

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KIRONI OLIVEIRA PIRES

**INVESTIGAÇÃO DO POTENCIAL REATIVO ÁLCALI-AGREGADO
RESIDUAL – UM ESTUDO DE CASO**

CURITIBA

2009

KIRONI OLIVEIRA PIRES

**INVESTIGAÇÃO DO POTENCIAL REATIVO ÁLCALI-AGREGADO
RESIDUAL – UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

CURITIBA

2009

TERMO DE APROVAÇÃO

KIRONI OLIVEIRA PIRES

INVESTIGAÇÃO DO POTENCIAL REATIVO ÁLCALI-AGREGADO RESIDUAL – UM ESTUDO DE CASO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho
Departamento de Construção Civil, UFPR

Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon
Departamento de Construção Civil, UNICAMP

Prof. Dr. Kleber Franke Portella
Departamento de Construção Civil, UFPR

Curitiba, 16 de abril de 2009

*A Deus
À minha esposa Gleice
Aos meus pais, Celso e Elvira
Aos meus irmãos, Kelson, Karolídia e Kênia*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao Deus único, fonte de vida e da graça, por iluminar meus caminhos durante essa trajetória.

Agradeço ao Professor José Marques Filho, não apenas pela orientação e compartilhamento de seus conhecimentos, mas também pela amizade e incentivo frequente.

Ao Professor Kleber Franke Portella, pela sua disposição e auxílio na interpretação dos dados das micrografias e ensaios químicos.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, por possibilitar através de suas instalações a execução dos ensaios laboratoriais.

Aos profissionais do LACTEC, em especial ao Geólogo Roberto Rafael Zorzi, pelo apoio na condução do programa experimental.

Agradeço a Companhia Paranaense de Energia – COPEL, e aos Engenheiros Romano Francisco Laslowski e Antonio Carlos Dequech José, que acreditando no desenvolvimento técnico-científico pela pesquisa, permitiram o desenvolvimento deste trabalho através da disponibilidade de recursos e informações.

Aos engenheiros da Divisão de Manutenção Civil da COPEL, pelo apoio e companheirismo, em especial ao Engenheiro Marcos Aberto Soares pelo auxílio na condução das campanhas de campo.

À Universidade Federal do Paraná, que através do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Com muito carinho, aos meus pais e irmãos, que mesmo distantes, têm me apoiado e incentivado em todos os momentos.

Agradeço a minha querida esposa Gleice, que me acompanhou nessa trajetória com muito carinho, amor e dedicação incondicional, além do incentivo e apoio.

Agradeço a todos os meus amigos que através da companhia e amizade tornaram essa tarefa menos exaustiva.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

PIRES, K. O. **Investigação do potencial reativo álcali-agregado residual – um estudo de caso.** 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2009.

Entre os vários processos relacionados à deterioração do concreto, encontra-se a reação álcali-agregado (RAA), um fenômeno complexo e responsável por afetar diversas estruturas de concreto, principalmente aquelas em contato com água, em geral as obras hidráulicas como as barragens. A reação entre hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos gera produtos expansivos capazes de microfissurar o concreto, causando a perda de homogeneidade, de resistência mecânica e de durabilidade. Apesar da reação álcali-agregado possuir formas de ser combatida do ponto de vista preventivo, após a instalação do processo deletério, não se conhece uma medida eficiente e econômica para combatê-la. Dado o grande número de obras afetadas pela RAA e a dificuldade no entendimento dos mecanismos envolvidos, a investigação do potencial reativo residual dessas estruturas afetadas passa a ser relevante. Neste sentido, a presente pesquisa buscou avaliar o potencial reativo álcali-agregado residual do concreto da barragem de Salto do Meio da UHE de Chaminé, através principalmente do ensaio de reatividade potencial preconizado pela NBR 15577/08. Também foram utilizados ensaios como: análise petrográfica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difração de raios-X (DRX), ensaios físico-químicos de água, ensaio de absorção, ensaios mecânicos e de ultrassom. Os resultados das análises petrográficas mostraram que os agregados são potencialmente reativos. As expansões medidas no ensaio acelerado confirmaram o potencial reativo dos agregados, bem como demonstraram que os agregados do concreto da barragem possuem um potencial reativo álcali-agregado residual de 60 %. Os resultados obtidos pelos ensaios de MEV e EDS evidenciaram a generalização do processo de RAA no concreto. Já os ensaios mecânicos, de absorção, de ultrassom e físico-químicos da água, possibilitaram a análise global do concreto, indicando principalmente que apesar da deterioração devida à RAA, o concreto ainda possui elevada resistência.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado. Reatividade. Residual. Concreto. Método acelerado. Barragem.

ABSTRACT

PIRES, K. O. *Investigation of the residual alkali-aggregate reactive potential – a case study*. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2009.

Among the several processes related to the concrete deterioration, there's the alkali-aggregate reaction (AAR), a complex phenomenon and responsible for affecting several concrete structures, mainly those in contact with water, in general hydraulic work constructions like dams. The reaction between alkaline hydroxides mainly coming from the cement and some reactive minerals create expanded products that are able to micro-fissure the concrete, resulting in homogeneity, mechanical resistance and durability loss. Despite the alkali-aggregate reaction possessing forms of being combated from the preventive point of view, after the installation of the deleterious process, there isn't an efficient and economic measurement known which combat it. Due to the big number of affected work constructions by AAR and the difficulty in the understanding of the involved mechanisms, the investigation of the residual reactive potential of these affected structures becomes relevant. In this sense, this research sought to evaluate the residual alkali-aggregate reactive potential of Salto do Meio Dam in the Chaminé UHE energetic complex, mainly through the potential reactivity test according to NBR 15577/08. It was also used tests as: petrographic analysis, scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS), x-ray diffraction (XRD), physic chemistry water tests, absorption test, mechanical tests and ultrasound. Petrographic analyses results showed that the aggregates are potentially reactive. The expansions measured in the accelerated test confirmed the reactive potential of the aggregates, as also as well showed that there are 60 % of a residual alkali-aggregate reactive potential in the dam's concrete aggregates. The results obtained by the SEM and EDS tests evidenced the generalization of the AAR process in concrete. In addition the mechanical tests, absorption, ultrasound and water physic chemistry, made the complete concrete analysis possible, indicating mainly that even with the deterioration due to the AAR, concrete still has elevated resistance.

Key words: Alkali-aggregate reaction. Reactivity. Residual. Concrete. Accelerated method. Dam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Complexo energético de Chaminé.....	24
Figura 2 - Arranjo geral da UHE de Chaminé	25
Figura 3 - Construção e operação da barragem de Salto do Meio	26
Figura 4 - Planta da barragem de Salto do Meio	27
Figura 5 - Perfil longitudinal da barragem de Salto do Meio	27
Figura 6 - Perfis transversais "A-A e B-B" da barragem de Salto do Meio	27
Figura 7 - Micrografia e espectro de EDS	29
Figura 8 - Micrografia e espectro de EDS	29
Figura 9 - Fissuras em bloco de fundação afetado pela RAA na cidade de Recife/PE.....	32
Figura 10 - Mecanismo de formação do gel de RAA.....	36
Figura 11 - Mecanismo do processo de reação álcali-agregado	37
Figura 12 - Ataque das hidroxilas à sílica.....	39
Figura 13 - Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas.....	40
Figura 14 - Ruptura da ligação do grupo siloxano pelos íons hidroxilas	41
Figura 15 - Desenvolvimento da reação álcali-silicato	43
Figura 16 - Características de fissuras devidas à RAA	54
Figura 17 - Aspecto microscópico de um basalto constituído por plagioclásio (PL), piroxênio (PX), opacos (OP) e quartzo microcristalino (Q). Ampliação aproximada de 100x.....	56
Figura 18 - Imagem em MEV da amostra polida de um concreto com agregado apresentando reação álcali-agregado	61
Figura 19 - Difratograma de raios X de uma escória de aciaria elétrica in natura.....	63
Figura 20 - Indícios de RAA.....	67
Figura 21 - Corte longitudinal da barragem (vista de montante) com a localização dos pontos de extração de testemunhos, coleta de água e material exsudado.....	68
Figura 22 - Planta indicando os cortes e o local de extração de testemunhos E1	68

Figura 23 - Corte A indicando a posição dos pontos E6 e AP3	69
Figura 24 - Corte B indicando a posição dos pontos E4, E5 e AP2.....	69
Figura 25 - Corte C indicando a posição dos pontos E1 e E3.....	70
Figura 26 - Corte D indicando a posição dos pontos E2 e AP1	70
Figura 27 - Locais de extração de testemunhos	72
Figura 28 - Extração de testemunhos.....	72
Figura 29 - Extração inclinada nas paredes da galeria	73
Figura 30 - Furos preenchidos com concreto após extração.....	73
Figura 31 - Coleta de amostra de água no dreno de fundação (AP1).....	75
Figura 32 - Coleta de amostra de material exsudado do concreto	75
Figura 33 - Execução do ensaio de ultrassom.....	77
Figura 34 - Medições indiretas entre 3 pontos colineares	77
Figura 35 - Medição direta realizada na ombreira esquerda.....	78
Figura 36 - Acesso ao local da pedreira desativada	79
Figura 37 - Bases do britador da pedreira desativada.....	79
Figura 38 - Localização da pedreira desativada	79
Figura 39 - Vistoria e amostras de rocha selecionadas na pedreira desativada	80
Figura 40 - Corpos de prova extraídos da barragem	81
Figura 41 - Corpos de prova preparados para os ensaios	82
Figura 42 - Agregados separados do concreto da barragem.....	84
Figura 43 - Cura alcalina das barras de argamassa	86
Figura 44 - Leituras das expansões das barras de argamassa	86
Figura 45 - Corpos de prova cilíndricos dentro de tanque com solução (NaOH, 1N a 80 °C)	87
Figura 46 - Leituras das expansões dos CP's (5x10) cm	87
Figura 47 - Fragmentos de concreto da barragem.....	88
Figura 48 - Barras de argamassa após ensaio acelerado.....	89
Figura 49 - Amostras selecionadas para análise por MEV e EDS.....	89
Figura 50 - Amostras preparadas através de metalização com grafite	90
Figura 51 - Equipamentos utilizados para execução dos ensaios de MEV com EDS.....	90

Figura 52 - Ensaio de resistência à compressão axial	92
Figura 53 - Ensaio de módulo de elasticidade	93
Figura 54 - Exemplo de gráfico de módulo de deformação estática	94
Figura 55 - Execução do ensaio de ultrassom no CP do local E3.....	95
Figura 56 - Fotomicrografia (amostras do agregado da barragem - A1).....	98
Figura 57 - Fotomicrografia (amostras da pedreira - J1).....	98
Figura 58 - Fotomicrografia (amostras da pedreira - J2).....	99
Figura 59 - Difratoograma de raios X (amostra A1)	100
Figura 60 - Difratoograma de raios X (amostra J1)	100
Figura 61 - Difratoograma de raios X (amostra J2)	101
Figura 62 - Espectro da análise química elementar da amostra de gel e seu percentual atômico.....	106
Figura 63 - Difratoograma de raios X da amostra de gel	107
Figura 64 - Forma dos agregados do concreto da barragem.....	114
Figura 65 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1).....	117
Figura 66 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1).....	117
Figura 67 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1).....	118
Figura 68 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1).....	118
Figura 69 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1).....	118
Figura 70 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2).....	119
Figura 71 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2).....	119
Figura 72 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2).....	119
Figura 73 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2).....	120
Figura 74 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2).....	120
Figura 75 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3).....	120
Figura 76 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3).....	121
Figura 77 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3).....	121
Figura 78 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3).....	121
Figura 79 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3).....	122
Figura 80 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3).....	122
Figura 81 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4).....	122

Figura 82 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4).....	123
Figura 83 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4).....	123
Figura 84 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4).....	123
Figura 85 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E5).....	124
Figura 86 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E5).....	124
Figura 87 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E6).....	124
Figura 88 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E6).....	125
Figura 89 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1 após ensaio acelerado)	125
Figura 90 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3 após ensaio acelerado)	125
Figura 91 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4 após ensaio acelerado)	126
Figura 92 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E5 após ensaio acelerado)	126
Figura 93 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E6 após ensaio acelerado)	126
Figura 94 - Micrografia e espectro (amostra de argamassa com agregados da jazida).....	127
Figura 95 - Micrografia e espectro (amostra de argamassa com agregado da jazida).....	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ensaio de ultrassom - identificação dos locais e métodos de medição	76
Quadro 2 - Relação de materiais da argamassa	85
Quadro 3 - Caracterização do cimento padrão (valores certificados).....	85
Quadro 4 - Características macroscópicas das amostras (A1, J1 e J2)	97
Quadro 5 - Composição mineralógica das amostras (A1, J1 e J2)	97
Quadro 6 - Compostos química (amostra A1)	100
Quadro 7 - Compostos químicos (amostra J1)	100
Quadro 8 - Compostos químicos (amostra J2)	101
Quadro 9 - Resultados dos ensaios físico-químicos das amostras de água.....	104
Quadro 10 -Classificação dos materiais observados nas micrografias e espectros	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química	101
Tabela 2 - Variável reduzida (Z) - composição química das amostras (A1, J1 e J2).....	102
Tabela 3 - Expansões das barras de argamassa confeccionadas com agregados oriundos da pedreira desativada	108
Tabela 4 - Expansões das barras de argamassa confeccionadas com agregados do concreto da barragem.....	110
Tabela 5 - Expansões das barras de argamassa aos 30 dias	112
Tabela 6 - Análise da variância da influência dos locais (E1, E2, E3, E4, E5 e E6) nas expansões.....	112
Tabela 7 - Expansões médias das barras de argamassa confeccionadas com agregados da pedreira desativada e da barragem	114
Tabela 8 - Expansão média das barras de argamassa aos 30 dias	116
Tabela 9 - Análise da variância das expansões entre os grupos AP e AB	116
Tabela 10 - Resultados dos ensaios mecânicos dos testemunhos de concreto extraídos da barragem.....	129
Tabela 11 - Velocidade de pulso ultra-sônico na barragem	132
Tabela 12 - Velocidade de pulso ultra-sônico nos testemunhos extraídos da barragem.....	132
Tabela 13 - Absorção de água e índice de vazios	134
Tabela 14 - Variável reduzida (Z) da absorção e índice de vazios das amostras E1 a E6	135

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre o consumo de cimento no concreto e o equivalente alcalino do cimento.....	47
Gráfico 2 - Teor péssimo de agregados	48
Gráfico 3 - Aumento das expansões com o decréscimo do tamanho das partículas....	49
Gráfico 4 - Redução da expansão causada pela RAA devido à substituição parcial de areia artificial de basalto por basalto pulverizado	50
Gráfico 5 - Influência da forma dos grãos nas expansões por RAA.....	51
Gráfico 6 - Expansão verso temperatura de cura em primas de concreto	53
Gráfico 7 - Distribuição % da composição química das amostras (A1, J1 e J2).....	102
Gráfico 8 - Expansão das barras de argamassa confeccionadas com agregados da pedreira desativada	109
Gráfico 9 - Expansão das barras de argamassa confeccionadas com agregados do concreto da barragem.....	111
Gráfico 10 -Expansões médias das barras de argamassa confeccionadas com agregados da barragem e da pedreira desativada	115
Gráfico 11 -Absorção de água e índice de vazios	134

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2	JUSTIFICATIVAS	20
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA	22
1.3.1	Objetivo principal	22
1.3.2	Objetivos secundários	22
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	USINA HIDRELÉTRICA DE CHAMINÉ – BARRAGEM DE SALTO DO MEIO	24
2.1	USINA HIDRELÉTRICA DE CHAMINÉ.....	24
2.2	BARRAGEM DE SALTO DO MEIO	26
2.2.1	Concreto da barragem de Salto do Meio.....	28
2.2.2	Indícios de reação álcali-agregado na barragem de Salto do Meio	28
3	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA).....	30
3.1	HISTÓRICO	30
3.2	MECANISMOS DE EXPANSÃO	33
3.3	TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	37
3.3.1	Reação álcali-sílica (RAS)	38
3.3.2	Reação álcali-silicato	41
3.3.3	Reação álcali-carbonato (RAC).....	43
3.4	FATORES INTERVENIENTES NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	45
3.4.1	Alcalinidade do concreto.....	45
3.4.2	Agregados.....	48
3.4.3	Umidade	51
3.4.4	Temperatura.....	53
3.4.5	Tensões no concreto.....	54
4	MÉTODOS INVESTIGATIVOS DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	55

4.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	55
4.2	EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO	57
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS).....	59
4.4	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX).....	61
4.5	ESPECTROSCOPIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX).....	63
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	65
5.1	CAMPANHAS DE CAMPO	65
5.1.1	Inspeções na barragem e definição dos locais de interesse para estudo	65
5.1.2	Extração dos testemunhos de concreto	71
5.1.3	Coleta de amostras de água e de material exsudado do concreto.....	74
5.1.4	Ensaio de ultrassom na estrutura da barragem	76
5.1.5	Localização da pedreira desativada (jazida).....	78
5.2	ENSAIOS LABORATORIAIS	80
5.2.1	Preparação dos testemunhos de concreto para os ensaios	80
5.2.2	Ensaio petrográficos	83
5.2.3	Ensaio de expansão pelo método acelerado.....	84
5.2.3.1	Método acelerado em barras de argamassa – NBR 15577-4	84
5.2.3.2	Método acelerado em CP's cilíndricos extraídos da barragem.....	86
5.2.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS)	88
5.2.5	Difratometria de raios X (DRX).....	90
5.2.6	Espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).....	91
5.2.7	Ensaio físico-químicos em amostras de água	91
5.2.8	Ensaio mecânicos	92
5.2.8.1	Ensaio de resistência à compressão axial – NBR 5739/07	92
5.2.8.2	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – NBR 7222/94.....	93
5.2.8.3	Ensaio de módulo de elasticidade – NBR 8522/03	93
5.2.9	Ensaio de ultrassom nos testemunhos de concreto.....	94

5.2.10	Ensaio de absorção de água e índice de vazios	95
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	96
6.1	ENSAIOS PETROGRÁFICOS	96
6.2	ENSAIOS REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUA E GEL	103
6.2.1	Ensaio físico-químico de água.....	103
6.2.2	Ensaio químico do material exsudado (gel)	105
6.3	ENSAIOS DE EXPANSÃO – MÉTODO ACELERADO.....	107
6.3.1	Expansões das barras de argamassa com agregados oriundos da pedra desativada – NBR 15577-4/08.....	108
6.3.2	Expansões das barras de argamassa com agregados oriundos do concreto da barragem – NBR 15577-4/08.....	110
6.3.3	Expansões dos testemunhos de concreto (5 x 10) cm submetidos as condições de ensaio da NBR 15577-4/08	112
6.3.4	Comparação entre os resultados dos ensaios acelerados com agregados da pedreira desativada e do concreto da barragem.....	114
6.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)..	117
6.5	ENSAIOS MECÂNICOS.....	129
6.6	ENSAIOS DE ULTRASSOM.....	131
6.7	ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS.....	133
6.8	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS	135
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
7.1	CONCLUSÕES	138
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
	REFERÊNCIAS.....	142
	ANEXOS	150

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto de cimento Portland é considerado um dos materiais mais utilizados no mundo, vem sendo empregado desde meados do século XIX nas mais variadas construções, apresentando muitas vantagens quando comparado a outros materiais de construção, provando ser um material resistente às mais variadas sobrecargas e ações do meio ambiente. Entretanto, há construções de concreto que apresentam manifestações patológicas em magnitude e incidência significativa (HELENE e FIGUEIREDO, 2005).

Entre os vários processos relacionados à deterioração do concreto, encontra-se a reação álcali-agregado (RAA), um fenômeno complexo que é responsável por afetar diversas construções, principalmente aquelas em contato com a água, em geral as obras hidráulicas como as barragens.

A reação entre os álcalis do cimento com minerais reativos dos agregados gera produtos expansivos capazes de microfissurar o concreto, causando a perda de elasticidade, resistência mecânica e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os sintomas da reação álcali-agregado são evidenciados a partir do aparecimento de fissuras em forma de mapa, descoloração do concreto, fechamentos de juntas de dilatação, deslocamentos de elementos estruturais, e em alguns casos a exsudação de gel sílico-alcalino na superfície do concreto (PAULON, 1981).

Este gel sílico-alcalino na presença de umidade pode se expandir, causando fissuração e afetando as características mecânicas do concreto.

Existem vários fatores que influenciam a velocidade de desenvolvimento e magnitude do fenômeno da RAA, sendo os principais: a natureza e quantidade

disponível de agregados reativos; teor de álcalis no cimento e no ambiente; temperatura ambiente; disponibilidade de umidade e restrições mecânicas. Ante os fatores que influenciam à RAA, nota-se que as barragens apresentam condições particularmente favoráveis ao seu desenvolvimento, devido ao grande volume de concreto massa empregado e as condições de temperatura e umidade favoráveis (SILVA, 2007).

Quando do conhecimento prévio da reatividade do agregado, a reação álcali-agregado pode ser combatida preventivamente através de adições pozolânicas, porém, segundo Hasparyk (2005), ainda existem grandes dificuldades de entender melhor os mecanismos envolvidos e controlar a ação deletéria, ou ainda conforme Silva (2007), avaliar a continuidade da reação e dos efeitos da expansão na estrutura.

De acordo com Sabbg (2003), RAA é uma das patologias de maior grau de deterioração e dificuldade de recuperação, principalmente no caso das barragens, fatores esses que levam este fenômeno a ser objeto pesquisa aprofundado, visando principalmente às questões de segurança e durabilidade.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A reação álcali-agregado tem ocasionado a degradação e desativação de diversas estruturas, como barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Segundo Hasparyk (2005), existem relatos no meio técnico indicando mais de 140 casos de barragens afetadas pela RAA. A autora também comenta que em estruturas onde estão instalados equipamentos hidrodinâmicos e elétricos (comportas, geradores, turbinas, etc.), os problemas ocasionados pela RAA passam a ter uma maior dimensão e custos, devido à manutenção e reparo.

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB (1999), há países em que cerca de 25% das estruturas de barragens está afetada pela RAA. No Brasil, de acordo com Silveira *et al.* (2002), há conhecimento de mais de 30 barragens e usinas hidrelétricas atingidas pela RAA. Silva (2007) comenta que na África do Sul, entre 1970 e 1996 foi gasto cerca de US\$ 350.000.000,00 (trezentos e cinquenta milhões de dólares americanos) com manutenção e reparo de estruturas de concreto afetadas por esta reação deletéria. Os números de obras identificadas com RAA tendem a aumentar, considerando o desenvolvimento de novas pesquisas em todo o mundo.

Até pouco tempo, a preocupação com a reação álcali-agregado se dava somente com obras hidráulicas, porém, recentemente na cidade de Recife/PE, foram diagnosticados vários casos de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado, chamando atenção da população e da comunidade técnica. Segundo Andrade (2007), entre janeiro de 2005 e março de 2007, foram estimados 15 casos de fissuração em blocos de fundação devido a RAA na Região Metropolitana do Recife.

Apesar das várias pesquisas desenvolvidas, ainda não se dispõe de uma maneira eficiente para impedir a evolução da RAA após iniciado o processo, Silva (2007), relata que algumas questões ainda continuam sem resposta, tais como: quanto tempo a RAA ainda perdurará? Qual a velocidade de expansão esperada para uma estrutura afetada pela RAA? Como evitar a continuidade da reação?

Deste modo, a pesquisa sobre reação álcali-agregado residual de estruturas de concreto afetadas, objeto desta dissertação, mostra-se relevante para o desenvolvimento do conhecimento técnico-científico sobre o assunto, objetivando a busca por soluções. A análise da RAA residual pode indicar quanto de expansão o concreto afetado ainda sofrerá, possibilitando a análise da segurança estrutural, a elaboração de projetos de recuperação adequados ao grau de expansão futuro e previsão de recursos para manutenção da estrutura em níveis operacionais de utilização.

Como justificativa social e ambiental, a RAA pode afetar estruturas com papel social e econômico importantes, como usinas de energia e sistemas de abastecimento de água e saneamento, gerando aumento do risco à saúde e da produção de bens.

A diminuição da vida útil dessas estruturas e conseqüente aumento dos gastos de manutenção desviam recursos que poderiam ser utilizados para atividades que levam ao desenvolvimento sustentado, à distribuição de renda e a assistência as camadas e extratos sociais mais necessitados.

O prolongamento da vida útil dos aproveitamentos hidráulicos diminui a pressão sobre materiais necessários à construção e evita discussões sobre o destino da estrutura comprometida.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 Objetivo principal

Esta pesquisa objetiva investigar o potencial reativo álcali-agregado residual do agregado constituinte do concreto da barragem de Salto do Meio, através do ensaio acelerado de reatividade potencial preconizado pela NBR 15577-4/08, utilizando para isso, a comparação entre as determinações das expansões em barras de argamassa, com agregados do próprio concreto da barragem, e com agregados da pedra empregada na época da sua construção.

1.3.2 Objetivos secundários

- a) analisar a eficiência da metodologia utilizada para a análise da reação álcali-agregado residual para este estudo de caso;
- b) avaliar o estado global do concreto da estrutura em análise;

- c) avaliar qualitativamente a interação entre diferentes manifestações patológicas presentes na barragem.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho foi dividido em sete capítulos. Neste primeiro capítulo, é apresentada uma introdução ao assunto, as justificativas e os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2, são apresentadas informações sobre a Usina Hidrelétrica de Chaminé e sua barragem de Salto do Meio, nele aborda a história e a relevância desse empreendimento, as informações sobre o concreto e os indícios de RAA.

No capítulo 3, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto, aborda o histórico sobre a reação álcali-agregado, seus mecanismos de reação, os diferentes tipos de RAA e os fatores intervenientes na reação.

No capítulo 4, são apresentados alguns dos métodos investigativos da RAA, sendo estes os métodos principais utilizados nesta pesquisa.

O programa experimental foi apresentado no quinto capítulo, o qual aborda as campanhas de campo realizadas e os ensaios laboratoriais, bem como o detalhamento de todos os procedimentos.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios e suas respectivas análises e discussões.

As considerações finais da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros, são apresentadas no sexto capítulo.

2 USINA HIDRELÉTRICA DE CHAMINÉ – BARRAGEM DE SALTO DO MEIO

2.1 USINA HIDRELÉTRICA DE CHAMINÉ

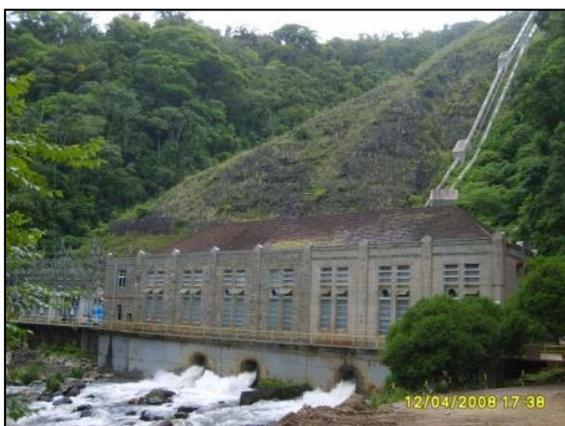
Atualmente, a Usina Hidrelétrica de Chaminé possui duas barragens, Salto do Meio com a função de regulação (Figura 1 a), e Voçoroca com a função de acumulação (Figura 1 b). A usina tem quatro grupos geradores com potência instalada total de 18 MW (Figura 1 c).



(a) barragem de Salto do Meio



(c) barragem de Voçoroca

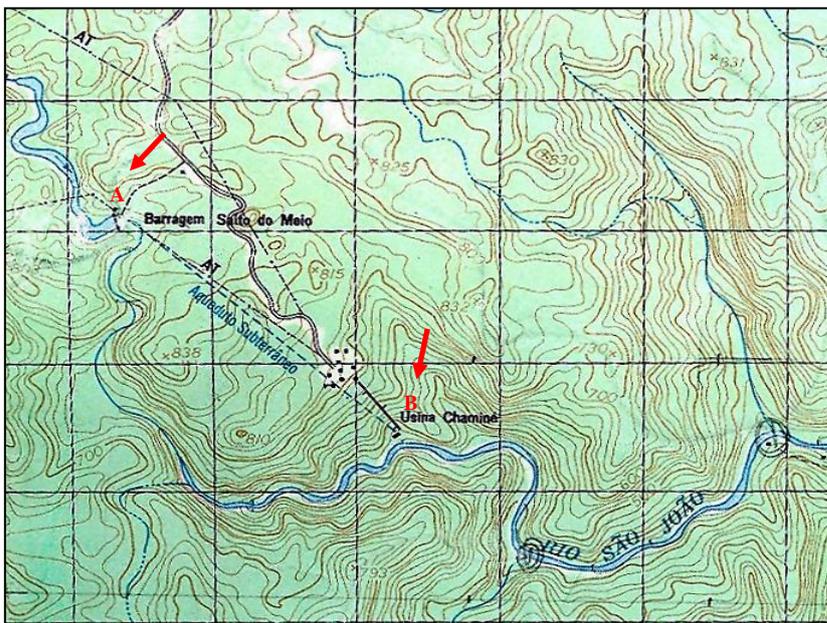


(a) casa de força

Figura 1 - Complexo energético de Chaminé
Fonte: Companhia Paranaense de Energia (COPEL)

A usina fica localizada na margem esquerda do Rio São João (Figura 2), na divisa entre os municípios de São José dos Pinhais e Tijucas do Sul no estado do

Paraná, em área de preservação permanente na Serra do Mar, distante 79 km de Curitiba.



(A) barragem de Salto do Meio;

(B) casa de força.

Figura 2 - Arranjo geral da UHE de Chaminé

Fonte: COPEL

A construção da usina foi realizada pela Companhia Força e Luz do Paraná, sob a orientação do americano Howell Lewis Fry. As obras foram concluídas em 1931, possuindo 2 (dois) grupos geradores com potência instalada total de 8 MW. Em 1946 teve sua potência ampliada com o grupo gerador 3 (três), e em 1952 com o grupo gerador 4 (quatro), disponibilizando um total de 18 MW de potência. Em 1975 foi incorporada pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL).

Essa usina foi o primeiro grande empreendimento hidrelétrico do estado do Paraná, permitiu o desenvolvimento da região de Curitiba, quando a capital tinha apenas 80.000 habitantes e 2,9 MW de potência de geração de energia disponível (FRY, 1931).

Devido à ampliação da potência instalada, a capacidade de armazenamento da barragem de Salto do Meio, com 330 mil m³, tornou-se insuficiente para alimentação das turbinas. Então, a capacidade de armazenamento foi ampliada com mais 38 milhões m³ através da construção da barragem de Voçoroca no mesmo Rio São João.

2.2 BARRAGEM DE SALTO DO MEIO

A construção da barragem de Salto do Meio ocorreu entre outubro de 1929 e janeiro de 1931 (Figura 3), ou seja, neste ano (2009) a barragem completou 78 anos em operação.



(a) construção da barragem de Salto do Meio



(b) barragem em operação

Figura 3 - Construção e operação da barragem de Salto do Meio
Fonte: COPEL

A barragem é do tipo gravidade com 9 (nove) contrafortes, medindo 94 metros de comprimento, dos quais 35,5 metros de vertedouro do tipo soleira vertente. A altura da barragem é de aproximadamente 14,7 metros do contato rocha/concreto até o topo do vertedouro, nos demais perfis esta altura chega a 19,7 metros. As Figuras 4, 5 e 6 mostram a estrutura da barragem.

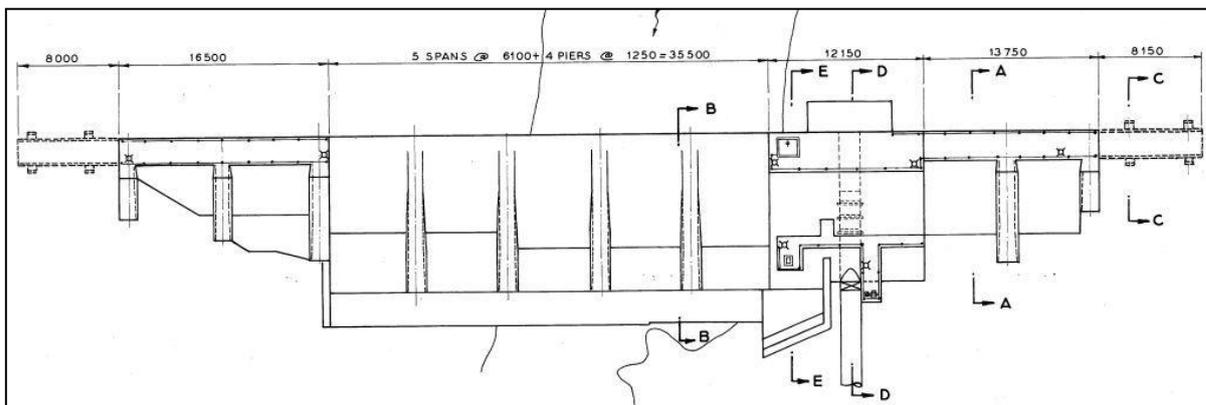


Figura 4 - Planta da barragem de Salto do Meio
 Fonte: COPEL/Companhia Força de Luz do Paraná (1955)

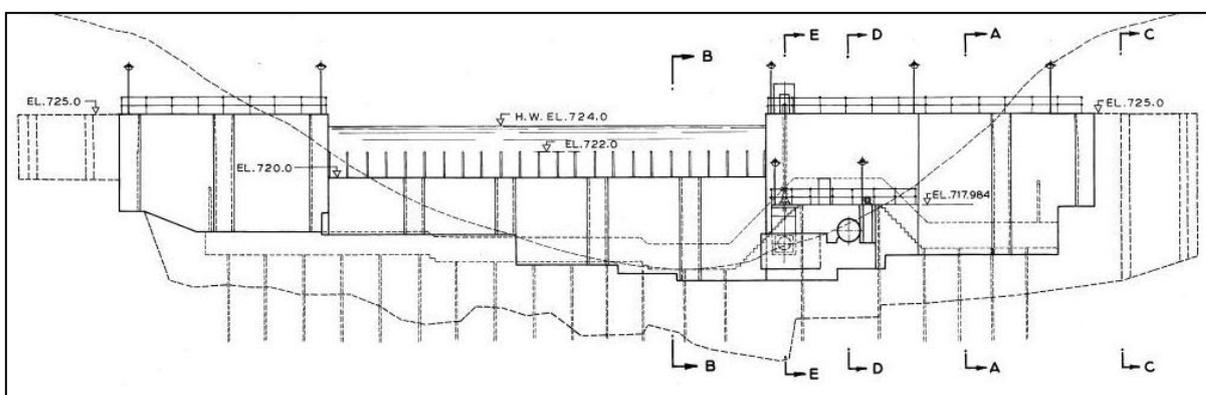


Figura 5 - Perfil longitudinal da barragem de Salto do Meio
 Fonte: COPEL/Companhia Força e Luz do Paraná (1955)

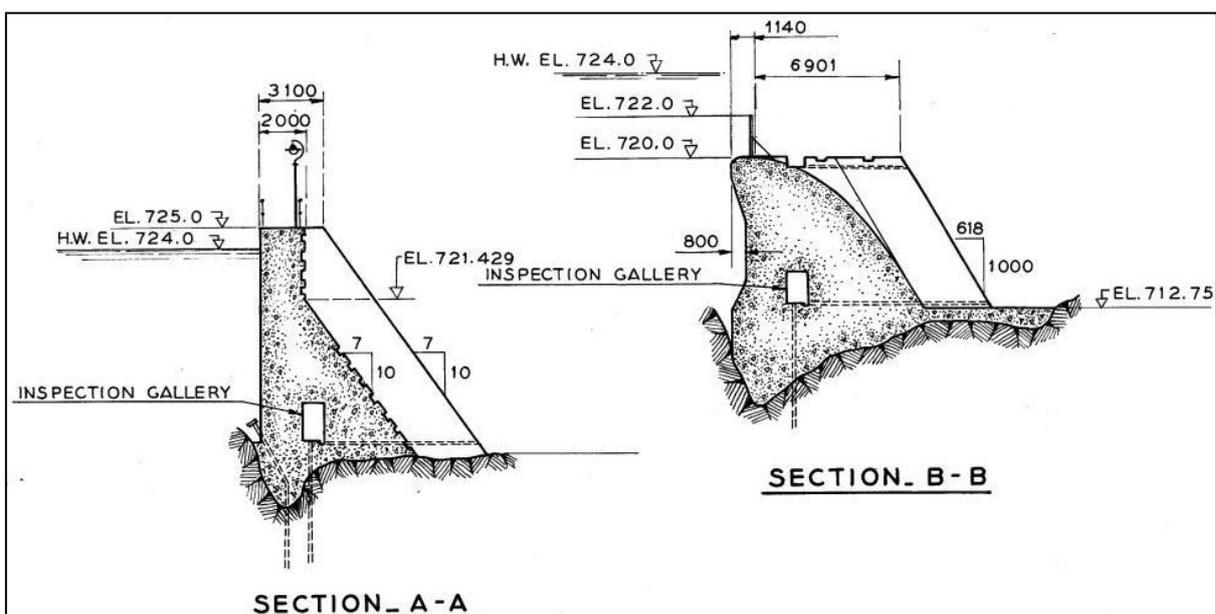


Figura 6 - Perfis transversais "A-A e B-B" da barragem de Salto do Meio
 Fonte: COPEL/Companhia Força de Luz do Paraná (1955)

Após a instalação das duas unidades geradoras, foram implantados *flash-boards*¹ de madeira com altura de 2 m sobre a soleira do vertedouro da barragem, visando elevar a cota do reservatório. Contudo, não houve necessidade de reforço da estrutura, pois o projeto inicial previa aumento da cota do reservatório em até 5 (cinco) metros.

2.2.1 Concreto da barragem de Salto do Meio

Foram utilizados aproximadamente 5.805 m³ de concreto para a construção da barragem de Salto do Meio. Os registros da época indicam certo nível de controle tecnológico do concreto, com a utilização de laboratórios montados especialmente para atender as necessidades da obra. O traço utilizado, mais satisfatório, obteve resistência média à compressão aos 28 dias de 13,8 MPa, obtida através de ensaios de corpos de prova cilíndricos (FRY, 1931).

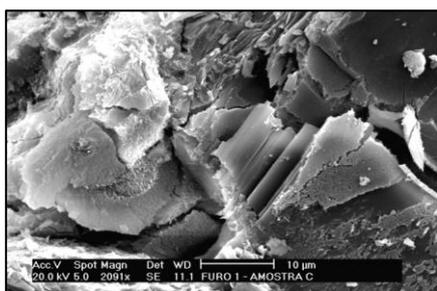
Como não havia areia para confecção do concreto, foi utilizada areia artificial produzida na própria pedreira da obra. Fry (1931) relata que a resistência atingida estava acima das especificações, porém para conseguir um concreto mais trabalhável, foi utilizada grande quantidade de cimento.

2.2.2 Índícios de reação álcali-agregado na barragem de Salto do Meio

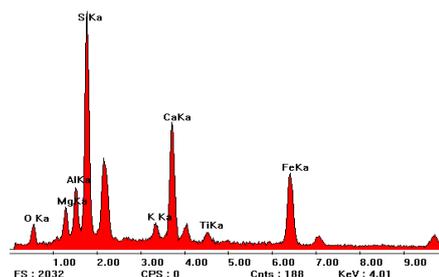
Por meio do programa de monitoramento da barragem de Salto do Meio, observou-se a partir do início desta década a evolução na degradação do concreto, apresentando aumento no quadro de fissuração e exsudação de materiais das fissuras.

¹ Dispositivos compostos por placas de madeira e estrutura metálica com 2 (dois) metros de altura, que funcionam como um conjunto de comportas planas.

Conforme relatório de ensaios do Lactec (2005), na época foi realizado um estudo para verificação do estado do concreto, cujos resultados indicaram produtos da reação álcali-agregado, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8. No entanto, o concreto apresentou resistência adequada para estrutura, com resistência média à compressão de 45,4 MPa.



(a) micrografia de gel gretado na adjacência de uma fissura

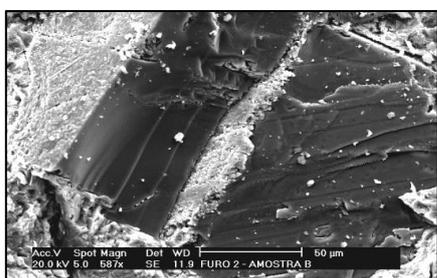


(b) espectro de EDS de gel Si-Ca-K gretado

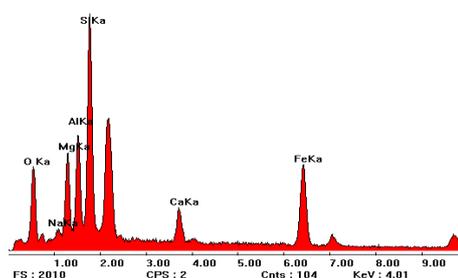
Elemento	% Peso
O	7,78
Mg	4,95
Al	6,54
Si	23,80
K	2,76
Ca	19,60
Ti	2,86
Fe	31,71
<i>Total</i>	<i>100,00</i>

(c) percentual atômico

Figura 7 - Micrografia e espectro de EDS
Fonte: Adaptado (LACTEC, 2005)



(a) micrografia gel preenchendo a fratura de um agregado



(b) espectro de EDS de gel Si-Ca-Na

Elemento	% Peso
O	16,02
Na	1,52
Mg	11,28
Al	12,19
Si	22,73
Ca	4,87
Fe	31,39
<i>Total</i>	<i>100,00</i>

(c) percentual atômico

Figura 8 - Micrografia e espectro de EDS
Fonte: Adaptado (LACTEC, 2005)

3 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

3.1 HISTÓRICO

O fenômeno da RAA foi descrito pela primeira vez em 1940 por um trabalho de autoria de Stanton, a partir de investigações sobre estruturas fissuradas de concreto na Califórnia. Stanton identificou o processo de RAA como sendo uma reação deletéria causada pela expansão de um gel gerado pela sílica reativa dos agregados e os álcalis do cimento, cuja manifestação é capaz de causar fissuras em forma de “mapa”, pipocamento e exsudação de um fluido viscoso sílico-alcalino (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Em seguida, em 1941, é apresentado um artigo por Blanks e Meissner sobre a deterioração da barragem *Parker Dam* pela RAA (POOLE, 1992 *apud* HASPARYK, 2005).

Segundo Hobbs (1988), após o reconhecimento da RAA como um problema em 1940 na América do Norte, ela foi detectada em diversas regiões do mundo, na Dinamarca nos anos 50, na Alemanha Ocidental nos anos 60, no Reino Unido em meados dos anos 70 e no Japão nos anos 80.

O trabalho de Stanton é considerado um marco nas pesquisas de RAA, pois muitas metodologias de ensaios foram embasadas em suas descobertas (VALDUGA, 2007). Após a descoberta do fenômeno, pesquisadores em vários países diferentes passaram a pesquisá-lo buscando inicialmente a identificação dos minerais reativos presentes nos agregados (HASPARYK, 2005).

Logo várias instituições em todo mundo conduziram pesquisas sobre reação álcali-agregado, como: *Army Corps of Engineers e Portland Cement Association* nos E.U.A, *Australian Council for Scientific and Industrial Research*, na Austrália e o *Danish National Committee*, na Dinamarca. Estas pesquisas buscaram entender o mecanismo de reação, a eficiência de adições minerais em reduzir as expansões da reação, conhecer quais os tipos de rocha eram suscetíveis a RAA, e quais métodos de

ensaios eram capazes de detectar e medir o potencial reativo das rochas e da combinação cimento-agregado (SILVA, 2007).

Entre os diversos pesquisadores de destaque no entendimento da reação encontram-se Swenson do Canadá, Idorn da Dinamarca e Vivian da Austrália (POOLE, 1992 *apud* HASPARYK, 2005).

Apesar de mais de 60 anos de pesquisas a respeito, ao longo destes anos, a reação tem provocado a desagregação seguida de recuperação ou desativação de estruturas de concreto em muitos países (VALDUGA, 2002).

A partir da década de 70, surgiram novos casos de RAA mesmo em estruturas cujos agregados haviam sido investigados, revelando que os métodos de ensaios utilizados na época não foram eficazes. Uma possível explicação é a reação lenta de certos tipos de agregados, cujos minerais apresentam quartzo tensionado em sua constituição (SILVA, 2007).

Ainda segundo a autora, a partir da década de 90, novos métodos foram desenvolvidos, impulsionados devido à grande quantidade de casos de RAA que surgiram em todo o mundo. Dentre estes métodos, destaca-se o método acelerado das barras de argamassa (ASTM C 1260) e o método dos prismas de concreto (ASTM C 1293). No Brasil, recentemente estes dois métodos foram normalizados pela NBR 15777.

Muitas obras já foram diagnosticadas como afetadas pela RAA, como exemplo do panorama mundial, podem ser citados os exemplos: a barragem Parker (E.U.A), a barragem Val de la Mare (Reino Unido), as barragens Beauharnois e Mactaquac (Canadá), a barragem Apolônio Sales (Brasil), a barragem de Sandouping (China), trechos da via urbana de Johannesburg (África do Sul), e trechos da via expressa Hanshin (Japão) (ICOLD, 1991).

No Brasil, as primeiras pesquisas sobre o assunto começaram a surgir na década de 80 (PAULON, 1981), apesar de não haver números precisos, relatos indicam evidências de reação em várias barragens brasileiras. (VALDUGA, 2002).

Há relatos de mais de 20 casos de barragens afetadas pela RAA no Brasil (HASPARYK; CARASEK; MONTEIRO, 2001). Já conforme Silveira *et al.* (2002), há conhecimento de mais de 30 hidrelétricas atingidas pela reação.

As estruturas atingidas não se limitam apenas às barragens, também são afetadas as estruturas das tomadas d'água, casas de força e vertedouros (ADRIOLO, 2000). As consequências dos danos em estruturas onde estão instalados equipamentos como geradores e turbinas são maiores, deslocamentos milimétricos destas estruturas, gerados por expansões, podem causar a paralisação das máquinas (VALDUGA, 2002).

Recentemente no Brasil, na cidade de Recife/PE, foram diagnosticados casos de RAA em blocos de fundação, chamando atenção da população e da comunidade técnica. Segundo Andrade (2007), entre janeiro de 2005 e março de 2007, foram estimados 15 casos de fissuração em blocos de fundação devido à RAA (Figura 9).



Figura 9 - Fissuras em bloco de fundação afetado pela RAA na cidade de Recife/PE
Fonte: ANDRADE (2006)

3.2 MECANISMOS DE EXPANSÃO

Nesta seção, são apresentadas as principais teorias acerca dos mecanismos de expansão da reação tipo álcali-sílica/silicato.

A reação álcali-agregado é a reação química que ocorre em uma estrutura de concreto entre os íons hidroxilas (OH^-), íons alcalinos (Na^+ e K^+) e alguns minerais reativos presentes no agregado. Os álcalis são fornecidos principalmente pelo cimento Portland, mas também podem ter origem na água de amassamento, pozolanas, aditivos, agentes externos e nas próprias rochas usadas como agregados.

Com a hidratação do cimento, ocorre a dissolução dos componentes alcalinos na água de amassamento, e a solução dos poros do concreto torna-se alcalina. O pH dessa solução depende do teor de álcalis do cimento, que para concretos normais geralmente é de 12,5 a 13,5. Neste meio de pH alto, alguns agregados contendo sílica e minerais silicosos não permanecem estáveis por longos períodos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A explicação é o ataque da superfície da sílica pelos íons hidroxilas (HELMUTH e STARK, 1992), a solubilidade da sílica aumenta mais de duas ordens de grandeza quando o pH passa de 10 para 11,5 (VALDUGA, 2007).

As principais teorias para explicar o mecanismo de expansão do gel, produto da reação, são as teorias da pressão osmótica, desenvolvida por Hansen (1944), e a teoria da adsorção, desenvolvida por Vivian (1950). A teoria da pressão osmótica propõe hipoteticamente que os produtos da reação ficam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento, a qual devido às pressões hidráulicas ocasiona a expansão da estrutura de concreto. Já, a teoria da adsorção, propõe que as expansões e fissuras nas estruturas são causadas por pressões mecânicas exercidas pelos produtos de reação no estado sólido ou semi-sólido (PAULON, 1981). Segundo Hasparyk (2005), a teoria da adsorção é mais aceita atualmente.

Essa teoria está atribuída às tensões produzidas pelo crescimento do gel quando saturado, o qual dependerá da concentração volumétrica do gel, da taxa de crescimento e suas propriedades físicas. Quando a taxa de crescimento do gel ocorre lentamente, esse pode migrar pelo concreto e dissipar as tensões, caso contrário, as tensões podem aumentar causando a fissuração e expansão do gel (HOBBS, 1988).

Prezzi, Monteiro e Sposito (1997), propuseram um modelo para elucidar melhor as expansões ou variações volumétricas devidas a RAA, cujos conceitos são baseados na química de superfície. De acordo com os autores, as expansões ocasionadas pelo inchamento do gel são devidas às forças de repulsão da dupla camada elétrica. Quando uma superfície sólida entra em contato com um líquido, a superfície do sólido fica carregada com excesso de carga e a interface eletrificada, como consequência, as propriedades das duas fases são alteradas. A reação álcali-sílica relaciona-se com a interação da superfície da sílica altamente carregada presente no agregado e a solução alcalina dos poros do concreto. Essa reação, é responsável pela dissolução da sílica e formação de um gel, o qual é expansivo em presença de água (HASPARYK, 2005).

É possível estimar o valor da pressão no concreto devido à reação álcali-sílica, baseando-se no modelo de Gouy-Chapman na parte difusa da dupla camada elétrica, o potencial expansivo do sistema será maior quanto mais espessa for a parte difusa da dupla camada, e o valor pode variar de 2,2 MPa a 10,3 MPa (PREZZI, MONTEIRO e SPOSITO, 1997). Porém na prática, foram obtidos valores da ordem de 6 MPa a 7 MPa (DIAMOND, 1989).

Com relação à capacidade expansão, géis com maiores teores de íons monovalentes (Na^+ e K^+), produzem maiores espessuras na dupla camada que géis com maiores teores de íons bivalentes (Ca^{++}), pois a valência e a concentração de íons determinam a espessura da dupla camada elétrica e as forças de repulsão. Dessa forma, um gel rico em sódio possui maior capacidade de expansão que um gel rico em cálcio (PREZZI, MONTEIRO e SPOSITO, 1997; HASPARYK, 1999). Quanto maior a razão

CaO/SiO₂ do gel, menor a habilidade que ele possui de expandir (PREZZI *et al.*, 1997).

As reações álcali-agregado produzem géis com composições químicas diferentes. O gel é o produto de uma reação instável e suas características, tais como: viscosidade, grau de inchamento e absorção de água, dependem principalmente de sua composição química e da presença de água. Já as características do gel formado e seus efeitos, dependem diretamente das condições em que se encontram o concreto, das características de suas estruturas e condições ambientais (VEIGA *et al.*, 1997).

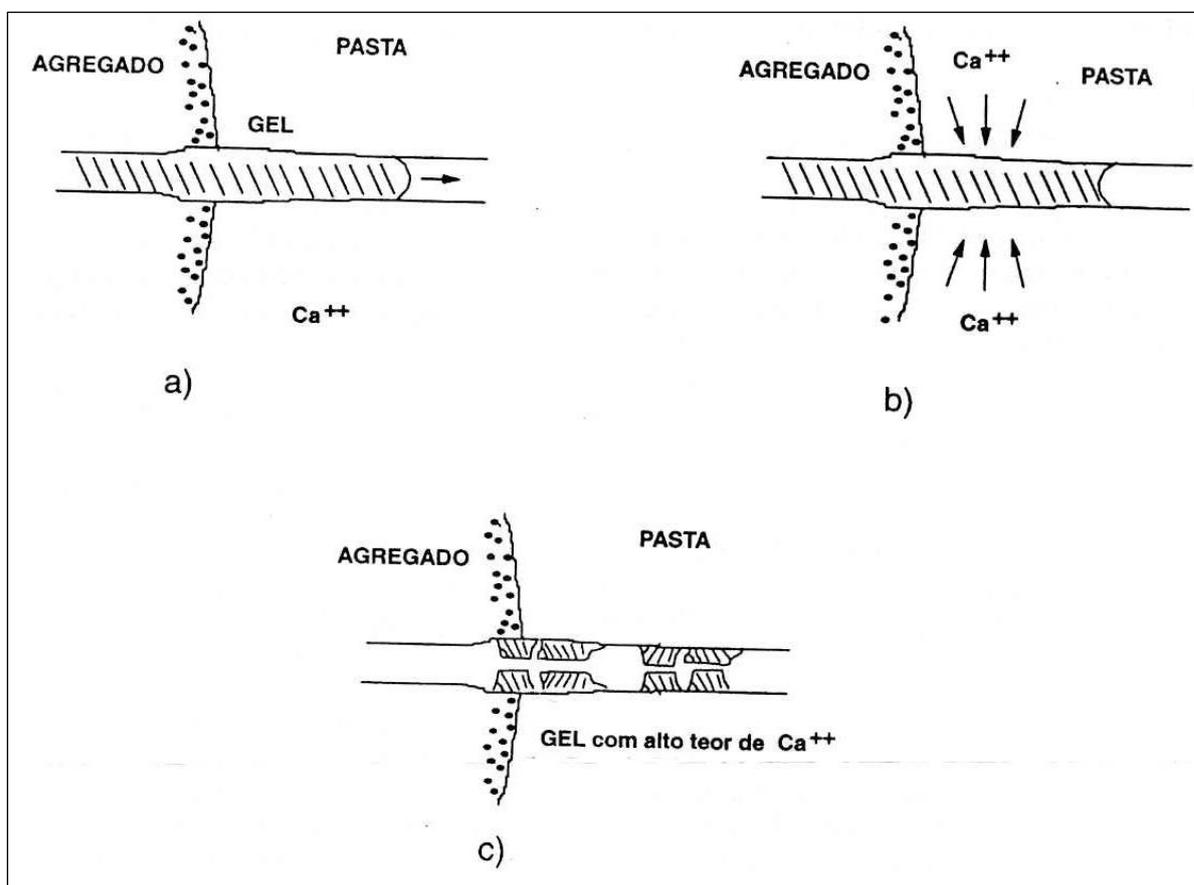
Os mesmos autores comentam que, a composição química do gel também pode modificar conforme o local de sua formação (no interior do agregado, poros, pasta e regiões microfissuradas), o qual varia devido à mobilidade do gel dentro do concreto.

O teor de silício (Si) diminui, enquanto o de cálcio (Ca) aumenta, quanto mais longe o gel formado estiver do agregado; isso devido há uma absorção dos íons cálcio presentes na pasta de cimento. O gel rico em cálcio possui maior viscosidade e menor capacidade de inchamento, quando atinge o estado sólido, há uma coagulação e retração gerando algumas fissuras na sua estrutura (Figura 10) (VEIGA *et al.*, 1997).

A RAA é uma reação espontânea, ou seja, nas condições de pH e temperatura em que se desenvolve, seus produtos formados são mais estáveis que os reagentes. Com isso, após iniciado o processo de reação, praticamente não há como cessá-lo (VALDUGA, 2007).

Após a formação do gel, duas propriedades do concreto são fundamentais para o processo de deterioração, além daquelas intrínsecas ao gel, a permeabilidade e porosidade. A permeabilidade regula o acesso da água ao interior do concreto, caso essa seja elevada, propiciará expansões maiores devido à maior quantidade de água em contato com o gel. A porosidade representa o volume de vazios do concreto, quando

essa for faixa, durante a expansão do gel ocorrerá o aparecimento de tensões de fissuração, caso contrário, a expansão do gel poderá ocorrer dentro dos poros sem ocasionar tensões de fissuração.



- (a) formação do gel próximo ao agregado;
 (b) movimento do gel ao longo da pasta de cimento com absorção de íons cálcio;
 (c) gel no estado sólido, apresentado fissuras devido à retração.

Figura 10 - Mecanismo de formação do gel de RAA

Fonte: VEIGA *et al.* (1997)

Quando há o surgimento de tensões, sempre que essas forem maiores que a resistência à tração do concreto, o quadro de fissuração será instaurado (VALDUGA, 2007). A Figura 11 demonstra resumidamente o processo da RAA.

Haja vista, as várias teorias apresentadas sobre os mecanismos de expansão da RAA, é importante salientar, que tanto os mecanismos como a velocidade de expansão variam de acordo com os minerais envolvidos. Portanto, estes parâmetros variam conforme os tipos de reação: álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato.

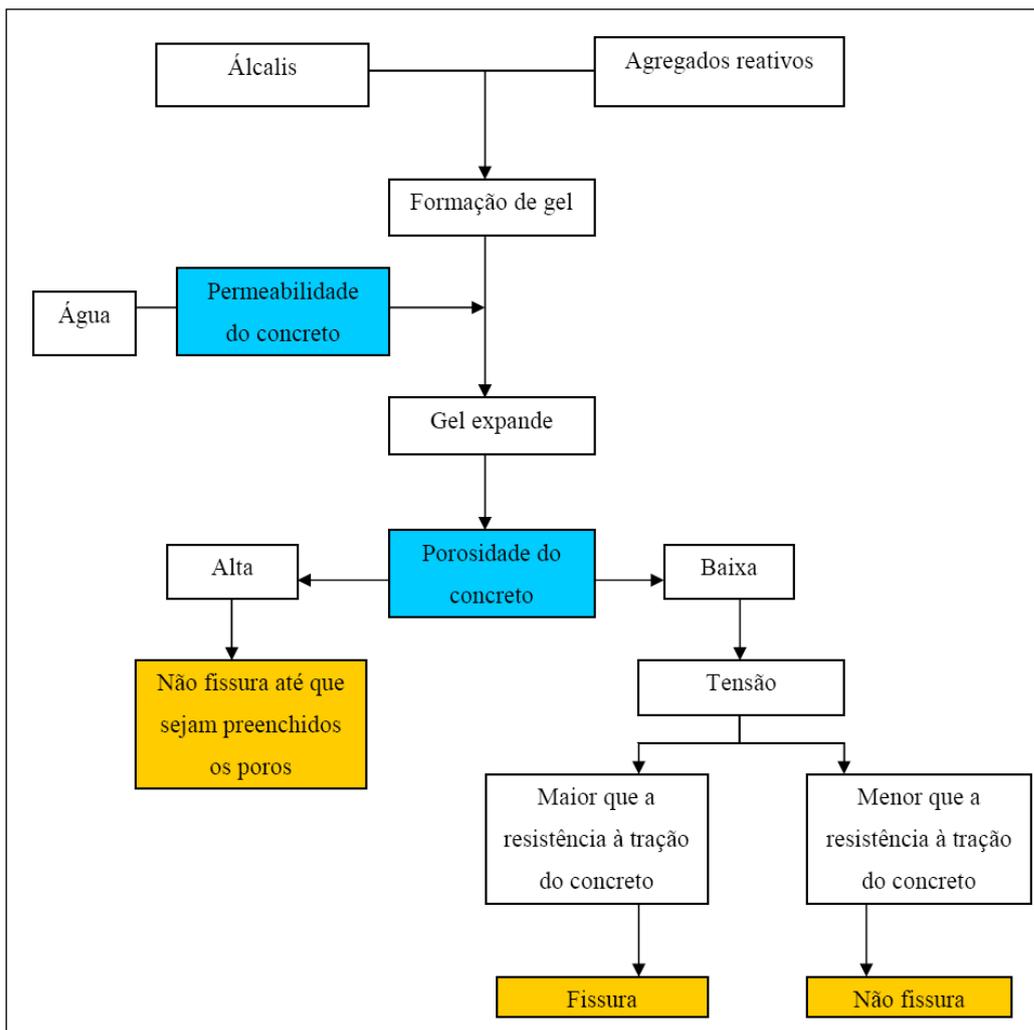


Figura 11 - Mecanismo do processo de reação álcali-agregado
 Fonte: FERRAIS (2000) *apud* VALDUGA (2002)

3.3 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado pode ser classificada em três tipos básicos, em função da composição mineralógica dos agregados que participam da reação química, e do mecanismo de expansão resultante:

- a) Reação álcali-sílica;
- b) Reação álcali-silicato;

c) Reação álcali-carbonato.

A reação álcali-sílica e álcali-silicato não possuem diferenças evidentes com relação ao mecanismo de expansão, ambas formam gel, o que as difere basicamente é a complexidade e a velocidade com que ocorrem. Contudo, os ensaios para identificação da potencialidade reativa dos agregados e as medidas preventivas adotadas no concreto para minimizar os efeitos deletérios da RAA, tais como o uso de adições minerais, são idênticos para os dois tipos de reação (TIECHER, 2006).

3.3.1 Reação álcali-sílica (RAS)

A reação álcali-sílica é o tipo de reação mais registrada e estudada dentre as reações álcali-agregado. A NBR 15577-1 (ABNT, 2008), define esta reação como sendo o tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo.

Constituem exemplos de sílica reativa (minerais na forma desordenada): opala ou sílica amorfa, calcedônia (variedade de quartzo fibroso ou criptocristalino), cristobalita e tridimita (formas cristalizadas metaestáveis de sílica), vidros naturais ou vulcânicos (depósitos piroclásticos ou rochas vulcânicas), e os vidros artificiais (pyrex) (HOOBS, 1998; HASPARYK, 1999).

A Figura 12 exemplifica a química da RAS de duas formas, uma quando o ataque dos íons hidroxilas ocorre na superfície bem cristalizada da sílica, e a outra quando a sílica é amorfa (DENT GLASSER e KATAOCA, 1981).

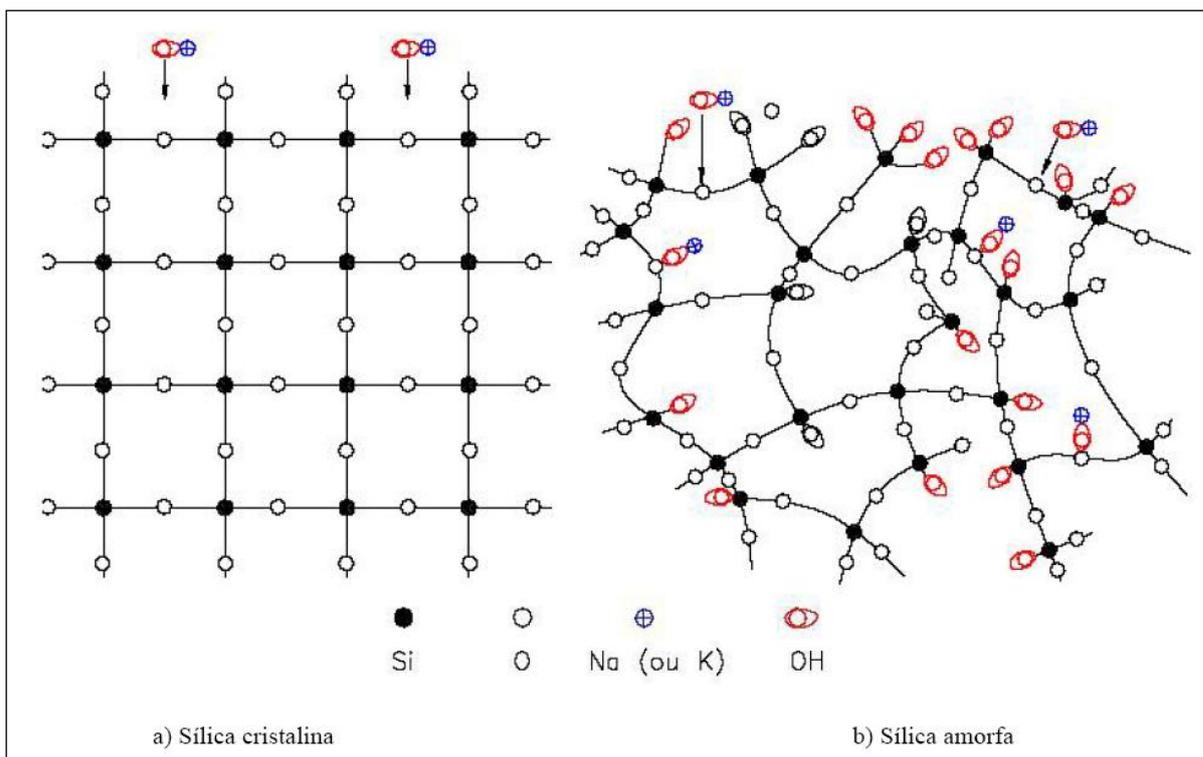


Figura 12 - Ataque das hidroxilas à sílica
 Fonte: DENT GLASSER e KATAOKA (1981)

Na Figura 12 a, observa-se o ataque dos íons hidroxilas sobre a superfície da sílica cristalina, cujo processo é muito lento e com poucos íons de sílica passando para a fase fluida. Na Figura 12 b, porém, percebe-se que a sílica pouco cristalina permite a penetração generalizada dos íons hidroxilas (OH^-) e dos íons alcalinos (Na^+ , K^+), ocasionando o rompimento das ligações do grupo siloxano (Si-O-Si) (DENT GLASSER e KATAOKA, 1981).

De acordo com diversos autores (GLASSER e KATAOKA, 1981; TURRIZIANI, 1986; HOBBS, 1988; GLASSER, 1992; FURNAS, 1997), a primeira etapa da reação é definida como sendo do tipo ácido-base na qual os íons hidroxilas (OH^-), dissociados na solução alcalina, atacam as ligações do grupo silanol (Si-OH), neutralizando-as e liberando água. Simultaneamente ocorre a associação dos cátions (Na^+) presentes no meio à estrutura, formando um gel de silicato alcalino, como o exemplo da Figura 13 (Equações 3.1 e 3.2).

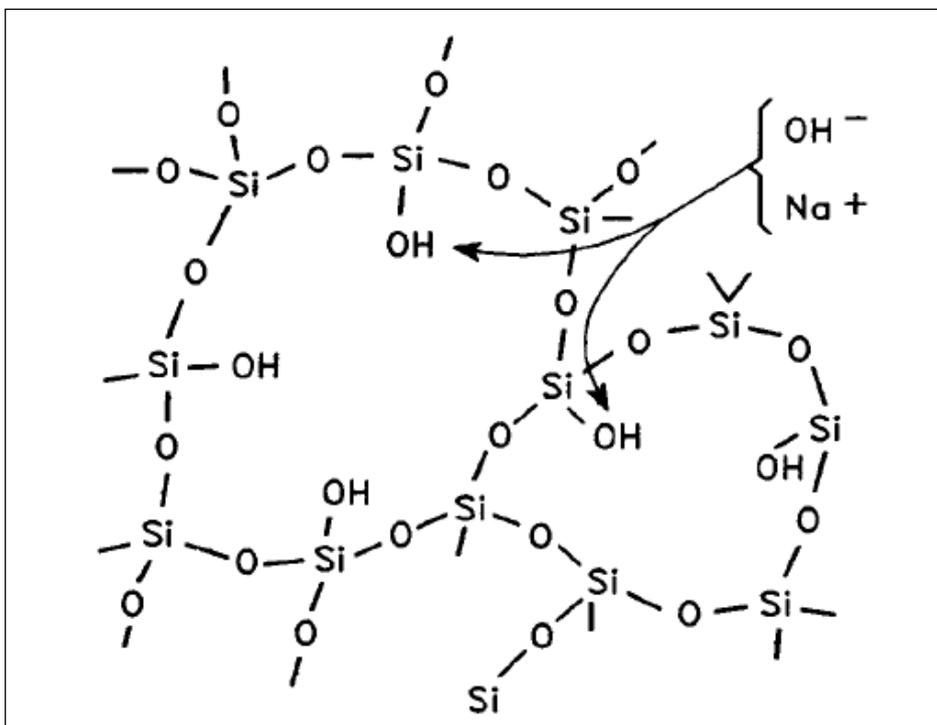
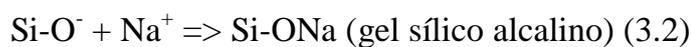


Figura 13 - Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas
Fonte: TURRIZIANI (1986)

Em um segundo estágio, as ligações do grupo siloxano (Si-O-Si) são atacadas pelos íons hidroxilas (OH^-), rompendo estas ligações e propiciando a absorção de água e íons alcalinos (Equação 3.3 e Figura 14). O silicato solúvel H_2SiO_4 (ácido ortossilícico) fica em solução em um ambiente com pH alto.



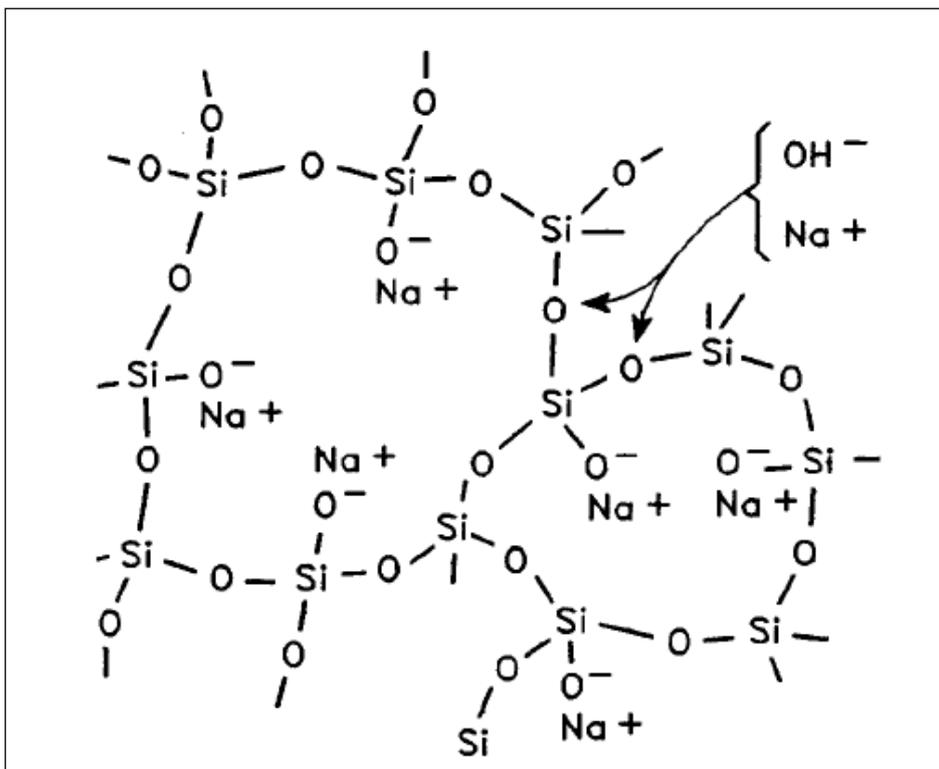


Figura 14 - Ruptura da ligação do grupo siloxano pelos íons hidroxilas
Fonte: TURRIZIANI (1986)

3.3.2 Reação álcali-silicato

A reação álcali-silicato é um tipo específico de reação álcali-sílica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas (NBR 15577-1/2008). A ocorrência é mais lenta devido ao fato dos minerais reativos estarem mais disseminados na matriz e a presença de quartzo deformado (VEIGA *et al.*, 1997; VALDUGA, 2007).

Essa reação ocorre entre as hidroxilas dos álcalis do cimento e silicatos presentes em determinadas rochas: sedimentares (argilitos, siltitos, folhelhos argilosos e grauvacas), metamórficas (gnaisse e quartzitos) e magmáticas (granitos) (VALDUGA, 2007). As presenças do quartzo tensionadas ou minerais expansivos do grupo dos filossilicatos são os principais elementos relacionados à reação (KIHARA, 1986; VEIGA *et al.*, 1997). As grauvacas e os argilitos são rochas que normalmente

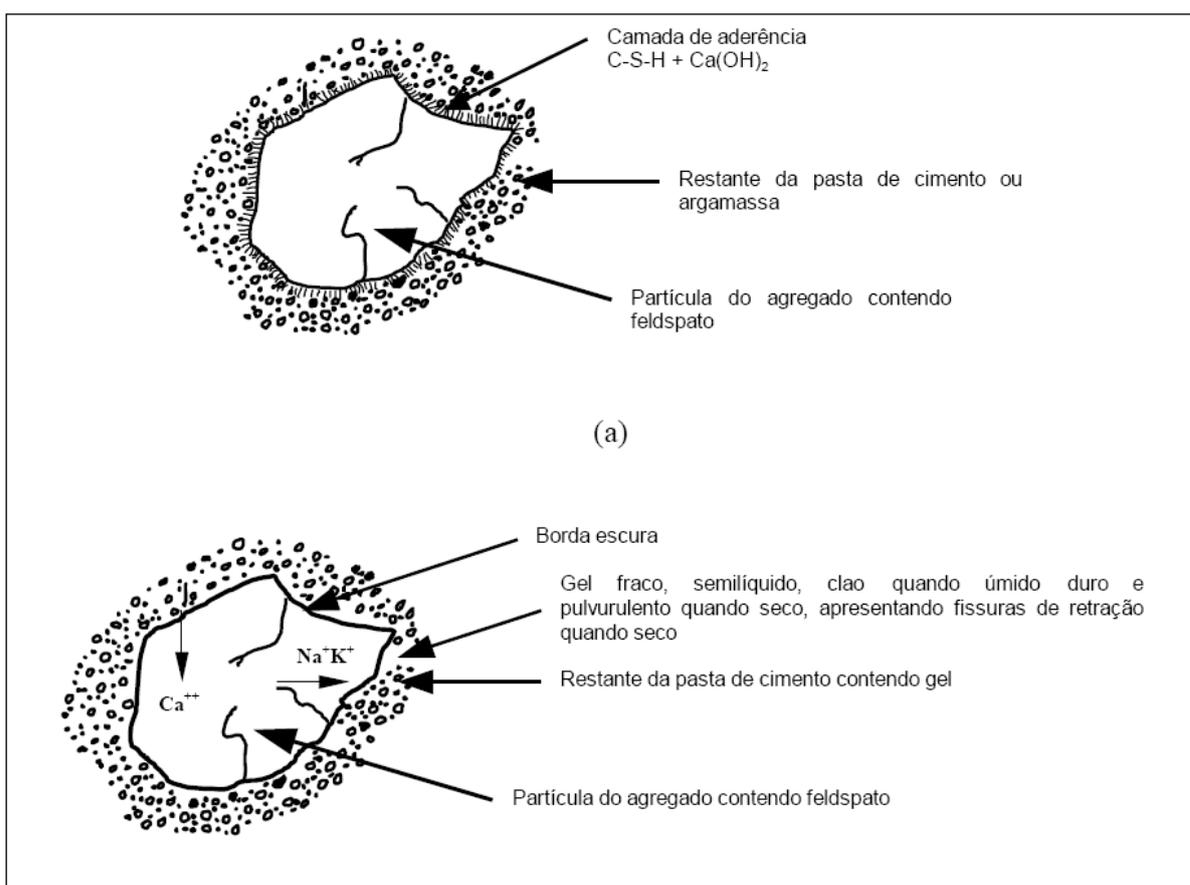
contém quartzo e feldspato, mas também algumas vezes carbonato (GILLOTT, 1975 *apud* TIECHER, 2006).

Van Aardt e Visser (1977) estudaram a reação entre hidróxido de cálcio e feldspato e propuseram uma teoria chamada “*Solution Theory*” (PAULON, 1981). De acordo com os autores, nas primeiras idades do concreto origina-se uma camada de aderência ao redor do agregado composta por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Com o tempo e na presença de umidade, o ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) proveniente da hidratação do cimento reagirá com o feldspato. Além disso, poderá ocorrer reação devido à penetração de cal no agregado, liberando álcalis sob forma de KOH e NaOH, e/ou silicatos de potássio e sódio, sendo este último na forma de gel parcialmente solúvel em água. A partir de certa concentração, os silicatos de cálcio (responsáveis pela aderência) tenderão a se dissolver em silicatos de potássio e sódio, formando um vidro ou gel composto por cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) e sílica ao redor do agregado e às vezes internamente a ele. O vidro ou gel é parcialmente solúvel em água e constitui um péssimo elemento da ligação, devido à variação volumétrica (expansão e contração) em consequência da perda ou ganho de água. Dessa forma, o agregado envolvido pelo vidro ou gel semi-líquido tem baixa resistência. A Figura 15 demonstra a reação.

Segundo o ICOLD (1991), este tipo de reação manifesta-se por uma zona escura na interface entre o agregado e a pasta de cimento, e depósitos brancos nos planos de clivagem dos agregados. Esta zona escura (gel) poderá ser mais ou menos expansiva, dependendo do teor de álcalis ou hidróxido de cálcio.

A reação álcali-silicato é o tipo de RAA mais encontrada no Brasil (VADUGA, 2002). A partir das décadas de 50 e 60 quando a maioria das barragens foi construída no Brasil, foi evitada a utilização de agregados contendo sílica amorfa e conseqüentemente a reação álcali-sílica. Em muitas destas obras utilizou-se granitos, gnaisses e quartzitos, acreditando que pelo fato do quartzo ser um dos minerais mais estáveis na natureza, que estas rochas seriam adequadas para confecção de concreto.

Porém, a partir da década de 70 foi constatado que o quartzo geralmente é encontrado com a sua estrutura levemente distorcida, cuja textura é conhecida como “quartzo deformado”. O quartzo deformado é um dos fortes indícios de reatividade potencial, e por este motivo, diversas barragens construídas no Brasil e no exterior até a década de 80, passaram a apresentar problemas em decorrência da RAA (SILVEIRA *et al.*, 2002).



- (a) agregado antes da reação;
(b) agregado após a reação.

Figura 15 - Desenvolvimento da reação álcali-silicato
Fonte: VAN AARDT e VISSER (1977)

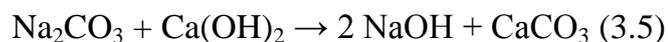
3.3.3 Reação álcali-carbonato (RAC)

A reação álcali-carbonato (RAC) é um tipo de reação álcali-agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de

deterioração do concreto ocorre devida à desdolomitização da rocha e o consequente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Nessa reação não há formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como a brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), carbonatos alcalinos, carbonatos cálcicos e silicato magnésiano (NBR 15577-01/2008). A reação de desdolomitização ocorre segundo a Equação 3.4 (PAULO, 1981; FURNAS, 1997; TANG *et al.*, 2000).



Após a desdolomitização ocorre a regeneração de hidróxido alcalino, ou seja, o hidróxido de cálcio presente no concreto reagirá com o carbonato de sódio produzido durante a desdolomitização, formando calcita e regenerando íons hidroxilas (Equação 3.5) (FURNAS, 1997).



Devido a essa reação de regeneração dos hidróxidos alcalinos, a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote (PAULON, 1981; FURNAS, 1997; NBR 15577-01/2008). Caso haja presença de hidróxido de potássio ao invés de hidróxido de sódio, haverá formação de carbonato de potássio no lugar de carbonato de sódio (VALDUGA, 2007).

Segundo Silveira *et al.* (2006), as rochas carbonáticas também podem desenvolver reações do tipo sílica/silicato (RAS), quando possuírem silicatos em sua composição. (SILVA, 2007).

No Brasil não existem casos registrados de ocorrência da reação álcali-carbonato (HASPARYK, 1999; TIECHER, 2006; VALDUGA, 2007), mas em outros países como: EUA, Iraque, Inglaterra e China encontram-se concretos afetados por esta reação (HASPARYK, 1999).

3.4 FATORES INTERVENIENTES NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Segundo vários autores (PAULON, 1981; HASPARYK, 1999; MEHTA e MONTEIRO, 2008), conclui-se que existem diversos fatores que influenciam na reação álcali-agregado, os quais podem ser divididos em:

- a) fatores externos ou ambientais: umidade, álcalis, temperatura, ciclos de molhagem e secagem, tensões de compressão;
- b) fatores relacionados ao concreto: cimento (teor de álcalis), agregado (minerais reativos, porosidade, dimensão e forma das partículas), relação água/cimento (porosidade), aditivos (plastificantes, redutores de água, inibidores da reação, etc);
- c) tempo (idade do concreto).

3.4.1 Alcalinidade do concreto

O cimento Portland é a principal fonte de álcalis no concreto, apresentado teores entre 0,2 % a 1,5 % de Na_2O equivalente, com isso, o pH da solução dos poros de concretos normais variam de 12,5 a 13,5 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Hasparyk (1999), os álcalis são encontrados no cimento de duas formas:

- a) álcalis solúveis: presentes nos sulfatos alcalinos (representam de 10 % a 60% dos álcalis totais), são responsáveis pelo pH na solução dos poros do concreto;

b) álcalis insolúveis: provenientes das soluções sólidas das fases presentes no clínquer.

No cimento são encontrados geralmente compostos de sódio e potássio, porém o teor de álcalis normalmente é expresso em teor de óxido de sódio (Na_2O) solúvel em ácido equivalente (Equação 3.6).

$$\% \text{ equivalente } \text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O} \quad (3.6)$$

A norma ASTM C – 150/2002 classifica os cimentos com menos de 0,6% Na_2O equivalente como cimentos de baixa alcalinidade, e os cimentos com mais de 0,6% Na_2O equivalente como cimentos de alta alcalinidade.

Contudo, apenas limitando o teor de álcalis ($< 0,6\% \text{Na}_2\text{O}$) não é garantia da não ocorrência da RAA (KIHARA, 1986). O consumo elevado de cimento, mesmo quando limitado o teor de álcalis ($< 0,6\% \text{Na}_2\text{O}$) pode ser danoso (MEHTA e MONTEIRO, 2008), sendo necessário o estabelecimento de valores limites, não somente do percentual de álcalis no cimento, mas também de cimento no concreto (PAULON, 1981; FURNAS 1997). Além disso, os álcalis podem penetrar no concreto através de águas que estejam em contato com a massa, bem como por meio de adições, aditivos e agregados (DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986).

A Figura 19 mostra a relação entre o consumo de cimento no concreto e o equivalente alcalino do cimento, indicando a potencialidade reativa dessas combinações (FURNAS, 1997).

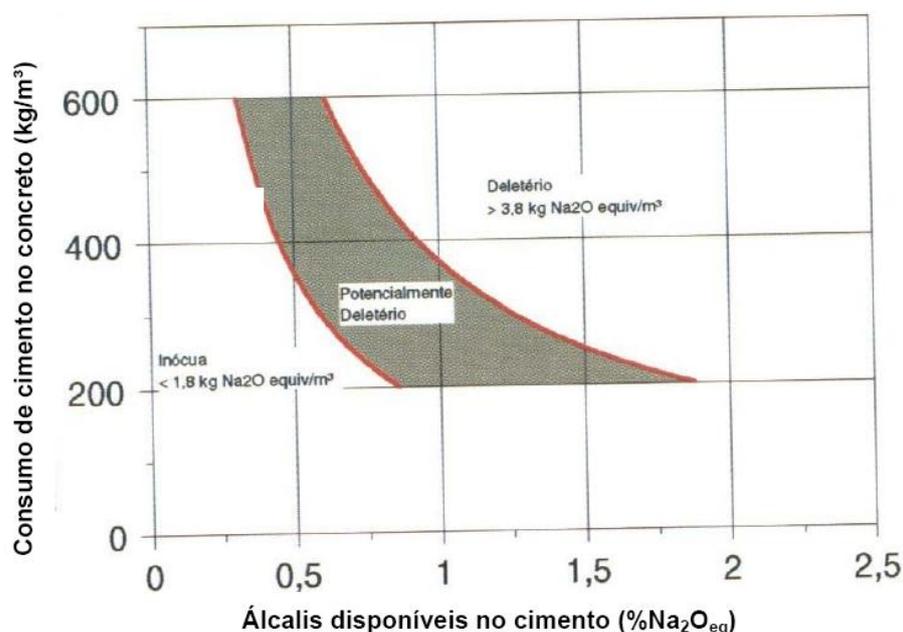


Gráfico 1 - Relação entre o consumo de cimento no concreto e o equivalente alcalino do cimento
 Fonte: FUNAS (1997)

Segundo Mehta e Monteiro (2008), estudos na Alemanha e Inglaterra mostraram que quando o teor total de álcalis do concreto (todas as fontes) é menor que 3 kg/m^3 , não ocorre expansão deletéria.

Os mesmos autores ressaltam que os íons hidroxilas e íons metálicos alcalinos são necessários para o fenômeno da expansão, contudo, devido à grande quantidade de hidróxido de sódio na pasta de cimento, a quantidade de íons hidroxilas se mantém alta mesmo com cimentos de baixa alcalinidade, com isso, o fenômeno expansivo poderá acontecer caso íons alcalinos sejam fornecidos por alguma outra fonte, como aditivos/adições contendo álcalis, agregados contaminados por sal e água do mar, ou solução de degelo contendo cloreto de sódio que possa penetrar no concreto.

3.4.2 Agregados

São vários os fatores inerentes aos agregados influentes na reação álcali-agregado, dentre os quais se destacam a composição granulométrica, a forma dos grãos e as características mineralógicas.

O teor de agregados reativos é um fator preponderante para RAA. De acordo com Hobbs (1988), há um “teor p \acute{e} ssimo” de agregados que resulta em expansões mais elevadas (Gráfico 2). Vale salientar que as características da curva teor p \acute{e} ssimo são particulares para cada combinação de materiais.

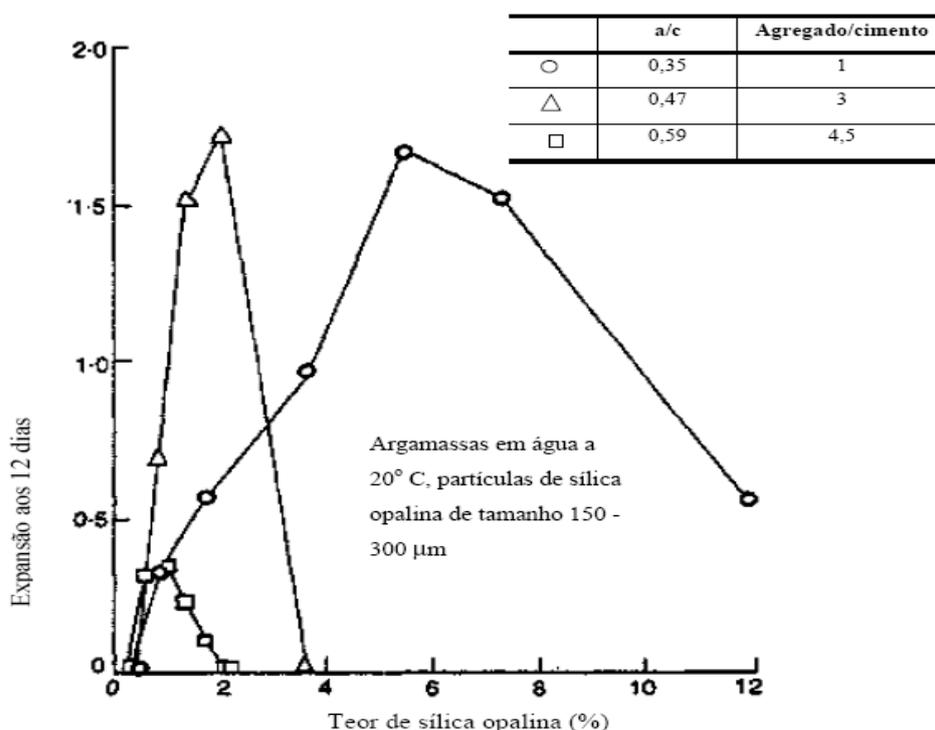


Gráfico 2 - Teor p \acute{e} ssimo de agregados
Fonte: HOBBS (1988)

Para quantidades baixas de agregados reativos, a expansão aumenta com o percentual, porém, a partir de um determinado valor (excesso), não ocorre à formação de gel expansivo (PAULON, 1981), ou seja, o excesso de agregados reativos em relação aos álcalis implica no consumo rápido desses pela sílica.

Em relação à estrutura do agregado, quanto mais desordenada e instável for, maior será o seu potencial de reação, em ordem decrescente de reatividade encontram-se os minerais com estrutura amorfa (opala e vidro), microcristalina a criptocristalina (calcedônia), metaestáveis (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados) (BULLETIN 79, 1991; GLASSER, 1992).

A distribuição granulométrica é outro fator importante na atividade deletéria, há evidências que quanto maior a dimensão da partícula do agregado reativo, menor será a expansão causada. Segundo resultados apresentados por Hobbs (1988), com o decréscimo do tamanho das partículas de agregado, ocorre o aumento das expansões (Gráfico 3).

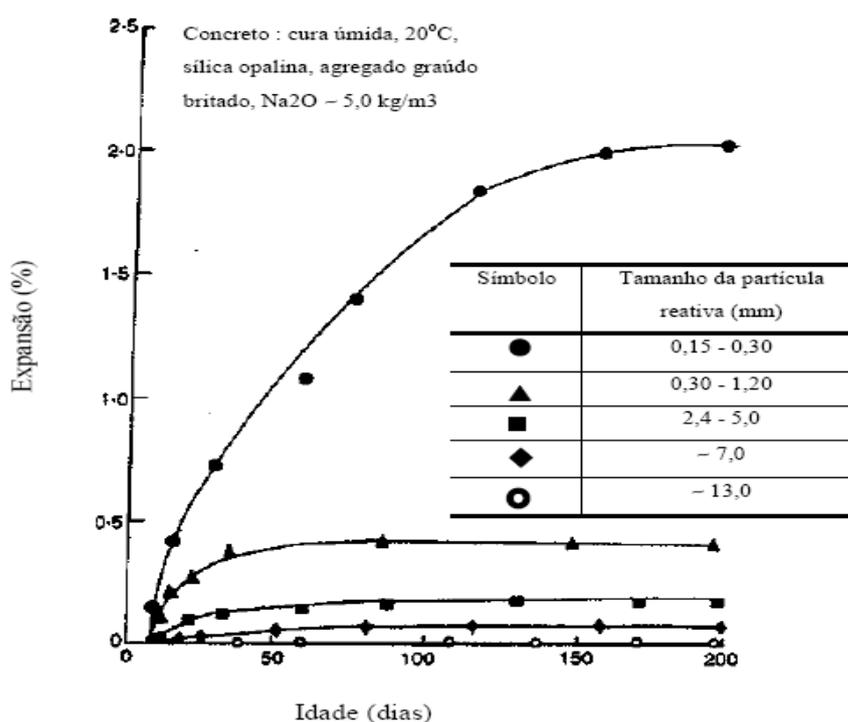


Gráfico 3 - Aumento das expansões com o decréscimo do tamanho das partículas
Fonte: HOBBS (1988)

Contudo, conforme pesquisa realizada por Castro *et al.* (1997), quando o agregado é utilizado em dimensões muito pequenas (pulverizado), esse passa a apresentar um efeito pozolânico. Nessa pesquisa observaram-se reduções dos níveis de expansão causadas pela RAA, quando utilizado o agregado pulverizado (fração

passante na peneira ABNT # 200) em substituição parcial do cimento e do agregado (Gráfico 4).

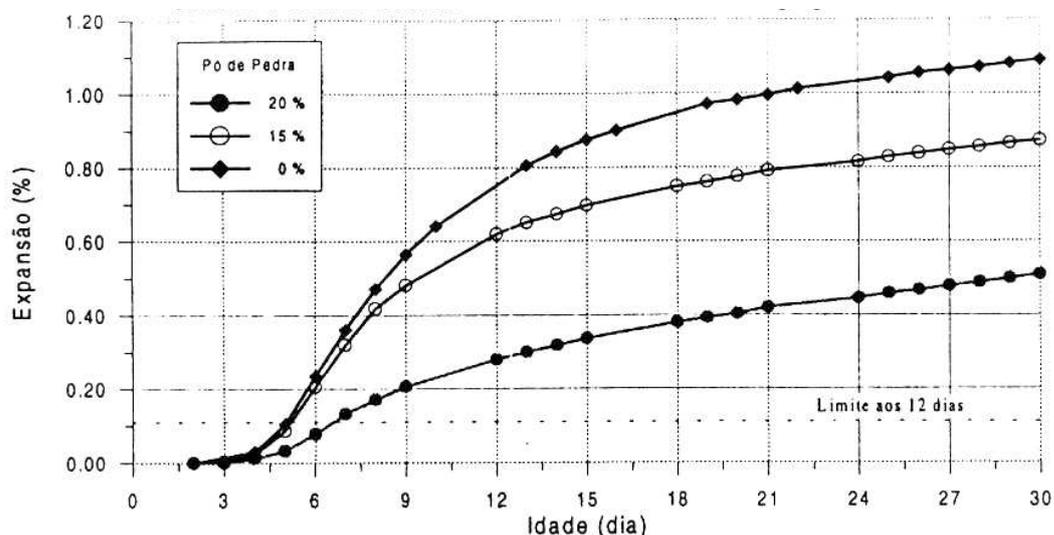
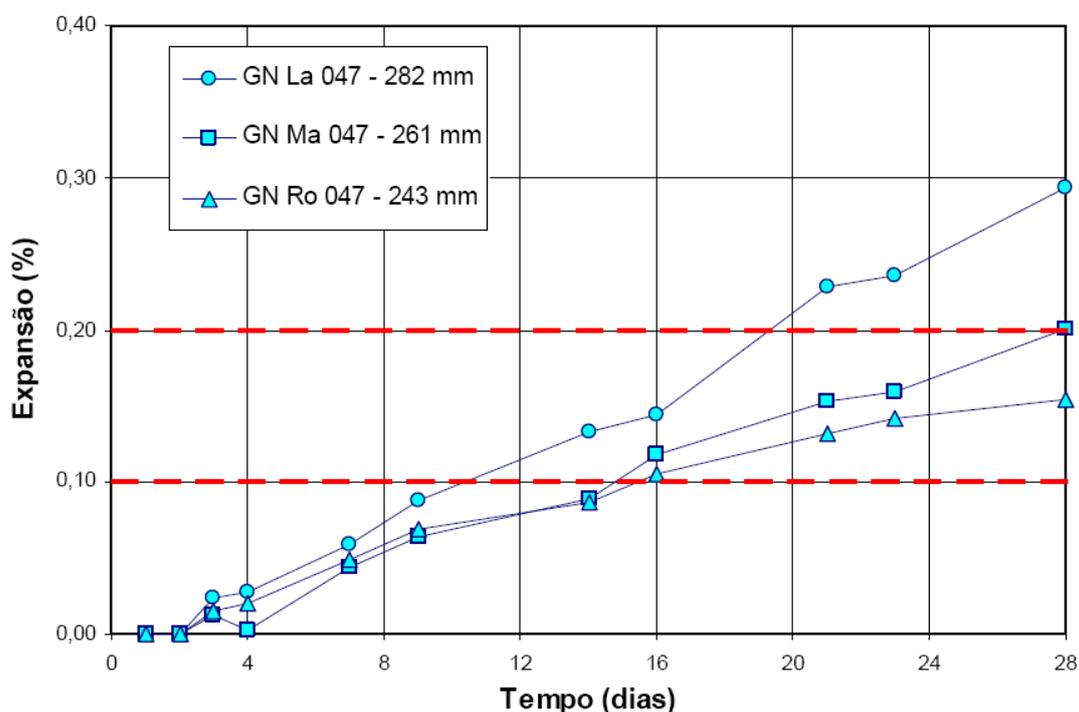


Gráfico 4 - Redução da expansão causada pela RAA devido à substituição parcial de areia artificial de basalto por basalto pulverizado
Fonte: CASTRO *et al.*(1997)

Além disso, de acordo pesquisa realizada por Valduga (2007), a forma dos grãos também exerce influência nas expansões por RAA em barras de argamassa (Gráfico 5), uma vez que agregados com grãos mais arredondados fazem com que a matriz da argamassa fique mais compacta, com menos vazios. Já agregado com grãos mais angulosos, dá origem a argamassas mais secas, difíceis de moldar, com mais vazios. Nestes vazios se dá a acomodação do gel, gerando menos expansões nas dimensões das barras de argamassa.



(GN La) amostra GN moída no Abrasão Los Angeles (índice de forma = 1,7);
 (GN Ma) amostra GN moída no britador de mandíbulas (índice de forma = 1,9);
 (GN Ro) amostra GN moída no britador de rolos (índice de forma = 5,9).

Gráfico 5 - Influência da forma dos grãos nas expansões por RAA
 Fonte: Valduga (2007)

3.4.3 Umidade

A umidade é um dos requisitos para a expansão de concretos afetados pela RAA, principalmente daqueles em contato constante com a água, como é o caso das estruturas hidráulicas.

O gel formado da RAA pode existir em ambientes secos, mas a sua expansão só ocorre quando há uma quantidade suficiente de umidade (ISE, 1992). Dessa forma, são mais susceptíveis à RAA as obras hidráulicas como as barragens, concretos em contato com terrenos úmidos ou atmosferas úmidas e construções expostas constantemente à chuva (HASPARYK, 1999).

De acordo com Kihara (1986), a umidade relativa maior que 85% favorecem a migração dos íons alcalinos na solução dos poros do concreto, aumentando a agressividade das soluções no agregado. Esta migração dos álcalis ocorre pelo gradiente de umidade e diferença de potencial elétrico, ou seja, o deslocamento acontece das partes úmidas para as partes secas do concreto (XU e HOOTON, 1993 *apud* SABBAG, 2003).

Normalmente as expansões capazes de causar fissuração devida à RAA requerem água externa ao concreto, porém segundo Hobbs (1988), em concretos com cimento em excesso (550 kg/m^3), selados após desmoldagem e estocados em condições controladas, a água de amassamento residual também pode levar a expansões capazes de causar fissuração.

Entretanto, a influência da água sobre a amplitude das deformações é limitada pelo processo de formação dos produtos de reação, isto é, a exposição do concreto afetado à umidade elevada só provoca expansão enquanto a reação ainda estiver em andamento (LOPES, 2004).

É importante destacar também, que propriedades do concreto como a relação água/cimento e permeabilidade influenciam diretamente a relação umidade versus expansão de concretos afetados pela RAA.

A permeabilidade do concreto regula a velocidade de penetração da umidade e conseqüentemente a taxa de expansão. Portanto, a redução da permeabilidade através de adições minerais e utilização de baixa relação água/cimento podem reduzir o movimento de álcalis e umidade no concreto (ISE, 1992). Porém, conforme pesquisa realizada por Valduga *et al.* (2005), a baixa relação água/cimento pode causar maior expansão, isso devido a matriz menos porosa da argamassa, resultando em menos espaço para expansão dos produtos da reação.

3.4.4 Temperatura

A temperatura funciona como um catalisador da RAA (VALDUGA, 2002), a temperatura elevada, como de modo geral nas reações químicas, acelera as reações nas estruturas de concreto, causando um aumento nas expansões (PAULON, 1981). Com o aumento da temperatura o gel torna-se menos viscoso e tem mais facilidade de percolar pelos vazios do concreto (ICOLD, 1991; HASPARK, 1999).

As altas temperaturas também aceleram a hidratação do cimento e intensificam a agressividade das soluções alcalinas, levando a reações álcali-agregado mais rápidas (KIHARA, 1986).

Além da temperatura ambiente, a temperatura de cura também influencia na RAA. Segundo Shayan e Xu (2004), quanto maior a temperatura de cura, maiores são as expansões, conforme o Gráfico 6 (SILVA, 2007).

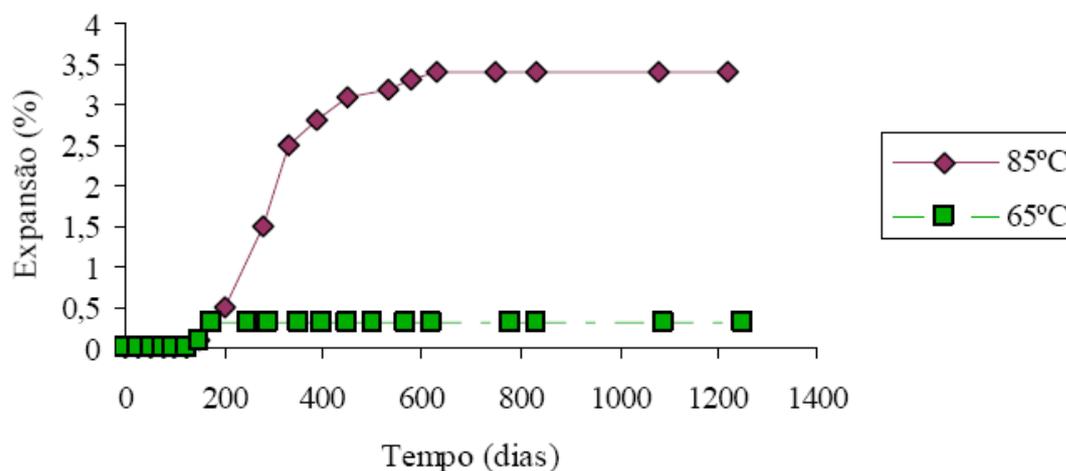


Gráfico 6 - Expansão versus temperatura de cura em primas de concreto
Fonte: SHAYAN e XU, 2004, *apud* SILVA (2007)

3.4.5 Tensões no concreto

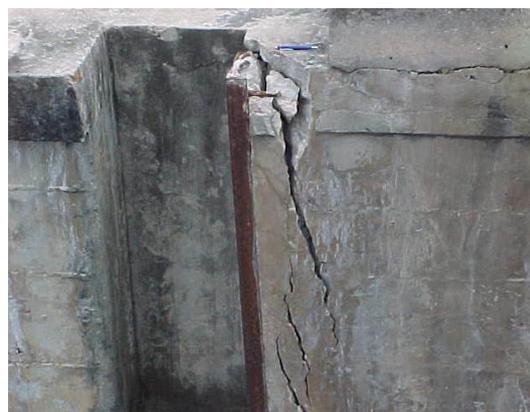
Restrições e tensões nas estruturas de concreto influenciam as expansões e os danos devidos à RAA. As tensões de compressão bem distribuídas podem reduzir a expansão e as fissuras na direção da compressão (ISE, 1992). Conforme Silveira (1997), as taxas de expansão em barragem de arco são menores que nas estruturas de gravidade, isso devido às tensões confinantes.

Segundo pesquisa de Hobbs (1988), a qual avaliou a influência da tensão de compressão na RAA, através da mensuração da expansão de barras de argamassa submetidas a diversos carregamentos, a tensão de compressão retarda a fissuração e reduz a expansão na direção do carregamento.

As fissuras devido à RAA podem ser de dois tipos: fissuras primárias (mapa) (Figura 16 a) e secundárias ou estruturais (Figura 16 b). As primárias ocorrem devido às expansões irregulares, enquanto as secundárias ocorrem devido às restrições que se opõem a expansão do concreto. A ausência de restrições proporciona à formação de fissuras randômicas, caso contrário, as fissuras se formam paralelamente a direção de maior tensão (SILVA, 2007).



(a) fissuras primárias no piso da tomada d'água da UHE Paulo Afonso III



(b) fissura secundárias na guia da comporta da tomada d'água da UHE Paulo Afonso I

Figura 16 - Características de fissuras devidas à RAA
Fonte: SILVA (2007)

4 MÉTODOS INVESTIGATIVOS DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Neste capítulo são apresentados os principais métodos de ensaio laboratoriais utilizados nesta pesquisa. Existem vários tipos de métodos investigativos de RAA na bibliografia, entretanto, Tiecher (2006) comenta que apesar dos vários estudos desenvolvidos mundialmente, ainda não foi definido um método rápido e eficaz para avaliar esta reação. Sendo assim, a adoção de um conjunto de ensaios para complementação mútua tem sido empregada para diagnóstico e investigações referentes à RAA.

4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

A análise petrográfica é o primeiro passo na investigação do potencial reativo de um agregado (FURNAS, 2007), a técnica é utilizada para obter informações qualitativas sobre os minerais e natureza dos agregados quanto a sua nocividade em relação à RAA (SILVA, 2007), ou seja, busca-se a identificação de fases mineralógicas reconhecidamente instáveis (VALDUGA, 2007). Através da petrografia são caracterizadas a composição mineral e textura dos agregados (VIEIRA e OLIVEIRA, 1997).

Entretanto, cabe ressaltar o caráter subjetivo dessa análise, devendo ser realizada por um petrógrafo experiente para obtenção de resultados confiáveis. É importante mencionar também que a análise petrográfica classifica a rocha (agregado) unicamente quanto ao seu potencial reativo. A análise de expansão deletéria deve ser verificada através de testes que combinem o agregado com o cimento, por exemplo, os ensaios de reatividade de prismas de concreto e de barras de argamassa.

A análise é realizada a partir do exame em microscópio óptico com a possibilidade de se efetuarem observações em luz transmitida e em luz refletida (polarizada), permitindo um exame detalhado das características intrínsecas da rocha:

composição mineralógica; granulação dos constituintes; grau de entrelaçamento e imbricamento dos cristais; estado de alteração; presença de microfissuras; minerais alterados, alteráveis e solúveis (DAL MOLIN, 2007). A Figura 17 mostra duas micrografias como exemplo da aplicação da análise petrográfica em rochas.

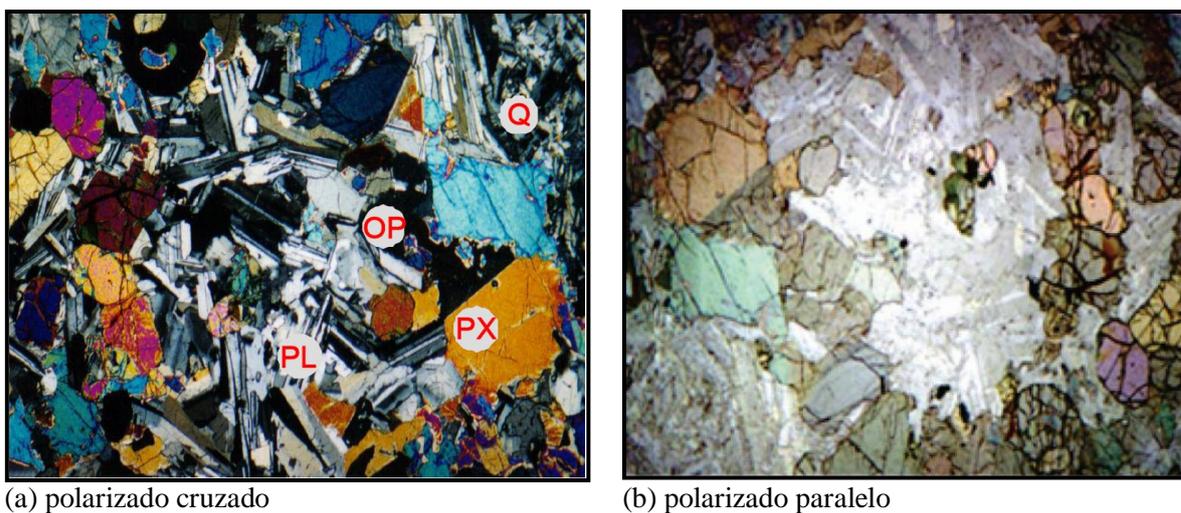


Figura 17 - Aspecto microscópico de um basalto constituído por plagioclásio (PL), piroxênio (PX), opacos (OP) e quartzo microcristalino (Q). Ampliação aproximada de 100x
Fonte: DAL MOLIN (2007)

A análise petrográfica também pode ser realizada em amostras de concreto endurecido, uma descrição do procedimento de análise petrográfica visando avaliar a reação álcali-agregado em concretos é feita por Viera (1997) *apud* Valduga (2007):

- a) análise macroscópica a olho nu: tem como objetivo a caracterização geral do concreto, para avaliar o comprometimento da sua qualidade em função de processos deletérios;
- b) análise com microscópio estereoscópico: deve ser dada atenção especial aos poros, fissuras, superfícies dos agregados e zonas de interface agregado/argamassa, com o objetivo de identificar eventuais presenças de gel ou produtos cristalizados;

- c) análise com microscópio ótico de luz transmitida: é feita em uma lâmina de, aproximadamente, 30 μm , de modo a permitir a passagem de luz, de acordo com os procedimentos usualmente empregados para a análise de rocha;
- d) análise com microscópio eletrônico de varredura: tem como principal objetivo a confirmação de inferências feitas a partir dos estudos ao microscópio ótico e estereoscópico.

A difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX) também são técnicas muito úteis para realização de análise petrográfica. A DRX pode ser utilizada para identificação das composições mineralógicas, enquanto a FRX para identificação dos elementos químicos.

4.2 EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO

Esse método de ensaio foi desenvolvido inicialmente por Oberholster e Davies (1986), denominado de método acelerado Sul Africano NBRI², consiste na moldagem de barras de argamassa com faixas granulométricas pré-definidas e consistência fixa (105% a 120% do diâmetro inicial). É similar ao método de barras prescrito pelas normas ASTM C 227/2003 e NBR 9773/1997, entretanto, as barras são imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 1N e temperatura de 80 °C por um período de 14 dias. O método objetiva avaliar rapidamente o comportamento do agregado frente à reação álcali-silica e álcali-silicato.

² *National Building Research Institute (NBRI).*

O método acelerado foi posteriormente normalizado com poucas variações pela ASTM C 1260. A principal alteração foi à fixação da relação água/cimento da argamassa utilizada na moldagem das barras.

De acordo a norma ASTM C 1260/2007, intitulada de “*Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*”, três barras de argamassa são confeccionadas nas dimensões de 25 x 25 x 285 mm, com relação cimento/agregado igual a 1/2,25 e relação água/cimento de 0,47 (em massa). Posteriormente as barras são curadas e imersas em água (80 °C), ambas etapas por 24 horas, seguido por imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH, 1N, 80 °C). O resultado da média das três barras de argamassa aos 16 dias indica o potencial reativo do agregado, os seguintes limites de expansão são dados pela norma:

- a) expansões inferiores a 0,10 % aos 16 dias: indicam um comportamento inócuo;
- b) expansões superiores a 0,20 % aos 16 dias: indicam reação deletéria;
- c) expansões entre 0,10 % e 0,20 % aos 16 dias: indicam comportamento potencialmente reativo, sugere-se levar o ensaio até 28 dias e realizar investigações complementares.

Recentemente a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) normalizou o ensaio acelerado através da NBR 15577-4/2008, cujas principais alterações referem-se:

- a) inclusão da utilização de um cimento padrão: deve possuir finura de (4900 ± 200) cm²/g, equivalente alcalino total expresso em Na₂O_{eq} (0,658 K₂O % + Na₂O %) de $(0,90 \pm 0,10)$ %, e expansão em autoclave inferior a 0,20 %;

b) período e limite da expansão para determinação do potencial reativo:

- expansão menor que 0,19 % aos 30 dias: o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo;
- expansão maior ou igual a 0,19 % aos 30 dias: o agregado é considerado potencialmente reativo.

Além disso, a NBR 15577/2008 na sua 5ª (quinta) parte prevê a determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, possibilitando a determinação da suscetibilidade do cimento Portland em combinação ou não com adições, em mitigar a expansão em barras de argamassa elaboradas com agregados potencialmente reativos.

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é largamente empregada na análise da microestrutura de materiais, como os produtos de hidratação do cimento e investigação de produtos resultantes de ataques de agentes agressivos, entre eles os produtos de reação álcali-agregado (VALDUGA, 2007). A técnica possibilita a classificação dos diversos tipos de géis formados pela RAA, bem como a identificação das bordas de reação na interface da pasta com o agregado, e a existência de gel álcali-silicoso disperso na argamassa, poros e fissuras do agregado (SABBAG, 2003).

O microscópio eletrônico de varredura permite a investigação de amostras através da produção de imagens com alta resolução (HASPARYK, 2005). Também

permite que seja acoplado o sistema de EDS³, o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras, a partir da emissão de raios X característicos (DAL MOLIN, 2007).

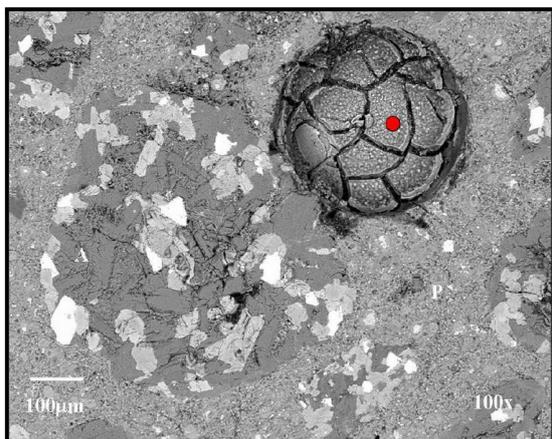
Quando um feixe de elétrons produzido a partir de um filamento de tungstênio incide sobre a superfície da amostra, 3 (três) tipos de sinais são originados e coletados independentemente: os elétrons secundários (SE), os elétrons retroespalhados (BSE) e os raios X (KESTENBACH e BOTTA FILHO, 1989 *apud* HASPARYK 2005).

Esses sinais são muito úteis para a avaliação dos produtos gerados pela reação álcali-agregado, sendo que, cada um tem uma aplicação específica. Os elétrons secundários são utilizados para observar a morfologia do gel, enquanto os elétrons retroespalhados são utilizados quando a estrutura da matriz é muito densa, necessitando de diferenciação dos produtos. Os raios X são utilizados para caracterização dos elementos químicos presentes nos produtos de reação, confirmando seus constituintes químicos (MARUSIN, 1995).

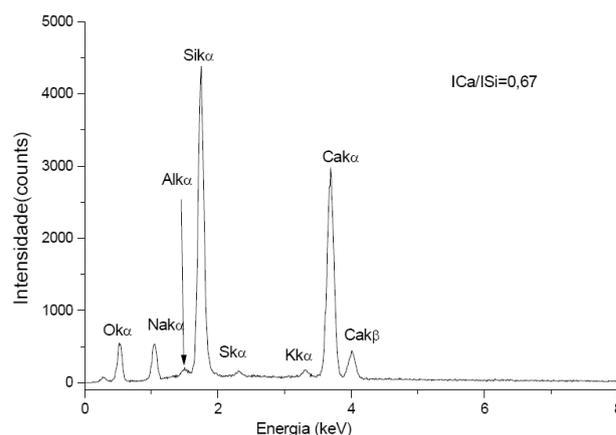
A análise da morfologia e composição química através desse método possibilita o reconhecimento e identificação precisa dos produtos da RAA (Figura 18), auxiliando no diagnóstico do concreto afetado.

Segundo Silva *et al.* (1997), para análise de produtos de RAA é importante observar as bordas da interface pasta/agregado em amostras polidas e das superfícies de fratura. O gel oriundo da reação pode estar concentrado nos poros da amostra, disperso na argamassa, interfaces e depositados nas fissuras dos agregados (VALDUGA, 2007).

³ *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)*



(a) detalhe do gel inserido em um vazio da matriz



(b) espectro EDS indicando a formação de gel de baixa relação C/S

Figura 18 - Imagem em MEV da amostra polida de um concreto com agregado apresentando reação álcali-agregado

Fonte: DAL MONLIN (2007)

4.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX)

O fenômeno da difração ocorre quando uma onda encontra uma série de obstáculos que são capazes de dispersá-la, e possuem espaçamentos comparáveis em magnitude ao comprimento de onda, além disso, a difração é uma consequência de relações de fases específicas estabelecidas entre duas ou mais ondas dispersadas.

A técnica de difração de raios X é a mais indicada para determinação das fases cristalinas presentes nos materiais, ela é utilizada para obtenção de informações sobre a estrutura, composição e estado de materiais (DAL MOLIN, 2007). A técnica revela a estrutura cristalina das fases que compõem os materiais pela distância interatômicas (VANVLACK, 1992 *apud* HASPARYK, 2005).

Quando um feixe de raios X incide sobre um material sólido, ocorre à dispersão de uma fração deste feixe em todas as direções pelos elétrons associados a cada átomo ou íon que se encontra na trajetória do feixe. A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg (Equação 4.1), que estabelece a relação entre o ângulo de

difração e a distância entre os planos que a originam, que são característicos para cada fase cristalina (FORMOSO *et al.*, 1984 *apud* DAL MOLIN, 2007).

$$n\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad (4.1)$$

Onde:

λ : é o comprimento de onda;

d: distância interplanar (distância característica entre os planos de um cristal);

θ : ângulo de difração (ângulo de Bragg) dos raios X;

n: número de ondas.

Cada material cristalino possui um único padrão de difração, por isso, o padrão do difratograma de raios X de uma substância cristalina pode ser associado a uma “impressão digital” (Figura 19). Os constituintes da microestrutura podem ser identificados por comparação entre seu espectro de difração com o arquivo do *Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS)*, o qual possui mais de 50.000 substâncias inorgânicas cadastradas (PADILHA e AMBROZIO FILHO, 1986; REIDINGER, MURTHY e CORREALE, 1988; *apud* DAL MOLIN, 2007).

As amostras para serem analisadas podem ser pulverizadas, sólidas, filmes ou fitas, necessitando de uma quantidade mínima de material (miligramas). No caso de amostras sólidas há restrições de dimensões dependendo do equipamento (REIDINGER, MURTHY e CORREALE, 1988; *apud* DAL MOLIN, 2007).

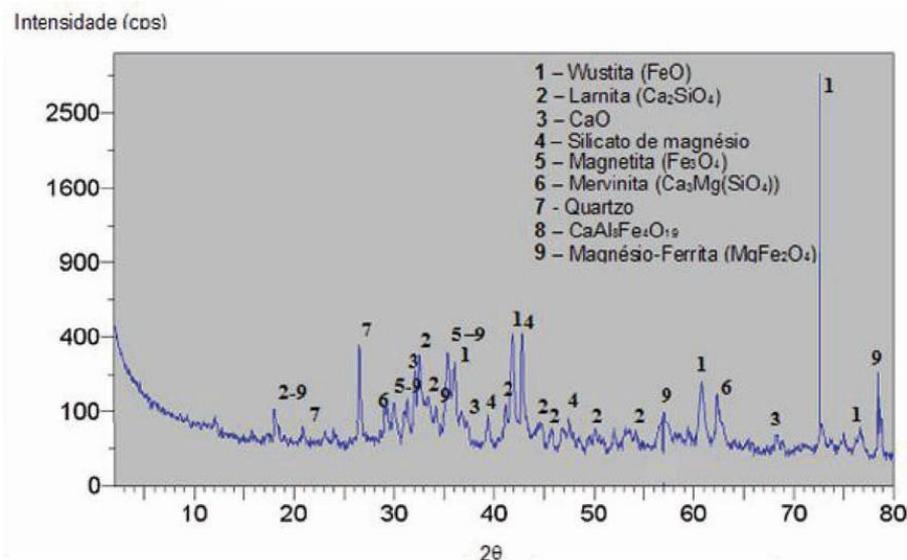


Figura 19 - Difratograma de raios X de uma escória de aciaria elétrica in natura
Fonte: DAL MOLIN (2007)

4.5 ESPECTROSCOPIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

A fluorescência de raios X é usada na determinação qualitativa e quantitativa de elementos que compõem uma amostra (DAL MOLIN, 2007), por ser não destrutiva e instrumental, e por permitir a análise de vários elementos simultaneamente com rapidez e baixo custo, tem um elevado potencial de aplicação em várias áreas (NASCIMENTO FILHO, 1999).

A técnica é baseada na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios X emitidos por uma fonte excitam os elementos constituintes da amostra, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (NASCIMENTO FILHO, 1999).

A excitação da amostra tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis dos átomos e conseqüentemente os elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto

quântico para preencher vaga. Estas transições representam perda de energia para o elétron, a qual é emitida em forma de fóton de raios X com energia característica bem definida (NASCIMENTO FILHO, 1999).

As amostras analisadas podem ser nas formas líquida, em pó ou sólida. A preparação para análise exige que os átomos das soluções ou sólidos sejam dissolvidos, vaporizados e atomizados a uma temperatura relativamente baixa em um tubo quente, chama ou forno de grafita (DAL MOLIN, 2007).

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os procedimentos, materiais e equipamentos empregados para realização das campanhas de campo e dos ensaios laboratoriais, visando atender os objetivos propostos nesta pesquisa.

O programa experimental foi dividido em duas etapas, a primeira etapa se refere às campanhas de campo: inspeção na barragem, extração de testemunhos, coleta de materiais de interesse, ensaio de ultrassom e localização da pedreira desativada. A segunda etapa se refere aos ensaios laboratoriais: petrografia, difratometria de raios X (DRX), espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), expansão de barras de argamassa pelo método acelerado, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção e ultrassom.

Tendo em vista o objetivo principal desta pesquisa, o principal método empregado foi o ensaio acelerado de barras de argamassa prescrito pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008). Os demais ensaios foram aplicados de forma complementar a este, bem como para atender aos objetivos secundários.

5.1 CAMPANHAS DE CAMPO

5.1.1 Inspeções na barragem e definição dos locais de interesse para estudo

Foram realizadas duas inspeções visando o reconhecimento da estrutura da barragem e a definição dos pontos e locais de interesse para pesquisa. Durante as inspeções, foram observados indícios de RAA (Figura 20), confirmando o descrito anteriormente (item 2.2.2). Nas ocasiões, também foram coletadas as informações que possibilitaram a definição dos locais de extração de testemunhos, bem como os pontos de coleta de materiais para análise.



(a) face de jusante da ombreira esquerda (fissuras em forma de mapa)



(b) ombreira direita (exsudação de gel, fissuras horizontais e em forma de mapa)



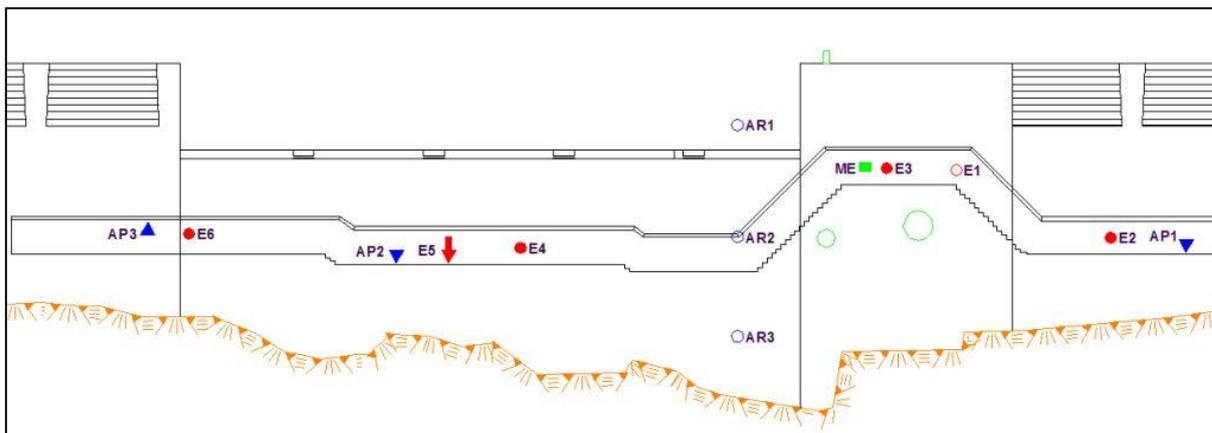
(c) contrafortes do vertedouro apresentando fissura horizontal e exsudação de materiais na superfície



(d) gel exsudado de fissura no interior da galeria de drenagem

Figura 20 - Indícios de RAA

Visando atender o programa experimental, foram selecionados 6 (seis) locais para extração de testemunhos, 6 (seis) pontos de coleta de água para análise e 1 (um) ponto para coleta de material exsudado (gel) na superfície do concreto, conforme Figuras 21 a 26.



(E1, E2, E3, E4, E5 e E6) locais selecionados para extração dos testemunhos de concreto;
 (AR1, AR2 e AR3) pontos selecionados para coleta de amostras de água no reservatório;
 (AP1, AP2 e AP3) pontos selecionados para coleta de amostras de água percolada no interior da galeria de drenagem;
 (ME) ponto selecionado para coleta de material exsudado (gel) na superfície do concreto.

Figura 21 - Corte longitudinal da barragem (vista de montante) com a localização dos pontos de extração de testemunhos, coleta de água e material exsudado

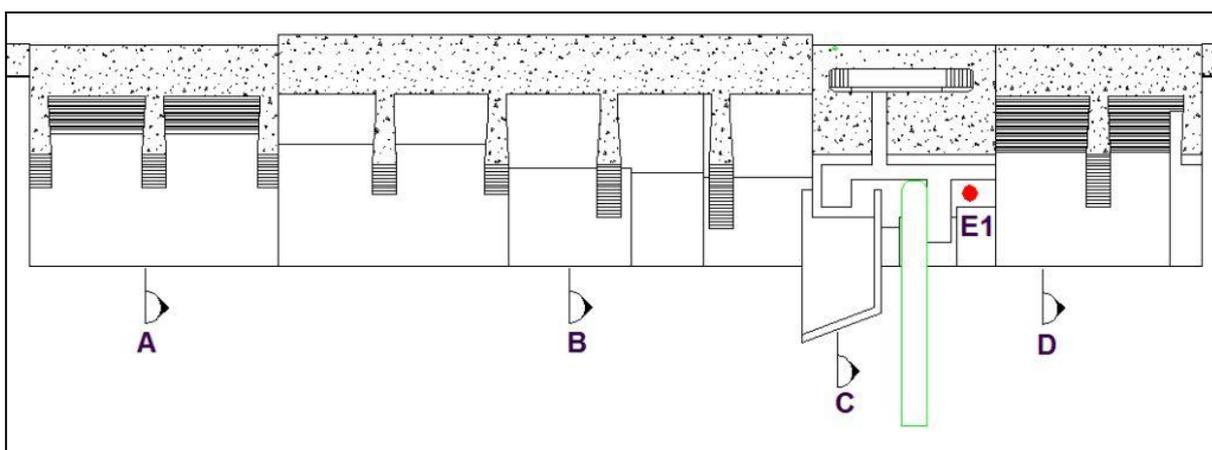


Figura 22 - Planta indicando os cortes e o local de extração de testemunhos E1

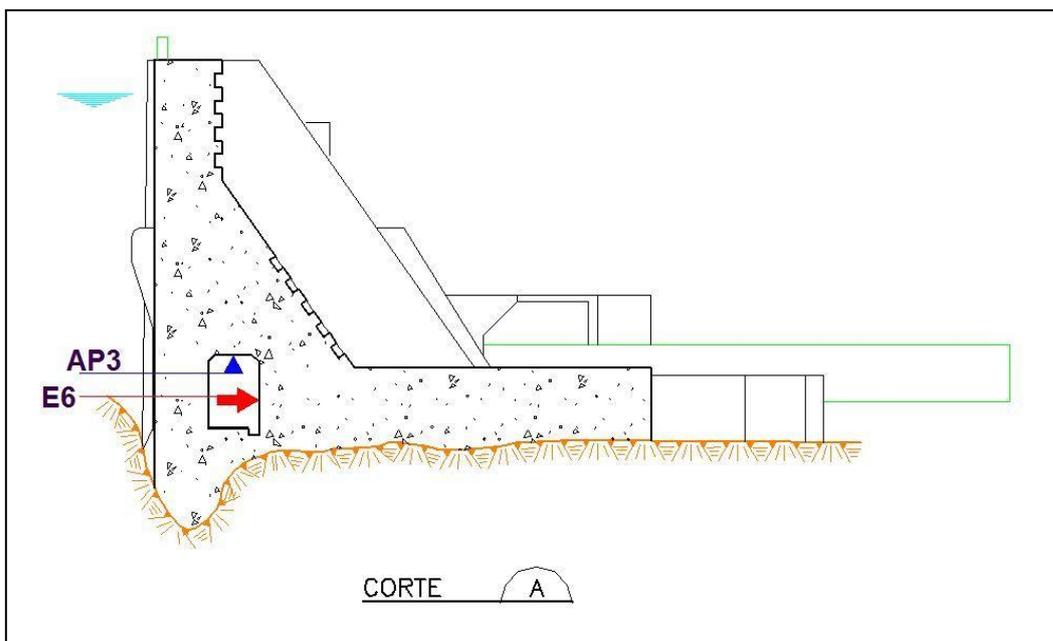


Figura 23 - Corte A indicando a posição dos pontos E6 e AP3

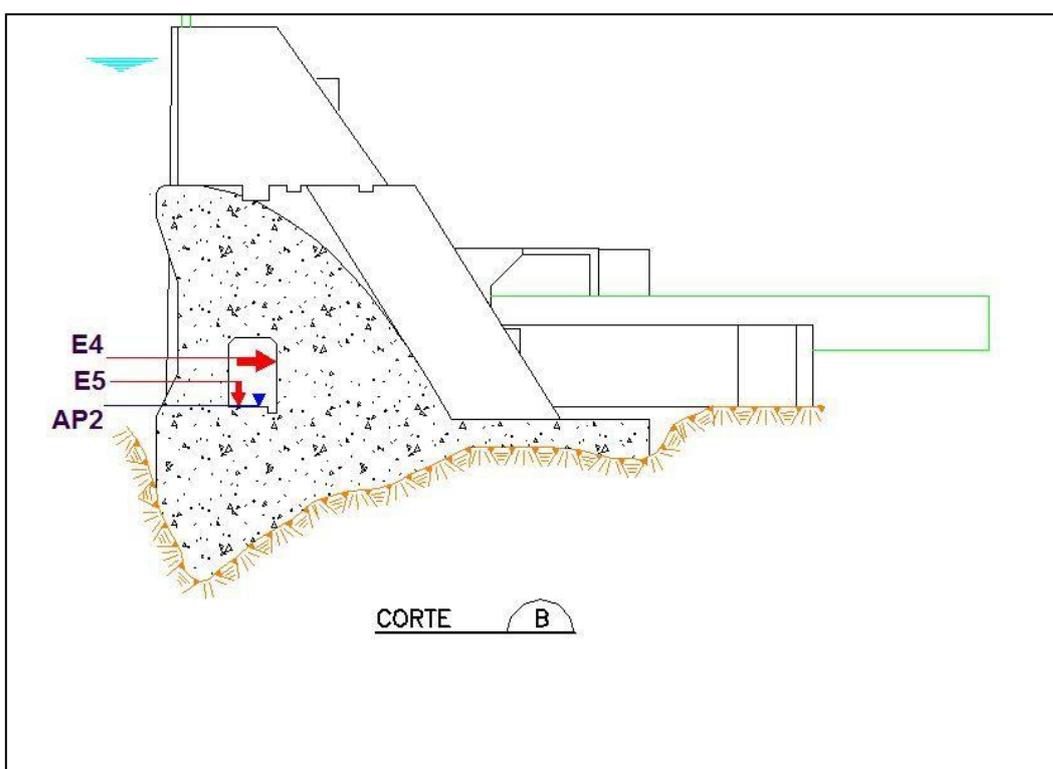


Figura 24 - Corte B indicando a posição dos pontos E4, E5 e AP2

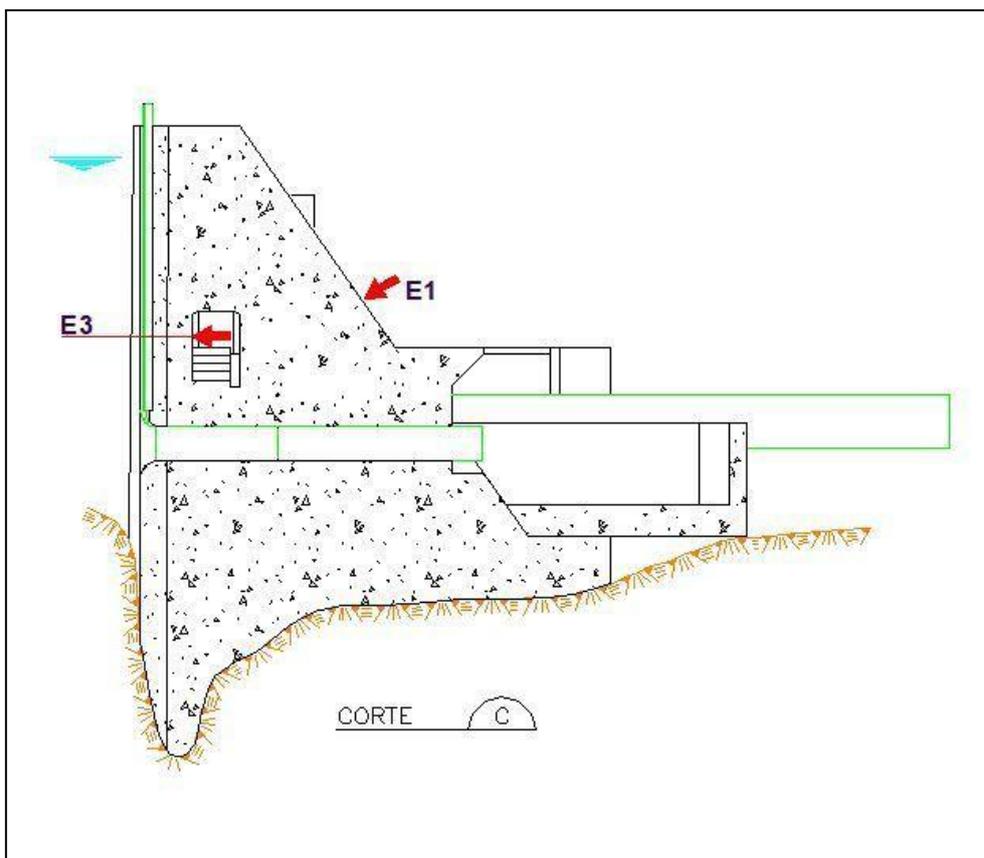


Figura 25 - Corte C indicando a posição dos pontos E1 e E3

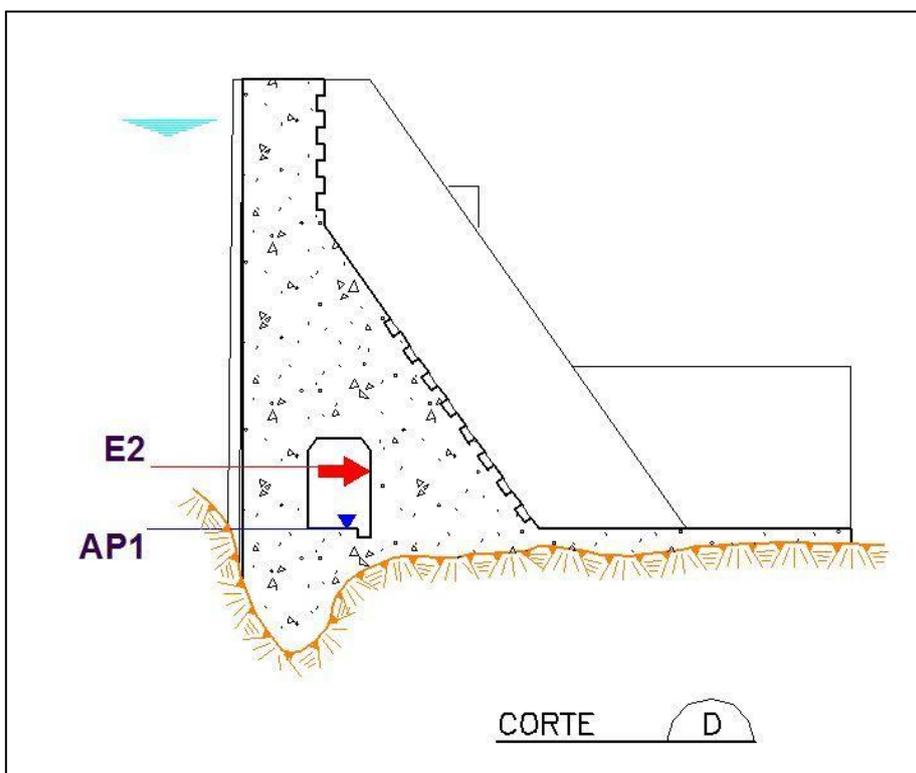


Figura 26 - Corte D indicando a posição dos pontos E2 e AP1

5.1.2 Extração dos testemunhos de concreto

As extrações de testemunhos foram distribuídas por toda galeria de drenagem (Figura 21), cujo objetivo foi a caracterização do concreto na extensão da barragem. Dos 6 (seis) locais escolhidos para extração de testemunhos, 5 (cinco) ficaram localizados no interior da galeria de drenagem, e 1 (um) na face de jusante da obreira esquerda. As amostras foram denominadas conforme os locais de extração:

- a) amostra de extração (E1): localizada na face de jusante da obreira esquerda (Figura 27 a);
- b) amostra de extração (E2): localizada no interior da galeria de drenagem do lado esquerdo, na parede de jusante;
- c) amostra de extração (E3): localizado no interior da galeria de drenagem no acesso à galeria, na parede de montante (Figura 27 b);
- d) amostra de extração (E4): localizada no interior da galeria de drenagem do lado direito (2º patamar), na parede de jusante;
- e) amostra de extração (E5): localizada no interior da galeria de drenagem do lado direito (2º patamar), no piso;
- f) amostra de extração (E6): localizada no interior da galeria de drenagem do lado direito (3º patamar), na parede de jusante.



(a) local de extração de testemunhos E1



(b) local de extração de testemunhos E3

Figura 27 - Locais de extração de testemunhos

Os testemunhos foram extraídos com uma perfuratriz de pequeno porte (HILTI DD 200) (Figura 28 a), com duas coroas diamantadas de diâmetros internos com aproximadamente 50 e 100 mm. Em cada local foram efetuados 6 (seis) furos, dos quais 4 (quatro) executados com 100 mm de diâmetro e 2 (dois) com 50 mm de diâmetro (Figura 28 b).

Para garantir a segurança da estrutura da barragem e da operação de extração dos testemunhos, apenas um ponto (E3) foi posicionado na parede de montante da galeria. O motivo para esta precaução deve-se a pouca espessura entre a parede de montante da galeria e o reservatório, entre 1,5 e 3,0 m.



(a) perfuratriz HILTI DD 200



(b) furos de extração (6 furos)

Figura 28 - Extração de testemunhos

Devido às dimensões da galeria de drenagem (1,0 x 2,1) m, as profundidades das extrações foram limitadas a 40 cm e executadas com inclinação, conforme exposto na Figura 29.



Figura 29 - Extração inclinada nas paredes da galeria

Os testemunhos extraídos foram numerados conforme local de extração e posteriormente acondicionados para o transporte. Após as extrações os furos foram preenchidos com concreto dosado para uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa (Figura 30).



Figura 30 - Furos preenchidos com concreto após extração

5.1.3 Coleta de amostras de água e de material exsudado do concreto

Paralelamente aos serviços de extração, foram coletadas amostras de água para análise físico-química e de material exsudado (gel) do concreto para análise química.

Conforme os pontos de coleta de água selecionados (Figuras 21, 23, 24 e 26), foram coletadas 6 (seis) amostras de água, das quais 3 (três) no reservatório e 3 (três) na galeria de drenagem. Estas amostras foram denominadas conforme os pontos de coleta:

- a) amostra de água do reservatório (AR1): localizada no reservatório junto à face de montante a uma profundidade entre 0 e 0,5 m;
- b) amostra de água do reservatório (AR2): localizada no reservatório junto à face de montante a uma profundidade aproximada de 3 m;
- c) amostra de água do reservatório (AR3): localizada no reservatório junto à face de montante a uma profundidade aproximada de 6 m;
- d) amostra de água de percolação (AP1): localizada no interior da galeria de drenagem do lado esquerdo, no dreno de fundação extremo, onde se observou menor vazão em relação aos drenos ativos (Figura 31);
- e) amostra de água de percolação (AP2): localizada no interior da galeria de drenagem do lado direito, no dreno de fundação central (2° patamar), onde se observou maior vazão em relação aos drenos ativos;
- f) amostra de água de percolação (AP3): localizada no interior da galeria de drenagem do lado direito sob eflorescência (3° patamar).



Figura 31 - Coleta de amostra de água no dreno de fundação (AP1)

A amostra de material exsudado (gel) denominada de ME foi coletada dentro da galeria de drenagem (Figura 21), no acesso a galeria na parede de montante (Figura 32).



Figura 32 - Coleta de amostra de material exsudado do concreto

Para coletas e armazenamento das amostras de água e gel utilizaram-se recipientes plásticos adequados, os quais foram devidamente nomeados e acondicionados para transporte até o laboratório.

5.1.4 Ensaio de ultrassom na estrutura da barragem

O ensaio de ultrassom foi realizado em 6 (seis) locais da barragem, dos quais 2 (dois) em locais externos e 4 (quatro) no interior da galeria de drenagem. Buscou-se realizar o ensaio, quando possível, nos mesmos locais onde foram realizadas as extrações de corpos de prova, porém nas paredes de montante e jusante da galeria.

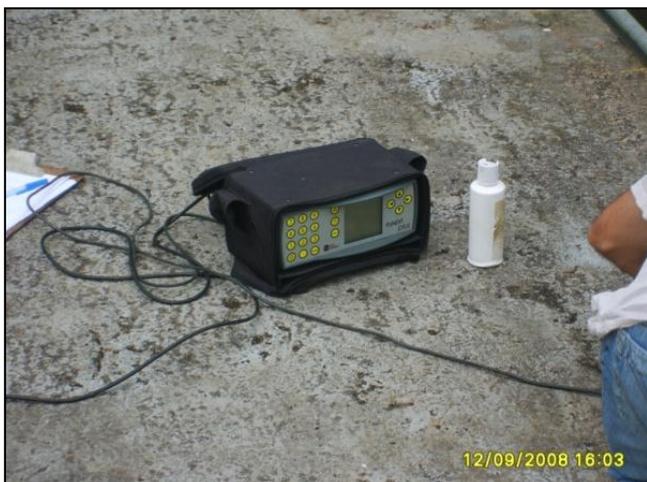
O Quadro 1 apresenta o método de medição adotado e os locais selecionados para aplicação do ensaio.

Local	Coincidente com o local de extração de testemunhos	Descrição	Tipo de medição
1	E1	Face de jusante da obreira	Indireta
2	E2	Interior da galeria de drenagem do lado esquerdo, nas paredes de montante e jusante	Indireta
3	E3	Interior da galeria de drenagem no acesso a galeria, na parede de montante	Indireta
4	E4	Interior da galeria de drenagem do lado direito (2° patamar), nas paredes de montante e jusante	Indireta
5	E6	Interior da galeria de drenagem do lado direito (3° patamar), nas paredes de montante e jusante	Indireta
6	-	Ombreira esquerda	Direta

Quadro 1 - Ensaio de ultrassom - identificação dos locais e métodos de medição

Nota: No local E5, localizado no piso da galeria, o acúmulo de água impossibilitou a aplicação do ensaio.

Para a geração dos pulsos ultra-sônicos foi utilizado o equipamento Pundit Plus PC 1006K (Figura 33 a), e transdutores para frequência de onda de 54 kHz. Empregou-se também uma esmerilhadeira para regularizar a superfície nos pontos de acoplamento dos transdutores (Figura 33 b).



(a) Pundit Plus modelo PC 1006K



(b) esmerilhadeira utilizada para minimizar a rugosidade

Figura 33 - Execução do ensaio de ultrassom

As medições indiretas foram realizadas através de 3 (três) pontos colineares espaçados de 50 cm (Figura 34).

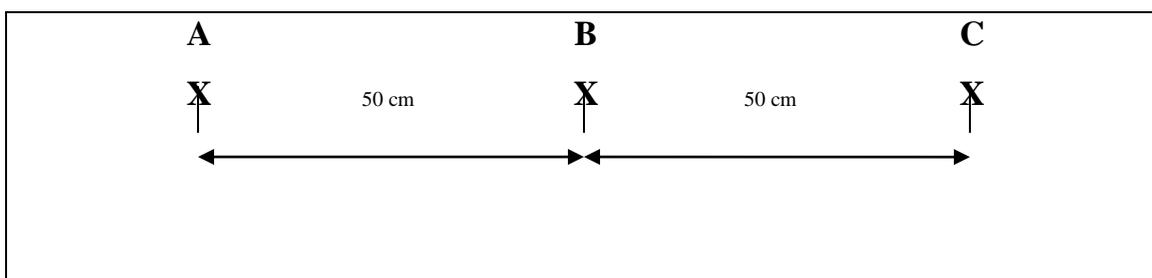


Figura 34 - Medições indiretas entre 3 pontos colineares

Para cada medição, realizadas dois a dois, os transdutores (transmissão e recepção) foram posicionados nos pontos A, B e C. Na sequência os transdutores foram invertidos para a realização de novas leituras como contraprova, resultando em 6 (seis) leituras de tempo de propagação de onda ultra-sônica para cada local.

As medições diretas foram realizadas apenas na ombreira esquerda (Figura 35), em pontos opostos localizados nas faces de montante e jusante. Os transdutores também foram invertidos para obtenção de contraprova das leituras.



Figura 35 - Medição direta realizada na ombreira esquerda

5.1.5 Localização da pedreira desativada (jazida)

Os registros da época da construção da barragem de Salto do Meio não informam a localização da pedreira utilizada para sua construção, sendo assim, foi necessária a realização de pesquisa por meio de imagens de satélites e entrevistas com os empregados antigos da UHE de Chaminé.

Nas imagens de satélites não foram observadas características que pudessem indicar o local da pedreira, contudo as entrevistas com os empregados antigos forneceram informações suficientes para realização de uma campanha de campo.

Com base nessas informações, localizou-se a antiga pedreira. O acesso ao local fica situado a uma distância aproximada de 5,8 km da barragem (Figura 36), por onde percorrendo cerca de 500 m, encontram-se as bases de concreto de um britador (Figura 37). A pedreira desativada fica localizada nas coordenadas UTM 0701555E e 7148348N ($25^{\circ} 46' 08,7''$ S e $48^{\circ} 59' 24,7''$ W), conforme Figura 38.



Figura 36 - Acesso ao local da pedreira desativada



Figura 37 - Bases do britador da pedreira desativada



Figura 38 - Localização da pedreira desativada

No local, após vistoria (Figura 39 a), foram selecionadas amostras representativas de rocha para os ensaios de expansão e petrográficos (Figura 39 b). Em seguida, as amostras foram nomeadas e transportadas para o laboratório.



(a) vistoria



(b) amostras de rocha coletadas

Figura 39 - Vistoria e amostras de rocha selecionadas na pedreira desativada

5.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

5.2.1 Preparação dos testemunhos de concreto para os ensaios

Após a chegada dos corpos de prova (CP's) extraídos da barragem ao laboratório, iniciou-se à preparação para realização dos ensaios laboratoriais. Primeiramente os CP's foram separados conforme o local de extração (Figura 40), em seguida eles foram cortados com serra de disco diamante em comprimentos de 10 e 20 cm, respectivamente para os diâmetros de 50 e 100 mm. As sobras desse procedimento foram separadas, visando à extração dos agregados para utilização no ensaio de expansão acelerado.



(a) CP's extraídos (E1)



(b) CP's extraídos (E2)



(c) CP's extraídos (E3)



(d) CP's extraídos (E4)



(e) CP's extraídos (E5)



(f) CP's extraídos (E6)

Figura 40 - Corpos de prova extraídos da barragem

Os CP's ainda foram retificados para tornar as superfícies planas e paralelas. Enfim, após estes procedimentos os CP's ficaram prontos para os ensaios, conforme a Figura 41.



(a) CP's preparados (E-01)



(b) CP's preparados (E-02)



(c) CP's preparados (E-03)



(d) CP's preparados (E-04)



(e) CP's preparados (E-05)



(f) CP's preparados (E-06)

Figura 41 - Corpos de prova preparados para os ensaios

Os CP's com 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento foram destinados para os ensaios mecânicos de resistência (compressão e tração) e módulo de elasticidade. Os CP's com 10 cm de diâmetro e comprimento variável foram

destinados ao ensaio de absorção de água e índice de vazios. Já os CP's com 5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento foram destinados ao ensaio de reatividade, através de imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH, 1N, 80°C). Para a amostra E6 dos CP's (5 x 10) cm, apenas 2 (dois) testemunhos foram utilizados para os ensaios, isso devido a dificuldade de recuperação na ocasião da extração.

5.2.2 Ensaios petrográficos

Os ensaios petrográficos foram realizados em 3 (três) amostras, uma delas refere-se aos agregados extraídos dos CP's do concreto da barragem, denominada de A1. As outras 2 (duas) amostras, referem-se aos fragmentos de rocha coletados na pedreira desativada, denominadas de J1 e J2.

Estas amostras foram analisadas conforme a norma NBR 15577-3 (ABNT, 2008), que especifica procedimentos para execução de análise petrográfica, dando ênfase nos fatores condicionantes para ocorrência da reação álcali-agregado.

A técnica englobou a caracterização mesoscópica e complementação por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida, através do microscópio petrográfico da marca Olympus, modelo BX 60. O objetivo da técnica por luz transmitida, através da análise em lâminas delgadas, é fazer a descrição mineralógica dos agregados, dando ênfase na investigação dos minerais potencialmente reativos do ponto de vista da RAA.

O ensaio ainda foi complementado através das técnicas de difratometria de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX).

5.2.3 Ensaios de expansão pelo método acelerado

O objetivo desses ensaios foi verificar o potencial reativo dos agregados extraídos do concreto da barragem e dos fragmentos de rocha oriundos da pedreira desativada, segundo o método acelerado prescrito pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008). Como também, verificar a expansão residual em CP's cilíndricos (5 x 10) cm submetidos às mesmas condições agressivas do ensaio acelerado.

5.2.3.1 Método acelerado em barras de argamassa – NBR 15577-4

Os ensaios foram divididos em dois grupos conforme a origem dos agregados, um com os agregados oriundos dos testemunhos extraídos da barragem (E1, E2, E3, E4, E5 e E6), e o outro com agregados oriundos da pedreira desativa (AJ1, AJ2 e AJ3).

A extração dos agregados do concreto foi realizada através de separação mecânica manual, buscou-se separar toda pasta de cimento residual (Figura 42). Esse mecanismo de separação foi adotado para garantir a integridade química destes agregados.



Figura 42 - Agregados separados do concreto da barragem

Conforme o método de ensaio, três barras de argamassa foram moldadas nas dimensões de (25 x 25 x 285) mm e proporção em massa de 1/2,25/0,47 (cimento/agregado/água) (Quadro 2). O cimento padrão utilizado foi fornecido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), cujas características atenderam aos requisitos da NBR 15577-4 (ABNT, 2008) (Quadro 3), conforme certificado apresentado no Anexo 1.

Material	Peneiras	Massa (g)
Agregados	4,8 – 2,4	99,0
	2,4 – 1,2	247,5
	1,2 – 0,6	247,5
	0,6 – 0,3	148,5
Cimento padrão		440,0
Água destilada		206,8

Quadro 2 - Relação de materiais da argamassa

Ensaio	Resultado	Tolerâncias da NBR 15577-4
Óxido de sódio	0,32%	—
Óxido de potássio	0,87%	—
Equivalente alcalino em Na ₂ O	0,89%	(0,90 ± 0,10)%
Área específica	4920 cm ² /g	(4900 ± 200) cm ² /g
Expansibilidade em autoclave	0,02%	< 0,20%

Quadro 3 - Caracterização do cimento padrão (valores certificados)

Após a moldagem as barras de argamassa permaneceram nos moldes por 24 horas, em seguida foram imersas em um tanque contendo água, cuja temperatura foi elevada gradativamente até atingir 80 °C, permanecendo nesta situação por 24 horas. Depois deste período as barras foram imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH, 1N e 80 °C) até o término do ensaio (Figura 43).

As medidas das expansões foram realizadas periodicamente através de relógio comparador (Figura 44) e os seus resultados expressos em porcentagem da expansão da média de três barras. As leituras foram efetuadas até 30 dias, conforme determina a norma.



(a) disposição das barras de argamassa dentro do tanque com solução alcalina (NaOH, 1N a 80 °C)



(b) tanques para cura alcalina utilizados para o ensaio acelerado

Figura 43 - Cura alcalina das barras de argamassa



(a) relógio comparador digital com precisão de 0,001 mm



(b) execução das leituras de expansão

Figura 44 - Leituras das expansões das barras de argamassa

5.2.3.2 Método acelerado em CP's cilíndricos extraídos da barragem

Após a preparação os CP's cilíndricos (5 x 10) cm foram submetidos às mesmas condições de ensaios do método acelerado prescrito pela NBR 15577-04

(ABNT, 2008), ou seja, inicialmente foram imersos em um tanque contendo água, cuja temperatura foi elevada gradativamente até 80 °C, permanecendo nesta situação por 24 horas. Em seguida foram imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH, 1N e 80 °C) (Figura 45).



Figura 45 - Corpos de prova cilíndricos dentro de tanque com solução (NaOH, 1N a 80 °C)

Devido à incompatibilidade dimensional dos CP's para utilização do relógio comparador na execução das leituras, as medições foram realizadas com auxílio de um paquímetro analógico com precisão de 0,05 mm (Figura 46).



Figura 46 - Leituras das expansões dos CP's (5x10) cm

5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS)

O objetivo do uso dessas técnicas foi a identificação e avaliação dos produtos da reação álcali-agregado (gel), as análises foram realizadas em superfícies de fratura das seguintes amostras:

- a) amostras de concreto oriundas dos ensaios mecânicos (Figura 47);
- b) amostras de barras de argamassa oriundas do ensaio acelerado (Figura 48);
- c) amostras de concreto oriundas do ensaio acelerado com CP's (5 x 10) cm.



(a) fragmentos de concreto oriundos dos ensaios mecânicos



(b) fragmentos de concreto do local E3

Figura 47 - Fragmentos de concreto da barragem



Figura 48 - Barras de argamassa após ensaio acelerado



Figura 49 - Amostras selecionadas para análise por MEV e EDS

As amostras selecionadas (Figuras 49 e 50) foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura da marca Philips (Figura 51), modelo XL 30, nas condições de metalização superficial em câmara metalizadora tipo vaporização catódica, marca Baltec, modelo SCD 005. A composição química semiquantitativa foi obtida com microsonda analítica de raios-X, marca EDAX, acoplada ao MEV (Figura 51 b).

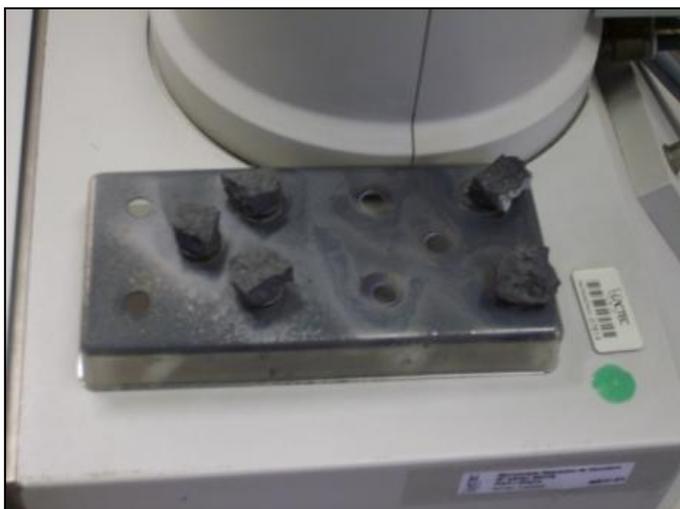


Figura 50 - Amostras preparadas através de metalização com grafite



(a) execução dos ensaios



(b) microscópio eletrônico de varredura com microsonda analítica de raios X acoplada

Figura 51 - Equipamentos utilizados para execução dos ensaios de MEV com EDS

5.2.5 Difratometria de raios X (DRX)

A técnica de difratometria de raios X (DRX) foi utilizada para análise da amostra de material exsudado (gel) na superfície do concreto.

A amostra foi seca e pulverizada, sendo então levada para o difratômetro de raios X da marca Philips, modelo X'Pert. A técnica objetivou a determinação das principais fases cristalinas presentes nesse material. A identificação das fases presentes foi feita por intermédio dos cartões de referência⁴ e software específico.

5.2.6 Espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS)

A amostra do gel também foi submetida a análise através da técnica de energia dispersiva de raios X (EDS), cujo objetivo foi a determinação da composição química semi-quantitativa. Utilizou-se para o ensaio, microsonda analítica de raios X, marca EDAX.

5.2.7 Ensaio físico-químico em amostras de água

As amostras de água coletadas foram submetidas a testes físico-químicos para determinação dos parâmetros: pH, condutividade, alcalinidade fenolftaleína, alcalinidade total, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais, turbidez, dureza, temperatura, magnésio, sódio, potássio, ferro, alumínio, silício, fluoretos, cloretos, nitratos, nitritos, sulfatos, brometos, fosfatos e sólidos totais.

Os ensaios basearam-se nos procedimentos do manual da Associação Americana de Saúde Pública (APHA)⁵.

⁴ *International Centre for Diffraction – ICDD.*

⁵ *American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th ed.*

5.2.8 Ensaios mecânicos

Para verificação das características mecânicas do concreto, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, bem como ensaio de módulo de elasticidade. Foram ensaiados 18 corpos de prova, sendo utilizado um conjunto de 6 (seis) CP's por tipo de ensaio.

5.2.8.1 Ensaio de resistência à compressão axial – NBR 5739/07

Após preparação dos CP's, conforme item 5.2.1, 6 (seis) CP's foram capeados com enxofre e levados à prensa para ruptura (Figura 52). O ensaio baseou-se nos procedimentos recomendado pela NBR 5739 (ABNT, 2007).



(a) corpos de prova capeados com enxofre



(b) execução do ensaio de resistência à compressão axial

Figura 52 - Ensaio de resistência à compressão axial

Foram utilizadas duas prensas da marca EMIC, uma com capacidade para 30 toneladas (modelo DL 30000) e a outra com capacidade para 200 toneladas (modelo PC 200).

5.2.8.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – NBR 7222/94

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral, 6 CP's previamente preparados, foram ensaiados em prensa automatizada com capacidade para 30 toneladas, marca EMIC, modelo DL 30000. Os ensaios foram realizados conforme os procedimentos preconizados pela NBR 7222 (ABNT, 1994).

5.2.8.3 Ensaio de módulo de elasticidade – NBR 8522/03

Foram ensaiados 6 (seis) CP's para determinação do módulo estático de elasticidade (Figura 53 a), cujos procedimentos foram realizados conforme a norma NBR 8522 (ABNT, 2003). Os ensaios foram realizados em duas prensas da marca EMIC, uma com capacidade para 30 toneladas (modelo DL 30000) e a outra com capacidade para 200 toneladas (modelo PC 200).



(a) Execução do ensaio de módulo de elasticidade



(b) Extensômetro digital utilizado para execução do ensaio

Figura 53 - Ensaio de módulo de elasticidade

Para medição das deformações foram empregados 2 (dois) extensômetros digitais com comprimento de 75,8 mm e sensibilidade de 0,0001mm, marca EMIC

(Figura 53 b). Empregou-se também sistema de leituras e registros automatizado, que através de um software registra os dados em uma planilha e desenha os gráficos de módulo de deformação estática (Figura 54).

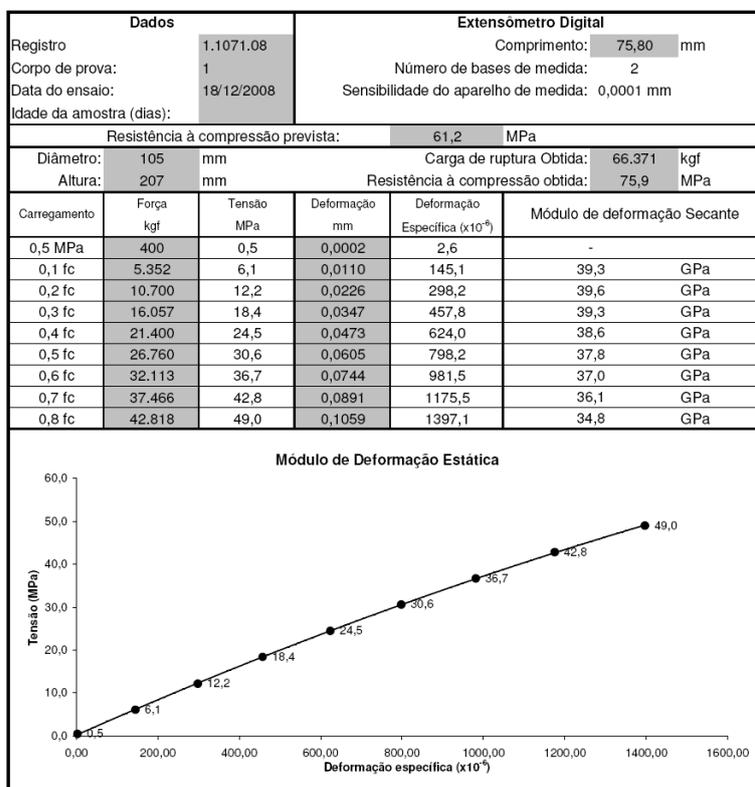


Figura 54 - Exemplo de gráfico de módulo de deformação estática

5.2.9 Ensaio de ultrassom nos testemunhos de concreto

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade, também foram submetidos ao ensaio de ultrassom (Figura 55), observando as diretrizes da NBR 8802 (ABNT, 1994). Utilizou-se o equipamento Pundit Plus PC 1006K e transdutores para transmissão e recepção de ondas com frequência de 54 kHz.



Figura 55 - Execução do ensaio de ultrassom no CP do local E3

5.2.10 Ensaio de absorção de água e índice de vazios

Foram ensaiados 6 (seis) testemunhos de concreto, conforme os procedimentos de ensaio preconizados pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Para determinação das massas seca e saturada foi empregada balança eletrônica com sensibilidade de 0,1g. O ensaio objetivou principalmente a avaliação da porosidade do concreto.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, bem como as suas análises, buscando verificar os objetivos propostos nesta pesquisa.

6.1 ENSAIOS PETROGRÁFICOS

Nesta seção são descritas as características petrográficas das amostras selecionadas e suas análises, visando principalmente verificar a semelhança entre os agregados do concreto da barragem e das amostras de rocha da pedreira desativada, bem como a identificação de minerais frente à reação álcali-agregado. Além disso, complementarmente, são apresentados os resultados da avaliação por difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX), objetivando a comparação química destas amostras.

As características macroscópicas e microscópicas das amostras (A1, J1 e J2), são apresentadas respectivamente nos Quadros 4 e 5. Quanto às características macroscópicas, as amostras apresentaram semelhanças, como a cor cinza predominante e a estrutura apresentando fraturas submilimétricas preenchidas por clorita. Com relação à composição mineralógica (Quadro 5), os principais minerais identificados, nas três amostras, em ordem decrescente de percentagem foram: andesina (plagioclásio), quartzo, hornblenda (anfíbolito), clorita, feldspato alcalino, diopsídio (piroxênio), minerais opacos e argilomineral. Nota-se uma grande semelhança do percentual destes minerais, com uma variação máxima de 5 % entre as amostras. Observa-se também, que todas as amostras apresentaram quartzo deformado⁶ maior que 5%, segundo a NBR 15577-3 (ABNT, 2008), os agregados que apresentam percentual maior que 5% de quartzo deformado podem ser classificados como potencialmente reativos.

⁶ Apresenta deformações intracristalinas decorrentes de processos tectônicos NBR 15577-3 (ABNT, 2008).

Características Macroscópicas	Amostra	Descrição
COR	A1	Cinza esverdeada
	J1	Cinza esverdeada
	J2	Cinza
ESTRUTURA	A1	Apresenta estrutura maciça, com fraturas submilimétricas preenchidas por clorita e subordinadamente carbonato e tremolita/actinolita.
	J1	Apresenta estrutura com bandamento incipiente com níveis félsicos de composição quartzo-feldspática intercalado a níveis máficos formados por hornblenda, diopsídio e minerais opacos. Apresenta fraturas submilimétricas preenchidas por clorita, carbonato e tremolita/actinolita.
	J2	Apresenta estrutura maciça, com fraturas submilimétricas preenchidas por clorita.

Quadro 4 - Características macroscópicas das amostras (A1, J1 e J2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

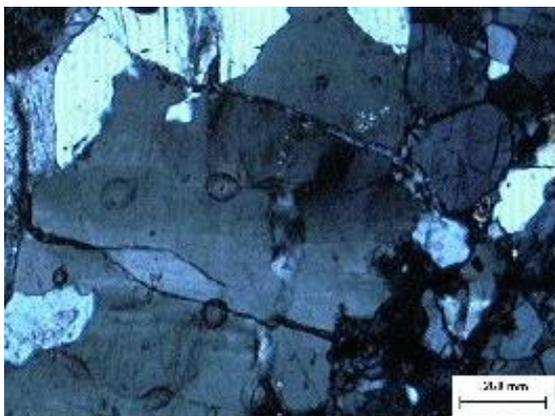
Composição Mineralógica						
Mineral	Tipo	A1 (%)	Tipo	J1 (%)	Tipo	J2 (%)
Andesina (plagioclásio)	P	35	P	35	P	30
Quartzo	P	20	P	20	P	25
Hornblenda (anfíbolito)	P	15	P	20	P	20
Diopsídio (piroxênio)	P	5	P	5	P	5
Feldspato alcalino	P	10	S	5	S	5
Clorita	S	10	S	10	S	10
Minerais opacos	S	< 5	S	< 5	S	5
Mica branca fina/argilomineral	S	5	S	5	S	< 1
Carbonato	S	< 1	S	< 1		
Epidoto	S	< 1	S	< 1		
Tremolita/actinolita (anfíbolito)			S	< 1	S	< 1
Zircão/apatia					S	< 1
Quartzo deformado	D	> 5	D	> 5	D	> 5
Quartzo microgranular			D	< 1		
Textura	Granoblástica		Granoblástica		Granoblástica	
Granulação	Fina (0,2 – 0,5mm)		Fina a média (< 1,0 mm)		Fina (0,2 – 0,5 mm)	
Estado de alteração	Rocha alterada		Rocha pouco alterada		Rocha pouco alterada	
Teor de quartzo microgranular	Não se aplica		< 1%		Não se aplica	
Microfissuração	Moderada a forte		Moderada		Incipiente a moderada	

(P) principal; (S) secundário; (D) deletério.

Quadro 5 - Composição mineralógica das amostras (A1, J1 e J2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

Nas Figuras 56, 57 e 58, são apresentadas fotomicrografias mostrando os minerais constituintes das amostras analisadas.



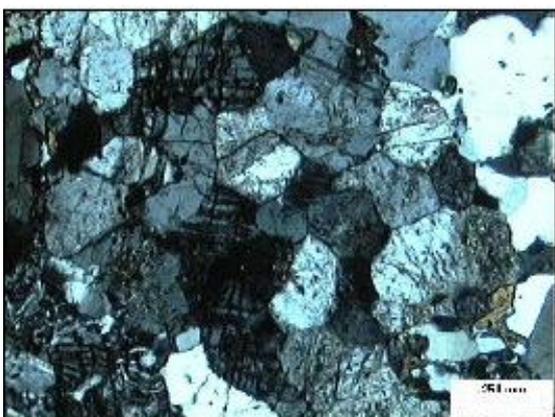
(a) Cristais de quartzo fraturado e com extinção ondulante (aumento 40X / luz polarizada)



(b) Clorita (verde claro) substituindo hornblenda (aumento 40X / luz natural)

Figura 56 - Fotomicrografia (amostras do agregado da barragem - A1)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)



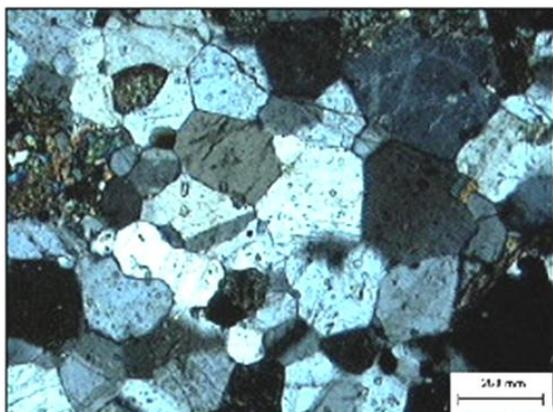
(a) Contato poligonal entre os cristais de quartzo, andesina e feldspato alcalino (aumento 40X / luz polarizada)



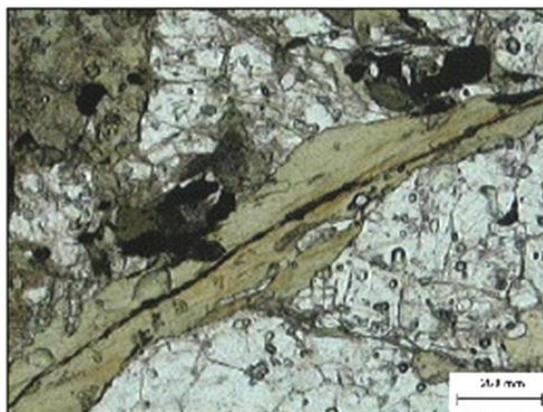
(b) Quartzo fraturado e com extinção ondulante (aumento 40X / luz natural)

Figura 57 - Fotomicrografia (amostras da pedreira - J1)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)



(a) Contato poligonal entre os cristais de quartzo e andesina (aumento 40X / luz polarizada)



(b) Fratura submilimétrica preenchida por clorita (aumento 40X / luz natural)

Figura 58 - Fotomicrografia (amostras da pedra - J2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

De acordo com as características apresentadas, as três amostras podem ser classificadas como rocha metamórfica, com metamorfismo nas fácies anfibolito alto a granulito com retrometamorfismo na fácies xisto verde, apresentando os seguintes nomes:

- a) amostra A1: granulito/granofeis;
- b) amostra J1: granulito/granofeis ou “diopsídio – hornblenda – quartzo – andesina gnaise”;
- c) amostra J2: granulito/granofeis.

O granulito é uma rocha afetada por metamorfismo de alto grau, submetida a elevadas condições de temperatura e pressão (MEHENERT, 1972).

A seguir, são apresentados os difratogramas (Figuras 59, 60 e 61) e os compostos químicos identificados através da análise por DRX (Quadros 6, 7 e 8).

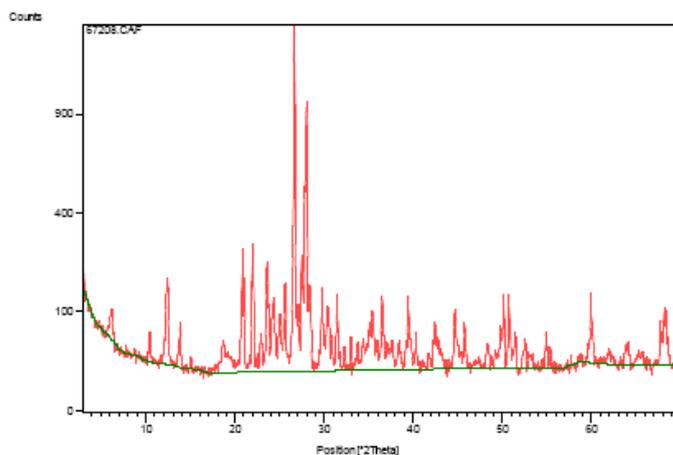


Figura 59 - Difratoograma de raios X (amostra A1)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

Mineral	Fórmula
Andesina (Plagioclásio)	(Na, Ca)(Si, Al) ₄₀₈
Quartzo	SiO ₂
Hornblenda (Anfibolito)	Ca ₂ Mg ₄ (Al, Fe ³⁺)Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂
Clinocloro (Clorita)	(Mg, Fe ²⁺) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈
Feldspato alcalino	KAlSi ₃ O ₈

Quadro 6 - Compostos química (amostra A1)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

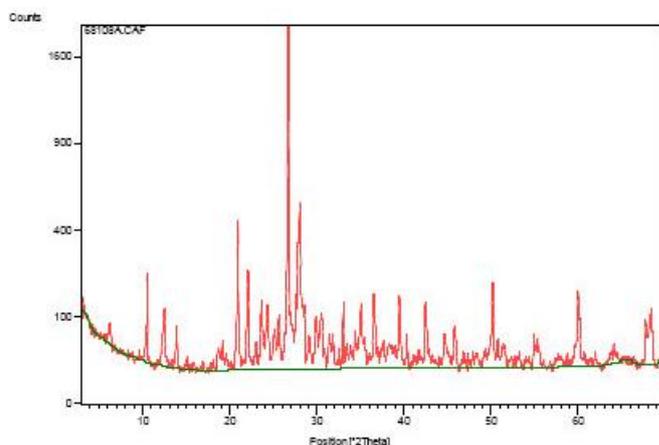


Figura 60 - Difratoograma de raios X (amostra J1)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

Mineral	Fórmula
Andesina (Plagioclásio)	(Na, Ca)(Si, Al) ₄₀₈
Quartzo	SiO ₂
Hornblenda (Anfibolito)	Ca ₂ Mg ₄ (Al, Fe ³⁺)Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂
Clinocloro (Clorita)	(Mg, Fe ²⁺) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈
Diapsídio (Piroxênio)	CaMgSi ₂ O ₆

Quadro 7 - Compostos químicos (amostra J1)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

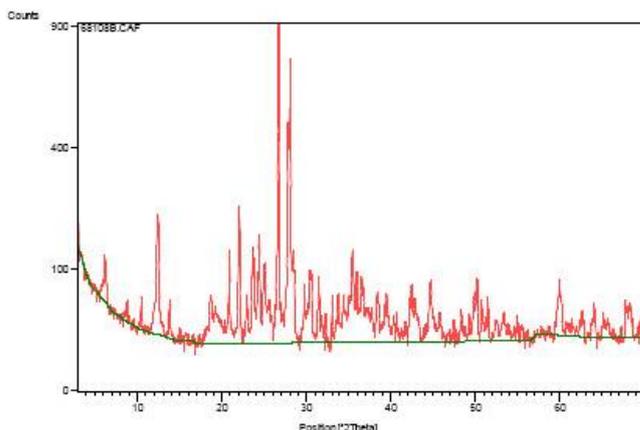


Figura 61 - Difratograma de raios X (amostra J2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

Mineral	Fórmula
Andesina (Plagioclásio)	(Na, Ca)(Si, Al) ₄₀₈
Quartzo	SiO ₂
Hornblenda (Anfibolito)	Ca ₂ Mg ₄ (Al, Fe ³⁺)Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂
Clinocloro (Clorita)	(Mg, Fe ²⁺) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈
Diapsídio (Piroxênio)	CaMgSi ₂ O ₆

Quadro 8 - Compostos químicos (amostra J2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

Nota-se que os resultados dos compostos químicos corroboram com as composições mineralógicas apresentadas no Quadro 5. As três amostras indicaram minerais semelhantes como: andesina, quartzo, hornblenda e clinocloro.

Utilizou-se também da técnica de fluorescência de raios X (FRX), cujos resultados são apresentados na Tabela 1 e Gráfico 7.

Tabela 1 - Composição química

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	P.F.
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A1	60,6	16,46	1,83	3,88	7,19	4,56	3,11	0,47	0,1	0,2	1,88
J1	65,86	13,57	1,07	3,78	5,99	5,2	2,43	0,4	0,09	0,14	1,57
J2	52,47	17,37	0,65	3,69	12,54	4,47	4,84	0,87	0,15	0,31	2,79
Média	59,64	15,80	1,18	3,78	8,57	4,74	3,46	0,58	0,11	0,22	2,08
DP	6,75	1,98	0,60	0,10	3,49	0,40	1,24	0,25	0,03	0,09	0,63
CV	11,31	12,56	50,54	2,51	40,68	8,39	35,91	43,72	28,36	39,79	30,49

(DP) Desvio Padrão; (CV) Coeficiente de Variação.

Fonte: Adaptado LACTEC (2009a)

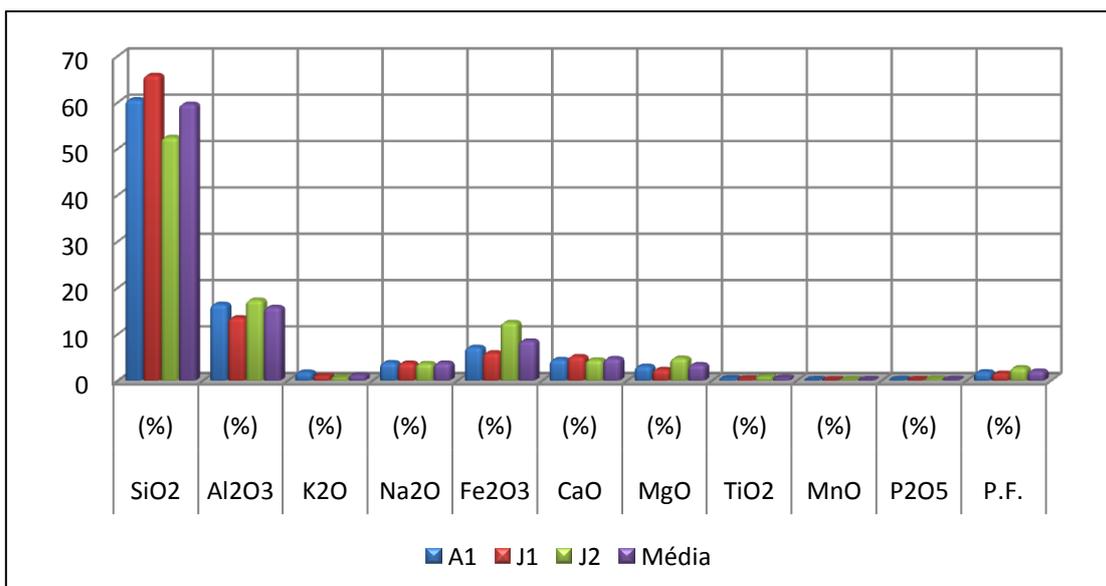


Gráfico 7 - Distribuição % da composição química das amostras (A1, J1 e J2)

Analisando a Tabela 1 e o Gráfico 7, observa-se que as amostras são basicamente compostas por silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio e sódio, com aproximadamente 95% dos totais dos elementos químicos. Analisando a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação das três amostras, percebe-se que não há grandes dispersões para os elementos em maior quantidade, ocorrendo maior variabilidade para os elementos potássio, titânio e ferro.

A análise do variável reduzida, apresentada na Tabela 2, confirma a pequena variabilidade da composição química entre as três amostras, sendo que, o cálcio da amostras J1 apresenta a maior variação quando comparado com a média. A variável reduzida mede a amplitude do desvio em relação à média em unidades de desvio padrão. Os dados são considerados atípicos quando o módulo da variável reduzida (Z) é maior que 2,5 (RIBEIRO e CATEN, 2001).

Tabela 2 - Variável reduzida (Z) - composição química das amostras (A1, J1 e J2)

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	P.F.
A1	0,14	0,33	1,08	1,02	0,40	0,46	0,28	0,43	0,41	0,19	0,32
J1	0,92	1,12	0,19	0,04	0,74	1,15	0,83	0,71	0,73	0,89	0,80
J2	1,06	0,79	0,89	0,98	1,14	0,69	1,11	1,14	1,14	1,08	1,12

As análises dos resultados evidenciaram que há semelhança entre as três amostras, comprovando que o material da pedra desativada foi utilizado para produção de agregados da barragem.

6.2 ENSAIOS REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUA E GEL

Esta seção trata da apresentação e análises dos resultados dos ensaios realizados nas amostras de água e de material exsudado (gel) na superfície do concreto da barragem.

6.2.1 Ensaios físico-químicos de água

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a água costuma ser o fator central para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto, seja pelos processos físicos ou químicos de degradação. Neste sentido, a investigação físico-química da água do reservatório e da água percolada pela barragem, busca detectar os possíveis processos deletérios do concreto da barragem. O Quadro 9 apresenta os resultados dos ensaios físico-químicos das amostras de água coletadas.

Parâmetros	AR 1	AR 2	AR 3	AP 1	AP 2	AP 3
pH	7,00	7,10	7,50	6,20	6,10	8,00
Condutividade, ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	31,00	31,00	41,00	93,00	85,00	123,00
Alcalinidade fenolftaleína, (mgCO_3/l)	0	0	0	0	0	0
Alcalinidade total, (mgCO_3/l)	23,00	20,00	31,00	56,00	50,00	65,00
Sólidos suspensos totais, (mg/l)	5,00	5,00	6,00	0,00	24,00	0,00
Sólidos dissolvidos totais, (mg/l)	37,00	40,00	52,00	74,00	70,00	83,00
Turbidez, (NTU)	5,00	4,00	5,00	1,00	10,00	1,00
Dureza, (mg/l)	7,90	7,90	8,10	31,80	25,60	44,80
T, ($^{\circ}\text{C}$)	19,60	19,20	20,50	18,10	17,50	18,50
Cálcio, (mg/l)	1,50	1,50	1,60	7,30	6,30	16,80
Magnésio, (mg/l)	1,00	1,00	1,00	3,30	2,40	0,70
Sódio, (mg/l)	2,55	2,60	2,50	4,40	3,55	4,25
Potássio, (mg/l)	0,70	0,80	0,80	0,85	1,05	1,55
Ferro, (mg/l)	0,90	0,60	0,65	0,05	6,30	0,05
Alumínio, (mg/l)	0,40	0,20	0,20	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Parâmetros	AR 1	AR 2	AR 3	AP 1	AP 2	AP 3
Sílicio, (mg/l)	5,30	5,80	5,40	11,00	7,90	6,20
Fluoretos, (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cloretos, (mg/l)	1,70	1,90	1,76	1,81	1,81	1,65
Nitratos, (mg/l)	0,90	1,28	0,90	0,31	0,10	< 0,1
Nitritos, (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfatos, (mg/l)	0,60	0,70	0,50	0,85	< 0,1	0,10
Brometos, (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Fosfatos, (mg/l)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sólidos totais, (mg/l)	42,00	45,00	58,00	74,00	94,00	83,00

Quadro 9 - Resultados dos ensaios físico-químicos das amostras de água

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

Comparando os resultados das amostras de água do reservatório com as amostras de água percolada na barragem, observa-se principalmente:

- a) pH: houve redução do valor do pH das amostras AP1 e AP2 referentes a água percolada pelos drenos de fundação, devido provavelmente ao meio percolado, como solo, matéria orgânicos e a rocha de fundação. Já para a amostra AP3 referente à percolação pelo concreto da barragem (eflorescência), nota-se o aumento do pH, devido provavelmente a maior alcalinidade desse meio;
- b) sólidos suspensos totais: observa-se um aumento considerável para a amostra AP2 e nenhum valor detectado para as amostra AP1 e AP3, este fato demonstra o processo de lixiviação intenso dos componentes do concreto neste local, já que refere-se ao dreno de fundação de maior vazão da barragem. Tal fato, também pode ser confirmado pela maior turbidez detectada;
- c) sólidos dissolvidos totais: os resultados demonstram aumento para todas as amostras de percolação, confirmando a ocorrência do processo de hidrólise dos constituintes da pasta de cimento;

- d) álcalis (cálcio, magnésio, sódio e potássio): nota-se um aumento para todos estes álcalis, demonstrando a disponibilidade de íons alcalinos para continuidade dos processos relacionados à RAA.

Na amostra AP3, devido ao maior teor de álcali dissolvido, principalmente pelo íon cálcio, percebe-se o reflexo no aumento dos parâmetros de dureza, condutividade e alcalinidade total.

As amostras AR1, AR2 e AR3, coletadas no reservatório, possuem composições químicas similares, variando ligeiramente alguns parâmetros de acordo com a profundidade. Contudo não houve destaque com relação às concentrações, podendo considerar a água como natural ou fluvial sem poluição externa (BICZOK e ASENSI, 1981).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), águas que contêm pequenas quantidades de cloretos, sulfatos, bicarbonato de cálcio e de magnésio, geralmente não atacam os constituintes da pasta de cimento Portland, porém no caso de água corrente ou de infiltração sob pressão, a hidrólise pode ocorrer. Portanto, o contato constante da água sob pressão certamente teve um papel importante no processo de degradação do concreto da barragem ao longo dos 78 em operação, seja pela presença constante de íons agressivos (íons sulfato, nitrato e cloreto), pelas reações de hidrólise ou pelas reações expansivas álcali-agregado.

6.2.2 Ensaios químicos do material exsudado (gel)

A amostra de material exsudado foi submetida à análise química elementar e de fase, por EDS e DRX. A Figura 62 apresenta o espectro do material exsudado (gel) e sua composição química elementar.

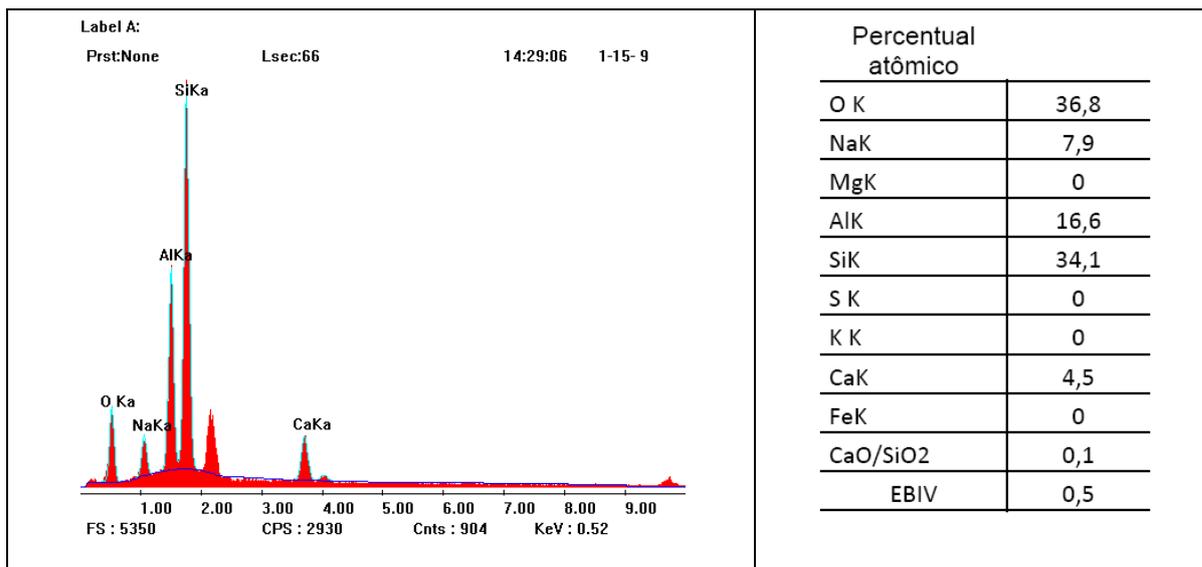


Figura 62 - Espectro da análise química elementar da amostra de gel e seu percentual atômico
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

A relação CaO/SiO_2 tem sido utilizada por diversos autores, tais como Prezzi *et al.*, (1997), Hasparyk (1999), Silveira (2001), entre outros, para identificação dos produtos da RAA. Segundo estes autores, quanto menor a relação CaO/SiO_2 , mais expansivo é o gel. Cabe ressaltar, que esta relação com valores entre 1,5 e 2, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), pode caracterizar silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Outro parâmetro utilizado para caracterização da expansibilidade de gel proveniente da RAA, é a taxa E_{BIV} (Equação 6.1), que é baseada no conceito convencional de troca catiônica e inchamento da dupla camada elétrica. Segundo Prezzi *et al.*, (1997) e Hasparyk (1999), quanto maior a taxa E_{BIV} , menos expansivo é o gel.

$$E_{\text{BIV}} = \frac{(\text{molCaO} + \text{molMgO})}{(\text{molCaO} + \text{molMgO} + \text{mol Na}_2\text{O} + \text{mol K}_2\text{O})} \quad (6.1)$$

Com base nos parâmetros citados, a análise do material exsudado apresenta a relação CaO/SiO_2 igual a 0,1 e a taxa E_{BIV} igual a 0,5 (Figura 62), evidenciando o material como sendo um gel expansivo de composição sílico-cálcico sódica.

Na análise do difratograma (Figura 63), nota-se que o gel é formado por uma mistura de fases aluminato, silicato de cálcio, silicato de sódio e carbonato de cálcio em menor proporção, porém é difícil atribuir ao gráfico uma ou outra fase química específica.

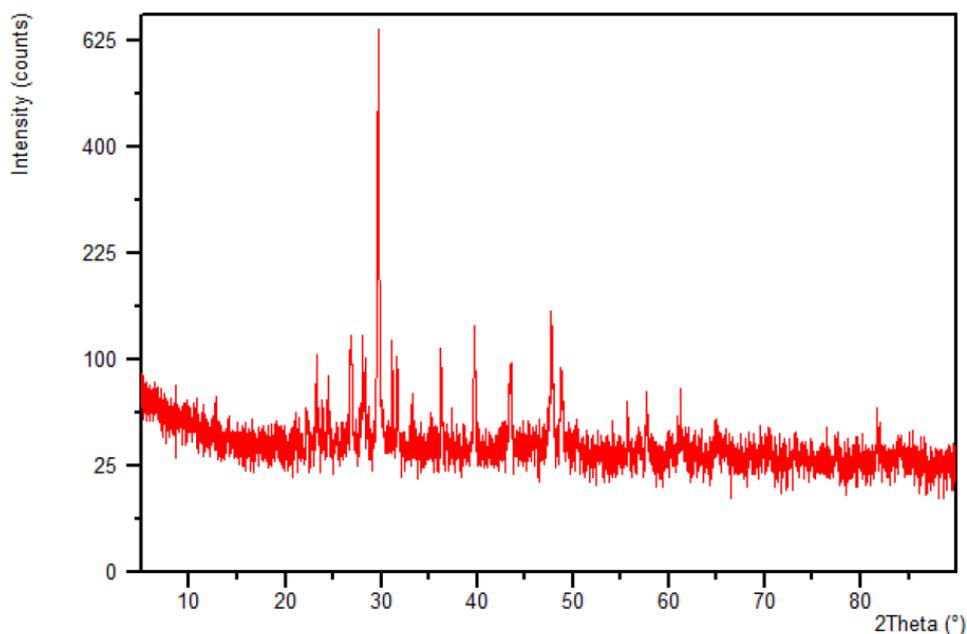


Figura 63 - Difratograma de raios X da amostra de gel
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

6.3 ENSAIOS DE EXPANSÃO – MÉTODO ACELERADO

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios acelerados e suas análises, para os agregados oriundos da barragem e da pedreira desativada, bem como para os corpos de prova cilíndricos (5 x 10) cm, objetivando principalmente avaliar o potencial reativo álcali-agregado residual do agregado constituinte do concreto da barragem.

6.3.1 Expansões das barras de argamassa com agregados oriundos da pedra desativada – NBR 15577-4/08

A Tabela 3 e o Gráfico 8 apresentam os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com agregados da pedra desativada. Os resultados de cada ensaio estão apresentados no Anexo 2.

Tabela 3 - Expansões das barras de argamassa confeccionadas com agregados oriundos da pedra desativada

IDADE (dias)	AJ1 (%)	AJ2 (%)	AJ3 (%)	Média (%)	Desvio Padrão
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,031	0,005	0,007	0,014	0,014
	0,050	0,012	0,012	0,025	0,022
	0,097	0,044	0,039	0,060	0,032
	0,086	0,070	0,068	0,075	0,010
	0,103	0,087	0,090	0,093	0,009
	0,110	0,091	0,094	0,099	0,010
	0,115	0,146	0,151	0,137	0,019
	0,121	0,171	0,175	0,156	0,031
	0,169	0,192	0,187	0,183	0,012
16	0,222	0,215	0,224	0,220	0,005
	0,265	0,223	0,241	0,243	0,021
	0,273	0,270	0,303	0,282	0,019
	0,330	0,290	0,333	0,318	0,024
	0,353	0,323	0,352	0,342	0,017
	0,368	0,337	0,375	0,360	0,020
	0,383	0,356	0,384	0,375	0,016
	0,385	0,373	0,399	0,386	0,013
	0,415	0,390	0,413	0,406	0,013
	0,426	0,407	0,431	0,422	0,013
30	0,449	0,424	0,448	0,440	0,014

Fonte: Adaptado LACTEC (2009b)

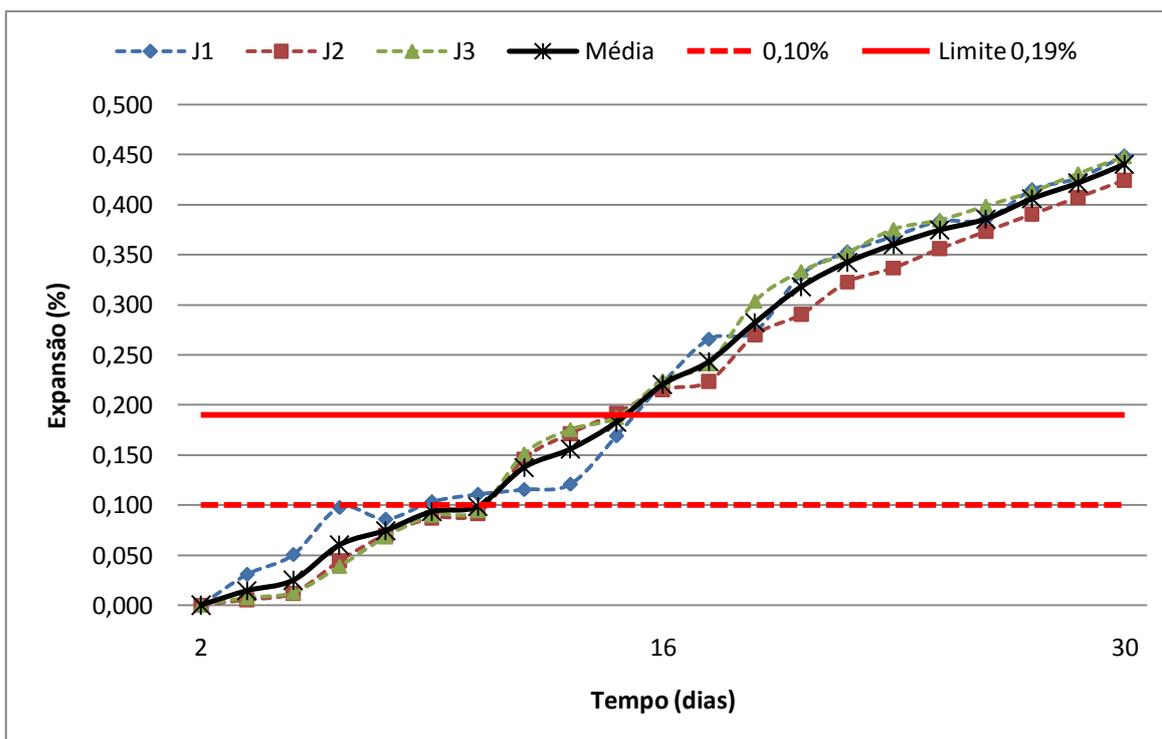


Gráfico 8 - Expansão das barras de argamassa confeccionadas com agregados da pedreira desativada

De acordo com a norma NBR 15577 (ABNT, 2008), para expansões menores que 0,19 %, os agregados são classificados como potencialmente inócuos, já para as expansões maiores ou iguais que 0,19 %, os agregados são classificados como potencialmente reativos.

Com base nestes critérios, observa-se que aos 16 dias as três amostras já haviam ultrapassado o limite de expansão de 0,19 %. Já aos 30 dias as amostras obtiveram em média expansões de 0,44 %, ou seja, mais que o dobro do limite de 0,19 %, comprovando que os agregados da pedreira desativada são potencialmente reativos.

Analisando o Gráfico 8, percebe-se o aumento constante das expansões para todas as amostras. Também não há sinal de estabilização das expansões ao final do ensaio, ou seja, caso as leituras prosseguissem além dos 30 dias, é provável que houvesse expansões maiores.

Nota-se também, que os resultados das três amostras tiveram pouca dispersão da média, isso pode ser verificado pela análise do desvio padrão. Este fato mostra a homogeneidade das amostras coletas na pedreira desativada.

6.3.2 Expansões das barras de argamassa com agregados oriundos do concreto da barragem – NBR 15577-4/08

Na Tabela 4 e no Gráfico 9, são apresentados os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com agregados oriundos do concreto da barragem. Os resultados de cada ensaio estão apresentados no Anexo 2.

Tabela 4 - Expansões das barras de argamassa confeccionadas com agregados do concreto da barragem

IDADE (dias)	E1 (%)	E2 (%)	E3 (%)	E4 (%)	E5 (%)	E6 (%)	MÉDIA (%)	Desvio Padrão
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,006	0,006	0,005	0,006	0,007	0,004	0,005	0,001
	0,015	0,013	0,011	0,012	0,006	0,013	0,012	0,003
	0,041	0,037	0,039	0,031	0,006	0,014	0,028	0,015
	0,051	0,051	0,053	0,052	0,008	0,014	0,038	0,021
	0,070	0,068	0,067	0,076	0,014	0,018	0,052	0,028
	0,075	0,072	0,071	0,080	0,025	0,057	0,063	0,020
	0,103	0,092	0,104	0,128	0,037	0,071	0,089	0,032
	0,116	0,115	0,121	0,160	0,052	0,083	0,108	0,037
	0,130	0,127	0,136	0,183	0,063	0,092	0,122	0,041
16	0,138	0,139	0,152	0,220	0,065	0,092	0,134	0,053
	0,138	0,144	0,155	0,223	0,107	0,136	0,151	0,039
	0,161	0,158	0,188	0,242	0,121	0,150	0,170	0,041
	0,172	0,163	0,206	0,253	0,151	0,163	0,185	0,038
	0,186	0,166	0,222	0,264	0,168	0,182	0,198	0,038
	0,194	0,175	0,235	0,276	0,180	0,197	0,210	0,039
	0,208	0,184	0,243	0,287	0,200	0,219	0,223	0,037
	0,224	0,196	0,254	0,306	0,220	0,240	0,240	0,038
	0,242	0,209	0,266	0,325	0,230	0,247	0,253	0,040
	0,248	0,215	0,271	0,333	0,241	0,251	0,260	0,040
30	0,254	0,223	0,278	0,346	0,263	0,270	0,272	0,041

Fonte: Adaptado LACTEC (2009b)

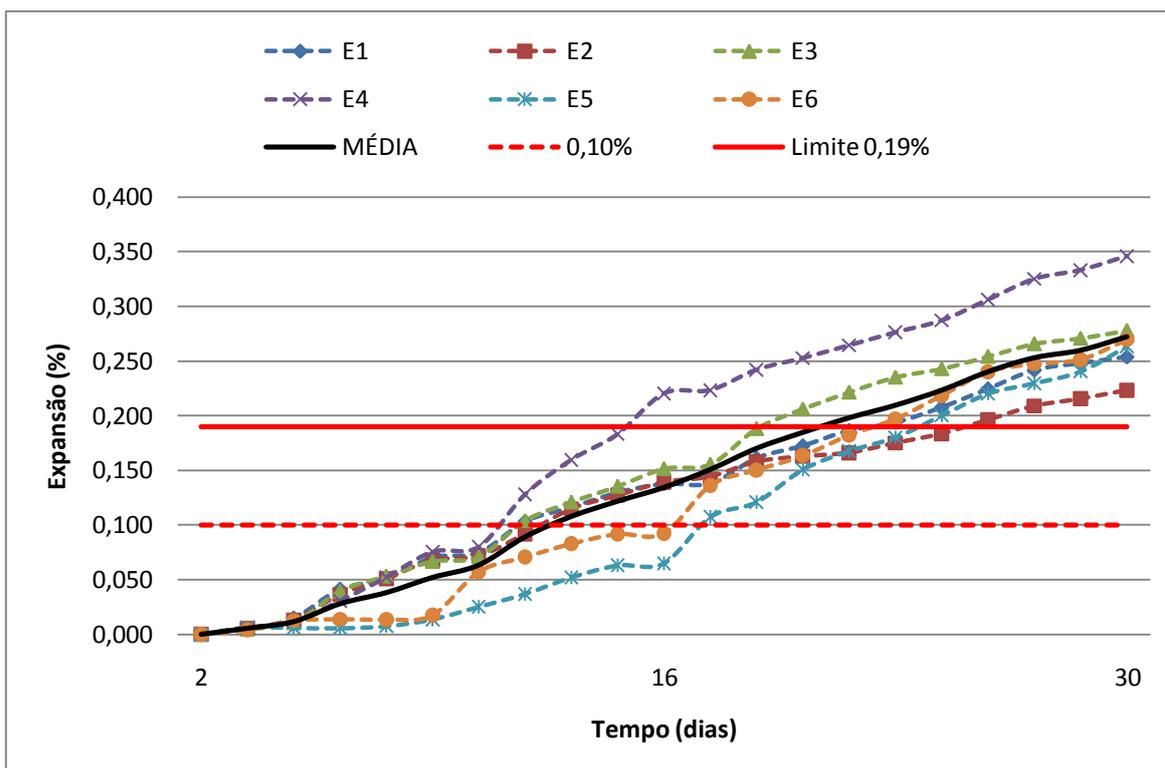


Gráfico 9 - Expansão das barras de argamassa confeccionadas com agregados do concreto da barragem

Observa-se que aos 30 dias, todas as amostras apresentaram expansões superiores a 0,19%, ou seja, os agregados da barragem podem ser classificados como potencialmente reativos.

É importante destacar, que os agregados permaneceram imersos no concreto por 78 anos, portanto, os resultados demonstram que os agregados da barragem ainda têm potencial de reação álcali-agregado.

Analisando o Gráfico 9, nota-se o comportamento expansivo crescente das amostras. Também não há sinal de estabilização das expansões ao final do ensaio, ou seja, caso as leituras prosseguissem além dos 30 dias, é provável que houvesse expansões maiores.

Observa-se também, que as amostras E2 e E4 em relação às demais, apresentam maior dispersão da média. Objetivando a verificação do efeito da

localidade das amostras (E1, E2, E3, E4, E5 e E6), com base nas expansões aos 30 dias de cada barra de argamassa (Tabela 5), realizou-se a análise da variância (ANOVA) (Tabela 6).

Tabela 5 - Expansões das barras de argamassa aos 30 dias

Nº Barra	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	0,231	0,205	0,284	0,341	0,261	0,291
2	0,271	0,233	0,275	0,350	0,292	0,275
3	0,259	0,232	0,275	0,347	0,238	0,243

Tabela 6 - Análise da variância da influência dos locais (E1, E2, E3, E4, E5 e E6) nas expansões

ANOVA								
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab			
Entre os grupos	SQG	0,0249	K - 1	5	MQG	0,0050	15,9063 >	3,025438
Dentro Grupos	SQR	0,0041	n - K	13	MQR	0,0003		
Total		0,0289		18				
Conclusão:		O efeito dos locais é significativo (Teste F > Ftab)						

A análise da variância confirma o efeito significativo da localidade na influencia das expansões. Este fato se deve provavelmente a variação no consumo dos minerais reativos em função dos fatores intervenientes da RAA, como a umidade e temperatura no interior do concreto. A umidade elevada favorece a migração dos íons alcalinos na solução dos poros do concreto, enquanto a temperatura funciona como um catalisador da reação.

6.3.3 Expansões dos testemunhos de concreto (5 x 10) cm submetidos as condições de ensaio da NBR 15577-4/08

Os testemunhos de concreto (5 x 10) cm, ensaiados conforme método experimental apresentado no item 5.2.3.2, não apresentaram expansões ao final do ensaio, porém conforme apresentado anteriormente, os agregados da barragem foram

considerados potencialmente reativos pelo ensaio acelerado de barras, as prováveis causas para este resultado se devem aos seguintes fatores:

- a) dimensões: as dimensões dos testemunhos (5 x 10 cm), são diferentes das dimensões das barras de argamassa (2,5 x 2,5 x 28,5 cm), nota-se uma diferença de 18,5 cm no comprimento, com isso, mesmo que as expansões específicas fossem as mesmas, certamente as barras de argamassa obteriam expansões totais maiores;
- b) porosidade elevada: a porosidade elevada permite que o gel produto da RAA possa expandir dentro dos vazios, evitando as tensões de tração, conforme descrito por Ferraris (2000);
- c) menor área específica: agregados com área específica maior provocam expansões maiores (HOBBS, 1988);
- d) forma dos grãos: na Figura 64, observa-se que os agregados do concreto têm em geral formatos angulosos, de acordo com Valduga (2007), grãos com formato mais arredondados causam maiores expansões;
- e) equipamentos de medição das expansões: para realização do ensaio foi utilizado um paquímetro com precisão de 0,05 mm, prejudicando as medições em caso de expansões mínimas. A NBR 15577 (ABNT, 2008) preconiza o uso do relógio comparador com precisão de 0,001 mm.

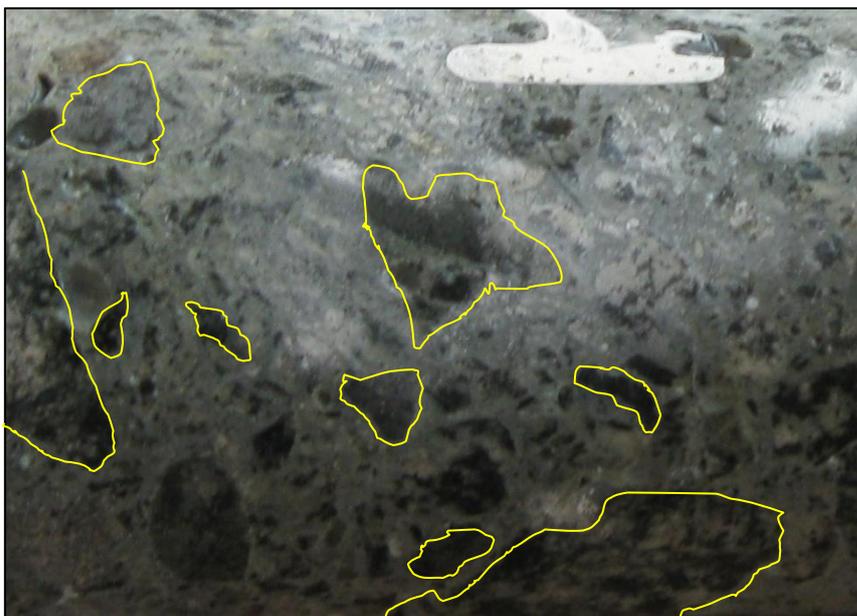


Figura 64 - Forma dos agregados do concreto da barragem

6.3.4 Comparação entre os resultados dos ensaios acelerados com agregados da pedreira desativada e do concreto da barragem

Objetivando a verificação do potencial reativo álcali-agregado residual, é apresentada uma comparação entre os resultados das expansões médias obtidas com os agregados da pedreira desativada (AP) e da barragem (AB).

A Tabela 7 e o Gráfico 10 apresentam a comparação das médias das expansões destes dois grupos.

Tabela 7 - Expansões médias das barras de argamassa confeccionadas com agregados da pedreira desativada e da barragem

IDADE (dias)	Expansões Médias AP	Expansões Médias AB
	Amostras: (AJ1, AJ2 e AJ3) (%)	Amostras: (E1, E2, E3, E4, E5 e E6) (%)
2	0,000	0,000
	0,014	0,005
	0,025	0,012
	0,060	0,028
	0,075	0,038
	0,093	0,052

IDADE (dias)	Expansões Médias AP	Expansões Médias AB
	Amostras: (AJ1, AJ2 e AJ3) (%)	Amostras: (E1, E2, E3, E4, E5 e E6) (%)
	0,099	0,063
	0,137	0,089
	0,156	0,108
	0,183	0,122
16	0,220	0,134
	0,243	0,151
	0,282	0,170
	0,318	0,185
	0,342	0,198
	0,360	0,210
	0,375	0,223
	0,386	0,240
	0,406	0,253
	0,422	0,260
30	0,440	0,272

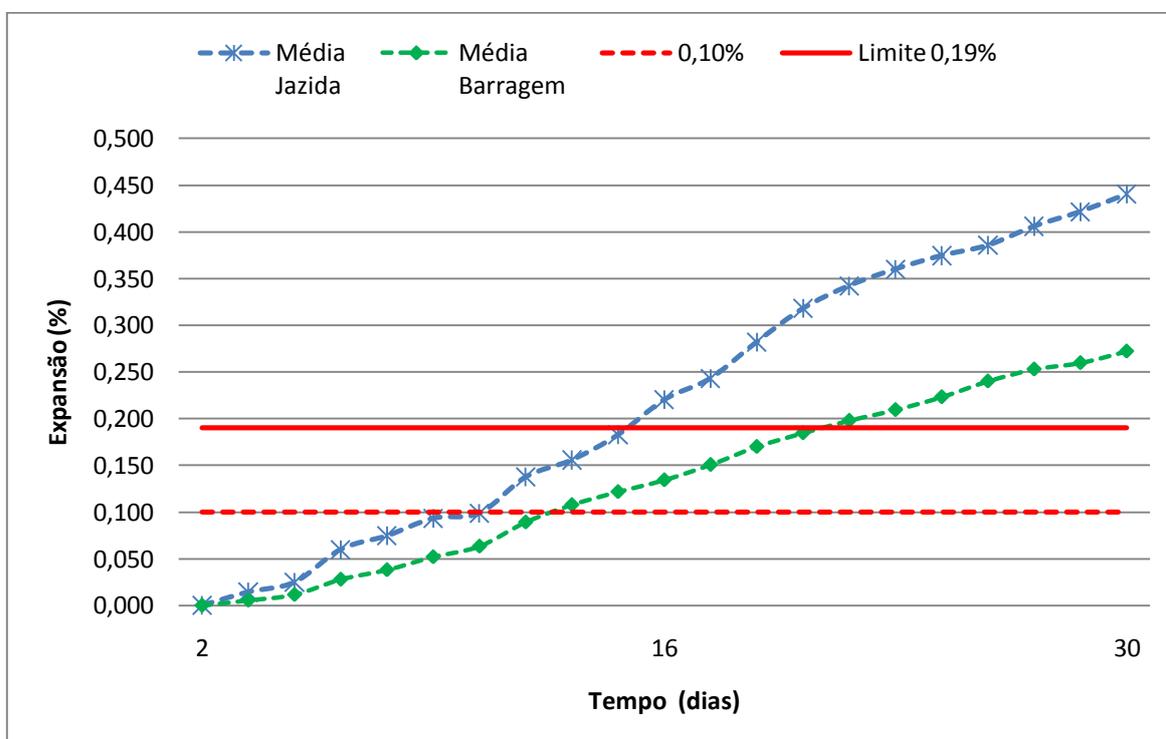


Gráfico 10 - Expansões médias das barras de argamassa confeccionadas com agregados da barragem e da pedra desativada

Verifica-se, que tanto as expansões de AP como as de AB, alcançaram valores acima de 0,19% aos 30 dias, o que classifica ambos agregados como potencialmente deletérios. No Gráfico 10, percebem-se tendências divergentes do crescimento das expansões, sem apresentar sinal de estabilização ao final do ensaio.

Para poder analisar melhor estes resultados, fez-se necessário verificar a significância da diferença das expansões. Para isso, com base nas expansões médias das barras de argamassa aos 30 dias (Tabela 8), foi realizada análise da variância (ANOVA), conforme Tabela 9.

Tabela 8 - Expansão média das barras de argamassa aos 30 dias

ORIGEM DOS AGREGADOS	
Pedreira desativada (%)	Barragem (%)
0,254	0,449
0,223	0,424
0,278	0,448
0,346	
0,263	
0,270	

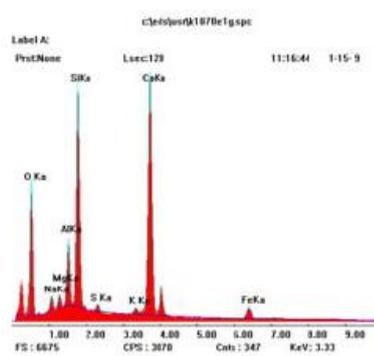
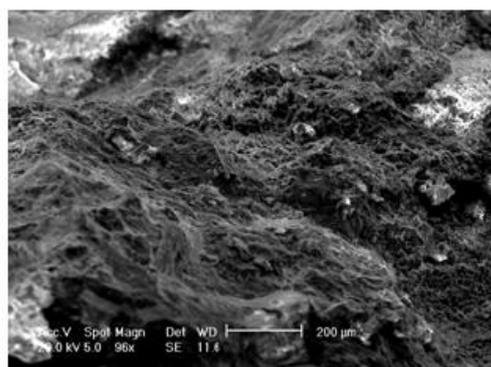
Tabela 9 - Análise da variância das expansões entre os grupos AP e AB

ANOVA					
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab.
Entre os grupos	SQG 0,056	K - 1 1	MQG 0,056	45,6	> 5,591448
Dentro Grupos	SQR 0,009	N - K 7	MQR 0,001		
Total	0,065	8			
Conclusão:		O efeito dos grupos é significativo (Teste F > F tab)			

O resultado da análise da variância mostra que a diferença entre os valores das expansões é significativa, comprovando que a variação das expansões do grupo AP para AB é real. Sendo assim, nota-se ao final do ensaio, que a expansão de AB representa cerca de 60 % da expansão de AP, isso significa que apenas 40 % do potencial reativo foi consumido durante 78 anos. Este comportamento evidencia o potencial reativo residual dos agregados da barragem.

6.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)

Nas Figuras 65 a 95 são apresentadas as micrografias e espectros resultantes das análises por MEV e EDS.



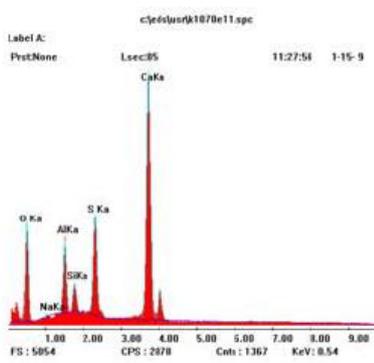
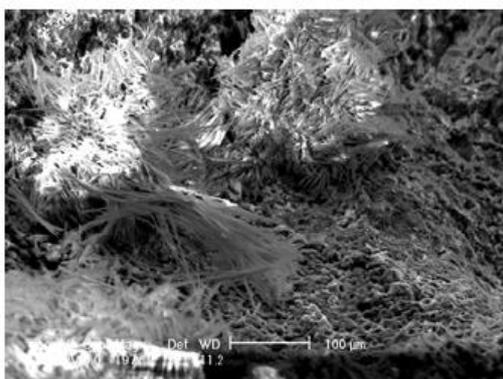
O K	58,7
NaK	2,9
MgK	1,4
AlK	4,8
SiK	13,3
S K	0,4
K K	0,4
CaK	16,6
FeK	1,6
CaO/SiO ₂	0,8
E _{BIV}	0,9

(a) imagem geral e espectro de superfície de fratura (ampliação 96 X)

(b) percentual atômico

Figura 65 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



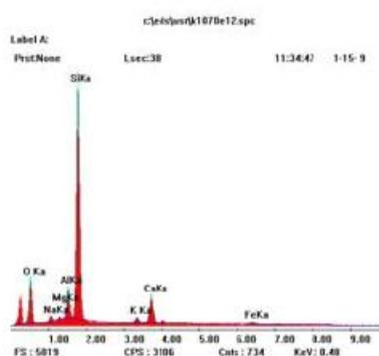
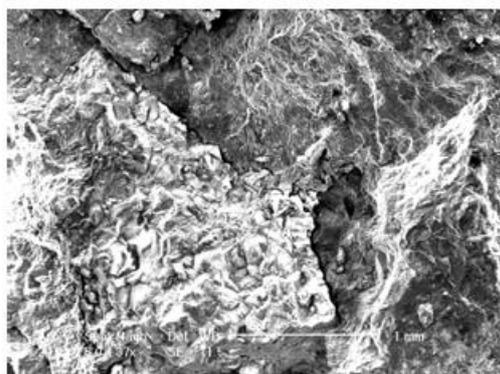
O K	63,2
NaK	0,3
MgK	0
AlK	6,4
SiK	2,2
S K	6,4
K K	0
CaK	21,5
FeK	0
CaO/SiO ₂	6,4
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura (ampliação 197 X)

(b) percentual atômico

Figura 66 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

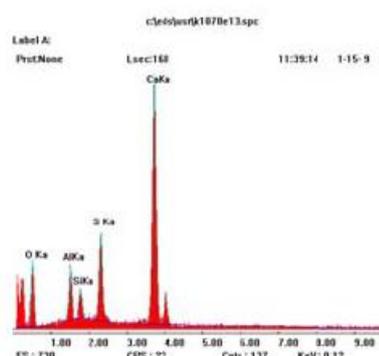
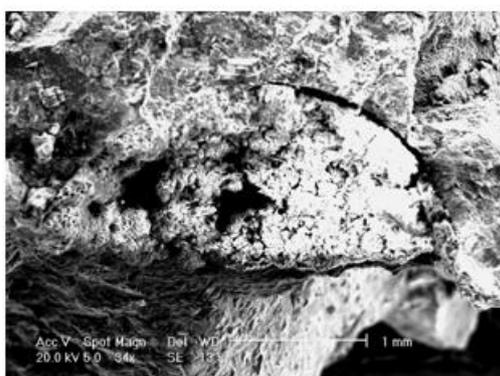


O K	48,0
NaK	2,4
MgK	0,7
AlK	5,5
SiK	36,2
S K	0
K K	1,0
CaK	5,3
FeK	0,9
CaO/SiO ₂	0,1
E _{BIV}	0,8

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, na interface agregado/pasta (ampliação 37 X)

(b) percentual atômico

Figura 67 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

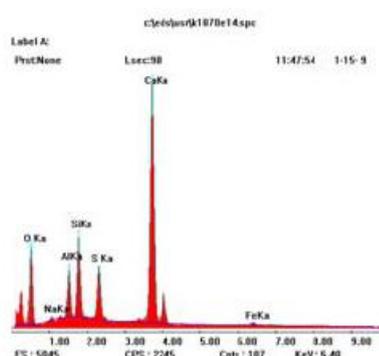
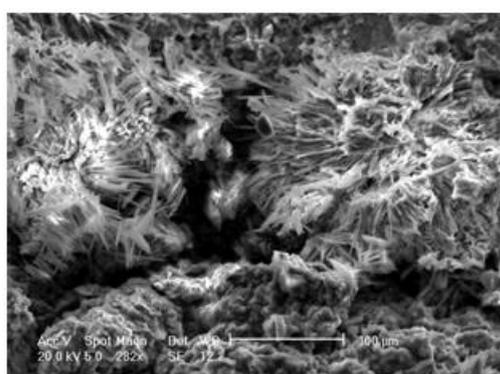


O K	58,4
NaK	0
MgK	0
AlK	5,9
SiK	2,8
S K	6,7
K K	0
CaK	26,2
FeK	0
CaO/SiO ₂	6,1
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, em vazio localizado na pasta (ampliação 34 X)

(b) percentual atômico

Figura 68 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

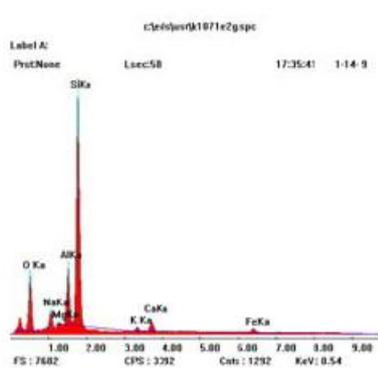
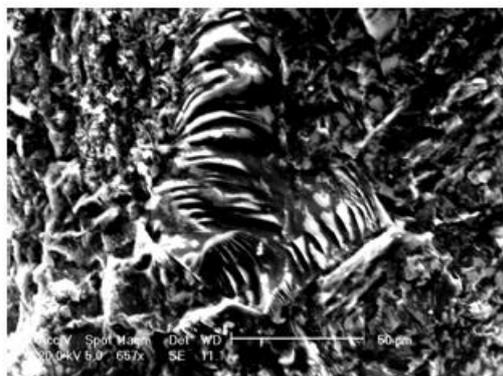


O K	59,4
NaK	0,9
MgK	0
AlK	5,1
SiK	6,8
S K	4,0
K K	0
CaK	23,3
FeK	0,7
CaO/SiO ₂	2,3
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura da pasta (ampliação 228 X)

(b) percentual atômico

Figura 69 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



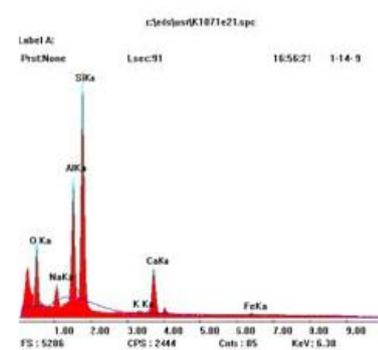
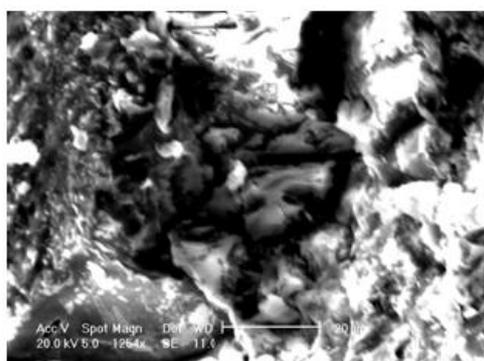
O K	45,3
NaK	6,5
MgK	0,9
AlK	9,1
SiK	34,4
S K	0
K K	0,6
CaK	1,7
FeK	1,5
CaO/SiO ₂	0,0
E _{BIV}	0,4

(a) imagem e espectro de superfície de fratura com agregado mostrando alteração superficial (ampliação 657 X)

(b) percentual atômico

Figura 70 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



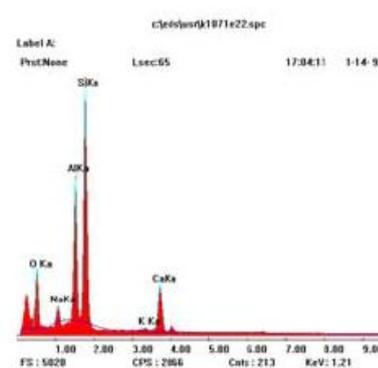
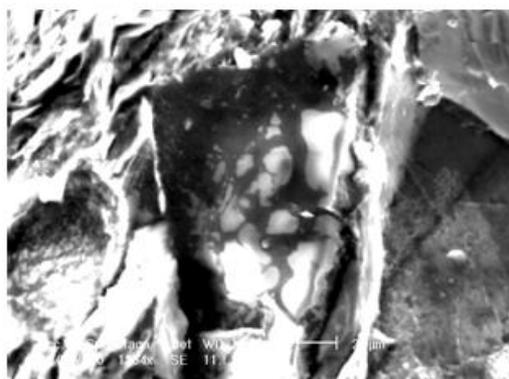
O K	46,2
NaK	4,7
MgK	0
AlK	14,5
SiK	27,2
S K	0
K K	0,3
CaK	6,6
FeK	0,6
CaO/SiO ₂	0,2
E _{BIV}	0,7

(a) imagem e espectro de superfície de fratura em poro contendo material no seu interior (ampliação 1254 X)

(b) percentual atômico

Figura 71 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



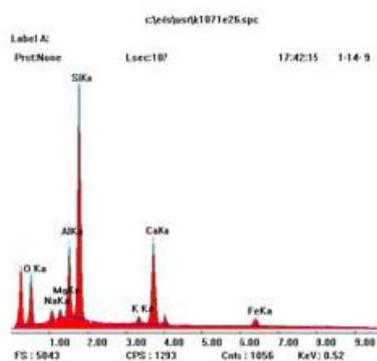
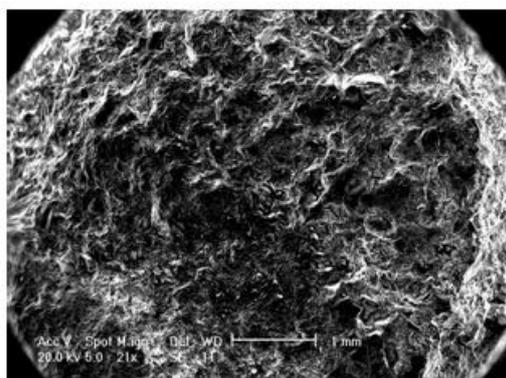
O K	43,6
NaK	4,7
MgK	0
AlK	16,1
SiK	28,8
S K	0
K K	0,4
CaK	6,5
FeK	0
CaO/SiO ₂	0,1
E _{BIV}	0,7

(a) imagem e espectro de superfície de fratura na interface entre um poro e agregado (ampliação 1254 X)

(b) percentual atômico

Figura 72 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

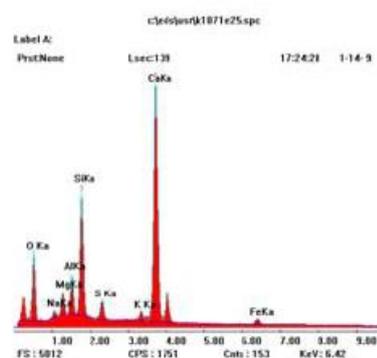
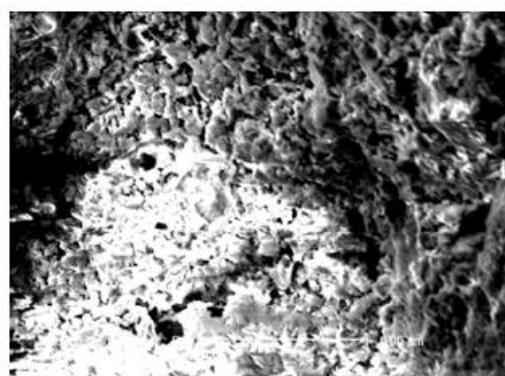


O K	42,2
NaK	3,6
MgK	1,7
AlK	9,5
SiK	28,4
S K	0
K K	1,0
CaK	11,4
FeK	2,2
CaO/SiO ₂	0,3
E _{BIV}	0,8

(a) imagem geral e espectro de superfície de fratura (ampliação 21 X)

(b) percentual atômico

Figura 73 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2)
 Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

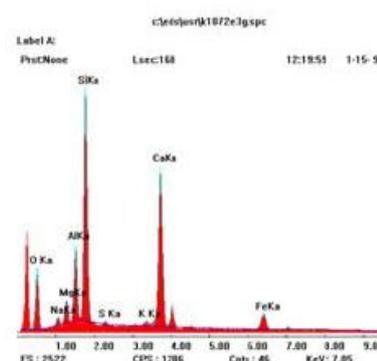
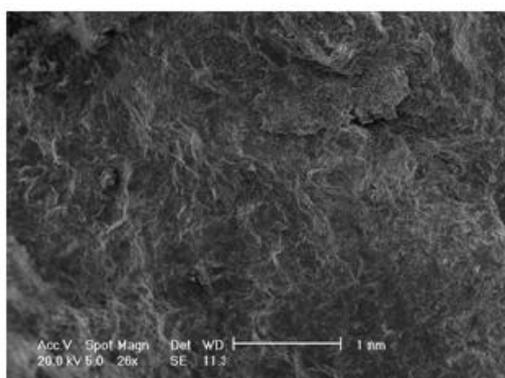


O K	52,5
NaK	2,1
MgK	3,7
AlK	4,2
SiK	10,4
S K	1,5
K K	0,8
CaK	23,5
FeK	1,2
CaO/SiO ₂	1,5
E _{BIV}	0,9

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, em poro preenchido (ampliação 330 X)

(b) percentual atômico

Figura 74 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E2)
 Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

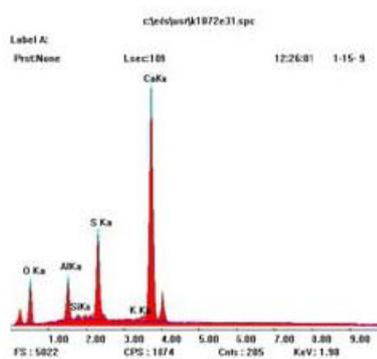
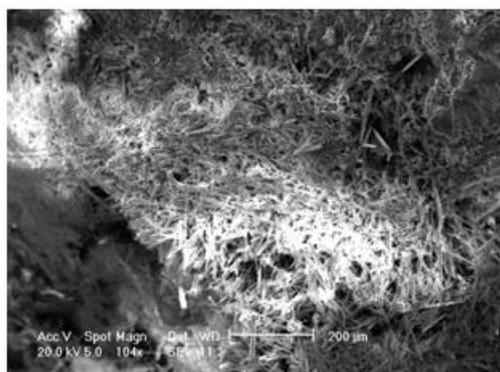


O K	42,7
NaK	2,2
MgK	3,6
AlK	8,2
SiK	22,4
S K	0,3
K K	0,5
CaK	16,8
FeK	3,3
CaO/SiO ₂	0,5
E _{BIV}	0,9

(a) imagem geral e espectro de superfície de fratura (ampliação 26 X)

(b) percentual atômico

Figura 75 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3)
 Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



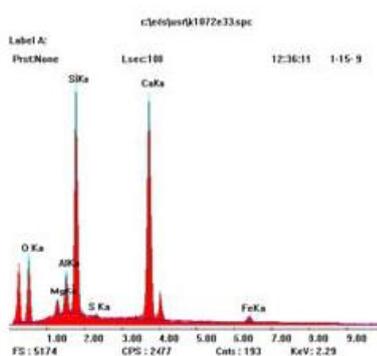
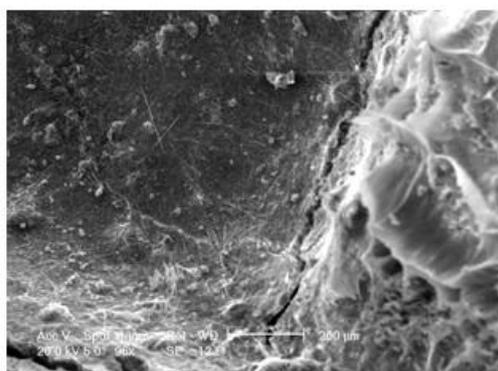
O K	53,351
NaK	0
MgK	0
AlK	6,149
SiK	0,570
S K	8,509
K K	0,376
CaK	31,045
FeK	0
CaO/SiO ₂	35,6
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura em poro preenchido (ampliação 104 X)

(b) percentual atômico

Figura 76 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



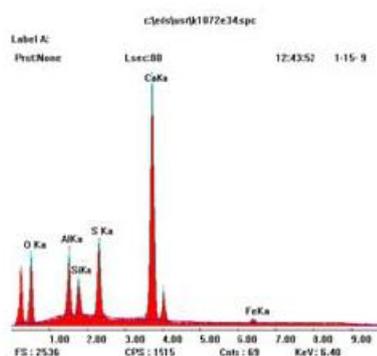
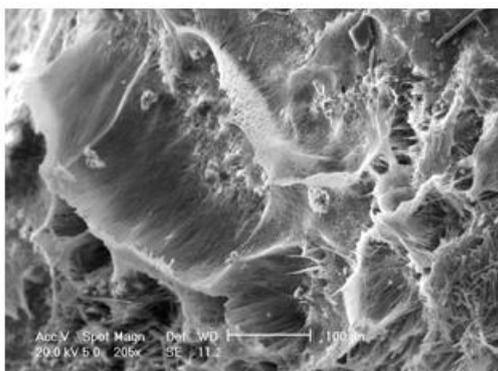
O K	49,8
NaK	0
MgK	2,4
AlK	4,3
SiK	19,3
S K	0,3
K K	0
CaK	22,5
FeK	1,4
CaO/SiO ₂	0,8
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, no interior de um poro (ampliação 96 X)

(b) percentual atômico

Figura 77 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



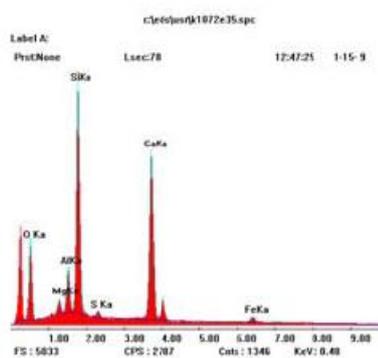
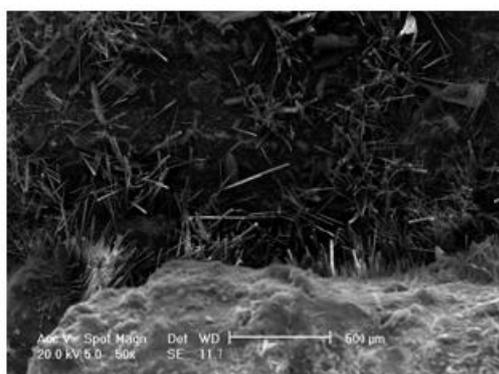
O K	58,0
NaK	0
MgK	0
AlK	6,9
SiK	3,4
S K	5,9
K K	0
CaK	25,0
FeK	0,9
CaO/SiO ₂	4,9
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura da interface do poro da Figura 74 (ampliação 205 X)

(b) percentual atômico

Figura 78 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



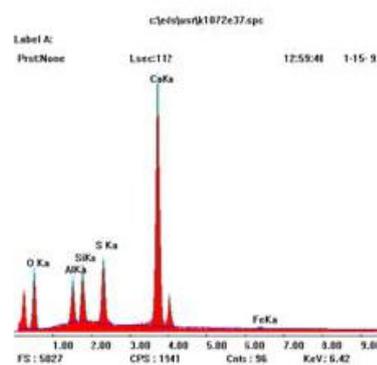
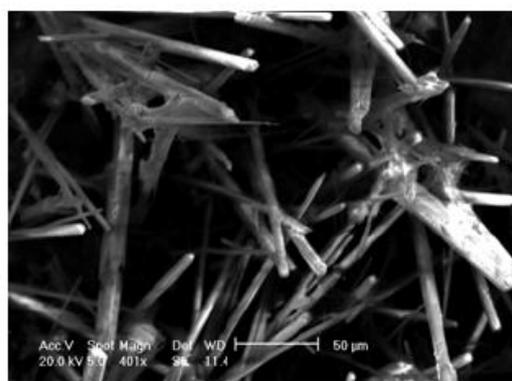
O K	54,6
NaK	0
MgK	2,0
AlK	4,7
SiK	19,6
S K	0,5
K K	0
CaK	17,2
FeK	1,3
CaO/SiO ₂	0,6
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, da interface poro/argamassa (ampliação 50 X)

(b) percentual atômico

Figura 79 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



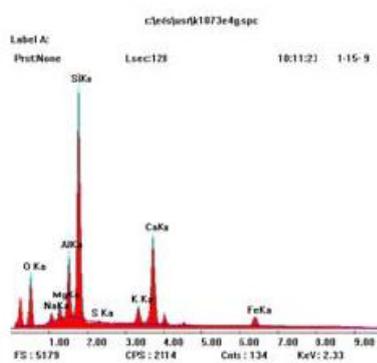
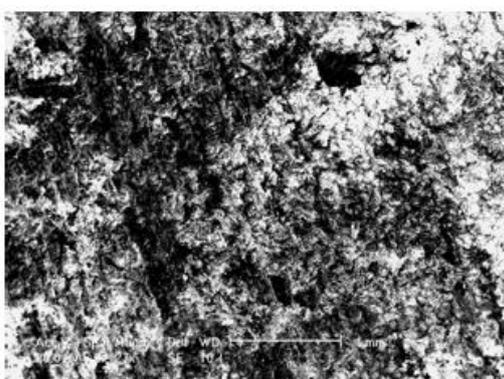
O K	56,4
NaK	0
MgK	0
AlK	5,2
SiK	5,0
S K	5,3
K K	0
CaK	27,6
FeK	0,5
CaO/SiO ₂	3,6
E _{BIV}	1,0

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, região cristalizada mostrada na Figura 76 (ampliação 401 X)

(b) percentual atômico

Figura 80 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



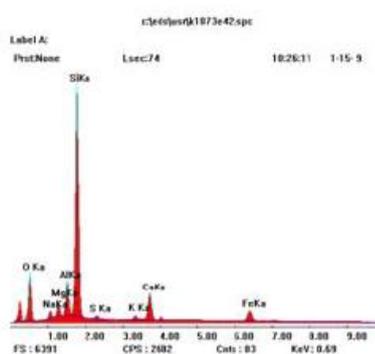
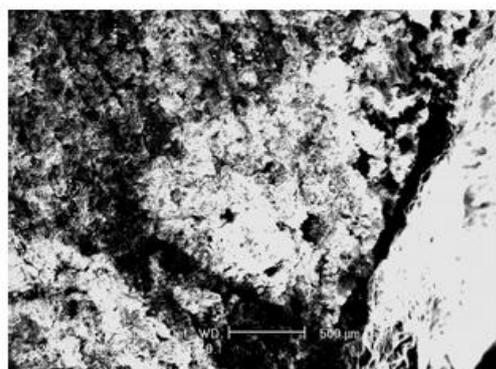
O K	42,8
NaK	3,0
MgK	2,3
AlK	8,2
SiK	26,9
S K	0,2
K K	2,1
CaK	12,0
FeK	2,5
CaO/SiO ₂	0,3
E _{BIV}	0,8

(a) imagem geral e espectro de superfície de fratura (ampliação 401 X)

(b) percentual atômico

Figura 81 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



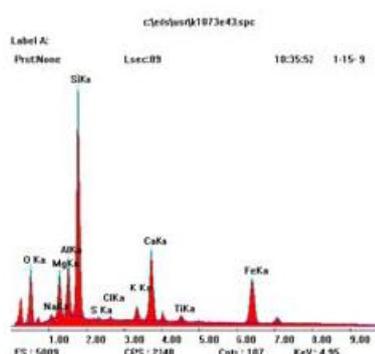
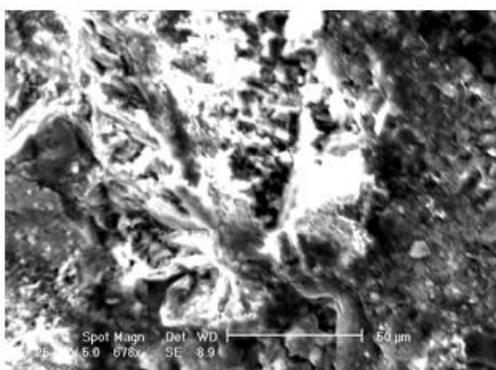
O K	42,364
NaK	3,504
MgK	3,118
AlK	6,019
SiK	34,827
S K	0,636
K K	0,805
CaK	4,872
FeK	3,855
CaO/SiO ₂	0,1
E _{BIV}	0,8

(a) imagem geral e espectro de superfície de fratura (ampliação 500 X)

(b) percentual atômico

Figura 82 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



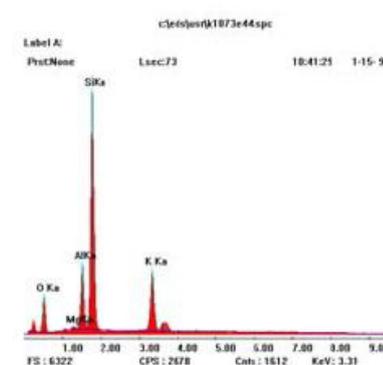
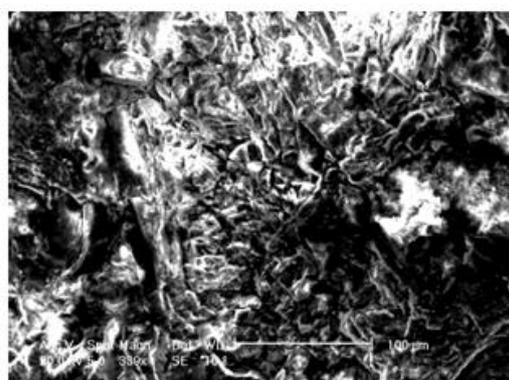
O K	34,9
NaK	2,0
MgK	8,5
AlK	7,3
SiK	25,7
S K	0,3
K K	1,5
CaK	8,1
FeK	10,3
Cl K	0,4
CaO/SiO ₂	0,2
E _{BIV}	0,9

(a) imagem geral e espectro de superfície de fratura (ampliação 678 X)

(b) percentual atômico

Figura 83 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



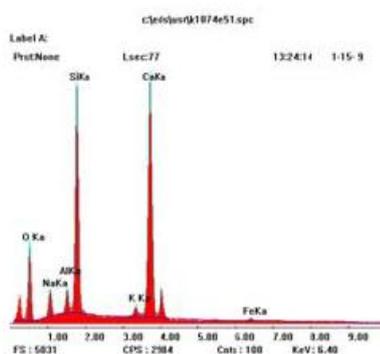
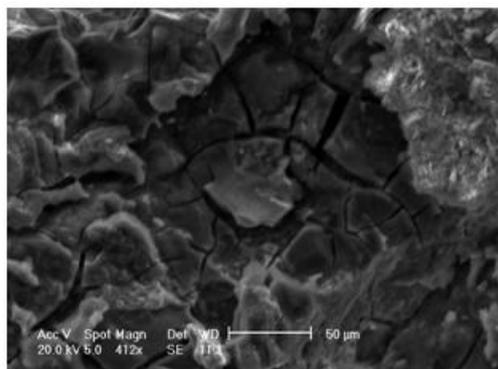
O K	42,1
NaK	0
MgK	0,9
AlK	9,9
SiK	36,3
S K	0
K K	10,7
CaK	0
FeK	0
CaO/SiO ₂	0
E _{BIV}	0,2

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, região da argamassa (ampliação 339 X)

(b) percentual atômico

Figura 84 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

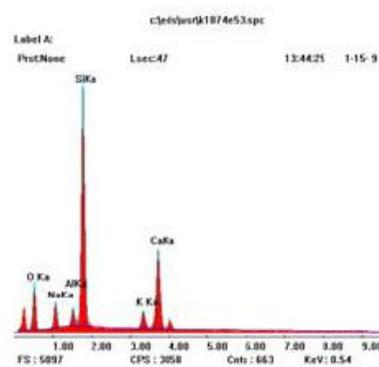
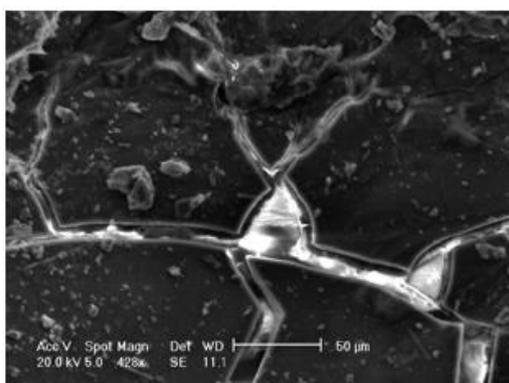


O K	51,002
NaK	6,974
MgK	0
AlK	2,301
SiK	17,119
S K	0
K K	0,789
CaK	21,264
FeK	0,550
CaO/SiO ₂	0,8
E _{BIV}	0,8

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, região da argamassa (ampliação 412 X)

(b) percentual atômico

Figura 85 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E5)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

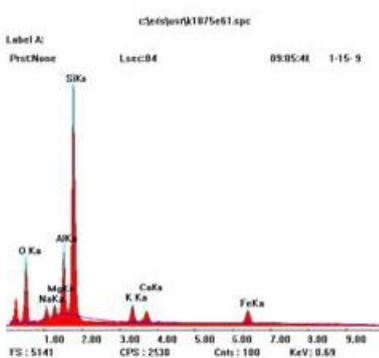
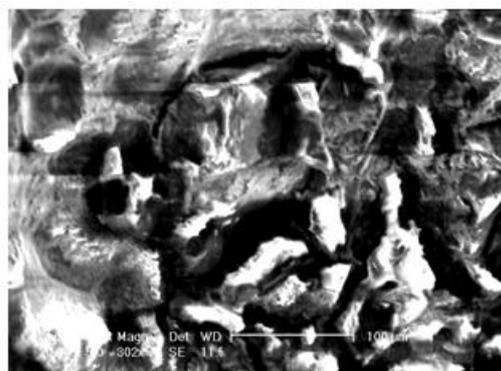


O K	44,8
NaK	9,4
MgK	0
AlK	2,6
SiK	28,6
S K	0
K K	2,3
CaK	12,2
FeK	0
CaO/SiO ₂	0,3
E _{BIV}	0,6

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, região da argamassa (ampliação 412 X)

(b) percentual atômico

Figura 86 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E5)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

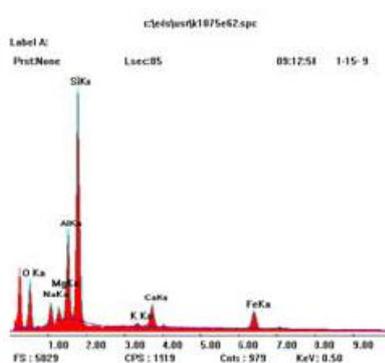
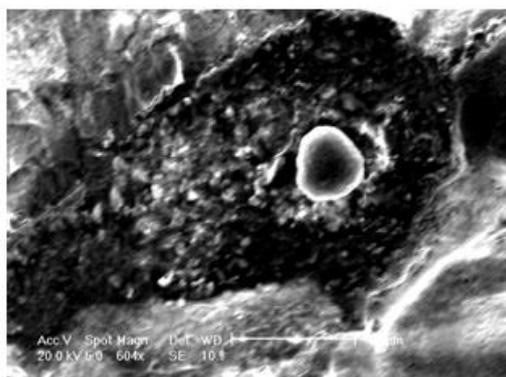


O K	44,5
NaK	4,4
MgK	2,3
AlK	9,4
SiK	31,5
S K	0
K K	2,4
CaK	1,7
FeK	3,8
CaO/SiO ₂	0
E _{BIV}	0,6

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, região da argamassa (ampliação 302 X)

(b) percentual atômico

Figura 87 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E6)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



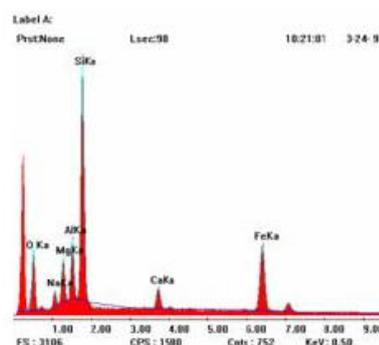
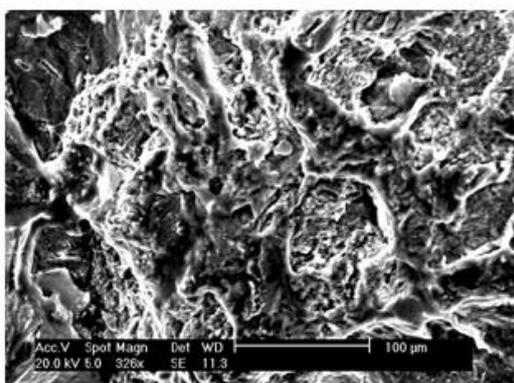
Percentual atômico

O K	34,6
NaK	7,2
MgK	2,4
AlK	13,1
SiK	33,7
S K	0
K K	0,6
CaK	3,3
FeK	5,2
CaO/SiO ₂	0,1
E _{BIV}	0,6

(a) imagem e espectro de superfície de fratura, região da argamassa (ampliação 604 X)

(b) percentual atômico

Figura 88 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E6)
 Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

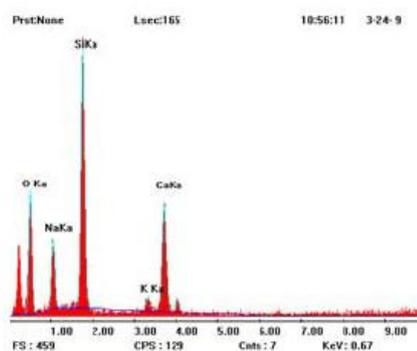
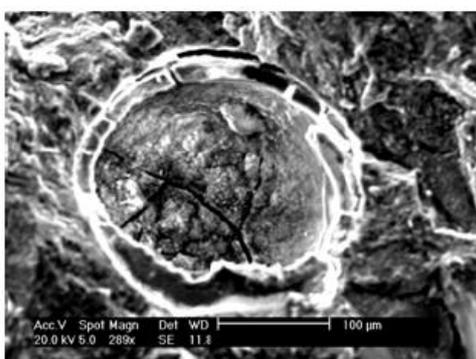


O K	29,6
NaK	5,7
MgK	9,4
AlK	8,6
SiK	28,8
S K	0
K K	0
CaK	2,6
FeK	15,3
CaO/SiO ₂	0,1
E _{BIV}	0,8

(a) imagem e espectro de superfície de fratura (ampliação 326 X)

(b) percentual atômico

Figura 89 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E1 após ensaio acelerado)
 Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



O K	55,1
NaK	15,8
MgK	0
AlK	0
SiK	18,5
S K	0
K K	1,1
CaK	9,5
FeK	0
CaO/SiO ₂	0,3
E _{BIV}	0,5

(a) imagem e espectro de superfície de fratura (ampliação 289 X)

(b) percentual atômico

Figura 90 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E3 após ensaio acelerado)
 Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

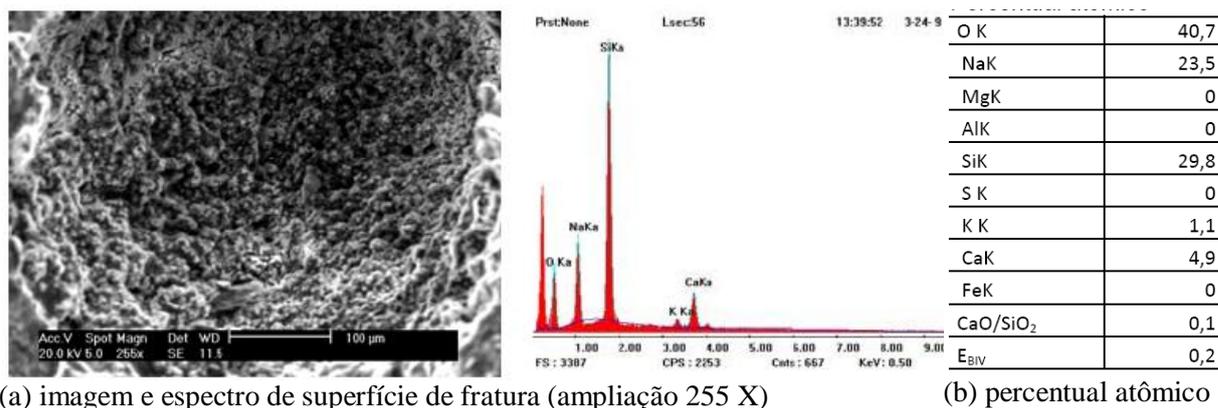


Figura 91 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E4 após ensaio acelerado)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

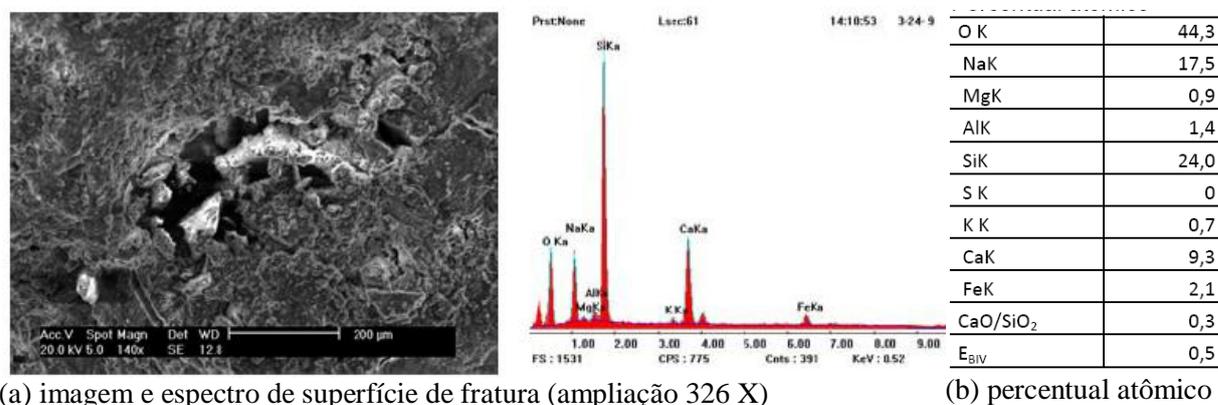


Figura 92 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E5 após ensaio acelerado)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

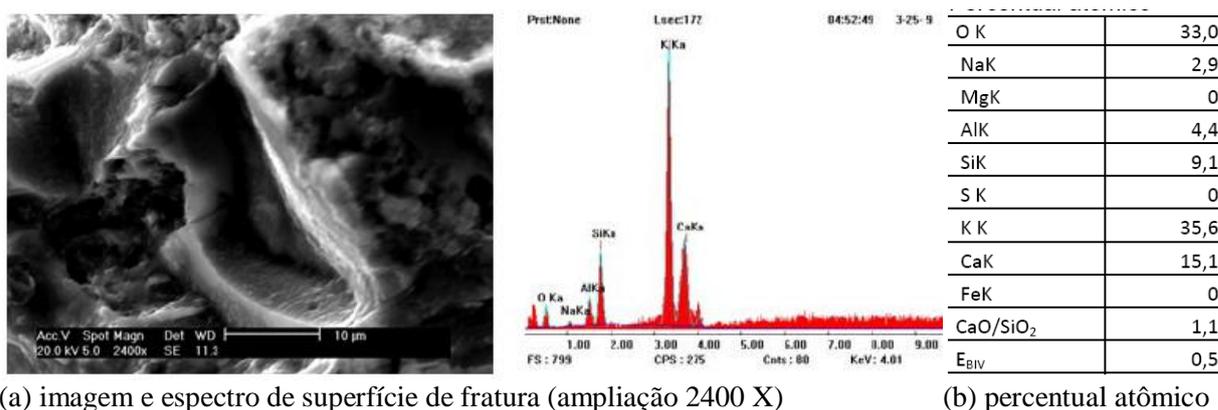
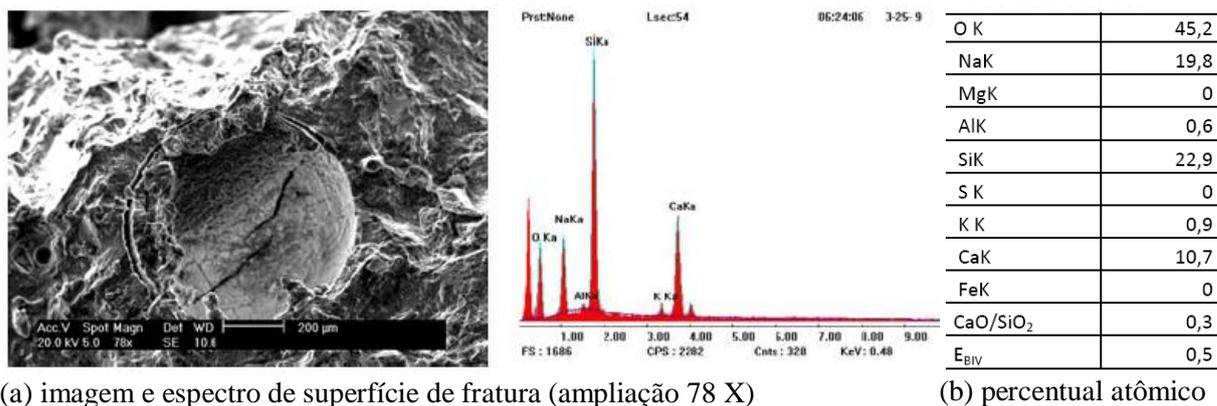


Figura 93 - Micrografia e espectro (amostra de concreto do local E6 após ensaio acelerado)
Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

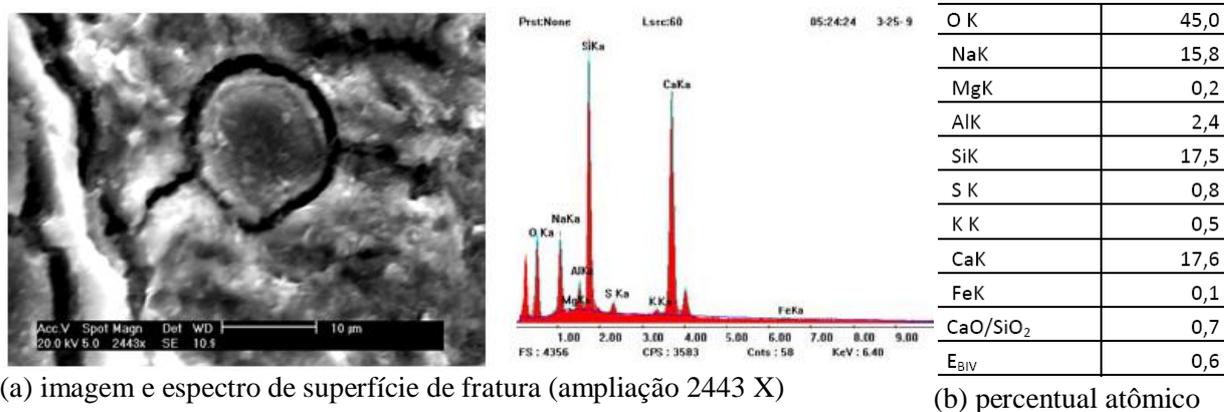


(a) imagem e espectro de superfície de fratura (ampliação 78 X)

(b) percentual atômico

Figura 94 - Micrografia e espectro (amostra de argamassa com agregados da jazida)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)



(a) imagem e espectro de superfície de fratura (ampliação 2443 X)

(b) percentual atômico

Figura 95 - Micrografia e espectro (amostra de argamassa com agregado da jazida)

Fonte: Adaptado LACTEC (2009c)

No Quadro 10 são apresentadas as classificações dos materiais observados nas micrografias e espectros, conforme os parâmetros descritos no item 6.2.2.

ORIGEM (Local)	SITUAÇÃO (Ensaio Acelerado)	FIGURA	Ca/Si ₂	E _{BIV}	CLASSIFICAÇÃO PROVÁVEL DOS PRODUTOS
CP Concreto (E1)	Não	65	0,8	0,9	Gel RAA
CP Concreto (E1)	Não	66	6,4	1,0	Etringita
CP Concreto (E1)	Não	67	0,1	0,8	Gel RAA
CP Concreto (E1)	Não	68	6,1	1	Etringita
CP Concreto (E1)	Não	69	2,3	1,0	Etringita/C-S-H
CP Concreto (E2)	Não	70	0,0	0,4	Gel RAA
CP Concreto (E2)	Não	71	0,2	0,7	Gel RAA
CP Concreto (E2)	Não	72	0,1	0,7	Gel RAA
CP Concreto (E2)	Não	73	0,3	0,8	Gel RAA
CP Concreto (E2)	Não	74	1,5	0,9	Gel RAA/Etringita
CP Concreto (E3)	Não	75	0,5	0,9	Gel RAA

ORIGEM (Local)	SITUAÇÃO (Ensaio Acelerado)	FIGURA	Ca/Si ₂	E _{BIV}	CLASSIFICAÇÃO PROVÁVEL DOS PRODUTOS
CP Concreto (E3)	Não	76	35,6	1,0	Etringita
CP Concreto (E3)	Não	77	0,8	1,0	Fase Sulfoaluminato
CP Concreto (E3)	Não	78	4,9	1,0	Fase Sulfoaluminato
CP Concreto (E3)	Não	79	0,6	1,0	Etringita junto à pasta de cimento
CP Concreto (E3)	Não	80	3,6	1,0	Etringita
CP Concreto (E4)	Não	81	0,3	0,8	Gel RAA
CP Concreto (E4)	Não	82	0,1	0,8	Gel RAA
CP Concreto (E4)	Não	83	0,2	0,9	Gel RAA
CP Concreto (E4)	Não	84	0	0,2	Gel RAA
CP Concreto (E5)	Não	85	0,8	0,8	Gel RAA
CP Concreto (E5)	Não	86	0,3	0,6	Gel RAA
CP Concreto (E6)	Não	87	0	0,6	Gel RAA
CP Concreto (E6)	Não	88	0,1	0,6	Gel RAA
CP Concreto (E1)	Sim	89	0,1	0,8	Gel RAA
CP Concreto (E3)	Sim	90	0,3	0,5	Gel RAA
CP Concreto (E4)	Sim	91	0,1	0,2	Gel RAA
CP Concreto (E5)	Sim	92	0,3	0,5	Gel RAA sobre agregado
CP Concreto (E6)	Sim	93	1,1	0,5	Gel RAA
Barra Argamassa. (Jazida)	Sim	94	0,3	0,5	Gel RAA
Barra Argamassa. (Jazida)	Sim	95	0,7	0,6	Gel RAA

Quadro 10 - Classificação dos materiais observados nas micrografias e espectros

Nota-se a presença de gel devido à RAA em todos os locais analisados (E1 a E6), confirmando a generalização da reação por toda a estrutura da barragem. Quanto às amostras de concreto analisadas após o ensaio acelerado, observa-se para os géis devidos à RAA, uma ligeira redução da relação média Ca/Si₂ (0,25 para 0,20) e taxa E_{BIV} (0,70 para 0,5), isso pode significar o aumento da capacidade de expansão dos géis depois de submetidos à solução de hidróxido de sódio.

Nas amostras das barras de argamassa confeccionadas com agregados da pedreira desativada (Figuras 94 e 95), nota-se a presença de gel de RAA, corroborando com os resultados observados nas amostras de concreto.

Observa-se também a presença de etringita em várias amostras, principalmente naquelas dos locais E1 e E3. No entanto, após o ensaio acelerado nenhuma etringita foi identificada, este fenômeno provavelmente se deve a instabilidade desta fase em altas

temperaturas. Segundo Metha e Monteiro (2008), a etringita não é uma fase estável acima de 65 °C, decompondo-se para formação de monossulfato hidratado.

Nas Figuras 77 e 78, percebe-se uma fase sulfoaluminato, provavelmente em decorrência de instabilidade na formação da fase etringita.

6.5 ENSAIOS MECÂNICOS

A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração, bem como do módulo de elasticidade. Os resultados completos do módulo de elasticidade estão apresentados no Anexo 3.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios mecânicos dos testemunhos de concreto extraídos da barragem

ORIGEM (Local)	Resistência à compressão (f_c) (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo estático de deformação		
			Resistência à compressão (f_{cef}) (MPa)	Módulo de deformação secante ($0,4 f_c$) (GPa)	Diferença entre f_c e f_{cef} (%)
E1	33,20	1,35	15,90	22,70	52,11
E2	61,60	6,15	75,90	38,60	23,21
E3	81,10	5,15	81,10	34,20	0,00
E4	62,10	6,30	59,70	41,50	3,86
E5	8,02	4,70	34,10	39,40	325,19
E6	31,20	4,60	42,70	32,60	36,86
Média	46,20	4,71	51,57	34,83	
DP	26,68	1,79	25,24	6,81	
CV (%)	57,75	38,11	48,95	19,56	

(DP) Desvio Padrão; (CV) Coeficiente de Variação.

Fonte: Adaptado LACTEC (2009d)

Nota-se que a resistência à compressão apresenta o maior coeficiente de variação, o menor valor (8,02 MPa) chega a um décimo do maior valor (81,10 MPa) de resistência. Os resultados de resistência á compressão obtidos pelo ensaio de módulo, também apresentam um valor elevado de coeficiente de variação.

Um fato a ser observado, é o ganho de resistência à compressão alcançado pelo concreto da barragem após 78 anos, de acordo com Fry (1931), o concreto ensaiado atingiu resistência de 13,8 MPa aos 28 dias.

Segundo resultados obtidos por Hasparyk (2005), a RAA pode afetar a resistência à compressão de duas formas, em um primeiro estágio os produtos da reação preenchem os vazios provocando um ganho de resistência, a partir de um determinado ponto, quando o nível de fissuração é intenso, pode refletir na queda da resistência.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral, apresentam valores entre 1,35 e 6,40 MPa, resultando em coeficiente de variação de 38,11 %. Observa-se também, que os valores se apresentam na faixa de 4 a 58 % da resistência à compressão. Segundo Rasparyk (2005), esta propriedade também é afetada pela RAA na mesma proporção que a resistência à compressão, conforme o estágio que se encontra a reação.

Os resultados do módulo de elasticidade apresentaram menor dispersão quando comparados com os demais, porém segundo a norma NBR 8522 (ABNT, 2008), a resistência à compressão obtida pelo ensaio de módulo (f_{cef}) não deve diferir em mais de 20% da resistência à compressão (f_c) para validade do ensaio.

Cabe ressaltar, que o módulo de elasticidade possui comportamento diferenciado da resistência à compressão em relação à RAA, apresentando reflexos negativos de forma antecipada e expressiva, conforme descrito por Rasparyk (2005).

Com base no exposto, percebe-se uma grande dispersão dos valores de resistência e módulo de elasticidade, apresentado descorrelação do comportamento dessas propriedades quando comparadas. Acredita-se que quatro fatores tenham influenciado estes resultados:

- a) falta de controle na confecção e lançamento do concreto: muitos testemunhos extraídos apresentaram vazios devido ao adensamento inadequado, principalmente os testemunhos do local E1;
- b) influência da reação álcali-agregado em estágios de deterioração diferentes;
- c) degradação devido à hidrólise e lixiviação: os testemunhos do local E5 apresentaram muitos vazios devido a lixiviação por percolação de água;
- d) danos causado aos testemunhos devido ao procedimento de extração.

6.6 ENSAIOS DE ULTRASSOM

Nas Tabelas 11 e 12 são apresentados os resultados referentes às velocidades de propagação de ondas ultra-sônicas, medidas respectivamente na estrutura da barragem e nos testemunhos de concreto.

Na Tabela 11, notam-se diferenças das velocidades conforme o local do ensaio, com destaque para o local E1, o qual apresenta velocidade bem inferior aos demais. Estas diferenças devem-se provavelmente a heterogeneidade do concreto em função de defeitos internos, como vazios, fissuras e umidade.

É importante salientar, que o método de medição indireto utilizado para a maioria dos locais, abrange somente a região superficial do maciço. Isso significa que os resultados apresentados correspondem apenas à superfície dos locais avaliados.

Tabela 11 - Velocidade de pulso ultra-sônico na barragem

Locais das Medições		Tipo de Medição	Velocidade Média (m/s)	Variável Reduzida (Z)
Face de jusante - ombreira direita (coincidente com E1)		Indireta	3680,00	2,54
Galeria de drenagem - lado esquerdo (coincidente com E2)	Parede de jusante	Indireta	4883,10	0,06
	Parede de montante		5060,30	0,44
Galeria de drenagem - acesso (coincidente com E3)	Parede de montante	Indireta	4886,70	0,06
Galeria de drenagem - lado direito (coincidente com E4)	Parede de jusante	Indireta	5312,50	0,98
	Parede de montante		4996,60	0,30
Galeria de drenagem - lado direito (coincidente com E6)	Parede de jusante	Indireta	5050,60	0,42
	Parede de montante		4843,20	0,03
Crista - ombreira esquerda		Direta	4998,20	0,31
Média			4856,80	
DP			462,71	
CV(%)			9,53	

(DP) desvio padrão; (CV) coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado LACTEC (2009e)

Tabela 12 - Velocidade de pulso ultra-sônico nos testemunhos extraídos da barragem

Origem (CP's)	Velocidade Média (m/s)	Variável Reduzida
E1	4940,00	1,90
E2	5320,00	0,11
E3	5400,00	0,53
E4	5490,00	1,00
E5	5360,00	0,32
E6	5290,00	0,05
Média	5300,00	
DP	189,63	
CV (%)	3,58	

(DP) desvio padrão;

(CV) coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado LACTEC (2009d)

Já na Tabela 12, observam-se velocidades mais uniformes, conforme demonstra a análise do coeficiente de variação. Analisando a variável reduzida e a média, observa-se apenas um valor disperso, o qual corresponde ao testemunho extraído do local E1.

As velocidades de propagação inferiores correspondentes ao local E1 e testemunho E1, provavelmente ocorreram devido à maior quantidade de vazios, os quais foram observados nos testemunhos extraídos (Figura 40 a).

Comparando os resultados obtidos pelos dois métodos, medição indireta e direta, percebe-se que não há uma tendência estabelecida. Isso provavelmente se deve a heterogeneidade do concreto da barragem. Verifica-se também que há diferenças entre os dois métodos utilizados, as velocidades obtidas através do método indireto são sempre inferiores ao do método direto. Estudos realizados por Hasparyk (2005), em concretos afetados pela RAA, também mostram este comportamento entre estes dois tipos de método de medição.

De acordo com os resultados obtidos por Rasparyk (2005), em função da microfissuração gerada pela RAA, a velocidade ultra-sônica em concretos que se apresentam mais deteriorados é menor do que em concretos bons. Entretanto, em decorrência da falta de correlação entre os dados obtidos e à ausência de valores de referência para o concreto da barragem, não foi possível verificar o efeito da RAA nas velocidades ultra-sônicas.

6.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Na Tabela 13 e no Gráfico 11, são apresentados os resultados de absorção e índice de vazios

Tabela 13 - Absorção de água e índice de vazios

Origem (CP's)	Absorção		Índice de Vazios	
	Após Saturação (%)	Após Saturação e Fervura (%)	Após Saturação (%)	Após Saturação e Fervura (%)
E1	6,94	8,13	15,45	18,05
E2	3,6	3,65	8,86	8,99
E3	6,21	6,86	14,29	15,71
E4	5,62	5,9	13,23	13,84
E5	6,16	6,71	14,35	15,58
E6	5,83	6,27	13,64	14,67
Média	5,73	6,25	13,30	14,47
Desvio Padrão	1,13	1,48	2,30	3,03
CV	19,82	23,73	17,32	20,97

(DP) desvio padrão; (CV) coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado LACTEC (2009d)

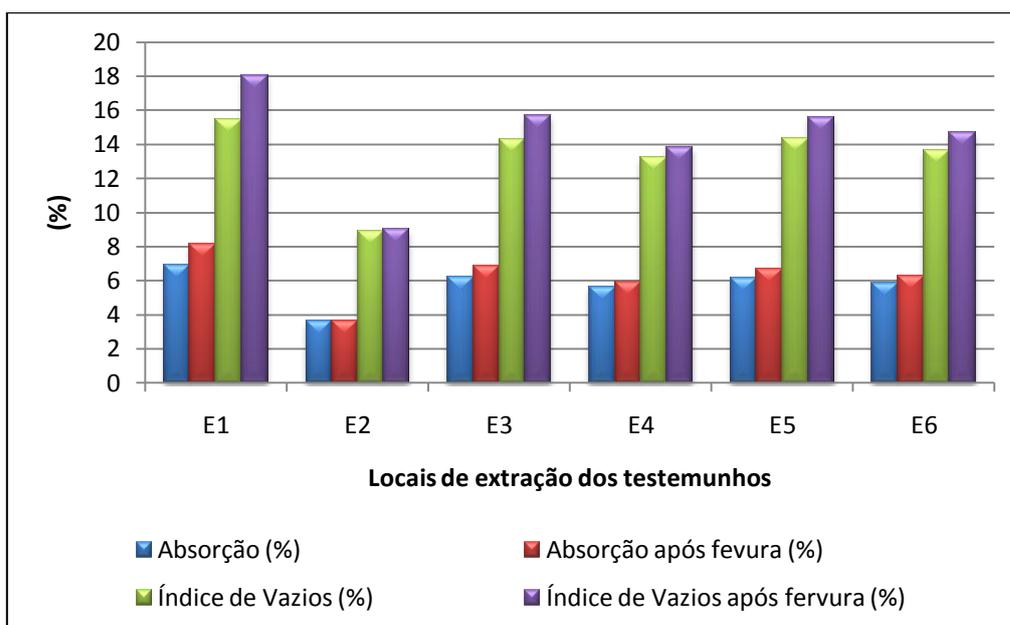


Gráfico 11 - Absorção de água e índice de vazios

Nota-se quanto ao procedimento de fervura, que as amostras obtiveram um ligeiro aumento em relação às amostras apenas saturadas, refletindo também no aumento do coeficiente de variação (CV).

Observa-se que a amostra E1 apresenta a maior absorção em relação às demais, com um valor de 8,3%. Já a amostra E2 apresenta o menor valor de absorção,

com um valor de 3,65 %. Estas observações podem ser verificadas pela análise da variável reduzida (Z) na Tabela 14, cujas amostras E1 e E2 apresentam as maiores dispersões.

Tabela 14 - Variável reduzida (Z) da absorção e índice de vazios das amostras E1 a E6

Origem (CP's)	[Absorção] Após Saturação	[Absorção] Após Saturação e Fervura	[Índice de Vazios] Após Saturação	[Índice de Vazios] Após Saturação e Fervura
E1	1,07	1,27	0,93	1,18
E2	1,87	1,76	1,93	1,81
E3	0,43	0,41	0,43	0,41
E4	0,09	0,24	0,03	0,21
E5	0,38	0,31	0,45	0,36
E6	0,09	0,01	0,15	0,06

Verifica-se também, uma grande dispersão dos valores de absorção e índice de vazios, isso pode ser confirmado pela análise do coeficiente de variação, que apresenta valores elevados. O provável motivo para estes resultados se deve a heterogeneidade da porosidade do concreto da barragem.

6.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS

As análises petrográficas indicaram semelhança, entre os agregados provenientes da pedra desativada e os agregados do concreto da barragem. Como também, demonstraram que ambos agregados são potencialmente reativos, contendo mais de 5 % de quartzo deformado.

As análises da água do reservatório e da água percolada pela barragem mostraram a ocorrência de lixiviação por hidrólise dos compostos do concreto. Além disso, indicaram que o concreto ainda possui íons alcalinos disponíveis para continuidade do processo de reação álcali-agregado (RAA).

O material exsudado na superfície do concreto, de acordo com os parâmetros de análise, foi classificado como gel proveniente de reação álcali-agregado, corroborando com os indícios de RAA e com os resultados das análises petrográficas.

Os resultados dos ensaios acelerados de expansão confirmaram os resultados das análises petrográficas, classificando os agregados da pedreira desativada e da barragem como potencialmente reativas. A comparação entre os resultados demonstrou que os agregados da barragem ainda têm 60 % de potencial reativo álcali-agregado.

As análises das micrografias e espectros corroboram com os resultados das análises petrográficas e ensaios acelerados de expansão, bem como a análise do gel exsudado na superfície do concreto. Os produtos observados foram em sua maioria classificados como gel proveniente da RAA. Observou-se também, o aumento na capacidade de expansão dos géis após o ensaio acelerado dos testemunhos de concreto da barragem.

Os resultados dos ensaios mecânicos apresentaram grandes dispersões, com coeficientes de variações de 19,56 % para o módulo de elasticidade, de 38,11 % para resistência à tração e 57,75 % para a resistência à compressão. Estes resultados não apresentaram correlação entre as propriedades do concreto e prejudicaram a verificação dos efeitos da RAA.

Os resultados dos ensaios de ultrassom, exceto para o local E1, não corroboram com os resultados dos ensaios mecânicos, apresentado desconexão dos valores quando comparados.

Os resultados do ensaio de absorção e índice de vazios (porosidade), exceto para o local E1, também não corroboram com os resultados dos ensaios mecânicos. Os valores quando comparados não apresentam correlação adequada da porosidade verso resistência. Segundo Mehta e Monteiro (2008), há uma relação inversa entre

porosidade e resistência nos sólidos, pois a resistência se encontra na parte sólida de um material, assim os vazios são prejudiciais à resistência. Além disso, de acordo com os resultados obtidos por Hasparyk (2005), a RAA pode reduzir a porosidade do concreto pela colmatação dos poros com produtos da reação e conseqüentemente, aumentar a resistência à compressão.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou analisar o potencial reativo álcali-agregado residual dos agregados constituintes do concreto da barragem de Salto do Meio da UHE de Chaminé. Buscou-se também avaliar o estado global do concreto da estrutura, a interação entre as manifestações patológicas e a eficiência da metodologia empregada.

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas por meio das análises dos resultados dos ensaios, como também as sugestões para trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

Os resultados não são extrapolados devendo se restringir a esta pesquisa, porém a metodologia empregada mostrou resultados importantes e deveria ser aplicada em outras pesquisas para balizamento.

As análises individuais e comparativas realizadas nesta pesquisa permitiram listar as seguintes conclusões:

- a) as análises petrográficas comprovaram que os agregados da pedreira desativada são semelhantes aos agregados do concreto da barragem, ou seja, as rochas desta pedreira foram utilizadas na época da construção para produção dos agregados da barragem. Também demonstraram que este material é potencialmente reativo, apresentando mais de 5 % de quartzo deformado;
- b) as expansões medidas no ensaio acelerado confirmaram o potencial reativo dos agregados, bem como demonstraram que os agregados do concreto da barragem possuem potencial reativo álcali-agregado residual de 60 %;

- c) as análises das micrografias e espectros corroboraram com os resultados obtidos pelas análises petrográficas e ensaio acelerado. Detectou-se a presença de gel de reação álcali-agregado (RAA) em todos os testemunhos analisados, evidenciando a generalização do processo de RAA no concreto da barragem. O gel exsudado na superfície do concreto também foi classificado como sendo produto de RAA. Além disso, foi detectada a presença de etringita, que deve ser investigada oportunamente;
- d) o ensaio acelerado com testemunhos não apresentou expansões detectáveis até 30 dias. Este resultado pode não ser significativo devido aos fatores: porosidade elevada, pequena área específica e forma dos agregados, dimensões dos testemunhos e dificuldade na medição das expansões. Esta proposta de ensaio deve ser calibrada;
- e) a análise físico-química da água demonstrou intenso processo de deterioração do concreto pela ação da hidrólise e lixiviação, como também, evidenciou a disponibilidade de íons alcalinos para o processo de reação álcali-agregado;
- e) os ensaios mecânicos mostraram grande dispersão dos resultados, principalmente o ensaio de resistência à compressão, apresentado coeficiente de variação de 57,75 %. Provavelmente quatro fatores influenciaram estes resultados: falta de controle na confecção e lançamento do concreto; influência da reação álcali-agregado em estágios de deterioração diferentes; degradação devido à hidrólise e lixiviação; e danos causados aos testemunhos devido ao procedimento de extração. Apesar dos resultados dispersos, o concreto apresentou elevada resistência média;
- f) os resultados dos ensaios de ultrassom demonstraram heterogeneidade do concreto da barragem;

- g) os resultados dos ensaios de absorção apresentaram coeficiente de variação de 23,73 %, demonstrando variação da porosidade do concreto.

A metodologia empregada se mostrou relevante para a pesquisa em questão, principalmente para análise do potencial reativo álcali-agregado residual. Os resultados dos ensaios petrográficos e das expansões de barras, bem como das micrografias e espectros, obtiveram qualitativamente boa correlação e demonstraram consistência. Já os resultados dos ensaios mecânicos, de ultrassom e absorção, quando analisados se mostraram dispersos, impossibilitando o estabelecimento de correlações entre eles. Contudo, quando analisados individualmente, estes resultados foram importantes para avaliação do estado global do concreto da barragem.

Apesar da reação álcali-agregado, o concreto da barragem apresentou resistência mecânica adequada ao tipo de estrutura. Entretanto, devido à possibilidade de RAA residual, às análises laboratoriais e inspeções deverão ser intensificadas, visando à verificação da evolução do processo de reação deletéria, bem como da necessidade de eventuais intervenções.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listadas sugestões para trabalhos futuros visando dar continuidade a presente pesquisa:

- a) executar a metodologia apresentada nesta pesquisa em outras estruturas de concreto afetadas pela reação álcali-agregado, visando o balizamento;
- b) executar a metodologia apresentada nesta pesquisa, porém complementando com o método de ensaio de prismas de concreto;

- c) realizar o ensaio acelerado em testemunho de concreto por um período de seis meses a um ano, desenvolvendo um método adequado de medição das expansões.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C - 1260**: standard test method for potential alkali reactivity of aggregates – mortar-bar method. Philadelphia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C - 150**: standard specification for Portland cement. West Conshohocken, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C - 227**: standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method). Philadelphia, 2005.

ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na Região Metropolitana do Recife. Disponível em: [http://pcc2526.pcc.usp.br/Arquivos/2007/Aulas/07.03.28 Aula5 \(2\). pdf](http://pcc2526.pcc.usp.br/Arquivos/2007/Aulas/07.03.28 Aula5 (2). pdf). Acessado em: 15 out. 2008, às 20:35 h.

ANDRIOLO, F.R. AAR Dams Affected in Brazil - Report on the Current Situation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 1243-1252.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15577**: agregados – reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222**: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7389**: apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522**: concreto – determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802**: concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9773**: agregado: reatividade potencial de álcalis em combinações cimento agregado. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

BICZOK, I.; ASENSI, J. D. **Corrosión y protección del hormigón**. Bilbao: Urmo S.A. de Ediciones, 1981.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Bulletin 79 - alkali-aggregate reaction in concrete dams – review and recommendations**. Paris: 1991.

CASTRO, C. H.; SANTOS, M. C.; TRABOULSI, M. A.; BITTENCOURT, R. M. Influência do agregado pulverizado na reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. **Anais...** Goiânia, 1997, p. 87-94.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - CBDB. Panorama brasileiro e relato técnico do simpósio. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALIAGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Relatório final...** Rio de Janeiro: CBDB, 1999. 135 p.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas experimentais para estudo da microestrutura. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO (IBRACON). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Ed. G C Isaia, 2007. p. 403-436.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v.5, p. 329-345, 1975.

DIAMOND, S. ASR: Another look at mechanisms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION (ICAAR), 8., 1989, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: Edited by K. Okada, S. Nishibayashi & M. Kawamura, 1989. p. 83-94.

FERRARIS, C. F. Alkali-silica reaction and high performance concrete. Disponível em: <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build95/art004.html>. Acesso em: 20 nov. 2008, às 19:30 h.

FURNAS. Laboratório de concreto. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado a rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

GLASSER, F. P. Chemistry of the alkali-aggregate reaction. In: SWAMY, R. N. **The Alkali- Silica Reaction in Concrete**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p. 30-53.

GLASSER, L. S. Some observations on the rapid chemical test for potentially reactive aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 11, n. 2, p. 191-196, 1981.

GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The chemistry of ‘alkali-aggregate’ reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 11, n. 1, p. 1-9, 1981.

HASPARYK, N.P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 326 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N.P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado - efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** 257 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HASPARYK, MONTEIRO, P. J. M.; CARASEK, H. Determinação da água adsorvida no estudo das expansões geradas pela reação álcali-agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. p. 1-16. 1 CD ROM.

HELENE, P. L. R.; FIGUEIREDO, E. P. Introdução. In: RED REHABILITAR. **Manual de reabilitação de estruturas de concreto. Reparo, Reforço e Proteção.** São Paulo: Ed. Multipla, 2005. p. 19-34.

HELMUTH, R.; STARK, D. Alkali-silica reactivity mechanisms. In: SKALNY, J. **Materials science of concrete III.** Westerville, Ohio: The American Ceramic Society, 1992. p. 131-208.

HOOBS, D.W. **Alkali Silica reaction in concrete.** Londres: Ed. Thomas Telford, 1988.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO - LACTEC. **Apoio técnico para acompanhamento da evolução de processos de degradação de concreto de estruturas e componentes de concreto.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2005. 51 p. Relatório técnico de inspeção e ensaios LACTEC (970/2005).

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO - LACTEC. **Análise petrográfica.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2009a. 25 p. Relatório técnico de ensaios LAME-LACTEC (017.2009).

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO - LACTEC. **Determinação da reatividade álcali-agregado pelo método acelerado.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2009b. 15 p. Relatório técnico de ensaios LAME-LACTEC (025.2009).

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO - LACTEC. **Estudo e avaliação do concreto da barragem de Salto do Meio.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2009c. 31 p. Relatório técnico de ensaios DPTM-LACTEC (30288.2009).

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO - LACTEC. **Ensaio em testemunhos de concreto da barragem Salto do Meio: resistência à compressão e tração; determinação dos módulos estáticos de elasticidade; ultrassom e; determinação da absorção de água por imersão e índice de vazios.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2009d. 21 p. Relatório técnico de ensaios LAME-LACTEC (276.2008).

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO - LACTEC. **Ensaio de ultrassom na barragem Salto do Meio.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2009e. 15 p. Relatório técnico de ensaios LAME-LACTEC (28.2009).

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986. p. 127-138.

LOPES, L. E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação à barragens de concreto.** 157 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2004.

MARUSIN, S. L. Sample preparation – the key to SEM studies of failed concrete. In: **Cement and Concrete Composites**, U.K., v. 17, n. 4, p. 311 - 318, 1995.

MEHNERT, KR. Granulites – Results of a discussion II. N. Jb. Miner, Monatsh, p. 139-150, 1972.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3^a. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

FRY, H. L. **Relatório final de engenharia – construção da usina de Chaminé.** Curitiba: Companhia Força e Luz do Paraná, 1931, 42 p.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios x por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. São Paulo: ESALQ/ CENA/USP, 1999, 33 p.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1981.

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, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBDB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 173-196.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. The alkali-silica reaction, part I: use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 1, p. 10-17, jan./feb. 1997.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projeto de Experimentos**. 125 p. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001a.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Estatística Industrial**. 135 p. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001b.

SABBAG, A. F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas**. 105 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2003.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas Usinas Hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/Chesf – Influência da reação nas propriedades do concreto**. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2007.

SILVEIRA, J. F. A.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M. Investigação da reatividade álcali-agregado e a confiabilidade dos métodos acelerados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 44, 2002, Belo Horizonte, Brasil. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002.

SILVEIRA, *et al.* Investigação da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2006. p.1-16. 1 CD-ROM.

SILVEIRA, J. F. A. A expansão do concreto em barragens afetadas pela RAA e a importância das tensões confinantes. SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBDB/FURNAS/IBRACON, 1997.

TANG, M., MIN, D., ZHONGZI, X. Comparison between alkali-silica reaction and alkalicarbonate reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 109-118.

THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS - ISE. **Structural effects of alkali-silica reaction: technical guidance appraisal of existing structures.** London: ISE, 1992. 45 p.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de rochas do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2005.

TURRIZIANI, R. Internal degradation of concrete: alkali-aggregate reaction, reinforcement steel corrosion. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 1986. v. 1, p. 388-442.

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado.** 204 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos no estado de São Paulo.** 213 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, 2002.

VALDUGA, V. *et al.* Influência da forma do agregado, da relação água/cimento e da consistência da argamassa na verificação da potencialidade reativa do agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Recife. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2005. p. 118-128.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; HASPARYK, N. P. Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétricas. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBDB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 69-79.

VIEIRA, S. R. S. S. Investigação das reações álcali-agregado em concreto. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBDB/FURNAS/IBRACON, 1997. p.143-150.

VIEIRA, S. R. S. S.; OLIVEIRA, M. A. F. Estudo Petrográfico de alguns agregados brasileiros, com ênfase na avaliação de sua reatividade potencial frente aos álcalis do cimento. In: REIBRAC, 39., 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1997. p. 77-91.

ANEXOS

Anexo 1 - Certificado do cimento padrão fornecido pela ABCP



Associação
Brasileira de
Cimento Portland

Av. Torres do Olivina, 76 - Jaguaré
CEP. 05347-092 - São Paulo-SP
Tel: (011) 3760.5300 - Fax (011) 3760.5340
e-mail: laboratorio@abcp.org.br
www.abcp.org.br

CERTIFICADO

CIMENTO PADRÃO

ENSAIOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

FINALIDADE

Cimento Portland a ser utilizado para a avaliação do grau de reatividade de um determinado agregado através das metodologias descritas nas normas ABNT NBR 15577/4 e ABNT NBR 15577/6.

Fornecido em embalagens fechadas com quantidade suficiente para realizar 5, 10 ou 20 ensaios pela norma ABNT NBR 15577/4.

CARACTERIZAÇÃO

Foi produzido a partir de um cimento Portland de alta resistência inicial – CP V-ARI que atende integralmente aos requisitos da ABNT NBR 5733, além de possuir finura de $(4900 \pm 200) \text{ cm}^2/\text{g}$ determinada de acordo com a ABNT NBR NM 76, equivalente alcalino total expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($0,658 \% \text{K}_2\text{O} + \% \text{Na}_2\text{O}$) de $(0,90 \pm 0,10)\%$, determinado de acordo com a ABNT NBR NM 17 e expansão em autoclave inferior a 0,20%, determinada pelo método prescrito pela ASTM C 151.

VALORES CERTIFICADOS

Propriedade	Método de ensaio	Valores certificados	Incerteza dos resultados
Óxido de sódio (Na_2O)	ABNT NBR NM 17	0,32 %	0,02 %
Óxido de potássio (K_2O)	ABNT NBR NM 17	0,87 %	0,09 %
Equivalente alcalino em Na_2O	-	0,89 %	-
Área específica - Blaine	ABNT NBR NM 76	4920 cm^2/g	90 cm^2/g
Expansibilidade em autoclave	ASTM C 151	0,02 %	0,008 %

RASTREABILIDADE

A qualidade e homogeneidade do cimento padrão foram testadas através das metodologias ABNT NBR NM 17, ABNT NBR NM 76 e ASTM C 151.

Padrões e equipamentos utilizados:

- > Padrão NIST – Standard Reference Material 1885 – Cement Composition
- > Padrão NIST – Standard Reference Material 114p – Portland Cement Fineness Standard
- > Fotômetro de chama Micronal – calibrado com padrão NIST 1885
(NIST – National Institute of Standards and Technology)
- > Aparelho de permeabilidade ao ar – Blaine Star – certificado de calibração ABCP nº 83925, válido até 15.05.09
- > Manômetro do autoclave – certificado de calibração ABSI nº 52875/08, válido até 17.03.09
- > Termômetro do autoclave – certificado de calibração Visomes nº LV 6335/07, válido até 16.04.09

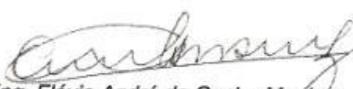
Investigação do Potencial Reativo Álcali-Agregado Residual – Um Estudo de Caso

INSTRUÇÃO DE USO

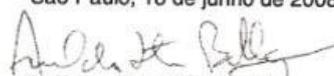
Passar o cimento a ser utilizado na peneira de malha 850µm para remover eventuais grumos. Manter a embalagem fechada após o uso.

RESPONSABILIDADE

O suporte técnico, assim como os vários aspectos que abrangeram a preparação, caracterização e certificação deste padrão, foram desenvolvidos pela Supervisão de Cimento da Área de Tecnologia da ABCP.


Eng. Flávio André da Cunha Murinho
Supervisão de Cimento

São Paulo, 18 de junho de 2008.


Geól. Arnaldo Forti Baítagir
Chefe do Laboratório
CREA 0600586647

Propriedades Química e Físico-mecânica do cimento CP V-ARI

As Tabelas 1 e 2 apresentam a caracterização química e físico-mecânica do cimento Portland de alta resistência inicial – CP V-ARI (resultados de uma determinação).

TABELA 1 – Caracterização Química

Ensaio	Método de ensaio	Resultados % em massa	Limites da NBR 05733/91
Perda ao fogo - PF	NBR NM 18/04	3,05	≤ 4,5%
Dióxido de silício total - SiO ₂	NBR NM 11-2/04	19,52	-
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃	NBR NM 11-2/04	4,80	-
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃	NBR NM 11-2/04	2,26	-
Óxido de cálcio total - CaO	NBR NM 11-2/04	62,33	-
Óxido de magnésio - MgO	NBR NM 11-2/04	1,90	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico - SO ₃	NBR NM 16/04	3,64	≤ 4,5%
Anidrido carbônico - CO ₂	NBR NM 20/04	2,59	≤ 3,0%
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15/04	0,31	≤ 1,0%
Óxido de cálcio livre - CaO (livre)	NBR NM 13/04	1,21	-

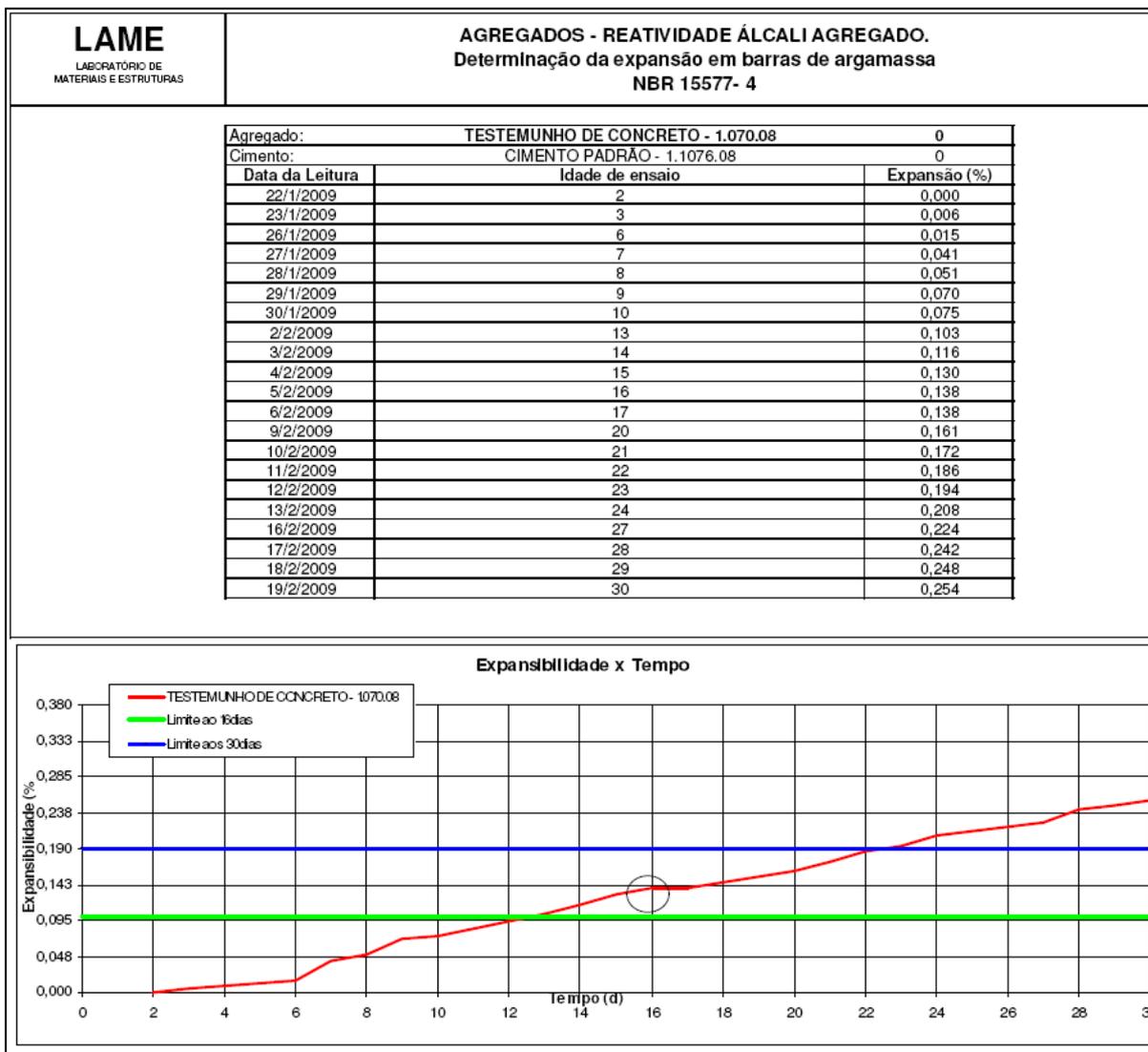
TABELA 2 – Caracterização físico-mecânica

Ensaio	Método de ensaio	Resultados	Limites da NBR 5733/91				
Finura - resíduo na peneira de 75µm (%)	NBR 11579/91	0,9	≤ 6,0				
Finura - resíduo na peneira de 45µm (%)	NBR 12826/93	2,2	-				
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/01	3,09	-				
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	29,4	-				
Início de pega (h:min)	NBR NM 65/03	3:40	≥ 1h				
Fim de pega (h:min)	NBR NM 65/03	5:15	≤ 10h				
Expansibil. de Le Chatelier - a quente (mm)	NBR 11582/91	0,5	≤ 5				
Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215/96)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova n ^o				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 5733/91
	1	2	3	4			
1	25,7	25,6	25,2	24,9	25,4	2,0	-
3	39,5	37,6	38,1	38,8	38,5	2,6	≥ 14,0
7	42,9	41,1	42,9	42,8	42,4	3,1	≥ 24,0
28	49,9	51,3	50,0	51,6	50,7	1,8	≥ 34,0

Obs.: Data de validade impressa na embalagem

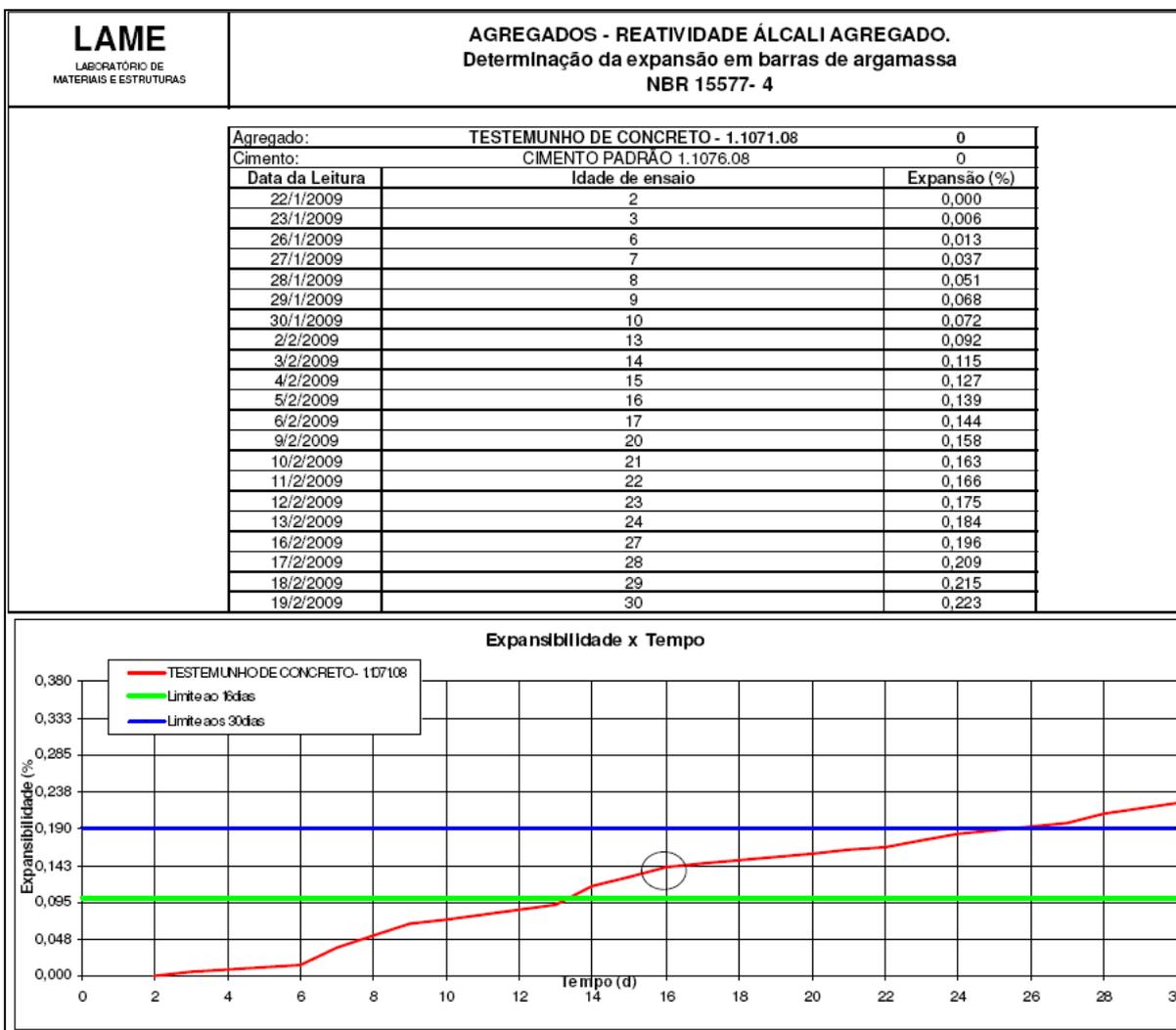
(VERSO)

Anexo 2 - Resultados dos ensaios de reatividade álcali-agregado



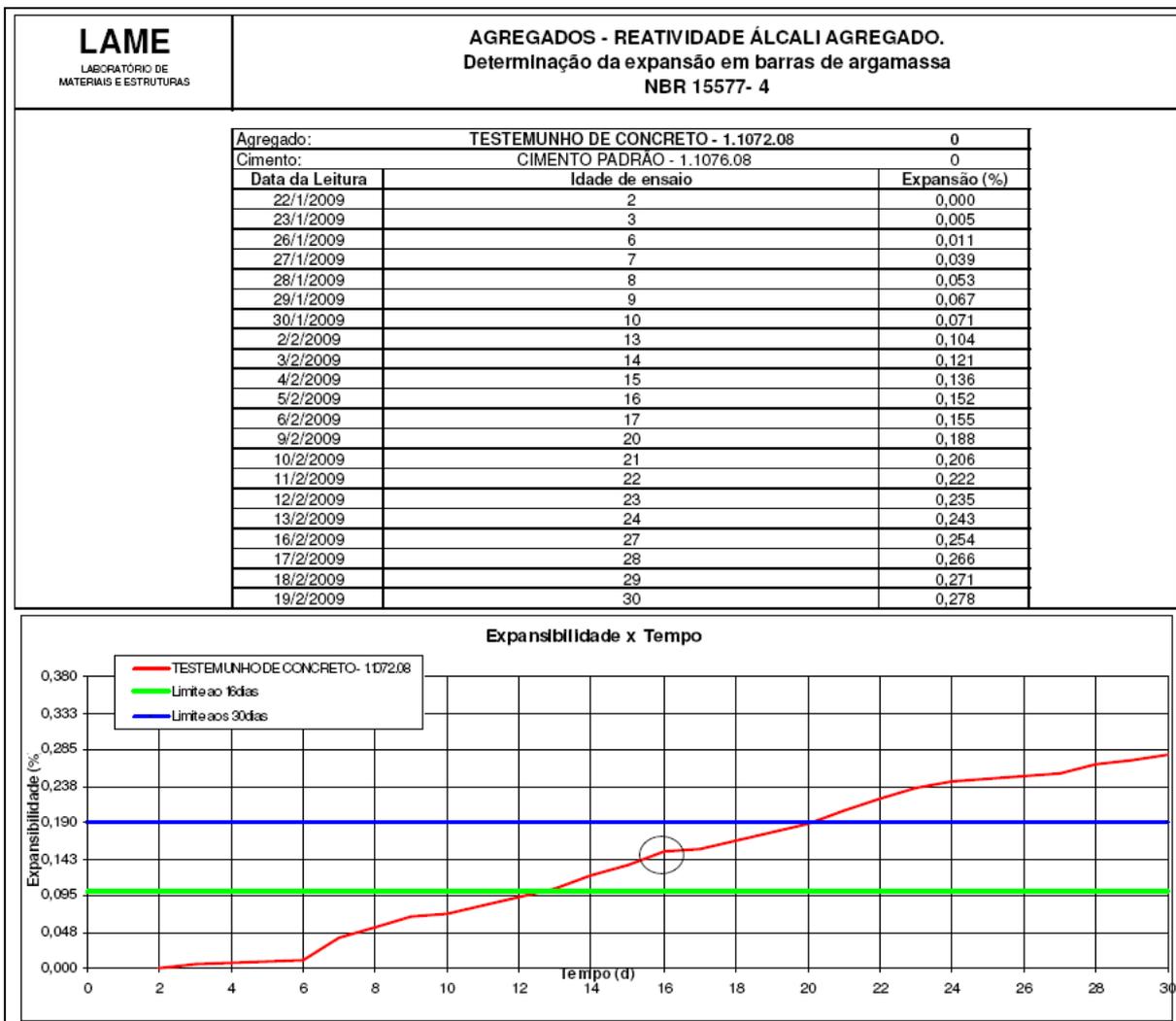
Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra E1)

Fonte: LACTEC (2009b)



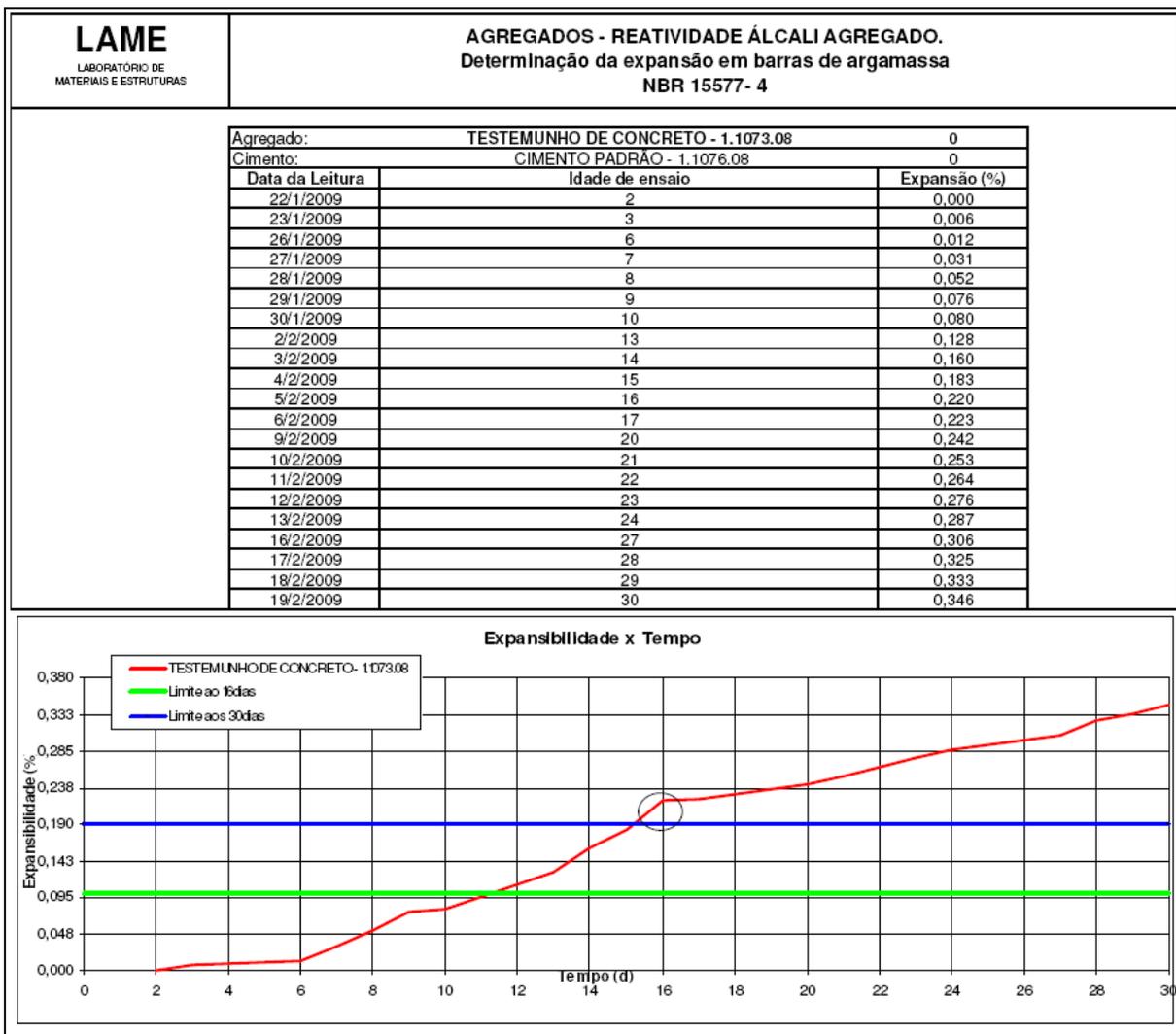
Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra E2)

Fonte: LACTEC (2009b)

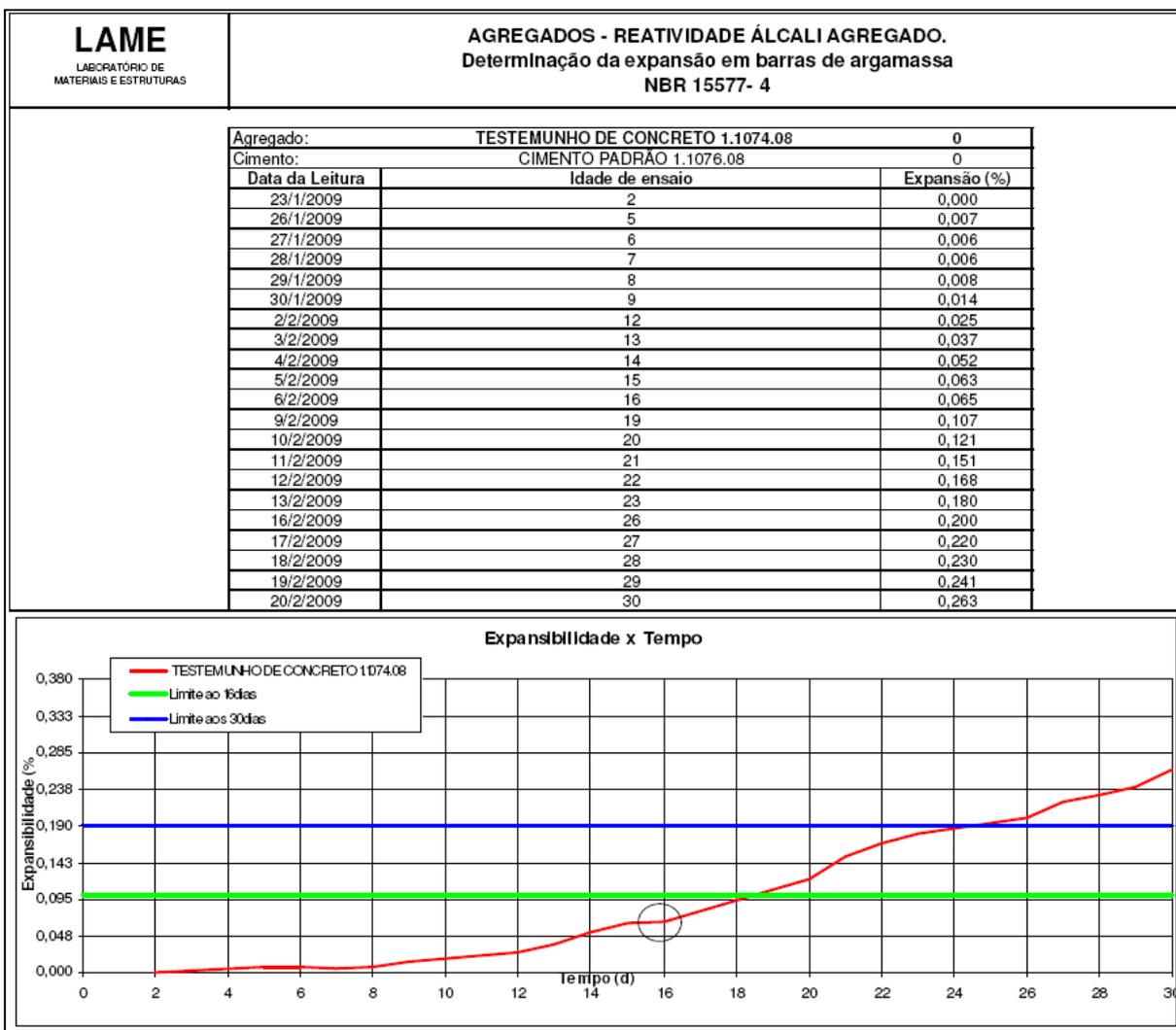


Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra E3)

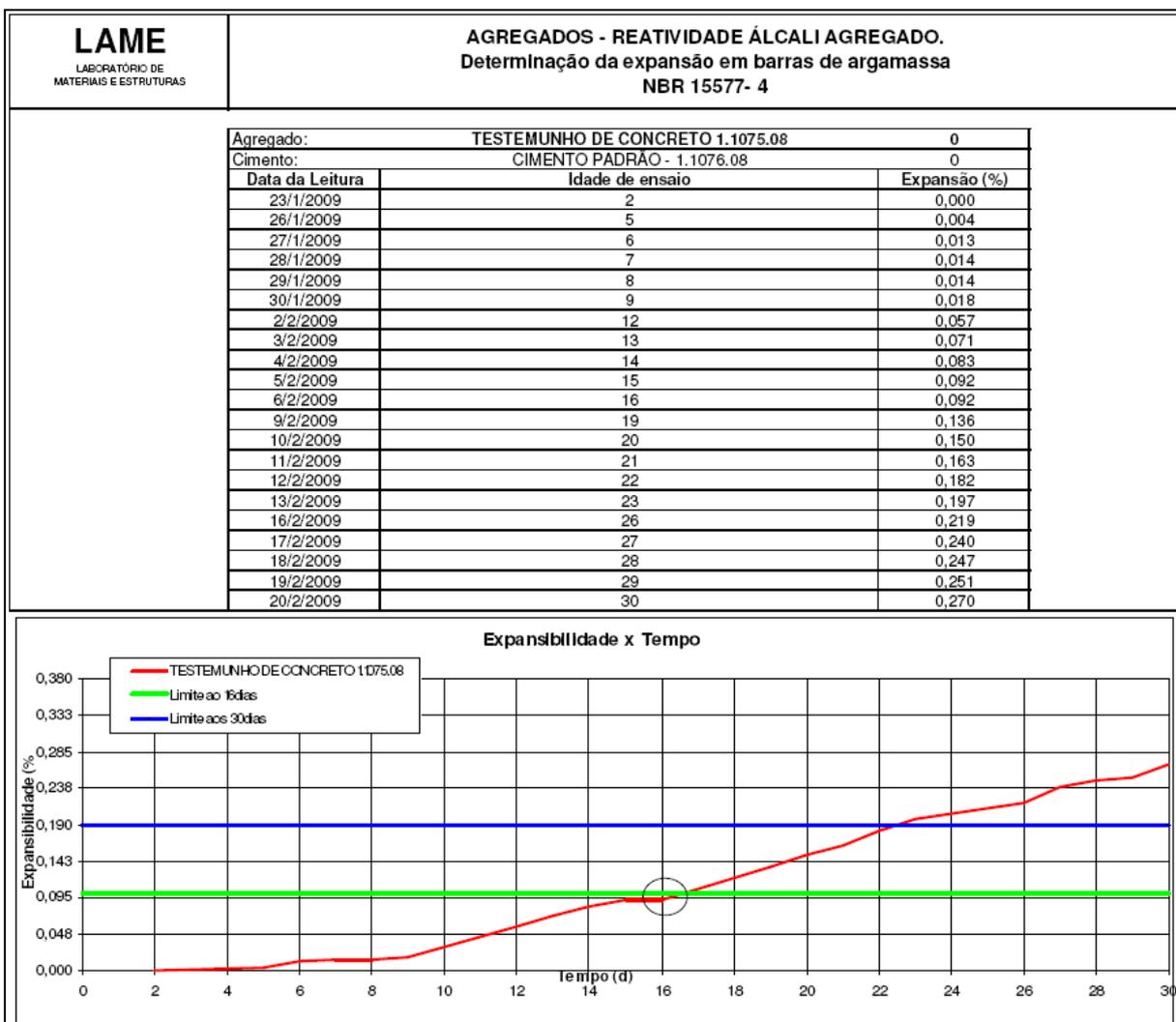
Fonte: LACTEC (2009b)



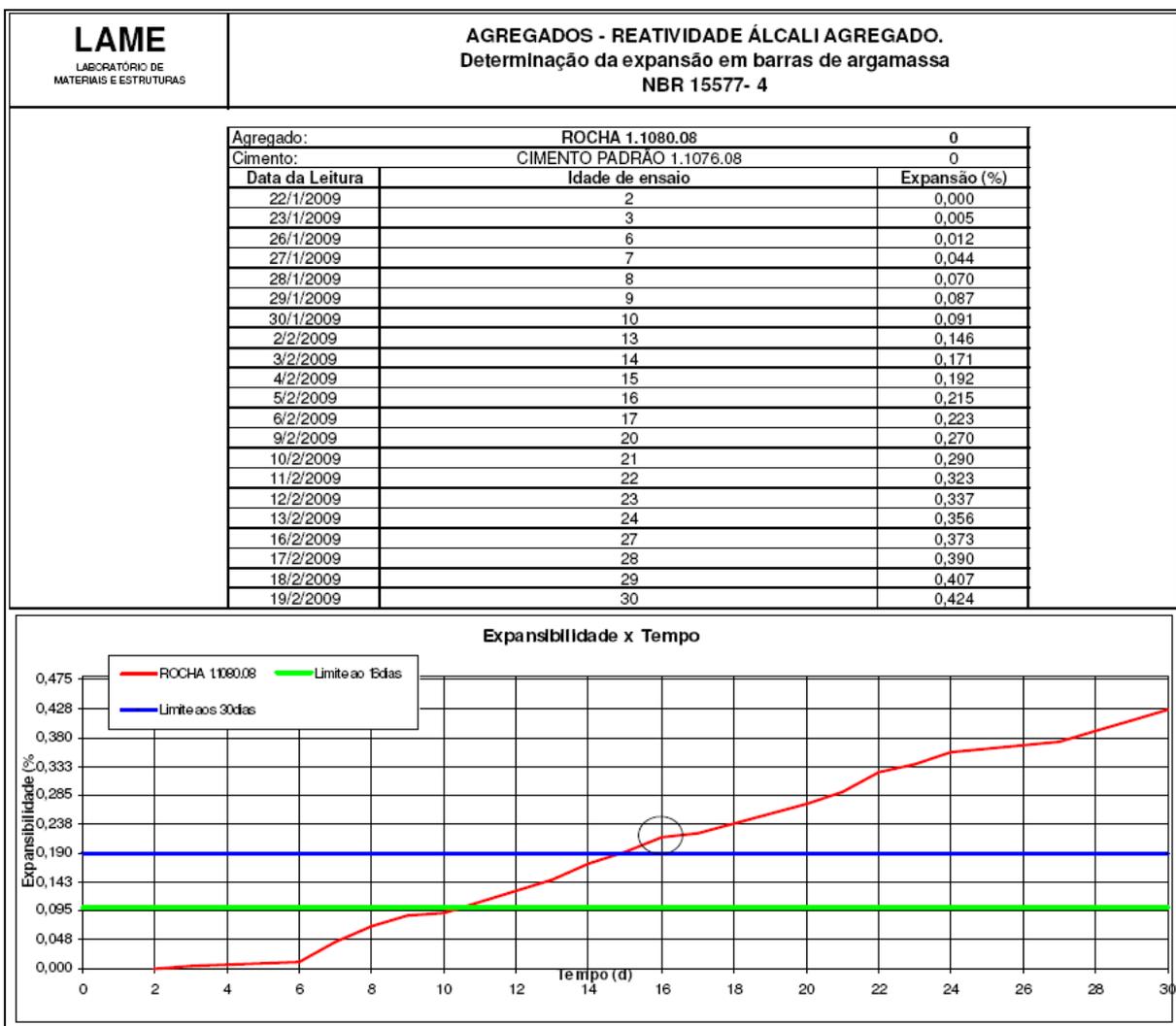
Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra E4)
Fonte: LACTEC (2009b)



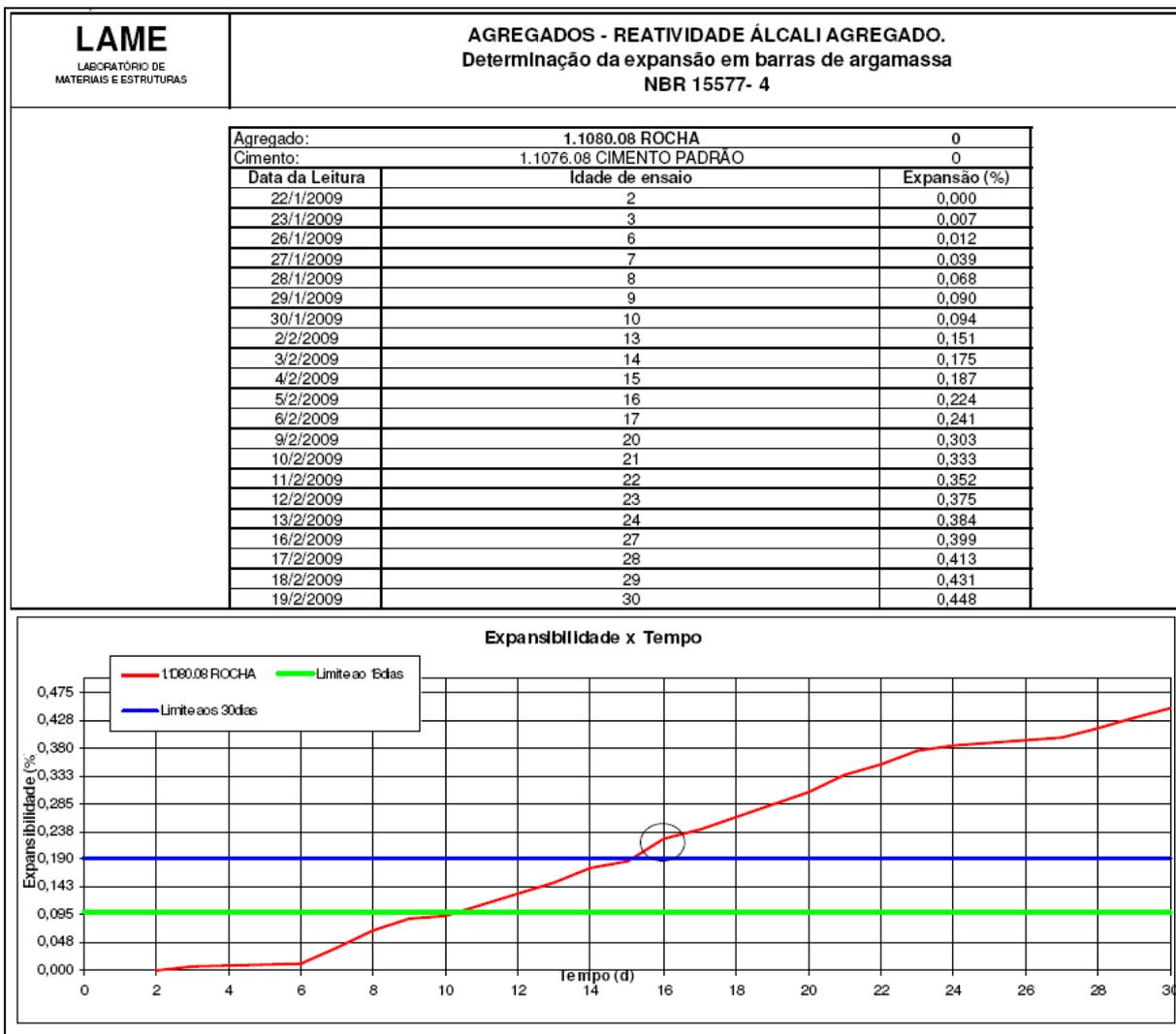
Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra E5)
Fonte: LACTEC (2009b)



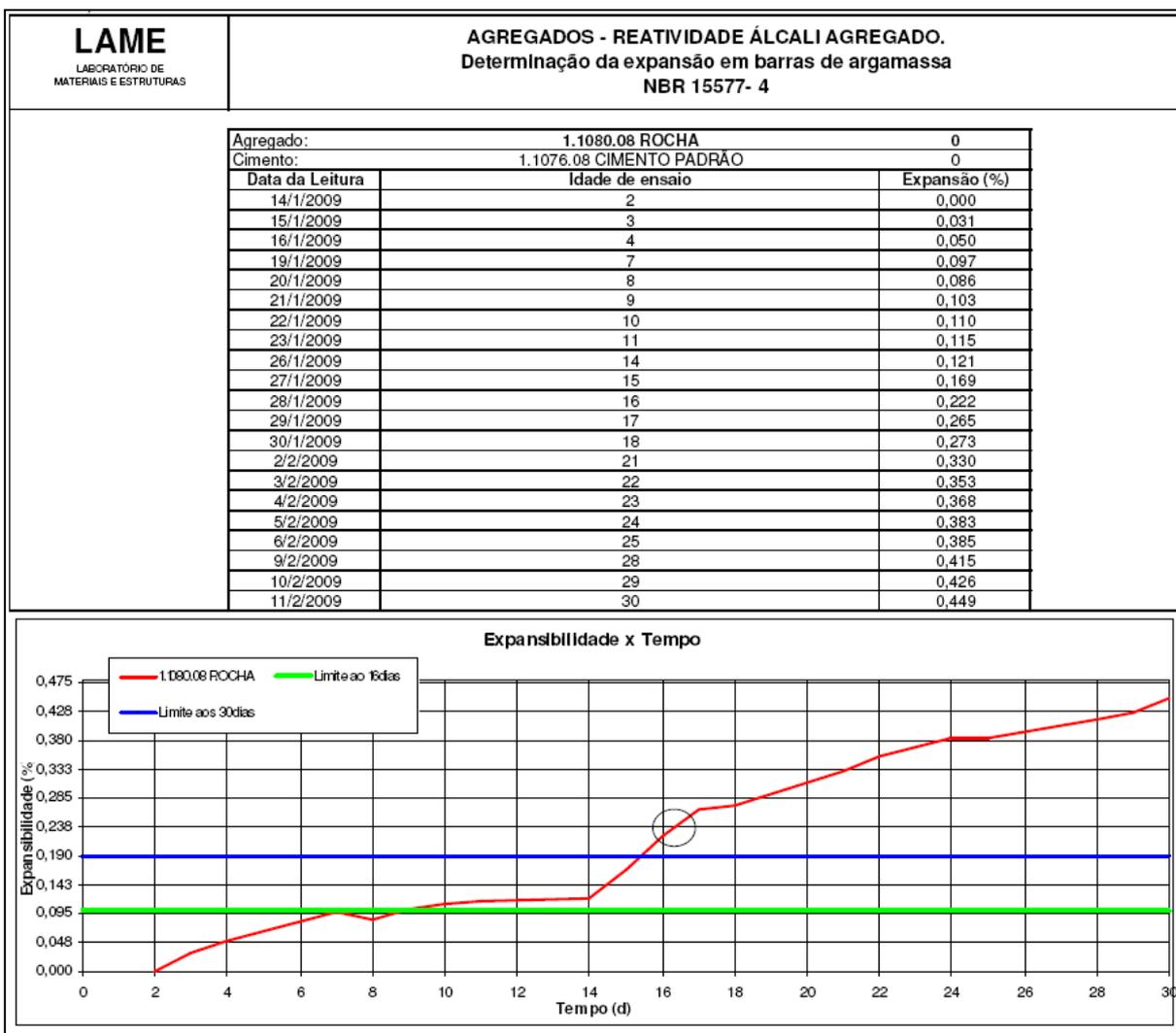
Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra E6)
Fonte: LACTEC (2009b)



Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra J1)
Fonte: LACTEC (2009b)



Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra J2)
Fonte: LACTEC (2009b)



Ensaio de reatividade álcali-agregado (Amostra J3)
Fonte: LACTEC (2009b)

Anexo 3 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade

Dados		Extensômetro Digital				
Registro	1.1070.08	Comprimento: 75,80 mm				
Corpo de prova:	1	Número de bases de medida: 2				
Data do ensaio:	17/12/2008	Sensibilidade do aparelho de medida: 0,0001 mm				
Idade da amostra (dias):						
Resistência à compressão prevista:		33,3 MPa				
Diâmetro:	104 mm	Carga de ruptura Obtida:		13.762 kgf		
Altura:	200 mm	Resistência à compressão obtida:		15,9 MPa		
Carregamento	Força kgf	Tensão MPa	Deformação mm	Deformação Específica ($\times 10^{-6}$)	Módulo de deformação Secante	
0,5 MPa	400	0,5	0,0007	9,2	-	
0,1 fc	2.871	3,3	0,0092	121,4	25,0	GPa
0,2 fc	5.747	6,7	0,0201	265,2	24,2	GPa
0,3 fc	8.626	10,0	0,0315	415,6	23,4	GPa
0,4 fc	11.501	13,3	0,0434	572,6	22,7	GPa
0,5 fc	0	0,0	0,0000	0,0	54,1	GPa
0,6 fc	0	0,0	0,0000	0,0	54,1	GPa
0,7 fc	0	0,0	0,0000	0,0	54,1	GPa
0,8 fc	0	0,0	0,0000	0,0	54,1	GPa
Observações:						
O corpo-de-prova rompeu com 0,4 fc.						
<p style="text-align: center;">Módulo de Deformação Estática</p>						

Determinação do módulo de elasticidade estático (Amostra E1)

Fonte: LACTEC (2009d)

Dados		Extensômetro Digital				
Registro	1.1071.08	Comprimento:		75,80	mm	
Corpo de prova:	1	Número de bases de medida:		2		
Data do ensaio:	18/12/2008	Sensibilidade do aparelho de medida: 0,0001 mm				
Idade da amostra (dias):						
Resistência à compressão prevista:		61,2	MPa			
Diâmetro:	105	Carga de ruptura Obtida:		66.371	kgf	
Altura:	207	Resistência à compressão obtida:		75,9	MPa	
Carregamento	Força kgf	Tensão MPa	Deformação mm	Deformação Específica ($\times 10^{-6}$)	Módulo de deformação Secante	
0,5 MPa	400	0,5	0,0002	2,6	-	
0,1 fc	5.352	6,1	0,0110	145,1	39,3	GPa
0,2 fc	10.700	12,2	0,0226	298,2	39,6	GPa
0,3 fc	16.057	18,4	0,0347	457,8	39,3	GPa
0,4 fc	21.400	24,5	0,0473	624,0	38,6	GPa
0,5 fc	26.760	30,6	0,0605	798,2	37,8	GPa
0,6 fc	32.113	36,7	0,0744	981,5	37,0	GPa
0,7 fc	37.466	42,8	0,0891	1175,5	36,1	GPa
0,8 fc	42.818	49,0	0,1059	1397,1	34,8	GPa

Módulo de Deformação Estática

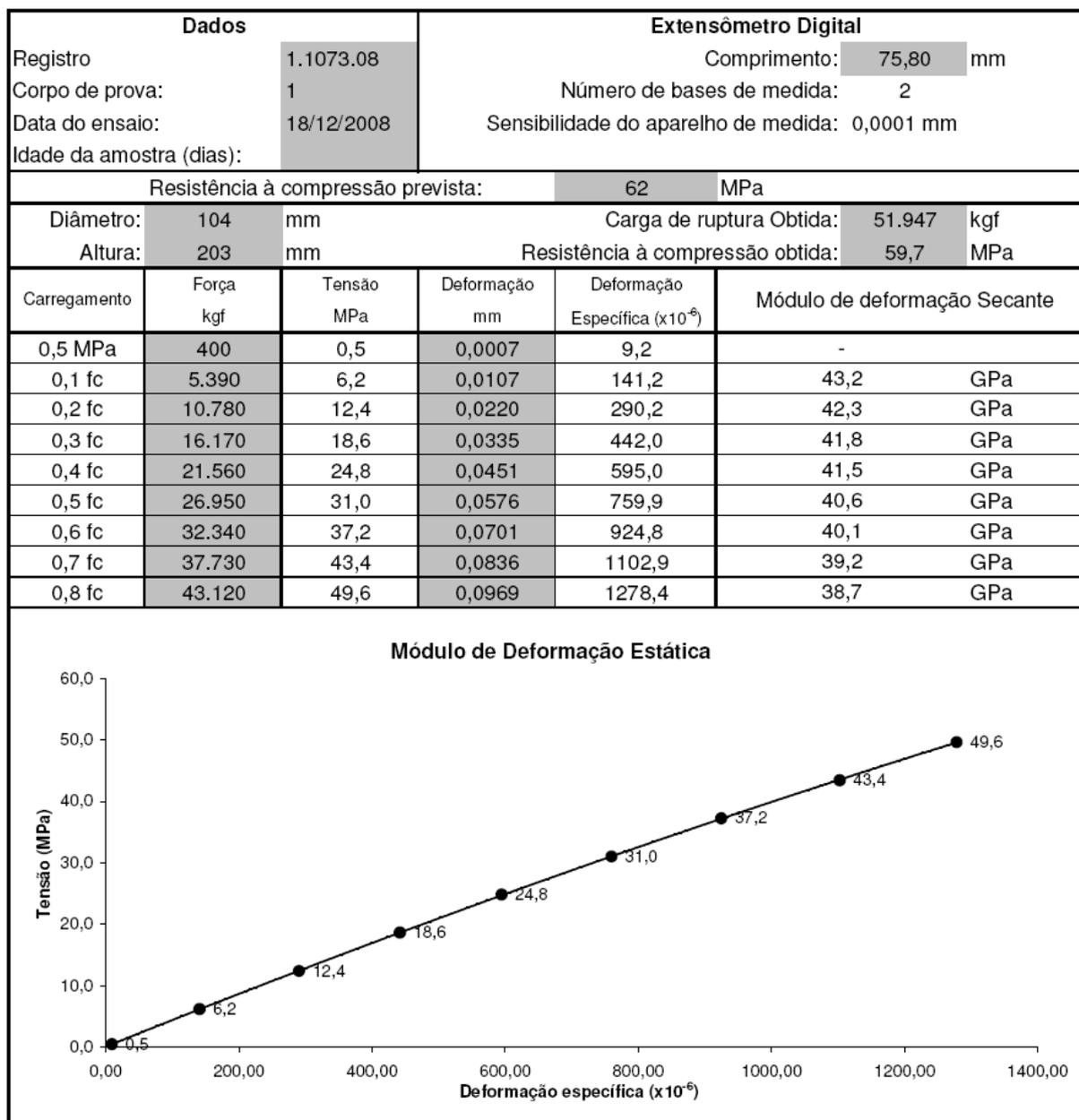
Determinação do módulo de elasticidade estático (Amostra E2)

Fonte: LACTEC (2009d)

Dados		Extensômetro Digital				
Registro	1.1072.08	Comprimento:		75,80	mm	
Corpo de prova:	1	Número de bases de medida:		2		
Data do ensaio:	18/12/2008	Sensibilidade do aparelho de medida: 0,0001 mm				
Idade da amostra (dias):						
Resistência à compressão prevista:		81,1	MPa			
Diâmetro:	104	mm		Carga de ruptura Obtida:	70.355	kgf
Altura:	204	mm		Resistência à compressão obtida:	81,1	MPa
Carregamento	Força kgf	Tensão MPa	Deformação mm	Deformação Específica ($\times 10^{-6}$)	Módulo de deformação Secante	
0,5 MPa	400	0,5	0,0004	5,3	-	
0,1 fc	7.035	8,1	0,0156	205,8	37,9	GPa
0,2 fc	14.070	16,2	0,0336	443,3	35,8	GPa
0,3 fc	21.100	24,3	0,0513	676,8	35,4	GPa
0,4 fc	28.100	32,4	0,0710	936,7	34,2	GPa
0,5 fc	35.200	40,6	0,0925	1220,3	33,0	GPa
0,6 fc	0	0,0	0,0000	0,0	94,8	GPa
0,7 fc	0	0,0	0,0000	0,0	94,8	GPa
0,8 fc	0	0,0	0,0000	0,0	94,8	GPa
Observações:						
O corpo-de-prova rompeu com 0,5 fc						
Módulo de Deformação Estática						

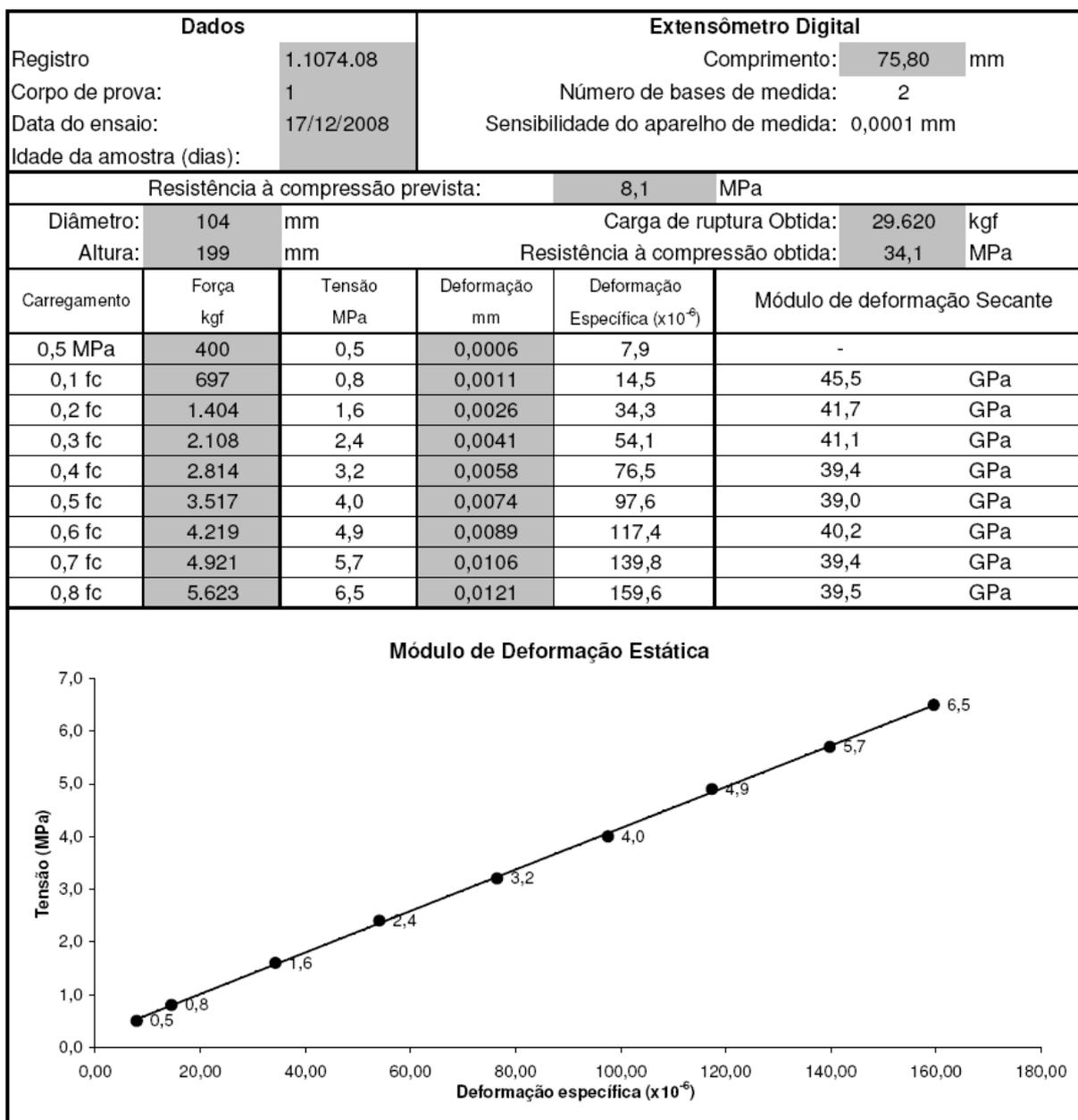
Determinação do módulo de elasticidade estático (Amostra E3)

Fonte: LACTEC (2009d)



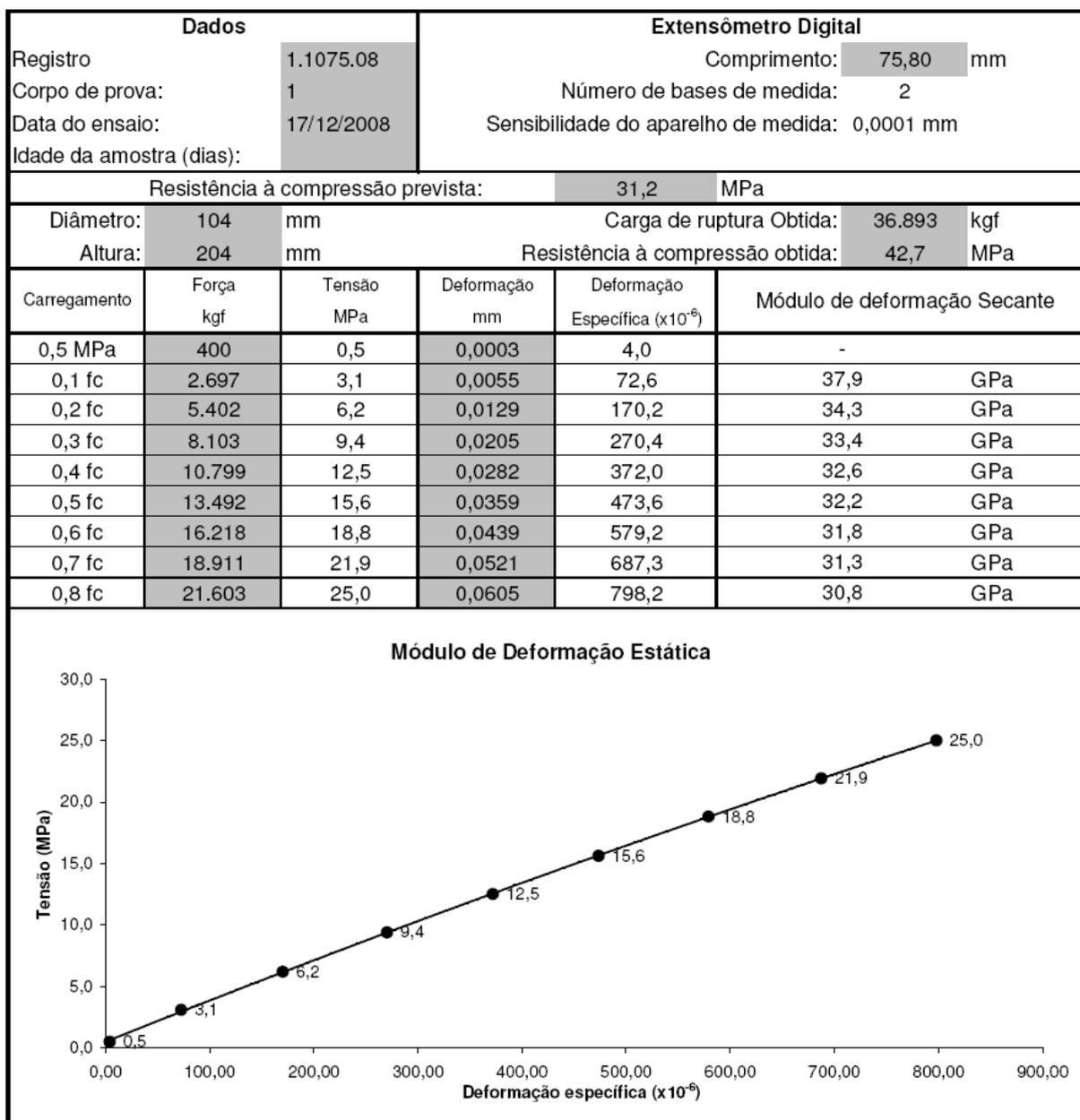
Determinação do módulo de elasticidade estático (Amostra E4)

Fonte: LACTEC (2009d)



Determinação do módulo de elasticidade estático (Amostra E5)

Fonte: LACTEC (2009d)



Determinação do módulo de elasticidade estático (Amostra E6)

Fonte: LACTEC (2009d)