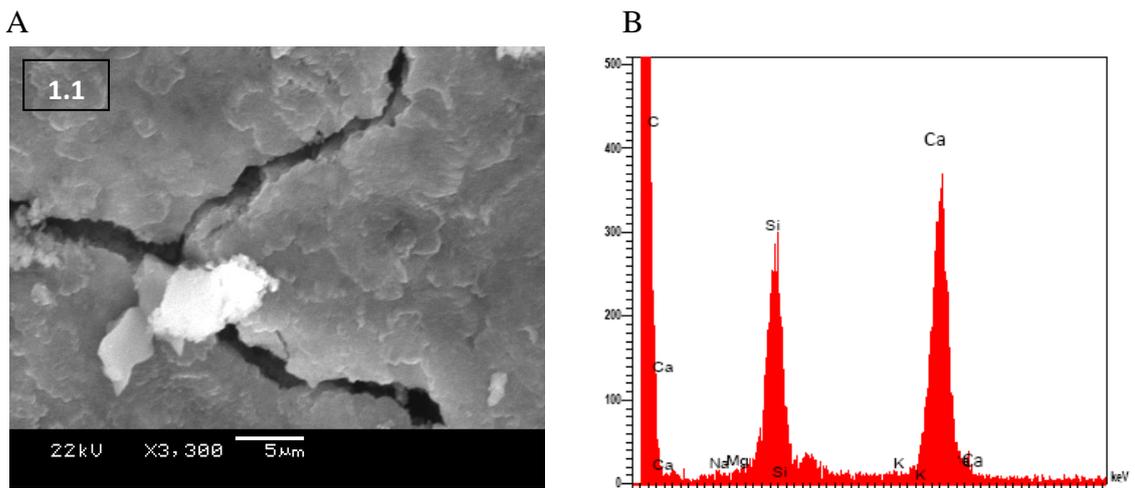


Figura 34 - Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).

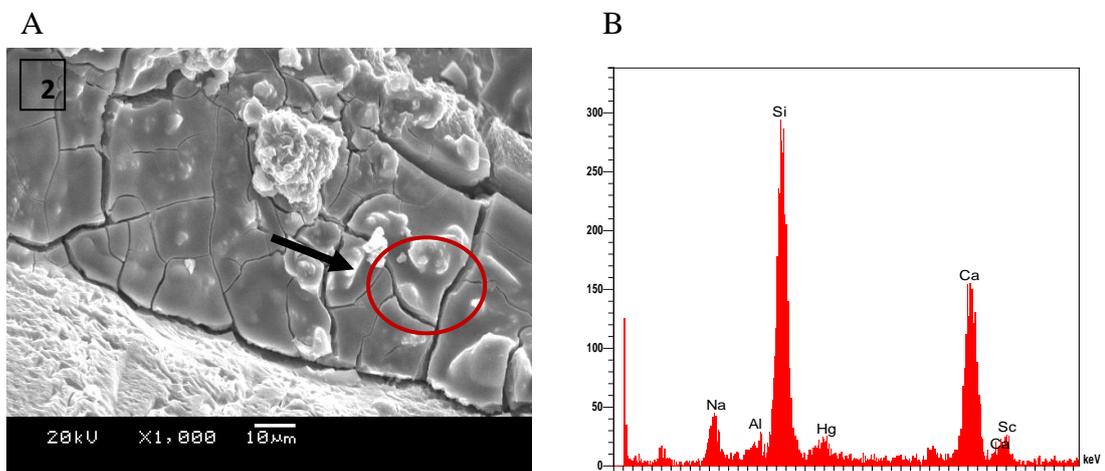


Figura 35 - Micrografia (A) e EDS (B) na interface pasta agregado (ponto 2).

Além disso, a investigação feita pela MEV identificou que a única amostra coletada que apresentou aglomerações de CCA foi a da mistura de cimento padrão com CCA moída (Figura 36 B), no entanto, não foi verificado o produto da RAS ao redor ou no interior dessa aglomeração.

As figuras 36, 37, 38 e 39 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de cimento padrão com CCA moída.

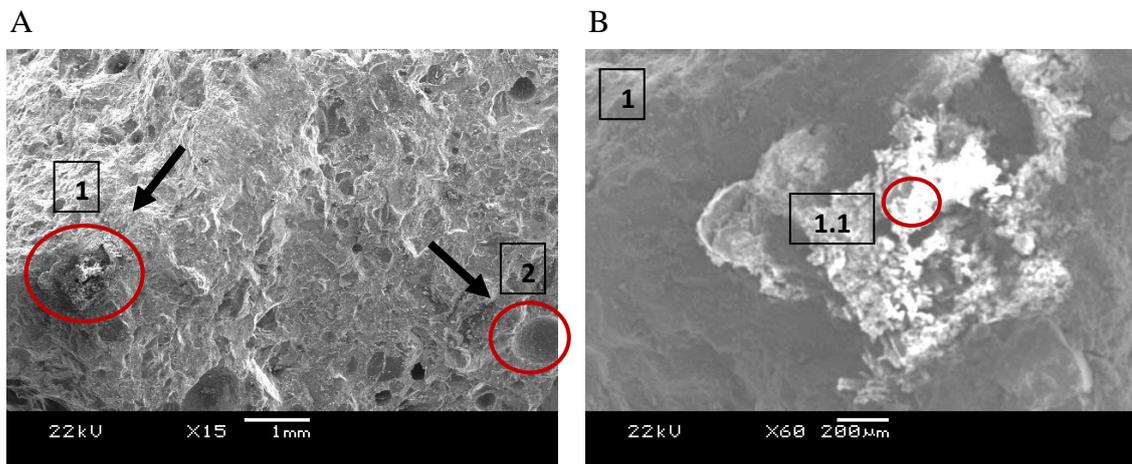


Figura 36 – Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa com cimento padrão e CCA moída visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia ampliada do aglomerado de CCA moída (ponto 1) (B).

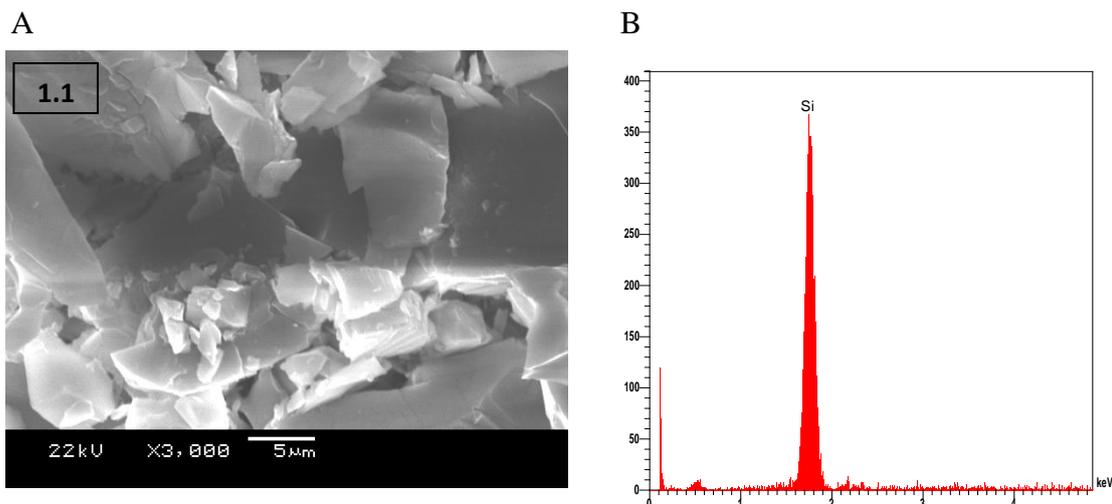


Figura 37 – Micrografia (A) e ED-S (B) no aglomerado aproximado de CCA moída da amostra (ponto 1.1).

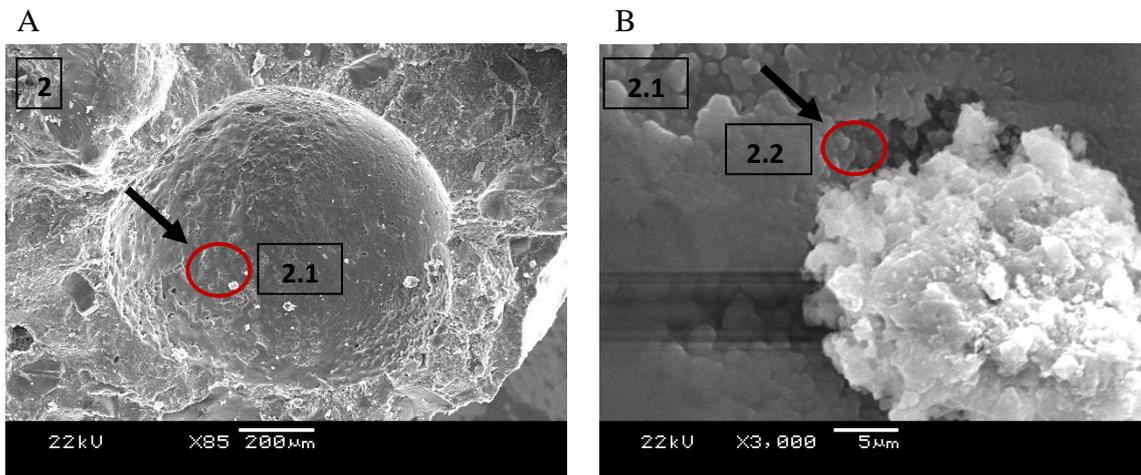


Figura 38 – Micrografia do poro da amostra (ponto 2) (A) e micrografia do poro aproximado (ponto 2.1) (B).

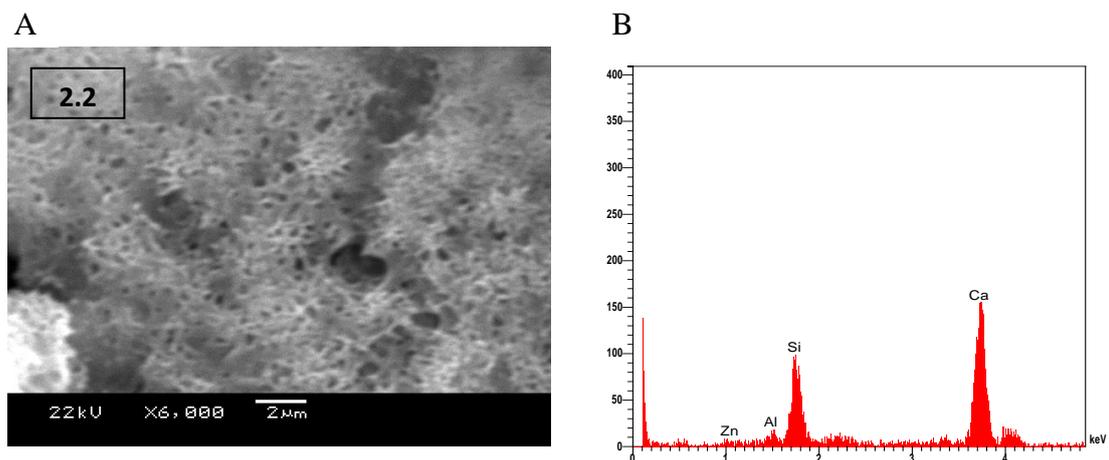


Figura 39 – Micrografia (A) e EDS (B) do poro (ponto 2.2) aproximado da amostra.

A investigação feita pela MEV identificou que a única amostra que apresentou gel gretado nos poros, típico da RAS, foi da mistura de cimento padrão com CCA natural (figuras 40 B e 42 B). Esse fato comprova a possível reatividade dos álcalis do cimento com a sílica da CCA natural.

As figuras 40, 41, 42 e 43 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de cimento padrão com CCA natural.

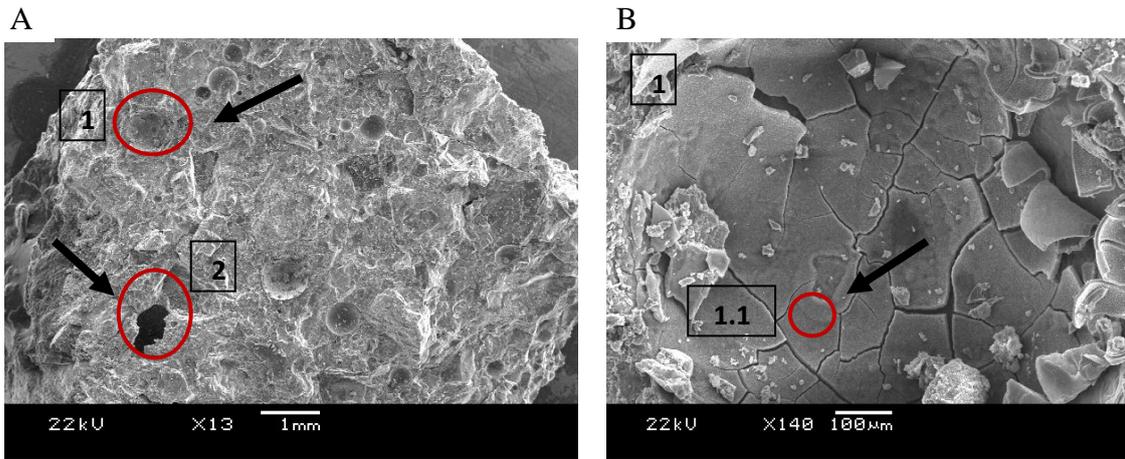


Figura 40 – Micrografia geral das amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de cimento padrão com CCA natural visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).

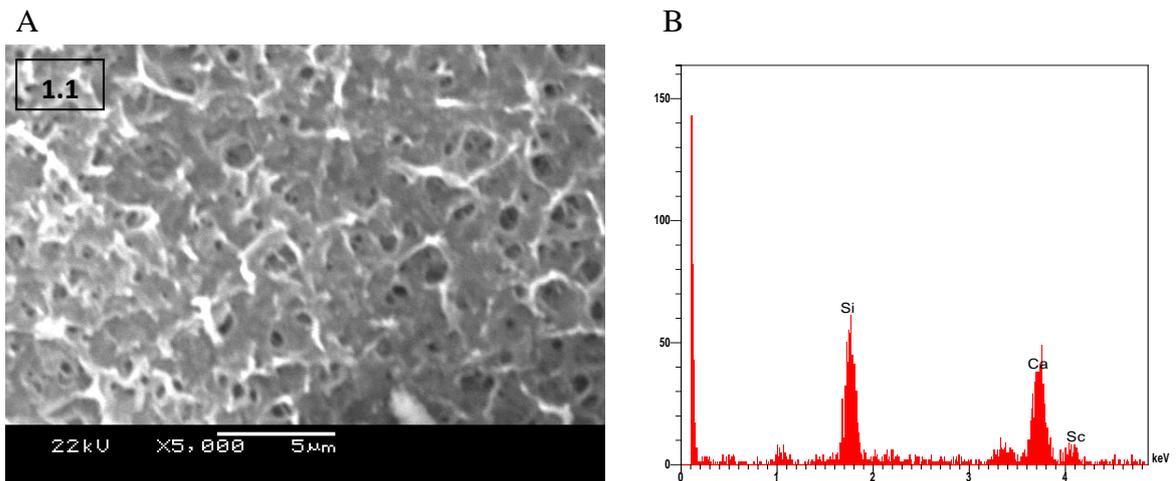


Figura 41 - Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).

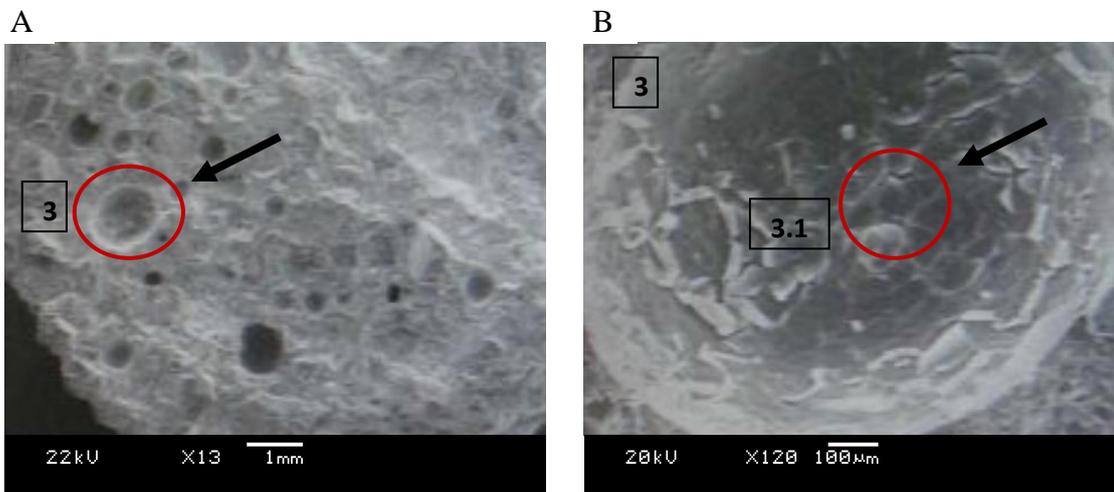


Figura 42 – Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa com cimento padrão e CCA natural visualizando-se o ponto 3 (A) e micrografia aproximada do poro da amostra (ponto 3) (B).

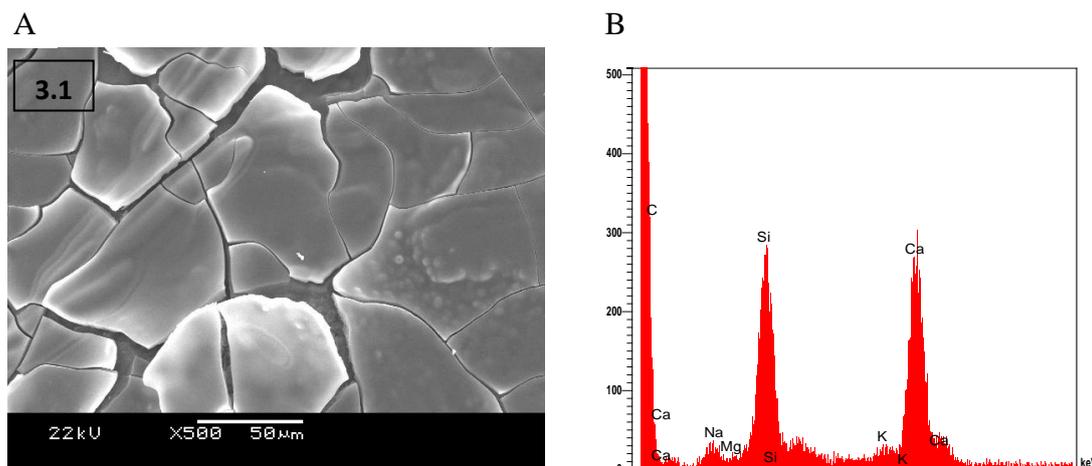


Figura 43 – Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 3.1).

A MEV, com o auxílio da EDS, mostrou as diferenças nas composições químicas dos materiais encontrados nos poros das amostras das diferentes misturas. A diferença básica entre elas é o teor de cálcio, já que a mistura com CCA natural (Figuras 41 e 43) apresenta menor teor que as demais misturas de cimento padrão. A relação $\text{Ca/Si} < 1$ e a presença de Na e potássio (K) no gel gretado da amostra com CCA natural comprova a possível RAS (Figura 43). O gel encontrado nos poros da amostra de CCA natural é semelhante, tanto quimicamente quanto fisicamente, aos produtos característicos da RAS causada por agregados encontrados em diversos estudos (HASPARYK, 1999, 2005; SABBAG, 2003; MUNHOZ, 2007).

A micrografia da mistura com CCA moída (Figura 39) apresenta uma estrutura rendada e porosa, diferentemente da micrografia da mistura com CCA natural (Figura 41) que se apresenta somente porosa.

Portanto, através da investigação feita pela MEV e EDS confirmou-se a presença do produto típico da RAS, ou seja, o gel gretado nos poros das amostras de cimento padrão com CCA natural. As micrografias e EDS ratificam o comportamento expansivo nas barras de argamassa dessa mistura. No entanto, não foi encontrado nestas mesmas amostras algo que indique que essa CCA natural seja a causadora desse fenômeno, já que não havia aglomerações ou partículas de sílica da CCA natural contaminadas com o gel sílico-alcalino.

5.1.11.2 Mistura com CII-Z e 20 % de cinza volante

As misturas selecionadas para análise de sua microestrutura foram:

- CII-Z com 20 % de cinza volante
- CII-Z com 20 % cinza volante e CCA moída
- CII-Z com 20 % cinza volante e CCA natural

As análises nas amostras de CII-Z adicionada de 20 % de cinza volante ocorreram com o intuito de verificar se havia formação do gel sílico-alcalino oriundo da RAS. O principal alvo nessa investigação foi à mistura de CII-Z adicionada de 20 % de cinza volante com CCA natural, pois ela mostrou-se eficiente na redução da expansão média nas barras de argamassa, tornando-a inferior ao limite proposto por norma, sendo assim considerada mitigadora da RAS.

Na microscopia da amostra de CII-Z com 20 % de cinza volante os poros apresentam uma estrutura bastante densa (Figura 44), e com aflorações de cristais aciculares típicos de etringita como pode ser verificado pela figura 55 B.

As figuras 44 e 45 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de CII-Z com 20 % cinza volante.

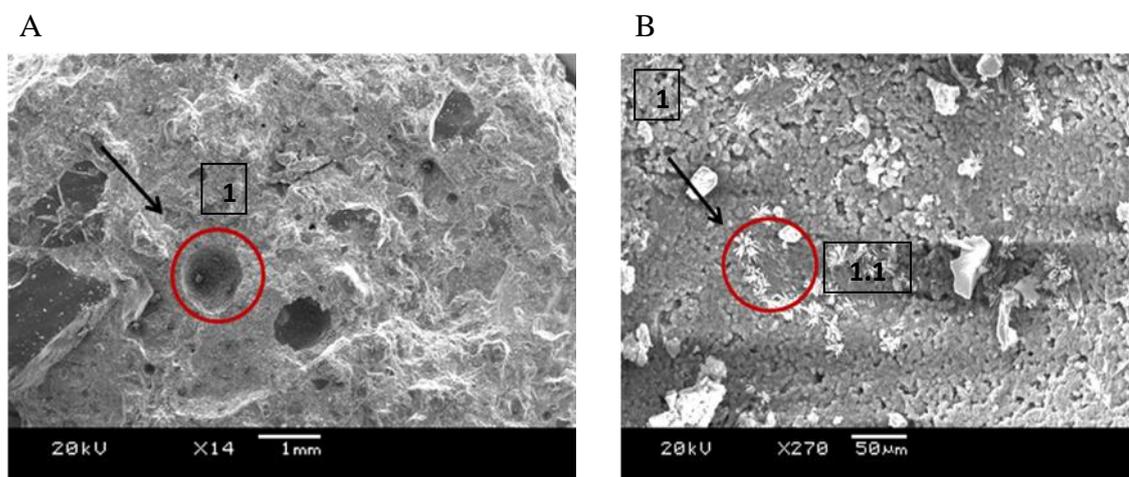


Figura 44 – Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CII-Z com 20 % cinza volante visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1).

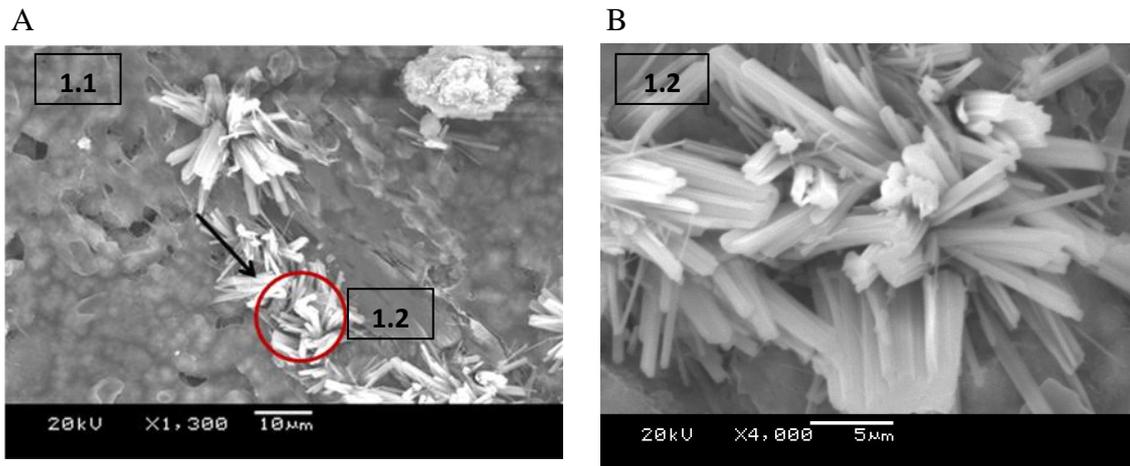


Figura 45 – Micrografia aproximada no poro da amostra (ponto 1.1) (A) e micrografia da etringita no poro da amostra (ponto 1.2) (B).

Na microscopia da amostra de CII-Z adicionada de 20 % de cinza volante com CCA moída não foram encontrados produtos que caracterizem a RAS. O poro dessa amostra também apresenta uma estrutura bastante densa com algumas microfissuras e cristais aciculares sobrepostos (Figura 46), mas de forma mais densa que a amostra da mistura dessa cinza com cimento padrão. O EDS representado na figura 47 identifica uma relação $Ca/Si > 1$, o que não caracteriza reação deletéria.

As figuras 46 e 47 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de CII-Z adicionado de 20 % cinza volante com CCA moída.

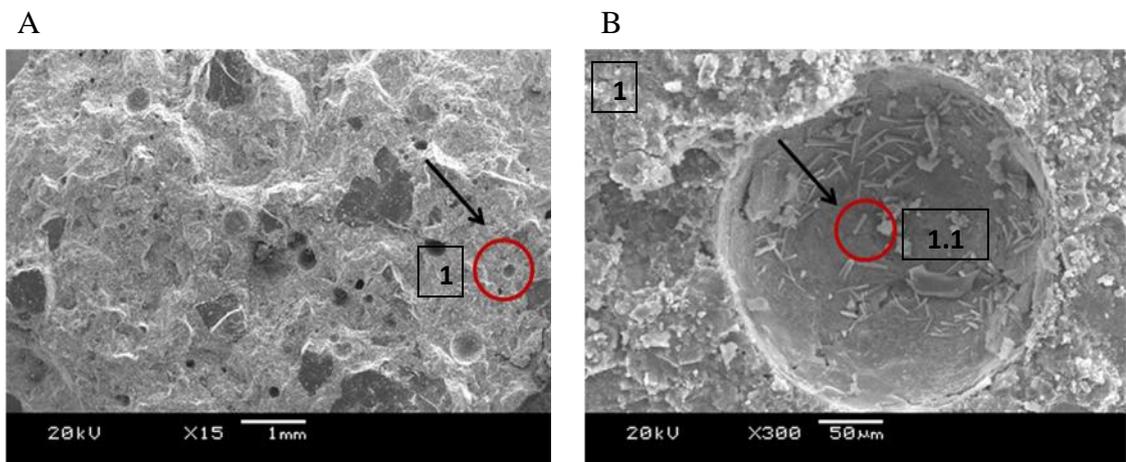


Figura 46 – Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CII-Z adicionada de 20 % cinza volante com CCA moída visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).

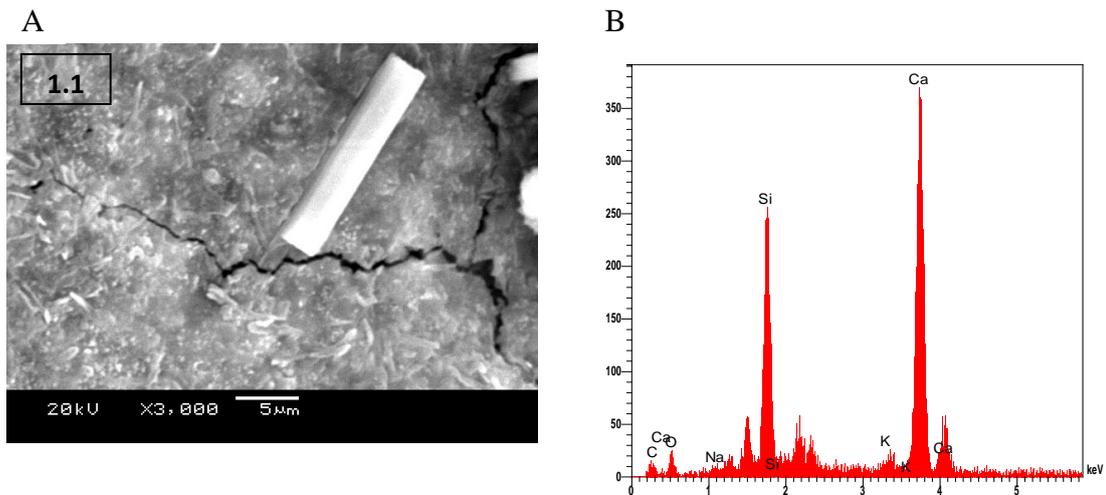


Figura 47 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).

Na microscopia da amostra de CII-Z adicionada de 20 % de cinza volante com CCA natural foi identificado no poro um produto com forma estufada e fissurada (Figura 49), que com a maior aproximação verificou-se ter uma estrutura rendada (Figura 50). Neste mesmo poro, foram encontrados cristais aciculares sobrepostos típicos de etringita e uma descamação rica em cálcio (Figuras 51 e 52).

As figuras 48, 49, 50, 51 e 52 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de CII-Z com 20 % cinza volante e CCA natural.

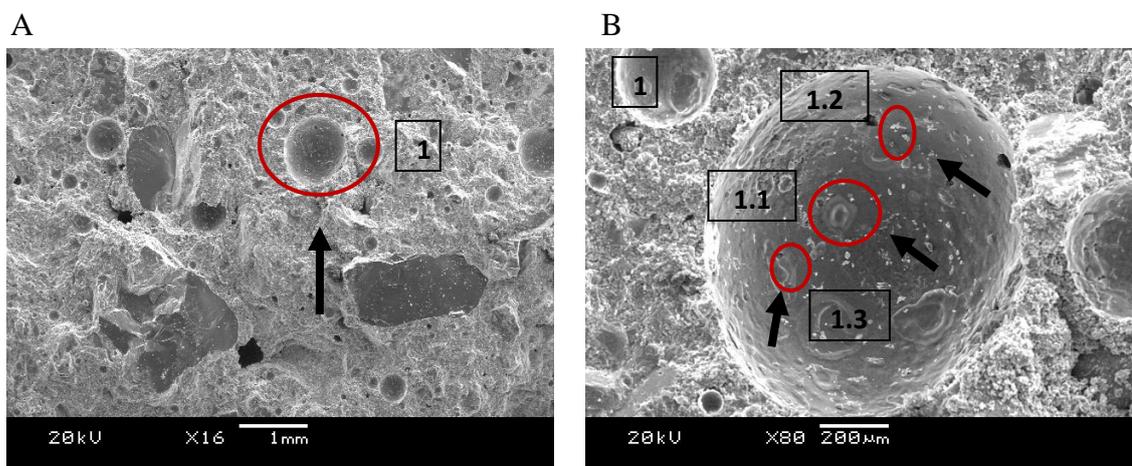


Figura 48 – Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CII-Z adicionada de 20 % cinza volante com CCA natural visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).

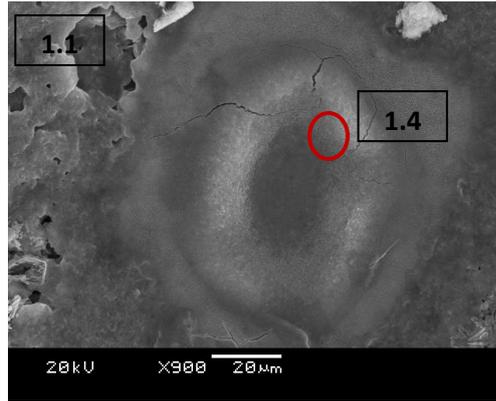


Figura 49 – Micrografia no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).

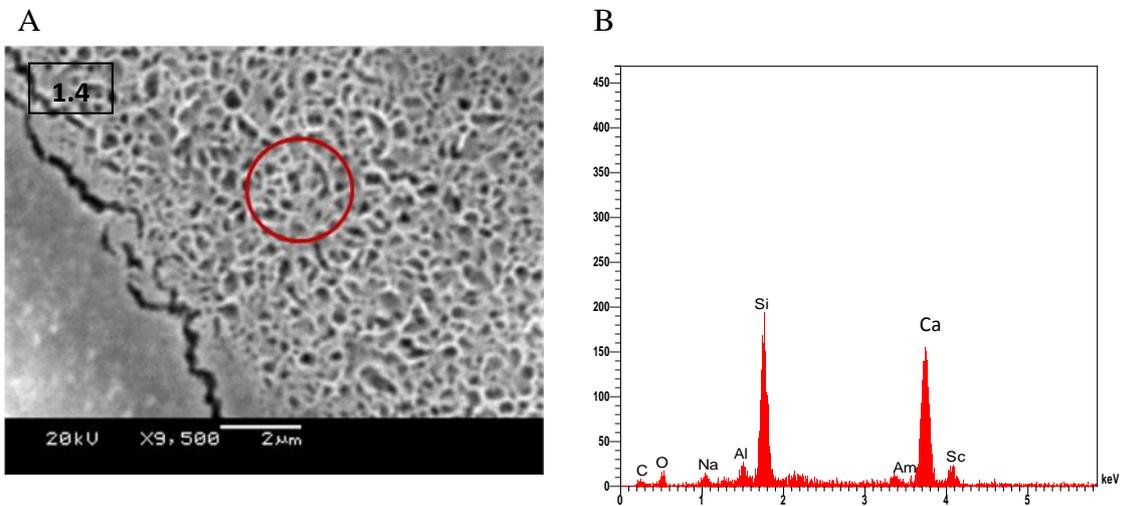


Figura 50 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.4).

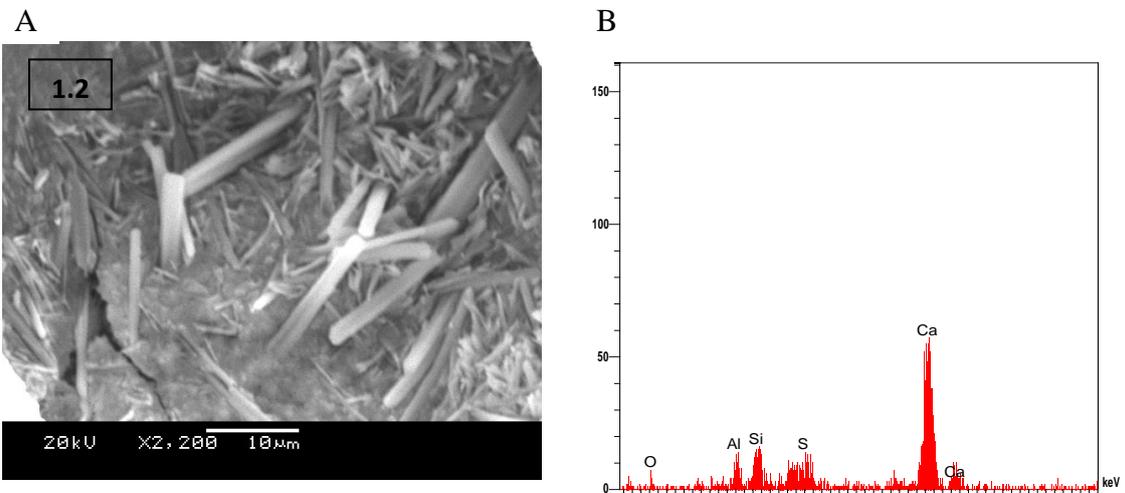


Figura 51 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.2).

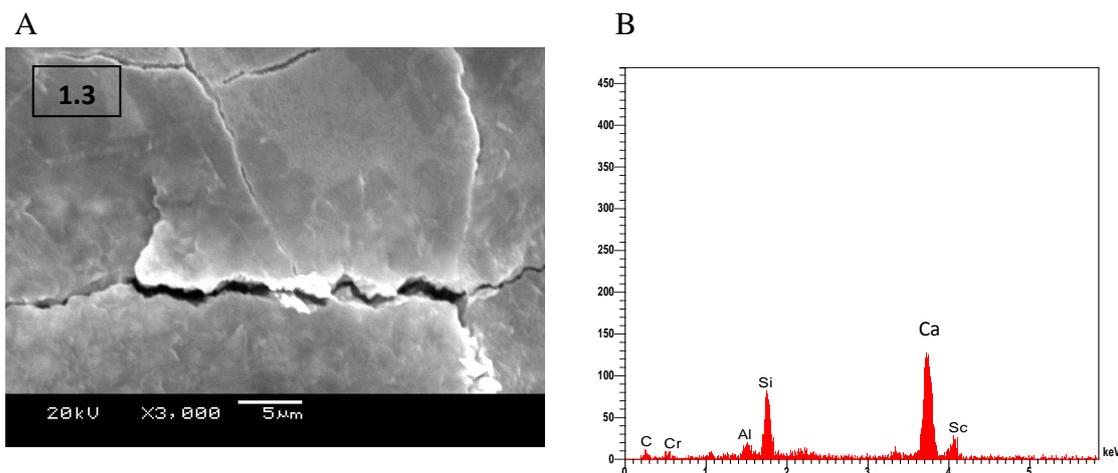


Figura 52 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.3).

As investigações feitas pela MEV não identificou a presença massiva do gel gretado nos poros da amostra de CPII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural, como o ocorrido nas amostras que excederam o limite de expansão proposto por norma. Na micrografia da figura 50, o EDS apresentado mostra vestígios da presença de um produto sílico-cálcico-alcalino característico da RAS.

O acréscimo adicional de 20 % de cinza volante a mistura de CPII-Z com CCA natural, gerou uma alteração nos produtos oriundos da RAS, ou consumiu o hidróxido de cálcio necessário, por reagir com a sílica reativa responsável pela RAS. Essa mistura obteve uma expansão média nas barras de argamassa menor que limite proposto por norma (item 5.1.6).

5.1.11.3 Mistura com CPIV

As misturas selecionadas para análise de sua microestrutura foram:

- CPIV puro
- CPIV + CCA moída
- CPIV + CCA natural

As análises nas amostras de CPIV ocorreram para ratificar a não formação do gel sílico-alcalino oriundo da RAS. O principal alvo nessa investigação foi à mistura de CPIV com CCA natural, pois ela se mostrou extremamente eficiente na redução da expansão média

nas barras de argamassa, tornando-a inferior ao limite proposto por norma, sendo assim considerada mitigadora da RAS.

Na microscopia da amostra de CPIV, os poros apresentam uma estrutura bastante densa, com a formação de aflorações de cristais aciculares típicos de etringita. A figura 54 mostra que essa camada de recobrimento do poro apresenta um teor $\text{Ca/Si} > 1$. A figura 55 representa os cristais aciculares típicos de etringita e o EDS confirma a composição química desse composto com a presença do enxofre.

As figuras 53, 54 e 55 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de CPIV.

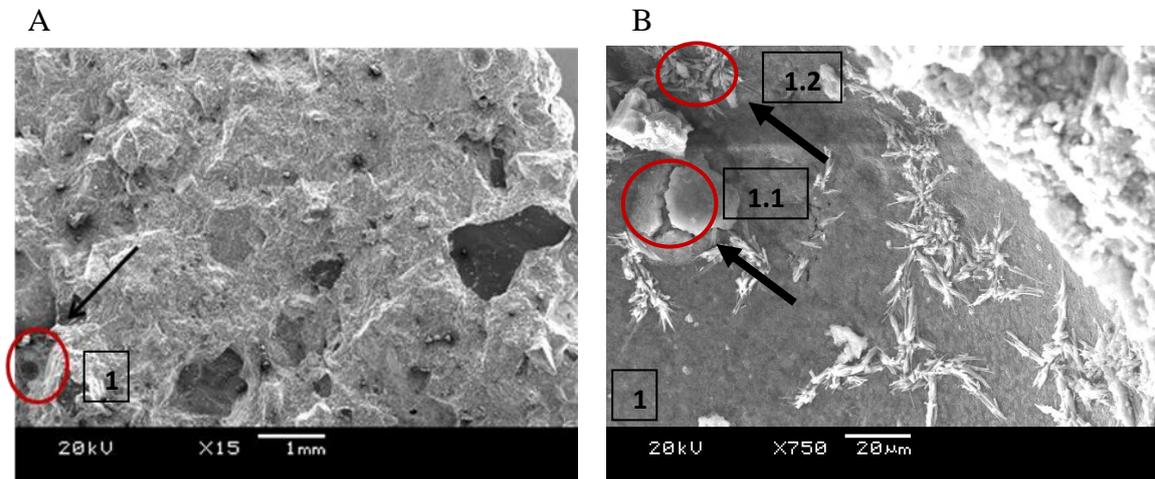


Figura 53 - Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa somente com CPIV visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).

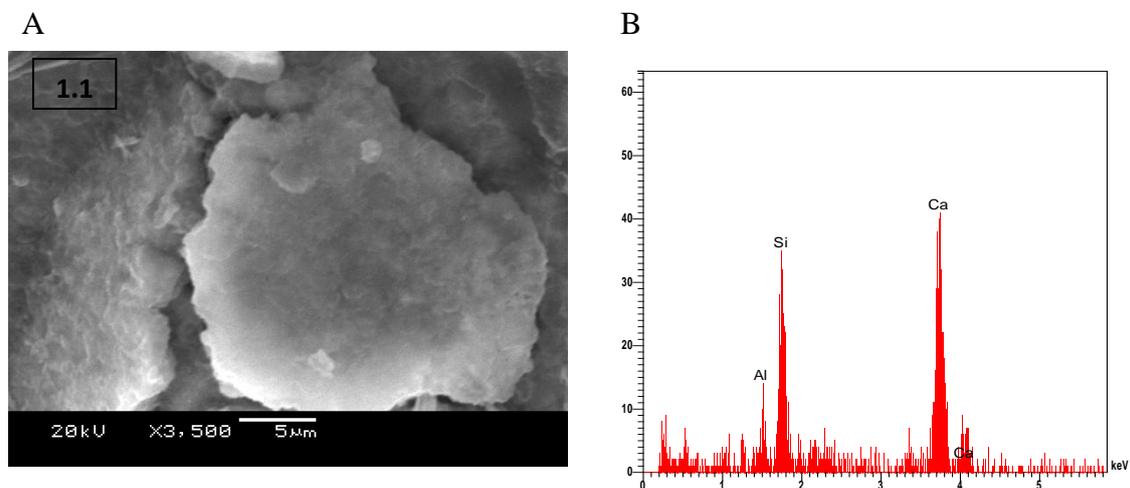


Figura 54 - Micrografia (A) e EDS (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).

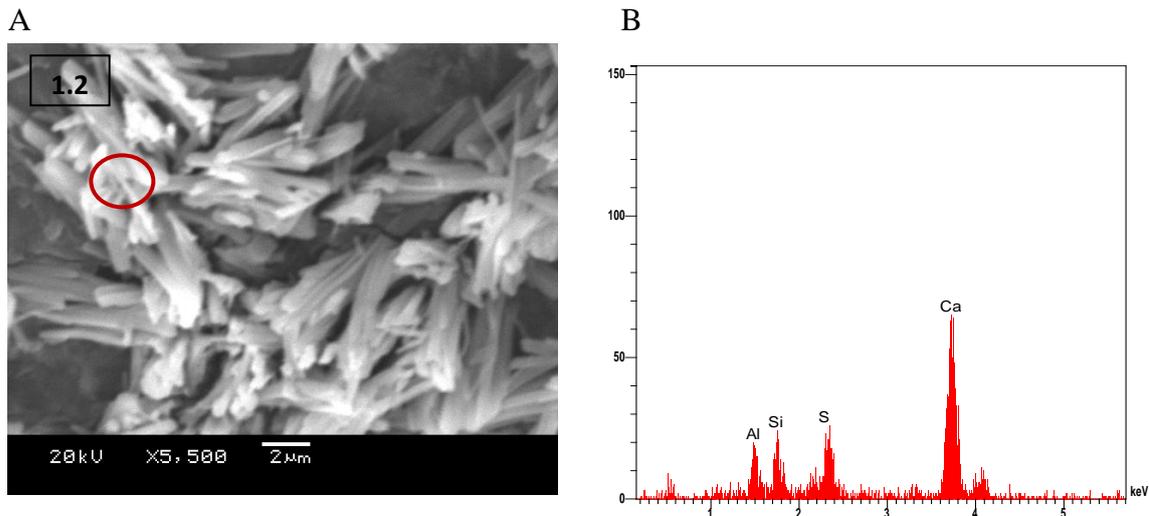


Figura 55 - Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.2).

Na microscopia da amostra de CPIV com CCA moída não foram encontrados produtos que caracterizem a RAS. O poro dessa amostra apresenta uma estrutura bastante densa com algumas microfissuras (Figuras 56 e 57). O EDS da micrografia representada na figura 57 mostra que a camada de recobrimento desse poro apresenta relação $Ca/Si > 1$. As investigações feitas pela MEV na amostra de CPIV com CCA moída não identificaram a presença de estruturas rendadas, em comparação a mistura de cimento padrão com CCA moída.

As figuras 56 e 57 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de CPIV com CCA moída.

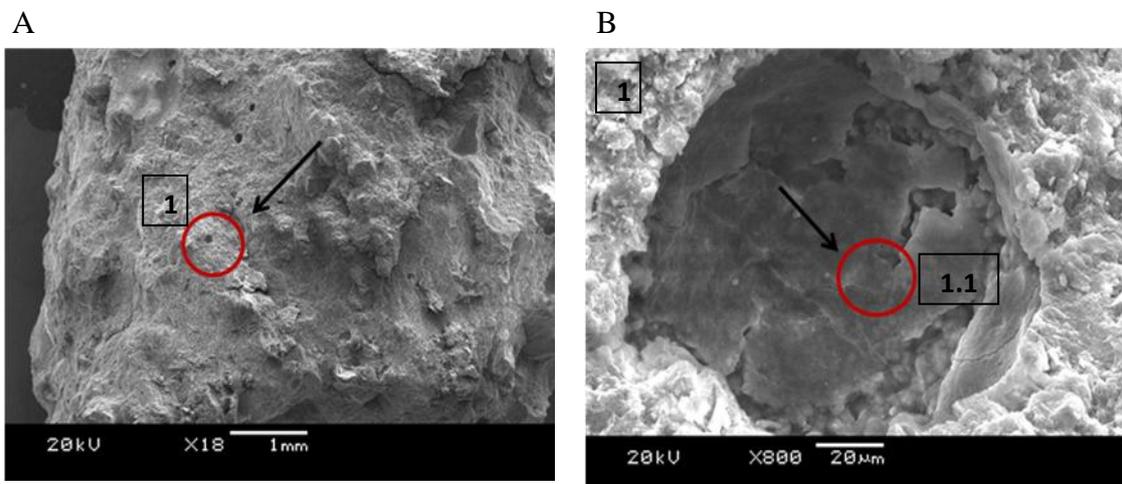


Figura 56 – Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CPIV com CCA moída visualizando-se o ponto 1 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1) (B).

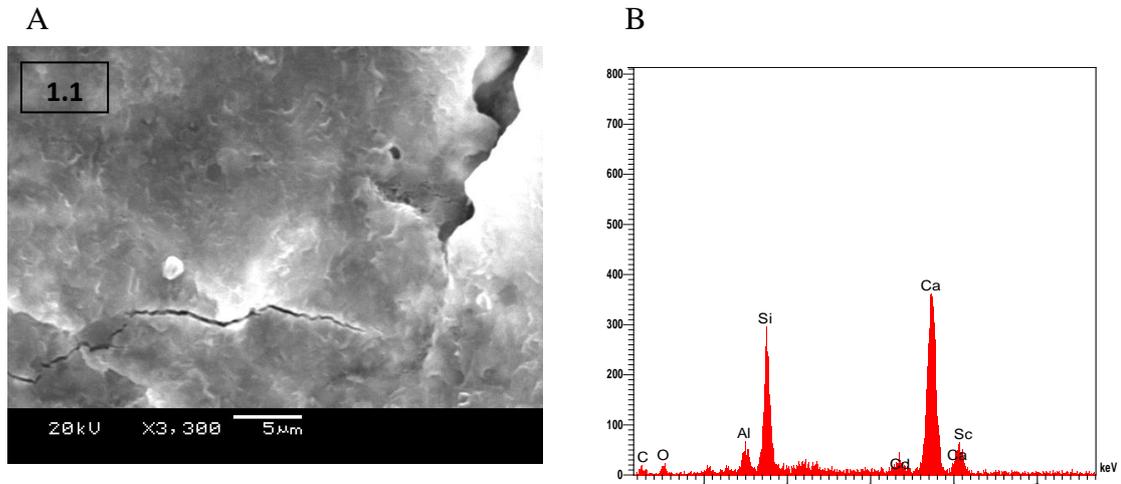


Figura 57 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).

Na microscopia da amostra de CPIV com CCA natural foram identificados em seus poros focos de um produto com forma de placas finas cristalizadas e translúcidas (Figuras 59 e 61), sendo estas não encontradas nas amostras anteriores. O EDS desse produto apresenta um teor $\text{Ca/Si} \approx 1$ e composição sílico-cálcico-alcálica semelhante à morfologia do gel proveniente da RAS.

As figuras 58, 59, 60, 61 e 62 representam as amostras coletadas das barras de argamassa da mistura de CPIV com CCA natural.

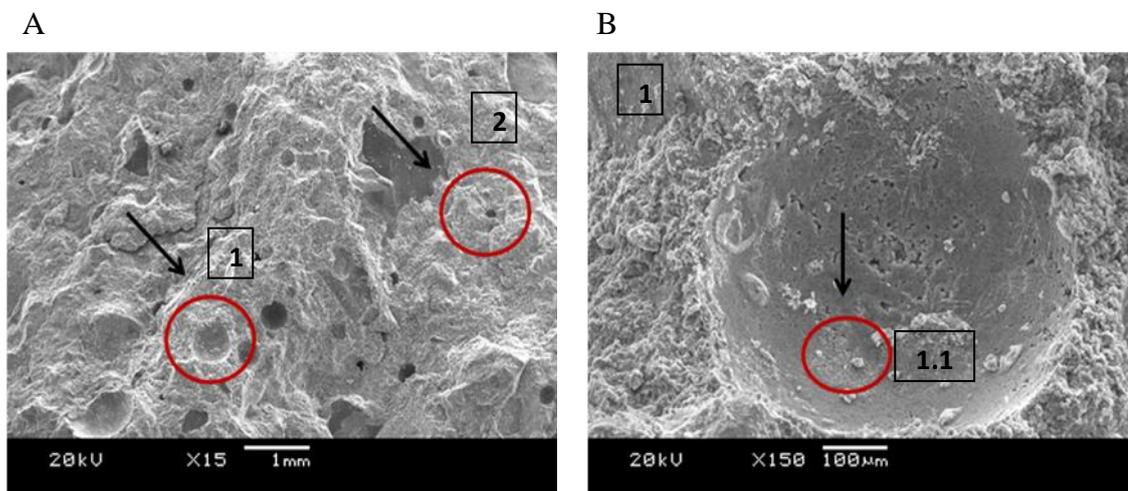


Figura 58 – Micrografia geral da amostra extraída das barras de argamassa da mistura de CPIV com CCA natural visualizando-se os pontos 1 e 2 (A) e micrografia no poro da amostra (ponto 1).

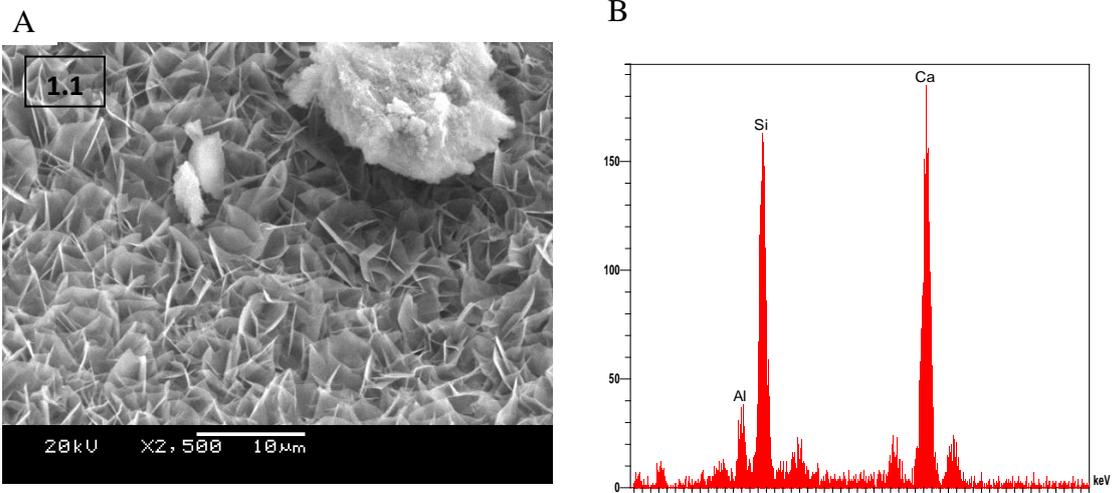


Figura 59 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 1.1).

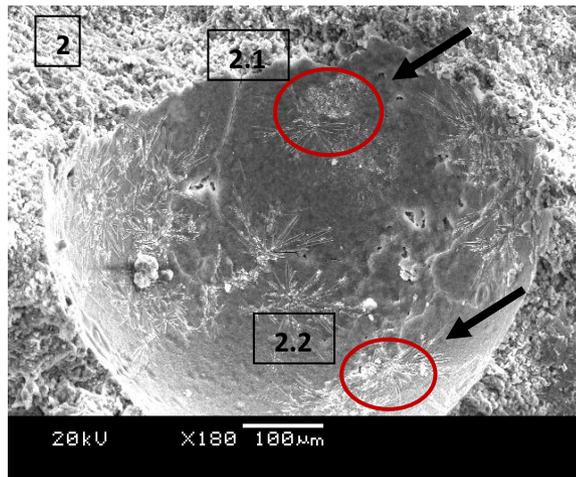


Figura 60 – Micrografia no poro da amostra (ponto 2).

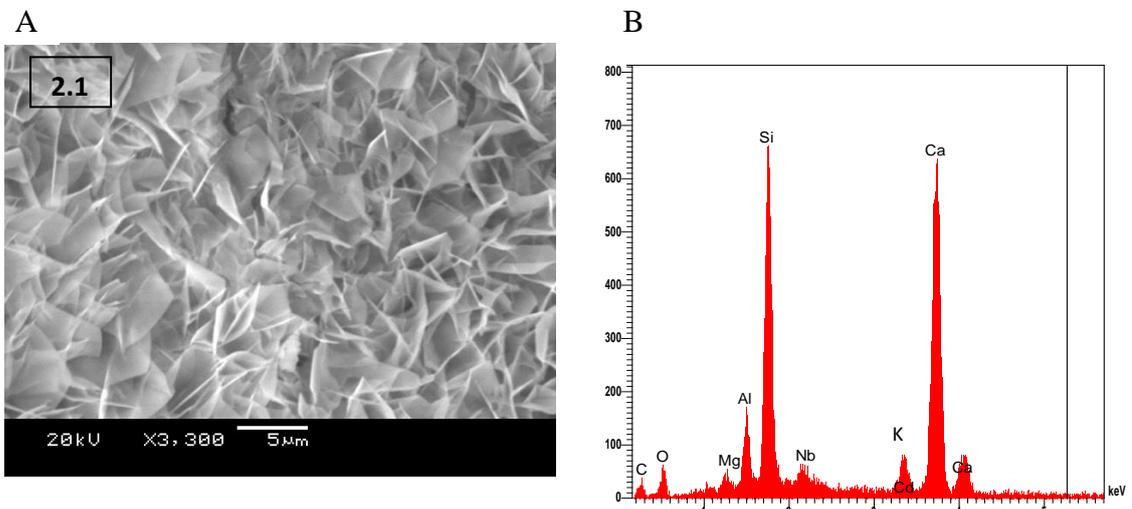


Figura 61 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 2.1).

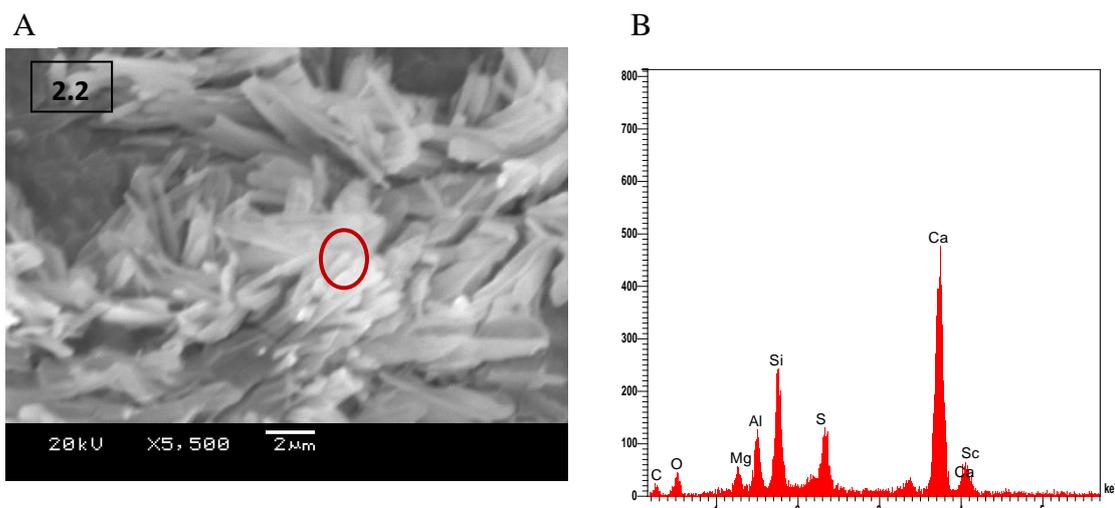


Figura 62 – Micrografia (A) e ED-S (B) no poro aproximado da amostra (ponto 2.2).

Alguns produtos semelhantes aos encontrados nas figuras 59 e 61 foram demonstrados por Sabbag (2003) nas micrografias referentes às amostras extraídas da galeria de inspeção da barragem de Mascarenhas. Nessas amostras do estudo de Sabbag (2003), submetidas ou não ao ensaio de reatividade em solução de NaOH, foram encontrados dentro do poro do concreto produtos da RAS “rosáceas” que apresenta uma composição sílico-cálcico-alcálica identificada pelo EDS. Analisando os resultados obtidos através da utilização do MEV, pôde-se concluir que, a barragem em estudo apresentou produtos com morfologias e composições químicas típicas da RAA, tendo como principal produto, encontrado nos poros do concreto e em certas ocasiões sobre o agregado, um gel gretado e botrioidal e seus produtos cristalizados, com morfologia rendada, fibras entrelaçadas, aciculares e rosáceas.

A EDS mostrou que os géis e os produtos cristalizados eram compostos de silício, cálcio e álcalis (sódio e/ou potássio), os quais apresentaram-se tanto no estado amorfo, com relações K/Ca ou $Na/Ca < 1$, quanto nas morfologias e cristalizações distintas, com relações K/Ca ou $Na/Ca > 1$.

No poro da figura 60 também foram encontradas aflorações de cristais aciculares típicas de etringita (Figura 62 A). O EDS (Figura 62 B) confirma quimicamente esse composto.

Nas amostras de CPIV com CCA natural não ficou verificada a presença do gel gretado nem produtos com forma estufada, rendada e fissurada no poro. Este fato acredita-se ser devido ao alto teor de cinza volante presente no cimento CPIV que criou na mistura uma nova alteração química gerando produtos oriundos da RAS, diferentes daqueles observados na mistura de CPII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural, tornando assim, as barras de

argamassa ainda menos expansivas. Através dessa análise microscópica é possível visualizar e identificar o processo de interação das adições minerais nas misturas de argamassa ativadas pelo ensaio de RAS.

Portanto, analisando os resultados físicos e microscópicos nas barras de argamassa percebeu-se que os produtos da RAS encontrados nas amostras de fratura através do MEV apresentaram-se de diversas formas, podendo ser encontradas tanto as fases amorfas quanto as cristalizadas. As diferenças entre estas morfologias podem estar relacionadas com os diferentes estágios em que se encontram, ou com o tipo de aglomerante utilizado. Acredita-se que o gel com aspecto gretado trata-se de uma das formas mais expansivas, uma vez que esta característica gretada deve-se à secagem da amostra, denotando a elevada umidade presente. Por isso, quanto maior o teor de água presente, maiores são as expansões geradas. Segundo Diamond (1989), o gel amorfo pode ser convertido em produtos cristalizados. De acordo com esse autor é possível que estas fases cristalizadas constituam produtos secundários incapazes de contribuir para novas expansões e fissurações. Corroborando está o fato das amostras menos expansivas, com elevados teores de adição pozolânica, apresentarem menor incidência de géis gretados e uma maior incidência de produtos cristalizados nos poros, tais como a etringita, as finas placas translúcidas e os cristais entrelaçados.

5.1.12 Difração por raios-X

Nesta etapa foram analisadas algumas amostras extraídas das barras de argamassa após ensaio de RAS. Os difratogramas das misturas estão agrupados para o mesmo tipo de cimento. O objetivo principal desta análise foi observar a variação dos picos cristalinos nas diferentes misturas.

Para melhor visualização, foram retirados dos difratogramas os picos de quartzo que são provenientes da contaminação da amostra por areia.

5.1.12.1 Cimento Padrão

Neste item são apresentados os difratogramas das misturas de cimento padrão, cimento padrão com CCA moída e cimento padrão com CCA natural.

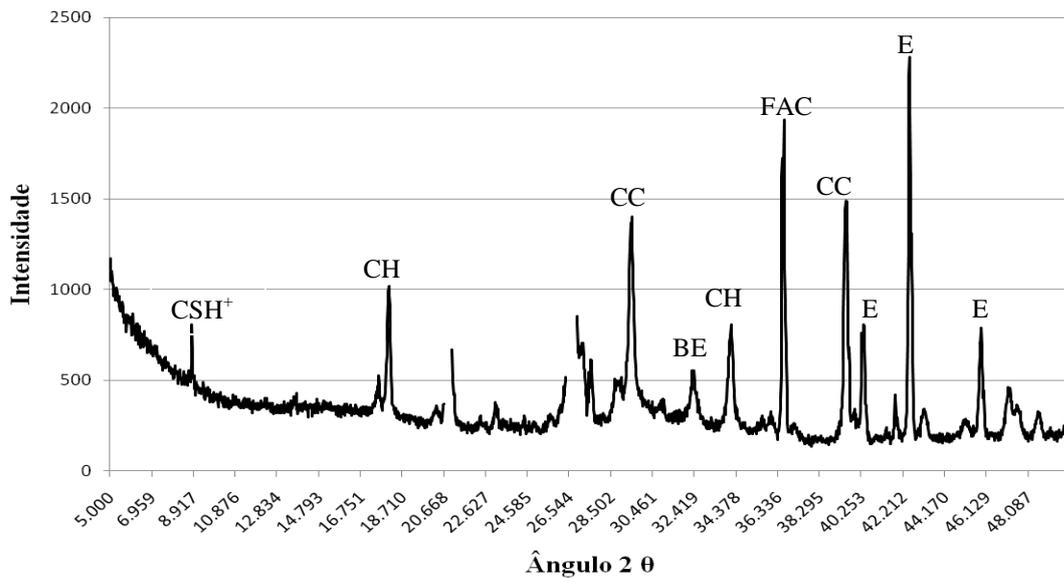


Figura 63 - Difratograma da amostra de cimento padrão. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO₃), BE - Belita – (C₂S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico, CSH⁺ - Silicato de cálcio hidratado - alto cálcio.

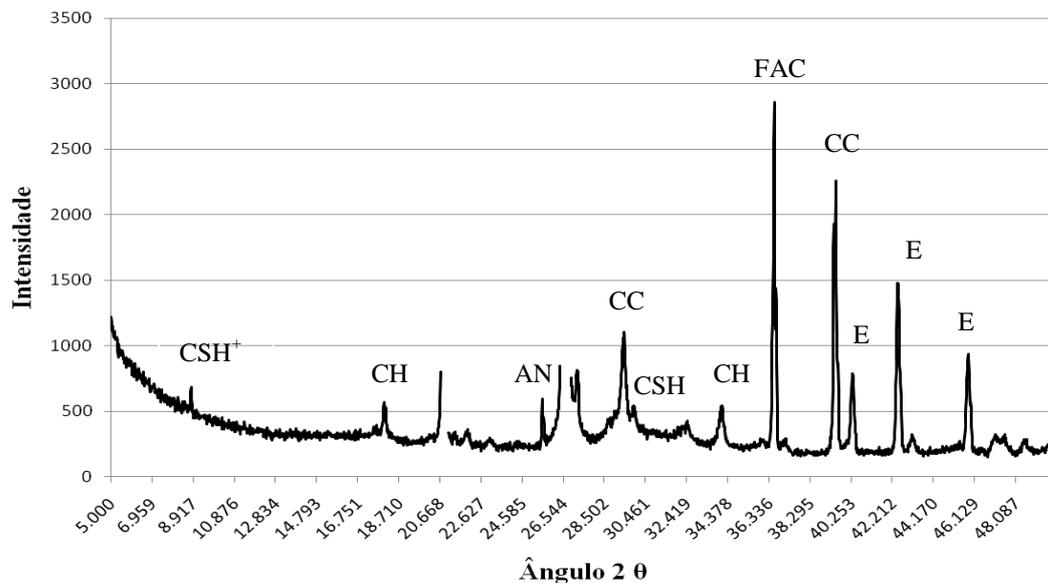


Figura 64 - Difratograma da amostra de cimento padrão com CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, CSH - Silicato de cálcio hidratado, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO₃), BE - Belita – (C₂S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico, CSH⁺ - Silicato de cálcio hidratado - alto cálcio, AN – Anidrita.

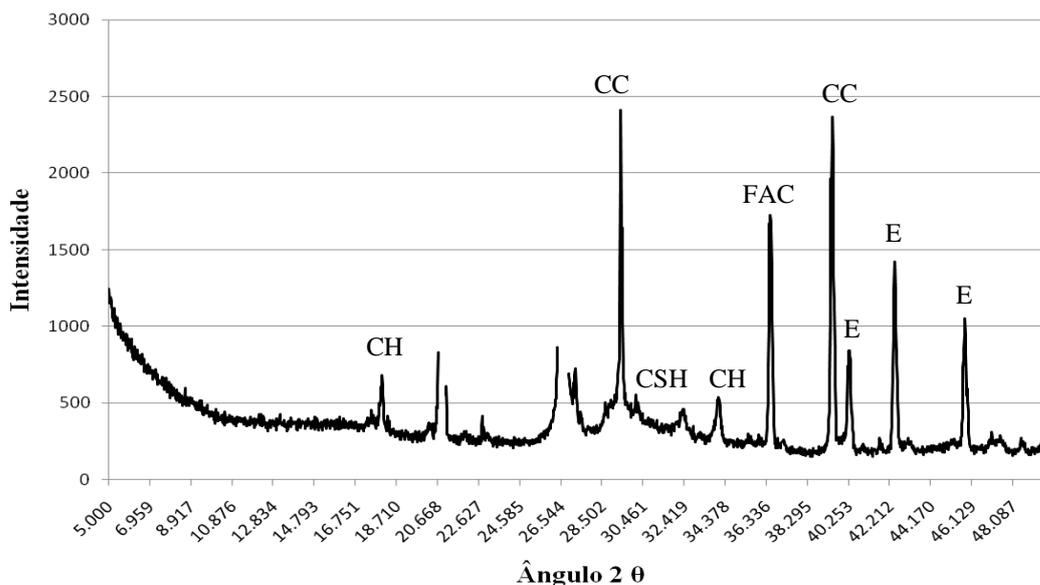


Figura 65 - Difratoograma da amostra de cimento padrão com CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, CSH - Silicato de cálcio hidratado, E - Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita - (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

A investigação feita pela DR-X identificou que a amostra somente com cimento padrão apresenta picos de CH com maior intensidade que as misturas com CCA (Figura 63). Essa amostra também apresenta um pico de CSH com alto teor de cálcio que diminuiu de intensidade nas demais amostras (Figuras 64 e 65). A extinção desse pico de CSH^+ ocorre devido às reações pozolânicas proporcionadas pelas CCA adicionadas ao cimento padrão. Essas reações tendem a equilibrar o teor de Ca e Si do novo CSH secundário formado.

As amostras de cimento padrão com CCA natural e moída (Figuras 64 e 65) apresentam um pico de CSH que não foi perceptível na amostra somente com cimento padrão (Figura 63). Esse fato provavelmente ocorreu devido ao efeito pozolânico das CCA que consomem o CH para formação de CSH secundário, logo no estado amorfo e não cristalino. Observa-se também na figura 65 (CCA natural) em relação a figura 64 (CCA moída) que os picos na primeira figura são maiores do que na segunda figura, indicando que a cinza moída atua como agente de nucleação junto com o filer calcário contido no cimento CII-Z, ocorrendo a formação de um teor mais alto de CSH no estado amorfo.

5.1.12.2 CII-Z

Neste item são apresentados os difratogramas das misturas de cimento tipo CII-Z puro, CII-Z com CCA moída e CII-Z com CCA natural.

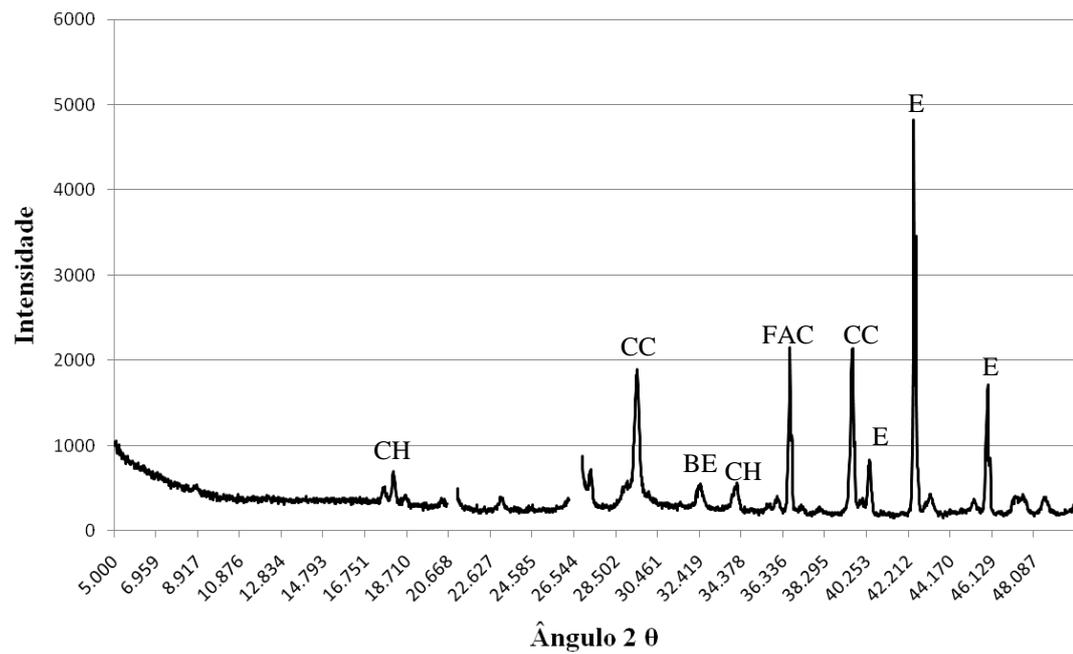


Figura 66 - Difratograma da amostra de CII-Z. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita – (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

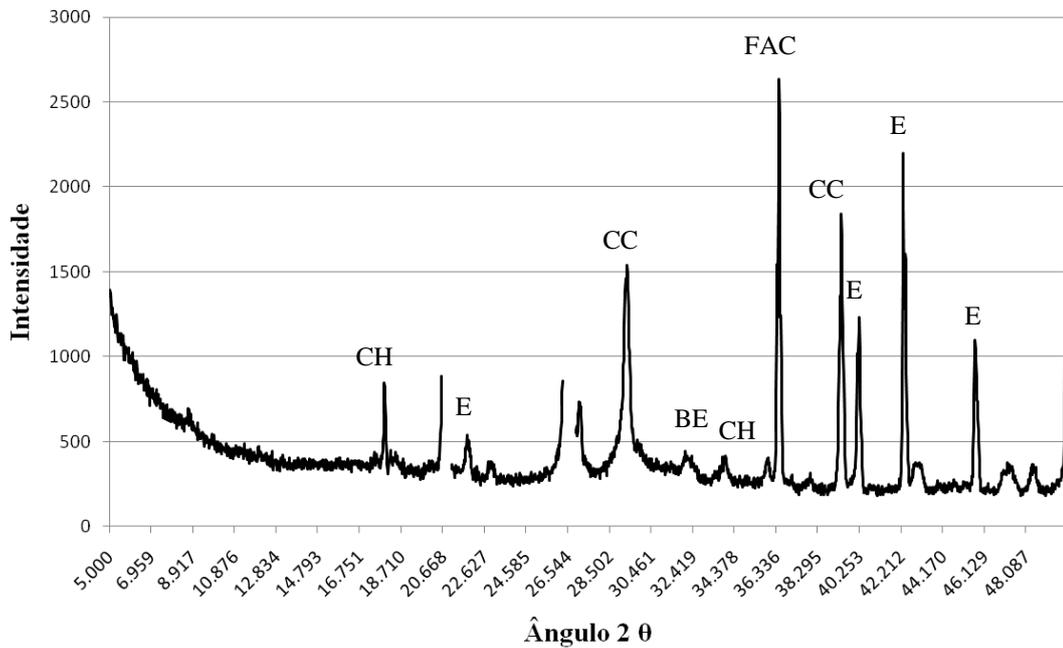


Figura 67 - Difratograma da amostra de CII-Z com CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, E - Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita - (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

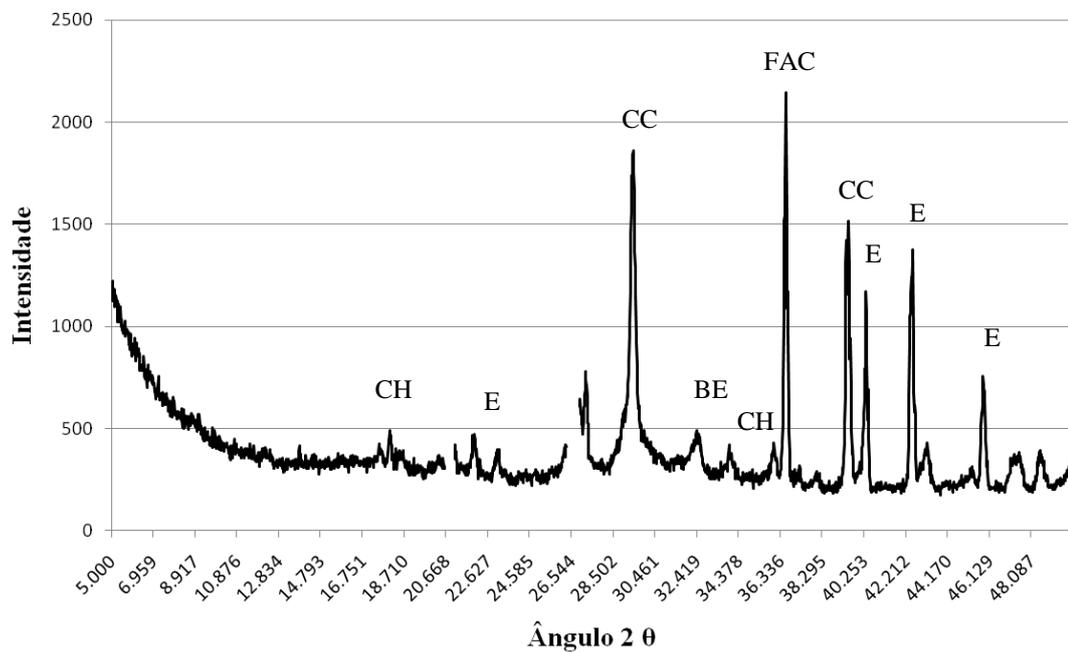


Figura 68 - Difratograma da amostra de CII-Z com CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, E - Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita - (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

A investigação feita pela DRX identificou que a amostra somente com CII-Z apresenta picos de etringita com maior intensidade que as misturas com CCA, mas as amostras com CCA apresentam novos picos de etringita antes não visualizados na amostra

somente com CII-Z (Figura 66, 67 e 68). Paradoxalmente, os picos de CH da figura 68 (CCA natural) são menores do que da figura 67 (CCA moída), entretanto os picos de CC (filer) na cinza natural são maiores do que na cinza moída, conforme acima enunciado.

5.1.12.3 CII-Z com 20 % de cinza volante

Neste item são apresentados os difratogramas das misturas de cimento tipo CII-Z com 20 % de cinza volante, CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA moída e CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural.

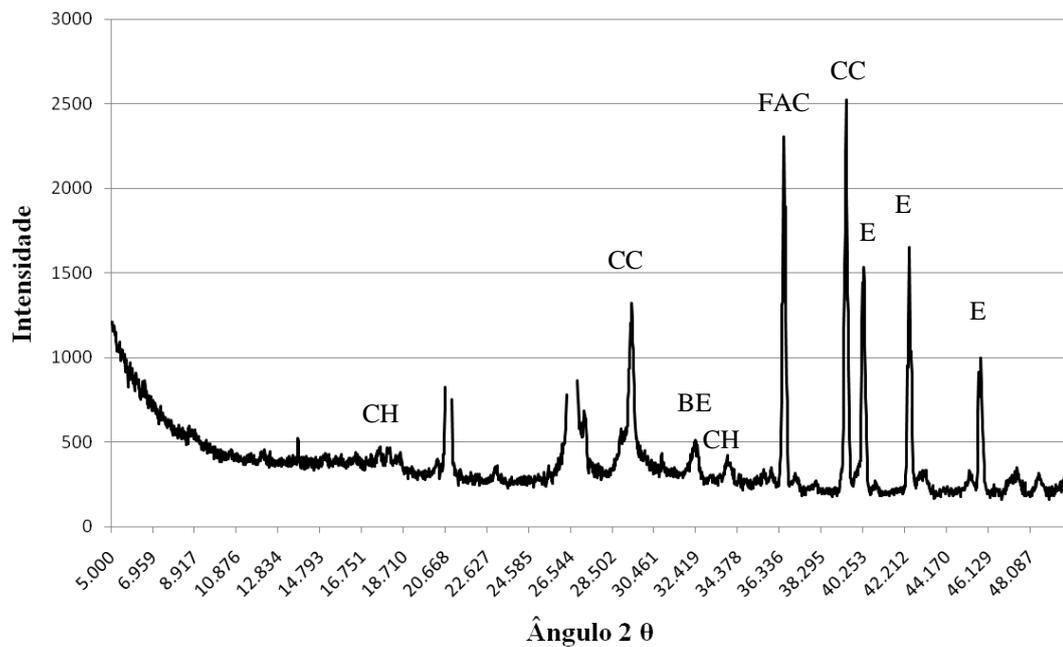


Figura 69 - Difratograma da amostra de CII-Z com 20 % de cinza volante. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita – (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

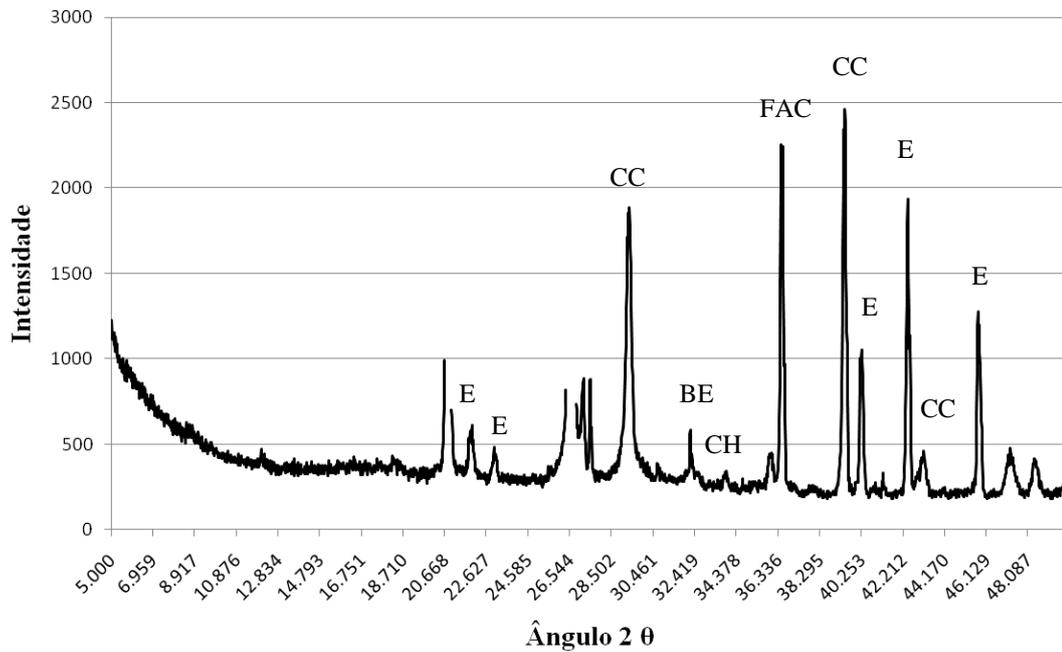


Figura 70 - Difratoograma da amostra de CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita – (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

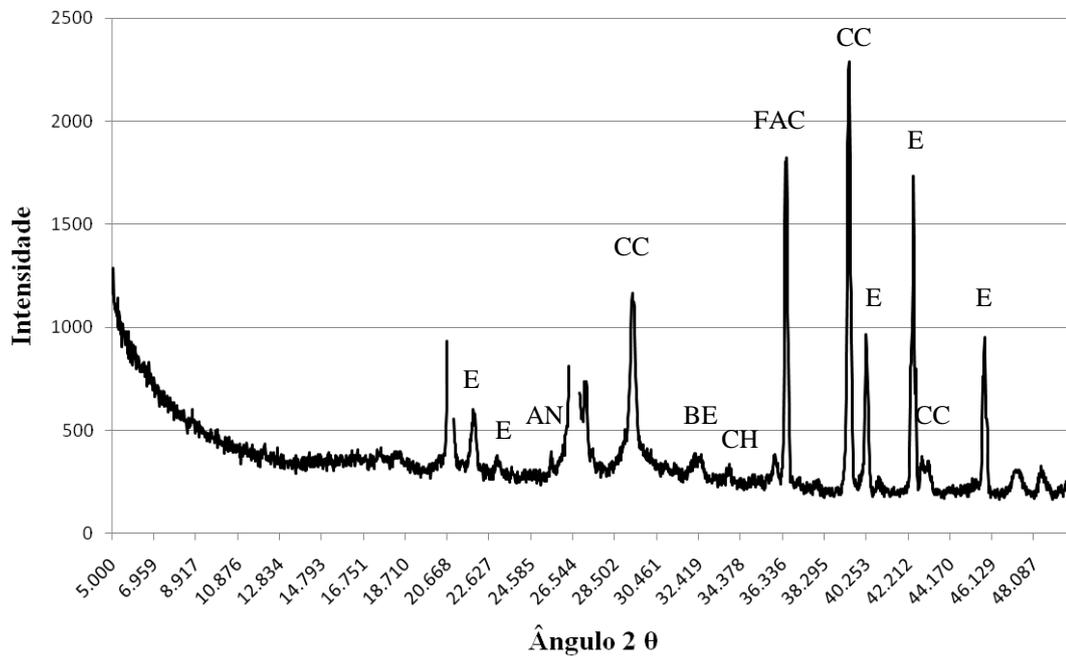


Figura 71 - Difratoograma da amostra de CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita – (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico, AN – Anidrita.

A investigação feita pela DRX identificou que as amostras com CCA natural e moída apresentam novos picos de etringita e menor intensidade nos picos de CH (Figuras 70 e 71), em comparação a mistura de CPII-Z com 20 % de cinza volante.

5.1.12.4 CPIV

Neste item são apresentados os difratogramas das misturas de cimento do tipo CPIV, CPIV com CCA moída e CPIV com CCA natural.

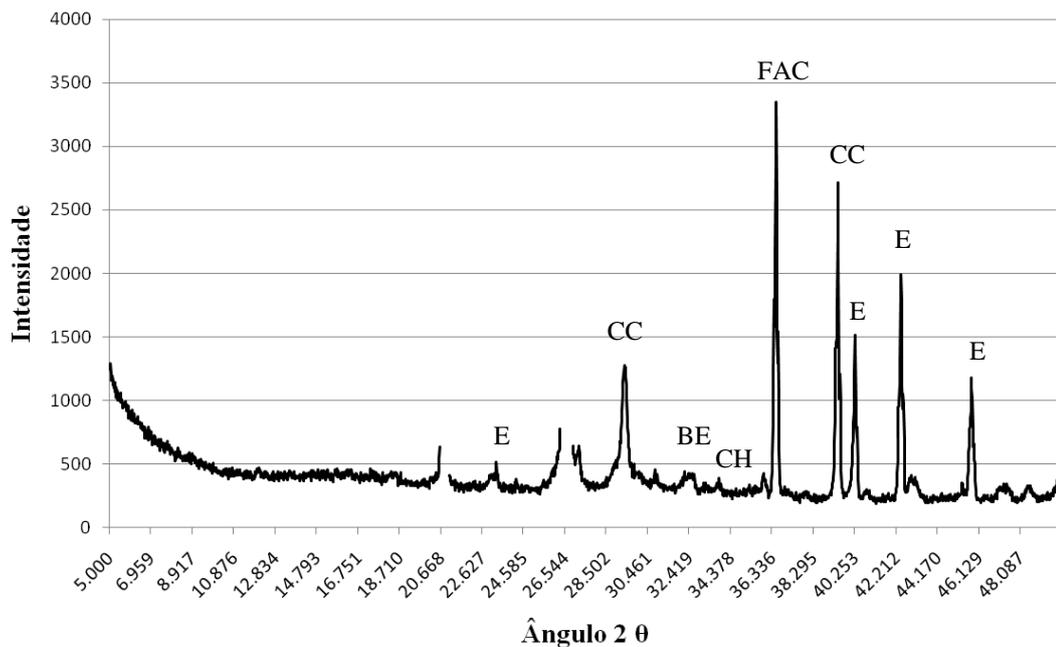


Figura 72 - Difratograma da amostra de CPIV. CH - Hidróxido de cálcio, E - Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita - (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

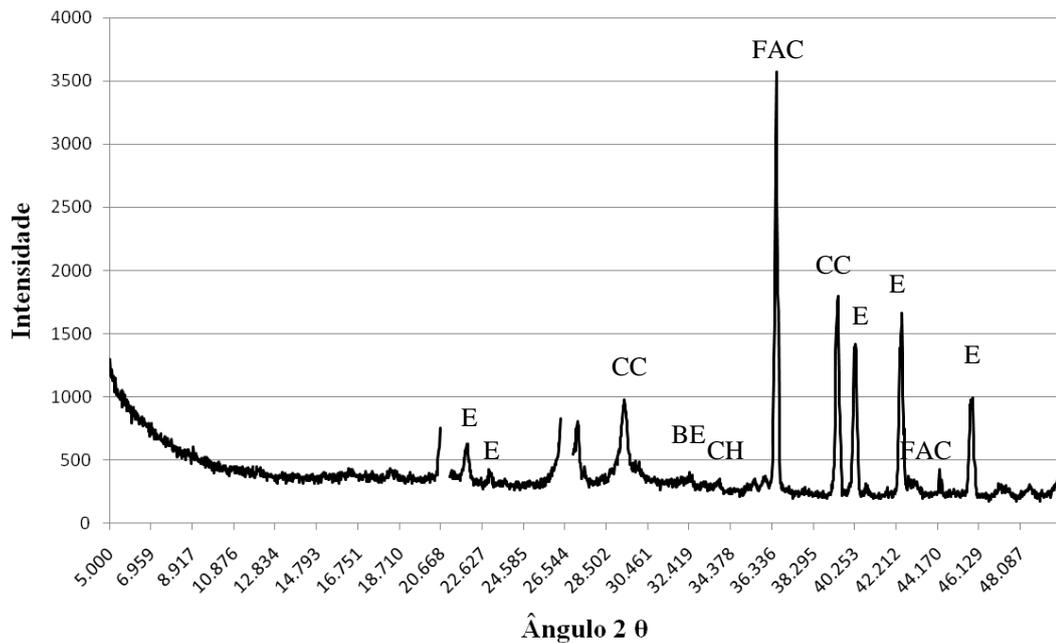


Figura 73 - Difratoograma da amostra de CPIV com CCA moída. CH - Hidróxido de cálcio, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita – (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

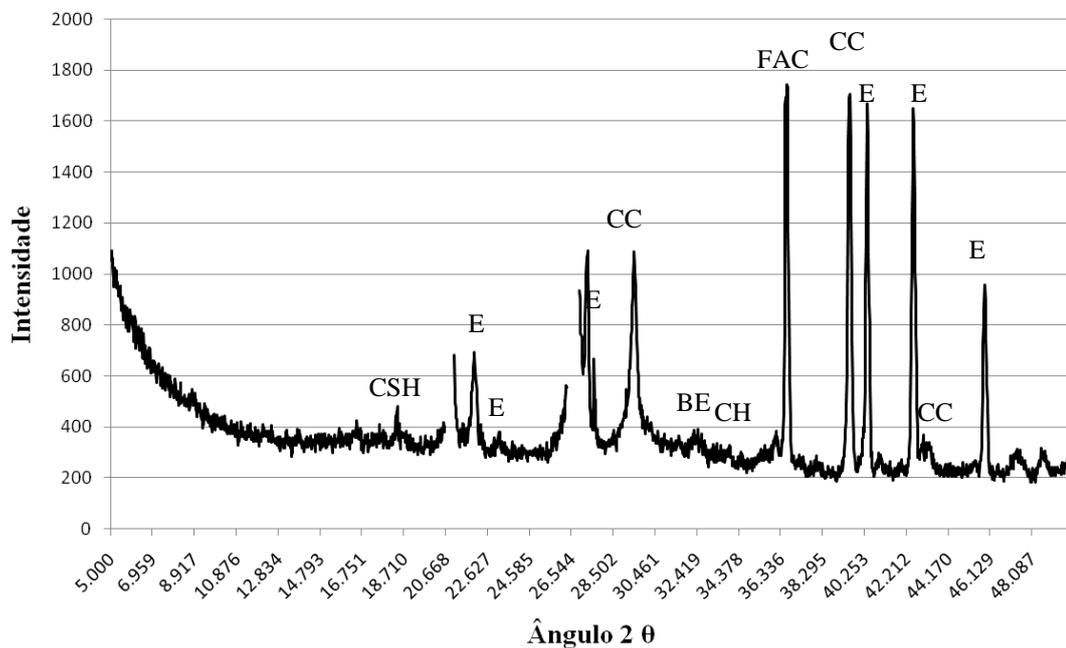


Figura 74 - Difratoograma da amostra de CPIV com CCA natural. CH - Hidróxido de cálcio, CSH - Silicato de cálcio hidratado, E – Etringita, CC - Carbonato de cálcio (CaCO_3), BE - Belita – (C_2S), FAC - ferro-aluminato tetracálcico.

A investigação feita pela DRX identificou que todas as amostras contendo CPIV apresentaram menor quantidade e intensidade dos picos de CH (Figuras 72, 73 e 74). Novamente percebe-se que a quantidade de CC na CCA natural (Figura 74) é maior do que na

CCA moída (Figura 73), devido ao menor poder de nucleação da cinza grossa em relação a fina para a formação de compostos de CSH secundários.

Através dos resultados obtidos na DR-X e associando com os resultados em barras de argamassa e MEV para essa mistura com CPIV, verifica-se que a excelência em mitigar a RAS deve-se a este tipo de cimento apresentar maior teor de adição mineral em sua composição, sendo responsável por consumir o CH remanescente da hidratação do cimento, não o deixando disponível para reagir com a Si reativa responsável pela RAS.

Portanto, a partir dos difratogramas das amostras analisadas evidenciou-se que as misturas de CPII-Z com 20 % de cinza volante e CPIV adicionadas ou não de CCA apresentaram picos de CH em menor quantidade e com menor intensidade que as demais amostras. Esses resultados corroboram com a idéia de diversos autores de que o consumo do CH pelas reações pozolânicas proporcionada pela cinza volante e pelo CPIV teria sido um fator preponderante para a mitigação da RAS. A maior presença de etringita verificada pela MEV nas amostras contendo cimento CPII-Z com 20 % de cinza volante e CPIV adicionadas ou não de CCA, também ficaram evidenciadas pela DRX.

As microanálises, tanto a DRX quanto a MEV em conjunto com a EDS, esclareceram os resultados obtidos no ensaio físico em barras de argamassa. A técnica de DRX no pó extraído das barras de argamassa permitiu identificar algumas diferenças nas fases cristalinas e amorfas das amostras. Ainda a respeito dos métodos de ensaio, as análises em amostras de fratura através do EDS acoplado ao MEV foram ferramentas indispensáveis na investigação da RAS uma vez que permitiram a confirmação da presença de seus produtos formados através das suas características óticas, da morfologia e da composição química. As investigações das amostras através do MEV e EDS também foram importantes na caracterização microestrutural do gel da RAS, permitindo a análise semiquantitativa dos elementos químicos presentes, e sua posterior correlação com as expansões geradas.

5.2 Fase 2 – Ensaios em prismas de concreto

5.2.1 Ensaio em prisma de concreto realizado a temperatura de 38 °C

O ensaio EPC, segundo a ABNT NBR 15577-6:2008 com cimento padrão, foi realizado para investigar a reatividade dos agregados locais. Este ensaio originalmente utilizado para avaliar o potencial reativo dos agregados também foi realizado com o intuito de investigar a reatividade das misturas com CCA natural e aglomerante constituído por cimento tipo CII-Z e cinza volante. Sendo o objeto de análise a CCA natural os dois limites de norma foram usados como critério para classificação desse material.

A figura 75 ilustra comparativamente o comportamento expansivo médio dos prismas de concreto ao longo do tempo, até 1 ano de idade.

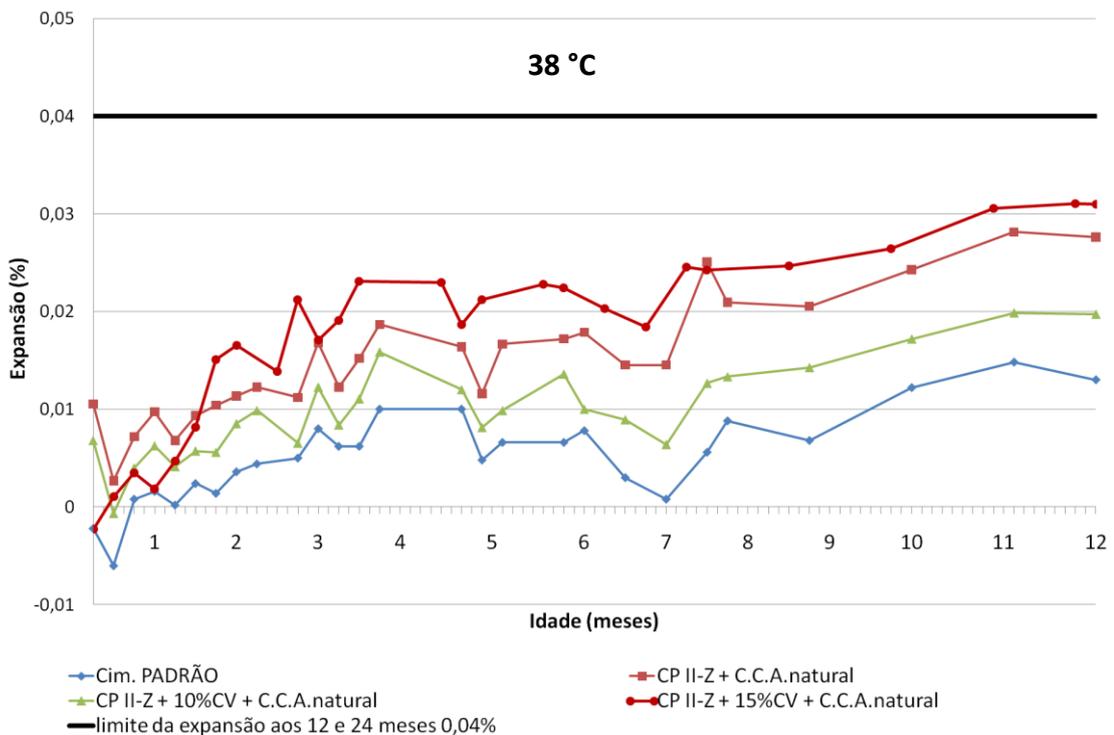


Figura 75 - Expansão em prismas de concreto pelo método ABNT NBR 15577-6, a temperatura de 38°C, utilizando cimento padrão e CII-Z com CCA natural adicionados 0, 10 e 15 % de cinza volante.

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa dos prismas de concreto a 1 ano estão apresentados na tabela 24. Entretanto, segundo a ABNT NBR 15577-6:2008, o ensaio deve prosseguir até e 2 anos.

Tabela 24 - Expansão dos prismas de concreto a 1 e 2 anos e classificação da potencialidade reativa das misturas com CCA natural.

Misturas	Expansão média (%) 1 ano	Classificação NBR 15577-6	Expansão média (%) 2 anos	Classificação NBR 15577-6 com inibidores
Cimento Padrão	0,0130	Inócuo	x	-
CPII-Z + CCA natural	0,0276	Inócuo	x	-
CPII-Z + 10 % cinza volante + CCA natural	0,0197	Inócuo	x	-
CPII-Z + 15 % cinza volante + CCA natural	0,0310	Inócuo	x	-

(-) corresponde a não determinado; (x) corresponde a não concluído

Segundo a ABNT NBR15577:2008, o limite de expansão para a identificação do potencial reativo dos *agregados* em 1 ano é de 0,04 %, enquanto o limite de expansão para identificação dos materiais inibidores em 2 anos é de 0,04 %. Os resultados apresentados na figura 75 demonstraram que a expansão com o traço contendo cimento padrão ficou muito abaixo dos limites exigidos por norma. Na tabela 24, pode-se verificar que os agregados foram considerados potencialmente inócuos.

As misturas que apresentaram maior expansão foram CPII-Z com CCA natural e 15 % de cinza volante, CPII-Z com CCA natural e CPII-Z com CCA natural e 10 % de cinza volante, respectivamente. Esses resultados obtidos não são conclusivos para essas misturas, devendo ser avaliados no período de 2 anos, conforme o exigido por norma. No entanto, os resultados mostraram não existir uma relação entre o aumento do teor de adição de cinza volante a mistura com a diminuição da expansão. Diferentemente, Thomas et al. (2007), no ensaio EPC, verificaram que os teores de 15, 20 e 25 % de cinza volante em substituição ao cimento, reduziram a expansão nos prismas confeccionados com agregado reativo, sendo essa redução proporcional ao aumento da adição. Entretanto, somente teores de 20 e 25 % foram

capazes de reduzir a expansão abaixo do limite estabelecido por norma, mitigando o efeito expansivo desse agregado. Contudo, os resultados preliminares obtidos nesse ensaio mostram haver um teor ótimo de adição de cinza volante (6 a 24 %, isto é, 6 a 14 % contida no cimento CII-Z adicionada de 10 % de cinza volante externamente), que quando ultrapassada, causa efeito indesejado, pois retorna a aumentar a expansão.

5.2.2 Ensaio EAPC realizado a temperatura de 60 °C

O ensaio acelerado em prismas de concreto EAPC (TOUMA et al., 2001; FOURNIER et al., 2004) envolvendo cimento padrão foi realizado para investigar mais rapidamente o potencial reativo dos agregados. O ensaio com CCA natural e cimento tipo CII-Z e cinza volante também foi realizado para investigar a reatividade dessas misturas mais rapidamente. Sendo o objeto de análise a CCA natural os dois limites propostos foram usados como critério para classificação desse material.

A figura 76 ilustra o comportamento expansivo médio dos prismas de concreto ao longo do tempo.

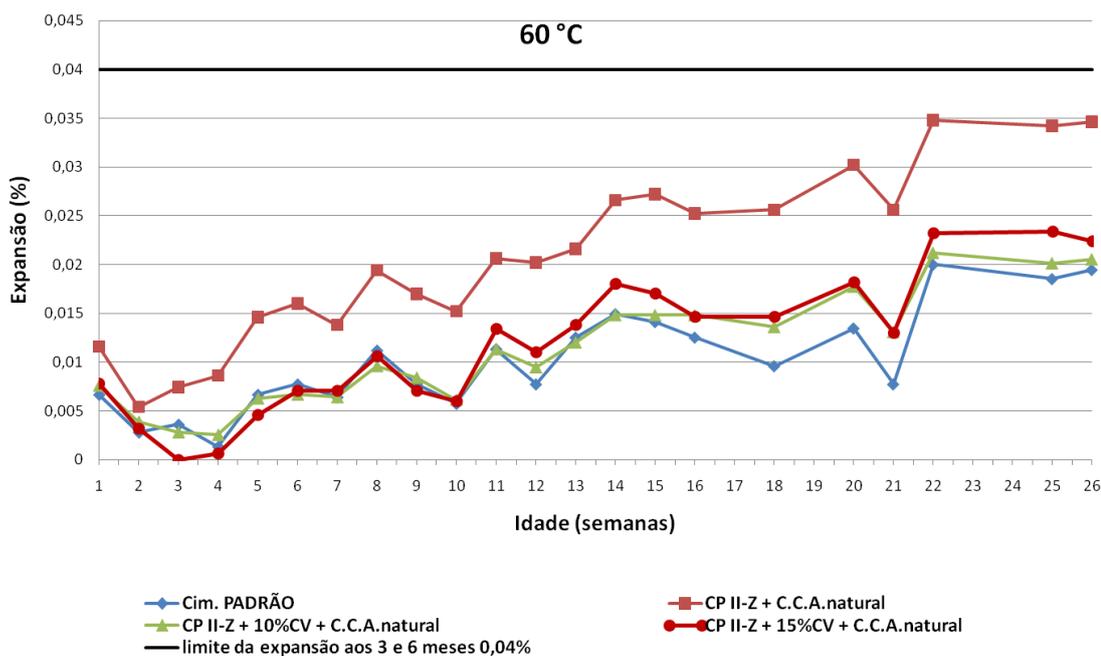


Figura 76 - Expansão em prismas de concreto pelo método acelerado (Touma et al., 2001; Fournier et al., 2004) a 60°C com cimento padrão e CII-Z com CCA natural adicionados 0, 10 e 15 % de cinza volante.

Os resultados contendo a expansão média (%) e a classificação da potencialidade reativa dos prismas de concreto aos 3 e 6 meses de acordo com Touma et al. (2001) e Fournier et al. (2004) estão na Tabela 25.

Tabela 25 - Porcentagem de expansão dos prismas de concreto aos 3 e 6 meses e classificação da potencialidade reativa das misturas com CCA natural.

Misturas	Expansão média (%) 3 meses	Classificação reatividade	Expansão média (%) 6 meses	Classificação com inibidores
Cimento Padrão	0,013	Inócuo	0,020	Inócuo
CPII-Z + CCA natural	0,022	Inócuo	0,035	Inócuo
CPII-Z + 10 % cinza volante + CCA natural	0,012	Inócuo	0,021	Inócuo
CPII-Z + 15 % cinza volante + CCA natural	0,014	Inócuo	0,023	Inócuo

Segundo dados dos dois pesquisadores mencionados anteriormente, o limite de expansão é de 0,04 % aos 3 meses para identificação do potencial reativo dos agregados, enquanto o limite de expansão é de 0,04 % aos 6 meses para identificação dos materiais inibidores.

Pelo método de investigação dos EAPC, os resultados apresentados na figura 76 mostram que o traço com cimento padrão ficou muito abaixo dos limites exigidos pela norma. Na tabela 25, pode-se verificar que na décima terceira semana (3 meses), os agregados foram considerados potencialmente inócuos.

A mistura de CPII-Z com CCA natural apresentou maior expansão, em comparação com as demais misturas investigadas, mas se mantém abaixo do limite proposto por este ensaio (Figura 76). Além disso, as misturas de CPII-Z com CCA natural adicionadas de 10 e 15 % de cinza volante mostram melhor resultado a mitigação da RAS, comparadas à mistura de CPII-Z com CCA natural (Figura 76). Assim como os resultados apresentados para o traço com cimento padrão, todas as misturas mostraram ser inócuas para as duas idades avaliadas, baseado no EAPC (Tabela 25).

Com relação aos métodos de investigação da RAS, constatou-se haver discordância em seus resultados, uma vez que, as investigações realizadas em barras de argamassa (Fase 1) identificaram que a cinza volante é uma adição mitigadora da RAS, e seu efeito aumentou proporcionalmente com o aumento do teor de adição. No entanto, os ensaios em prismas de concreto (Fase 2) mostraram haver um teor ótimo de adição de cinza volante que, quando ultrapassado, causa efeito inverso ao desejado. Em adição, pode-se sugerir que a diferença dos resultados nos ensaios pode ser devido à alteração de suas temperaturas. De fato, os ensaios acelerados apresentaram melhores resultados para as misturas com um maior teor de adição. Este acontecimento pode ter ocorrido porque essas misturas atingiram a maturidade mais rapidamente, ficando menos susceptível as deformações causadas pelos produtos expansivos da RAS.

O anexo G apresenta o gráfico com os dados da expansão nos primas de concreto para o método EAPC até o período de 12 meses.

5.3. Fase 1 x Fase 2 – Ensaio em barras de argamassa x Ensaio em prisma de concreto

Baseado nos resultados obtidos em todos os ensaios de RAS pode-se verificar que a adição de CCA natural potencializou o efeito expansivo gerado pela RAS tanto nas barras de argamassa quanto nos prismas de concreto. Portanto, a CCA natural é prejudicial quando utilizada em concreto ou argamassa contendo agregados potencialmente reativos se não for empregada em conjunto com materiais inibidores da RAS.

Este processo pode estar associado ao tamanho das partículas da CCA natural, onde as partículas muito grandes induziriam uma reação entre os álcalis da pasta cimentícia com a sílica da CCA.

Porém não foi possível comprovar que a CCA natural seja a única causadora da RAS, pois não foi identificado pela MEV nenhuma partícula ou aglomerado de material contaminado pelos produtos da RAS. Acredita-se que a CCA natural utilizada no ensaio em argamassa potencializou e não somente gerou os produtos da RAS, pelo fato de sua contaminação com a areia, considerada reativa neste mesmo ensaio. Essa contaminação teria ocorrido na simulação de pré-moagem da CCA residual na betoneira, para que ela atingisse a granulometria semelhante à CCA natural utilizada em concreto. Isso teria ocorrido apesar de ter sido travada a granulometria da areia numa malha 0,149 mm (Tyler 100), pois no próprio

processo de pré-moagem a areia sofria degradação gerando partículas menores passantes na peneira malha 0,074mm (Tyler 200), como ficou identificado pelos picos de quartzo na DRX da CCA natural.

No entanto, acredita-se que o aumento da expansão nas misturas em argamassa e concreto contendo CCA natural, em comparação as demais misturas, tenha ocorrido principalmente devido aos efeitos físicos dessa adição, ou seja, as suas dimensões dos grãos. Dentre os fatores físicos destaca-se a expansão ocasionada pela absorção de água das partículas porosas da CCA natural que é oriunda da CCA residual, a qual apresenta uma estrutura esponjosa, que quando pulverizada por um processo enérgico de moagem, é desintegrada. Entretanto, a CCA natural, por sofrer um processo menos intenso de moagem, apresenta partículas maiores as quais tem resquícios da estrutura esponjosa, quando comparadas a moída em moinho de bolas.

Outro fator seria a demora da ativação pozolânica da CCA natural (efeito tardio) que acarretaria um enfraquecimento da pasta quando iniciada a RAS, tornando a argamassa e o concreto sensíveis as expansões geradas pelos produtos da RAS.

5.4 Fase 3 – Ensaio de Penetração de cloretos

O método de EPCI é apropriado para a investigação de concretos contendo adições minerais, pois representa o comportamento de um material submerso sem influência de mecanismos externos.

A partir dos gráficos (profundidade de penetração x $\sqrt{\text{tempo}}$), obtidos de acordo com o procedimento descrito no item 4.2.3, ilustrados nas figuras 77, 78, 79 e 80, foram obtidas equações de regressão correspondentes às linhas retas de tendências traçadas entre os pontos obtidos pelas profundidades médias de penetração para cada uma das 6 idades. As profundidades médias de penetração das misturas estão apresentados nas tabelas 26, 27, 28 e 29.

Para determinar as profundidades médias de penetração nos CP, foi adotado um coeficiente de variação de 20 % para os resultados válidos. Esse valor de 20 % abrange um maior número de valores, tornando assim os valores das médias mais representativos, mas ainda assim exclui valores muito discrepantes decorrentes de dois fatores: a falha na

impermeabilização da face lateral do CP que provoca uma maior penetração ou o acúmulo pontual de agregados graúdos que provoca uma menor penetração.

O coeficiente de penetração de cloretos por imersão (K') determinado para cada mistura investigada através do EPCI está descritos na tabela 30, bem como as respectivas resistências a compressão axial, obtidas aos 28 dias de cura.

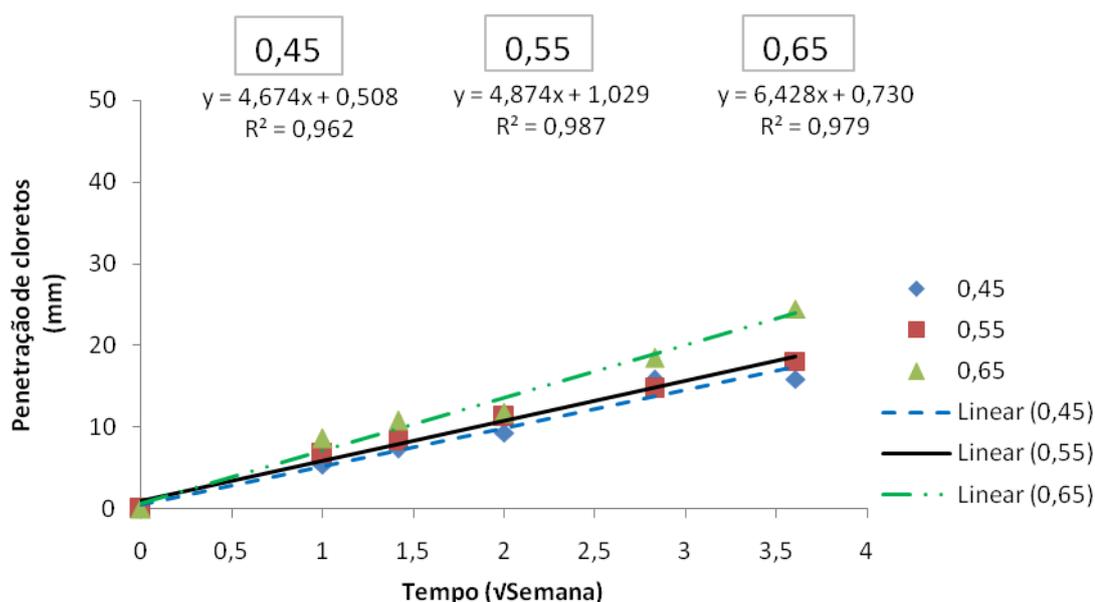


Figura 77– Gráfico para obtenção do coeficiente K' dos traços de CII-Z - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Tabela 26 – Profundidades médias de penetração dos traços de CII-Z - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Tempo de imersão (dias)	Profundidade média de penetração (mm)		
	a/ag 0,45	a/ag 0,55	a/ag 0,65
7	5,38	6,76	8,61
14	7,37	8,3	10,79
28	9,33	11,25	11,78
56	15,81	14,69	18,44
91	15,87	18,06	24,5

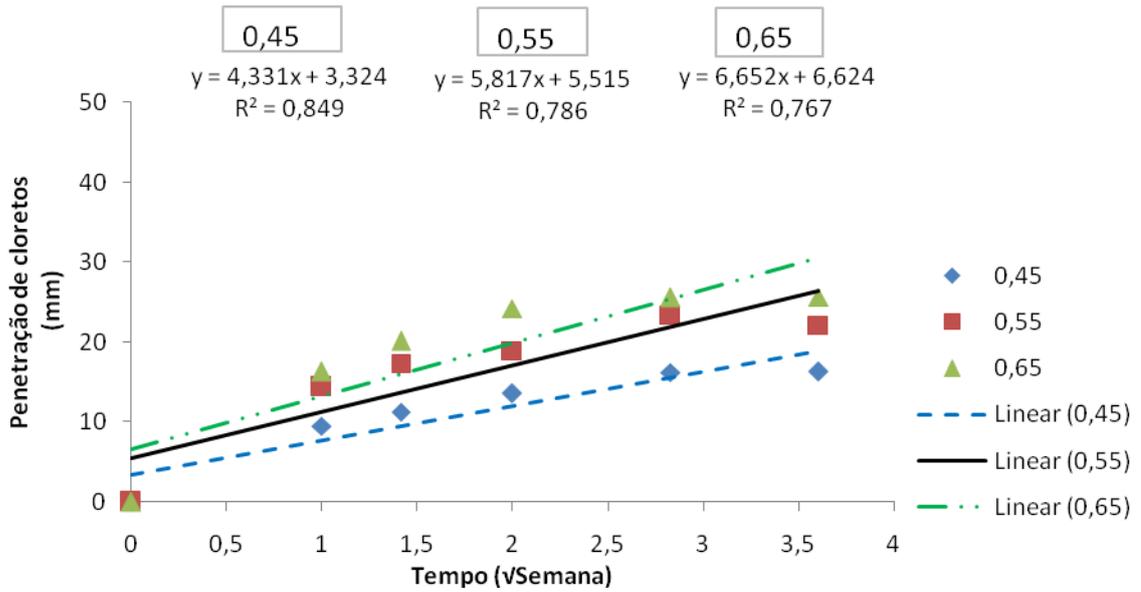


Figura 78 – Gráficos para obtenção do coeficiente K' dos traços de CII-Z com CCA natural e 12,75 % cinza volante - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Tabela 27 – Profundidades médias de penetração dos traços de CII-Z com CCA natural e 12,75 % cinza volante - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Tempo de imersão (dias)	Profundidade média de penetração (mm)		
	a/ag 0,45	a/ag 0,55	a/ag 0,65
7	9,49	14,43	16,31
14	11,31	17,32	20,13
28	13,64	18,93	24,23
56	16,2	23,41	25,56
91	16,3	22,11	25,68

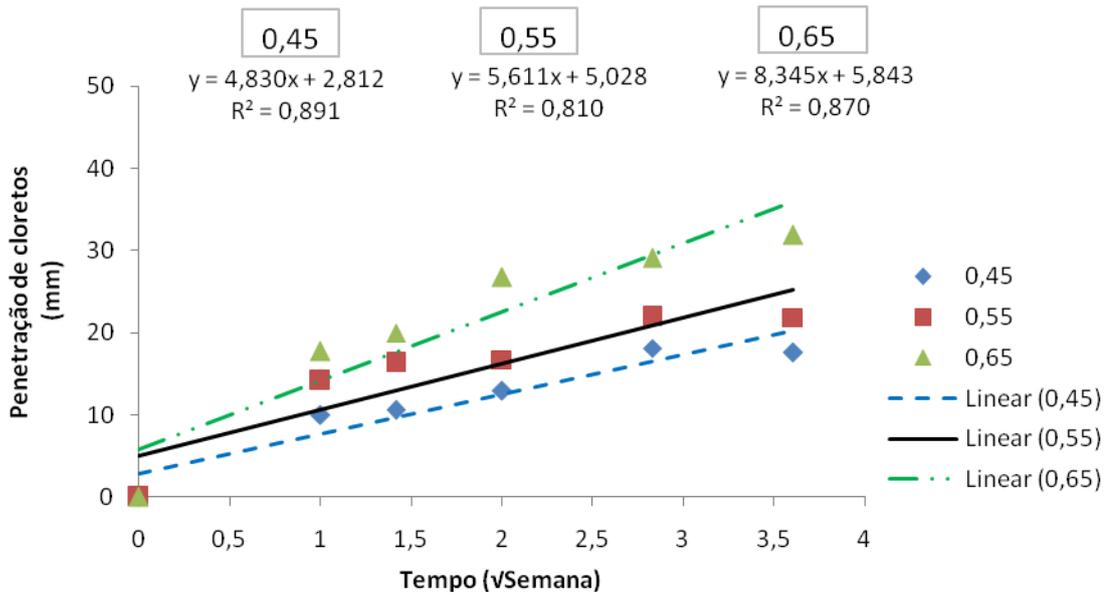


Figura 79 - Gráfico para obtenção do coeficiente K' dos traços de CII-Z com CCA natural e 17 % cinza volante - a/a/g 0,45, 0,55 e 0,65.

Tabela 28 – Profundidades médias de penetração dos traços de CII-Z com CCA natural e 17 % cinza volante - a/a/g 0,45, 0,55 e 0,65.

Tempo de imersão (dias)	Profundidade média de penetração (mm)		
	a/a/g 0,45	a/a/g 0,55	a/a/g 0,65
7	9,95	14,15	17,76
14	10,57	16,32	20,01
28	12,96	16,75	26,8
56	18,16	21,96	29,1
91	17,63	21,86	31,92

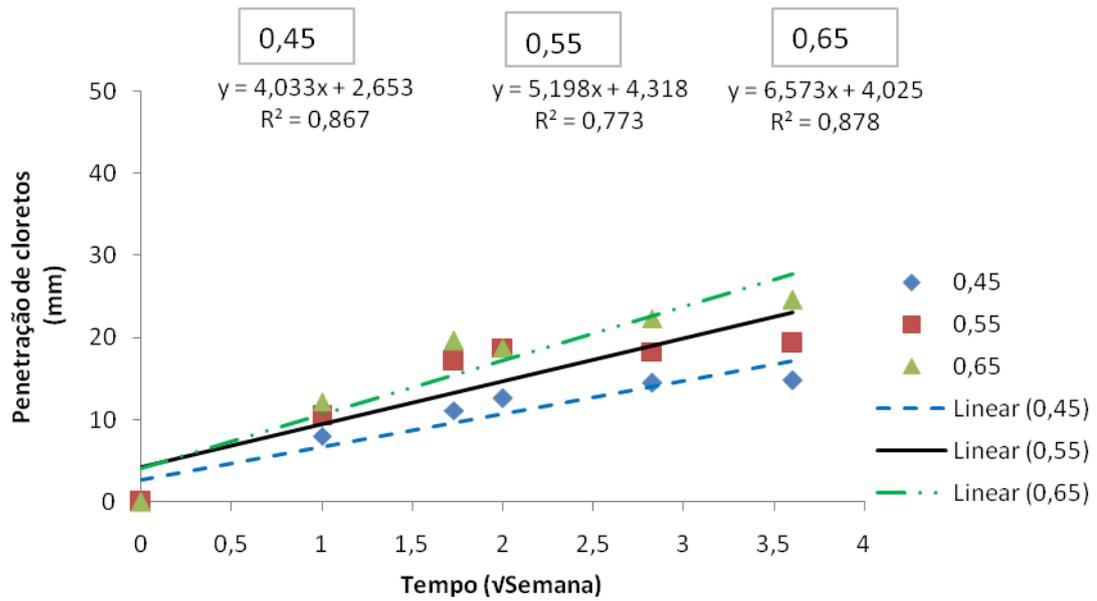


Figura 80 – Profundidades médias de penetração dos traços de CPII-Z com CCA moída - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Tabela 29 – Profundidades médias de penetração dos traços de CPII-Z com CCA moída - a/ag 0,45, 0,55 e 0,65.

Tempo de imersão (dias)	Profundidade média de penetração (mm)		
	a/ag 0,45	a/ag 0,55	a/ag 0,65
7	8,04	10,48	12,24
21	11,11	17,13	19,59
28	12,58	18,76	18,79
56	14,45	18,30	22,37
91	14,78	19,29	24,56

Tabela 30 - Coeficientes de Penetração de Cloretos por Imersão (K') e resistência a compressão aos 28 dias dos traços estudados.

Misturas	a/ag	K'(mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)	Resistência à compressão (MPa)
CPII-Z puro	0,45	4,6744	46
	0,55	4,8749	39
	0,65	6,4285	31
CPII-Z + 15 % CCA natural + 12,75 % cinza volante	0,45	4,3317	38
	0,55	5,8172	25
	0,65	6,6522	16
CPII-Z + 15 % CCA natural + 17 % cinza volante	0,45	4,8301	30
	0,55	5,6112	25
	0,65	8,3452	18
CPII-Z + 15 % CCA moída	0,45	4,0337	38
	0,55	5,1985	33
	0,65	6,5735	28

Os valores apresentados na tabela 30 estão ilustrados, para efeito de comparação, na figura 81.

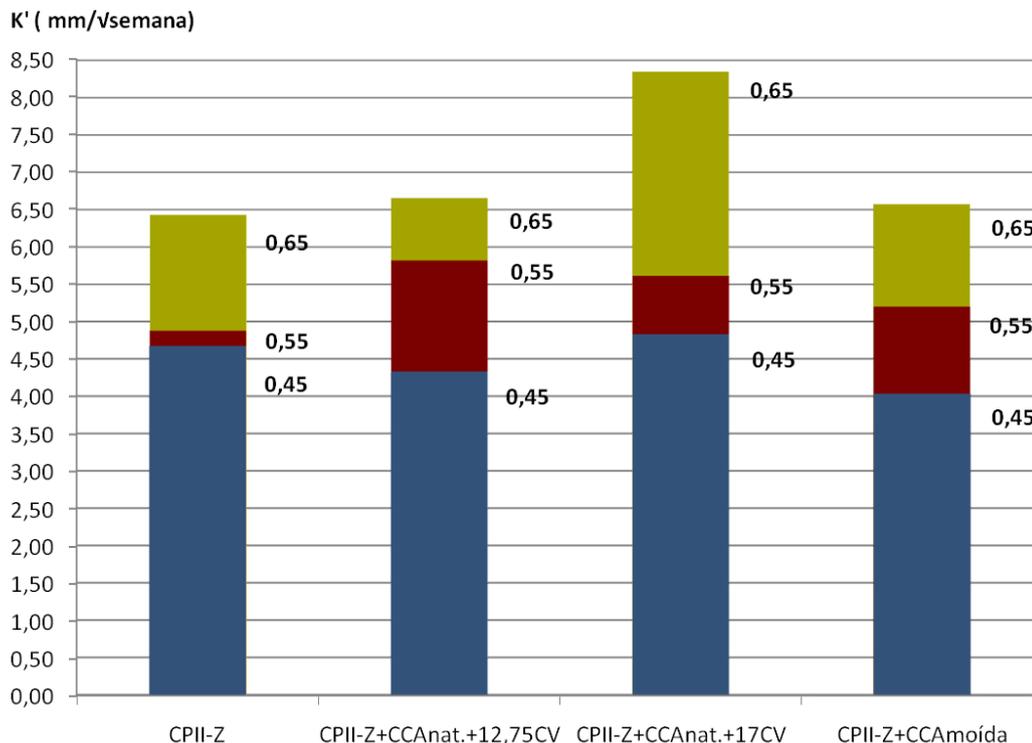


Figura 81 – Coeficientes de Penetração de Cloretos por Imersão (K') dos traços investigados.

A análise comparativa dos resultados do EPCI com base no coeficiente angular da equação da reta (K') evidenciou que:

- Todos os traços apresentaram redução da profundidade média de penetração para as relações a/ag de 0,55 e 0,65 nas últimas idades entre 56 e 91 dias, quando comparados com a mistura de referência (Tabelas 26, 27, 28 e 29). Esse efeito se deve a CCA e a cinza volante proporcionarem ganhos de resistência a penetração em idades mais avançada, à medida que as reações pozolânicas tornam-se mais intensas. O EPCI é controlado pela estrutura de poros e pela capacidade de fixação e restrição à mobilidade dos íons cloreto (WEE et al., 2000). Fernandez (2004) observou que as pastas de cimento Portland adicionadas de pozolanas, apresentam maior porosidade nas primeiras idades, quando comparada com as pastas sem adição. Porém, esta situação muda com o processo de hidratação do cimento, já que aproximadamente após 60 dias ocorre uma inversão e as pastas com adição de pozolanas apresentam porosidade menor, sendo tanto menor a porosidade quanto maior o teor de adição de pozolana. De acordo, Dhir et al. (1994) demonstraram que após 6 meses de exposição em ambiente com íons cloreto, os concretos com teores de substituição entre 25 e 30 % de cinza volante, apresentaram uma redução de 35 % dos íons cloreto solúveis livres na solução dos poros.

- Os traços em concreto contendo CCA moída e natural adicionada de 12,75 % de cinza volante com relação a/ag 0,45 obtiveram o menor K' (Figura 81). Isso pode ser devido ao fato dos traços com menor relação a/ag terem maior consumo de cimento, tendo assim maior quantidade de CH para interagir com a CCA e a cinza volante nas reações pozolânicas, além de maior compactidade por efeito físico.

- O traço com CCA natural e 17 % de cinza volante obteve maior K' para a relação a/ag 0,65 (Figura 81). Fato semelhante ocorreu no estudo de Cesar (2011), no qual o concreto produzido com substituição parcial do cimento por 15 % de CCA natural e 20 % cinza volante (relação a/ag 0,65, cura úmida de 7 dias) apresentou penetrabilidade superior a outras misturas investigadas no ensaio e com menores teores de adições.

- Todas as misturas com a relação a/ag 0,55 e 0,65 obtiveram maior K' , em comparação ao traço de referência de mesma relação a/ag. Entretanto, o valor do K' dos traços com CCA moída e natural adicionada de 12,75 % de cinza volante permaneceram muito próximos aos valores de referência (Figura 81).

Além disso, a análise comparativa dos resultados do EPCI com base no coeficiente angular da equação da reta (K'), com foco na variação da relação a/ag mostrou que:

- Em todos os traços o aumento da relação a/ag provocou um aumento no K' (Tabela 30), pois os íons cloreto se difundem com maior rapidez devido à maior porosidade destes concretos (DHIR et al., 1994). Segundo Ngala et al. (1995), a relação a/ag é o parâmetro principal que influencia a penetração de íons cloretos no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar que se obtém com baixas relações a/ag. Nestes concretos, os íons cloreto são obrigados a propagarem-se por caminhos mais tortuosos e desconexos, o que dificulta o seu ingresso para o interior do concreto.

- Nos traços de CII-Z com CCA natural adicionados de 12,75 ou 17 % de cinza volante, o aumento na relação a/ag não aumentou de forma proporcional o K' . Já no traço com CCA moída, o aumento na relação a/ag proporcionou um aumento no K' de forma percentual, em torno de 30 %.

A análise comparativa dos resultados do EPCI com base no coeficiente angular da equação da reta (K') com foco na resistência a compressão demonstrou que:

- Todos os traços investigados obtiveram resistência acima de 15 Mpa aos 28 dias.
- Apesar de não ter sido feito o ensaio de resistência a compressão em todas as idades investigadas no EPCI, como seria o desejado para que se pudesse analisar a evolução da resistência em conjunto com o K' , foi possível constatar uma relação inversa entre esses

fatores. Os resultados representados na tabela 30 demonstraram que entre as misturas de mesmo aglomerante, o aumento na relação a/ag diminui a resistência a compressão do concreto e, aumentou o K' .

- O traço de referência obteve melhores valores de resistência a compressão em todas as relações a/ag, mas esse comportamento não se repetiu no EPCI, já que as misturas que obtiveram menor K' foram as com CCA moída e CCA natural adicionadas de 12,75 % de cinza volante e relação a/ag. 0,45. De acordo com estes resultados, Dotto (2006) verificou que embora as adições minerais pozolânicas não tenham aumentando a resistência mecânica dos concretos, principalmente a CCA devido a sua baixa qualidade (pequena superfície específica, grande diâmetro médio, baixo índice de pozolanicidade), os concretos com cinza volante e CCA e baixas relações a/ag mostraram-se eficientes. Essa eficiência ocorreu no controle do tempo de iniciação do processo de corrosão ativa no aço embutido nos mesmos, quando induzidos pelos íons cloreto oriundos dos ciclos de imersão e secagem. De acordo, Dhir et al. (1994), o teor de substituição de cinza volante nos concretos é mais importante do que o nível de resistência mecânica, quando o mesmo se encontra exposto em meio contaminado com íons cloreto.

CAPÍTULO VII

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo estão apresentadas as conclusões obtidas com base nos resultados do programa experimental, válidas em princípio para os materiais e condições estudados.

Fase 1

- Expansão em Barras de Argamassa:

- Pelo método acelerado a 80 °C em barras de argamassa conforme NBR 15577, a mistura de cimento padrão com CCA natural se mostrou expansiva, sendo considerada reativa para as duas idades avaliadas.

- A mistura de cimento padrão com CCA moída apresentou uma expansão muito inferior ao limite estabelecido pela norma, sendo considerada inócua para as duas idades avaliadas.

- A investigação dos materiais mitigadores da RAS identificou que a mistura de CPII-Z com CCA natural não diminuiu a expansão nas barras de argamassa, sendo essa também classificada como reativa para as duas idades avaliadas.

- O traço somente com CPII-Z foi considerado inócua para as duas idades avaliadas, porém teve as expansões aos 16 e 30 dias muito próximas as do limite de norma.

- As misturas de CCA natural com CPIII, CPII-Z adicionadas de 10 e 15 % de cinza volante diminuíram a expansão nas barras de argamassa, mas não atenderam o limite de norma, sendo classificadas como reativas para as duas idades avaliadas.

- As misturas de CCA natural com CPIIZ adicionadas de 20, 30 e 40 % de cinza volante se mostraram mitigadoras da RAS e seu efeito aumentou proporcionalmente ao aumento da adição de cinza volante, sendo classificadas como inócuas para as duas idades avaliadas.

- A mistura de CPIV com CCA natural mostrou excelência em mitigar a reação expansiva sendo classificada como inócua para as duas idades avaliadas.

- Análise de MEV e EDS

- A amostra de CCA natural com cimento padrão apresentou gel gretado nos poros semelhante, tanto quimicamente quanto fisicamente, aos produtos característicos da RAS.
- A amostra CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural apresentou vestígios da presença de um produto sílico-cálcico-alcálico característico da RAS, de cristais aciculares sobrepostos típicos de etringita e de uma descamação rica em cálcio nos poros.
- A amostra de CIII com CCA natural apresentou placas finas cristalizadas e translúcidas com a composição sílico-cálcico-alcálica semelhante à morfologia do gel proveniente da RAS e ainda aflorações de cristais aciculares típicos de etringita nos poros.

- Análise de DR-X

- O difratograma da amostra somente com cimento padrão apresentou picos de CH com maior intensidade que as demais amostras, por não haver adições pozzolânicas.
- Os difratogramas das amostras analisadas em geral demonstraram que a quantidade de CC na CCA natural é maior do que na CCA moída, isto pode ser devido ao menor poder de nucleação da cinza grossa em relação à fina para a formação de compostos de CSH secundários.
- Os difratogramas das amostras analisadas demonstraram que as misturas de CII-Z com 20 % de cinza volante e CCA natural apresentaram novos picos de etringita, em comparação a mistura de CII-Z com 20 % de cinza volante.
- Os difratogramas das amostras analisadas demonstraram que as misturas de CII-Z com 20 % de cinza volante e CIII adicionadas ou não de CCA apresentaram picos de CH em menor quantidade e com menor intensidade que as demais amostras.
- O consumo do CH pelas reações pozzolânicas proporcionada pela cinza volante e pelo CIII teria sido um fator preponderante para a mitigação da RAS.

Fase 2

- Ensaio em Prismas de Concreto

- No EPC a 38 °C segundo a NBR 15577-6, os agregados foram classificados como potencialmente inócuos, mesmo a areia usada na confecção dos prismas de concreto ter sido classificada como reativa no ensaio em barras de argamassa a 80 °C.
- As misturas que apresentaram maior expansão em 12 meses foram as de CII-Z com CCA natural e 15 % de cinza volante, de CII-Z com CCA natural e CII-Z com CCA natural

e 10 % de cinza volante respectivamente, entretanto todos os valores abaixo do limite máximo de expansão preconizado pela norma brasileira.

- Esses resultados obtidos não são conclusivos para essas misturas, devendo ser levados até o período de 24 meses conforme o exigido por norma.

- Ensaio Acelerado em Prismas de Concreto

- No EAPC a 60 °C, o traço com cimento padrão ficou muito abaixo dos limites exigidos de 0,04 %, aos 3 meses, classificando com isso os agregados como potencialmente inócuos.

- A mistura de CII-Z com CCA natural apresentou maior expansão, em comparação com as demais misturas investigadas, mas ela se manteve abaixo do limite proposto por este ensaio que é de 0,04 %, aos 6 meses.

- As misturas de CII-Z com CCA natural adicionadas de 10 e 15 % de cinza volante mostraram melhor resultado em mitigar a RAS, quando comparadas à mistura de CII-Z com CCA natural. Além disso, essas misturas se mantiveram abaixo do limite proposto por este ensaio (0,04 %, aos 6 meses).

- Todas as misturas demonstraram-se inócuas para as duas idades avaliadas.

- O efeito benéfico demonstrado nos ensaios acelerados em barras de argamassa (o aumento da proporção da adição de cinza volante no cimento CII-Z, aumenta a eficiência da mitigação da RAS) não ocorreu no ensaio EAPC, já que a mistura com 15 % de cinza volante apresentou uma expansão um pouco maior que a mistura com 10 % de cinza volante. Além disso, pelo ensaio EPC a mistura com 15 % de cinza volante apresenta com mais evidência esse comportamento expansivo. Provavelmente, o teor ótimo de cinza volante adicionada ao CII-Z esteja entre 10 e 15% para ensaios com prismas de concreto

- Apesar de não serem visualizados produtos da RAS nas partículas de CCA natural, os ensaios empregados nesta investigação comprovaram o caráter expansivo da CCA natural. Sendo assim, quando se utilizar CCA natural na produção de concreto, é conveniente se valer de adições minerais e cimentos pozolânicos principalmente quando não houver nenhum estudo de reatividade dos agregados, a fim de evitar problemas devido à expansão gerada pela RAS.

Fase 3

- Ensaio de Cloretos

- As misturas com adições minerais proporcionaram a redução da profundidade média de penetração dos íons cloretos aos concretos com maiores idades.
- Os traços com CCA moída ou natural adicionada com 12,75 % cinza volante (relação a/ag 0,45) obtiveram o melhor resultado.
- Com exceção do traço com CCA natural adicionado de 17 % cinza volante, todos os outros traços obtiveram resultados melhores ou semelhantes, em comparação ao traço de referência.
- Os resultados comprovaram que as misturas com CCA moída ou natural adicionadas de cinza volante atenderam ao requisito de durabilidade frente ao ataque por íons cloretos.

- Conclusão Geral

- Utilizar a CCA natural na produção de concretos conjuntamente com cinza volante, em teores previamente estipulados se mostra viável mesmo quando este estiver em ambientes agressivos, atendendo ao requisito durabilidade. Além disso, o uso da CCA natural se apresenta como um importante contribuinte na busca pela sustentabilidade e preservação do meio ambiente por parte da indústria da construção civil.

Sugestões para novas pesquisas

Como continuidade deste trabalho, sugere-se prosseguir o estudo da RAS gerada pela substituição parcial do cimento Portland por CCA natural. Estas investigações poderiam ser realizadas em amostras que seriam produzidas com diversos teores de CCA natural em substituição parcial ao cimento com e sem o emprego de superplastificante e passariam por processos de ativação da RAS semelhantes aos ensaios de argamassa e concreto utilizados na presente investigação.

Este ensaio em pasta de aglomerante forneceria amostras para identificação dos produtos expansivos da RAS sem a interferência dos agregados. Essa análise seria realizada com o auxílio da MEV, EDS e DRX.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 221. ACI 221.1R-98. State-of-the-art: **Report on alkali-aggregate reactivity**. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 1998.

AGOPYAN, V. **Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil nos Países em Desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. São Paulo, 1991. 99 p. Tese de Livre-docência. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.

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

AKASAKI J. L. et al. **Influência da adição de cinza de casca de arroz nos tempos de pega e retração por secagem**, UNESP, PPGEC, 2005.

AL-KHALAF, M.; YOUSIFT, H. A. **Use of rice husk ash in concrete**. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 6, n. 4, november, 1984.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 259: **Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration**, Washington. D. C, 2006.

AMICK, J. A. **Purification of Rice Hulls as a Source of Solar Grade Silicon for Solar Cells**. Journal Electrochemistry Society, v. 129, n. 4, 1982, p. 864-66.

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

ANDRADE, T. **Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana do Recife**. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALIAGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2. 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, 1 CD.

ARMESTO, L.; BAHILL, A.; VEIJONEN, K.; CABANILLAS, A.; OTERO, J. **Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidised Bed**. Biomass and Bioenergy, v. 23, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1, **agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1**: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4, **agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4**: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-5, **agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 5**: Determinação da mitigação da expansão de barras de argamassa pelo método acelerado, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-6, **agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 6**: Determinação da expansão em prismas de concreto, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 05751. **Materiais pozolânicos – determinação de atividade Pozolânica – Índice de atividade Pozolânica com cal**, Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 05752. **Materiais pozolânicos – determinação de atividade Pozolânica – Índice de atividade Pozolânica com cimento Portland**, Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5753, **Cimentos – método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico**, Rio de Janeiro, 1980.

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

BATIC, O.R.; GIACCIO, G. Y.; ZERBINO, R. E.; ISAIA, G. **Las Cenizas de Cáscara de Arroz y la Reacción Álcali Sílice**. CINPAR - VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, 2010.

BARBOSA.M.B, et al. **Estudo comparativo da propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas**, 48º congresso brasileiro do concreto, IBRACON 2006.

BICZOK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon**. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. p.275-280. Trad. de Emilio J. d'Ocon Asensi.

BIJEN, J.; SELST, R. **Cement equivalence factors for fly ash**. Cement and Concrete Research, v. 23, p. 1029-1039, 1993.

BOATENING, A. A.; SKEETE, D. A. **Incineration of rice husk hull for use as a cementitious material: The Guyana experience**. Cement and Concrete Research. V. 20, 1990. Pergamon Press, Ltda.

BULLETIN 79 - **alkali-aggregate reaction in concrete dams – review and recommendations**. Committee on Materials for Concrete Dams - CIGB/ICOLD. Paris: Imprimerie de Montligeon, 1991.

CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P.; BOURDAROT, E. **Modeling alkali-aggregate reaction - effects in concrete dams**. In: second international conference on alkaliaggregate reactions in hydroelectric plants and dams, 1995, Chattanooga/Tennessee. *Proceedings...* Chattanooga/Tennessee: United States Committee On Large Dams (USCOLD), 1995.

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

CBCS - Conselho Brasileiro de construção Sustentável. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/busca/index.php?action=busca&comClip=true&comAuto=true&busca=consumo+mat%E9rias+primas+2010>>. Acesso em: 07 Dez, 2010.

CEZAR D. S. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinza VOLANTE e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento**. Dissertação de mestrado, PPGEC/ Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2011.

CHANDRA, S. 10th International Congress in the Chemistry of Cement “**Special Report**”. Cement and Concrete Research, USA, 1997.

CHANDRASEKHAR, S.; PRAMADA, P. N.; RAGHAVAN, P (2002). **Microsilica from rice husk as a possible substitute for condensed silica fume for high performance concrete**. Journal of Materials Science Letters, v.21, p. 1245-1247.

Cimento Org. Disponível em: <<http://www.cimento.org/site/coprocessamento.htm>> Acesso em: 06 Dez, 2010.

COOK, David; PAMA; Ricardo P.; PAUL, Bishwendu K. **Rice Husk Ash-Lime-Cement Mixes for use in Masonry Units**. Building and Environment. v.12, p. 281-288, 1977.

COOK, D. J. **Production of Cements based on rice husk ash**. International Conference on Development Low-Cost and Energy saving Construction Materials and Applications. Rio de Janeiro, July, 1984.

COP 15. **Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas** - Copenhague, 7 a 18 de dezembro de 2009.

COP 16. **Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas** - Cancún, 7 a 18 de dezembro de 2010.

CORDEIRO L. N. P. **Análise da Variação do Índice de Amorfismo da Cinza de Casca de Arroz Sobre a Atividade Pozolânica**. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

COUTINHO, J.S. **The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures**. Cement & Concrete Composites, v.25, n.1, 2003.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. **Um Estudo visando à identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, PR, 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica**. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

DASS, A. **Pozzolanicity of rice husk ash**. In: The 9th CIB Congress, Stocholm – CIB-83. To build and take care of what we have built with limited resources. Building Materials and Components, v. 4, 1984.

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

DELLA, V. P. **Processamento e Caracterização de Sílica Ativa Obtida a partir de Cinza de Casca de Arroz**. Florianópolis, 2001. 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HORTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para o uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica**. Revista Química Nova. Vol. 24, no. 06, 778-782, 2001.

DIAMOND, S. **A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms - 1**. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. Cement and Concrete Research, v.5, 1975.

DIAMOND, S. **ASR - Another look at mechanisms**. In: 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION (8th ICAAR), 1989, Kyoto. Proceedings...Kyoto, 1989. p.83-94.

DIAMOND, S; SADANANDA,S.; THALOW,N. **Reaction Products of densified silica fume agglomerates in concrete**. Cement and Concrete Research, N.34, 2004.

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

DUART, M. A. **Estudo da Microestrutura do Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz Residual sem Beneficiamento**. Dissertação de mestrado, 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.

EM-DAT – Emergency Events Database. **The OFDA/CRED International Disaster Database**. Disponível em: <<http://www.em-dat.net/>>. Acesso em: 08 dezembro, 2010.

FAO – **Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação**. Disponível em:<<https://www.fao.org.br/>>. Acesso em: 19 DEZ. 2010.

FERNANDES, A. Síntese de Zeólita e Wolastonita a partir de cinza de casca de arroz. Tese (Doutorado). USP, 2006.

FERNANDEZ, J.L. et al. **Evolución de la Porosidad de Pastas de Cemento Portland por la Incorporación de una Puzolana Natural**. Inf. tecnol., 2004, vol.15, no.5, p.37-40. ISSN 0718-0764.

FHWA - Federal Highway Administration. Washington USA. Disponível em: <www.fhwa.dot.gov/> Acesso em: 07 JAN, 2011.

FONSECA, Margarete R. G. **Isolantes Térmicos Fabricados a partir da Cinza da Casca de Arroz: Obtenção, caracterização de Propriedades e sua Relação com a Microestrutura**. Porto Alegre, 1999. 120p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FOURNIER, B. **Recent developments in the prevention and mitigation of AAR in concrete**. 52º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON, Outubro / 2010. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/eventos/52CBC/conferencias.asp>> Acesso em: 07 Dez, 2010.

FOURNIER, B.; CHEVRIER, R.; GROSBOIS, M.; LISELLA, R.; SHEHATA, M.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; THOMAS, M. and BAXTER, S. **The Accelerated Concrete Prism Test (60 °C): variability of the Test Method and Proposed Expansion Limits**. 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China, 2004.

FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades**. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade/PINI, 1997. cap.17.

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

GLASSER, F. P. **Chemistry of the alkali-aggregate reaction**. In: SWAMY, R. N. The Alkali- Silica Reaction in Concrete. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. **The chemistry of 'alkali-aggregate' reaction**. Cement and Concrete Research, v.11, 1981a.

GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. **Some observations on the rapid chemical test for potentially reactive aggregate**. Cement and Concrete Research, v.11, 1981b.

HARA, N. et al. Hydrothermal Reactivity of Rice Husk Ash and its Use for Calcium Silicate Products. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete, 1989, Trondheim, Norway. Proceedings...CAMMET, ACI SP-114, 1989, p. 499-516.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P. **Investigação de Concretos Afetados pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado.** Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

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

HELMUTH, R. SHRP C-342: **Alkali-silica reactivity:** an overview of research. Washington,DC: Strategic Highway Research Program, 1993.

HELMUTH, R.; STARK, D. **Alkali-silica reactivity mechanisms.** In: SKALNY, J. Materials Science of Concrete III. Westerville/Ohio, The American Ceramic Society, 1992.

Hidrovias interiores - RS Disponível em: <hidroviasinteriores.blogspot.com/2010/.../queda-da-ponte-rsc-287-e-hidrologia.html> . Acesso em: 06 Dez, 2010.

HOFFMANN, R.; JAHN, S. L.; BAVARESCO, M.; SARTORI, T.C. **Aproveitamento de cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte.** In: IX Congresso Brasileiro de Energia - IV Seminário Latino-Americano de Energia, 2002, Rio de Janeiro. Soluções para a energia no Brasil – Anais... 2002.

HOOBS, D. W. **Influence of pulverized-fuel ash and granulated blastfurnace slag upon expansion caused by the alkali-silica reaction.** Magazine of Concrete Research, v.34, 1982.

HOOBS, D. W. **Alkali-silica reaction in concrete.** London: Thomas Telford, 1988.

HOPPE A. E. **Carbonatação em Concreto com Cinza de Casca de Arroz Sem Moagem.** Dissertação de mestrado, PPGEC/ Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.

HOUSTON, D. F. Rice Hulls. **Rice Chemistry and Technology**. Am. ASS. Cereal Chem, Ins. St. Paul, Minesota, USA, 197

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 19 DEZ. 2010.

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. V. 2, p. 733-762. (SP-114).

ICTA /UFRGS por: Julio Alberto Nitzke e Aline Biedrzycki. Disponível em: (http://www.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr_divisao.htm) Última atualização: 02/07/2004. Acesso em: 25/12/10

IDORN G.M.; THAULOW N. **Effectiveness of research on fly ash in concrete**. Cement and Concrete Research. V 15, , May 1985.

ILER, R.K. **The chemistry of silica - Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry**. Ed John Wiley & Sons, 1976, 866p.

IRGA - **Instituto Riograndense do Arroz**. Disponível em:< <http://www.irga.rs.gov.br>>. Acesso em: 27 NOV. 2010.

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.; 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.; GASTALDINI A. L. G. **Sustentabilidade do concreto com altos teores de escória e cinzas volantes**. IBRACON Structures and Materials Journal, Vol. 2, Number 3 (September, 2009) p. 244 - 253 • ISSN 1983-4195.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON; 2010.

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

Concrete Structures, Florianópolis, SC, 05-07 jun.1996. Anai. Florianópolis, UFSC/UFRGS/USP, 1996b.

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

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

KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos**. In: 1º simpósio nacional de agregados, 1986, São Paulo. Anais...São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986. p.127-138.

KIHARA, Y & SCANDIUZZI, L. **Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros**. In: 3º congresso brasileiro de cimento, 1993, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, v.1, 1993.

KINGERY, W. D.; UHLMANN, D. R.; BOWEN, H. K. **Introduction to Ceramics**. 2 ed. John Wiley & Sons: USA, 1976.

KLEIN, C e HULBURT JR, C. S. **Manual of Mineralogy**. Ed. John Wiley & Sons, Inc., USA, 1999.

KORMANN A. C. M.; VALDUGA L. **Análise de Areias Naturais da Região Metropolitana de Curitiba quanto à Reatividade Potencial**. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALIAGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2. 2006, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, 1 CD.

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

LEE, C.; LIU, C.C.; WANG, C.W. **An Accelerated Concrete Prism Soaking Test for Evaluating the Alkali-Reactivity of Aggregates**. 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China, 2004.

LIGHTHILL, J.; HOLLAND, G.; GRAY, W.; LANDSEA, C.; CRAIG, G.; EVANS, J.; KURIHARA, Y.; GUARD, C. Global climate change and tropical cyclones. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 75, n. 11, 2147-2157, 1994.

MALHOTRA, V. M. **Fly ash, slag fume and rice-husk ash in concrete: a review.** *Concrete International*, p. 23-28, Abril, 1993.

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

MALVAR, L. J.; CLINE, G. D.; BURKE, D. F.; ROLLINGS, R.; SHERMAN, T. W.; GREENE, J. L. Alkali-Silica Reaction Mitigation: state of the art and recommendations. *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 5, p. 480-489, 2002.

MCBEAN, G. Climate change and extreme weather: a basis for action. *Natural Hazards*, 31, 177– 190, 2004.

MEHTA, P. K. **Concreto Sustentável.** [Revista Técnica, 139]. São Paulo: PINI; Outubro de 2008.

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

MEHTA, P. K. **Natural pozzolans, supplementary cementing materials for concrete.** Canadian government publishing centre, supply and services Canada Ltd, Ottawa, Canada, 1987. p.3-33.

MEHTA, P. K.; PITT, N. **A new process of rice husk utilization.** In: International Conference on the Utilization of Rice By-Products. Valência, Spain, 1974. Proceedings... Valencia: IATA, 1977.

MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete. A critical review.** In: MALHOTRA, V. M.(ed) International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By134 products in Concrete, 1 st, Montebello, 1983. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 1983.

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

MITCHEL, J.K. **Fundamentals of soil behaviour.** University of California, Berkeley.Ed John Wiley & Sons, 1992.

MONTEIRO, P. J. M.; WANG, K.; SPOSITO, G.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P.

Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction. Cement and Concrete Research, v.27, 1997.

MORAIS, 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.

MUNHOZ F.A.C. **Efeito de Adição Ativas na Mitigação das Reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato.** Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

Nações Unidas - ONU, 2010. Disponível em:
<<http://www.unmultimedia.org/radio/portuguese/detail/188549.html>> Acesso em: 06 Dez, 2010

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

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

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

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

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R. G.; PANDOFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas:** princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

PATEL, M.; KARERA, A.; PRASANNA P. **Effect of thermal and chemical treatments on carbon and sílica conténs in rice husk.** Journal of Materials Science. 22. 1987.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, SP, 1981.

PEDROZO, È. C. **Estudo da Utilização de Cinza da Casca do Arroz Residual em Concretos Estruturais: uma Análise da Durabilidade aos Cloretos**. Dissertação de mestrado, PPGEC/ Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.

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

POOLE, A. B. **Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete**. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

Portal Aquecimento Global. **Mudanças Climáticas - Os eventos climáticos extremos de Santa Catarina e Rio Grande do Sul**, 2009. Disponível em: <http://www.aquecimentoglobal.com.br/fiquedentro_detalhe.asp?id=195>. Acesso em: 06 Dez, 2010.

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

PREZZI, M.; KURTIS, K.E.; MONTEIRO, P.J.M.; SANTOS, M.C.; ANDRADE, W.P. **Importância da química de superfície na reação álcali-agregado**. In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Goiânia, 1997.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P.M.; SPOSITO, G. **The alkali-silica reaction**, Part I : use of double-layer theory to explain the behaviour of reaction-product gels. *ACI Materials Journal*, v.94, 1997.

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

PRUDÊNCIO, J. R.; SANTOS, S. **Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz**. In: Reciclagem e Reutilização de Resíduos como materiais de construção, Workshop, USP – São Paulo, SP, Nov, 1996.

PRUDÊNCIO, J. R., SANTOS, S. **Estudo comparativo da Pozolanicidade de cinza volante e cinza de casca de arroz**. VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Florianópolis, 1998.

RANC, R. and DEBRAY, L. **Reference Tests Methods and a Performance Criterion for Concrete Structures**, Proc. of the 9th Int. Conf. on AAR in concrete, London (UK), 1992, Publishers: The Concrete Society

REAL, Concha; ALCALÁ, Maria D.; CRIADO, José M. **Preparation os Silica from Rice Husks**. Journal American Ceramic Society. 79. 1996.

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

REGO, J. H. S. **Viabilidade Técnica da Utilização da Cinza de Casca de arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento**. Goiânia. CMEC/UFG, Dissertação de Mestrado, 2001.

RODRIGUES, E. P. **Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da Barragem de Pedro Beicht**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo, SP, 1994.

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

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1989.

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

SANCHEZ, L. F. M. **A evolução e desenvolvimento dos ensaios laboratoriais na prevenção e avaliação da reação álcali-agregado (RAA)**. 52º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON, Outubro / 2010. Disponível em:
< <http://www.ibracon.org.br/eventos/52CBC/conferencias.asp>> Acesso em: 07 Dez, 2010.

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

SARKAR, S. L. **The importance of microstructure in evaluating concrete.** In: MALHOTRA, V. M. (ed.) *Advances in concrete technology*, Ottawa, Energy Mines and Resources, 1992.

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

SENSALE; G. R. B. **Estudo Comparativo entre as Propriedades Mecânicas dos Concretos de Alta Resistência e Convencionais com Cinza de casca de arroz.** Tese (Doutorado). UFRGS, Brasil, RS, 2000.

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

SILVEIRA, A . A . **A Utilização de Cinza de casca de Arroz com Vistas a Durabilidade de Concretos:** Estudo do ataque por Sulfatos. Dissertação (Mestrado). UFRGS, Brasil, 1996.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao Estudo do Efeito da Incorporação de Cinza de Casca de Arroz em Concretos Submetidos à Reação Álcali – Agregado.** Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2007.

SILVEIRA, A . ; DAL MOLIN, D. **Adição de microsíllica e cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos.** In: XII Reunião Técnica Dra. Haydee V. Amandola. *Proceedings... Association Argentina de Tecnologia del Hormigon*, Argentina, 1996, p. 221-228.

Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Rio Grande do Sul (SINDUSCON). Disponível em: <http://www.sindusconrs.com.br/site/principal/conteudo_nivel_2.php?codConteudo=768>. Acesso em: 15 Dez, 2010.

Sindicato nacional da industria do cimento (SNIC). Disponível em: <<http://www.snic.org.br/25set1024/index.asp>>. Acesso em: 05 Mar, 2011.

SOUZA, M. F. et al. **Rice Hull-Derived Silica:** Applications in Portland Cement and Mullite Whiskers. *Material Research*. v.3 n.2. 2000.

STIEVENARD-GIREAUD, D. **Etude de la réaction alcalis-silice dans les bétons**. Paris: LCPC, 1987.

STARK, D. **Alkali-silica reaction**. In: KLIEGER, P.; LAMOND J. F. Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials (ASTM/STP 169C). Philadelphia, ASTM, 1994.

STARK, D. **The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity** (SP 126-49). In: second international conference on durability of concrete, 1991, Montreal/Canada. Proceedings...Detroit: American Concrete Institute (ACI), v.2 1991a.

STARK, D. **Lithium salt admixtures – an alternative method to prevent expansive alkali-silica reactivity**. In: research and development information. Reprinted from Proceedings of 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, July, 1992.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review**. FHWA Contract DTFH61-97-R-00022, University of Toronto, Canadá, 1997, 31 p.

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

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

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATA, M. **Test Methods for Evaluating Preventive measures for controlling expansion due the alkali-silica reaction in concrete**. Paper. Cement and Concrete Research , 2006.

THOMAS M. D.A.; FOURNIER B.; FOLLIARD K. J.; IDEKER J. H. and RESENDEZ Y. **The Use of Lithium to Prevent or Mitigate Alkali-Silica Reaction in Concrete Pavements and Structures**. Publicat ion No. FHWA-HRT-06-133. USA, 2007

TIBONI R. **A utilização da cinza de casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento portland**. 2007. Dissertação (Mestrado). Departamento de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos -SP, 2007.

TOMOSAWA, F.; TAMURA, K.; ABE, M. **Influence of water content of concrete on alkaliaggregate reaction**. In: International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), 8., 1989, Kyoto. Proceedings... Kyoto: Edited by K. Okada, S. Nishibayashi & M. Kawamura, 1989.

TOUMA W.E., FOWLER D.F., CARRASQUILLO R.L., **Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives**, Report ICAR 301-1F, International Center for Aggregates Research, Austin, Texas, 2001.

TURRIZIANI, R. **Internal degradation of concrete: alkali-aggregate reaction, reinforcement steel corrosion**. In: 8th international congress on the chemistry of cement, 1986, Rio de Janeiro, Proceedings...Rio de Janeiro, v.1, 1986.

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

URHAN, S. Alkali-silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: interpretation of published results and na hypothesis concerning the mechanism. *Cement and Concrete Research*, v.17, n.1, p.141-152, 1987.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Trad. de Edson Monteiro. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984. p.308-317.

VIVIAN, H. E. Studies in cement-aggregate reaction. XIX: **The effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate**. Australian Journal of the Applied Science, v. 2, 1951.

WEBSTER, P. J.; HOLLAND, G. J.; CURRY, J. A.; CHANG, H. R. **Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment**. Science, v. 309, 2005.

WEBER, S. L. **Metodologia para Obtenção de Sílica de Elevada Reatividade para Uso em Concreto de Alto Desempenho a Partir do Processamento de Cinza de Casca de Arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2001.

WEE, T.H.; SURYAVANSHI, A.K.; TIN, S.S. **Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) Results for concrete containing mineral admixtures**. ACI Materials Journal, v.97, n.2, p.221-232, March-April, 2000.

Website oficial da Defesa Civil do Governo de SC, 2008. Disponível em: <<http://www.desastre.sc.gov.br>>. Acesso em: 06 Dez, 2010.

World Business Council for Sustainable Development – WBCSD - Washington, D.C. United States, July, 2009.

ZHANG, M. H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M. Rice-husk ash paste and concrete: **Some aspects of hydration and microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste.** Cement and Concrete Research. v. 26, 1996. Pergamon Press, Ltda.

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V.M. **High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material.** ACI Materials Journal, v.93, 1996.

ANEXOS

Anexo A

Registros fotográficos

Materiais utilizados na pesquisa

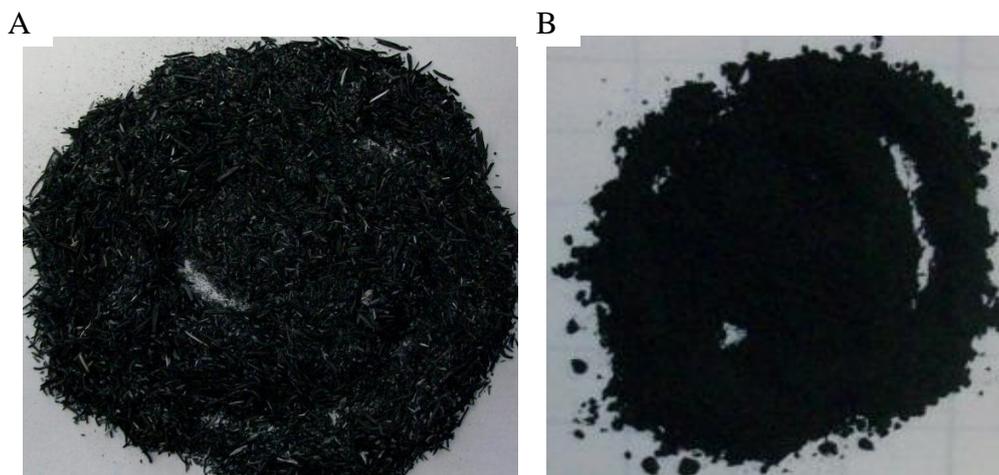


Figura 82 - CCA natural sem moagem (A) e CCA natural moída na betoneira (B).

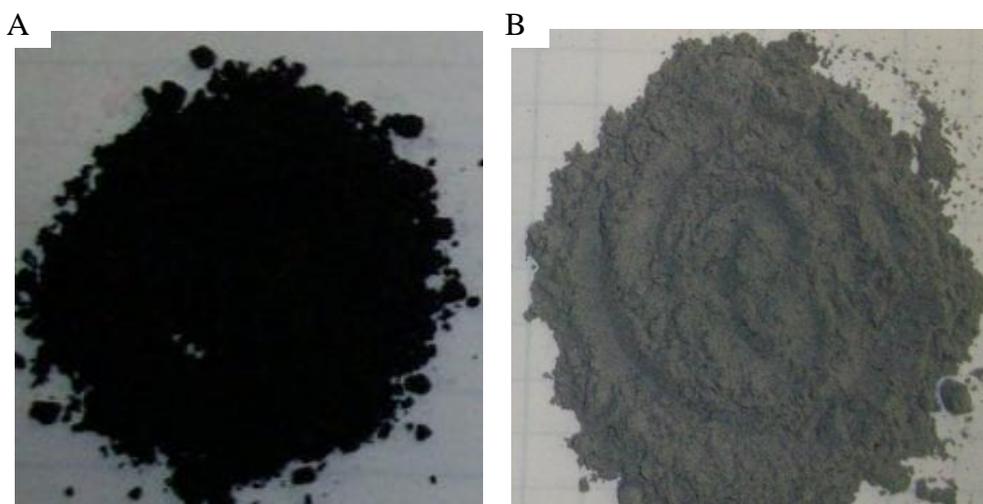


Figura 83 - CCA moída em moinho de bolas (A) e cinza volante (B).

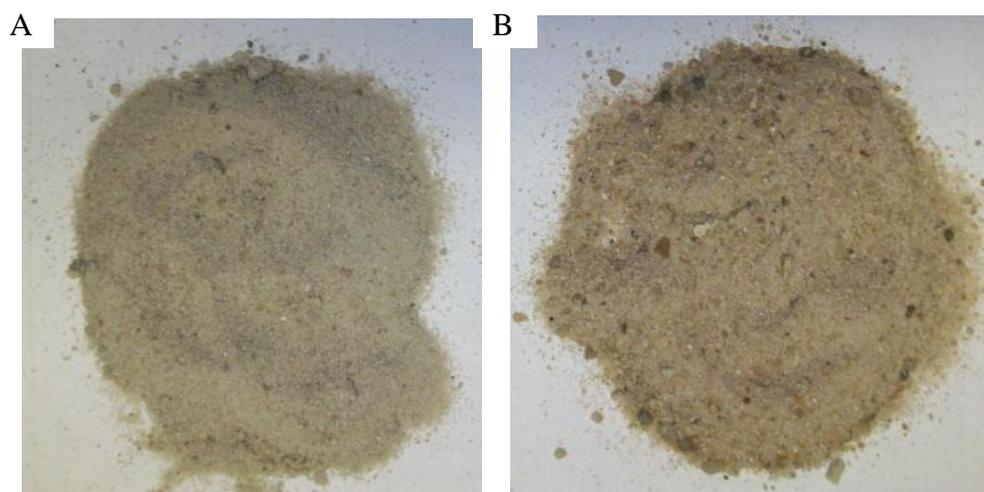


Figura 84 - Areia fina (A) e areia média (B).

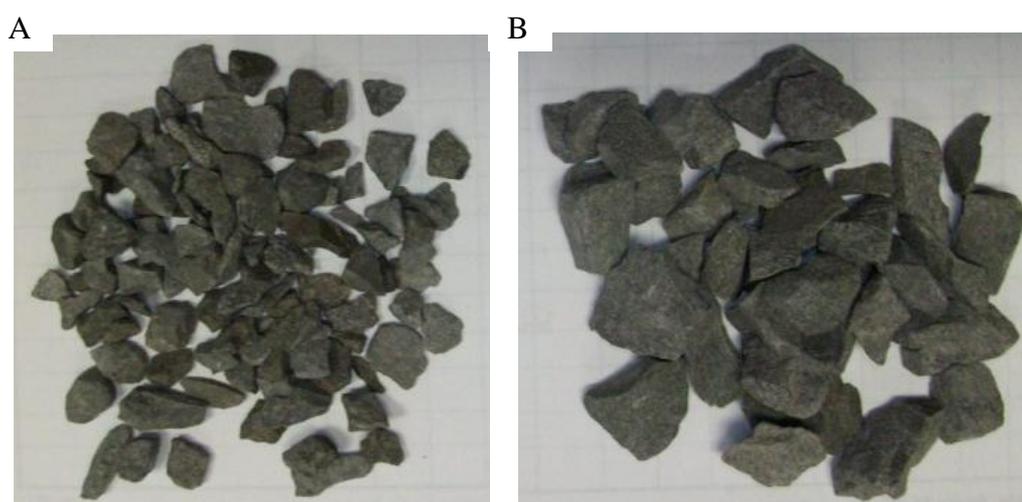


Figura 85- Brita zero (A) e brita 1 (B).

Anexo B

Registros fotográficos

Ensaio em barras de argamassa



Figura 86 - Aspecto final da argamassa fresca.



Figura 87 - Conferência do comprimento efetivo de medida na forma das barras de argamassa.



Figura 88 - Barras de argamassa no estado fresco.



Figura 89 - Recipiente de acondicionamento das barras de argamassa.



Figura 90 - Estufa empregada no acondicionamento dos recipientes.



Figura 91 - Aparelho usado como medidor do comprimento das barras.



Figura 92 - Aparelho umidificador usado no controle da climatização da sala de leitura.



Figura 93 - Aparelho usado no controle da climatização da sala de leitura.

Anexo C**Tabela 31– Períodos das coletas das amostras para ensaio de MEV e DRX.**

Cimentos	Termino do ensaio	Coleta das amostras
1- Cimento Padrão:	13/11/09	16/12/09
2- CII-Z:	14/11/09	18/12/09
3- CII-Z +10% CV:	14/11/09	21/12/09
4- CII-Z +15% CV:	15/12/09	25/12/09
5- CII-Z +20% CV:	14/11/09	23/12/09
6- CII-Z +30% CV:	18/11/09	29/12/09
7- CII-Z +40% CV:	19/11/09	31/12/09
8- CIV:	20/11/09	19/01/10
9- CIII:	20/11/09	21/01/10

Anexo D

Registros fotográficos

Ensaio MEV e DR-X



Figura 94 - Microscópio óptico de varredura.



Figura 95 - Aparelho metalizador.



Figura 96 - Porta amostra.



Figura 97 - Equipamento de DRX usado na investigação.

Anexo E

Registros fotográficos

Ensaio em prismas de concreto



Figura 98 - Aparelho medidor do comprimento dos prismas.

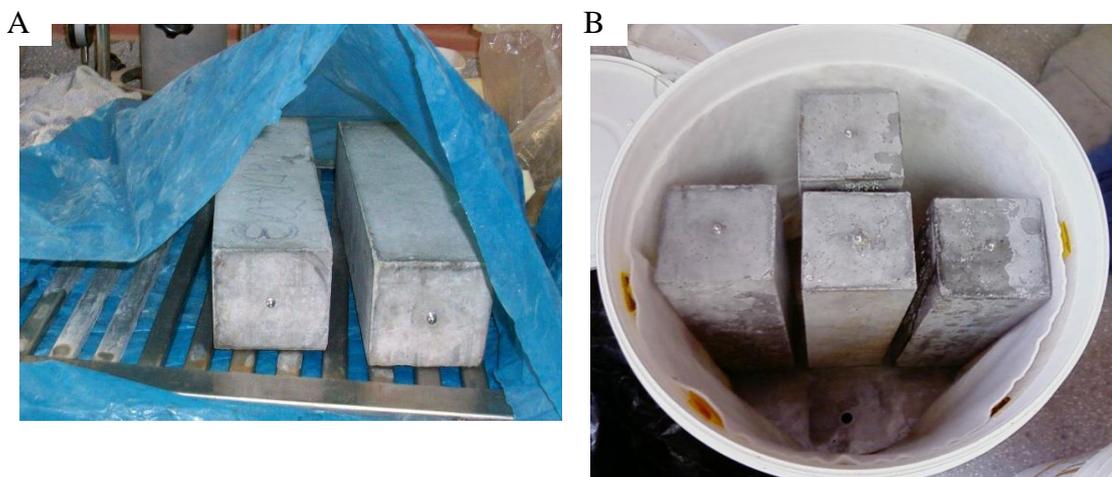


Figura 99 - Prismas cobertos com plástico para acondicionamento em câmara úmida (A) e no recipiente de acondicionamento (B).

Anexo F

Registros fotográficos

Ensaio de penetração de cloretos por imersão



Figura 100 - Corpos de prova imersos em solução salina.

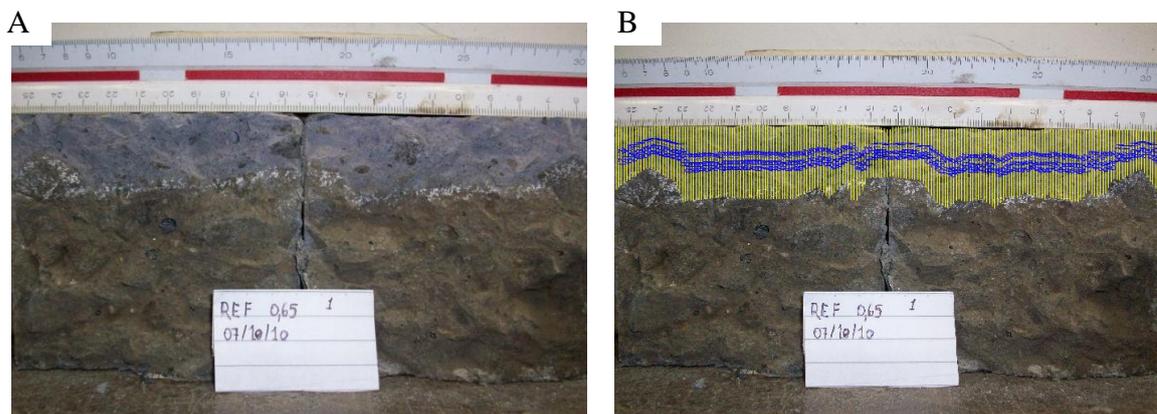


Figura 101 - Corpo de prova, rompido diametralmente, aspergido com nitrato de prata (A) e após tratamento feito no AutoCad, para obtenção das profundidades de penetração (B).

Anexo G

Gráfico EAPC

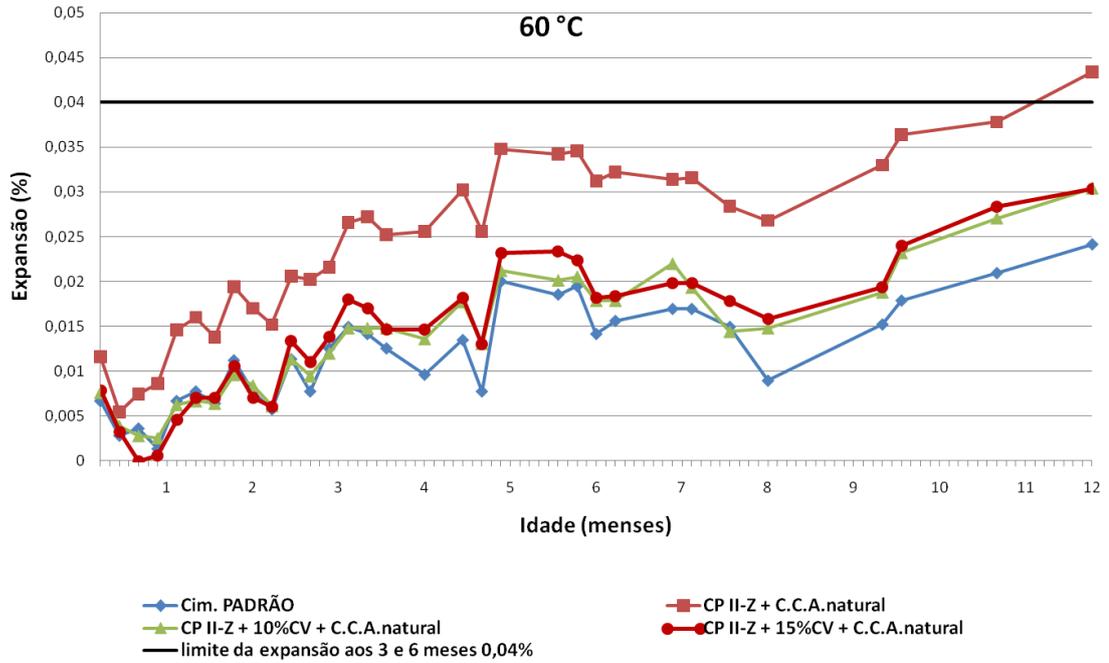


Figura 102 - Expansão nos prismas de concreto pelo método EAPC até o período de 12 meses