

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INVESTIGAÇÃO DE CONCRETOS AFETADOS PELA
REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E CARACTERIZAÇÃO
AVANÇADA DO GEL EXSUDADO**

Nicole Pagan Hasparyk

Tese de Doutorado

Porto Alegre
2005

NICOLE PAGAN HASPARYK

**INVESTIGAÇÃO DE CONCRETOS AFETADOS PELA
REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E CARACTERIZAÇÃO
AVANÇADA DO GEL EXSUDADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientadores:

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Paulo José Melaragno Monteiro

Porto Alegre
Dezembro 2005

H352i Hasparyk, Nicole Pagan
Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e
caracterização avançada do gel exsudado / Nicole Pagan Hasparyk. –
2005.

326f.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

Orientação : Prof^a. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Prof. Dr. Paulo José Melaragno Monteiro

1. Concreto – Durabilidade. 2. Concreto – Reação álcali-agregado.
3. Engenharia civil. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II.
Monteiro, Paulo José Melaragno, orient. III. Título.

CDU-691.32(043)

NICOLE PAGAN HASPARYK

**INVESTIGAÇÃO DE CONCRETOS AFETADOS PELA REAÇÃO
ÁLCALI-AGREGADO E CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DO
GEL EXSUDADO**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2005

Denise Carpena Coitinho Dal Molin & Paulo José Melaragno Monteiro
Dra. pela USP & PhD pela University of California
Orientadores

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Vladimir Antônio Paulon (UNICAMP)
Dr. pela USP

Prof^a. Helena Carasek (UFG)
Dra. pela USP

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD. pela Leeds University

Dedico este trabalho ao meu marido e filho,
com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Meus caros orientadores, Paulo e Denise, deixo aqui minha profunda admiração por vocês, pelos competentes profissionais que são, agradeço por toda atenção dispensada, orientação, disposição indiscutível, dedicação, interesse e carisma, sem vocês sempre presentes, apesar da distância física, não seria possível concluir esta tese. Hoje, mais do que nunca, percebi o quanto estivemos juntos nesta pesquisa. Obrigada por tudo!

A parte científica do gel não teria sido possível de ser realizada sem a participação das químicas prof. Dra Inés Joeques e Dra. Nádia Segre, que com bastante competência contribuíram de forma marcante nesta pesquisa.

Agradeço imensamente ao físico professor Dr. Schneider, que com competência e paciência me ensinou muito sobre a técnica de ressonância nuclear magnética e também por todos os ensaios e análises realizadas com a RNM no Instituto da Física de São Carlos, além da revisão dos textos da tese referentes a esta técnica.

À engenheira, professora e amiga Dra. Denise Antunes não tenho palavras, pois no meio de tantas atividades me ajudou muito com profissionalismo, carinho e paciência. Espero que nossa amizade perdure.

Não poderia esquecer da engenheira química Dra Roberta Signini, que esteve sempre disponível, disposta a ensinar e ajudar, contribuindo assim na pesquisa.

Ainda, à prof. Dra. Helena Carasek que me ajudou e motivou a escolher determinados caminhos que foram bastante importantes para o sucesso da pesquisa.

Agradeço as contribuições do prof. José Luiz Duarte Ribeiro na parte tanto estatística como na modelagem dos dados obtidos.

À todos os colegas de Furnas, minha imensa gratidão por me substituírem nos momentos em que estive ausente do trabalho, fazendo muitas de minhas atividades.

Em especial, gostaria de destacar alguns nomes de colegas de Furnas que contribuíram de forma marcante, com profissionalismo, carinho, dedicação e paciência para o desenvolvimento das etapas experimentais desta pesquisa, são eles: Tizzo, Erico, Marco Aurélio, Marley, Renato, Flávia, Emerson, Iones, Reginaldo, Helizabet, Fernanda, Célio, Cícero, Edson, Josean, Gilberto, Zito, Luiz Antônio, Jacilene, André, Rogério, Lutz, Álvaro, Juliana, são tantos, que se me esquecer de alguém favor me perdoem.

Àqueles engenheiros de Furnas que estiveram mais próximo de mim, às vezes me dando apoio, outras auxiliando e ajudando de forma competente no projeto, o meu agradecimento profundo; são eles: Ziza, Alexandre Castro, Cristiane, Gambale, Marlos, Reynaldo, Luciana e Marcos Daniel.

Um outro especial agradecimento dedico às competentes geólogas Heloísa e Ana Livia, que sempre me deram força, apoio e também contribuição técnica e científica nesta pesquisa.

Agradeço ainda aos engenheiros Carlos de Alencar Dias Sobrinho, Guynemer Miachon Filho, Fernando Ismael Tortorello, Elcio Antônio Guerra, Márcia Águas e Quintiliano Guedes pelo auxílio na pesquisa.

Não poderia esquecer também da colaboração de Maurice, Adão, Vilmar e Fábio, meu muito obrigado.

Gostaria de deixar registrado aqui minha gratidão também ao Wilson, Wellington e Daiane, que colaboraram bastante em grande parte da pesquisa. Talvez sem eles eu não teria feito tudo que fiz.

À todos os colegas do curso de Pós-Graduação da UFRGS, que me auxiliaram e ajudaram nos momentos em que estive em Porto Alegre.

Esta pesquisa não teria sido possível de ser realizada sem o estímulo inestimável do Dr. Walton Pacelli, o interesse, apoio e competência.

À cimento Goiás, em nome de todas as pessoas que contatei, que apesar das dificuldades, produziu um cimento específico para minha pesquisa contribuindo assim para o seu sucesso.

Ao meu chefe Rubens M. Bittencourt, que me apoiou no doutorado, mesmo com as exigências e dificuldades do trabalho, entendendo e contribuindo para o sucesso deste projeto.

Ao gerente do Laboratório de Concreto, engenheiro Moacir, minha gratidão pelo auxílio inestimável, competência e interesse para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço ao Programa de P & D da ANEEL e Furnas Centrais Elétricas S.A. pelo apoio financeiro e técnico, pois sem este seria impossível ser realizada uma pesquisa desta magnitude.

Ao meu marido Xim, agradeço a tudo mesmo, sem palavras, pela paciência, apoio, ajuda, carinho, amor, preocupação, contribuições técnicas, e ainda, por me substituir sendo às vezes pai e mãe ao mesmo tempo.

À meu querido filho Breno, que com apenas cinco aninhos já sabe o que é estudar muito e uma tese de doutorado, agradeço o seu imenso amor, carinho, a sua paciência em ter que ficar muitos momentos sem a sua mãe e por entender que eu nem sempre podia te dar atenção quando pedia.

À querida Purica, que sempre com pensamento positivo e carinho me estimulou e ajudou a enfrentar os momentos difíceis, além de ficar com meu filho para que eu pudesse estudar.

À toda minha família, mãe, pai e irmãos que estiveram sempre com o pensamento positivo e acreditando sempre em mim. Minha mãe e irmã Kátia, obrigada pelas orações constantes, meu pai, pela competência, persistência e por tudo que herdei de bom de você.

À Lidi, que sempre esteve ao meu lado e ajudou de forma expressiva.

Agradeço muito também à querida Dagmar, que me deu forças, e sempre com muita tranquilidade me orientando nos melhores caminhos a serem tomados.

Agradeço a Deus, mais uma vez, por me ter permitido concluir mais uma importante etapa da minha vida.

Obrigada.

RESUMO

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

A crescente preocupação com a qualidade e durabilidade das estruturas de concreto tem gerado grandes avanços na tecnologia do concreto, porém existem muitas questões ligadas aos processos de deterioração ainda a serem esclarecidas. Entre os vários processos que afetam a durabilidade do concreto, encontra-se a reação álcali-agregado (RAA), um fenômeno bastante complexo, mas que foi descoberto há muitos anos, porém responsável por ter afetado mais de 140 barragens no mundo. Ainda não se dispõe de uma maneira totalmente eficiente e econômica de combater a reação, uma vez instalada no concreto. A presente pesquisa aborda, do ponto de vista científico e tecnológico, o tema RAA. A investigação se deu em três etapas. Na primeira, o objetivo principal foi estudar aproximadamente cem testemunhos de concreto, provenientes de uma estrutura de usina hidrelétrica já afetada pela RAA, e verificar o reflexo desta patologia nas suas propriedades como a resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade, velocidade de pulsos ultra-sônicos e permeabilidade. Em conjunto, foram realizados ensaios para avaliar expansões residuais e investigações microscópicas com o objetivo de verificar os agentes causadores da reação. Na segunda etapa, o agregado quartzito, proveniente da região da usina hidrelétrica avaliada, foi estudado, desde análises microscópicas, ensaios de expansão em argamassas e concretos até a determinação das propriedades de concretos confeccionados em laboratório. As propriedades avaliadas foram as mesmas dos testemunhos. Nas duas primeiras etapas realizadas, o papel do lítio também foi abordado com o objetivo de verificar a sua eficiência no combate a RAA. Por fim, na terceira etapa, foi realizado um amplo estudo do gel exsudado coletado na superfície do concreto da estrutura deteriorada pela RAA. O estudo envolveu desde a sua simples caracterização através da determinação de suas propriedades até uma caracterização avançada fazendo-se o emprego de técnicas como a difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, análise térmica, espectroscopia no infravermelho e espectroscopia de ressonância nuclear magnética. Nesta etapa, o lítio também foi abordado com o objetivo de se verificar o seu efeito no gel exsudado. Os resultados com os testemunhos de concreto indicam que houve reflexos negativos em algumas propriedades devido a RAA, destacando o módulo de elasticidade. Verificou-se ainda a existência de expansões residuais nos testemunhos de concreto extraídos quando expostos a determinadas condições ambientais. Nos ensaios de expansão com os testemunhos, o lítio se mostrou capaz de reduzir em parte as expansões residuais nos testemunhos de concreto estudados. Adicionalmente, o agregado quartzito provou ser bastante reativo, chegando a expansões de 0,24% nas argamassas pelo método acelerado e 0,09% nos prismas de concreto, nas idades de 16 e 365 dias, respectivamente. Entre as propriedades estudadas nos concretos moldados, e atacados em laboratório, verificou-se também que o módulo de elasticidade foi a propriedade mais afetada no tempo. Ainda o lítio nesta etapa também mostrou algum efeito positivo nas expansões. No estudo do gel exsudado, foi possível caracterizá-lo como um silicato de potássio hidratado com grande potencialidade para expandir. A partir principalmente da ressonância nuclear magnética, verificou-se que o potássio faz parte da estrutura do gel enquanto que o sódio se apresenta combinado na forma de trona, um produto cristalizado que se encontra segregado na rede do silicato de potássio amorfo. O lítio em contato com o gel se mostrou capaz de afetar a sua estrutura através das alterações observadas por ressonância nas ligações do silício.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; gel; deterioração; expansão; propriedades.

ABSTRACT

HASPARYK, N. P. **Investigation of concretes affected by alkali-aggregate reaction and advanced characterization of exuded gel.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

The increasing concern with quality and durability of concrete structures has promoted great advances in the concrete technology nevertheless there are still several questions related to the durability of concrete to be elucidated. Among the several processes that affect concrete durability, alkali-aggregate reaction (AAR) is a very complex phenomenon responsible for the deterioration of more than 140 dams in the world. There is no efficient method to suppress AAR once it occurs in a concrete structure. The present research focuses on the study of the alkali-aggregate reaction from a scientific and technological point of view. The proposed investigation was performed on three stages. In the first stage, the main purpose was to study about one hundred concrete cores from a dam affected by AAR and to verify the consequences of reaction on their properties such as compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity, ultrasonic pulse velocity and permeability. Tests in order to evaluate residual expansion and microscopic analyses, to verify the main cause of reaction, were also performed. The second phase reported the microscope analyses of the aggregate and the results of the expansion tests with mortar and concrete, and evaluated the properties of concretes cast with quartzite from a quarry near the affected structure. In addition, for the both two stages the performance of lithium in suppressing AAR was also evaluated. Finally, the exuded gel from affected concrete surface was studied. This investigation included the determination of its properties as well as an advanced characterization using some techniques such as x ray diffraction, scanning electron microscope, thermal analyses, infrared spectroscopy and nuclear magnetic resonance spectroscopy. The effect of lithium on the gel was also studied. The results from concrete cores confirmed the negative influence of AAR on some properties of the concrete, specially on the modulus of elasticity. It was also verified the existence of residual expansion in cores when exposed to aggressive exposure conditions. In the expansion tests with cores, the lithium was able to reduce partially the expansions of concrete cores. In addition, quartzite was proved to be a very reactive aggregate and expansion tests reached 0.24% in mortar and 0.09% in concrete prisms tests at 16 days and 365 days, respectively. Among the properties of concretes cast in laboratory with quartzite and put under two different exposure conditions, the modulus of elasticity was the most affected property over time. Lithium also proved to decrease the expansions of concrete prisms. In the study of gel exuded, it was possible to characterize it as a hydrated potassium silicate with a high potentiality to expand. From nuclear magnetic resonance (NMR), it was verified that potassium takes part of gel while sodium is present in trona, a crystallized product that is segregated from the bulk amorphous silicate network. Lithium in contact with gel was capable to modify its structure, as observed through the alterations of silicon bridges by NMR.

Key-words: alkali-aggregate reaction; gel; deterioration; expansion, properties.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	31
1.1. IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	31
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	32
1.2.1. Objetivo Geral	32
1.2.2. Objetivos específicos	32
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	33
2. ESTADO DA ARTE	35
2.1. FUNDAMENTOS DA RAA	35
2.2. ASPECTOS QUÍMICOS DA RAA	42
2.3. MECANISMOS DE EXPANSÃO	45
2.4. EFEITO DE ADIÇÕES QUÍMICAS NA REAÇÃO ALCALI-SÍLICA	48
2.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	52
3. UHE FURNAS	53
3.1. INTRODUÇÃO	53
3.2. DADOS SOBRE O CONCRETO	55
3.3. HISTÓRICO DA RAA	57
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
4.1. PANORAMA GERAL	63
4.2. VARIÁVEIS	66
4.3. MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO	66
4.4. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	69
4.5. INVESTIGAÇÃO DO CONCRETO DA GALERIA DE DRENAGEM.....	71
4.5.1. Ensaio no concreto da galeria	71
4.5.2. Investigação dos testemunhos de concreto	72
4.5.2.1. Extração dos testemunhos	72

4.5.2.2. Amostragem e inspeção visual	76
4.5.2.3. Planejamento estatístico dos experimentos	78
4.5.2.4. Ensaio ultra-sônicos após extração	82
4.5.2.5. Determinação das propriedades e características dos concretos	82
4.5.2.6. Análises microestruturais	83
4.5.2.7. Ensaio de expansão e ultra-som	84
4.6. INVESTIGAÇÃO DO AGREGADO QUARTZITO	86
4.6.1. Estudo mineralógico do agregado	86
4.6.2. Ensaio de expansão em argamassa pelo método acelerado	87
4.6.3. Ensaio em concretos moldados em laboratório	87
4.6.3.1. Ensaio de expansão pelo método dos prismas de concreto e ultra-som	88
4.6.3.2. Determinação das propriedades dos concretos moldados	89
4.7. ESTUDO DO GEL EXSUDADO	90
4.7.1. Análise visual e por lupa	90
4.7.2. Análises químicas	90
4.7.3. Determinação da densidade	91
4.7.4. Determinação da absorção de vapor de água	92
4.7.5. Comportamento térmico	92
4.7.6. Determinação do coeficiente de expansão térmica	93
4.7.6.1. Introdução	93
4.7.6.2. Metodologia empregada	93
4.7.7. Determinação do potencial zeta	94
4.7.7.1. Introdução	94
4.7.7.2. Metodologia empregada	96
4.7.8. Análises térmicas	97
4.7.8.1. Termogravimetria e análise térmica diferencial	97

4.7.8.1.1. Introdução	97
4.7.8.1.2. Metodologia empregada.....	98
4.7.8.2. Determinação da temperatura de transição vítrea.....	98
4.7.9. Microscopia eletrônica de varredura.....	99
4.7.9.1. Introdução.....	99
4.7.9.2. Metodologia empregada	100
4.7.10. Difratomia de raios X.....	100
4.7.10.1. Introdução.....	100
4.7.10.2. Metodologia empregada	101
4.7.11. Espectrometria de infravermelho	102
4.7.11.1. Introdução.....	102
4.7.11.2. Metodologia empregada	103
4.7.12. Ressonância nuclear magnética.....	104
4.7.12.1. Introdução	104
4.7.12.2. Metodologia empregada	106
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA INVESTIGAÇÃO DO CONCRETO DA	
 UHE FURNAS	108
5.1. ENSAIOS NO CONCRETO DA GALERIA.....	108
5.1.1. Inspeção visual <i>in loco</i>.....	108
5.1.2. Ensaio ultra-sônicos	109
5.2. INVESTIGAÇÃO DOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS	111
5.2.1. Inspeção visual.....	111
5.2.2. Ensaio ultra-sônicos	117
5.2.3. Determinação das propriedades e características dos testemunhos de concreto..	119
5.2.3.1. Resistência à compressão	119
5.2.3.2. Módulo de elasticidade	121

5.2.3.3. Resistência à tração por compressão diametral	125
5.2.3.4. Permeabilidade	128
5.2.3.5. Medidas de carbonatação	129
5.2.3.6. Estimativa do teor de álcalis do concreto	131
5.2.4. Análises microestruturais	133
5.2.4.1. Microscopia ótica	133
5.2.4.2. Microscopia eletrônica de varredura	135
5.2.5. Ensaio de expansão	143
5.2.5.1. Ajustes dos resultados de expansão	155
5.2.6. Análise Comparativa entre o comportamento expansivo médio dos testemunhos de concreto nas condições E1, E2 e E3	163
5.2.7. Análise Comparativa entre o comportamento expansivo médio dos testemunhos de concreto expostos ao lítio e nas condições E3, E4 e E5	167
5.2.8. Ultra-som na expansão	169
5.2.9. Análise Comparativa entre os resultados de ultra-som pelo método direto e indireto	172
5.2.10. Correlação entre o módulo de elasticidade e a velocidade ultra-sônica	173
5.2.11. Correlação entre o comportamento expansivo e a velocidade ultra-sônica dos testemunhos	175
5.2.12. Comportamento dos testemunhos após ensaios de expansão	176
5.2.13. Modelagem das propriedades mecânicas dos testemunhos	179
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA INVESTIGAÇÃO DO AGREGADO QUARTZITO	183
6.1. ESTUDO MINERALÓGICO DO AGREGADO	183
6.2. ENSAIO DE EXPANSÃO PELO MÉTODO ACELERADO	186
6.3. ENSAIO DE EXPANSÃO PELO MÉTODO DOS PRISMAS DE CONCRETO	188
6.4. COMPARAÇÃO ENTRE EXPANSÕES OBTIDAS PELO MÉTODO ACELERADO E MÉTODO DOS PRISMAS DE CONCRETO	194

6.5. ULTRA-SOM NA EXPANSÃO.....	195
6.6. CORRELAÇÃO ENTRE EXPANSÕES E A VELOCIDADE ULTRA-SÔNICA NOS PRISMAS DE CONCRETO	198
6.7. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS MOLDADOS	200
6.7.1. Resistência à compressão	200
6.7.2. Módulo de elasticidade	202
6.7.3. Resistência à tração por compressão diametral	204
6.7.4. Permeabilidade	206
6.8. CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	208
7. PROPRIEDADES E CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DO GEL EXSUDADO	210
7.1. ANÁLISE VISUAL E POR LUPA	210
7.2. ANÁLISES QUÍMICAS	212
7.3. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	214
7.4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA	215
7.5. COMPORTAMENTO TÉRMICO.....	216
7.6. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA	218
7.7. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ZETA	219
7.8. ANÁLISES TÉRMICAS	220
7.8.1. Análise termogravimétrica e térmica diferencial	220
7.8.2. Determinação da temperatura de transição vítrea.....	223
7.9. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	223
7.10. DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X	228
7.11. ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO	231
7.12. RESSONÂNCIA NUCLEAR MAGNÉTICA	237
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	247
8.1. CONCLUSÕES	247

8.1.1. Reatividade do agregado quartzito	247
8.1.2. Características e comportamento do gel exsudado	248
8.1.3. Comportamento das propriedades dos concretos afetados pela RAA	250
8.1.4. Comportamento expansivo dos testemunhos de concreto e corpos-de-prova moldados	252
8.1.5. Avaliação do ensaio ultra-sônico na investigação da RAA	253
8.1.6. Microestrutura dos concretos afetados pela RAA	255
8.1.7. Efeito do lítio na reação álcali-agregado	256
8.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	257
BIBLIOGRAFIA	259
APÊNDICE A - Investigação da água adsorvida, expansões e variação de massa.....	276
APÊNDICE B – Identificação dos testemunhos	290
APÊNDICE C – Absorção, índice de vazios e massa específica dos testemunhos de concreto.....	294
APÊNDICE D – Dados de expansão pelo método ASTM C-1260, ASTM C-1293, ANOVA e granulometria dos agregados	296
APÊNDICE E – Dados dos ensaios ultra-sônicos com o concreto da galeria	302
APÊNDICE F – Medidas de carbonatação.....	305
APÊNDICE G – Dados de expansão e variação de massa na expansão dos testemunhos....	308
APÊNDICE H – Dados dos ensaios ultra-sônicos na expansão com os testemunhos	313
APÊNDICE I – Dados utilizados no estudo do comportamento das propriedades mecânicas dos testemunhos	315
APÊNDICE J – Dados dos ensaios ultra-sônicos na expansão com os prismas de concreto	317
APÊNDICE K – Dados relativos ao potencial zeta	319
APÊNDICE L – Difractogramas dos reagentes	321
APÊNDICE M – Espectros de RNM dos padrões utilizados.....	323

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas (TURRIZIANI, 1986).....	44
Figura 2: Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas (TURRIZIANI, 1986).....	44
Figura 3: Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, segundo o conceito da dupla camada difusa (MITCHELL, 1992).....	47
Figura 4: Vista aérea da UHE Furnas.....	53
Figura 5: Arranjo geral da UHE Furnas.....	54
Figura 6: Seção transversal do vertedouro.....	55
Figura 7: Detalhe da fissura em bloco de apoio do conduto forçado.....	57
Figura 8: Detalhe das fissuras na lateral de um pilar do vertedouro – sentido montante..	57
Figura 9: Desnivelamento entre juntas e fissuras superficiais (vertedouro / muro de transição).....	58
Figura 10: Fissuras no topo do pilar n.5, sentido vertedouro/ombreira esquerda.....	58
Figura 11: Detalhe das fissuras mapeadas no topo do pilar.....	59
Figura 12: Fissura abrangendo toda a seção transversal do pilar.....	59
Figura 13: Fissuras na face lateral do pilar n.6, sentido jusante.....	59
Figura 14: Detalhe das recuperações realizadas nos pilares do vertedouro.....	61
Figura 15: Tela metálica posicionada e tubos de pvc para injeção de calda nas fissuras do pilar a montante do vertedouro.....	61
Figura 16: Projeção de argamassa na face dos pilares a montante do vertedouro.....	61
Figura 17: Vista geral da obra recuperada.....	62
Figura 18: Vista geral do vertedouro da UHE Furnas.....	63
Figura 19: Interior da galeria de drenagem do vertedouro.....	64
Figura 20: Fluxograma das atividades do Programa Experimental.....	65
Figura 21: Croqui - seção em corte do vertedouro - detalhe dos furos de extração (sentido montante/jusante) nos blocos de concreto da galeria de drenagem da UHE Furnas.....	72

Figura 22: Corte longitudinal da galeria de drenagem do vertedouro da UHE Furnas apresentando distribuição dos furos de extração a jusante.....	74
Figura 23: Corte longitudinal da galeria de drenagem do vertedouro da UHE Furnas apresentando distribuição dos furos de extração a montante.....	75
Figura 24: Representação de um picnômetro	91
Figura 25: Esquema representativo da dupla camada elétrica e do potencial zeta. (Hunter, 1981; Everett, 1988; Hunter, 1993; Myers, 1999).....	95
Figura 26: Detalhe de fissura horizontal na superfície do concreto.....	109
Figura 27: Detalhe do gel exsudado e manchas escuras ao redor exsudado.....	119
Figura 28: Detalhe de gel exsudando a partir de uma fissura na superfície do concreto..	109
Figura 29: Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - Concretos Classe 0, 1 e 2 – Método Indireto.....	110
Figura 30: Manchas escuras (C0-B1-16).....	114
Figura 31: Poro branco e manchas (C0-B1-12).....	114
Figura 32: Poro branco (C0-B4-7).....	114
Figura 33: Manchas (C0-B5-2).....	114
Figura 34: Borda de reação (C0-B5-15).....	114
Figura 35: Poro com deposição branca (C0-B5-15).....	114
Figura 36: Manchas escuras (C1-B1-48A).....	115
Figura 37: Poro branco (C1-B2-64A).....	115
Figura 38: Mancha e borda de reação (C1-B3-30A).....	115
Figura 39: Poro com deposição branca e mancha (C1-B4-50A).....	115
Figura 40: Borda de reação (C1-B5-58A).....	115
Figura 41: Fissuras no agregado e poro branco (C1-B5-57A).....	115
Figura 42: Poro branco próximo ao agregado (C2-B1-28).....	116
Figura 43: Borda de reação (C2-B2-25A).....	116
Figura 44: Manchas (C2-B4-12A).....	116
Figura 45: Fissuras cortando os agregados e preenchidas por gel na argamassa (C2-B4-12A).....	116

Figura 46: Poro branco e fissura no agregado (C2-B5-3A).....	116
Figura 47: Descolamento na interface com o agregado (C2-B5-3A).....	116
Figura 48: Manchas (C2-B5-3A).....	117
Figura 49: Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - concretos classe 0, 1 e 2 – método direto.....	117
Figura 50: Resistência à compressão das classes C0, C1 e C2.....	120
Figura 51: Módulo de elasticidade das classes C0, C1 e C2.....	123
Figura 52: Correlação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos	124
Figura 53: Resistência à tração por compressão diametral das classes C0, C1 e C2.....	126
Figura 54: Correlação entre os dados da resistência à compressão e tração diametral.....	127
Figura 55: Equivalente alcalino das amostras.....	132
Figura 56: Fotomicrografia da amostra C0-15 e semelhante à amostra C1-34A - Quartzos estirados, suturados e com extinção ondulante; finas palhetas de muscovita (coloridas) orientadas entre os grãos de quartzo. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados.	134
Figura 57: Fotomicrografia da amostra C2-17A – Detalhe de uma região contendo intensa extinção ondulante nos grãos de quartzo suturados. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados.	134
Figura 58: Fotomicrografia apresentando cristais de hematita na matriz de silicatos.....	135
Figura 59: Micrografia indicando região maciça.....	137
Figura 60: Micrografia indicando um poro com deposição de etringita.....	137
Figura 61: Espectro na região central na Figura 59.....	137
Figura 62: Micrografia apresentando gel gretado botrioidal.....	137
Figura 63: Micrografia apresentando produtos cristalizados sobre o agregado.....	137
Figura 64: Espectro característico do gel gretado.....	138
Figura 65: Micrografia apresentando produtos cristalizados da RAA no poro.....	138
Figura 66: Micrografia indicando gel maciço gretado.....	138
Figura 67: Micrografia apresentando os produtos cristalizados observados na interface.	138
Figura 68: Micrografia do gel na borda do poro.....	139

Figura 69: Micrografia dos produtos cristalizados observados nos poros.....	139
Figura 70: Micrografia mais ampliada dos produtos cristalizados.....	139
Figura 71: Micrografia indicando a presença da etringita na argamassa.....	139
Figura 72: Espectro referente aos produtos cristalizados da RAA nos poros.....	139
Figura 73: Micrografia apresentando cristais depositados no poro.....	140
Figura 74: Micrografia da fase maciça gretada na argamassa.....	140
Figura 75: Micrografia indicando a presença de finas acículas na argamassa.....	140
Figura 76: Espectro referente à fase maciça gretada observada na argamassa.....	140
Figura 77: Espectro referente aos cristais apresentados na Figura 73.....	141
Figura 78: Micrografia apresentando formação de acículas na região de interface.....	141
Figura 79: Micrografia do gel maciço gretado.....	141
Figura 80: Micrografia mostrando vários poros preenchidos por gel.....	142
Figura 81: Micrografia indicando a presença de cristais rendados na argamassa.....	142
Figura 82: Espectro referente ao gel maciço gretado da Figura 79.....	142
Figura 83: Expansão residual – Classe 0 – Condição E1 – Elevada umidade (38°C).....	143
Figura 84: Expansão residual – Classe 1 – Condição E1 – Elevada umidade (38°C).....	144
Figura 85: Expansão residual – Classe 2 – Condição E1 – Elevada umidade (38°C).....	144
Figura 86: Expansão residual – Classe 0 – Condição E2 – Imersão em água (38°C).....	146
Figura 87: Expansão residual – Classe 1 – Condição E2 – Imersão em água (38°C).....	147
Figura 88: Expansão residual – Classe 2 – Condição E2 – Imersão em água (38°C).....	147
Figura 89: Expansão residual – Classe 0 – Condição E3 – Imersão em NaOH (38°C).....	149
Figura 90: Expansão residual – Classe 1 – Condição E3 – Imersão em NaOH (38°C).....	149
Figura 91: Expansão residual – Classe 2 – Condição E3 – Imersão em NaOH (38°C).....	150
Figura 92: Expansão residual – Classe 1 – Condição E4 – Imersão em solução com relação molar de 0,74 M LiNO ₃ :1 M NaOH.....	152
Figura 93: Expansão residual – Classe 1 – Condição E5 – Imersão em 1M de NaOH (38°C) após tratamento com lítio.....	152
Figura 94: Curvas ajustadas para a condição C0-E1.....	156

Figura 95: Curvas ajustadas para a condição C1-E1.....	156
Figura 96: Curvas ajustadas para a condição C2-E1.....	157
Figura 97: Curvas ajustadas para a condição C0-E2.....	158
Figura 98: Curvas ajustadas para a condição C1-E2.....	158
Figura 99: Curvas ajustadas para a condição C2-E2.....	159
Figura 100: Curvas ajustadas para a condição C0-E3.....	160
Figura 101: Curvas ajustadas para a condição C1-E3.....	161
Figura 102: Curvas ajustadas para a condição C2-E3.....	161
Figura 103: Curvas ajustadas para a condição C1-E4.....	162
Figura 104: Curvas ajustadas para a condição C1-E5.....	163
Figura 105: Comportamento médio das classes C0, C1 e C2 na condição E1 – elevada umidade (38°C).....	164
Figura 106: Comportamento médio das classes C0, C1 e C2 na condição E2 – imersão em água (38°C).....	165
Figura 107: Comportamento médio das classes C0, C1 e C2 na condição E3 – imersão em NaOH (38°C).....	166
Figura 108: Comportamento médio das condições E3, E4 e E5.....	168
Figura 109: Velocidades ultra-sônicas – classe 0, condição E1 – elevada umidade (38°C).....	169
Figura 110: Velocidades ultra-sônicas – classe 1 e 2, condição E1 – elevada umidade (38°C).....	169
Figura 111: Velocidades ultra-sônicas – classe 0, condição E2 – elevada umidade (38°C).....	170
Figura 112: Velocidades ultra-sônicas – classe 1 e 2, condição E2 – elevada umidade (38°C).....	170
Figura 113: Velocidades ultra-sônicas – classe 0, condição E3 – elevada umidade (38°C).....	171
Figura 114: Velocidades ultra-sônicas – classe 1 e 2, condição E3 – elevada umidade (38°C).....	171
Figura 115 Velocidades ultra-sônicas pelo método direto e indireto.....	172
Figura 116: Relação entre o método de transmissão direta e indireta.....	173

Figura 117: Módulo de elasticidade secante x velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.....	174
Figura 118: Módulo de elasticidade secante x módulo dinâmico dos testemunhos de concreto.....	174
Figura 119: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras da classe C0 (Jusante).....	175
Figura 120: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras da classe C1 e C2 (Montante).....	176
Figura 121: Comparação entre os resultados dos ensaios mecânicos e a curva da norma brasileira para os testemunhos extraídos.....	177
Figura 122 Comparação entre os resultados de expansão e o módulo de elasticidade.....	178
Figura 123: Comparação entre os resultados de expansão e a resistência à compressão..	178
Figura 124: Modelo referente à resistência à compressão e resultados de ensaio.....	180
Figura 125: Modelo referente ao módulo de elasticidade e resultados de ensaio.....	181
Figura 126: Detalhe do agregado quartzito exibindo grãos de quartzo estirados, suturados e com extinção ondulante, e finas palhetas de muscovita (coloridas) orientadas entre os grãos de quartzo. Imagem ao microscópio ótico, polarizador cruzado.....	184
Figura 127: Fotomicrografia do quartzito mostrando apenas um grão de pirita (Pi) com hábito subhédrico alterando-se para limonita (Lm) nas bordas e com microfratura no centro em meio aos silicatos (Sil).....	185
Figura 128: Comportamento expansivo do agregado quartzito através do método acelerado.....	186
Figura 129: Comportamento expansivo dos prismas de concreto de referência.....	188
Figura 130: Comportamento expansivo dos prismas de concreto tratados com lítio.....	189
Figura 131: Comparação entre o comportamento médio da expansão a partir das amostras de referência e tratadas com lítio.....	190
Figura 132: Vista geral dos prismas de concreto aos 4 meses apresentando algumas manchas escuras precipitado branco aos 4 meses.....	192
Figura 133: Vista geral dos prismas de concreto de referência com espalhamento de eflorações brancas na superfície - 12 meses.....	192
Figura 134: Detalhe mais ampliado de um dos prismas mostrando a abrangência dos sintomas na amostra de referência aos 12 meses.....	192

Figura 135: Vista geral dos prismas de concreto tratados com lítio aos 12 meses indicando uma menor deterioração visual.....	192
Figura 136: Detalhe mais ampliado mostrando algum manchamento e pontos brancos, quase imperceptíveis, espalhados no concreto tratado com lítio - 12 meses.....	192
Figura 137: Comparação entre os resultados de expansão em barras de argamassa (BA) e prismas de concreto (PC).....	194
Figura 138: Comportamento da velocidade ultra-sônica dos prismas de concreto de referência ao longo do ensaio de expansão.....	195
Figura 139: Comportamento da velocidade ultra-sônica dos prismas de concreto de referência ao longo do ensaio de expansão.....	196
Figura 140: Correlação entre o comportamento médio da velocidade ultra-sônica a partir das amostras de referência e tratadas com lítio ao longo do ensaio de expansão.....	197
Figura 141: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras de referência.....	198
Figura 142: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras tratadas com lítio.....	199
Figura 143: Correlação entre variação média da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras de referência e tratadas com lítio.....	200
Figura 144: Resistência à compressão média dos corpos-de-prova ao longo do tempo...	201
Figura 145: Módulo de elasticidade médio dos corpos-de-prova ao longo do tempo.....	203
Figura 146: Resistência à tração por compressão diametral média dos corpos-de-prova ao longo do tempo.....	205
Figura 147: Comparação entre os resultados dos ensaios mecânicos e a curva da norma brasileira para os concretos moldados.....	208
Figura 148: Correlação entre os dados da resistência à compressão e tração diametral para os concretos moldados.....	209
Figura 149: Aparência dos géis coletados na superfície do concreto afetado pela RAS...	211
Figura 150: Amostras de gel.....	212
Figura 151: Formatos variados do gel.....	212
Figura 152: Aspecto vítreo com superfície lisa do gel.....	212
Figura 153: Superfície rugosa.....	212

Figura 154: Absorção de água em função do tempo para amostras de gel submetidas a ambiente saturado de vapor de água.....	216
Figura 155: Amostras de gel original (A) e submetidas a diferentes temperaturas: 110°C, 500°C e acima de 1000°C.....	217
Figura 156: Porção interna da amostra de gel A após exposição a 500°C.....	217
Figura 157: Detalhe de uma amostra de gel estirada a temperaturas acima de 1000°C....	218
Figura 158: Potencial zeta em função do pH para suspensões aquosas de gel - média de dez medidas para cada amostra.....	219
Figura 159: Curvas TG/DTG do gel puro.....	221
Figura 160: Curvas DTA do gel puro apresentando apenas picos endotérmicos.....	222
Figura 161: Detalhe da fase maciça do gel A.....	224
Figura 162: Detalhe dos produtos cristalizados – gel A.....	224
Figura 163: Detalhe de uma região com grande concentração de poros – gel A.....	224
Figura 164: Fases tabulares ricas em sódio depositadas na superfície do gel tipo A.....	224
Figura 165: Acículas no poro do gel A.....	225
Figura 166: Outra região com cristais aciculares dispersos no gel A.....	225
Figura 167: Espectro de raios X da região maciça da porção interna do gel.....	225
Figura 168: Espectro de raios X característico da fase tabular.....	226
Figura 169: Espectro de raios X dos produtos aciculares.....	226
Figura 170: Fases tabulares bem cristalizadas presentes no gel B.....	226
Figura 171: Região maciça contendo algumas fases tabulares presentes no gel C.....	226
Figura 172: Deposição de cristais aciculares no poro do gel D.....	227
Figura 173: Concentração de fases cristalizadas e poros fechados no gel D.....	227
Figura 174: Região externa do gel A.....	227
Figura 175: Detalhe da Micrografia 5.6.....	227
Figura 176: Difratoograma de raios X das amostras de gel A, B, C e D.....	228
Figura 177: Difratoograma de raios X da amostras de gel A atacado.....	229
Figura 178: Difratoograma de raios X das amostras de gel A puro e gel A atacado.....	230

Figura 179: Espectro de transmitância de infravermelho do gel puro.....	232
Figura 180: Espectro de transmitância de infravermelho do gel, após exposição à solução de lítio.....	232
Figura 181: Ampliação da região de número de onda entre 800 e 1300 cm^{-1} do espectro de infravermelho do gel puro. Espectro convertido para unidades de absorbância.....	235
Figura 182: Ampliação da região de número de onda entre 800 e 1300 cm^{-1} do espectro de infravermelho do gel após exposição ao lítio. Espectro convertido para unidades de absorbância.....	235
Figura 183: Regiões entre 800 e 1400 cm^{-1} de espectros de infravermelho, obtidos na literatura (Sanders, Person & Hench, 1974) de vidros contendo K_2O e Na_2O em diferentes porcentagens molares na composição.....	236
Figura 184: Espectros de RNM do ^{29}Si referentes aos quatro géis.....	238
Figura 185: Representação esquemática dos grupos Q^n	239
Figura 186: Espectros de RNM do ^{23}Na referentes aos quatro géis.....	241
Figura 187: Espectros de RNM do ^{29}Si referente ao gel A atacado com lítio.....	242
Figura 188: Comparação entre os espectros de RNM do ^{29}Si do gel A puro e gel A atacado.....	243
Figura 189: Comparação entre os espectros de RNM do ^{23}Na do gel A puro e gel A atacado.....	244
Figura 190: Comparação entre os espectros de RNM do ^7Li do gel A atacado e da referência LiNO_3	246
Figura A-1: Fluxograma das Etapas realizadas com as argamassas.....	277
Figura A-2: Variações de massa nas amostras de referência e imersas em água a 21°C...	280
Figura A-3: Variações de massa nas amostras de referência e imersas em água a 38°C...	280
Figura A-4: Variações de massa nas amostras atacadas e imersas em água a 21°C.....	281
Figura A-5: Variações de massa nas amostras atacadas e imersas em água a 38°C.....	281
Figura A-6: Expansões medidas nas amostras de referência e imersas em água a 21°C...	282
Figura A-7: Expansões medidas nas amostras de referência e imersas em água a 38°C...	283
Figura A-8: Expansões medidas nas amostras atacadas e imersas em água a 21°C.....	283
Figura A-9: Expansões medidas nas amostras atacadas e imersas em água a 41°C.....	284

Figura A-10: Comparativo entre a amostra de referência e submetida ao ensaio de reatividade (RA) para a evaporação acumulada do quartzito de Furnas.....	286
Figura A-11: Expansão x água adsorvida.....	287

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes dos concretos aplicados na UHE Furnas.....	56
Tabela 2: Características físicas e mecânicas do cimento.....	67
Tabela 3: Características químicas do cimento.....	68
Tabela 4: Composição de Bogue (%).....	68
Tabela 5: Características dos agregados.....	69
Tabela 6: Ensaio propostos no programa experimental.....	69
Tabela 7: Distribuição dos ensaios em função dos 5 blocos criados – Classe 0 (sem indícios visuais de alteração - Jusante).....	79
Tabela 8: Distribuição dos ensaios em função dos 5 blocos criados – Classe 1 (concreto menos afetado pala RAA - montante).....	80
Tabela 9: Distribuição dos ensaios em função dos 5 blocos criados – Classe 2 (concreto mais afetado pala RAA - montante).....	81
Tabela 10: Distribuição dos testemunhos da segunda extração – sentido montante.....	82
Tabela 11: Quantidade de corpos-de-prova moldados e distribuição para ensaios.....	89
Tabela 12: Tipos de vibração e modos vibracionais de uma molécula (Silverstein & Webster, 2000).....	102
Tabela 13: Dados relativos à velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas – método indireto.....	110
Tabela 14: Análise de variância para a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - método indireto.....	110
Tabela 15: Características observadas nos testemunhos da Classe 0.....	111
Tabela 16: Características observadas nos testemunhos da Classe 1 – Concreto menos alterado.....	112
Tabela 17: Características observadas nos testemunhos da Classe 2 – Concreto mais alterado.....	112
Tabela 18: Características observadas nos testemunhos extraídos na segunda campanha de extração (ϵ_2) das Classes 1 e 2.....	113
Tabela 19: Dados relativos à velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas – método direto.....	118
Tabela 20: Análise de variância para a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - método direto.....	118

Tabela 21: Resultados de resistência à compressão dos testemunhos.....	119
Tabela 22: Análise de variância para a resistência à compressão.....	120
Tabela 23: Resultados de módulo de elasticidade dos testemunhos.....	122
Tabela 24: Análise de variância para o módulo de elasticidade.....	123
Tabela 25: Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos testemunhos.....	125
Tabela 26: Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral....	126
Tabela 27: Resultados de coeficiente de permeabilidade (k) dos testemunhos.....	128
Tabela 28: Análise de variância para a permeabilidade.....	129
Tabela 29: Medidas de carbonatação.....	130
Tabela 30: Álcalis totais e solúveis dos testemunhos de concreto.....	131
Tabela 31: Análise de variância para as expansões na condição E1.....	145
Tabela 32: Análise de variância para as expansões na condição E2.....	148
Tabela 33: Análise de variância para as expansões na condição E3.....	150
Tabela 34: Análise de variância para as expansões nas condições C1-E3, C2-E3, C1- E4 e C1-E5.....	153
Tabela 35: Agrupamento das médias obtido pelo método de Duncan.....	154
Tabela 36: Parâmetros determinados nos ajustes da condição E1.....	155
Tabela 37: Parâmetros determinados nos ajustes da condição E2.....	157
Tabela 38: Parâmetros determinados nos ajustes da condição E3.....	160
Tabela 39: Parâmetros determinados nos ajustes da condição C1-E4 e C1-E5.....	162
Tabela 40: Modelos utilizados no comportamento das propriedades mecânicas.....	180
Tabela 41: Expansões (%) obtidas para o quartzito, método acelerado.....	187
Tabela 42: Expansões (%) obtidas pelo método dos prismas de concreto aos 365 dias...	190
Tabela 43: Resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova.....	201
Tabela 44: Análise de variância para a resistência à compressão.....	202
Tabela 45: Resultados de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova.....	203

Tabela 46: Análise de variância para o módulo de elasticidade.....	204
Tabela 47: Resultados de resistência à tração dos corpos-de-prova.....	205
Tabela 48: Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral....	206
Tabela 49: Resultados de coeficiente de permeabilidade dos corpos-de-prova.....	207
Tabela 50: Análise de variância para permeabilidade.....	207
Tabela 51: Principais componentes químicos dos géis (em massa).....	212
Tabela 52: Quantidades molares dos principais componentes da amostra.....	213
Tabela 53: Composição estimada do gel.....	214
Tabela 54: Determinação da densidade do gel A.....	214
Tabela 55: Dados sobre o coeficiente de expansão térmica.....	218
Tabela 56: Microanálise por EDX (%) de 4 pontos selecionados na fase maciça do gel.	225
Tabela 57: Informações sobre os espectros ^{29}Si dos 4 géis A e A atacado.....	240
Tabela 58: Desvios químicos e largura dos picos dos géis A, B, C e D para o ^{23}Na	241
Tabela 59: Informações sobre os espectros ^{29}Si dos géis A e A atacado.....	243
Tabela 60: Informações sobre os espectros de ^{23}Na dos géis A e A atacado.....	245
Tabela A-1: Condições de secagem das barras de argamassa.....	279
Tabela A-2: Evaporação acumulada durante o período de secagem – amostras confeccionadas com o quartzito de Furnas (referente à presente pesquisa) e o quartzito e o basalto apresentado por Hasparyk (1999).....	285
Tabela A-3: Dados das expansões individuais no tempo após imersão.....	288
Tabela A-4: Dados dos ganhos de massa individuais no tempo após imersão.....	289

LISTA DE ABREVIATURAS

38G	- ambiente de elevada umidade a 40°C
AB1 a AB5	- curvas de ajuste das expansões para blocos de 1 a 5
AD	- água adicional
Am	- curvas de ajuste das expansões médias
ANOVA	- análise de variâncias
BA1 a BA3	- expansão das barras de argamassa no ensaio da ASTM C-1260 referente às amostras 1, 2 e 3
Bam	- expansão média das barras de argamassa no ensaio da ASTM C-1260
C0	- classe 0 referente ao concreto extraído no sentido jusante da galeria
C1	- classe 1 referente ao concreto extraído no sentido montante da galeria
C2	- classe 2 referente ao concreto extraído no sentido montante da galeria
CP	- corpo-de-prova
C.U.	- câmara úmida
δ	- desvio de RNM
DTA	- análise térmica diferencial
E	- módulo de elasticidade
E1 a E5	- condições diferentes de exposição dos testemunhos no ensaio de expansão:
- E1:	Condição de elevada umidade a 40°C
- E2:	Condição de imersão em água a 40°C
- E3:	Condição de imersão em NaOH (1N) a 40°C
- E4:	Condição de imersão em solução de LiNO ₃ :NaOH a 0,74M a 40°C
- E5:	Condição de imersão em NaOH (1N) a 40°C após tratamento com lítio
Eci	- módulo de elasticidade na idade i
EDX	- espectrômetro por energia dispersiva de raios X
Eq. Alcalino ou Na ₂ Oeq.	- equivalente alcalino = Na ₂ O+(0,658*K ₂ O)
exp	- exponencial
F	- parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos
F _{0,05}	- parâmetro tabela para um grau de significância de 5%
Fcal	- parâmetro calculado
fck	- resistência característica à compressão do concreto
FT	- transformada de Fourier
FWHM	- largura espectral de RNM a meia altura
GL	- grau de liberdade
I	- intensidade
IR	- radiação no infravermelho
k	- coeficiente de permeabilidade
L	- tratado com lítio
L1 a L4	- expansão dos prismas de concreto tratados com lítio no ensaio da ASTM C-1293 referente às amostras 1, 2, 3 e 4
Lm	- expansão média dos prismas de concreto tratados com lítio no ensaio da ASTM C-1293
MEV	- microscópio eletrônico de varredura
MQ	- média dos quadrados
NBO	- número de pontes de oxigênio
NS	- não significativo do ponto de vista de ANOVA

P	- permeabilidade
PC1 a PC4	- expansão dos prismas de concreto no ensaio da ASTM C-1293 referente às amostras 1, 2, 3 e 4
PCm	- expansão média dos prismas de concreto no ensaio da ASTM C-1293
Q ⁿ	- parâmetro indicativo do grau de conectividade do silicato
R	- referência
R ²	- coeficiente de correlação
R1 a R4	- expansão dos prismas de concreto de referência no ensaio da ASTM C-1293 referente às amostras 1, 2, 3 e 4
RAA	- reação álcali-agregado
RAS	- reação álcali-sílica
REEi	- ensaio de resistência à compressão em conjunto com módulo de elasticidade após ensaio de expansão na condição i (i=1, 2 ou 3)
Rc	- resistência à compressão
Rm	- expansão média dos prismas de concreto de referência no ensaio da ASTM C-1293
RNM	- ressonância nuclear magnética
Rt	- resistência à tração
S	- significativo do ponto de vista de ANOVA
S	- desvio dos resíduos
SE	- detector de elétrons secundários
SQ	- soma dos quadrados
t	- tempo
Tg	- temperatura de transição vítrea
TG	- termogravimetria
UHE	- Usina Hidroelétrica
Vm	- variação de massa

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A reação álcali-agregado (RAA) é um fenômeno patológico que ocorre no concreto e que pode desencadear problemas tanto em nível estrutural como operacional. Dependendo das condições a que a estrutura de concreto está exposta, esta reação deletéria gera expansões intensas que podem ser observadas em diferentes idades, a partir da sua instalação, dependendo do grau de reatividade do agregado. Existem relatos da confirmação da existência da RAA logo após o início da construção, porém outros casos clássicos envolvem observação da patologia em longo prazo.

O desenvolvimento deste fenômeno patológico no concreto tem ocasionado a degradação e a desativação de diversas estruturas, tais como barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Por exemplo, tem-se hoje relatado no meio técnico mais de 140 casos de barragens afetadas pela RAA. Nas estruturas em que se encontram instalados equipamentos hidrodinâmicos e elétricos, como comportas, geradores e turbinas, os problemas causados pela RAA passam a ter uma maior dimensão e os custos decorrentes da manutenção e reparo são, na maioria das vezes, bastante elevados. Atualmente o fenômeno passou também a ser diagnosticado em fundações de edificações no Brasil, desafiando a engenharia nacional.

Apesar deste fenômeno ter sido descoberto há mais de 60 anos (STANTON, 1940), ainda existem grandes dificuldades de entender melhor os mecanismos envolvidos e controlar a ação deletéria da RAA já instalada no concreto. Uma vez iniciada, ainda não se dispõe de uma maneira totalmente eficiente de interromper a evolução da RAA, e a conseqüente expansão, em qualquer tipo de estrutura de concreto.

Dada a carência de estudos mais aprofundados nesta área, e com o desafio de minimizar a incidência da RAA nas estruturas de concreto, a presente pesquisa é proposta. Com este trabalho, espera-se contribuir para um melhor entendimento deste fenômeno patológico e para o aumento da durabilidade e vida útil de estruturas de concreto, principalmente das barragens, evitando ou reduzindo eventuais problemas futuros decorrentes da RAA.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral contribuir para o entendimento do comportamento da reação álcali-agregado através de um estudo de caso, a partir da investigação do gel exsudado, produto formado na reação, e das características e propriedades de testemunhos de concreto afetados pela RAA contendo o quartzito reativo, ambos coletados na Usina Hidrelétrica de Furnas (UHE Furnas).

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Avaliar as características mineralógicas do agregado quartzito, procedente da UHE Furnas e empregado nas estruturas de concreto, investigando também a sua capacidade de reagir com os álcalis e gerar expansões, partindo-se da hipótese que a deformação dos cristais de quartzo é a responsável pela reatividade do agregado;
- b) Avaliar as características visuais, químico-físicas, morfológicas, microestruturais, cristalográficas bem como em nível atômico de amostras de gel da RAA, correlacionando-as com sua capacidade de expansão;
- c) Investigar as propriedades dos testemunhos de concreto extraídos da galeria de drenagem da UHE Furnas, afetados pela RAA, e de concretos moldados em laboratório, considerando a hipótese que a resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e permeabilidade podem ser influenciados pela RAA;
- d) Avaliar o comportamento expansivo tanto do concreto atacado pela RAA e extraído da UHE de Furnas, com relação a possíveis expansões residuais, como de corpos-de-prova moldados em laboratório, submetidos a várias condições de exposição;
- e) Correlacionar as características visuais de deterioração do concreto com a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, partindo-se da hipótese que esta propriedade possa auxiliar na investigação do grau de deterioração do concreto frente à RAA;

- f) Buscar uma possível correlação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e as expansões medidas no concreto atacado pela RAA;
- g) Correlacionar as características visuais de deterioração dos concretos atacados pela RAA com a microestrutura dos produtos da reação presentes;
- h) A partir dos resultados obtidos nos itens anteriores, e com o aprofundamento do conhecimento dos mecanismos envolvidos na RAA, buscar uma forma, através da aplicação de um produto químico à base de lítio, de interromper ou minimizar as futuras expansões residuais nos testemunhos de concreto já atacados e em corpos-de-prova moldados em laboratório e um maior entendimento da ação do lítio.

1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho foi dividido em nove capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução, contemplando a importância e relevância do tema estudado, os objetivos, e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo consiste de uma revisão da literatura, apresentando os principais aspectos da RAA relativos ao escopo do programa experimental desenvolvido. É apresentada uma introdução teórica sobre o assunto, incluindo os fundamentos da RAA, e cobrindo os aspectos químicos da RAA, os mecanismos envolvidos na expansão e o efeito de adições químicas no concreto.

No Capítulo 3 são abordadas informações gerais sobre a UHE Furnas, na qual foram extraídas as amostras para o programa experimental. São apresentados os principais aspectos da época da sua construção e o acompanhamento de RAA ao longo do tempo, com as intervenções já realizadas.

O programa experimental está detalhado no quarto capítulo, sendo descritos, além dos materiais empregados na pesquisa e o planejamento dos experimentos, a parte relativa às três principais abordagens da pesquisa, os ensaios com o concreto da galeria de drenagem, a investigação do agregado quartzito e o estudo do gel exsudado. Neste capítulo, está incluída também toda a parte de amostragem de testemunhos de concreto extraídos da UHE de Furnas,

descrevendo a distribuição dos testemunhos por meio de um projeto de blocos aleatorizados e os respectivos métodos de ensaios empregados.

Os Capítulos 5, 6 e 7 contém a apresentação, análise e discussão de todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais bem como as várias correlações entre os resultados realizadas.

As conclusões obtidas estão presentes no Capítulo 8 juntamente com as considerações finais e sugestões para futuras pesquisas.

2. ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre a reação álcali-agregado (RAA), destacando os principais aspectos relacionados ao tema em estudo.

O concreto pode estar sujeito a diferentes tipos de deterioração, sendo que os processos envolvidos podem ser subdivididos em químicos, físico-mecânicos, eletroquímicos e biológicos. A RAA é um processo químico de deterioração que pode ocorrer no interior do concreto afetando o seu desempenho e durabilidade.

2.1. FUNDAMENTOS DA RAA

A Reação Álcali-Agregado (RAA) pode ser definida como um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer a resistência e elasticidade de um concreto afetando, por conseguinte, a sua durabilidade.

O estudo da RAA teve seu marco inicial em meados de 1940, quando Stanton identificou este processo como sendo uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do concreto, a sílica do agregado e os álcalis do cimento, o qual denominou reação álcali-agregado. Segundo constatações experimentais realizadas por Stanton, a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causando fissurações similares àquelas observadas em diversas estruturas reais afetadas na Califórnia, durante os anos 1920 a 1930 (STANTON, 1940). Em seguida, em 1941, é apresentado um artigo por Blanks e Meissner sobre a deterioração da barragem Parker Dam pela RAA (POOLE, 1992).

Logo após a descoberta da RAA, diversos pesquisadores passaram a investigar este fenômeno patológico, em vários países, havendo inicialmente uma busca crescente na identificação das formas minerais presentes nos agregados que pudessem ser consideradas reativas. Segundo Poole (1992), entre os diversos pesquisadores de destaque no entendimento da reação encontram-se Swenson do Canadá, Idorn da Dinamarca e Vivian da Austrália. De qualquer forma, foram vários os pesquisadores que se motivaram a estudar o assunto, contribuindo tanto no que diz respeito ao processo químico envolvido e a identificação dos minerais reativos, como no campo das conseqüências e fatores intervenientes, com a identificação de casos reais de estruturas afetadas por esta patologia.

Ressalta-se que as principais causas da instalação da RAA são a presença, no agregado, de minerais reativos que reagem com os álcalis do cimento. Entretanto, influências externas como a umidade e temperatura são condicionantes importantes do processo deletério (BICZOK, 1972; HOBBS, 1988; DIAMOND, 1989; TAYLOR, 1997).

De acordo com Taylor (1997), a deterioração devida à RAA pode ocorrer em questão de dias, ou após anos. Poole (1992) comenta que a reação normalmente leva de 5 a 12 anos para se desenvolver. Biczok (1972) apresentou um caso de fortes expansões e fissuração após sete anos de construção (SE Jutlandia). O tempo necessário para notar indícios da RAA ou danos em uma estrutura depende de vários fatores, destacando-se o tipo e proporcionamento dos agregados, o teor de álcalis do cimento, a composição do gel (produto da reação formado), a temperatura e a umidade, entre outros fatores (BICZOK, 1972; DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986; HOBBS, 1988; BULLETIN 79, 1991; POOLE, 1992).

O processo químico de deterioração do concreto por RAA pode ser classificado de três formas, em função do tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido, como reação álcali-silica, reação álcali-silicato ou reação álcali-carbonato (HOBBS, 1988; STIEVENARD-GIREAUD, 1987; HOBBS, 1988; BULLETIN 79, 1991; POOLE, 1992; KIHARA, 1993; FURNAS, 1997).

A **reação álcali-silica (RAS)** é o tipo de RAA mais conhecida e relatada no meio técnico, sendo a que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas. Entre as formas minerais mais comuns destacam-se: a opala ou sílica amorfa, a calcedônia, a cristobalita, a tridimita, os vidros naturais e artificiais e o quartzo

microcristalino/criptocristalino e deformado (DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986; HOBBS, 1988; KIHARA, 1993; RODRIGUES, 1994; ACI 221, 1998).

Já a **reação** do tipo **álcali-silicato** geralmente se desenvolve de forma mais lenta, sendo pouco difundida e compreendida (POOLE, 1992). Segundo Regourd (1988), esta reação possui o mesmo princípio da reação álcali-sílica. Entretanto, uma vez que os minerais reativos estão mais disseminados na matriz, ocorre mais lentamente. Os minerais envolvidos são alguns tipos de silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos e hornfels) e ígneas (granitos). (KIHARA, 1986; HOBBS, 1988). Os minerais envolvidos na **reação álcali-silicato** mais mencionados são os expansivos do grupo dos filossilicatos, como a vermiculita, a illita e a montmorilonita (DUNCAN, GILLOTT & SWENSON, 1973, KIHARA, 1986; HOBBS, 1988). Nesta classificação também são destacados por Van Aardt & Visser (1977) e Visvesvaraya *et al.* (1986) os feldspatos alcalinos e alguns minerais presentes nos folhelhos argilosos. De acordo com Poole (1992), a reação álcali-sílica pode ocorrer simultaneamente com a reação álcali-silicato, prejudicando o diagnóstico da RAA. Neste caso, como mencionado por Hobbs (1988), o mesmo produto da reação álcali-sílica pode ser encontrado no concreto atacado pela reação álcali-silicato, uma vez que o quartzo microcristalino ou deformado está freqüentemente presente em agregados contendo filossilicatos.

A reação do tipo **álcali-carbonato** envolve uma interação química entre os álcalis e as dolomitas presentes nos calcários, promovendo a formação da brucita ($Mg(OH)_2$), processo conhecido como “desdolomitização”, que gera fissurações e o enfraquecimento da zona de transição (BICZOK, 1972; GILLOT, 1975; PAULON, 1981; STIEVENARD-GIREAUD, 1987; BULLETIN 79, 1991; OZOL, 1994; TAYLOR, 1997).

A forma com que os principais fatores interferem na velocidade e intensidade da reação álcali-agregado, de uma forma geral, são:

- quanto maiores o **teor de álcalis** do cimento e o consumo de cimento no concreto, maiores serão as expansões (BICZOK, 1972; POOLE, 1992);
- quanto mais desorganizada e instável é a **estrutura do mineral** presente no agregado, mais reativa será a fase. Em ordem decrescente de reatividade encontram-se os minerais com estrutura amorfa (opala e vidro), microcristalina a criptocristalina (calcedônia),

metaestável (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados). (BULLETIN 79, 1991; GLASSER, 1992; POOLE, 1992; KIHARA, 1993);

- em ambientes com **umidade** relativa acima de 80 a 85%, ocorre um aumento na magnitude da reação. As estruturas localizadas em ambientes úmidos tais como as barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas estão, portanto mais sujeitas a este tipo de deterioração (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Por outro lado, na falta de água ou umidade, a RAA pode ser limitada, mesmo na presença de agregados reativos e álcalis (BICZOK, 1972; TOMOSAWA, TAMURA & ABE, 1989; BULLETIN 79, 1991; POOLE, 1992);
- quanto maior a **temperatura** ambiente, mais rapidamente ocorrerá a reação. Isto pode ser explicado em decorrência do fato da maioria das reações químicas serem ativadas ou aceleradas por temperaturas elevadas (BICZOK, 1972; BULLETIN 79, 1991).

As manifestações mais comuns verificadas em estruturas de concreto atacadas são fissurações tipo “mapa”, exsudação de gel na superfície do concreto, bordas ao redor dos agregados, preenchimento de poros com material branco ou vítreo, microfissuração e descoloração do concreto (HOBBS, 1988; BULLETIN 79, 1991; POOLE, 1992; FURNAS, 1997; TAYLOR, 1997; ACI 221, 1998; GOULART NETO *et al.*, 1998, HASPARYK, 1999).

Em relação aos efeitos deletérios provocados pela RAA, destacam-se aqueles que afetam o concreto, propriamente dito, e aqueles que podem interferir no sistema operacional de uma usina hidroelétrica. Os principais efeitos relatados no meio técnico estão agrupados a seguir (POOLE, 1992; ACI 221, 1998; RELATÓRIO FINAL, 1999; HASPARYK *et al.*, 1997):

- grande incidência de fissuração na superfície do concreto e entre camadas de concretagem;
- deslocamentos na superfície do concreto;
- perda de estanqueidade;
- descolamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície dos agregados;
- movimentação (abertura e/ou deslocamento relativo) de juntas de contração;

- abertura de juntas de construção, com fissuras horizontais;
- movimentação/desalinhamento das superfícies livres (ex: alteamento da crista da barragem e soleiras de vertedouros, deflexões para montante nas estruturas de barragens);
- travamento e/ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (ex: comportas, turbinas, eixos, pistões, etc).

Adicionalmente, em um estágio mais avançado, a fissuração produzida no concreto afetado pela RAA pode permitir o ingresso externo de água, por exemplo, comprometendo de forma significativa a estanqueidade da estrutura, além de comprometer as propriedades mecânicas e elásticas do concreto.

No que diz respeito às medidas preventivas a serem adotadas com o objetivo de evitar a instalação da RAA e, conseqüentemente, os efeitos danosos às estruturas de concreto, destacam-se (HASPARYK, 1999):

- a) O estudo preliminar da rocha ou agregados a serem empregados na obra;
- b) a caracterização química do cimento a ser empregado na obra;
- c) os ensaios de laboratório sobre a reatividade da combinação cimento-agregado;
- d) o emprego de adições minerais.

São vários os ensaios de laboratório empregados para estudar a RAA. Dentre os principais voltados para a avaliação da rocha ou dos agregados encontra-se a análise petrográfica, que tem como objetivo identificar os minerais potencialmente reativos presentes, do ponto de vista da RAA. No estudo do cimento, é importante que seja verificado o teor de álcalis solúveis, o qual pode ser determinado através de sua análise química.

Os estudos da combinação cimento-agregado podem ser realizados através da norma americana ASTM C-1260, que trata de um ensaio de reatividade acelerado, na qual têm-se resultados em curto prazo (16 a 30 dias) sobre o comportamento expansivo da combinação estudada. Este método tem por objetivo investigar a RAA por meio avaliação da variação de comprimento de barras de argamassa imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH), de concentração 1N, a uma temperatura de 80°C. De acordo com a norma, se a expansão média

for menor do que 0,10%, é considerado um comportamento inócuo do agregado, na maioria dos casos; porém, se esta se encontrar entre 0,10 e 0,20%, o agregado é considerado potencialmente reativo, sendo necessários estudos adicionais para confirmar a sua reatividade, levando o ensaio até 28 dias. No caso das expansões se apresentarem superiores a 0,20%, o agregado será considerado reativo. Apesar dos limites propostos por norma, ainda existem muitas discussões quanto ao seu valor, destacando os trabalhos desenvolvidos por Stark *et al.* (1993), que sugerem que haja um único limite, e bem menor do que o proposto por norma, igual a 0,08%. Já Grosbois & Fontaine (2000a) sugerem limites de 0,06 a 0,08%.

Outra metodologia, contida na ASTM C-1293, investiga a reatividade do agregado, em prismas de concreto submetidos a um ambiente de elevada umidade, a 38°C, considerando um limite de 0,04% para as expansões. Entretanto, com esta metodologia torna-se necessário levar o ensaio até 365 dias, o que pode inviabilizar o seu emprego. Grosbois e Fontaine (2000b) propuseram fazer uma adaptação do método dos prismas de concreto, alterando a temperatura para 60°C, permitindo assim a redução do tempo de ensaio para três meses, propondo o mesmo limite na idade de 91 dias. De acordo com os pesquisadores, pode-se obter resultados satisfatórios e uma boa correlação com o método convencional.

Caso seja verificado, através da análise petrográfica, a presença de minerais potencialmente reativos, e esta reatividade seja comprovada através dos ensaios de reatividade, com expansões acima dos limites de norma, deverão ser tomadas medidas preventivas no que diz respeito à troca ou adequação dos materiais.

A primeira opção seria a utilização de um outro tipo de agregado comprovadamente não reativo. Entretanto, quando a jazida da rocha reativa é a única disponível nas proximidades da obra, nem sempre é possível e viável economicamente esta opção de troca. Em relação ao cimento, deve-se utilizar um tipo contendo baixo teor de álcalis. Segundo a ASTM C-150, um cimento com baixo teor de álcalis tem como requisito químico opcional que o equivalente alcalino ($\% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O}$) não exceda 0,60%. De acordo com o ACI Committee 221 (1998), o limite recomendado é de 0,40%. No entanto, fixar apenas este parâmetro não é garantia da inibição da reação além de também poderem existir fontes externas adicionais de álcalis.

Finalmente, mantendo-se o agregado reativo, deve-se então estudar outros tipos de cimento (Cimento Portland de Alto Forno - CP III ou Cimento Portland Pozolânico - CP IV), bem

como o emprego de adições minerais/pozolânicas tais como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, o metacaulim, a cinza volante ou as pozolanas naturais. Estes cimentos e os teores das adições a serem empregados devem ser investigados em conjunto com o agregado reativo, novamente através de ensaios de reatividade em laboratório, seguindo a ASTM C-1567, com o objetivo de verificar a melhor opção na inibição ou redução das expansões causadas pela RAA.

Verifica-se que o teor ideal de adição varia em função do tipo de agregado e o seu grau de reatividade tornando-se, portanto, imprescindível a investigação experimental do cimento e das adições, conforme comentado. De qualquer forma, para se ter uma idéia da faixa que normalmente tem sido empregada, a seguir são apresentados alguns teores de adição utilizados na prática ou sugeridos a partir de experimentações (MEHTA & MONTEIRO, 1994; ACI 221, 1998; HASPARYK, 1999; MALVAR *et al.*, 2002): sílica ativa de 10% a 15%, cinza de casca de arroz amorfa, acima de 12%, metacaulim de 10 a 25%, todos em substituição ao cimento e na presença de aditivo superplastificante, pozolana natural entre 20% e 30%, cinza volante entre 25% e 50% e escória de alto-forno moída, entre 40% e 65%.

Às vezes tornam-se necessárias medidas corretivas em estruturas deterioradas, que já apresentam o fenômeno da RAA instalado. Deve-se ressaltar que ainda não existe uma maneira completamente eficiente de combater a reação e suas expansões. Alguns procedimentos de reparo atualmente utilizados têm o objetivo de restringir a penetração de água, como aplicação de agentes hidrófobos (impregnantes/penetrantes), selantes, por meio de pinturas, por exemplo, ou impermeabilização com membranas; outras soluções de reparo são os reforços estruturais, que tem o objetivo de impedir as deformações, ou mesmo procedimentos relacionados a cortes na estrutura com o objetivo de liberar as deformações em determinadas direções. As soluções a base de lítio tem sido também estudadas (STARK *et al.*, 1993; FOLLIARD, THOMAS & KURTIS, 2003; FOURNIER *et al.*, 2005), porém ainda existem grandes questões a serem esclarecidas conforme será discutido no item 2.4.

2.2. ASPECTOS QUÍMICOS DA RAA

O presente item abordará, de forma mais detalhada os principais aspectos químicos envolvidos na **reação do tipo álcali-silica (RAS)**, uma vez que este assunto é escopo do trabalho desenvolvido.

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

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

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

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

De acordo com vários estudos desenvolvidos, comentados por Glasser (1992), a alcalinidade da solução dos poros do concreto é dominada principalmente pelos álcalis sódio e potássio, e não pelo cálcio. Assumindo uma completa dissociação dos compostos do tipo NaOH , por exemplo, o pH calculado pode chegar a elevados valores (>12) com concentrações acima de 0,01M de hidróxido de sódio.

De qualquer forma são os íons hidroxila, presentes na solução dos poros do concreto, que vão reagir com as formas de sílica reativas presentes nos agregados. Os compostos que contêm os

álcalis, mencionados anteriormente, ao participarem das reações de hidratação no concreto, formam produtos de baixa solubilidade, tais como a etringita, o C-S-H e as fases aluminato, liberando íons hidroxila. Os álcalis (sódio e potássio) participam nesta etapa apenas para balanceamento das cargas negativas, sendo incorporados ao gel, e uma vez que os seus hidróxidos são solúveis, permitem que os íons hidroxila (OH^-) entrem na solução dos poros (VIVIAN, 1951; HOBBS, 1988; GLASSER, 1992; TAYLOR, 1997).

De acordo com Glasser & Kataoka (1981a,b) e Glasser (1992), bem como relatos de outros pesquisadores (TURRIZIANI, 1986; STIEVENARD-GIREAUD, 1987; HOBBS, 1988; BULLETIN 79, 1991; HELMUTH & STARK, 1992; CAPRA *et al.*, 1995; FURNAS, 1997), o primeiro estágio da reação é definido como sendo do tipo ácido-base no qual o **grupo silanol (Si-OH)**, presente na superfície da sílica, é atacado pelos íons hidroxilas (OH^-), liberando água. Os cátions presentes no meio são atraídos se associando à estrutura deste grupo, desbalanceado negativamente pelo SiO^- , formando um gel sílico alcalino, conforme exemplificado a seguir e na Figura 1.



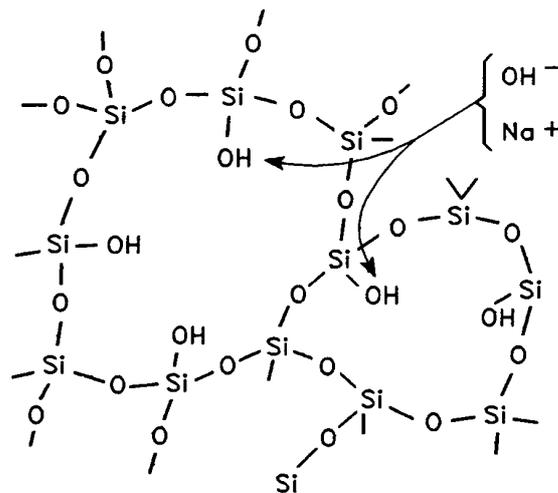


Figura 1: Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas.
Fonte: TURRIZIANI (1986)

Os íons hidroxila em excesso também atacam, em um segundo estágio, o **grupo siloxano (Si-O-Si)**, rompendo as suas ligações e substituindo-o por pares de SiO^- (equação 3). Desta forma, em um ambiente com alto pH, o silicato solúvel que representa o ácido ortossilícico (H_2SiO_4) fica em solução (Figura 2).

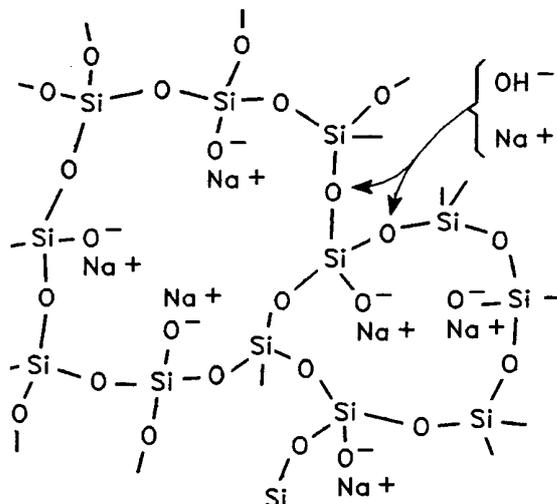
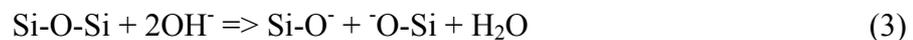


Figura 2: Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas
Fonte: TURRIZIANI (1986)

Taylor (1997) relata que este processo ocorre continuamente, sendo que, em um estágio mais avançado, provoca a fragmentação da estrutura tridimensional da sílica em anions de silicatos com tamanho variado.

As cargas negativas são balanceadas pelos cátions presentes, o sódio (Na^+) e o potássio (K^+), conforme exemplificado na equação 2, formando o gel da RAA (TAYLOR, 1997). De acordo com Knudsen & Thaulow (1975), Glasser (1992) e Taylor (1997), o gel silicato alcalino formado também pode incorporar os íons Ca^{2+} . Desta forma, o gel pode adquirir uma composição química variável e indefinida (POOLE, 1992). Adicionalmente, Hobbs (1988) sugere que a mobilidade e/ou fluidez do gel também é dependente da sua composição química, estando esta composição diretamente relacionada à sua capacidade de expansão, conforme comprovado por Hasparyk (1999).

O gel sílico-alcalino que é formado é hidrófilo e, ao absorver umidade, aumenta de volume, gerando pressões suficientes para danificar o concreto (POOLE, 1992). Glasser (1992) comenta, nessa mesma linha, que o volume específico e a densidade do gel é variável em função da quantidade de água presente e dos álcalis, sendo normalmente superior ao volume da sílica, criando as pressões expansivas. Adicionalmente, a extensão das expansões não é facilmente prognosticada. O pesquisador ainda relata que o gel não é muito solúvel e geralmente se concentra ao redor dos agregados, porém, um gel mais fluido pode ocorrer e exsudar na superfície do concreto durante o seu processo de inchamento.

O sistema de fissuras gerado pela expansão do gel pode permitir o surgimento de outros mecanismos de deterioração. A lixiviação, por exemplo, geralmente ocorre com a conseqüente precipitação dos carbonatos de cálcio na superfície do concreto pela percolação de água (POOLE, 1992).

2.3. MECANISMOS DE EXPANSÃO

As duas principais teorias propostas para explicar os mecanismos de expansão do gel proveniente da reação álcali-sílica são a teoria da pressão osmótica, desenvolvida por Hansen, e a teoria da adsorção, desenvolvida por Vivian (HOBBS, 1988), sendo esta última a mais aceita atualmente. De acordo com Diamond (1975), as evidências indicam que as expansões

são causadas por pressões mecânicas exercidas pelos produtos da reação no estado sólido ou semi-sólido, levando à formação e conseqüente abertura de fissuras.

A teoria da adsorção desenvolvida por Vivian está atribuída às tensões produzidas pelo crescimento do gel quando saturado. A expansão dependerá da concentração volumétrica do gel, de sua taxa de crescimento e suas propriedades físicas. Caso a taxa de crescimento ocorra lentamente, o gel pode migrar ao longo do concreto dissipando as tensões. Por outro lado, se ocorrer rapidamente, as tensões internas são capazes de aumentar a ponto de causar fissuração e expansão do gel (HOBBS, 1988). Maiores detalhes a esse respeito podem ser consultados em Hasparyk (1999).

Segundo o modelo proposto por Prezzi, Monteiro & Sposito (1997), é possível explicar melhor as expansões ou variações volumétricas causadas pela RAA a partir dos conceitos básicos da química de superfície. As expansões causadas pelo inchamento do gel são atribuídas às forças de repulsão da dupla camada elétrica. Segundo os pesquisadores, quando uma fase sólida entra em contato com uma fase líquida, a superfície do sólido carrega excesso de carga ficando a interface eletrificada. Este excesso de carga altera as propriedades das duas fases. A reação álcali-sílica está relacionada com a interação entre superfície da sílica altamente carregada presente no agregado e a solução dos poros do concreto. Esta reação promove a dissolução da sílica e a formação de um gel, que é expansivo na presença de água.

Uma dupla camada elétrica de cátions se desenvolve na superfície da sílica para neutralizar sua carga negativa (OLIVEIRA, 2000), sendo composta basicamente por íons sódio, potássio e cálcio. Os íons alcalinos são adsorvidos nos locais onde o oxigênio possui ligações incompletas na superfície da sílica amorfa, através de “forças eletrostáticas”. Esta troca iônica é similar ao comportamento ácido-base (MONTEIRO *et al.*, 1997; PREZZI *et al.*, 1997). Quanto maior o pH do meio, maior a tendência de ocorrer dissociação em água dos íons hidroxila na superfície da partícula, ficando a mesma mais eletrificada (MITCHELL, 1992). À medida que as reações vão ocorrendo, é gerado um sistema de fissuras, alterando a configuração dos poros do concreto e permitindo o ingresso mais fácil de água (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997).

Segundo Mitchell (1992), a superfície carregada e a carga distribuída na fase adjacente são denominadas “dupla camada difusa”. Na Figura 3 está apresentada a parte difusa de uma dupla camada elétrica em uma solução eletrolítica monovalente.

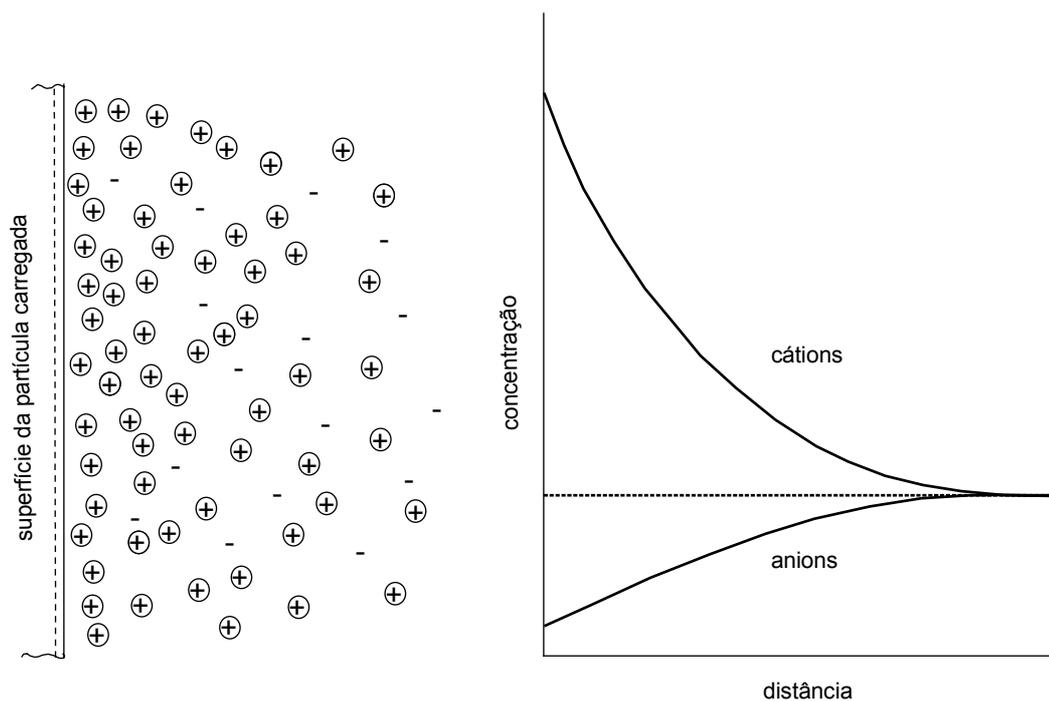


Figura 3: Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, segundo o conceito da dupla camada difusa (Fonte: MITCHELL, 1992).

As cargas negativas na superfície da partícula atraem os cátions e repelem os ânions. O campo elétrico criado pela partícula e o excesso localizado de cátions e a deficiência de ânions se combinam para criar uma força elétrica que interfere na espessura da dupla camada (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997). A força de atração ocorre provavelmente devido às forças de Van der Waals, sendo esta conhecida como a ligação que une as moléculas entre si (SANTOS, 1989); já a força de repulsão é atribuída ao complexo de adsorção (SOUZA, 1980). Segundo Mitchell (1992), outro fator que interfere na expansão é a temperatura e de acordo com a teoria da dupla camada, quanto maior a temperatura, maior será a espessura da camada.

Segundo Prezzi, Monteiro & Sposito (1997), e baseando-se no modelo de Gouy-Chapman, é possível estimar o valor da pressão induzida pela reação álcali-silica no concreto levando-se em consideração a parte difusa da dupla camada elétrica, podendo variar de 2,2 MPa a 10,3 MPa. Na prática, e de acordo com Diamond (1989), os valores das pressões causadas pela reação não excedem 6 MPa a 7 MPa, encontrando-se dentro da faixa de pressão calculada pelo modelo de Gouy-Chapman.

Quanto maior for a área de interface, maior será a quantidade de água adsorvida e, conseqüentemente maiores forças de repulsão se desenvolverão refletindo em elevadas expansões. A espessura da dupla camada e as forças de repulsão são governadas pela valência e a concentração dos íons presentes (OLIVEIRA, 2000). Para uma dada concentração, íons monovalentes Na^+ e K^+ produzem maiores espessuras na dupla camada em função de tenderem a se dispersar no complexo de adsorção, gerando assim maiores forças de repulsão do que íons bivalentes Ca^{2+} . Ou seja, mantendo-se todos os outros fatores constantes, um gel rico em sódio possui uma maior capacidade de expansão quando comparado com um gel rico em cálcio (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997).

2.4. EFEITO DE ADIÇÕES QUÍMICAS NA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Na tentativa de interferir no comportamento do gel e combater as expansões geradas, alguns pesquisadores tem estudado o efeito de adições químicas na reação álcali-agregado.

Estudos enfocando a dissolução da sílica como, por exemplo, o apresentado por Natesaiyer & Hover (1992), tiveram o objetivo de investigar o efeito de diversas adições químicas no controle da RAA. Dentre os compostos químicos estudados pelos pesquisadores, destacam-se o sulfato de alumínio e o sulfato de zinco entre os mais eficientes, sendo capazes de reduzir a solubilidade da sílica em 95% e 75%, respectivamente. Deve-se destacar que a reatividade do agregado é que governa a eficiência da adição na redução da solubilidade da sílica, sendo assim variável a concentração ótima das adições a serem empregadas.

Outras pesquisas foram realizadas por Stark (1992) e envolveram o estudo do LiF e Li_2CO_3 . De acordo com o autor, os sais à base de lítio podem prevenir as expansões acima de certos teores. Qinghan *et al.* (1995) também observaram que o LiNO_2 foi capaz de conter as expansões causadas pela reação álcali-sílica. Os autores acreditam que a eficiência do nitrito de lítio está relacionada com a relação molar Li/Na . Entretanto, apesar dos efeitos benéficos apontados na presença do lítio, ainda não se tem bem explicado o seu comportamento.

Já os estudos realizados por Prezzi *et al.* (1997) e Prezzi, Monteiro & Sposito (1998) foram bastante abrangentes, sendo investigados diversos compostos químicos tais como: NaOH , KOH , LiOH , Ca(OH)_2 , NaCl , KCl , LiCl , CaCl_2 , MgCl_2 , AlCl_3 , Na_2CO_3 , Li_2CO_3 e K_2CO_3 . Os

estudos envolveram ensaios acelerados na presença destes compostos com o objetivo de investigar o comportamento da RAA. Os compostos a base de lítio (hidróxidos e carbonatos) mostraram-se capazes de reduzir as expansões a níveis abaixo dos limites prescritos por norma.

Nesta mesma linha, Diamond (1999) estudou o efeito do nitrato de lítio na concentração dos íons hidroxila em pastas de cimento e verificou que, ao contrário do que acontece na presença do hidróxido de lítio, a sua introdução não reflete em um aumento significativo da concentração de OH^- , mostrando o seu efeito benéfico. Inclusive o pesquisador alerta quanto ao efeito do LiF e Li_2CO_3 , que ao aumentar esta concentração de OH^- podem se tornar ineficientes ou mesmo prejudiciais. Adicionalmente o pesquisador constata que o lítio, como nitrato, pode estar sujeito à sua incorporação nos produtos de hidratação, sendo necessária atenção especial quanto à dosagem correta da adição com o objetivo de não limitar sua eficiência quando da sua incorporação no gel da RAS. Malvar *et al.* (2002), mais especificamente no estudo da reação álcali-carbonato, observaram também aumento das expansões com os compostos LiOH e Li_2CO_3 , indicando a existência de teor péssimo.

Outras investigações, agora envolvendo a microscopia de transmissão de raios X mole (KURTIS *et al.*, 1998), foram realizadas com o gel exposto a soluções de hidróxido de cálcio, de hidróxido de sódio, ou ambos combinados. As análises do gel puro não indicaram qualquer forma cristalina corroborando as análises por difração de raios X. Porém, na presença do hidróxido de sódio combinado com hidróxido de cálcio, a morfologia sugere a dissolução da sílica, reação com íons cálcio, repolimerização e posterior agregação. O gel apenas em contato com o hidróxido de sódio apresentou-se com menor densidade (dissolução superficial) facilitando a penetração dos íons alcalinos e aumentando a solubilidade da sílica. Já na presença apenas do hidróxido de cálcio, são formados produtos aciculares cristalizados semelhantes ao C-S-H, segundo os pesquisadores, provavelmente com baixo caráter expansivo.

Kurtis & Monteiro (2003) estudaram especificamente o gel exsudado da RAS coletado na Usina de Furnas e o efeito de compostos químicos na sua estrutura, como o NaOH puro e o CaCl_2 , LiCl e a acetona em combinação com NaOH , através de microscopia de raios x mole, análises químicas e difração de raios X. O resultados sugerem que alguns dos compostos estudados possam afetar as expansões causadas pela reação. Na presença do cloreto de cálcio,

não foi evidenciada repolimerização do gel, mostrando sua possível eficiência. Com o cloreto de lítio, apesar de ter sido observada dissolução do gel, a repolimerização na formação do gel expansivo foi menor quando comparada com a solução contendo apenas o NaOH. Já a acetona não se apresentou eficiente uma vez que ao redor do gel foi verificada sua repolimerização. Os pesquisadores atribuem o efeito positivo do lítio na redução das expansões à teoria da química de superfície, sugerindo dois mecanismos: um primeiro no qual o lítio pode limitar a repolimerização da sílica e outro a respeito da possível redução da densidade de carga superficial do gel quando em contato com o lítio.

Já outros pesquisadores, como Mo *et al.* (2003), sugerem que os fatores chave que permitem o lítio de inibir a expansão da RAS são que o íon lítio Li^+ possui tanto um raio iônico pequeno quanto uma densidade de carga superficial mais elevada do que o Na^+ e K^+ , facilitando a sua entrada no produto da reação mais rapidamente do que os íons Na e K, permitindo a formação de produtos cristalinos e não expansivos.

Estudando o hidróxido de lítio (Li/Na de 0,3 a 1,5) através de ensaios acelerados em argamassa a 80°C, após autoclave, Mo *et al.* (2003) verificaram a partir dos resultados apresentados que as expansões são inversamente proporcionais à concentração de lítio, sendo para os maiores teores de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ analisados (3%) necessárias relações molares acima de 0,6 para reduzir as expansões a níveis aceitáveis. Vários estudos realizados com lítio indicam uma maior eficiência na redução das expansões quando o composto é utilizado na forma de nitrato de lítio, com relação molar de 0,74, segundo Folliard, Thomas & Kurtis (2003), além de não aumentar o pH.

Pesquisas mais recentes como a apresentada por Bérubé *et al.* (2004) tiveram o objetivo de avaliar a influência do nitrato de lítio (LiNO_3) no comportamento de pastas de cimento com teor alcalino variável após exposição a diferentes temperaturas e idades, sendo extraídas as soluções dos poros para análise. A relação molar entre Li:Na+K foi mantida fixa e igual a 0,74. Os estudos indicaram uma redução de 50% na relação molar da solução enquanto que nos produtos hidratados esta relação apresentava-se sempre acima de 1,1, mostrando a eficiência e preferência do lítio na fixação aos hidratos quando comparado com o Na e K. Apesar do aumento da concentração dos íons Na e K na solução, o lítio foi capaz de reduzir o seu pH.

Feng *et al.* (2004), nesta mesma linha, porém através de ressonância magnética por imagem, verificaram a eficiência da técnica na investigação do efeito do nitrato de lítio (com relações molares variando de 0,19 a 1,49) em pastas de cimento, mostrando também a fixação do lítio nos produtos de hidratação do cimento.

Yin Qi & Wen Zi-yun (2004) estudaram diferentes relações molares de Li/Na (0,1 a 1,2), utilizando o hidróxido de lítio, na presença da opala e também verificaram que à medida que a relação molar aumentava (conseqüentemente a concentração de lítio também aumentava), a expansão diminuía, juntamente com a concentração de sílica na solução analisada, reduzindo assim a difusão da sílica da opala. Segundo os pesquisadores, os resultados indicam que a taxa de expansão depende principalmente da quantidade de sílica dissolvida do agregado reativo na solução, estando este comportamento dependente da concentração de lítio presente.

Ainda no que diz respeito ao efeito do lítio, Mitchell, Beaudoin & Grattan-Bellew (2004) desenvolveram uma pesquisa envolvendo análises por microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e ressonância nuclear magnética (RNM) com a opala em contato com soluções de hidróxido de lítio, de potássio e cálcio. Os resultados por RNM mostram que, na presença do lítio, ocorrem variações significativas nas vizinhanças dos átomos de silício, indicando a presença de espécies provavelmente correspondentes a uma fase de gel não expansivo. Adicionalmente, pelo MEV, os pesquisadores observaram na superfície dos grãos uma estrutura diferenciada, com lâminas em camadas, e por difração de raios X a presença de um pico sugerindo um novo produto cristalizado formado.

Segundo relatos mais recentes apresentados por Feng *et al.* (2005), ainda existem muitas dúvidas a serem esclarecidas quanto ao efeito do lítio na reação. Os pesquisadores apresentam uma revisão bastante crítica das pesquisas realizadas até o momento, indicando que ainda não se tem um completo entendimento do fenômeno e nem um consenso a respeito dos vários mecanismos propostos na literatura. De qualquer forma, entre os vários compostos a base de lítio apresentados, os pesquisadores consideram que o nitrato de lítio (LiNO_3) representa o mais promissor.

2.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente levantamento bibliográfico foi importante para ampliar o conhecimento do tema e auxiliar no desenvolvimento do programa experimental. Percebe-se que se evoluiu muito nas investigações da reação álcali-agregado, porém ainda existem várias lacunas com carência de um estudo mais aprofundado, principalmente no que diz respeito ao comportamento das propriedades do concreto de obras reais que apresentam a patologia. Existem hoje muitas pesquisas a serem desenvolvidas neste tema, sendo que a maior parte já realizada se concentra em ensaios puramente laboratoriais, com isto a proposta deste trabalho foi de tentar contribuir com o tema reação álcali-agregado a partir de um estudo de caso e correlacionar com o comportamento observado em laboratório, incluindo o estudo do efeito do lítio na reação. Adicionalmente, são poucos os estudos envolvendo o gel real exsudado na superfície do concreto, formado a partir da reação; diante disto, resolveu-se realizar este trabalho tanto do ponto de vista tecnológico como científico.

3. UHE FURNAS

3.1. INTRODUÇÃO

As informações apresentadas neste item foram extraídas do livro *Concreto Massa no Brasil*, publicado em conjunto pela ELETROBRÁS, CBGB e IBRACON, em 1989.

A Usina Hidrelétrica de Furnas está situada no Rio Grande, município de Alpinópolis (MG). Furnas é proprietária desta usina, sendo a sua construção iniciada em 1958 e o enchimento do reservatório, em 1963. As seis unidades de geração entraram em operação entre 1963 e 1965. Em 1972 a usina foi ampliada, colocando em funcionamento mais duas unidades geradoras entre 1973 e 1974. Desta forma a capacidade instalada ficou igual a 1.216.000 kW.

A UHE Furnas possui na barragem principal um enrocamento com núcleo de argila, um vertedouro com canal de acesso escavado na ombreira esquerda, uma casa de força, a tomada d'água e o pátio de manobras (Figuras 4 e 5). O comprimento da crista da barragem principal é de 550 m e sua altura é igual a 127 m. O volume total de concreto aplicado foi de 426.202 m³, enquanto o de terra/enrocamento foi de 9.500.000 m³.

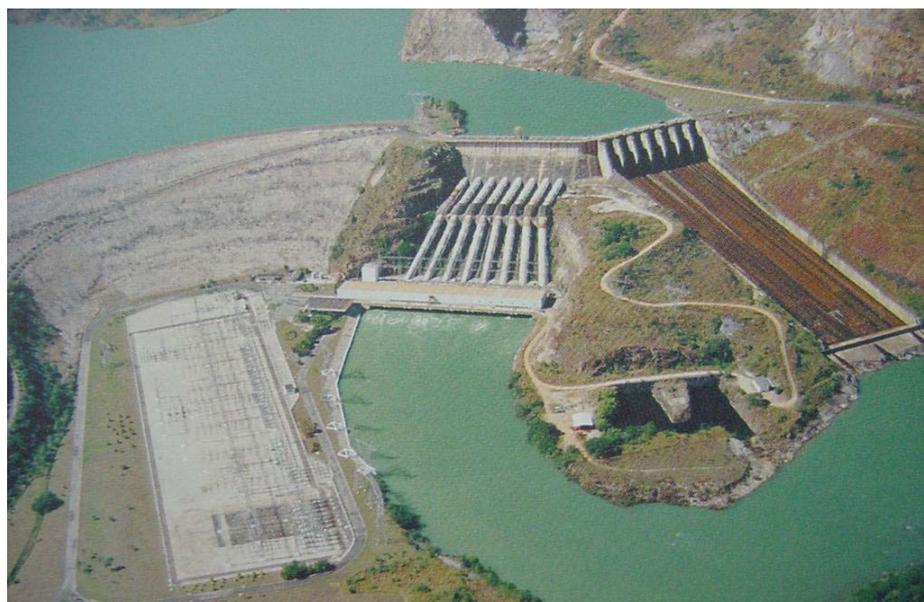


Figura 4: Vista aérea da UHE Furnas.

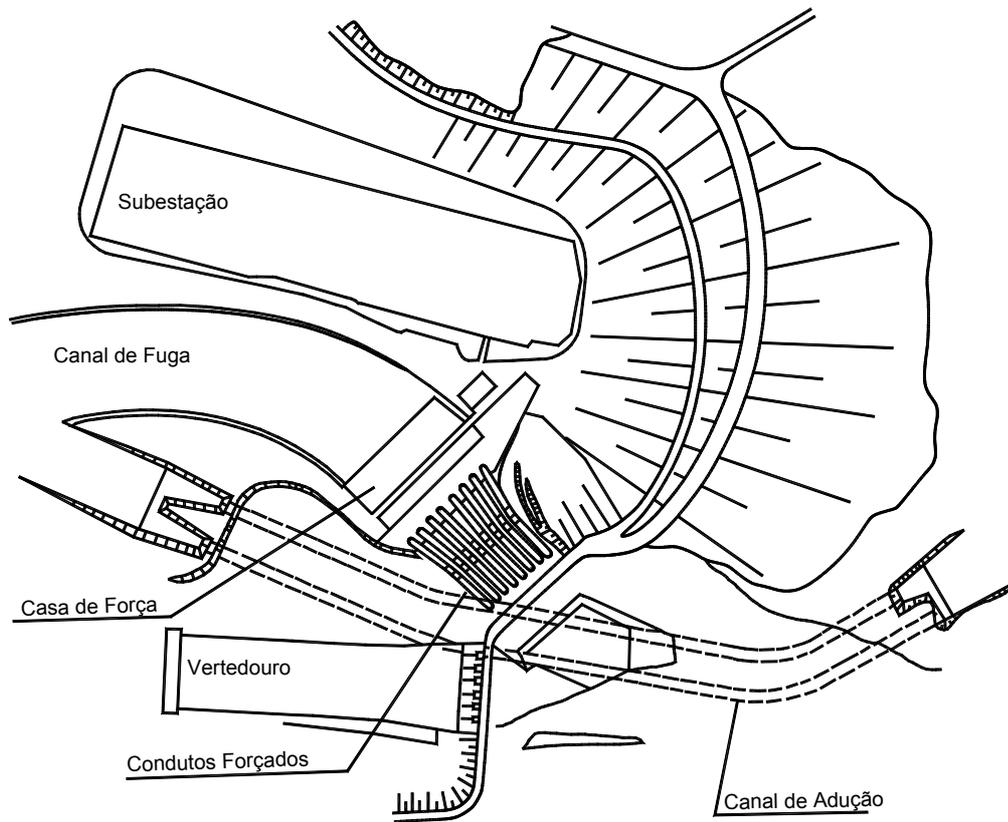


Figura 5: Arranjo geral da UHE Furnas.

Na tomada d'água existe uma barragem de concreto tipo gravidade, com 42,7 m de altura e 120 m de comprimento. Os condutos forçados possuem 6,5 m de diâmetro por 190 m de comprimento. A casa de força mede 186 m de comprimento, 28 m de largura e 36 m de altura. Tem-se um total de 8 unidades geradoras, de eixo vertical, sendo as turbinas do tipo Francis. A subestação de 345 kV localiza-se num aterro, ao pé da barragem, possuindo equipamento de manobra, proteção e medição para as linhas de transmissão e unidades geradoras.

O vertedouro tem capacidade de vazão de 13000 m³/s, sendo constituído por 7 comportas do tipo segmento (17,4 m de altura, 11,5 m de largura e 14,1 m de raio) operadas por guinchos individuais (Figura 6). Estando situado na margem esquerda do rio, possui uma estrutura do tipo gravidade com 104,5 m de comprimento, largura de crista igual a 13,5 m e altura de 39 m. Na sua estrutura estão inseridos pilares com 3 m de largura com o objetivo de sustentar as comportas. Foram confeccionadas vigas protendidas que são apoiadas nestes pilares, constituindo uma ponte na cota 770,2 no topo da barragem principal. A largura da calha do vertedouro é variável (a partir de 98,5 m) e o comprimento igual 336,44 m. O volume total do

concreto usado no vertedouro é de 145.840 m³, sendo o volume de escavação em rocha igual a 554.000 m³ e o de escavação em material comum e não classificado igual a 2.437.000 m³.

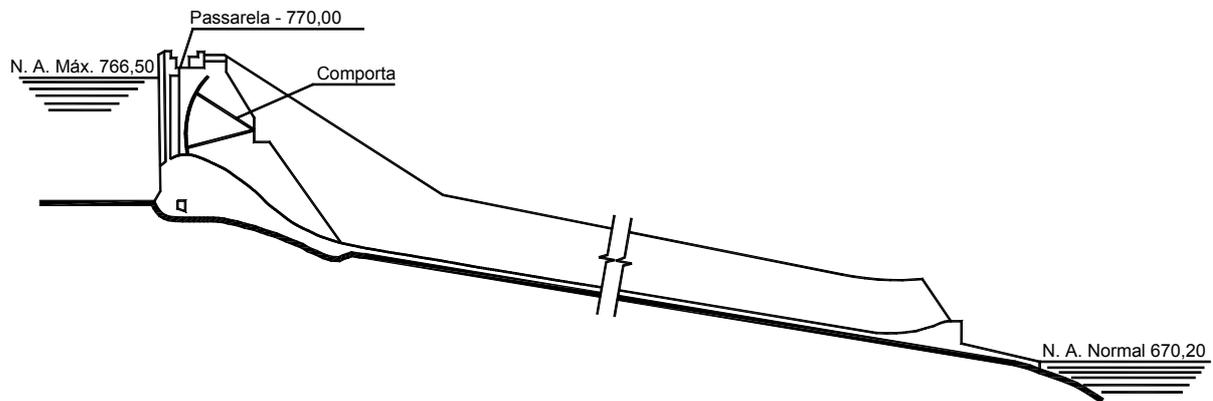


Figura 6: Seção transversal do vertedouro.

O reservatório possui uma capacidade volumétrica total de $20,858 \times 10^9$ m³ e um volume útil de $15,125 \times 10^9$ m³.

A construção das obras civis da UHE Furnas foi feita pela Construtora Anglo Brasileira de Construções e o projeto é de autoria da Companhia Internacional de Engenharia S.A. e da International Company Incorporation.

Foi construída também uma barragem auxiliar de Pium-I, para impedir a fuga do reservatório da UHE Furnas para o vale do São Francisco, promovendo a inversão do rio. Esta barragem situa-se próximo a Capitólio (MG). É uma barragem de terra com 680 m de comprimento, 37 m de altura e 10 m de largura na crista.

3.2. DADOS SOBRE O CONCRETO

Os concretos aplicados nas estruturas da UHE Furnas foram especificados em 5 diferentes classes, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Classes dos concretos aplicados na UHE Furnas.

Classe	Resistência à compressão (MPa)	a/c máx.	D _{máx} (mm)	Consumo mínimo de cimento (kg/m ³)	Local de aplicação
A	21,0	0,60	38	-	Estruturas de concreto armado (médias e pequenas)
B	17,5	0,63	76	267	Estruturas massivas (corpo da barragem e tampões dos túneis)
B'	17,5	0,50	76	267	Crista e calha do vertedouro e paramento de jusante
C	14,0	0,70	152	175	Núcleo do vertedouro e outras estruturas massivas
D	40,0	-	19	-	Não detalhado

Nota: Resistência à compressão para a idade de controle de 28 dias.

A altura das camadas aplicadas nas seções maciças do vertedouro e da tomada d'água foi limitada em 1,5 m, com intervalos de lançamento igual a 72 horas.

Na época da construção, foi instalado na obra um laboratório de concreto de Furnas, com o objetivo de efetuar o controle de qualidade dos materiais e concretos aplicados. O canteiro industrial era composto por uma central de britagem de rocha, um sistema de lavagem e classificação de areia, duas centrais de concreto (uma com capacidade de 90 m³/h e outra de 40 m³/h), um pátio de armação e carpintaria, um sistema de ar comprimido e uma seção de fabricação de pré-moldados. O lançamento do concreto foi feito através de guindastes.

No controle tecnológico, ficou definida a utilização de um cimento Portland tipo I (CP-I), limitando-se o teor de álcalis em 0,60%, segundo a ASTM C-150. Como agregado miúdo, foram utilizadas areias natural e artificial (subproduto da britagem do quartzito), sendo a percentagem média de areia artificial em relação ao agregado miúdo total igual a 35%. Como agregado graúdo foi utilizado o quartzito britado obtido a partir das escavações obrigatórias. Foram empregados também aditivos incorporadores de ar para alcançar valores entre 3% e 6% de ar. Eram moldados corpos-de-prova para execução do controle de qualidade do concreto endurecido, sendo realizadas amostragens a cada 265 m³ de concreto aplicado.

3.3. HISTÓRICO DA RAA

As primeiras observações da instalação da reação álcali-agregado na UHE Furnas ocorreram em 1976, após cerca de 13 anos do término da construção, a partir principalmente da observação de deslocamentos verticais nos marcos altimétricos instalados nas estruturas. As principais ocorrências que surgiram, de uma maneira geral, foram: fissuração nos pilares do vertedouro, nos blocos de ancoragem dos condutos forçados e na casa de força, bem como desnivelamento do coroamento entre o muro central e os blocos adjacentes. A partir deste momento, as estruturas de concreto da UHE Furnas passaram a ser monitoradas mais intensamente, sendo instalados novos instrumentos ao longo do tempo, fazendo-se um acompanhamento bastante criterioso. As Figuras 7 e 8 mostram algumas fissuras surgidas em decorrência da reação álcali-agregado.



Figura 7: Detalhe da fissura em bloco de apoio do conduto forçado.



Figura 8: Detalhe das fissuras na lateral de um pilar do vertedouro – sentido montante.

As investigações petrográficas macroscópicas, por microscopia ótica e eletrônica de varredura foram realizadas posteriormente, a partir de 1994, sendo avaliados vários concretos provenientes de algumas estruturas da usina, destacando os pilares do vertedouro e blocos de transição (ABCP, 1994, 1995 e 1996). Os resultados indicaram a presença de poros com material branco, porcelânico ou cristalizado no seu interior, bordas claras e vítreas frequentes de reação em torno dos agregados e gel preenchendo algumas fissuras na argamassa. Os agregados apresentaram-se, na maioria das vezes, bastante deformados, com estrutura orientada. Os grãos de quartzo apresentavam-se estirados, recristalizados e de granulometria fina. Os produtos da RAA encontravam-se na forma de gel maciço, gretado, às vezes botrioidal e na forma de fases cristalizadas aciculares, rendadas, fibras entrelaçadas, lancetadas e rosáceas. Os produtos foram observados tanto nas interfaces da pasta com o

agregado e no interior dos agregados como nos poros e dispersos na argamassa, sendo de composição sílico-cálcico alcalina; também foi verificada a presença de etringita.

Foram realizadas várias inspeções nas estruturas de concreto, destacando aquelas na presença de especialistas no assunto como Dr. Paulo Monteiro, João Francisco Alves Silveira e outros engenheiros de Furnas (FURNAS, 1995; SILVEIRA, 1996).

A partir do diagnóstico e parecer das estruturas (FURNAS, 1995), as recomendações foram a implantação de sistemas de monitoramento, como medidores de convergência nos vãos das comportas, rede geodésica para medição dos deslocamentos horizontais absolutos, linha de nivelamento de 1ª ordem no coroamento e medidores triortogonais nas galerias de drenagem, em todas as juntas de dilatação na parede de montante. Também foi indicada a necessidade de furos de sondagem para definição do padrão de fraturamento do maciço rochoso. Destacou-se a necessidade de mapeamento de toda e qualquer fissura dos pilares incluindo inspeções subaquáticas. Na ocasião, definiram-se os reparos a serem feitos nos pilares deteriorados. A campanha de extração de testemunhos, com o objetivo de caracterizar em laboratório os concretos, foi mantida como previamente definido.

As Figuras 9 a 13 registram algumas das ocorrências observadas quando da visita a UHE Furnas (FURNAS, 1995).



Figura 9: Desnívelamento entre juntas e fissuras superficiais (vertedouro / muro de transição).

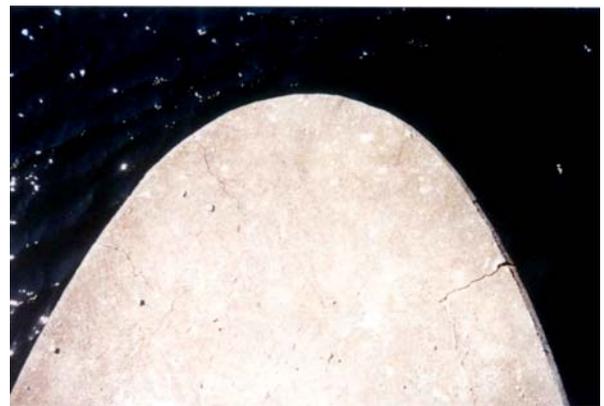


Figura 10: Fissuras no topo do pilar n.5, sentido vertedouro/ombreira esquerda.



Figura 11: Detalhe das fissuras mapeadas no topo do pilar.



Figura 12: Fissura abrangendo toda a seção transversal do pilar.



Figura 13: Fissuras na face lateral do pilar n.6, sentido jusante.

De acordo com Silveira (1996), as regiões mais críticas eram os pilares do vertedouro (topo e laterais), uma vez que o nível de fissuração podia refletir na intensificação do nível de tensões das armaduras e do sistema de ancoragem das comportas e os blocos de ancoragem, uma vez que caso as armaduras fossem afetadas, poderia comprometer a segurança e colocar em risco a operação dos equipamentos de geração da usina. Outro ponto também identificado como crítico foi a região do vertedouro, justaposta à tomada d'água, uma vez que o empuxo transmitido já havia provocado o esmagamento do concreto na região de contato entre os blocos adjacentes e deslocamento. Deslocamentos diferenciais irreversíveis foram observados nos medidores triortogonais instalados nas juntas de contração entre blocos na crista da barragem, sendo característica típica de concretos com ocorrência da RAA. Outra

observação na ocasião foi a incidência de fissuras entre camadas de concretagem nas galerias de drenagem devido à expansão diferencial entre camadas em função da RAA e gel exsudado nas paredes e teto das galerias de drenagem. Foi também alertado quanto à necessidade de investigação quanto à possível corrosão de armaduras nos concretos armados.

Entretanto, apesar das manifestações da RAA, Silveira (1996) comenta que as taxas de expansão observadas anualmente na UHE Furnas representam uma das mais baixas quando comparada com outras barragens mais afetadas como Moxotó, por exemplo, onde as taxas são cerca de sete vezes superiores. Segundo o consultor, a porosidade dos concretos da usina de Furnas pode ter sido benéfica aliado ao baixo teor de álcalis, fato que pode ter contribuído para as baixas expansões devidas à reação. Em relatos de Galetti *et al.* (1997), e segundo certificado do cimento usado na época da construção, o teor de álcalis totais se apresentava igual a 0,23% (0,24% de K_2O e 0,07% de Na_2O). De acordo com Fontoura *et al.* (1997), as velocidades médias de expansão tendem a cair no tempo, apresentando 0,22 mm/ano como o maior valor obtido na época analisada. Segundo Veiga, Santos & Guedes (1996), as inspeções eletromecânicas realizadas periodicamente até esta época não revelaram qualquer problema em nível operacional nas unidades geradoras e nas comportas.

Porém, apesar das constatações que o concreto não evidenciava sinais de grande movimentação, até que ocorresse a estabilização por completo das expansões, ainda existia a possibilidade de problemas operacionais. Sendo assim, definiu-se a instalação de medidores triortogonais de junta, que em conjunto com medidas de verticalidade do eixo da turbina e gerador, folga dos anéis de desgaste da turbina e folgas do entreferro do gerador auxiliariam no acompanhamento da RAA (FONTOURA *et al.*, 1997).

Os estudos realizados em laboratório (CASTRO *et al.*, 1997), envolvendo testemunhos de concreto extraídos dos pilares do vertedouro, indicaram queda no módulo de elasticidade (cerca de 50%), apesar da resistência ter se apresentado satisfatória.

Após as várias inspeções e monitoramento, foram definidos e realizados os reparos necessários nos blocos de apoio e de ancoragem dos condutos forçados e nos pilares do vertedouro. Os reparos envolveram injeção das fissuras com calda de cimento, sílica ativa e superplastificante e aplicação de argamassa projetada, de alto desempenho, na superfície do concreto sobre tela de aço soldada (FURNAS, 2001). Nos pilares do vertedouro foi utilizada

fibra de polipropileno na argamassa, sendo que as recuperações foram realizadas em três etapas, duas acima do nível d'água e uma sub-aquática (FURNAS, 1999, 2000). As Figuras 14 e 17 apresentam alguns detalhes da recuperação dos pilares do vertedouro.

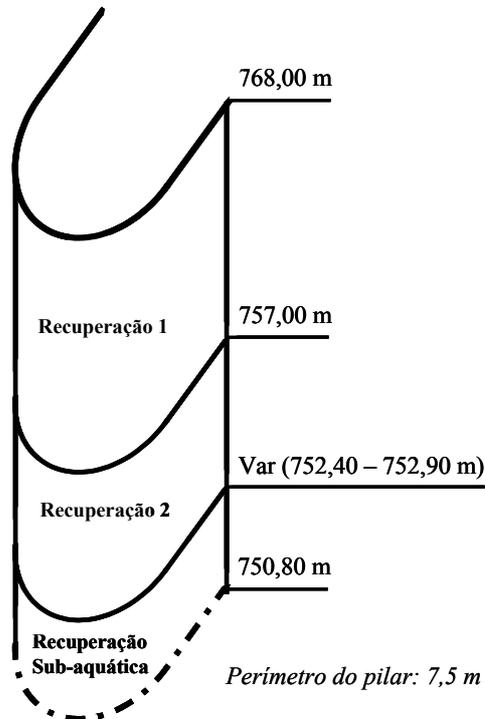


Figura 14: Detalhe das recuperações realizadas nos pilares do vertedouro.



Figura 15: Tela metálica e posicionamento de tubos de pvc para injeção de calda nas fissuras do pilar a montante do vertedouro.



Figura 16: Projeção de argamassa na face dos pilares a montante do vertedouro.



Figura 17: Vista geral da obra recuperada.

Dados mais recentes da posição atual da reação na usina indicam tendência de estabilização das taxas de expansão, apresentando hoje cerca de 0,13 mm/ano a partir dos dados da instrumentação na região da barragem. Porém, estão sendo notadas novas frentes da reação na tomada d'água e casa de força, já tendo iniciado o processo de ovalização no anel de desgaste inferior da máquina 6 na casa de força. Apresentam-se fissuras na superfície do concreto e constante exsudação do gel na galeria mecânica. A usina encontra-se hoje em processo de modernização, e em paralelo estão sendo tomadas providências quanto aos procedimentos de ajustes e reparos, uma vez que o concreto é que está se deformando e refletindo nos equipamentos, sendo o anel retirado e a máquina 6 paralisada.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. PANORAMA GERAL

A UHE Furnas foi escolhida para ser estudada nesta pesquisa, uma vez que apresentava a reação álcali-agregado já instalada. Diversas estruturas de concreto da Usina de Furnas (pilares do vertedouro nos sentidos montante e jusante, galeria de drenagem da casa de força, galeria de drenagem do vertedouro e blocos de ancoragem dos condutos forçados) foram inspecionadas com o objetivo de verificar a intensidade da reação álcali-agregado. Após esta observação, definiu-se a região da galeria de drenagem do vertedouro (Figuras 18 e 19) para compor as amostras de concreto deste estudo em função de ter sido constatada a presença expressiva de gel exsudado na superfície do concreto. Foram coletados também, nas proximidades da usina, matacões e agregados semelhantes aos utilizados na época da execução dos concretos da usina para serem investigados em laboratório.



Figura 18: Vista geral do vertedouro da UHE Furnas.



Figura 19: Interior da galeria de drenagem do vertedouro.

Os ensaios e análises relativos à RAA da usina de Furnas foram divididos em três grupos. O primeiro envolveu o estudo do concreto da galeria de drenagem, sendo realizadas tanto investigações do concreto *in loco*, na superfície do concreto, como em laboratório, em testemunhos de concreto extraídos; no segundo, o foco principal foi estudar o agregado quartzito em laboratório através de estudos mineralógicos em argamassas e concretos. No terceiro grupo foi avaliado o gel exsudado (formado a partir desta reação deletéria) coletado na superfície do concreto.

De uma maneira geral, foram verificadas experimentalmente as características visuais e microestruturais dos géis e concretos, as expansões e as principais propriedades dos concretos, além das velocidades de pulsos ultra-sônicos e do estudo do efeito do lítio na RAA.

No fluxograma a seguir (Figura 20) estão apresentadas, de forma detalhada, todas as atividades que foram realizadas no programa experimental.

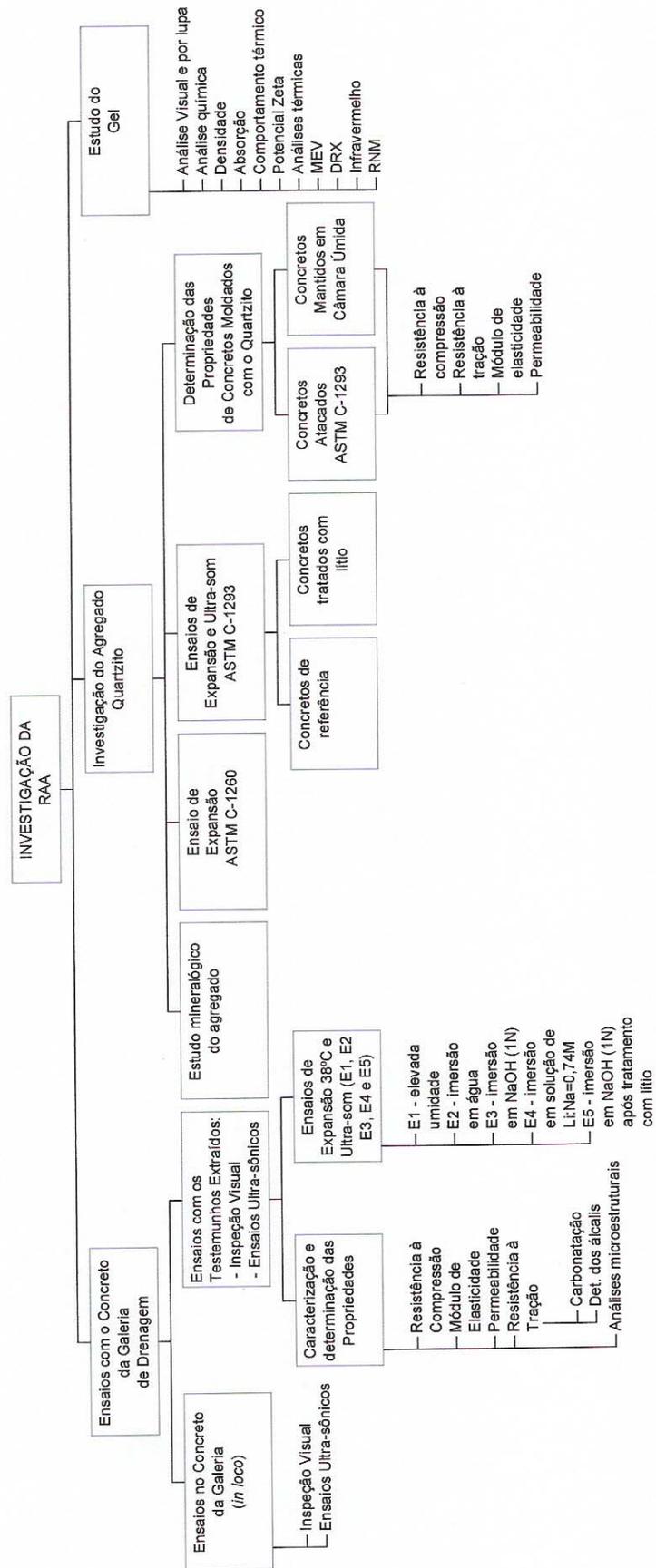


Figura 20: Fluxograma das atividades do Programa Experimental.

4.2. VARIÁVEIS

Existem vários fatores que interferem na reação álcali-agregado ou são conseqüências deste fenômeno patológico. Adicionalmente, pode existir um efeito sinérgico entre estes fatores, agravando ainda mais o processo de deterioração de um concreto afetado.

Selecionando as principais variáveis envolvidas no problema proposto na presente pesquisa, tem-se a seguinte classificação:

- a) Variáveis dependentes: expansões, características e propriedades do concreto e do gel; velocidade de pulsos ultra-sônicos;
- b) Variáveis independentes: condições de exposição (ambiente com alta umidade, imersão em água, imersão em solução de NaOH e tratamento com lítio); teor de álcalis dos concretos;
- c) Variável de controle: temperatura.

4.3. MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO

Os materiais utilizados na moldagem das argamassas e concretos do programa experimental foram:

- aglomerante hidráulico: cimento Portland sem adição, contendo elevado teor de álcalis, tipo CP I-32;
- agregado: quartzito procedente da região da UHE Furnas (MG);
- areia quartzosa;
- água potável.

A seguir estão apresentados os ensaios de caracterização realizados com os materiais empregados no estudo experimental.

- Cimento: resistência à compressão; finura (# 200 e # 325); finura Blaine; tempo de pega; massa específica; expansibilidade em autoclave; resíduo insolúvel; perda ao fogo; óxidos de ferro, alumínio, cálcio, magnésio, cálcio livre, sódio e potássio total e solúvel; dióxido de silício; trióxido de enxofre; granulometria a laser.
- Areia quartzosa: composição granulométrica; massa específica; absorção.
- Brita quartzito: composição granulométrica; massa específica e absorção.

As Tabelas 2 e 3 apresentam as características físicas, mecânicas e químicas do cimento utilizado.

Tabela 2: Características físicas e mecânicas do cimento.

Propriedades determinadas	Norma	Cimento	Exigências	
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/01	3,12	-	-
Finura Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76/98	311	≥ 260	NBR 5732/91
Resíduo na peneira # 200 75 µm (%)	NBR 11579/91	1,7	≤ 12,0	
Resíduo na peneira # 325 45 µm (%)	NBR 12826/93	12,2	-	-
Dimensão média dos grãos (µm)	Procedimento Furnas 1.002.133	13,07	-	-
Tempo de início de pega (h:min)	NBR 11581/91	2:20	≥ 01:00	NBR 5732/91
Tempo de fim de pega (h:min)		3:20	-	
Resistência à compressão	NBR 7215/96			
3 dias (MPa)		20,4	≥ 10,0	
7 dias (MPa)		25,9	≥ 20,0	
28 dias (MPa)		31,3	≥ 32,0	-
Expansão em autoclave (%)	ASTM C-151/00	0,1	≤ 0,8 ≤ 0,2	ASTM C-150/02 ASTM C-1260/01

Tabela 3: Características químicas do cimento.

Propriedades determinadas (%)	Norma	Cimento	Exigências	
Dióxido de silício (SiO ₂)	NBR 9203/85	20,75	-	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		4,52	-	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,56	-	-
Óxido de cálcio (CaO)		64,65	-	-
Óxido de magnésio (MgO)		1,16	≤ 6,5	NBR 5732/91
Óxido de enxofre (SO ₃)	NBR 5745/89	2,44	≤ 4,0	
Cal livre (CaO)	NBR 7227/89	3,00	-	-
Álcalis totais				
Óxido de sódio (Na ₂ O)	NBR 5747/89	0,77	-	-
Óxido de potássio (K ₂ O)		0,84	-	-
Equivalente alcalino (Na ₂ O _{eq})		1,32	≤ 0,6	ASTM C-150/02
Álcalis solúveis				
Óxido de sódio (Na ₂ O)	ASTM C-114/97	0,34	-	-
Óxido de potássio (K ₂ O)		0,75	-	-
Equivalente alcalino (Na ₂ O _{eq})		0,83	-	-
Perda ao fogo	NBR 5743/89	1,55	≤ 2,0	NBR 5732/91
Resíduo insolúvel	NBR 5744/89	0,35	≤ 1,0	

Nota: $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658.\% \text{K}_2\text{O}$

A composição potencial de Bogue do cimento está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Composição de Bogue (%).

Silicato tricálcico (C ₃ S)	52,29
Silicato dicálcico (C ₂ S)	20,04
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	7,65
Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF)	7,79

A Tabela 5 apresenta as características do agregado graúdo quartzito com D_{máx} de 19mm, e miúdo (areia natural) estudados.

Tabela 5: Características dos agregados.

Característica	Norma	Agregado Graúdo (19mm)	Agregado Miúdo
		Quartzito	Areia Quartzosa
Módulo de finura (Apêndice D)	NBR NM 248/03	6,68	2,83
Massa específica SSS (g/cm ³)	NBR NM 52/03	2,64	2,61
Absorção (%)	NBR NM 53/03 ¹ NBR NM 30/01 ²	0,5 ¹	0,7 ²

Foram também utilizados durante os experimentos alguns reagentes químicos tais como o nitrato de lítio, o hidróxido de sódio e uma solução a base de lítio, para tratamento de concretos afetados pela RAA, todos comercialmente disponíveis no mercado.

4.4. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

A Tabela 6 detalha os ensaios realizados, o tamanho das amostras envolvido em cada etapa com as respectivas normas ou métodos de ensaio empregados no programa experimental em argamassas e concretos.

Tabela 6: Ensaios realizados no programa experimental.

Características ou Propriedades investigadas	Número de amostras/CP's	Norma ou metodologia adotada
Ensaios no concreto da galeria		
Inspeção visual na superfície do concreto	209 m	ASTM C-856/02
Velocidade de propagação de ondas por ultrassom	231 determinações	NBR 8802/94 / ASTM C-597/02
Ensaios com testemunhos extraídos		
Características visuais dos testemunhos de concreto extraídos, relativas a RAA	98	ASTM C-856/02
Velocidade de propagação de ondas por ultrassom imediatamente após a extração	77	NBR 8802/94 / ASTM C-597/02
Resistência à compressão após extração	15	ASTM C-39/03
Módulo de elasticidade após extração		ASTM C-469/02
Resistência à compressão após extração e ensaios de expansão	39	ASTM C-39/03
Módulo de elasticidade após extração e expansão		ASTM C-469/02
Resistência à tração por compressão diametral	15	NBR 7222/94
Permeabilidade	15	NBR 10786/89 Procedimento Furnas 01.011.001

Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado

Características ou Propriedades investigadas	Número de amostras/CP's	Norma ou metodologia adotada
Absorção, massa específica e índice de vazios	15	NBR 9778/87
Determinação dos álcalis dos concretos extraídos	12	Procedimento Furnas 01.006.017 IPT - Boletim n. 25
Carbonatação dos testemunhos de concreto extraídos	15	RILEM (1988)
Análise microestrutural dos produtos da RAA formados no concreto, por MEV	6	ASTM C.856-2002 Procedimento 04.015.012
Ensaio de expansão – E1 – elevada umidade	12	ASTM C-1293/01
Ensaio de expansão – E2 – imersão em água	12	Adaptação da ASTM C-1293/01
Ensaio de expansão – E3 – imersão em NaOH	12	Adaptação da ASTM C-1293/01
Ensaio de expansão – E4 – imersão em solução com relação molar de Li:Na=0,74	4	Adaptação da ASTM C-1293/01
Ensaio de expansão – E5 – imersão em NaOH após tratamento com produto à base de lítio	4	Adaptação da ASTM C-1293/01
Velocidade de propagação de ondas por ultrassom em paralelo com ensaio de expansão ao longo de um ano, em 36 amostras	510 determinações (nota a)	NBR 8802/94 / ASTM C-597/02
Ensaio com argamassas moldadas		
Ensaio de expansão pelo método acelerado com o agregado quartzito	3	ASTM C-1260/01
Ensaio com concretos moldados		
Resistência à compressão	24	ASTM C-39/03
Módulo de elasticidade		ASTM C-469/02
Resistência à tração por compressão diametral	24	NBR 7222/94
Permeabilidade	18	NBR 10786/89 Procedimento Furnas 01.011.001
Ensaio de expansão com o agregado quartzito - referência	8	ASTM C-1293/01
Ensaio de expansão com o agregado quartzito – fazendo tratamento com lítio	8	ASTM C-1293/01
Velocidade de propagação de ondas por ultrassom em paralelo com ensaio de expansão por um ano	96 determinações	NBR 8802/94 / ASTM C-597/02

Nota a: Este número refere-se ao total de determinações de velocidade ultra-sônica (pelo método direto) realizadas ao longo do tempo no ensaio de expansão, até 365 dias, contemplando as classes C0, C1 e C2 nas condições E1, E2 e E3.

A seguir serão detalhadas todas as atividades realizadas no programa experimental, conforme fluxograma apresentado na Figura 20.

4.5. INVESTIGAÇÃO DO CONCRETO DA GALERIA DE DRENAGEM

4.5.1. Ensaio no concreto da galeria

A galeria de drenagem é composta por 6 faixas de blocos de concreto de 14,5 metros cada (relativos a 6 vertedouros) e mais dois blocos de 8,75 m cada (ombreiras direita e esquerda), totalizando 104,5 metros de galeria.

Os blocos de concreto da galeria de drenagem foram construídos em 13 camadas de 1,5 metro cada. Com o objetivo de estudar o mesmo tipo de concreto, foi definido nesta pesquisa o estudo do concreto aplicado na camada de referência de número 7, na galeria de drenagem, nos dois sentidos (montante e jusante), representando um único tipo de concreto aplicado há 44 anos, conforme relatórios mensais da época da execução da obra (FURNAS, 1961).

Em uma primeira etapa, o concreto da camada 7 foi avaliado superficialmente, “in loco”, através de uma inspeção visual. Além de gel, foi investigada a incidência de fissuras e manchas escuras na superfície do concreto, nos dois sentidos, sendo registradas e fotografadas as principais características relativas à RAA observadas.

O objetivo desta inspeção foi o de verificar similaridades e divergências nos concretos dos blocos da galeria de drenagem do vertedouro, nos dois sentidos, quanto ao grau de deterioração, a partir das características típicas da RAA.

Em uma segunda etapa, a superfície do concreto da galeria, mais especificamente a região definida para a extração dos testemunhos, foi ensaiada através do ultra-som, pelo método de transmissão indireto (NBR 8802). Inicialmente foram definidos 4 pontos, centralizando-os na região de extração de cada testemunho (com afastamentos iguais a 10 cm), e a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas final foi calculada representando a tangente dos resultados a partir das 3 determinações em cada região, de acordo com a norma. A frequência de

vibração de onda empregada foi de 54 kHz, de acordo com recomendações da ASTM C-597, com o objetivo de se obter uma maior precisão das medidas e conseqüentemente, maior sensibilidade. Foram obtidos 100 resultados de velocidade de pulsos ultra-sônicos a partir das 300 leituras indiretas realizadas.

4.5.2. Investigação dos testemunhos de concreto

4.5.2.1. Extração dos testemunhos

Após a inspeção visual realizada na galeria, foi definida a extração na camada 7 de concretagem. A Figura 21 detalha o local das extrações.

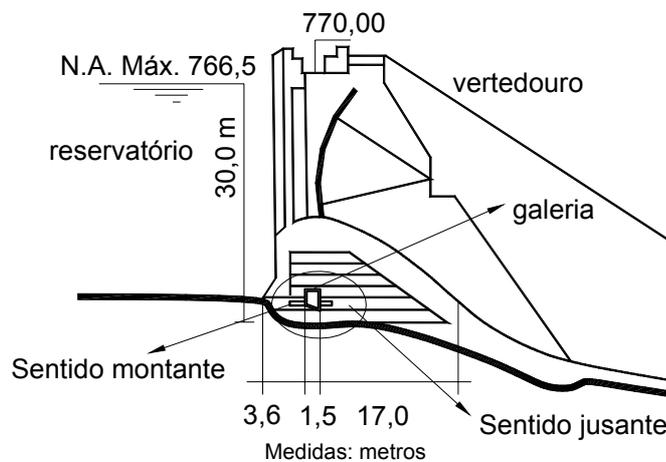


Figura 21: Croqui - seção em corte do vertedouro - detalhe dos furos de extração (sentido montante/jusante) nos blocos de concreto da galeria de drenagem da UHE Furnas.

Foram selecionados vários pontos para extração dos testemunhos, todos eles na camada de concretagem de número 7 (ver Figuras 22 e 23).

Os critérios seguidos para a extração dos testemunhos, tais como espaçamentos entre cada furo de extração previsto, distâncias mínimas entre juntas e furos, entre outros, seguiram as especificações do Departamento de Engenharia Civil de Furnas e a norma para extração de

testemunhos, NBR 7680/83. Com o objetivo de se obter uma quantidade suficiente de testemunhos para os ensaios propostos, foram realizadas duas campanhas de extração de forma a compor os concretos tanto no sentido montante como jusante da galeria de drenagem do vertedouro.

A seguir estão detalhadas as condições de extração e cuidados que tiveram que ser tomados:

- Distância entre o furo e as juntas de dilatação entre blocos (verticais): 50 cm;
- Distância entre o furo e as juntas de construção horizontais (entre camadas de concretagem) e das fissuras candidatas a controle: 30 cm;
- Distância mínima horizontal entre furos: 45 cm;
- Distância mínima vertical entre furos: 60 cm;
- Profundidade máxima permitida para extração: 90 cm;
- Resguardar os instrumentos instalados e marcações nas paredes com previsão de novos instrumentos, distanciando os furos dos instrumentos instalados ou previstos em 2 m.

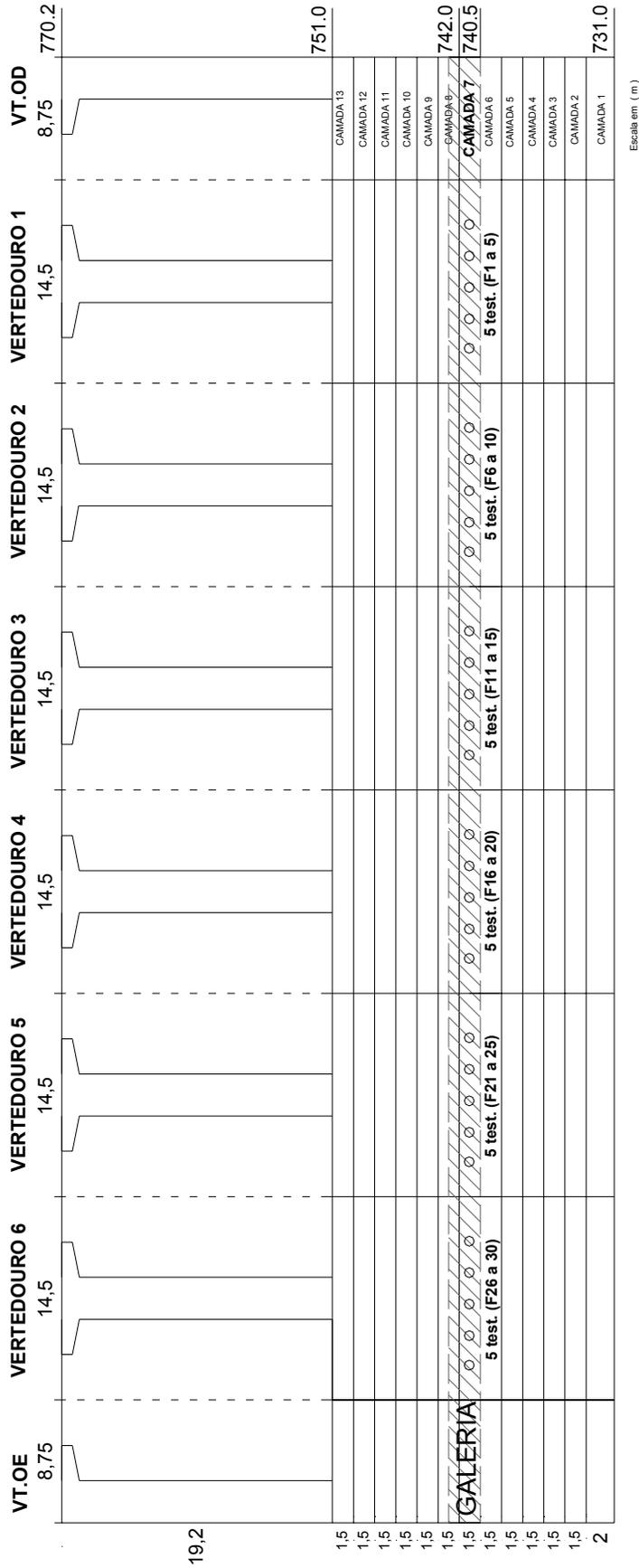


Figura 22: Corte longitudinal da galeria de drenagem do vertedouro da UHE Furnas apresentando distribuição dos furos de extração a jusante.

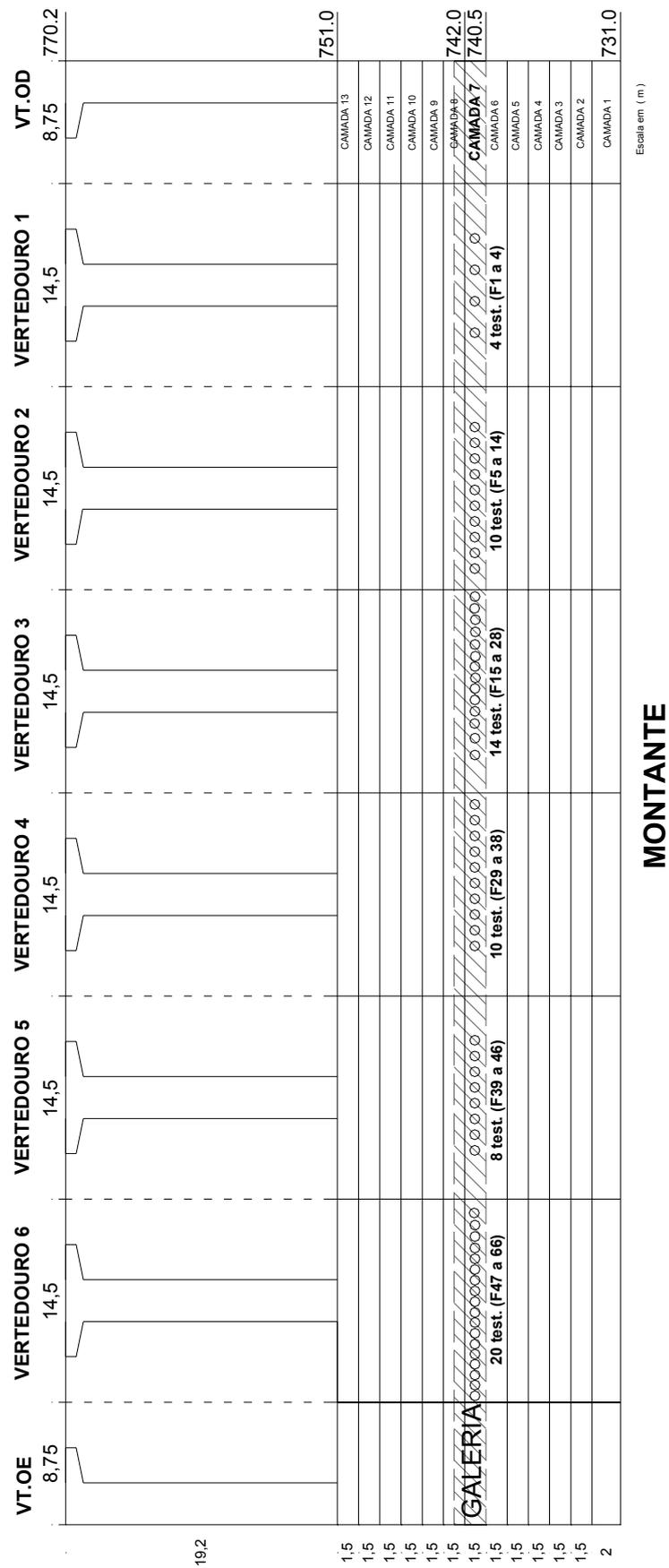


Figura 23: Corte longitudinal da galeria de drenagem do vertedouro da UHE Furnas apresentando distribuição dos furos de extração a montante.

Posteriormente, após as marcações, foram realizados vários furos de extração, através do uso de sonda rotativa a diamante, com circulação direta de água.

No sentido montante, foram executados 72 furos de extração, com aproximadamente 15 cm de diâmetro, a uma profundidade de até 45 cm, ao longo de toda a extensão da galeria de drenagem do vertedouro (66 na primeira e 6 na segunda campanha de extração).

No sentido jusante, já na segunda campanha de extração, foram realizados 30 furos de extração nas mesmas dimensões, abrangendo também todos os seis blocos principais de concretagem.

Todos os testemunhos, após a extração, foram envolvidos com filme plástico com objetivo de evitar a perda de umidade. Em seguida foram encaminhados para o Laboratório de Concreto do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Goiânia-GO, para amostragem e realização dos ensaios. Todos os furos de extração foram preenchidos com graute depois de finalizadas as campanhas de extração.

4.5.2.2. Amostragem e inspeção visual

Após o recebimento do material em laboratório, todos os testemunhos extraídos foram separados, medidos e distribuídos para os ensaios. Em algumas das extrações não foi possível que o testemunho fosse retirado por inteiro podendo, portanto, ser constituído de 1 ou 2 amostras e fragmentos menores (sendo acrescentado uma letra A ou B após o nº de cada testemunho extraído), conforme apresentado no Apêndice B.

Foi feito um planejamento dos experimentos de forma a garantir a representatividade dos dados obtidos sobre a população, conforme detalhado a seguir.

A partir da inspeção realizada na galeria de drenagem do vertedouro, foram compostas 3 classes distintas de concreto, em função do nível de incidência de características de deterioração relativas à RAA.

Desta forma, o sentido jusante foi considerado o concreto de referência (Classe 0), uma vez que não apresentou indícios de deterioração perceptíveis a olho nu durante a inspeção visual,

embora tivesse a mesma idade e tivesse exposto a um ambiente próximo do concreto de montante.

O sentido montante foi dividido em 2 classes (Classe 1 e Classe 2). A Classe 1 foi considerada a menos alterada, por conter uma baixa incidência de características relativas à RAA (concreto menos afetado). Já a Classe 2 apresentava-se bastante alterada (concreto mais afetado).

Em função do número de amostras possíveis de serem obtidas a partir das extrações dos testemunhos, obteve-se um aproveitamento total para ensaios de pelo menos de 30 amostras por classe, sendo destinados 30 corpos-de-prova (amostras) para compor a Classe 0 (sem indícios visíveis da reação), 38 amostras para a Classe 1 (concreto menos afetado pela RAA) e 32 amostras para a Classe 2 (concreto mais afetado pela RAA). Todas as amostras contém diâmetro aproximado de 15 cm e comprimento variável, conforme pode ser observado no Apêndice B.

No planeamento estatístico dos experimentos foi definido o projeto de blocos aleatorizados conforme será detalhado no item seguinte. Para aplicar esta metodologia, inicialmente todos os testemunhos extraídos foram submetidos a uma inspeção visual, em laboratório, mais rigorosa e detalhada. Dentro de cada Classe (Classe 0, 1 e 2) as amostras foram inspecionadas individualmente a olho nu e através de lupa com o objetivo de registrar as possíveis características (sintomas) presentes, relativas à RAA, tais como:

- poro contendo material em seu interior;
- fissuras (tanto na argamassa quanto nos agregados);
- bordas de reação;
- manchas escuras na argamassa ou em torno dos agregados;
- descolamentos entre o agregado e a pasta.

Para cada característica observada, aplicou-se um peso em função da intensidade observada (variando de 1 para baixa, 2 para intermediária e 3 para alta intensidade) e, em seguida, foi realizada uma análise visual comparativa entre as amostras (dentro de cada Classe) do grau de alteração.

Após esta inspeção, as amostras (de cada Classe) foram ordenadas seqüencialmente em função do seu grau de alteração, de menos alterado (nº 1) para mais alterado (ex.: até o nº30 para Classe 0).

É importante comentar que, no processo de ordenação das amostras, foi considerado o número de características presentes e, no caso de empate, a intensidade de cada característica (nível de incidência), fazendo-se uma análise conjunta destes fatores para a sua classificação. Levou-se em consideração também o grau de deterioração relativo a cada sintoma (característica) observado, segundo Grattan-Bellew & Danay (1992). Neste caso, o agregado apresentando fissuras possui menor grau, seguido pela borda, juntamente com vazios contendo deposição. Os sintomas considerados que representam maior grau de deterioração são o descolamento seguido pela fissura na pasta com deposição de material.

Complementando posteriormente algumas investigações no concreto de montante, foi feita uma segunda campanha de extração neste sentido (constituído pelas classes 1 e 2) de forma a obter uma quantidade suficiente de testemunhos para os ensaios propostos.

Com o objetivo de avaliar os concretos constituintes dos testemunhos extraídos, as amostras obtidas foram divididas em blocos, seguindo-se um critério de distribuição estatística, conforme será detalhado no item seguinte. Esta distribuição foi realizada para destinar os testemunhos aos ensaios propostos no programa experimental.

4.5.2.3. Planejamento estatístico dos experimentos

Com o objetivo de avaliar as propriedades dos concretos extraídos, foram definidos os ensaios de laboratório a serem realizados. Os ensaios abrangeram a determinação das propriedades mecânicas e elásticas (resistência à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade), ensaios de permeabilidade e a investigação de expansões. Para estes ensaios específicos, os testemunhos foram divididos em blocos e seguiu-se um critério de distribuição estatística, conforme apresentado no presente item.

Para a realização dos ensaios com os testemunhos extraídos, adotou-se um projeto de blocos aleatorizados, conforme descrito por Nani & Ribeiro (1987).

Nesta etapa, cada amostra, obtida a partir de todos os testemunhos extraídos (dentro de cada Classe 0, 1 e 2), foi dividida em blocos.

Assim, foram identificados **cinco** blocos para cada classe. O bloco 1 continha os elementos menos alterados da classe estudada, enquanto que o bloco 5 continha os elementos mais fortemente alterados. Em seguida, as amostras destinadas aos ensaios foram escolhidas de modo a formarem um conjunto com elementos pertencentes aos diversos blocos, equilibradamente. Esse procedimento assegurou que todos os ensaios fossem feitos com amostras representativas da classe que estava sendo analisada. Portanto, a amostragem foi realizada blocando-se o efeito da alteração existente entre as amostras obtidas.

Ao separar as amostras (de cada Classe) em cinco blocos, mantendo-se a ordem de classificação atribuída de acordo com item 5.2.1, realizou-se a distribuição equilibrada dos CP's para todos os ensaios. Ou seja, os CP's com maior (ou menor) evidência de degradação não ficaram concentrados em nenhum ensaio (o que faria com que o respectivo ensaio deixasse de ser representativo da população). Em alguns casos, foram feitos pequenos ajustes na distribuição dos CP's em função do comprimento necessário para os ensaios específicos (Tabelas 7, 8 e 9).

Após os testemunhos terem sido selecionados para os ensaios mencionados, procedeu-se então do corte de suas extremidades, para ajuste do comprimento (comprimento final) em função das características de cada ensaio e da necessidade de correção de possíveis irregularidades na superfície do topo e da base dos corpos-de-prova cilíndricos, conforme apresentado no Apêndice B.

Tabela 7: Distribuição dos ensaios em função dos 5 blocos criados - Classe 0 (sem indícios visuais de alteração - Jusante).

Classificação	Nº do Testemunho	Comprimento final (cm)	Blocos¹	Ensaio²
1	16	28,5	1	E1
2	23	40,0		T
3	18	33,0		RE
4	17	22,0		REE1
5	22	40,0		E2
6	12	43,0		P
7	4	36,0		E3
8	27	33,0	2	RE
9	24	25,0		E2
10	13	30,0		E3
11	8	20,0		T

Classificação	Nº do Testemunho	Comprimento final (cm)	Blocos¹	Ensaio²
12	5	19,0	2	P
13	3	35,0		E1
14	9	22,0	3	P
15	29	30,5		RE
16	20	37,0		T
17	10	38,0		REE2
18	14	38,0	4	E3
19	25	20,0		P
20	26	40,0		E1
21	7	29,0		E2
22	19	32,0		T
23	28	38,5		RE
24	6	41,0	5	E1
25	11	15,0		REE3
26	30	15,0		P
27	21	38,0		RE
28	1	30,5		E2
29	2	32,0		E3
30	15	30,0	T	

Nota 1: Bloco 1—menor alteração; 2—pouca alteração; 3—média alteração; 4—muita alteração; 5—maior alteração Nota 2: RE (resistência à compressão e módulo de elasticidade); T (resistência à tração); REE (ensaio de resistência à compressão e módulo após exposição às condições E1, E2 ou E3); P (permeabilidade); E1, E2 e E3 (expansão e acompanhamento de massa conjuntamente).

Tabela 8: Distribuição dos ensaios em função dos 5 blocos criados - Classe 1 (concreto menos afetado pala RAA - montante).

Classificação	Nº do Testemunho	Comprimento final (cm)	Blocos¹	Ensaio²
1	52A	28,5	1	E1
2	55A	15,1		P
3	45A	28,5		E2
4	48A	28,5		E3
5	49A	28,5		E4
6	53A	24,0		---
7	32A	28,5		E5
8	51A	24,8		RE
9	55B	18,7		T
10	61A	28,5	2	E2
11	42A	28,5		E3
12	64A	28,5		E4
13	39A	28,5		E5
14	40A	28,5		E1
15	36A	28,2		T
16	47A	15,1		P
17	56A	29,0		RE
18	41A	29,1		T
19	30A	29,0	3	RE
20	36B	13,7		P
21	44A	29,1		E2 - Vm
22	33A	29,0	4	RE
23	50A	28,5		E3
24	38A	23,6		T
25	43A	28,5		E4
26	54A	28,5		E5

Classificação	Nº do Testemunho	Comprimento final (cm)	Blocos¹	Ensaio²
27	60A	28,5	4	E1
28	59A	28,5		E2
29	46B	15,1		P
30	31A	29,0		RE
31	62A	15,0	5	P
32	63A	28,5		E5
33	35A	28,5		E1
34	29A	28,5		E4
35	34A	18,9		T
36	65A	29,1		E1 - Vm
37	57A	28,5		E2
38	58A	28,5		E3

Nota 1: Bloco 1—menor alteração; 2—pouca alteração; 3—média alteração; 4—muita alteração; 5—maior alteração Nota 2: RE (resistência à compressão e módulo de elasticidade); T (resistência à tração); Vm (variação de massa após exposição às condições E1 e E2); P (permeabilidade); E1, E2, E3, E4 e E5 (expansão nas 5 condições).

Tabela 9: Distribuição dos ensaios em função dos 5 blocos criados - Classe 2 (concreto mais afetado pala RAA - montante).

Classificação	Nº do Testemunho	Comprimento final (cm)	Blocos¹	Ensaio²
1	28A	28,5	1	T
2	28B	12,9		P
3	13A	28,5		E1
4	8A	28,5		E2
5	16A	25,9		Vm - E1
6	15A	20,2		RE
7	23A	28,5		E3
8	1A	25,3	2	RE
9	15B	15,7		T
10	25A	28,5		E2
11	22A	28,5		E3
12	26A	28,5		E1
13	27A	15,1		P
14	14B	15,0		P
15	24A	29,1	3	Vm - E2
16	20A	28,3		T
17	21A	29,1		RE
18	12A	18,9	4	T
19	19A	28,5		E3
20	2A	28,5		E1
21	6A	28,5		E2
22	11A	28,9		RE
23	10A	15,1		P
24	5A	29,1		Vm - E2
25	9A	29,1	5	RE
26	7A	28,5		E3
27	14A	15,1		P
28	17A	26,8		T
29	18A	28,5		E2
30	3A	28,5		E1

Nota 1: Bloco 1—menor alteração; 2—pouca alteração; 3—média alteração; 4—muita alteração; 5—maior alteração Nota 2: RE (resistência à compressão e módulo de elasticidade); T (resistência à tração); Vm (variação de massa após exposição às condições E1 e E2); P (permeabilidade); E (expansão).

A Tabela 10 a seguir apresenta os demais testemunhos (constituintes da segunda extração – sentido montante – C1 e C2) selecionados apenas para os ensaios de acompanhamento de massa (V_m) em cada condição de exposição, de forma a constituir uma quantidade suficiente de amostras para análise.

Tabela 10: Distribuição dos testemunhos da segunda extração - sentido montante.

Classificação	Nº do Testemunho	Comprimento final (cm)	Blocos	Ensaio
Entre 2 e 3	33e2 – C2	26,0	1	V_m - E3
Entre 17 e 18	34e2 – C2	25,0	3	V_m - E1
Entre 2 e 3	35e2 – C2	34,0	1	V_m - E3
Entre 1 e 3	36e2 – C1	41,0	1	V_m - E3

4.5.2.4. Ensaios ultra-sônicos após extração

A maioria dos testemunhos, logo após a extração, foram submetidos aos ensaios ultra-sônicos fazendo-se a medida longitudinalmente com o objetivo de determinar a velocidade de propagação de ondas e correlacioná-la com o seu grau de alteração. A frequência de vibração de onda utilizada foi de 54 kHz.

4.5.2.5. Determinação das propriedades e características dos concretos

O módulo de elasticidade foi determinado na mesma amostra ensaiada à compressão (ASTM C-39), sendo esta levada até a ruptura e o módulo calculado a partir do diagrama tensão-deformação em 40% da carga de ruptura, de acordo com as formulações apresentadas na ASTM C-469. A norma americana foi empregada nesta etapa uma vez que faz citação quanto a possibilidade de determinação simultânea das duas propriedades na mesma amostra. Para todas as amostras era feita a correção da relação h/d , quando necessário, na determinação da resistência e a partir desta correção que o módulo era determinado. A velocidade de carregamento durante o ensaio foi constante e igual a 0,25 MPa/s, de acordo com as recomendações ASTM C-39. Foi utilizada uma prensa eletromecânica da marca Emic,

modelo DL 100-T e extensômetros elétricos da marca Emic, modelo EEDA, com comprimento de base de medida igual a 150mm.

O ensaio de permeabilidade seguiu o método de percolação de água sob pressão, de acordo com a NBR 10786/89, sendo adotada uma pressão igual a 2,1 MPa. Os corpos-de-prova foram cortados com o objetivo de manter a relação altura/diâmetro igual a 1 (um). Desta forma os CP's foram ensaiados na dimensão de 15 x 15 cm.

No ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral, realizado de acordo com a NBR 7222, foi utilizada uma prensa da marca Amsler, modelo 300D-75. A velocidade de carregamento foi mantida dentro da faixa estipulada por norma, em média 0,05 MPa/s. As amostras já rompidas foram destinadas ao teste de carbonatação na sua porção interna e determinação dos álcalis.

O teste de carbonatação foi realizado de acordo com a RILEM (1988). Esta análise foi realizada em uma das metades internas de todos os 15 testemunhos submetidos ao ensaio resistência à tração por compressão diametral (classes C0, C1 e C2), após as suas rupturas. O indicador empregado neste ensaio foi a fenolftaleína e as leituras da frente de carbonatação foram realizadas após 30 minutos e 24 horas da sua aspersão, sendo este último recomendado pela Rilem. A segunda parte dos testemunhos foi selecionada para análise química com o objetivo de verificar o teor de álcalis dos concretos.

As amostras restantes, que não foram destinadas aos ensaios mencionados anteriormente e que possuíam comprimento inferior a 14 cm, foram reservadas para outras investigações, incluindo a determinação da massa específica, índice de vazios e absorção, segundo a NBR 9778/87, sendo estes resultados apresentados no Apêndice C.

4.5.2.6. Análises microestruturais

Com o objetivo de verificar os minerais reativos presentes nos agregados e diagnosticar precisamente a RAA nos testemunhos de concreto extraídos através da formação de seus produtos, alguns testemunhos também foram selecionados para serem investigados através da microscopia ótica e eletrônica de varredura, respectivamente.

Para as análises por microscopia ótica tanto de luz transmitida como de luz refletida, foram selecionados 3 testemunhos, a partir dos 15 testemunhos de concreto submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral, para compor as amostras a serem analisadas. O objetivo principal na técnica por luz transmitida foi fazer a descrição mineralógica dos agregados constituintes dos concretos com ênfase na investigação dos minerais potencialmente reativos, do ponto de vista da RAA através da análise em lâminas delgadas. O microscópio empregado nesta etapa foi da marca Leitz, modelo Ortholux 2 Pol-BK. Já por microscopia ótica de luz refletida, o objetivo principal foi investigar os minerais constituintes dos opacos, através de sua identificação, descrevendo as alterações quando presentes. As análises foram realizadas em seções polidas confeccionadas com os agregados extraídos dos concretos. O microscópio utilizado nesta investigação foi da marca Zeiss, modelo Axioskop 40 Pol. Os três testemunhos selecionados para análise foram o de n. 15 (Classe 0), 34A (Classe 1) e 17A (Classe 2).

Já as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em 6 testemunhos de concreto, sendo dois testemunhos por classe de concreto (C0, C1 e C2), um constituinte do bloco B1 (menor grau de alteração na classe) e o outro do bloco B5 (maior grau de alteração na classe), após os ensaios de resistência à tração. As análises foram feitas após uma criteriosa inspeção visual e fragmentação dos testemunhos, sendo investigadas a suas porções internas com superfície de fratura. Foram utilizados o detector de elétrons secundários (SE) para obtenção das imagens e a espectrometria por energia dispersiva de raios-X (EDX) para as microanálises dos produtos. As amostras foram previamente metalizadas com ouro para se tornarem visíveis no MEV. Maiores detalhes sobre a técnica podem ser obtidos no item 4.7.9.

4.5.2.7. Ensaio de expansão e ultra-som

Para a realização dos ensaios de expansão, denominados ensaios de expansão residual, os testemunhos foram serrados de forma a se obter comprimento aproximado de 285 mm, conforme indicado na norma ASTM C-1293/01 para concretos moldados. Em seguida foram introduzidos pinos de aço inox nas extremidades dos testemunhos (os mesmos pinos utilizados na moldagem de prismas de concreto pela ASTM C-1293) de forma com que ficassem centralizados. Desta forma, os testemunhos tiveram que ser perfurados e os pinos

colados com adesivo epóxi fazendo com que o comprimento efetivo dos corpos-de-prova ficasse com 250 ± 2 mm.

Foram definidas cinco condições de exposição (E1 a E5) para os testemunhos da classe 1 e três (E1 a E3) para as classes 0 e 2, conforme seleção a partir da distribuição estatística nos ensaios de expansão. As condições foram:

1. E1-ASTM C-1293 tradicional - Exposto a $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade elevada ($\sim 90\%$);
2. E2-ASTM C-1293 - Exposto a $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com imersão em água (saturado);
3. E3-Exposto a $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com imersão em NaOH a 1N;
4. E4- Teste de expansão - Exposto a $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com imersão em $\text{LiNO}_3:\text{NaOH}$ com relação molar igual a 0,74;
5. E5- Teste de expansão após aplicação de tratamento com produto comercial a base de lítio, por saturação do corpo-de-prova durante 15 dias - Exposto a $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com imersão em NaOH a 1N.

Paralelamente às leituras de comprimento dos testemunhos extraídos, foram determinadas as velocidades de propagação de ondas durante o ensaio de expansão com a realização de leituras periódicas (aproximadamente 1 vez por mês) com o objetivo de correlacionar seus resultados com as expansões medidas, seguindo-se as mesmas condições de ensaio realizadas anteriormente.

Nesta mesma etapa, foram selecionados aleatoriamente três testemunhos para serem submetidos a cada uma das condições de exposição E1, E2 e E3 dos ensaios de expansão, com o objetivo de verificar apenas o seu comportamento no que diz respeito ao ganho de massa (denominado V_m) para os concretos constituintes das classes à montante (classes 1 e 2). Já para os concretos de jusante (classe 0) ensaiados na expansão, em todas as amostras foi feito o acompanhamento de massa em paralelo.

Adicionalmente, foi incluída a determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em todos os testemunhos submetidos às condições E1, E2 e E3 ao final de 1 ano e 2 anos para as classes 1 e 2 e 0,5 ano e 1 ano para classe 0, de forma a avaliar o

comportamento no tempo e ter dados suficientes para estudar o comportamento das duas propriedades. As amostras avaliadas após o ensaio de expansão foram:

- Jusante (C0): total de 15 testemunhos - 6 testemunhos (2 para cada condição E1, E2 e E3) com 6 meses de ensaio e 9 testemunhos (3 para cada condição) com 1 ano;
- Montante (C1 e C2): total 12 testemunhos (4 para cada condição) com 1 ano de ensaio e 12 (4 para cada condição) testemunhos após 2 anos submetidos às três condições de exposição.

4.6. INVESTIGAÇÃO DO AGREGADO QUARTZITO

As investigações realizadas com o quartzito tiveram o objetivo de complementar o estudo do concreto atacado pela RAA, extraído da galeria. Durante os estudos com os testemunhos extraídos, surgiram algumas questões que precisaram ser esclarecidas e, em função de não se ter controle de todas as variáveis envolvidas, decidiu-se por buscar explicações no agregado empregado nestes concretos para simular em laboratório o comportamento da reação.

4.6.1. Estudo mineralógico do agregado

O agregado quartzito, britado a partir dos matacões coletados na região da usina de Furnas, foi investigado por microscopia ótica de luz transmitida e microscopia ótica de luz refletida, após uma amostragem representativa do volume total de agregado preparado.

O objetivo principal na técnica por luz transmitida foi fazer a descrição mineralógica dos agregados constituintes dos concretos, com ênfase na investigação dos minerais potencialmente reativos do ponto de vista da RAA, através da análise em lâminas delgadas. O microscópio empregado nesta etapa foi da marca Leitz, modelo Ortholux 2 Pol-BK. Através da microscopia ótica por luz refletida, teve-se a intenção de identificar os opacos, indicando possíveis alterações, quando presentes. As análises foram realizadas em seções polidas confeccionadas com o agregado quartzito. O microscópio utilizado nesta investigação foi da marca Zeiss, modelo Axioskop 40 Pol.

4.6.2. Ensaio de expansão em argamassa pelo método acelerado

Os ensaios de expansão foram realizados com o objetivo de verificar a potencialidade reativa do agregado quartzito, segundo o método acelerado prescrito pela ASTM C-1260.

De acordo com o método de ensaio, três barras de argamassa foram confeccionadas nas dimensões de 25mm x 25mm x 285mm, relação cimento:agregado igual a 1:2,25 e relação água/cimento de 0,47 (em massa).

Após moldagem das barras, as mesmas foram curadas por 24 horas em câmara úmida seguidas por 24 horas de imersão em água a 80°C; após este período as barras foram imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N, e temperatura de 80 °C.

As barras foram medidas periodicamente e os resultados expressos em porcentagem de expansão, correspondendo a médias das três barras. As leituras foram realizadas por 60 dias com o objetivo de verificar o comportamento dos agregados a um tempo superior ao estipulado pela norma (16 dias).

4.6.3. Ensaio em concretos moldados em laboratório

Foram moldados corpos-de-prova de concreto com o objetivo de realizar ensaios de expansão e de determinar suas propriedades.

A dosagem do concreto empregada na confecção dos corpos-de-prova seguiu a especificação da ASTM C-1293 (2001), conforme apresentado a seguir:

- ✓ Cimento: 420 kg/m³
- ✓ Areia natural: 552 kg/m³
- ✓ Brita 19 mm: 1.187 kg/m³
- ✓ Água: 189 kg/m³
- ✓ Relação a/c: 0,45

4.6.3.1. Ensaio de expansão pelo método dos prismas de concreto e ultra-som

Os ensaios de expansão foram realizados com o objetivo de verificar a potencialidade reativa do agregado quartzito, segundo o método de prismas de concreto prescrito pela ASTM C-1293/01.

De acordo com este método, é feita uma avaliação da potencialidade reativa do agregado no que diz respeito à reação álcali-silica através da variação de comprimento de prismas de concreto.

Como exigência da norma, foi escolhido um agregado miúdo (areia quartzosa) não reativo uma vez que o objetivo foi avaliar a reatividade potencial do agregado graúdo quartzito. Desta forma, a areia natural escolhida foi previamente ensaiada pela ASTM C-1260, sendo verificado, na idade de 16 dias, expansões inferiores a 0,10 %. O módulo de finura da areia apresentou-se na faixa de $2,7 \pm 2$, conforme prescrito na referida norma (ver Apêndice D).

Os agregados graúdos empregados possuíam dimensão máxima de 19 mm e foram utilizados na proporção aproximada de 33 % nas frações entre 19 mm e 12,5 mm; 12,5 mm e 9,5 mm; 9,5 mm e 4,75 mm (em massa), segundo recomendações da norma ASTM C-1293 (Apêndice D).

Uma vez que o cimento escolhido para a dosagem já continha um elevado teor de álcalis (acima de 1,25% de equivalente alcalino, conforme exigido pela norma), não foi realizada nenhuma adição de NaOH na água de mistura. O cimento empregado continha teores de álcalis totais e solúveis iguais a 1,32% e 0,83%, respectivamente.

Foram preparados oito prismas de concreto nas dimensões de 75 mm x 75 mm x 285 mm. Após 24 horas da moldagem, os prismas foram retirados da câmara úmida, sendo realizada a primeira leitura de referência. Posteriormente, os prismas foram estocados em um recipiente com fechamento hermético de forma a manter uma elevada umidade interna. Os recipientes ficaram mantidos em sala climatizada, com temperatura igual a $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Foram separados quatro prismas com o objetivo de avaliar as expansões até a idade de um ano, de acordo com as prescrições da norma, denominados referências. Os quatro prismas restantes, no momento em que apresentaram expansões elevadas (acima do limite de 0,04% estipulado pela ASTM C-1293/01), foram tratados com um produto comercial à base de lítio

(nitrato de lítio), sendo acompanhamento o seu comportamento expansivo ao longo do tempo e até a idade de um ano.

Foram realizadas leituras de comprimento nas idades de 7 dias, 28 dias e a partir dessa idade, leituras mensais até o ensaio completar um ano. Os resultados foram expressos em porcentagem de expansão.

Em paralelo às leituras de comprimento e nas mesmas idades, a partir de 7 dias de ensaio, todos os prismas de concreto foram avaliados através de ensaios ultra-sônicos com o objetivo de acompanhar a velocidade de propagação de ondas e correlacioná-las com as expansões ao longo do tempo. As condições de ensaio foram as mesmas empregadas nos testemunhos, para o método direto.

4.6.3.2. Determinação das propriedades dos concretos moldados

A quantidade de corpos-de-prova moldados nesta etapa está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Quantidade de corpos-de-prova moldados e distribuição para ensaios.

Ensaio	Dimensão do CP (cm)	Idade (dias)				Nº de CP's por idade	Total de CP's
		28	90	180	365		
Resistência à compressão	10 x 20	X	X	X	X	6	24
Módulo de elasticidade		X	X	X	X		
Resistência à tração por compressão diametral		X	X	X	X	6	24
Permeabilidade	15 x 30	X	X		X	6	18
Total de CP's moldados							66

Todos os corpos-de-prova moldados foram submetidos a duas diferentes condições de exposição/cura. Desta forma, a quantidade apresentada na Tabela 11 já representa as duas condições. A primeira refere-se à estocagem em câmara úmida até a idade definida para ensaio. Na segunda, denominada ataque, os corpos-de-prova foram submetidos à mesma condição dos prismas de concreto conforme ASTM C-1293/01 até a idade de ensaio. Todas as propriedades determinadas seguiram as normas já apresentadas anteriormente para os testemunhos de concretos extraídos.

4.7. ESTUDO DO GEL EXSUDADO

Os géis exsudados, coletados na superfície dos concretos da galeria de drenagem do vertedouro, foram submetidos a uma investigação bastante extensa, sendo determinadas várias de suas propriedades bem como realizadas caracterizações através de técnicas avançadas. Dependendo da técnica empregada, foram selecionadas apenas algumas amostras a partir dos quatro tipos de gel (A, B, C e D) existentes para análise, sendo especificado em cada etapa de estudo. Destaca-se o maior número de análises com o gel denominado A, em virtude de se apresentar, em maior incidência, exsudado na superfície do concreto. Os géis foram coletados manualmente, utilizando-se uma pequena talhadeira, fazendo-se golpes delicados através de um martelo na sua base de forma com que o gel se desprendesse da superfície do concreto por inteiro, sem se quebrar.

As análises aqui apresentadas foram realizadas em vários locais, incluindo os laboratórios de Furnas Centrais Elétricas S.A., o Instituto de Química da UNICAMP, a Central de Análises do Departamento de Química da UFSC, o Laboratório de Materiais (LabMat) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e o Laboratório de Ressonância Magnética do Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

4.7.1. Análise visual e por lupa

Os géis foram inspecionados visualmente e com auxílio de lupa com o objetivo de registrar as suas características macroscópicas, entre elas a tonalidade, o formato e as características superficiais e óticas. A lupa utilizada foi um estereomicroscópio da marca Carl Zeiss, Stemi SV-11.

4.7.2. Análises químicas

As análises químicas das quatro amostras de gel (A, B, C e D) tiveram o objetivo de determinar os elementos químicos presentes em termos de óxidos, sendo empregada a técnica de espectroscopia de absorção atômica, utilizando-se um espectrofotômetro Unicam, modelo 989. Os álcalis foram determinados por complexometria, a partir da titulação das amostras.

Todas as análises foram feitas nas amostras de gel moídas (passante na peneira # 200, 75 μm). A perda ao fogo foi obtida através do aquecimento da amostra em mufla a temperatura abaixo de 700°C.

4.7.3. Determinação da densidade

A densidade do gel “A” foi estimada, em duplicata, a partir do método de picnometria (DANIELS, 1970; SHOEMAKER, GARLAND & NIBLER, 1989). Foi utilizado um picnômetro de vidro com as características apresentadas na Figura 24 a seguir, sendo um frasco volumétrico bastante preciso.

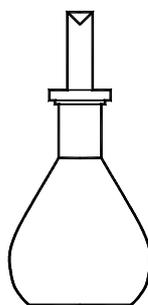


Figura 24: Representação de um picnômetro.

A presença do capilar no topo do picnômetro faz com que o volume excedente de líquido que ultrapassa a capacidade volumétrica do frasco seja eliminado. O método consiste em determinar o volume ocupado por uma massa conhecida da amostra de gel, calculando a densidade (ρ) a partir da relação massa/volume.

O picnômetro foi inicialmente pesado seco e vazio e depois pesado com a amostra, que foi previamente finamente moída (granulometria abaixo de 100 μm) utilizando-se almofariz e pistilo. O picnômetro já contendo a amostra foi preenchido com um líquido de densidade conhecida, no caso um óleo de silicone de elevada pureza ($\rho = 1,050 \text{ g/cm}^3$) e pesado novamente. Desta forma, o volume do líquido presente no picnômetro é encontrado por diferença uma vez que o volume total do picnômetro é conhecido, sendo calculado o volume ocupado pelo sólido (amostra de gel). O líquido usado (óleo de silicone) foi o mais apropriado por não exercer nenhuma interação com a amostra, como o intumescimento, por exemplo. A equação 3 apresenta a formulação usada.

$$\rho = \frac{\rho_{\text{silicone}}(w_2 - w_1)}{(\rho_{\text{silicone}} \cdot V_{\text{pic}}) + w_2 - w_3} \quad (4)$$

onde:

w_1 = massa do picnômetro vazio

w_2 = massa do picnômetro + amostra

w_3 = massa do picnômetro + amostra + silicone

V_{pic} = volume do picnômetro

4.7.4. Determinação da absorção de vapor de água

Amostras de gel “A”, in natura, foram expostas a umidade relativa de 100% e temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), sendo mantidas em ambiente fechado (dessecador) contendo água no fundo e dentro de outro recipiente no seu interior de forma a garantir a umidade constante. A determinação da absorção foi feita em duplicata, sendo calculada a partir do ganho de massa das amostras no tempo, sendo as mesmas pesadas periodicamente em balança analítica, estendendo-se o ensaio até aproximadamente 40 dias.

Optou-se por este tipo de metodologia, em vapor de água e sem imersão, em função de não ter sido possível determinar a absorção do gel com imersão em água pelo fato do material se dissolver quase que por completo na água.

4.7.5. Comportamento térmico

Amostras de gel “A”, in natura, foram submetidas a diferentes temperaturas (desde 100°C até temperaturas acima de 1000°C) sendo observada, visualmente, a alteração volumétrica das amostras em função da liberação de água.

4.7.6. Determinação do coeficiente de expansão térmica

4.7.6.1. Introdução

Os efeitos da temperatura produzem, em geral, dilatação dos materiais. Quando se trata de uma análise unidimensional e pequenas variações de temperatura, o comportamento segue a seguinte equação:

$$L - L_0 = \alpha L_0 (T - T_0) \Rightarrow \Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (5)$$

Onde L é o comprimento final do material, L_0 é o comprimento inicial do material, T é a temperatura final, T_0 é a temperatura inicial e α é o coeficiente de expansão térmica linear característico (CALLISTER Jr, 2000).

Quando a expansão ocorre de forma tridimensional, a análise da expansão térmica deve ser feita em volume, conforme expressão apresentada a seguir:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \Leftrightarrow \beta = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (6)$$

onde V representa o volume do material, β é o seu coeficiente de expansão térmica volumétrico. Para materiais com expansão isotrópica, ou seja, as expansões ocorrem de forma semelhante em todas as direções do espaço, tem-se que $\beta = 3\alpha$. (CALLISTER Jr, 2000).

4.7.6.2. Metodologia empregada

Com o objetivo de estimar o coeficiente de expansão térmica aparente do gel “A” foi utilizada a picnometria (DANIELS, 1970; SHOEMAKER, GARLAND & NIBLER, 1989), fazendo-se uma adaptação do método em função do tipo e formato das amostras do gel terem impossibilitando a utilização das normas disponíveis.

O picnômetro contendo uma massa conhecida de amostra, finamente moída (<100µm) utilizando-se almofariz e pistilo (<100 µm), foi preenchido com óleo de silicone, pesado e colocado em banho de óleo termostaticado a 50°C. Após cerca de 1 hora o picnômetro foi retirado do banho, resfriado a temperatura ambiente e todo o óleo que foi expelido do picnômetro pelo capilar foi cuidadosamente limpo. A expansão causada pela amostra com a temperatura foi calculada mediante a variação de volume do óleo no picnômetro, descontando-se a variação de volume apenas do óleo nas mesmas temperaturas.

4.7.7. Determinação do potencial zeta

4.7.7.1. Introdução

Conforme abordado no Capítulo 2 (em mecanismos de expansão), tem-se que a superfície de um sólido quando em contato com um líquido apresenta-se carregada eletricamente. No caso de sistemas coloidais, estas cargas dão origem à estabilidade coloidal. Algumas partículas apresentam grupos superficiais como - COOH, OSO₃H, NH₂, que podem reagir com ácidos ou bases para promover uma estabilidade de carga superficial (ver equações 7 e 8). Muitos óxidos metálicos, uma classe importante de colóides, possuem hidroxilas em sua camada superficial que podem ficar positiva ou negativamente carregadas, dependendo do pH em que se encontram (HUNTER, 1981; EVERETT, 1988; HUNTER, 1993; MYERS, 1999).



As cargas superficiais das partículas originam uma distribuição de cargas elétricas no líquido ao seu redor, conhecida como *dupla camada elétrica*. De forma simplificada, conforme apresentado na Figura 25, esta região é constituída por uma camada de íons de carga oposta adsorvidos sobre a superfície da partícula devido à atração eletrostática (camada de Stern), e uma segunda camada mais externa (camada difusa). Em muitos casos, o **potencial eletrostático de superfície** é determinado pela concentração dos chamados *íons determinantes de potencial*, que são específicos para cada tipo de sólido. Para óxidos em solução aquosa, os íons H^+ e OH^- são os íons determinantes de potencial, ou seja, a carga e potencial de superfície são determinados pelo **pH** da suspensão. Os óxidos tendem a adquirir potencial de superfície positivo em pH ácido e negativo em pH básico. (HUNTER, 1981; EVERETT, 1988; HUNTER, 1993; MYERS, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2000)

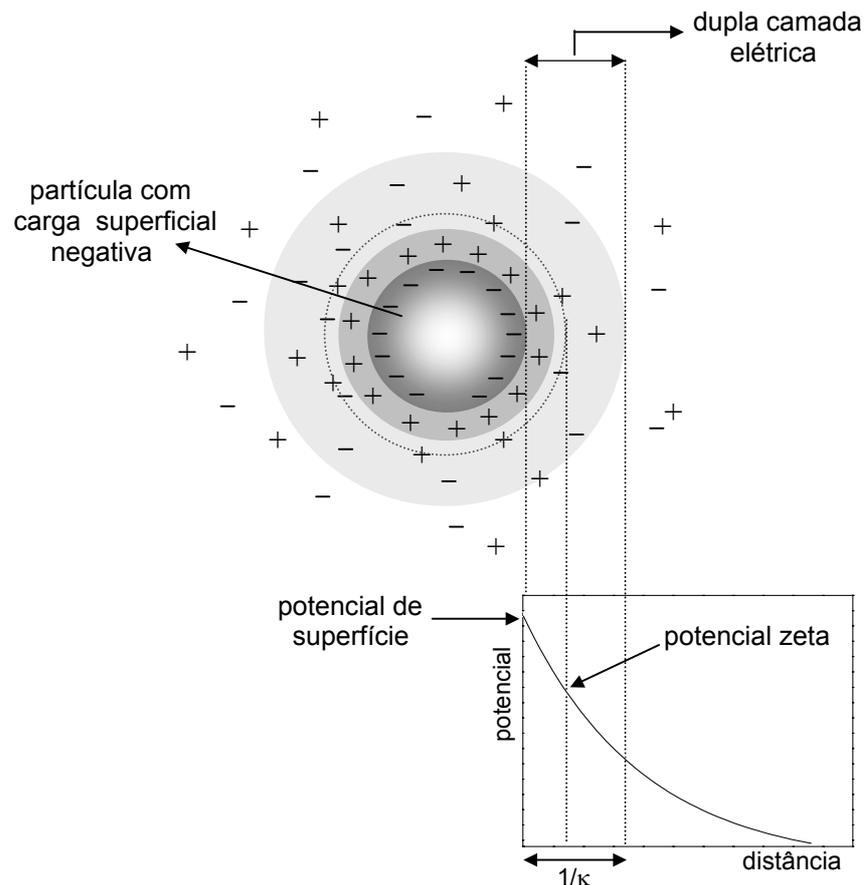


Figura 25: Esquema representativo da dupla camada elétrica e do potencial zeta.

Usualmente, experimentos baseados na mobilidade eletroforética das partículas (velocidade com que as partículas coloidais se movimentam sob a aplicação de um potencial elétrico) são usados para calcular o potencial elétrico no *plano de Stern* (camada intermediária entre a *camada de Stern* e a *camada difusa*, onde ocorre o cisalhamento pela movimentação da partícula no líquido) que é **denominado potencial zeta - ζ** (HUNTER, 1981; EVERETT, 1988; HUNTER, 1993; MYERS, 1999).

A magnitude do **potencial zeta** fornece uma indicação da estabilidade do sistema coloidal, representando a diferença de potencial entre duas camadas rígidas de íons positivos e negativos. Se as partículas em suspensão têm um alto valor absoluto (positivo ou negativo) de potencial zeta elas tendem a se repelir, eliminando a tendência das partículas de se agrupar (coagular). Já para valores baixos de potencial zeta (positivo ou negativo), ocorre agregação das partículas, não existindo forças para evitá-la. O pH no qual a densidade de carga superficial é zero é denominado **ponto isoelétrico** (ou potencial zeta crítico), sendo este dependente da natureza do sólido analisado. (HUNTER, 1981; EVERETT, 1988; SANTOS, 1989; HUNTER, 1993; MYERS, 1999; OLIVEIRA, 2000)

4.7.7.2. Metodologia empregada

A determinação do potencial zeta do gel, e mais especificamente do seu ponto isoelétrico, teve por objetivo verificar as melhores condições nas quais o gel, em termos de pH, possuiria um comportamento não expansivo, no qual as forças de repulsão seriam mínimas, a ponto de promover sua aglomeração, reduzindo portanto a espessura da dupla camada elétrica.

Para realização das análises de potencial zeta, tornou-se necessária uma preparação minuciosa de amostras de gel moídas com dimensões coloidais (abaixo de 1 μm). Amostras de gel do tipo “A” (o mais abundante) foram previamente submetidas à temperatura acima de 1000 °C para eliminação total da água, sendo em seguida previamente triturada manualmente utilizando-se almofariz e pistilo de ágata. Para obtenção da granulometria coloidal, utilizou-se um moinho vibratório de esfera de ágata modelo KM-1, marca MLW. Este moinho consiste de um almofariz de ágata, com capacidade para pequenas quantidades de amostra e uma única esfera de ágata com diâmetro de cerca de 5cm que, por vibração, mói a amostra dentro do almofariz.

As análises para determinação do potencial zeta do gel tipo “A”, representando o gel mais abundante exsudado na superfície do concreto, foram realizadas em um analisador eletroforético Malvern Zeta Master S. A técnica empregada mediu a variação da frequência de um feixe de laser (efeito Doppler), sendo determinada a mobilidade eletroforética e convertida em potencial zeta. As amostras foram dispersas em água, seguido do ajuste de pH para valores desde 2, 3, 7 até 9 utilizando-se ácido acético glacial. Utilizaram-se duas amostras de gel moídas, sendo realizadas dez medidas de potencial zeta em cada pH.

4.7.8. Análises térmicas

4.7.8.1. Termogravimetria e Análise térmica diferencial

4.7.8.1.1. Introdução

As análises térmicas são técnicas utilizadas para medir alterações nas propriedades físicas ou químicas dos materiais quando expostos a determinadas temperaturas. As modificações da amostra são observadas em um sistema de termoanálise, sendo monitoradas por um transdutor específico capaz de emitir sinais elétricos a partir das mudanças na amostra, que são amplificados eletronicamente, sendo lidos a partir de um registrador. Os resultados das análises térmicas são apresentados graficamente na forma de curvas ou picos (RAMACHANDRAN, 2001; MOTHÉ & AZEVEDO, 2002).

A **termogravimetria (TG)** é um método que estuda as alterações de massa da amostra (termobalança), quando aquecida em um forno gradativamente no tempo. Com a curva da termogravimetria derivada DTG (que representa a primeira derivada da curva TG) pode-se obter um resultado mais detalhado do comportamento da amostra, indicando com precisão, por exemplo, a determinação da temperatura em que a velocidade de perda de massa é máxima, entre outros. A TG fornece também informações sobre o conteúdo dos componentes voláteis como solventes ou água e sobre o comportamento de decomposição da amostra (SANTOS, 1989; MOTHÉ & AZEVEDO, 2002).

Na técnica de **análise térmica diferencial (DTA)** é medida a diferença de temperatura entre a amostra e uma referência inerte, quando submetidas ao aquecimento ou resfriamento. A partir desta técnica é possível analisar as mudanças que ocorrem na amostra com a temperatura, se de origem endotérmica ou exotérmica, proporcionando informações importantes como a temperatura de fusão e cristalização, reações de decomposição, mudança de fase, oxidação, entre outros (RAMACHANDRAN, 2001; MOTHE & AZEVEDO, 2002).

4.7.8.1.2. Metodologia empregada

As análises termogravimétrica e termodiferencial foram realizadas simultaneamente em um equipamento da marca Netzsch, modelo STA 409EP. Foi empregada uma taxa de aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio, no intervalo de temperatura de 20 a 1100°C, utilizando-se um cadinho de alumina. A amostra foi analisada na forma de pó (< 53µm), cerca de 25 mg, após moagem em almofariz de ágata e peneiramento.

4.7.8.2. Determinação da temperatura de transição vítrea

Com o objetivo de estimar a temperatura de transição vítrea (T_g) do gel, que representa a temperatura a partir da qual regiões amorfas adquirem mobilidade (MANO & MENDES, 1999), três amostras do gel tipo “A”, in natura e previamente aquecidas acima de 1000°C, para remoção total da água, foram estudadas.

As amostras foram submetidas a um aquecimento gradual em forno mufla. A temperatura do forno foi acompanhada utilizando-se um Termopar modelo 600-0000, tipo K, marca Barnant Company, com precisão de ± 1°C. A transição vítrea foi evidenciada pelo amolecimento das amostras conforme pressão realizada com um bastão metálico.

4.7.9. Microscopia eletrônica de varredura

4.7.9.1. Introdução

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que permite a investigação de amostras através da produção de imagens com alta resolução. O poder de resolução de um microscópio refere-se à capacidade de separação de dois pontos do objeto na formação da imagem, possuindo o microscópio eletrônico de varredura (MEV) uma resolução média da ordem de 200 Angstroms (PADILHA & AMBRÓSIO FILHO, 1985; SARKAR, AIMIN & JANA, 2001).

Quando o feixe de elétrons produzido a partir de um filamento de tungstênio incide sobre a amostra, diversos sinais são originados como, por exemplo, os elétrons secundários (SE), os elétrons retroespalhados (BSE) e os Raios X, sendo coletados independentemente. O termo varredura se refere à propriedade que o feixe tem de varrer a superfície da amostra, a partir de uma bobina de varredura acoplada ao equipamento (PADILHA & AMBRÓSIO FILHO, 1985; KESTENBACH & BOTTA FILHO, 1989).

Os detectores de elétrons secundários e retroespalhados fornecem informações da imagem, sendo os SE responsáveis pela formação da imagem tridimensional, apresentando a topografia da superfície da amostra. Já os elétrons retroespalhados têm a principal característica de apresentar maior contraste entre os elementos, a partir das diferentes massas atômicas de forma a facilitar a identificação das várias fases presentes na amostra. O espectrômetro por energia dispersiva de raios X (EDX), em conjunto com o MEV, é útil para obtenção de informações relativas à composição química elementar da fase analisada na amostra, de forma simultânea à análise da imagem (PADILHA & AMBRÓSIO FILHO, 1985; SARKAR, AIMIN & JANA, 2001).

A operação do MEV depende de um sistema de vácuo interno (pressão de aproximadamente 10^{-2} Torr), levando conseqüentemente à secagem da amostra. Todas as amostras a serem analisadas no MEV devem sofrer uma preparação prévia através da deposição de fina camada de material condutor sobre as suas superfícies, conhecida como metalização. (SARKAR, AIMIN & JANA, 2001).

4.7.9.2. Metodologia empregada

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em um equipamento da LEICA, modelo S440i, em amostras provenientes dos quatro tipos de gel (A, B, C e D) com superfícies de fratura, após a sua fragmentação, com o objetivo de avaliar sua porção interna. Durante as análises no MEV foi utilizado o detector de elétrons secundários (SE) para formação das imagens em conjunto a técnica de espectrometria por energia dispersiva de raios-X (EDX), para as microanálises pontuais dos elementos químicos presentes. Foram feitas microanálises qualitativas e semi-quantitativas dos géis. Todas as amostras analisadas no MEV sofreram uma preparação prévia, através da deposição de fina camada de material condutor (Au-ouro) sobre as suas superfícies (em média 25nm).

4.7.10. Difratometria de raios X

4.7.10.1. Introdução

A difratometria de raios X é uma técnica que revela a estrutura cristalina das fases que compõem os materiais através das distâncias interatômicas, fazendo o uso dos raios X (VAN VLACK, 1992; CHATTERJEE, 2001).

Os raios X representam ondas eletromagnéticas, estando associados à perda de energia dos elétrons. Para obtenção desta radiação, uma fonte aquecida eletricamente, usualmente um filamento de tungstênio, emite elétrons que são acelerados por uma diferença de potencial entre o filamento (catodo) e um alvo metálico (anodo), como o cobre. Os átomos do anodo absorvem a energia dos elétrons reemitindo-os sob a forma de radiação X. Neste processo 98% de energia é perdida na forma de calor e apenas 2% transformada em raios X. Estes raios X produzidos são os que vão ser incididos na amostra durante a análise (SANTOS, 1989).

Quando o feixe de raios X é lançado sobre um material cristalino (amostra), os raios são difratados em função dos planos atômicos ou íons presentes no cristal, sendo o ângulo de difração dependente tanto do comprimento de onda dos raios X como das distâncias interplanares. Considerando os planos atômicos paralelos, tanto as ondas como os raios X são

refletidos e para que as reflexões permaneçam em fase a seguinte equação (regida pela lei de Bragg) deve ser aceita (KESTENBACH & BOTTA FILHO, 1989; VAN VLACK, 1992):

$$n\lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen}\theta \quad (9)$$

onde λ é o comprimento de onda, d a distância interplanar (distância característica entre os planos de um cristal), θ o ângulo de difração (ângulo de Bragg) dos raios X e n o número de ondas.

A intensidade do feixe dos raios X difratado é coletado por um contador Geiger, registrando graficamente os ângulos de difração. Sendo o ângulo de difração determinado experimentalmente e o comprimento de onda conhecido, pode-se calcular a distância interplanar dos vários planos do composto cristalino permitindo a sua identificação, sendo que cada cristal possui características de difração diferentes (PADILHA & AMBRÓSIO FILHO, 1985; SANTOS, 1989).

4.7.10.2. Metodologia empregada

As análises por difratometria de Raio-X foram realizadas em equipamento da Siemens, de modelo D5000, utilizando um filamento de tungstênio para geração dos elétrons e apenas as radiações $K\alpha$ e tubo de cobre, com varredura 2θ variando de 3° a 70° e resolução de $0,02^\circ$. As amostras puras de gel do tipo A, B, C e D foram pulverizadas em almofariz de ágata, possuindo granulometria inferior a $53\mu\text{m}$ para análise pelo método do pó não orientado. Outra amostra de gel do tipo A, que se apresenta em maior incidência na barragem, foi submetida a uma solução de LiNO_3 e NaOH com relação molar de 0,74:1 (Li:Na), denominado gel atacado, e também analisada por difração. Esta concentração foi escolhida a partir dos dados apresentados na literatura (item 2.4), sendo considerada uma concentração eficiente no combate da reação. No ataque, cerca de 0,5 g do pó foi imersa na solução descrita por 48 horas em recipientes de volume pequeno e de grande relação área exposta/volume, sendo toda esta etapa realizada no interior de um balão de polietileno preenchido com gás N_2 . A relação aproximada entre a massa do pó de gel e da solução foi de 0,07. No final, a amostra

atacada foi seca em estufa a vácuo e temperatura ambiente ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) com sílica gel como corpo de chão, até que houvesse o desaparecimento do líquido. O período de secagem estendeu-se por aproximadamente dois dias. O resíduo da secagem, um material sólido, quebradiço e que apresentava aderência com o polietileno do recipiente, foi moído manualmente novamente com o conjunto almofariz/pistilo de ágata e submetido a peneiramento em peneira com abertura de malha de $53 \mu\text{m}$ para as análises.

4.7.11. Espectrometria de infravermelho

4.7.11.1. Introdução

A radiação no infravermelho (IR) corresponde à parte do espectro situada entre as regiões do visível e das microondas. Esta radiação é produzida por uma fonte aquecida eletricamente, usualmente um filamento de Nernst ou Globar (bastão de carvão de silício) a temperaturas que alcançam 1000 a 1800°C (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000).

Quando uma determinada molécula é exposta à radiação IR, esta sofre determinadas e complexas vibrações de deformação tanto axial (estiramento) como angular com modos vibracionais variados, indicando o movimento dos átomos que se encontram ligados. Nem todos os tipos de vibração são detectados pelo IR (WHETSEL, 1968; SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000). As vibrações moleculares podem ser classificadas conforme Tabela 12.

Tabela 12: Tipos de vibração e modos vibracionais de uma molécula.
Fonte: SILVERSTEIN & WEBSTER (2000)

Tipos de vibração molecular	Modos vibracionais
Deformação axial (estiramento)	Simétrica
	Assimétrica
Deformação angular	Simétrica no plano
	Simétrica fora do plano
	Assimétrica no plano
	Assimétrica fora do plano

A radiação IR na faixa de 10.000 a 100 cm^{-1} , quando absorvida pelas moléculas, é convertida em energia de vibração molecular. Um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) permite a obtenção de espectros a partir da captura das variações de intensidade de radiação coletada no detector, após atravessar a amostra. Assim, o espectro aparece normalmente como uma série de bandas de vibração, principalmente entre 4.000 e 400 cm^{-1} . A frequência ou comprimento de onda de uma absorção depende das massas relativas dos átomos, das constantes de força das ligações e da geometria dos átomos (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000, GHOSH, 2001).

As posições das bandas presentes no espectro de IR são normalmente apresentadas em número de ondas, tendo como unidade o centímetro inverso (cm^{-1}), sendo proporcional à energia de vibração. Os números de ondas representam o inverso dos comprimentos de ondas ($\text{cm}^{-1} = 10^4/\mu\text{m}$). Já as intensidades das bandas do IR podem ser apresentadas tanto em transmitância (T) como absorbância (A), sendo a transmitância a razão entre a energia radiante transmitida pela amostra e a energia incidente sobre ela e a absorbância o logaritmo, na base 10, da transmitância ($A = \log_{10}(1/T)$). (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000)

As análises por espectrometria no infravermelho permitem uma investigação da estrutura molecular dos materiais, permitindo também a identificação de compostos químicos presentes em um determinado material, complementando outras técnicas (WHETSEL, 1968; GHOSH, 2001).

4.7.11.2. Metodologia empregada

Amostras de gel do tipo A foram fragmentadas, sendo selecionadas as suas porções internas. Estes fragmentos do gel foram moídos através de almofariz/pistilo de ágata, sendo o pó resultante da moagem passante na peneira de abertura 53 μm . O material foi dividido em duas amostras, uma para ser analisada pura e outra analisada após ataque em solução de LiNO_3 e NaOH com relação molar 0,74:1 (Li:Na), conforme apresentado no item 4.7.10.2.

A análise por espectroscopia no infravermelho foi realizada num espectrofotômetro ABB Bomem Inc., modelo FTLA 2000, por transformada de Fourier. As amostras previamente preparadas (cerca de 1mg) foram maceradas conjuntamente com brometo de potássio (KBr)

seco de forma a constituir amostra suficiente para análise, material este que não interfere na absorção da amostra no IR. Em seguida, todo o material foi transferido para um pastilhador e compactadas a vácuo, para a obtenção de uma pastilha transparente com 13mm de diâmetro. As amostras foram analisadas por transmissão normal na região de 4000 a 400 cm^{-1} e as intensidades das bandas expressas em transmitância.

4.7.12. Ressonância nuclear magnética

4.7.12.1. Introdução

A espectrometria de ressonância nuclear magnética (RNM) é uma das técnicas mais efetivas para estudar os materiais em escala atômica (KIRKPATRICK, 2001). É outra forma de espectroscopia de absorção com similaridades à espectrometria de infravermelho ou ultravioleta (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000).

O fenômeno da RMN está baseado numa propriedade básica dos núcleos atômicos: o momento de spin nuclear. Esta propriedade pode ser interpretada em termos da existência de um momento de dipolo magnético permanente, intrínseco ao isótopo considerado. A magnitude deste momento de dipolo é própria de cada isótopo. Aqueles núcleos com momento magnético (ou spin) não nulos são potencialmente ativos para a técnica de RMN. O número de spin é determinado a partir da massa e número atômico do núcleo (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000).

Com o objetivo de analisar a estrutura do material, a amostra é submetida a um campo magnético gerado a partir de um magneto supercondutor. Neste campo, os núcleos possuem duas orientações com energias magnéticas diferentes: com o seu momento de dipolo paralelo ao campo (mínima energia) ou antiparalelo. Desta forma, existem dois níveis de energias acessíveis para os núcleos, cuja diferença de energia ΔE depende do campo aplicado e do isótopo em particular considerado. Aplicando radiação eletromagnética com frequência ν tal que coincida com o valor da frequência de ressonância do núcleo (ν_0), que satisfaz a relação de Planck $\Delta E = h \nu_0$ (h representa a constante de Planck), esta radiação será absorvida pelos

núcleos orientados paralelamente ao campo, sendo levados a um alinhamento antiparalelo ao campo. Este fenômeno de *absorção ressonante*, que ocorre somente quando a amostra é irradiada na frequência de ressonância ν_0 dos núcleos estudados, é o princípio fundamental da espectroscopia por RMN. Para campos magnéticos normalmente produzidos em laboratório, com intensidades entre 2,3 a 17,5 tesla (T), as frequências de ressonância dos núcleos resultam na região das radiofrequências, de 100 a 750MHz (KIRKPATRICK, 2001). O espectro de RMN é a representação da absorção de energia eletromagnética pela amostra em função da frequência ν dessa radiação. (FUKUSHIMA & ROEDER, 1981)

A irradiação da amostra é tipicamente rápida (alguns microsegundos), na forma de um pulso de radio-frequência. Este processo é chamado de excitação do sistema de núcleos e promove alteração no seu estado de equilíbrio. Quando a irradiação é desligada, os núcleos começam a retornar paulatinamente ao seu estado de mínima energia, com momento de dipolo paralelo ao campo. Eventualmente, após um tempo da ordem de milisegundos até segundos, o sistema retorna a seu estado de equilíbrio inicial. Este processo de retorno ao equilíbrio dos momentos de dipolo nucleares é monitorado ao longo do tempo. No espectrômetro de RNM a amostra se encontra dentro de uma bobina (diâmetro 7mm, comprimento 1cm), que atua como uma antena tanto durante a excitação como durante o período de retorno ao equilíbrio (período de medida). Durante a medida, as variações de orientação dos núcleos individuais, retornando ao equilíbrio, produzem variações na magnetização total da amostra (resultante da soma de todos os momentos nucleares individuais). Esta variação de momento magnético cria campos magnéticos variáveis que pela sua vez induzem voltagens sobre a bobina. A medida destas voltagens permite monitorar se houve absorção de energia por parte dos núcleos atômicos. (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000; KIRKPATRICK, 2001)

Os espectrômetros de RNM têm a capacidade de gerar e receber os pulsos de radio frequência. O espectrômetro, pulsado com transformada de Fourier, permite a captura dos sinais de magnetização (decaimento livre de indução) emitidos pelos núcleos, transformando-os em forma de espectro (FUKUSHIMA & ROEDER, 1981).

O interesse do fenômeno da RMN em Química ou Ciência de Materiais está baseado no fato que a frequência de ressonância ν_0 é sensível ao ambiente químico ao redor do núcleo. Isto é assim por que o tipo de ligações químicas estabelecidas pelo átomo onde se encontra o núcleo ressonante e o tipo de átomos vizinhos modificam o valor do campo magnético total que

efetivamente existe no sítio do núcleo, mudando assim o valor da energia ΔE . Este fenômeno é chamado de desvio químico das frequências de RMN (FUKUSHIMA & ROEDER, 1981). A espectroscopia por RMN de alta resolução, através da medida precisa das frequências de ressonância perturbadas por estes campos magnéticos locais, permite diferenciar a presença de núcleos da espécie de interesse em diferentes sítios cristalográficos ou químicos da estrutura do material.

As frequências de ressonância são normalmente apresentadas em termos de desvios δ , em vez de MHz, relativos a um padrão. Os desvios representam a diferença entre a frequência de ressonância da espécie nuclear na amostra de interesse com relação à frequência dessa mesma espécie numa amostra adotada convencionalmente como padrão. Dada que os desvios são extremamente pequenos é conveniente expressar em termos de partes por milhão em frequência (ppm).

Os espectros de RMN de uma espécie nuclear determinada podem conter um ou mais picos de absorção, dependendo da posição estrutural que o núcleo se encontra, e conseqüentemente com diferentes desvios químicos. Num espectro, para núcleos de $\text{spin}=1/2$, cada linha de RMN observada corresponde a um sítio estrutural diferente dentro do material. No caso dos silicatos, a RMN pode auxiliar na investigação da sua vizinhança química e estrutural, caracterizando em particular o grau de conexão mútua entre grupos silicatos, também chamado de grau de polimerização dos silicatos. (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000; KIRKPATRICK, 2001)

4.7.12.2. Metodologia empregada

A análise por espectroscopia de RNM foi realizada em amostras (< 1g) obtidas a partir dos quatro tipos de gel (A, B, C e D) pulverizados manualmente em almofariz (> 10 μm), utilizando um espectrômetro de alta resolução Varian Unity INOVA com campo magnético de 9,4 T, com porta-amostras de nitreto de silício e zircônia. Os espectros de ^{29}Si foram obtidos a partir de pulsos de radiofrequência com duração de 4,2 μs . Para melhorar a relação sinal ruído o experimento é repetido (da ordem de 1000 até 3000 vezes) e é obtido um sinal médio. O tempo entre experimentos, necessário para permitir o retorno dos núcleos ao estado de equilíbrio, foi de 3600s para o caso do ^{29}Si . Os espectros do ^{23}Na foram medidos em pulsos

com duração de $0,5\mu\text{s}$ e tempo de retorno de $0,5\text{s}$. Já os espectros de ${}^7\text{Li}$ foram obtidos com pulsos de $3\mu\text{s}$, e tempo de repetição de 10s . Todos espectros foram obtidos por transformada de Fourier a partir dos decaimentos medidos. As referências utilizadas para os desvios do ${}^{29}\text{Si}$, ${}^{23}\text{Na}$ e ${}^7\text{Li}$ foram a caulinita, uma solução aquosa de $0,1\text{M}$ de NaCl e $0,1\text{M}$ de LiCl , respectivamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA INVESTIGAÇÃO DO CONCRETO DA UHE FURNAS

5.1. ENSAIOS NO CONCRETO DA GALERIA

5.1.1. Inspeção visual *in loco*

A partir da inspeção visual “in loco” realizada na superfície do concreto da galeria, na camada de concretagem n.7, verificou-se características distintas relativas à RAA.

À jusante, não foi verificado na superfície do concreto nenhum indício significativo da RAA e tampouco a presença de gel e manchas pela inspeção visual. O concreto apresentava-se com um aspecto íntegro. Desta forma, a região jusante foi denominada de **Classe 0 (sem indícios da RAA)**.

Já a montante, foram identificadas duas regiões distintas, sendo divididas em 2 Classes (1 e 2) conforme segue:

A primeira classe (**Classe 1**) representa o **concreto que se apresentava com menores indícios da RAA (concreto menos afetado)**, contendo às vezes gel exsudado na superfície, porém em quantidade pouco expressiva (furo 29 ao 66).

Já a **Classe 2** representa o **concreto mais afetado pela RAA**, contendo uma quantidade bastante expressiva de gel bem como a incidência de fissuração em algumas regiões, na superfície do concreto (furo 1 ao 28).

As Figuras 26 a 28 apresentadas a seguir registram algumas das características observadas durante as inspeções realizadas in loco no concreto de montante.



Figura 26: Detalhe de fissura horizontal na superfície do concreto.



Figura 27: Detalhe do gel exsudado e manchas escuras ao redor.



Figura 28: Detalhe de gel exsudando a partir de uma fissura na superfície do concreto.

5.1.2. Ensaio ultra-sônicos

Os resultados dos ensaios ultra-sônicos realizados, através do método indireto, na superfície do concreto, mais especificamente na região onde posteriormente foi feita a extração dos testemunhos, podem ser visualizados na Figura 29 e Tabela 13 apresentadas a seguir. Encontram-se apresentados os resultados de forma sequencial (ordenação global), em função da ordenação dentro de cada classe. Os valores individuais encontram-se apresentados no Apêndice E.

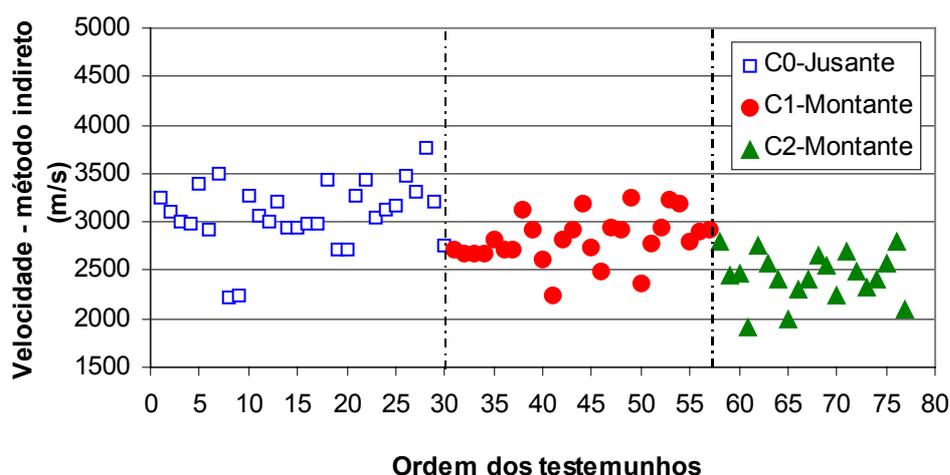


Figura 29: Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - Concretos Classe 0, 1 e 2 – Método Indireto.

Tabela 13: Dados relativos à velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - método indireto.

Classe	n. amostras	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Coef. Variação (%)
C0-Jusante	30	3080	335	11
C1-Montante	27	2826	248	9
C2-Montante	20	2443	248	10

Observa-se a partir da Figura 18 que, dentro da mesma classe, não se tem um decréscimo significativo da velocidade ultra-sônica no método indireto empregado à medida que o grau de alteração dos testemunhos aumenta. Porém observam-se diferenças entre as 3 classes estudadas (Tabela 13), sendo que as velocidades determinadas na Classe 0 são, na sua maioria, superiores às da Classe 1, e esta última superior às da Classe 2 (mais alterada). Esta diferença observada apresenta-se significativa do ponto de vista estatístico, através de análise de variâncias conforme Tabela 14. Portanto, para esta propriedade, todas as classes diferem entre si no método indireto, não havendo também agrupamento pelo teste de homogeneidade de grupos por Duncan, pertencendo a três grupos distintos.

Tabela 14: Análise de variância para a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - método indireto.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Classe do concreto	4868479,00	2	2434240,00	29,98	3,12	S
Erro	6008710,00	74	81199,00			
Total	10877189,00	76	---			

Com base nos resultados, pode-se constatar que a velocidade ultra-sônica em concretos que se apresentam mais deteriorados é menor do que em concretos bons, provavelmente em função da maior microfissuração gerada em virtude da RAA. Resultados semelhantes foram observados por Kobori *et al.* (2004).

5.2. INVESTIGAÇÃO DOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS

5.2.1. Inspeção visual

As características visuais observadas nos testemunhos extraídos com o objetivo de ordená-los em função do grau de alteração, de menos alterado (nº 1) para mais alterado (até nº 38 para Classe 1 e até nº 30 para as Classes 0 e 2), podem ser visualizadas nas Tabelas 15 a 17.

Tabela 15: Características observadas nos testemunhos da Classe 0.

Nº da amostra	Poro com neoformação			Borda de RAA			Fissuras			Manchas			Classificação dentro da Classe 0
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
16										X			1
23	X									X			2
18	X									X			3
17				X						X			4
22				X						X			5
12				X						X			6
4	X									X			7
27	X									X			8
24				X						X			9
13	X									X			10
8	X										X		11
5	X										X		12
3	X												13
9	X											X	14
29							X ¹			X			15
20	X			X						X			16
10	X			X						X			17
14	X			X						X			18
25	X			X						X			19
26	X			X						X			20
7	X			X						X			21
19	X			X						X			22
28	X			X						X			23
6	X			X						X			24
11	X			X						X			25
30	X			X						X			26
21	X			X						X			27
1	X			X							X		28
2	X			X								X	29
15	X					X				X			30

Nota 1 – Descolamento na interface pasta-agregado.

Tabela 16: Características observadas nos testemunhos da Classe 1 -
Concreto menos alterado.

Nº da amostra	Poros com neoformação			Borda de RAA			Fissuras			Manchas			Classificação dentro da Classe 1
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
52A	X									X			1
55A				X						X			2
45A				X						X			3
48A	X									X			4
49A				X							X		5
53A	X										X		6
32A		X								X			7
51A		X									X		8
55B	X			X						X			9
61A	X			X						X			10
42A	X			X						X			11
64A	X			X						X			12
39A	X			X						X			13
40A	X			X						X			14
36A	X			X						X			15
47A	X			X						X			16
56A	X			X						X			17
41A	X			X						X			18
30A	X			X						X			19
36B	X			X							X		20
44A	X			X							X		21
33A	X			X							X		22
50A	X			X								X	23
38A	X			X								X	24
43A	X				X					X			25
54A	X				X					X			26
60A		X		X						X			27
59A		X		X						X			28
46B		X		X						X			29
31A		X		X						X			30
62A		X		X							X		31
63A		X		X							X		32
35A		X		X								X	33
29A			X	X						X			34
34A			X	X								X	35
65A		X		X			X				X		36
57A		X		X			X				X		37
58A		X		X			X				X		38

Tabela 17: Características observadas nos testemunhos da Classe 2 -
Concreto mais alterado.

Nº da amostra	Poros com neoformação			Borda de RAA			Fissuras			Manchas			Classificação dentro da Classe 2
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
28A	X									X			1
28B	X									X			2
13A	X			X						X			3
8A	X			X						X			4
16A	X			X						X			5
15A	X			X							X		6
23A	X			X							X		7
1A	X			X							X		8
15B	X			X							X		9
25A	X			X								X	10

Nº da amostra	Poros com neoformação			Borda de RAA			Fissuras			Manchas			Classificação dentro da Classe 2
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
22A		X		X								X	11
26A		X		X								X	12
27A		X		X								X	13
14B	X					X				X			14
24A			X	X						X			15
20A			X	X						X			16
21A			X	X							X		17
12A	X							X ¹		X			18
19A	X			X			X			X			19
2A	X			X			X					X	20
6A	X			X				X		X			21
11A	X			X					X	X			22
10A	X			X					X		X		23
5A	X			X					X			X	24
9A	X			X					X			X	25
7A			X	X			X					X	26
14A	X					X			X			X	27
17A	X			X			X ²					X	28
18A	X					X	X ²				X		29
3A			X			X		X ³				X	30

Nota 1 – Ocorre a presença de material branco depositado na pasta, em dois pontos, na região entre fissuras de agregados;

Nota 2 – Descolamento do agregado na interface com a pasta;

Nota 3 – Fissura no agregado e descolamento na interface pasta-agregado.

A Tabela 18 apresenta as características observadas no concreto à montante, referente à segunda campanha de extração. Neste caso, foi feita uma classificação em função das intensidades registradas uma vez que não se dispunha dos demais testemunhos para comparação visual entre eles, pois já se encontravam em ensaio.

Tabela 18: Características observadas nos testemunhos extraídos na segunda campanha de extração (e2) das Classes 1 e 2.

Nº da amostra	Poros com neoformação			Borda de RAA			Fissuras			Manchas			Classificação dentro da sua Classe (C1 ou C2)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
31e2 – C2		X		X				X				X	entre 25 e 26
32e2 – C2		X		X					X			X	≅ 26
33e2 – C2			X								X		entre 2 e 3
34e2 – C2			X	X							X		≅ 17
35e2 – C2		X										X	entre 2 e 3
36e2 – C1	X									X			entre 2 e 3

As fotografias apresentadas nas Figuras 30 a 48, a seguir, registram as principais manifestações observadas em alguns dos testemunhos extraídos, sendo apresentada primeiro a classe, seguindo o bloco e por fim o número do testemunho (ex.: C0-B1-16).

Classe 0



Figura 30: Manchas escuras (C0-B1-16).



Figura 31: Poro branco e manchas (C0-B1-12).



Figura 32: Poro branco (C0-B4-7).



Figura 33: Manchas (C0-B5-2).



Figura 34: Borda de reação (C0-B5-15).



Figura 35: Poro com deposição branca (C0-B5-15).

Classe 1



Figura 36: Manchas escuras (C1-B1-48A).



Figura 37: Poro branco (C1-B2-64A).



Figura 38: Mancha e borda de reação (C1-B3-30A).



Figura 39: Poro com deposição branca e mancha (C1-B4-50A).



Figura 40: Borda de reação (C1-B5-58A).

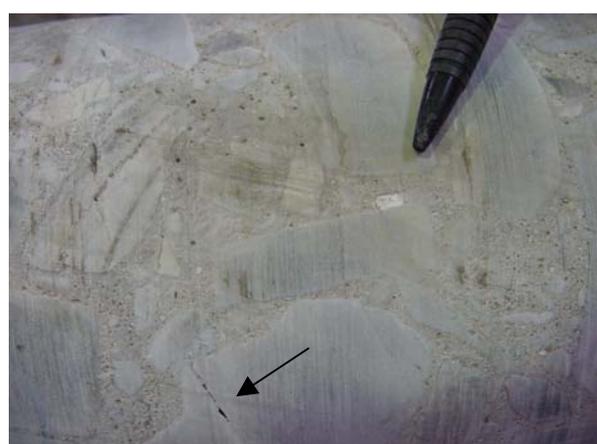


Figura 41: Fissuras no agregado e poro branco (C1-B5-57A).

Classe 2



Figura 42: Poro branco próximo ao agregado C2-B1-28).



Figura 43: Borda de reação (C2-B2-25A).



Figura 44: Manchas (C2-B4-12A).



Figura 45: Fissuras cortando os agregados e preenchidas por gel na argamassa (C2-B4-12A).

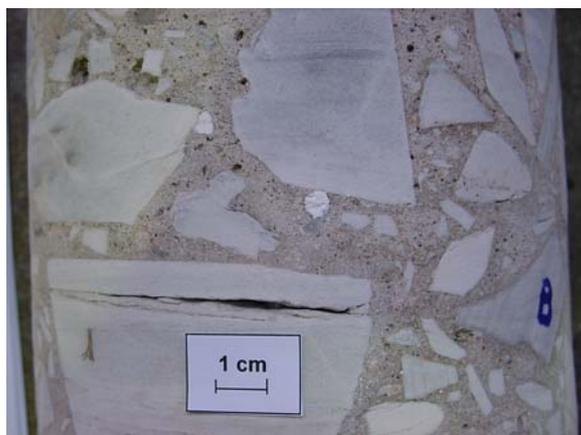


Figura 46: Poro branco e fissura no agregado (C2-B5-3A).

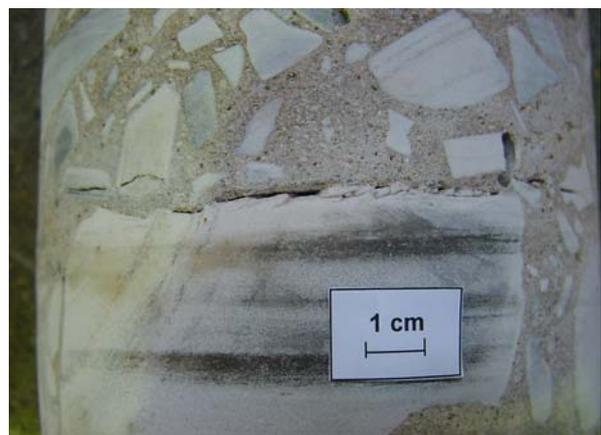


Figura 47: Descolamento na interface com o agregado (C2-B5-3A).



Figura 48: Manchas (C2-B5-3A).

5.2.2. Ensaio ultra-sônicos

Os resultados referentes às velocidades de propagação de ondas ultra-sônicas determinadas longitudinalmente, através do método direto, nos testemunhos de concreto extraídos para as 3 classes definidas a partir da inspeção visual, encontram-se apresentados na Figura 49 e Tabela 19. A ordem dos testemunhos representa a classificação global e segue o seqüencial obtido a partir da ordenação por cada classe. Os resultados individuais encontram-se apresentados no Apêndice E.

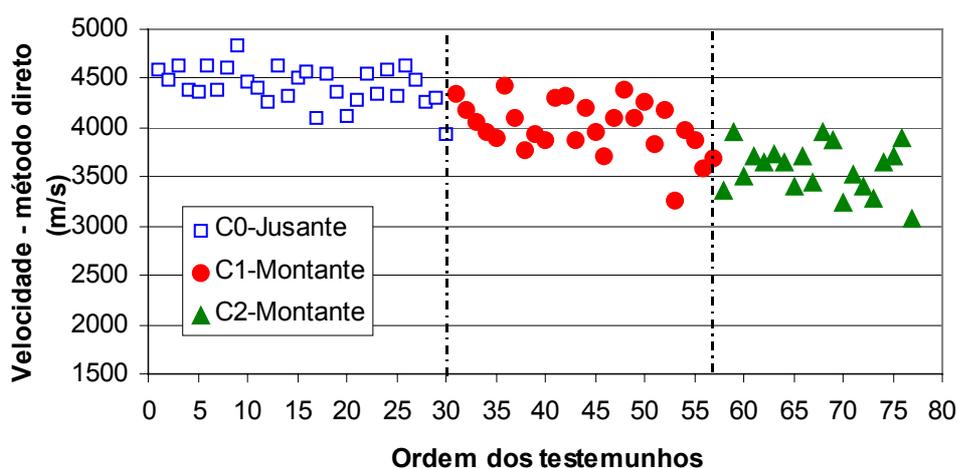


Figura 49: Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - concretos classe 0, 1 e 2 - método direto.

Tabela 19: Dados relativos à velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - método direto.

Classe	n. amostras	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Coef. Variação (%)
C0-Jusante	30	4432	191	4
C1-Montante	27	4005	269	7
C2-Montante	20	3586	246	7

Os resultados apresentados na Figura 38 atestam que, dentro da mesma classe, existe um decréscimo da velocidade ultra-sônica à medida que o grau de alteração dos testemunhos aumenta.

Verifica-se também, a partir dos resultados apresentados pelo método direto que, de uma maneira geral, as amostras que constituem a Classe 0 apresentam maiores valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas quando comparadas, nesta seqüência, com as Classes 1 (menos alterada) e 2 (mais alterada), sendo esta diferença significativa do ponto de vista estatístico, conforme análise de variâncias (Tabela 20). Pelo teste de Duncan as classes não se agrupam, compondo três grupos distintos.

Tabela 20: Análise de variância para a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas - método direto.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Classe do concreto	8722113,77	2	4361056,88	78,85	3,12	S
Erro	4092994,09	74	55310,73			
Total	12815107,86	76	---			

Da mesma forma que observado para o método de transmissão indireto (item 5.1.2), os concretos mais deteriorados pela RAA possuem menores velocidades ultra-sônicas. Pode-se dizer que, a partir da análise de variâncias, o método direto se apresentou mais sensível às diferenças entre os testemunhos do que o método indireto.

5.2.3. Determinação das propriedades e características dos testemunhos de concreto

5.2.3.1. Resistência à compressão

Na Tabela 21 estão apresentados os resultados da resistência à compressão determinada nos testemunhos de concreto extraídos e constituintes das Classes 0, 1 e 2. Na Figura 50 estão apresentados graficamente os resultados obtidos.

Tabela 21: Resultados de resistência à compressão dos testemunhos.

CLASSE 0 - JUSANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Tensão Ruptura
			MPa
18	B1	3	18,10
27	B2	8	15,90
29	B3	15	16,30
28	B4	23	20,50
21	B5	27	21,00
Média (MPa)			18,36
Desvio Padrão (MPa)			2,34
Máximo (MPa)			21,00
Mínimo (MPa)			15,90
Coeficiente de variação (%)			12,75
CLASSE 1 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Tensão Ruptura
			MPa
51A	B1	8	24,50
56A	B2	17	30,70
30A	B3	19	27,50
33A	B4	22	32,30
31A	B5	30	25,10
Média (MPa)			28,02
Desvio Padrão (MPa)			3,42
Máximo (MPa)			32,30
Mínimo (MPa)			24,50
Coeficiente de variação (%)			12,19
CLASSE 2 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Tensão Ruptura
			MPa
15A	B1	6	28,50
1A	B2	8	23,50
21A	B3	17	23,70
11A	B4	22	21,40
9A	B5	25	12,70
Média (MPa)			21,96
Desvio Padrão (MPa)			5,79
Máximo (MPa)			28,50
Mínimo (MPa)			12,70
Coeficiente de variação (%)			26,38

Percebe-se que a Classe 1 apresentou maiores valores de resistência à compressão quando comparada com as Classes 0 e 2. Verifica-se também para a Classe 2 (mais alterada) maior valor de coeficiente de variação em função provavelmente da evolução da reação.

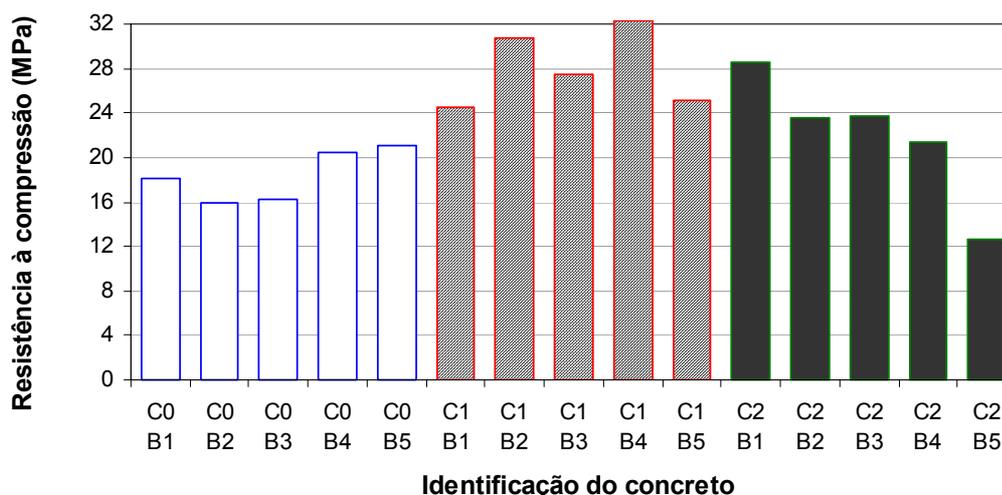


Figura 50: Resistência à compressão das classes C0, C1 e C2.

Analisando a Figura 50 verifica-se que não existe uma tendência clara do comportamento da resistência à compressão para os testemunhos dentro da mesma Classe 0 e 1, porém notam-se maiores valores de resistência para a classe 1. Já para a Classe 2 (concreto mais alterado), se observa uma tendência à redução no valor da resistência à medida que o grau de alteração aumenta (do bloco 1 para o 5). Este comportamento pode ter ocorrido em virtude deste tipo de concreto (C2) já se encontrar em um estágio bem mais avançado de deterioração e microfissuração, já provocando reflexos negativos nesta propriedade.

As diferenças observadas entre as classes 0, 1 e 2, para a propriedade de resistência à compressão, apresentam-se significativas do ponto de vista estatístico, através de análise de variâncias conforme Tabela 22.

Tabela 22: Análise de variância para a resistência à compressão.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Classe do concreto	238,33	2	119,17	7,05	3,89	S
Erro	202,83	12	16,90			
Total	441,16	14	---			

Adicionalmente, com o objetivo de verificar se existe homogeneidade dos grupos analisados (classes), foi realizado o teste de Duncan com comparação múltipla das médias. Os resultados indicaram agrupamento das médias para as classes 0 e 2, sendo a classe 1 pertencente a um grupo distinto, reforçando maiores valores observados para esta classe.

Acredita-se que o que está ocorrendo, em um primeiro estágio da reação investigada, é a formação de produtos decorrentes da reação, que preenchem os vazios chegando a um momento em que a sua colmatação seja tão intensa a ponto de provocar um ganho de resistência à compressão, como observado para a classe 1. Entretanto, a partir de um determinado ponto, o nível de fissuração pode ser tão intenso, em virtude da formação destes produtos e elevadas expansões, refletindo em quedas nesta propriedade, como verificado para a classe 2. Este tipo de fenômeno é encontrado em ataques por sulfato, como evidenciado por Silva Filho (1994).

No que diz respeito ao comportamento da resistência à compressão, não são muitos os estudos relatados mostrando dados sobre a influência da RAA nesta propriedade, quando o concreto se encontra deteriorado. Destaca-se o relato de Paulon (1981), a respeito do concreto de uma barragem em arco nos EUA, onde foram verificados baixos valores de resistência à compressão, na faixa de 8 a 18 MPa, enquanto os dados aos 28 dias indicavam resistências da ordem de 33 MPa. Nishibayashi *et al.* (1992) também indicam queda de resistência em testemunhos extraídos de estruturas afetadas pela reação. Entretanto, segundo os dados apresentados, verifica-se valores de resistência variando desde cerca de 15 MPa até ligeiramente superiores a 30 MPa para concretos extremamente deteriorados, não sendo apresentada uma referência para comparação. Neste caso, os altos valores obtidos poderiam ser reflexos de um incremento da resistência. Nos estudos realizados por Kaneyoshi, Uchida & Kano (2004), os pesquisadores verificaram resistências superiores às de projeto em concretos com a presença da RAA. Já em relação aos estudos de laboratório desenvolvidos por Marzouk & Langdon (2003), na presença de agregado altamente reativo, foram notadas quedas de até 24% na resistência de concretos afetados pela RAA, após exposição em solução de NaOH por 3 meses.

5.2.3.2. Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade obtidos para os testemunhos de concreto extraídos encontram-se apresentados na Tabela 23 e na Figura 51.

Tabela 23: Resultados de módulo de elasticidade dos testemunhos.

CLASSE 0 - JUSANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Módulo de Elasticidade
			GPa
18	B1	3	18,75
27	B2	8	18,31
29	B3	15	18,11
28	B4	23	17,49
21	B5	27	15,11
Média (GPa)			17,56
Desvio Padrão (GPa)			1,44
Máximo (GPa)			18,75
Mínimo (GPa)			15,11
Coeficiente de variação (%)			8,20
CLASSE 1 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Módulo de Elasticidade
			GPa
51A	B1	8	20,58
56A	B2	17	18,87
30A	B3	19	14,31
33A	B4	22	13,98
31A	B5	30	10,97
Média (GPa)			15,74
Desvio Padrão (GPa)			3,91
Máximo (GPa)			20,58
Mínimo (GPa)			10,97
Coeficiente de variação (%)			24,82
CLASSE 2 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Módulo de Elasticidade
			GPa
15A	B1	6	11,52
1A	B2	8	13,07
21A	B3	17	11,66
11A	B4	22	5,35
9A	B5	25	9,06
Média (GPa)			10,13
Desvio Padrão (GPa)			3,04
Máximo (GPa)			13,07
Mínimo (GPa)			5,35
Coeficiente de variação (%)			29,98

Observa-se que os valores obtidos para o módulo de elasticidade são maiores para a Classe 0 (sem alteração) seguido pela Classe 1 (menos alterado) e, na seqüência pela Classe 2 (mais alterado). Ou seja, à medida que a deterioração aumenta, o módulo cai. Os valores obtidos para a Classe 2 apresentaram-se muito baixos, chegando até aproximadamente 5 GPa. Com exceção da Classe 0, os coeficientes de variação apresentaram-se bastante elevados para esta propriedade, mostrando as diferentes condições em que se encontram as amostras analisadas.

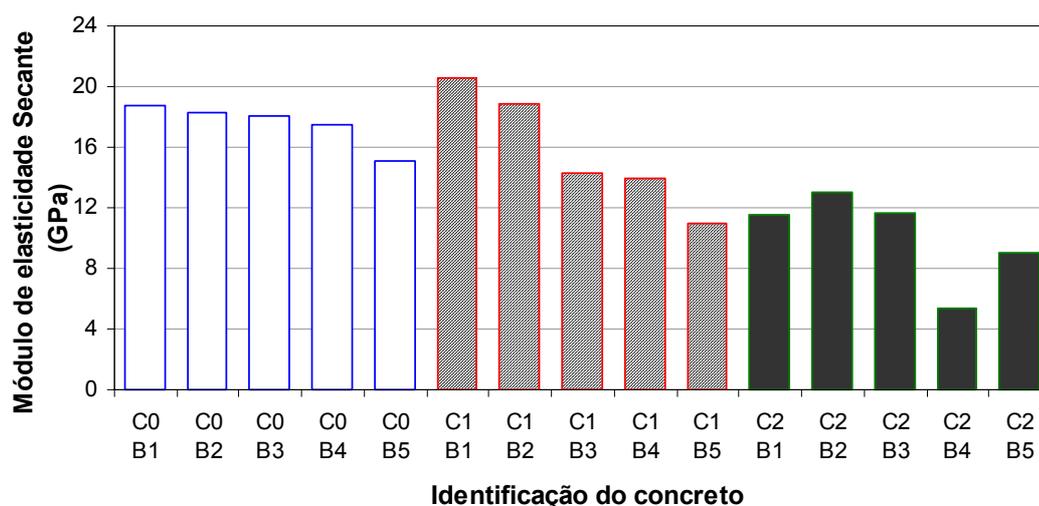


Figura 51: Módulo de elasticidade das classes C0, C1 e C2.

Verifica-se, a partir dos resultados obtidos, que as 3 classes estudadas apresentam efeito significativo no módulo de elasticidade, com base no resultado de análise de variância apresentado na Tabela 24.

Tabela 24: Análise de variância para o módulo de elasticidade.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Classe do concreto	149,72	2	74,86	8,46	3,89	S
Erro	106,24	12	8,85			
Total	255,96	14	---			

Através do teste de Duncan, com comparação múltipla das médias, verificou-se agrupamento das médias para as classes 0 e 1, sendo a classe 2 pertencente a um grupo distinto, mostrando a forte redução nos valores do módulo determinados.

Hobbs (1988) apresenta um exemplo de caso onde testemunhos de concreto provenientes de uma estrutura afetada pela RAA na Inglaterra apresentaram queda expressiva no módulo de elasticidade. Outros estudos realizados em vigas, mencionados por Hobbs (1988), mostram também queda de módulo na ordem de 65%, após exposição das vigas por 150 dias em condição de 100% de umidade a 40°C. Nesta mesma linha, nos estudos realizados por Castro *et al.* (1997) com testemunhos de concreto provenientes da UHE Furnas, e possuindo 32 anos, já se mostravam baixos os valores do módulo de elasticidade em várias estruturas como vertedouro, muro central, bloco da tomada d'água, casa de força e blocos de apoio do conduto

forçado. Estimou-se queda em torno de 50% no seu valor a partir de reconstituição de traço. De acordo também com Larive (1997), o processo de deterioração causado pela RAA influencia principalmente o módulo de elasticidade, através de uma redução significativa no seu valor. Estudos em concretos moldados realizados por Batic, Giaccio & Zerbino indicam também queda no módulo, estimando-se em torno de 40%, aos 120 dias de ensaio pela ASTM C-1293, quando se compara um concreto reativo com uma referência isenta da RAA. Já nos estudos realizados em concretos extraídos por Hasparyk *et al.* (2004b) e Kaneyoshi, Uchida & Kano (2004), a partir dos dados apresentados, estima-se reduções de até cerca de 50% ao se comparar os dados com as especificações de norma. De acordo com Batic, Giaccio & Zerbino (2004), este comportamento pode ser atribuído à presença de fissuração não só na interface com o agregado, mas também na matriz de cimento.

Fazendo uma correlação entre as duas propriedades (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e a curva apresentada pela norma NBR 6118 para o módulo secante ($E_{ci} = 0,85.5,6. f_{ck}^{1/2}$), conforme Figura 52, observa-se que enquanto a resistência ainda está subindo (de C0 para C1), o módulo já está caindo. Em um determinado momento (C2), as duas propriedades apresentam-se em queda. Este fenômeno pode ser notado na Figura 52, onde à medida que o nível de degradação aumenta, mais afastados da curva da norma os pontos se encontram. De uma maneira geral, os resultados das propriedades determinados para a classe 0 são os que mais se aproximam da curva da norma.

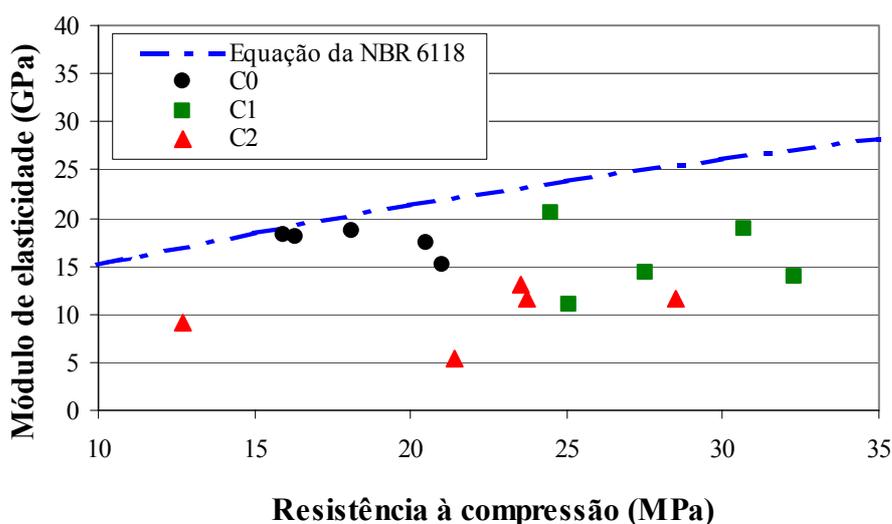


Figura 52: Correlação entre a resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos.

Com base no exposto, nota-se que o módulo de elasticidade possui comportamento diferenciado da resistência à compressão, apresentando reflexos negativos de forma antecipada e expressiva. Esta propriedade mostrou-se mais sensível às alterações internas no concreto devido à reação. A classe 2, mais deteriorada, foi a que mais se apresentou afetada no que diz respeito ao módulo, em virtude provavelmente do estágio mais avançado da microfissuração gerada.

5.2.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 25 estão registrados os resultados da tensão de tração obtidos para os testemunhos das três Classes e na Figura 53 estão apresentados graficamente os resultados para cada Classe.

Tabela 25: Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos testemunhos.

CLASSE 0 - JUSANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Resistência à Tração
			MPa
23	B1	2	3,17
8	B2	11	2,42
20	B3	16	2,20
19	B4	22	3,16
15	B5	30	2,59
Média (MPa)			2,71
Desvio Padrão (MPa)			0,44
Máximo (MPa)			3,17
Mínimo (MPa)			2,20
Coeficiente de variação (%)			16,23
CLASSE 1 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Resistência à Tração
			MPa
55B	B1	9	3,45
36B	B2	15	2,47
41B	B3	18	3,26
38B	B4	24	2,74
34B	B5	35	2,36
Média (MPa)			2,86
Desvio Padrão (MPa)			0,48
Máximo (MPa)			3,45
Mínimo (MPa)			2,36
Coeficiente de variação (%)			16,80
CLASSE 2 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	Resistência à Tração
			MPa
28A	B1	1	3,18
15A	B2	9	2,85
20A	B3	16	3,38
12A	B4	18	2,78
17A	B5	28	3,31
Média (MPa)			3,10
Desvio Padrão (MPa)			0,27
Máximo (MPa)			3,38
Mínimo (MPa)			2,78
Coeficiente de variação (%)			8,81

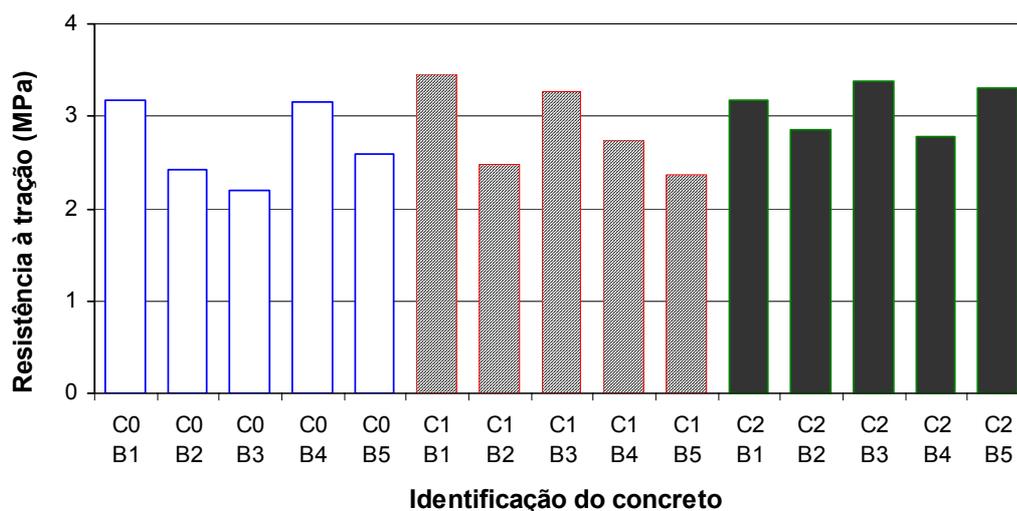


Figura 53: Resistência à tração por compressão diametral das classes C0, C1 e C2.

Observa-se para esta propriedade que as três classes estudadas apresentam valores próximos e na ordem de 3 MPa. Da mesma forma que para algumas das classes e propriedades analisadas anteriormente, não existe uma tendência clara entre a tração e os diferentes níveis de alteração dos blocos dentro de uma mesma classe analisada (do bloco menos alterado para mais alterado, de B1 a B5). Porém, analisando as médias entre as classes nota-se uma tendência, embora pequena, de crescimento de resistência da classe 0 para classe 2.

Entretanto não se nota, para a propriedade resistência à tração por compressão diametral, diferença significativa entre as três classes estudadas do ponto de vista estatístico, através de análise de variâncias, estando as três classes em um único grupo homogêneo, conforme dados apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Signif.
Classe do concreto	0,39	2	0,19	1,16	3,89	NS
Erro	1,99	12	0,17			
Total	2,38	14	---			

Apesar de não se poder verificar uma influência negativa da reação, a partir das três classes analisadas, na propriedade resistência à tração por compressão diametral do ponto de vista

estatístico, as médias obtidas já indicam uma tendência de comportamento crescente, mostrando, em parte, uma certa coerência com a resistência à compressão.

Com o objetivo de correlacionar a resistência à tração e à compressão (R_c), foram apresentados os dados de ensaio médios da compressão nas classes estudadas na Figura a seguir (Figura 54) e os valores individuais da resistência à tração para cada classe.

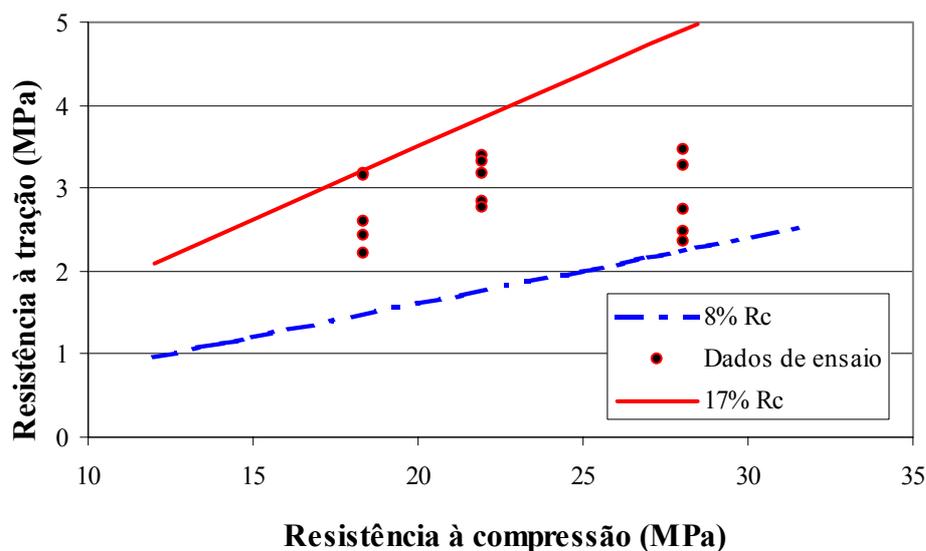


Figura 54: Correlação entre os dados da resistência à compressão e tração diametral.

Observa-se que a maioria dos valores de resistência à tração se apresenta na faixa de cerca de 8 a 17% da resistência à compressão. Já em outros estudos envolvendo ensaios também com testemunhos de concreto deteriorados pela RAA, se notou valores mais baixos, na faixa de 5 a 10% da resistência à compressão (HASPARYK *et al.*, 2004b), indicando provavelmente diferentes estágios em que se encontram a reação. Já nas investigações realizadas em testemunhos deteriorados extraídos por St. John (1992), em pavimentos de base aérea, foi constatada redução de 30% no valor da resistência à tração do concreto com 20 anos. Estudos realizados por Marzouk & Langdon (2003) também mostram quedas expressivas na resistência à tração de concretos moldados em laboratório (cerca de 38%), contendo agregado bastante reativo, e submetidos a 12 semanas de exposição em ambiente bastante agressivo (NaOH a 80°C) para acelerar a RAA.

5.2.3.4. Permeabilidade

Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos para os testemunhos de concreto submetidos ao ensaio de percolação de água sob pressão estão apresentados na Tabela 27, a seguir.

Tabela 27: Resultados de coeficiente de permeabilidade (k) dos testemunhos.

CLASSE 0 - JUSANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	k
			m/s
12	B1	6	1,38E-10
5	B4	12	2,22E-10
9	B2	14	6,64E-11
25	B3	19	1,11E-10
30	B5	26	8,07E-11
Média (m/s)			1,24E-10
Desvio Padrão (m/s)			6,17E-11
Máximo (m/s)			2,22E-10
Mínimo (m/s)			6,64E-11
CLASSE 1 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	k
			m/s
55A	B1	2	1,37E-11
46B	B4	29	4,00E-11
47A	B2	16	6,27E-11
36B	B3	20	2,14E-11
62A	B5	31	9,71E-11
Média (m/s)			4,70E-11
Desvio Padrão (m/s)			3,38E-11
Máximo (m/s)			9,71E-11
Mínimo (m/s)			1,37E-11
CLASSE 2 - MONTANTE			
N. Testemunho	BLOCO	Ordenação	k
			m/s
10A	B4	23	1,79E-11
28B	B1	2	5,20E-11
14A	B5	27	2,81E-11
14B	B3	14	1,28E-11
27A	B2	13	1,85E-11
Média (m/s)			2,59E-11
Desvio Padrão (m/s)			1,56E-11
Máximo (m/s)			5,20E-11
Mínimo (m/s)			1,28E-11

Quando são comparados os resultados da Classe 0 com as Classes 1 e 2, verifica-se que a Classe 0 apresenta, em média, uma permeabilidade superior (da ordem de 10^{-10} m/s). Os coeficientes de permeabilidade obtidos para as Classes 1 e 2 apresentaram-se na ordem de 10^{-11} m/s. De qualquer forma, a permeabilidade dos concretos estudados apresentam-se

compatíveis com concretos de barragem (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). Adicionalmente, não se observa nenhuma correlação entre o grau de alteração e o coeficiente de permeabilidade dentro de cada classe estudada.

Do ponto de vista de análise de variâncias, foi observada diferença significativa entre as três classes estudadas, conforme dados apresentados na Tabela 28, sendo através do teste de Duncan verificado agrupamento das médias para as classes 1 e 2, e a classe 0 pertencente a um grupo distinto.

Tabela 28: Análise de variância para a permeabilidade.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Classe do concreto	2,65E-20	2	1,32E-20	7,65	3,89	S
Erro	2,08E-20	12	1,73E-21			
Total	4,72E-20	14	---			

Segundo Mehta & Monteiro (1994), existe uma correlação inversamente proporcional entre a propriedade de permeabilidade e a resistência à compressão através da porosidade capilar. Foram observadas maiores resistências e menor permeabilidade para os concretos pertencentes às classes 1 e 2.

Com base nos resultados obtidos e na análise de variâncias, constatam-se as diferenças entre os concretos de jusante (C0) e de montante (C1 e C2), onde se tem para os concretos mais deteriorados (C1 e C2) menor permeabilidade em função, provavelmente, da colmatação dos poros a partir dos produtos da RAA formados e, conseqüente intensificação da resistência à compressão.

5.2.3.5. Medidas de carbonatação

De uma maneira geral, as medidas médias da frente de carbonatação realizadas nos testemunhos após ensaio de tração, 30 minutos e 24 horas posteriormente à aplicação do indicador fenolftaleína, estão registradas na Tabela 29. Os resultados das medidas encontram-se apresentados no Apêndice F.

Tabela 29: Medidas de carbonatação.

Classe	N. Amostra	Medida (mm)	
		30min	24horas
C0	B1-23	40,05	40,56
	B2-08	31,01	30,99
	B3-20	27,92	29,05
	B4-19	39,25	39,75
	B5-15	33,22	33,45
C1	B1-55B	0,00	0,00
	B2-36A	20,49	20,63
	B3-41A	9,15	9,23
	B4-38A	13,98	13,91
	B5-34A	0,00	0,00
C2	B1-28A	15,76	15,76
	B2-15B	0,00	0,00
	B3-20A	15,06	14,77
	B4-12A	0,00	0,00
	B5-17A	20,40	20,23

Não são notadas grandes variações a partir das leituras feitas com 30 minutos e 24 horas após a aplicação da fenolftaleína, fato este já notado na pesquisa desenvolvida por Castro (2003). A partir dos resultados apresentados para as classes 1 e 2, verificam-se valores baixos da frente carbonatada, mantendo-se sempre inferiores a 20 mm, sendo que este valor ocorreu em apenas dois dos testemunhos analisados nestas classes, e abaixo de 15 mm nos demais testemunhos. Destaca-se também a ausência de frente de carbonatação em alguns dos testemunhos estudados, representando 40% dos testemunhos à montante (C1 e 2).

Porém, quando são analisadas as medidas de carbonatação das amostras constituintes da classe 0 (Jusante), notam-se maiores profundidades desde 29mm a 41mm, representando em média 35mm de frente carbonatada. Deve-se destacar que este tipo de concreto foi o que não apresentou indícios visuais das manifestações patológicas na galeria de drenagem. Segundo Kihara (1997) a carbonatação pode influenciar na RAA, minimizando as expansões a partir da redução da formação de produtos expansivos.

Em relação a carbonatação natural que ocorreu no tempo, entre o momento da extração do testemunho e a execução dos ensaios, observada nas laterais dos CP's, verifica-se valores baixos para todas as amostras analisadas conforme Apêndice F (<2 mm) não ocorrendo, portanto, a interferência do tempo de aguardo do testemunho entre a extração e o ensaio.

5.2.3.6. Estimativa do teor de álcalis dos concretos

Os resultados obtidos a partir das análises químicas dos concretos constituintes das classes 0, 1 e 2 no que diz respeito ao teor de álcalis totais e solúveis encontram-se apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Álcalis totais e solúveis dos testemunhos de concreto.

Classe	N. Amostra	Álcalis totais			Álcalis solúveis			% soluv./totais
		Na ₂ O	K ₂ O	Eq. Alcalino	Na ₂ O	K ₂ O	Eq. Alcalino	
C0	B1-23	0,01	0,12	0,09	0,01	0,01	0,02	19
	B3-20	0,04	0,23	0,19	0,02	0,06	0,06	31
	B4-19	0,03	0,20	0,16	0,01	0,02	0,02	14
	B5-15	0,02	0,12	0,10	0,01	0,03	0,03	30
C1	B1-55B	0,03	0,25	0,19	0,03	0,20	0,16	83
	B2-36A	0,06	0,41	0,33	0,07	0,32	0,28	85
	B4-38A	0,08	0,72	0,55	0,06	0,38	0,31	56
	B5-34A	0,05	0,36	0,29	0,04	0,22	0,18	64
C2	B1-28A	0,05	0,86	0,62	0,05	0,43	0,33	54
	B2-15B	0,04	0,29	0,23	0,03	0,23	0,18	79
	B4-12A	0,03	0,22	0,17	0,02	0,10	0,09	49
	B5-17A	0,05	0,45	0,35	0,04	0,26	0,21	61

Nota: Eq. Alcalino = Na₂O+(0,658*K₂O)

O teor de álcalis é bastante variável, apresentando em média, para a classe 0, os menores valores tanto para os álcalis totais como para os álcalis solúveis, quando comparado com as classes 1 e 2. Adicionalmente, verifica-se que a porcentagem de álcalis solúveis que ainda se encontram disponíveis para reagir quando comparados com os álcalis totais determinados também se apresenta variável, não existindo nenhuma tendência por classe.

Na Figura 55 encontram-se resumidos os resultados do teor de equivalente alcalino calculado a partir dos álcalis solúveis e totais determinados.

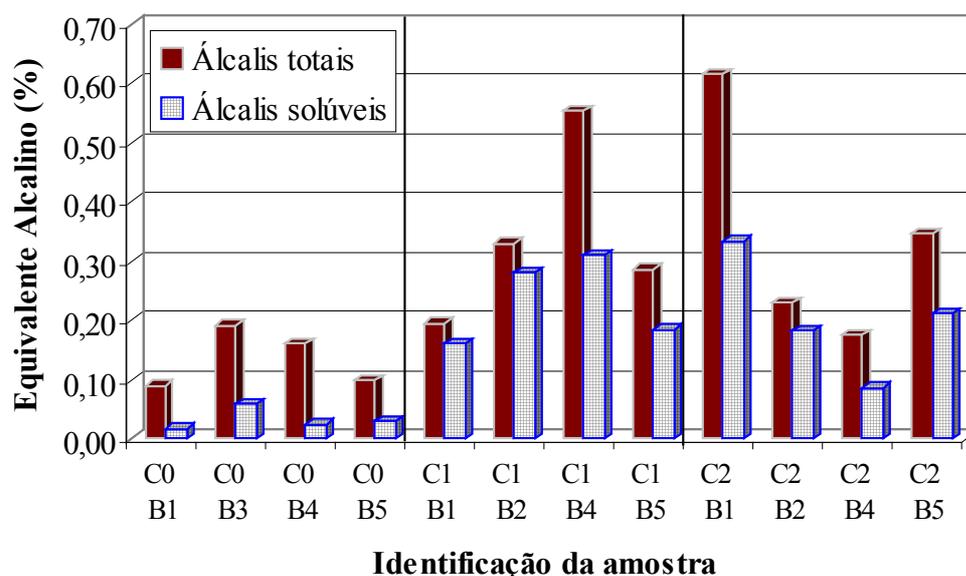


Figura 55: Equivalente alcalino das amostras.

Não se nota uma correlação entre álcalis, dentro de cada classe, à medida que o grau de alteração aumenta (de B1 para B5). Observa-se que praticamente todos os resultados obtidos apresentaram valores inferiores a 0,60% e 0,30% para os álcalis totais e solúveis, respectivamente.

Os valores mais elevados de álcalis foram verificados para a amostra de n. 28A pertencente à classe 2 (0,62% para os totais e 0,33% para os solúveis) e os mais baixos para a amostra de n. 23 representando a amostra com mais baixo nível de deterioração (B1) da classe 0 (0,09% para os totais e 0,02% para os solúveis). Interessante comentar que a menor deterioração, a partir das manifestações patológicas verificada durante a inspeção visual, foi observada para a classe 0. Sabe-se que quanto maior o teor de álcalis maior poderá ser a expansão gerada (BICZOK, 1972). Acredita-se que possa ter ocorrido uma influência da menor incidência de álcalis disponíveis no concreto da classe 0, para contribuir na reação com a sílica reativa do quartzito, entretanto ressalta-se que outros fatores também deverão ser levados em conta neste fenômeno.

5.2.4. Análises microestruturais

5.2.4.1. Microscopia ótica

Após inspeção dos agregados constituintes dos 15 testemunhos de concreto destinados ao ensaio de tração por compressão diametral, verificou-se litologia e mineralogia semelhantes, sendo selecionados 3 testemunhos constituintes do bloco 5 (B5) de cada classe de concreto (C0-15, C1-34A e C2-17A) para análise petrográfica da brita.

Todas as britas analisadas apresentaram, no exame macroscópico, origem quartzítica, de natureza metamórfica, com coloração creme acinzentado e estrutura foliada. Através das investigações microscópicas a partir das 3 amostras analisadas, por microscopia ótica de luz transmitida, a composição mineralógica média estimada foi:

Quartzo: 85% a 90 %; muscovita: 5 % a 10 %; minerais opacos: < 5 %.

A granulação das 3 amostras apresenta-se fina, com textura granoblástica e nítida foliação metamórfica, definida pela orientação preferencial dos cristais alongados (laminares) de muscovita e dos cristais estirados de quartzo tensionados e com contatos suturados. Os cristais de quartzo apresentam extinção ondulante freqüente, porém não foi possível a sua medição por não se ter cristais com faces bem definidas. A muscovita ocorre sob a forma de pequenas palhetas orientadas entre os cristais de quartzo. Os minerais opacos ocorrem disseminados por toda a rocha, sendo a maioria associada às micas. A composição mineralógica e as feições texturais presentes são indicativas de uma rocha derivada do metamorfismo sobre sedimentos arenosos. Deve-se comentar quanto à deformação mais intensa observada na amostra 17A (Classe 2), apesar das semelhanças mineralógicas com as duas outras amostras analisadas (C0-15 e C1-34A). Nesta amostra a muscovita aparece em menores quantidades (<5%) e existe provável presença de quartzo microcristalino. Porém, devido à fina granulometria da rocha, não se pode afirmar sua presença. Nas Figuras 56 e 57 encontram-se apresentadas fotomicrografias mostrando uma vista geral do quartzito e os principais minerais constituintes das amostras analisadas, sendo as imagens obtidas originalmente a um aumento de 40 vezes no microscópio ótico.

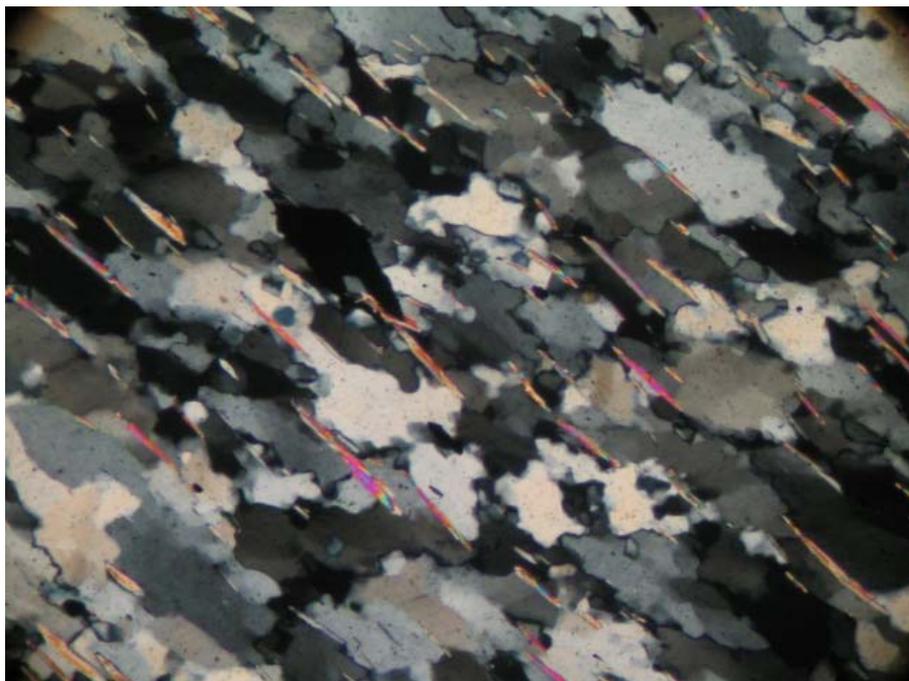


Figura 56: Fotomicrografia da amostra C0-15 e semelhante à amostra C1-34A - Quartzos estirados, suturados e com extinção ondulante; finas palhetas de muscovita (coloridas) orientadas entre os grãos de quartzo. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados.

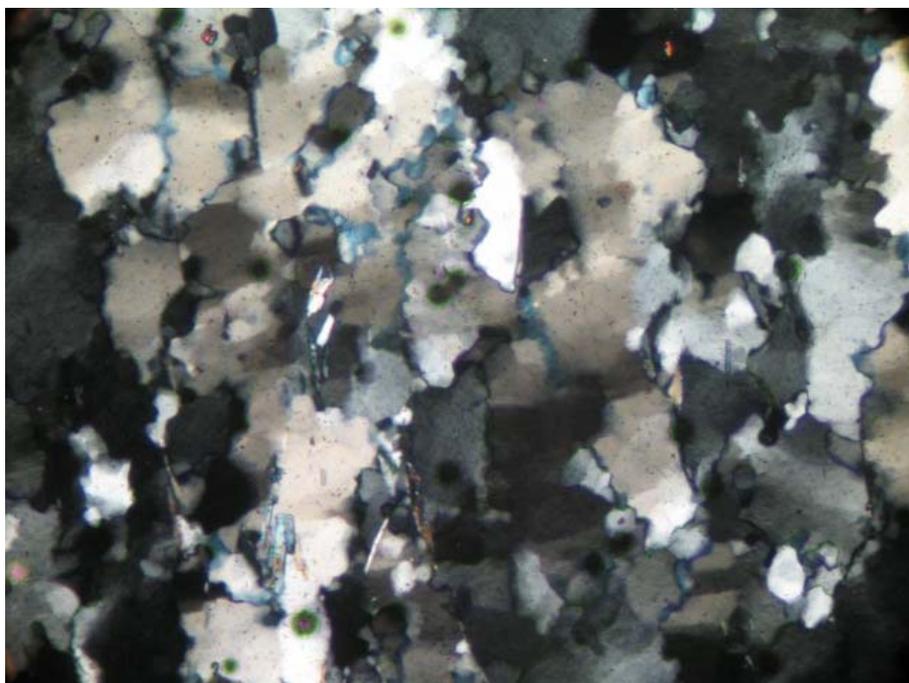


Figura 57: Fotomicrografia da amostra C2-17A – Detalhe de uma região contendo intensa extinção ondulante nos grãos de quartzo suturados. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados.

Em virtude da similaridade dos agregados extraídos dos concretos com o agregado quartzito analisado no Capítulo 6, todos os comentários relativos à sua reatividade serão abordados no próximo capítulo, valendo para todas as amostras aqui analisadas.

Na análise por microscopia ótica de luz refletida realizada nas três amostras provenientes dos concretos foi identificada apenas a hematita (Fe_2O_3) como mineral opaco não sendo detectados, nas amostras analisadas, sulfetos de ferro. Na Figura 58 encontram-se apresentados alguns cristais de hematita visualizado em meio aos silicatos da rocha.

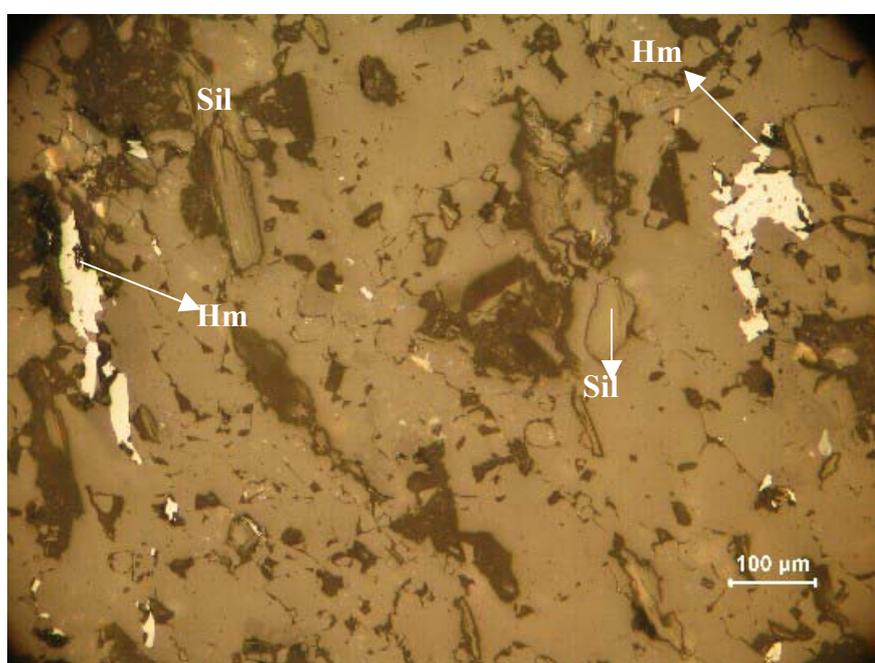


Figura 58: Fotomicrografia apresentando cristais de hematita (Hm) na matriz de silicatos (Sil).

5.2.4.2. Microscopia eletrônica de varredura

Após os ensaios para determinar a resistência à tração dos concretos, alguns testemunhos foram selecionados para análise por microscopia eletrônica de varredura. Foram selecionados 2 testemunhos por classe de concreto (C0, C1 e C2), sendo um constituinte do bloco B1 (menor grau de alteração na classe) e o outro do bloco B5 (maior grau de alteração na classe).

Previamente a estas análises, os testemunhos foram fragmentados sendo suas porções internas investigadas visualmente com o objetivo de verificar a presença de características visíveis a olho nu relativas ao processo de deterioração da reação álcali-agregado. Confirmou-se a maioria das características já observadas visualmente na superfície dos testemunhos de concreto na fase inicial do programa experimental.

A amostra pertencente à classe C0-B1 (testemunho 23) foi a que menos apresentou indícios da RAA, possuindo apenas algumas manchas escuras na argamassa e um poro com pouca deposição de material branco. A investigação na amostra C0-B5 (15) indicou as mesmas características da amostra anterior, entretanto registrando também algumas bordas em torno dos agregados.

No que diz respeito à classe 1, e na amostra B1-55B, foram observadas manchas na argamassa e vários poros contendo material branco no seu interior, sendo que alguns apresentavam manchas escuras ao seu redor. Na amostra pertencente ao bloco B5 (testemunho 34A), além das manchas escuras na argamassa e poros com deposição foi visualizado, nas bordas de alguns poros próximos aos agregados, material vítreo e algumas regiões com descoloração da argamassa (esbranquiçada).

Em relação à classe C2, em B1 (amostra 28A) foram visualizados poros com material branco no seu interior, na sua maioria faceando aos agregados. Adicionalmente foram identificadas manchas escuras e material esbranquiçado na argamassa. No bloco B5 (17A), a argamassa se apresenta esbranquiçada em algumas regiões e os poros com material branco também se encontram presentes, mas agora com bordas escuras e material vítreo ao seu redor; foram identificadas também bordas ao redor dos agregados.

Após esta inspeção, os fragmentos de concreto dos 6 testemunhos foram selecionados para compor as amostras para análise no MEV, sendo submetidas previamente ao processo de metalização. Em todas as análises foi utilizado o detector de elétrons secundários (SE).

As principais características observadas estão descritas a seguir. A classe 0 (B1-23) não apresentou praticamente indícios da reação. Apenas na região das manchas escuras se notou uma fase maciça sugestiva do gel. As Figuras 59 e 61 registram esta fase encontrada. No poro, foram verificados apenas alguns cristais de etringita (Figura 60).

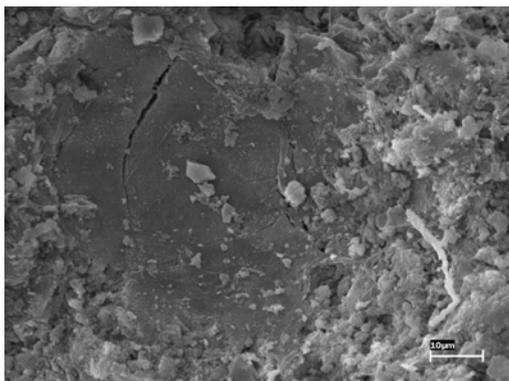


Figura 59: Micrografia indicando região maciça.

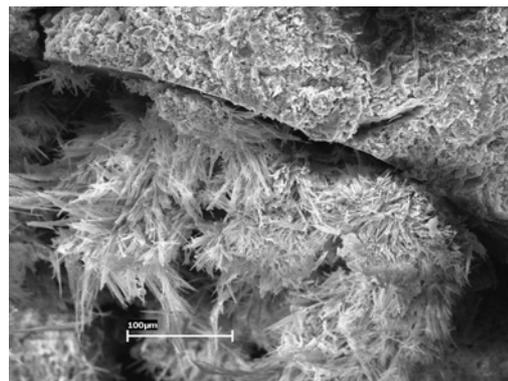


Figura 60: Micrografia indicando um poro com deposição de etringita.

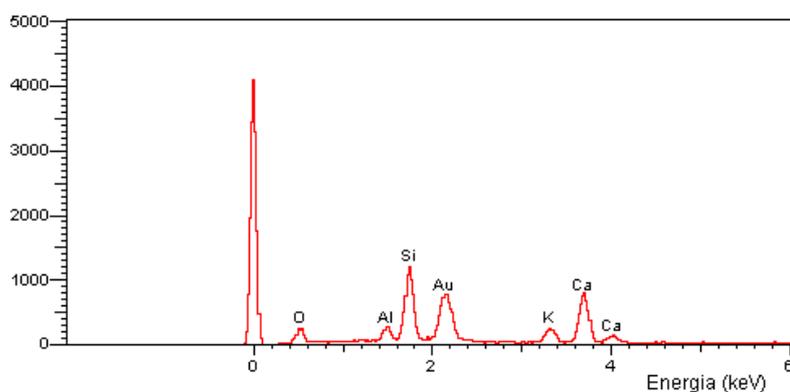


Figura 61: Espectro na região central na Figura 59.

No bloco B5 (amostra 15) da classe 0 a maioria das interfaces com os agregados se apresentaram preservadas. Porém, observou-se a presença de gel gretado com aspecto botrioidal na região das manchas verificadas visualmente e alguns produtos cristalizados sobre o agregado, ambos de composição sílico-cálcico alcalina. Foram verificados também alguns produtos sugestivos da etringita, sendo estes confirmados por microanálise contendo os elementos enxofre, cálcio e alumínio. Nas Figuras 62 a 64 estes produtos da reação podem ser visualizados.

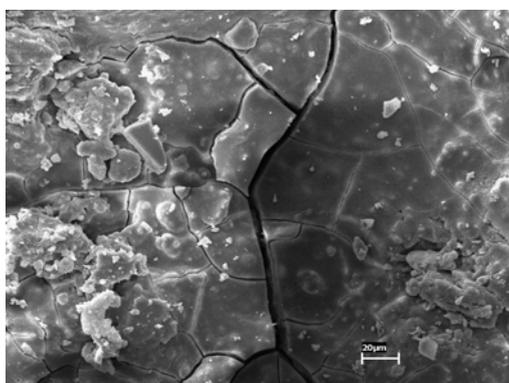


Figura 62: Micrografia apresentando gel gretado botrioidal.

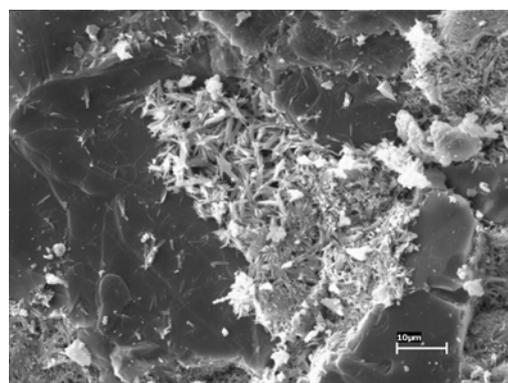


Figura 63: Micrografia apresentando produtos cristalizados sobre o agregado.

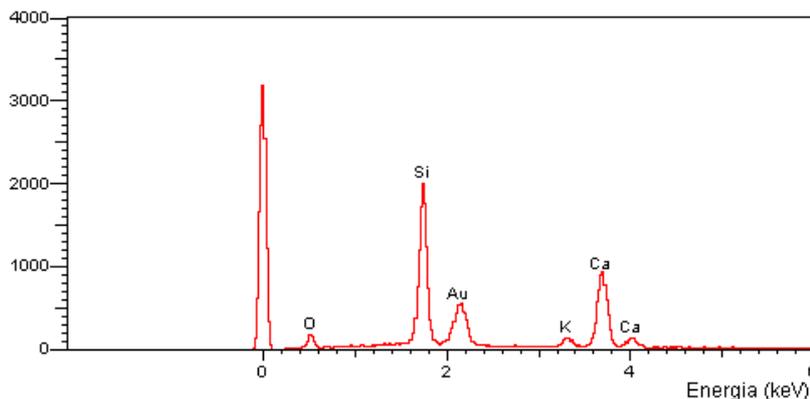


Figura 64: Espectro característico do gel gretado.

Na amostra 55B analisada da classe 1 (B1) foram observados produtos cristalizados, sílico-cálcico potássicos nos poros brancos e gel maciço gretado na região das manchas escuras na argamassa (Figura 65 e 66). Foram também verificados alguns produtos aciculares na interface com os agregados (Figura 67).

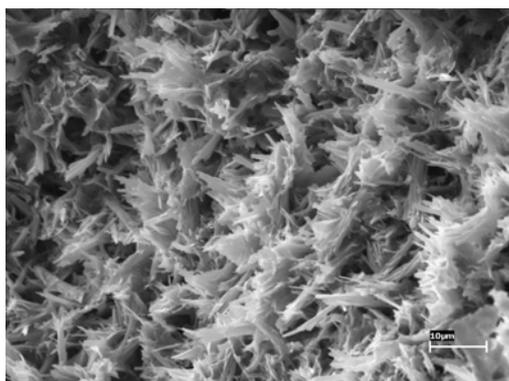


Figura 65: Micrografia apresentando produtos cristalizados da RAA no poro.

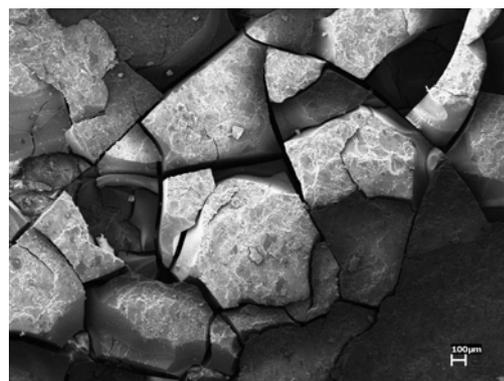


Figura 66: Micrografia indicando gel maciço gretado.

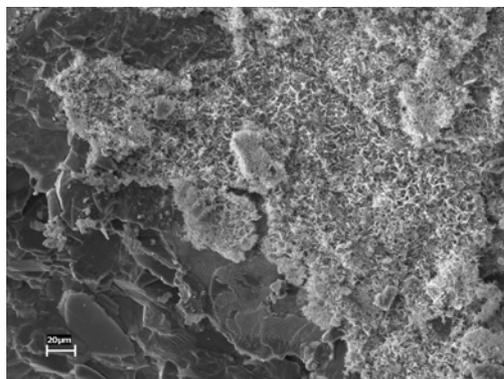


Figura 67: Micrografia apresentando os produtos cristalizados observados na interface.

As características observadas na amostra de n. 34A referente ao bloco B5-C1 foram: gel gretado na borda do poro (representando os poros brancos com bordas vítreas), produtos cristalizados da reação nos poros (material branco) e alguma etringita dispersa na argamassa esbranquiçada. As Figuras 68 a 72 registram estas características.

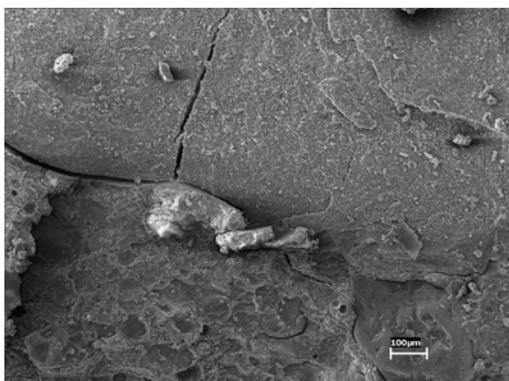


Figura 68: Micrografia do gel na borda do poro.

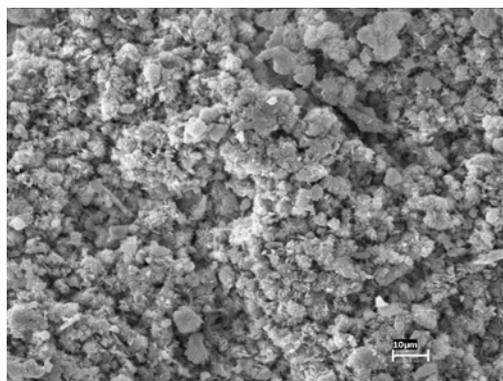


Figura 69: Micrografia dos produtos cristalizados da reação observados nos poros.

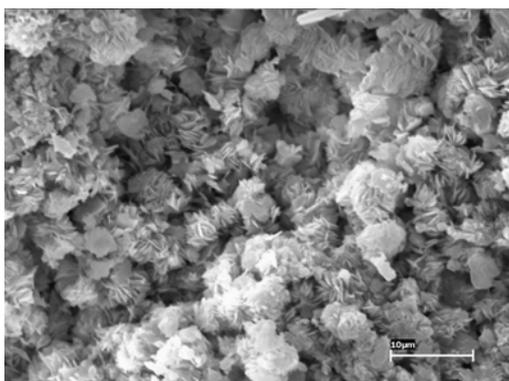


Figura 70: Micrografia mais ampliada dos produtos cristalizados.

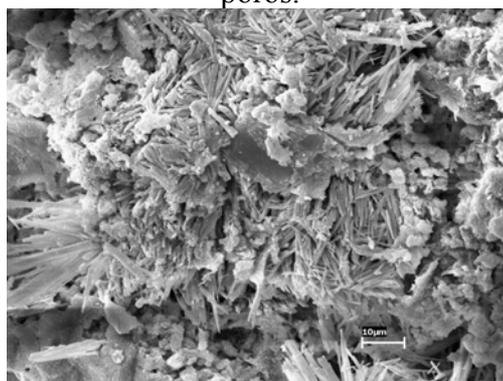


Figura 71: Micrografia indicando a presença da etringita na argamassa.

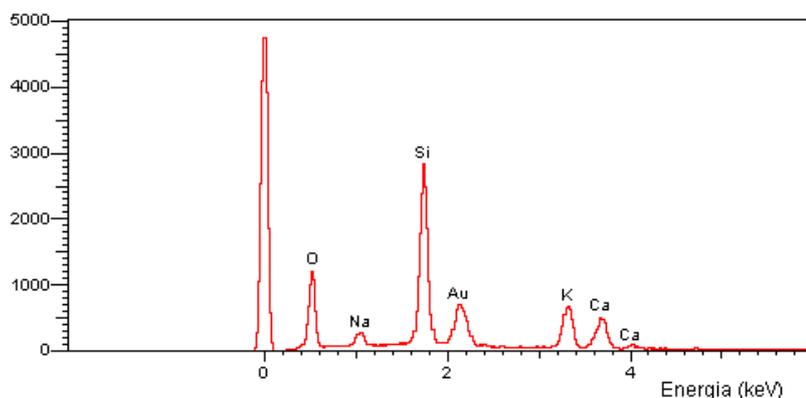


Figura 72: Espectro referente aos produtos cristalizados da RAA nos poros.

Na amostra 28A da classe C2 (bloco B1), também foram verificados poros contendo produtos cristalizados de composição sílico-cálcico alcalina no seu interior (Figura 73), argamassa contendo gel maciço gretado (na região das manchas escuras) e argamassa com deposição de produtos aciculares na região esbranquiçada (Figuras 73 a 77). Também foi verificada alguma etringita na amostra analisada.

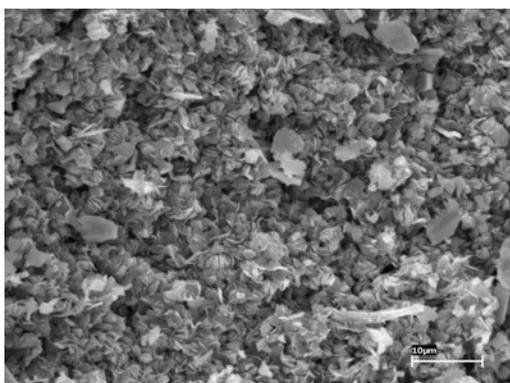


Figura 73: Micrografia apresentando cristais depositados no poro.

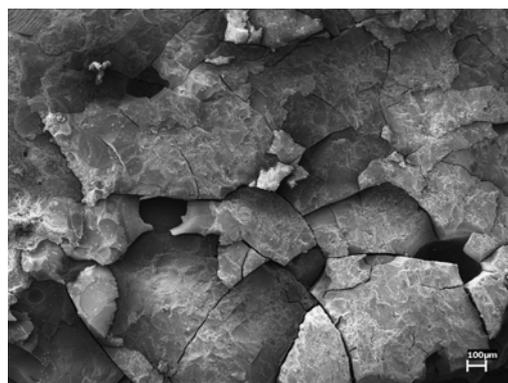


Figura 74: Micrografia da fase maciça gretada na argamassa.

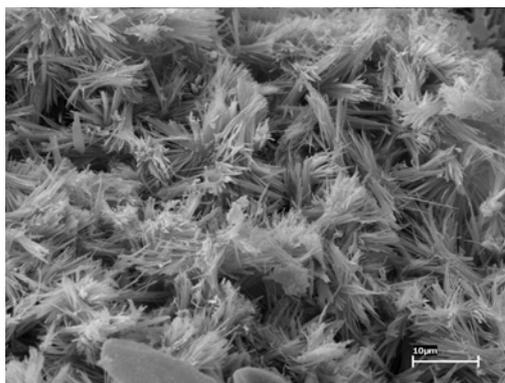


Figura 75: Micrografia indicando a presença de finas acículas na argamassa.

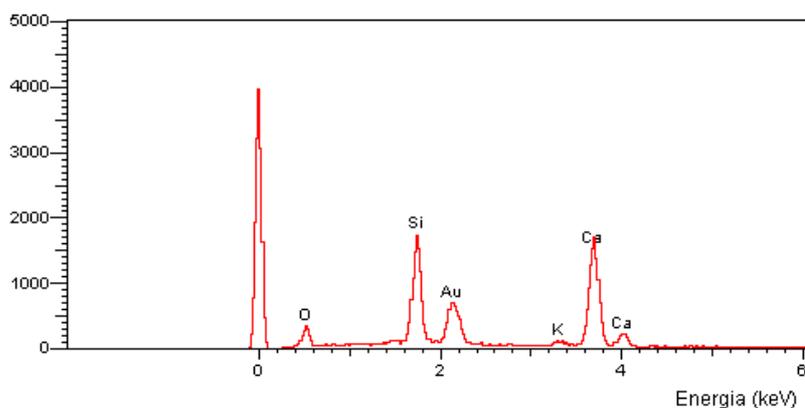


Figura 76: Espectro referente à fase maciça gretada observada na argamassa.

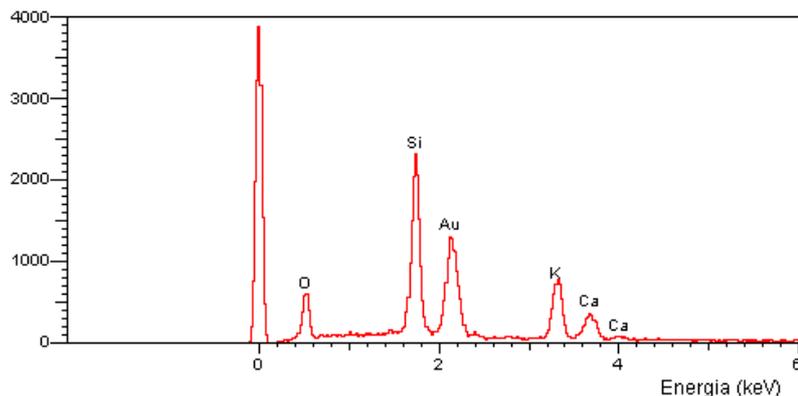


Figura 77: Espectro referente aos cristais apresentados na Figura 73.

As características observadas na amostra de n. 17A referente ao bloco B5-C2 foram: acículas na região de interface pasta/agregado (representando as bordas) e sobre o agregado, vários produtos tanto com caráter maciço gretado como cristalizados, e às vezes de morfologia rendada nos poros (material branco), argamassa com deposição de produtos aciculares de composição sílico-cálcico potássica (região esbranquiçada) e etringita, porém esta última de forma pouco expressiva. Outros estudos realizados através do MEV, em testemunhos de concreto afetados pela RAA, também indicam a presença da etringita (MARFIL & MAIZA, 2001). As Figuras 78 a 82 apresentadas a seguir registram as principais características observadas.

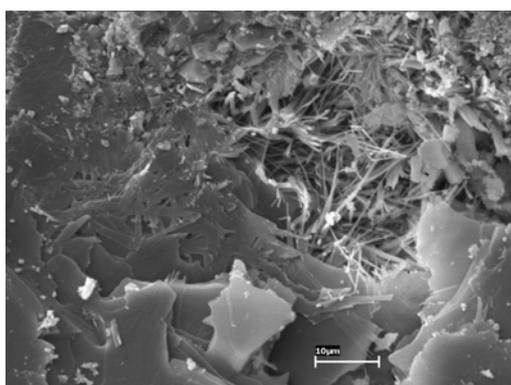


Figura 78: Micrografia apresentando formação de acículas na região de interface.

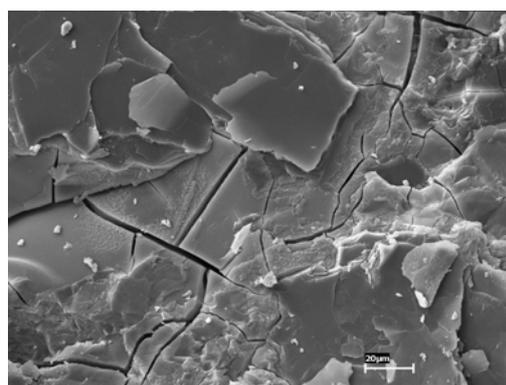


Figura 79: Micrografia do gel maciço gretado.

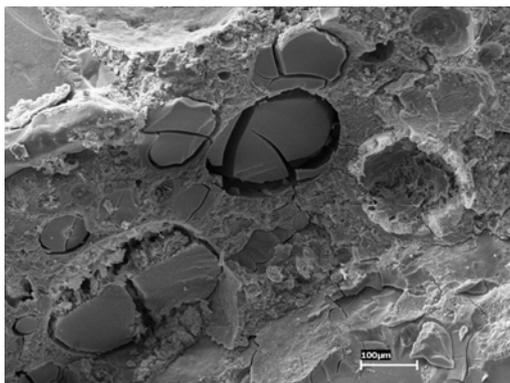


Figura 80: Micrografia mostrando vários poros preenchidos por gel.

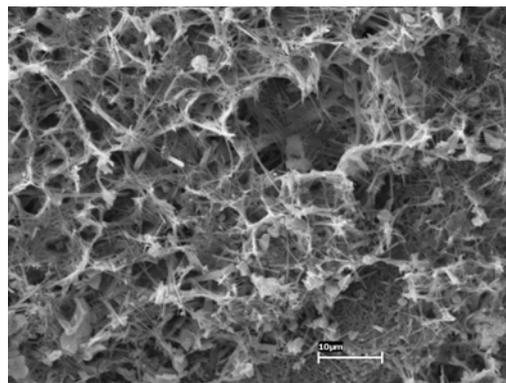


Figura 81: Micrografia indicando a presença de cristais rendados na argamassa.

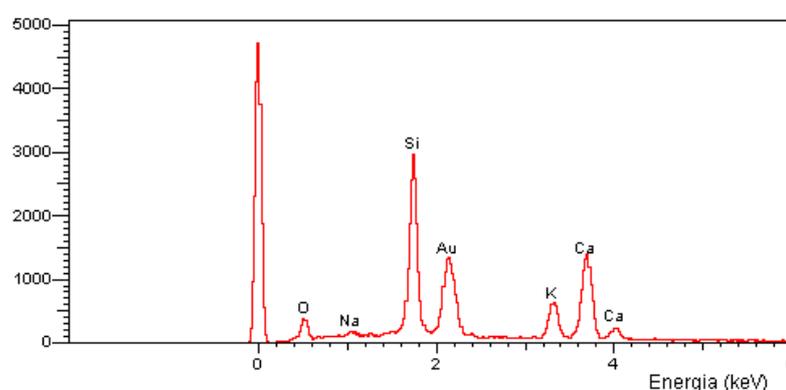


Figura 82: Espectro referente ao gel maciço gretado da Figura 79.

Com base nas análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura, constata-se a presença da reação álcali-agregado em praticamente todas as amostras de testemunho de concreto selecionadas nesta etapa, independente da classe estudada. Porém, apesar de a microscopia eletrônica de varredura não representar uma análise quantitativa, nota-se uma incidência bastante baixa destes produtos nos testemunhos pertencentes à classe 0 (concretos extraídos à jusante) quando comparado com as classes 1 e 2 (montante). A classe 2 foi a que apresentou maior incidência e variedade de produtos característicos da RAA. Os produtos observados possuem, na sua maioria, os elementos químicos silício, cálcio e potássio, e formas variadas mostrando-se coerentes com os géis formados na reação. (VEIGA, GONÇALVES & HASPARYK, 1997; HASPARYK *et al.*, 1998; HASPARYK, 1999; HASPARYK *et al.*, 2002)

5.2.5. Ensaio de expansão

Os resultados das expansões residuais determinadas, ao longo do tempo, nas várias amostras obtidas a partir os testemunhos de concreto extraídos, quando submetidas à condição de elevada umidade e temperatura de 38°C (E1), e de acordo com cada Classe (C0, C1 e C2), encontram-se apresentados nas Figuras 83 a 85, a seguir, com suas respectivas médias. Os resultados encontram-se apresentados nas legendas, a partir dos blocos em cada classe (B1 a B5, de menos alterado para mais alterado) e o número seguido do bloco (ex: 16 em B1-16) representa o número do testemunho investigado. A Classe C0 apresenta alguns testemunhos com expansão terminando aos 180 dias, em virtude de terem sido selecionadas algumas amostras para ruptura durante o ensaio de expansão.

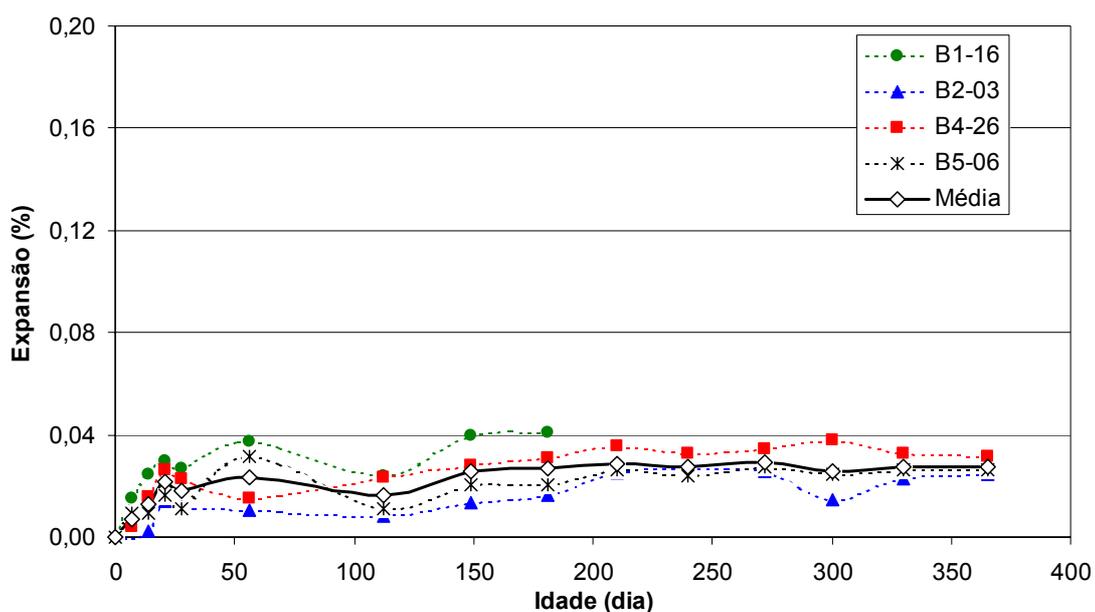


Figura 83: Expansão residual - Classe 0 - Condição E1 - Elevada umidade (38°C).

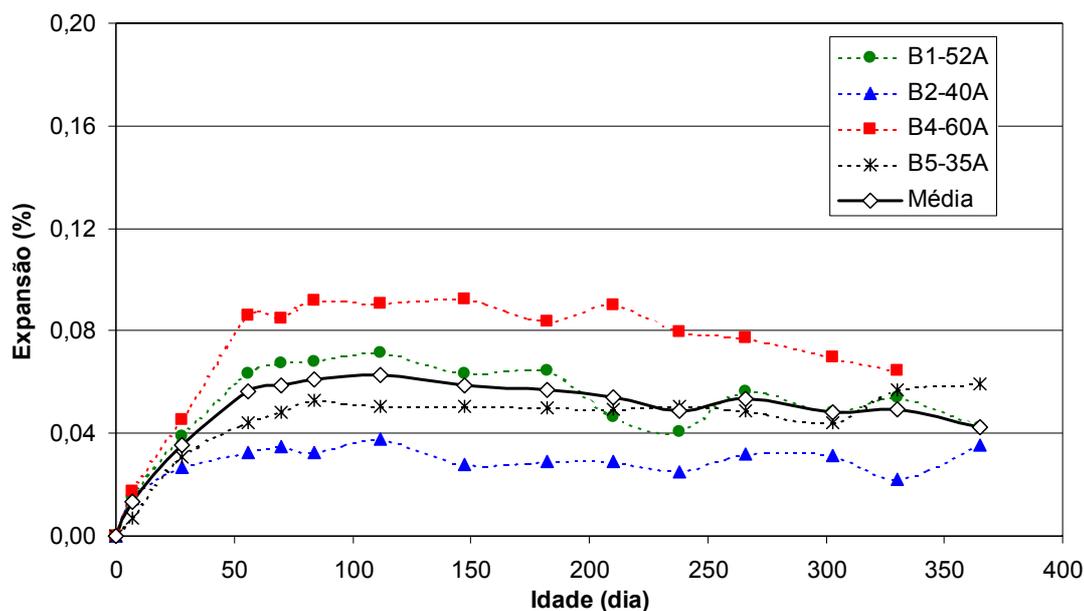


Figura 84: Expansão residual - Classe 1 - Condição E1 - Elevada umidade (38°C).

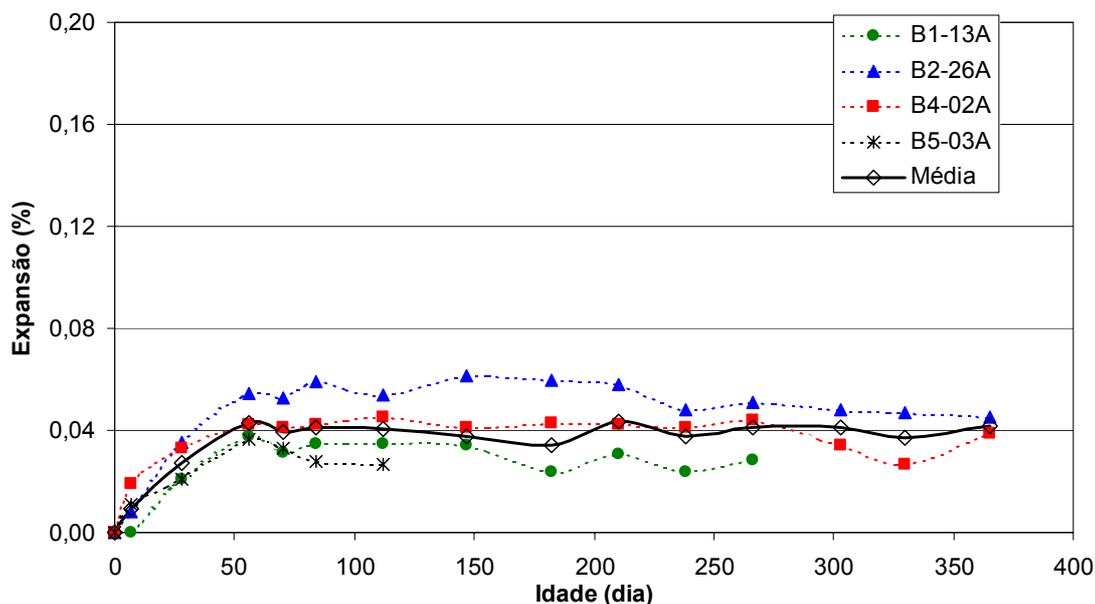


Figura 85: Expansão residual - Classe 2 - Condição E1 - Elevada umidade (38°C).

Verifica-se para a condição de elevada umidade e para todas as classes analisadas que até a idade de aproximadamente 56 dias as expansões crescem gradativamente, não se notando crescimento a partir desta idade. As maiores expansões observadas aos 365 dias foram de

0,06% para a amostra 35A pertencente à Classe 1. Em média, e aos 365 dias, as expansões giram em torno de 0,04% para as classes 1 e 2 e abaixo deste valor (~0,03%) para a classe 0.

Com o objetivo de verificar estatisticamente a influência da classe de concreto (C0, C1 e C2) nas expansões do tipo E1 (condição de elevada umidade a 38°C), foi realizada uma análise de variâncias (NANI & RIBEIRO, 1992) independente nas idades de 180 e 365 dias conforme apresentado na Tabela 31.

Tabela 31: Análise de variância para as expansões na condição E1.

Idade (dia)	Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Signif.
180	Classe do concreto	0,001903	2	0,000951	2,59	4,26	NS
	Erro	0,003311	9	0,000368			
	Total	0,005214	11	---			
365	Classe do concreto	0,000545	2	0,000272	3,96	5,79	NS
	Erro	0,000343	5	0,000069			
	Total	0,000888	7	---			

Com base nos resultados da análise de variâncias, verifica-se que não existe diferença significativa (NS) entre as três classes estudadas na condição E1 e nas idades analisadas para um nível de significância de 0,05. Ou seja, para esta condição estudada, as expansões residuais mostraram-se semelhantes e, em média, baixas e próximas ao limite de 0,04% prescrito na ASTM C-1293.

Nos estudos de expansão residual em testemunhos de concreto que foram extraídos de uma ponte (BÉRUBÉ, SMAOUI & CÔTÉ, 2004), em ambiente de elevada umidade (> 95%) a 38°C, nota-se um comportamento semelhante, com maiores ganhos de expansão nas idades iniciais e tendência à estabilização no tempo. Grattan-Bellew & Danay (1992) e Rivard *et al.* (2004b) também verificaram expansões residuais em ambiente de elevada umidade, a 38°C, com tendência de estabilização em idades avançadas. Os valores médios obtidos foram de 0,05% (um ano) e cerca de 0,04% (após 180 dias), próximos aos obtidos na presente pesquisa.

Sabe-se que a água desempenha um papel muito importante nas reações químicas da RAA. De acordo com Poole (1992), a água tem duas funções, uma primeira de permitir a migração e movimentação dos cátions alcalinos e íons hidroxila e na segunda, no que diz respeito à sua adsorção pelo gel, levando às expansões.

Uma possível explicação para este comportamento expansivo mais pronunciado nas primeiras idades, sendo também comentado por Poole (1992) e Sims (1992), é que quando o concreto já se apresenta deteriorado pela RAA, contendo gel no seu interior e em condição não saturada, qualquer fonte adicional de água é responsável por produzir rápidas e elevadas expansões em função da absorção do gel. As expansões que normalmente são verificadas em idades mais avançadas ocorrem em decorrência dos novos produtos expansivos formados naquele ambiente, caso haja ainda álcalis disponíveis para reagir.

Os resultados das expansões residuais determinadas, ao longo do tempo, nas várias amostras obtidas a partir dos testemunhos de concreto extraídos, quando submetidas à condição de imersão em água a 38°C (E2) e de acordo com cada Classe (C0, C1 e C2), encontram-se apresentados nas Figuras 86 a 88, a seguir, com suas respectivas médias. Os resultados encontram-se apresentados nas legendas a partir dos blocos em cada classe (B1 a B5, de menos alterado para mais alterado), e o número seguido do bloco (ex: B1-22) representa o número do testemunho investigado.

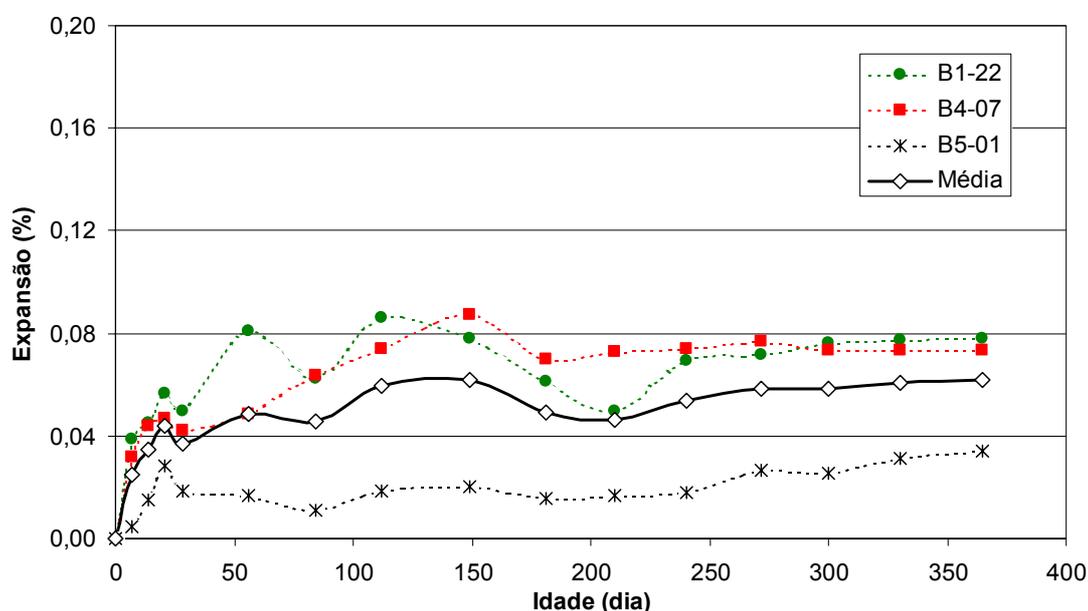


Figura 86: Expansão residual - Classe 0 - Condição E2 - Imersão em água (38°C).

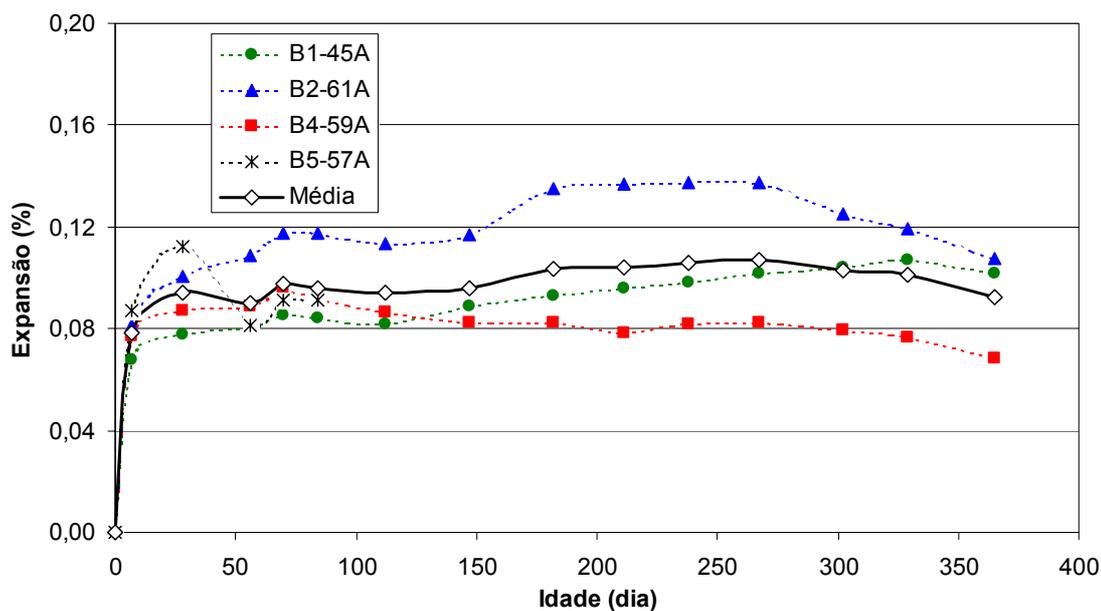


Figura 87: Expansão residual - Classe 1 - Condição E2 - Imersão em água (38°C).

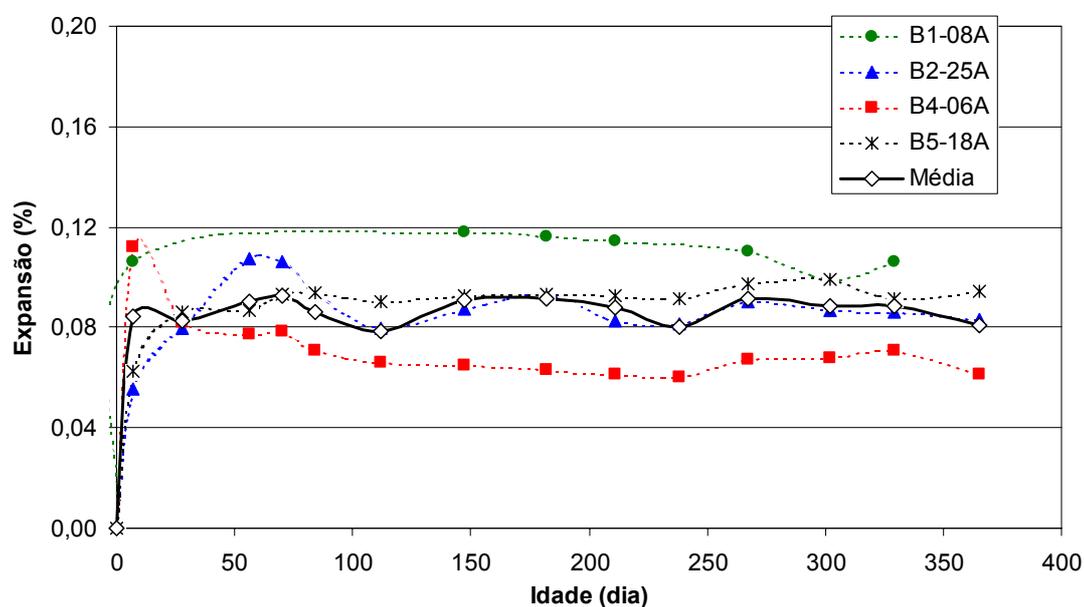


Figura 88: Expansão residual - Classe 2 - Condição E2 - Imersão em água (38°C).

A partir das figuras apresentadas na condição de imersão em água, observa-se um ganho expressivo das expansões logo nas idades iniciais de ensaio (em geral, até 28 dias), sendo que

aos 365 dias a maior expansão obtida foi igual a 0,11% para uma amostra pertencente à Classe 1, e em média global gira em torno de 0,08%.

Na Tabela 32 encontram-se apresentados os resultados referentes à análise de variância para verificar a influência da classe do concreto nas expansões do tipo E2, nas idades de 180 e 365 dias, respectivamente.

Tabela 32: Análise de variância para as expansões na condição E2.

Idade (dia)	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F _{0,05}	Signif.
180	Classe do concreto	0,004993	2	0,002497	3,76	4,74	NS
	Erro	0,004653	7	0,000665			
	Total	0,009646	9	---			
365	Classe do concreto	0,001449	2	0,000725	1,67	5,14	NS
	Erro	0,002608	6	0,000435			
	Total	0,004057	8	---			

Com base nos resultados da análise de variâncias (nível de significância de 0,05), e de forma semelhante à condição E1, não foram observadas diferenças significativas entre as três classes estudadas na condição E2.

Nos ensaios de expansão residual com testemunhos de concreto provenientes de cinco estruturas de casa de força em usina hidrelétrica, em ambiente com 100% de umidade a 38°C, Hasparyk *et al.* (2004a) constataram expansões na faixa de 0,02% a 0,06% em um ano, sendo este último valor obtido em testemunhos bastante afetados provenientes da UHE Moxotó.

As discussões já apresentadas para a condição E1 (elevada umidade) são válidas para a condição de imersão em água (E2), sendo que as diferenças ocorrem apenas na maior disponibilidade de água, incrementando ainda mais as expansões nas idades iniciais referentes ao gel já formado, conforme pode ser observado através da análise dos valores obtidos.

Os resultados das expansões determinadas, ao longo do tempo, nas várias amostras obtidas a partir os testemunhos de concreto extraídos, quando submetidas à condição E3, de imersão em NaOH a 1N e temperatura de 38°C (E3), e de acordo com cada Classe (C0, C1 e C2), encontram-se apresentados nas Figuras 89 a 91, a seguir, com suas respectivas médias. Os resultados encontram-se apresentados nas legendas a partir dos blocos em cada classe (B1 a B5, de menos alterado para mais alterado) e o número seguido do bloco (ex: B1-04) representa o número do testemunho investigado.

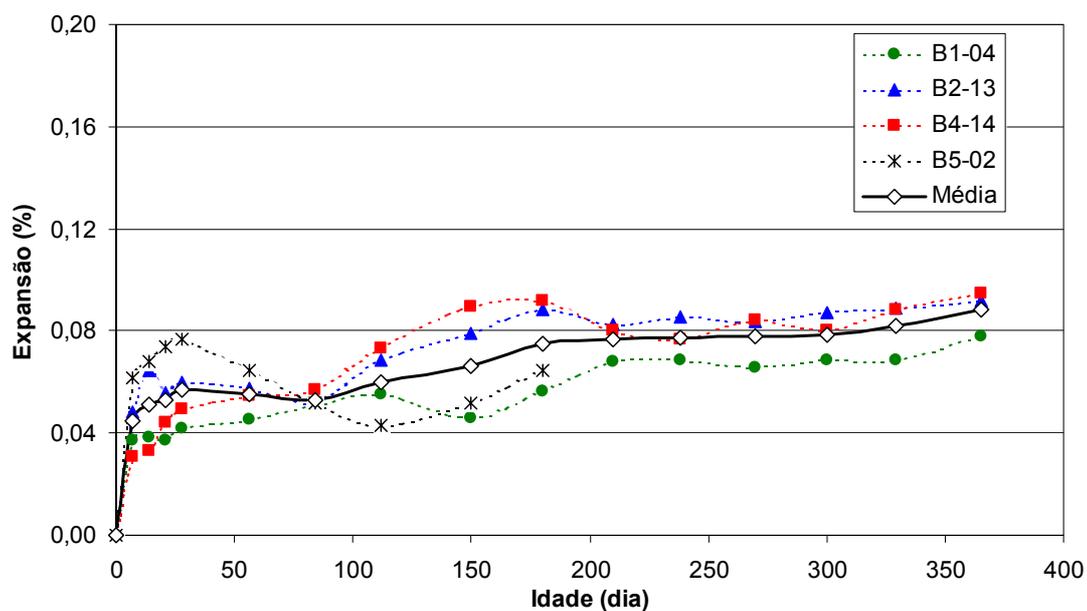


Figura 89: Expansão residual - Classe 0 -Condição E3 - Imersão em NaOH (38°C).

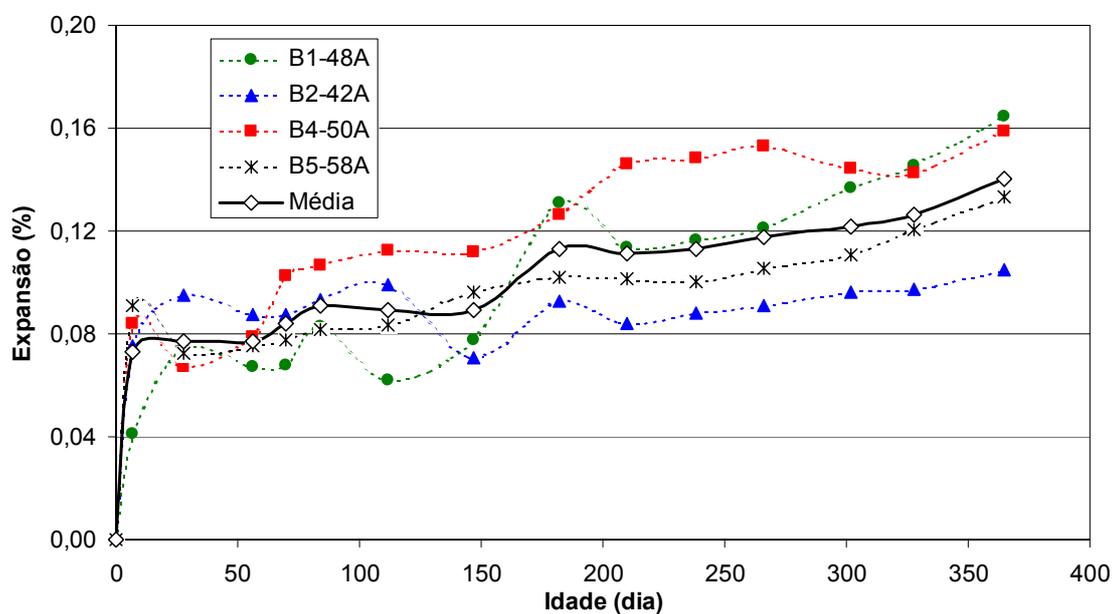


Figura 90: Expansão residual - Classe 1 - Condição E3 - Imersão em NaOH (38°C).

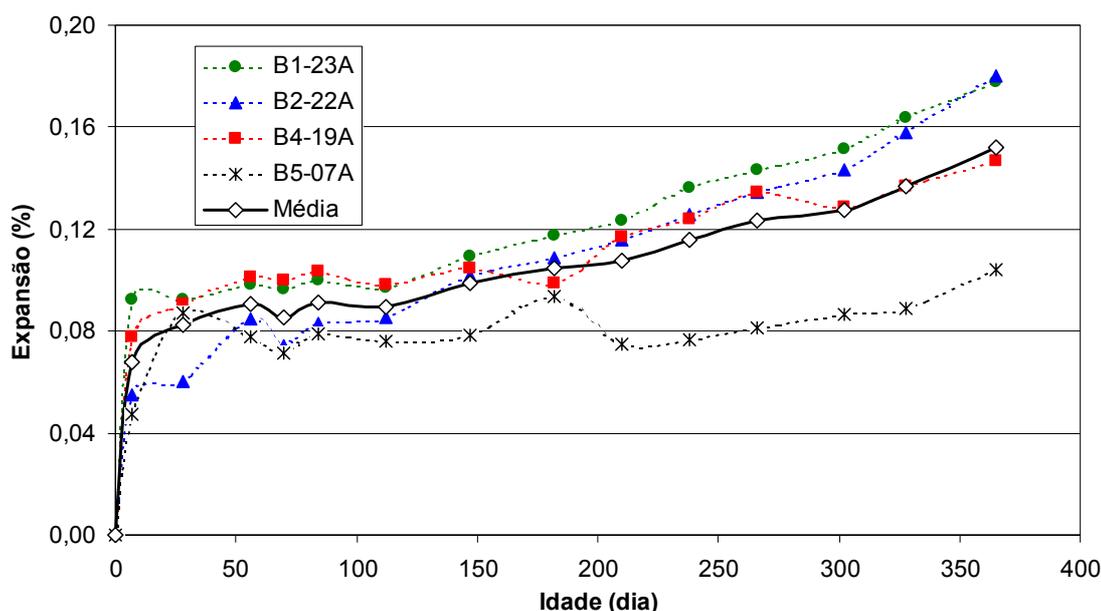


Figura 91: Expansão residual - Classe 2 - Condição E3 - Imersão em NaOH (38°C).

Da mesma forma que para a condição de imersão em água, verifica-se para a condição E3 (imersão em NaOH a 1N) um ganho inicial expressivo de expansão até 28 dias seguido por um período de constância nas expansões, até a idade de aproximadamente 90 dias para a classe C0 e, 112 dias para as classes C1 e C2. Mas neste caso, a partir destas idades as expansões não cessaram, crescendo gradativamente e de forma expressiva ao longo do tempo, até a idade de um ano. Os maiores valores obtidos aos 365 dias foram de 0,18% para a Classe 2. Aos 365 dias, em termos médios, as expansões giram em torno de 0,09%, 0,14% e 0,15% para as classes 0, 1 e 2, respectivamente.

Com o objetivo de verificar estatisticamente a influência da classe de concreto (C0, C1 e C2) nas expansões do tipo E3 (imersão em NaOH a 38°C), foi realizada uma análise de variâncias nas idades de 180 e 365 dias e os resultados se encontram apresentados na Tabela 33.

Tabela 33: Análise de variância para as expansões na condição E3.

Idade (dia)	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F _{0,05}	Signif.
180	Classe do concreto	0,003162	2	0,001581	6,18	4,26	S
	Erro	0,002301	9	0,000256			
	Total	0,005463	11	---			
365	Classe do concreto	0,007640	2	0,003820	4,94	4,46	S
	Erro	0,006182	8	0,000773			
	Total	0,013822	10	---			

Com base nos resultados da análise de variâncias, verifica-se que existe diferença significativa (S) entre as três classes estudadas na condição E3 e nas idades analisadas para um nível de significância de 0,05, embora na idade de 365 dias o efeito ter se apresentado menos importante em relação à idade de 180 dias. Adicionalmente, com o objetivo de verificar se existe homogeneidade dos grupos analisados (classes), foi realizado o teste de Duncan com comparação múltipla das médias. Os resultados indicaram agrupamento das médias para as classes 1 e 2, sendo a classe 0 pertencente a um grupo distinto, mostrando as semelhanças de comportamento e resultados das classes 1 e 2 em E3, ambas representando concretos extraídos à montante.

Grattan-Bellew & Danay (1992) observaram elevadas expansões ao ensaiar testemunhos de concreto deteriorados, mostrando comportamento sempre ascendente até um ano quando imersos em solução de NaOH (1M) a 38°C, chegando a valores cerca de 0,25%. Já nos estudos realizados por Hasparyk *et al.* (2004a), e em ambientes semelhantes, a faixa de expansão encontrada foi menor, variando de 0,05% a 0,08%, com estabilização, na sua maioria, aos 190 dias.

Na condição E3 estudada nesta pesquisa, além do efeito da água na expansão do gel pré-existente, destaca-se ainda a fonte adicional de álcalis para geração de novos produtos, intensificando mais as expansões observadas ao longo do ensaio quando comparadas com as condições de ensaio E1 e E2. Os valores obtidos na presente pesquisa apresentam-se elevados (na faixa de 0,09% a 0,15%) para os testemunhos analisados das três classes, na mesma condição de exposição, mostrando que ainda existem minerais potencialmente reativos para reagir, no caso de existirem álcalis disponíveis. Porém, o comportamento da classe 0 se apresenta distinto das classes 1 e 2, fato este que poderia ser explicado pela menor incidência de gel formado antes do ensaio ser realizado em laboratório, refletindo em menores expansões; esta menor incidência dos produtos da RAA formados na barragem foi comprovada pelas inspeções visuais e análises no MEV (ver item 5.2.4.2).

Os resultados das expansões determinadas, ao longo do tempo, nas várias amostras obtidas a partir os testemunhos de concreto extraídos constituintes da classe 1, quando imersas em solução de 0,74M de LiNO₃ e 1M de NaOH, a uma temperatura de 38°C (E4), e amostras submetidas inicialmente ao tratamento com lítio (E5) e imersas em seguida em solução de NaOH a 38°C encontram-se apresentados nas Figuras 92 e 93, a seguir, com suas respectivas

médias. Os resultados encontram-se apresentados nas legendas, a partir dos blocos em cada classe (B1 a B5, de menos alterado para mais alterado) e o número seguido do bloco (ex: B1-49A) representa o número do testemunho investigado.

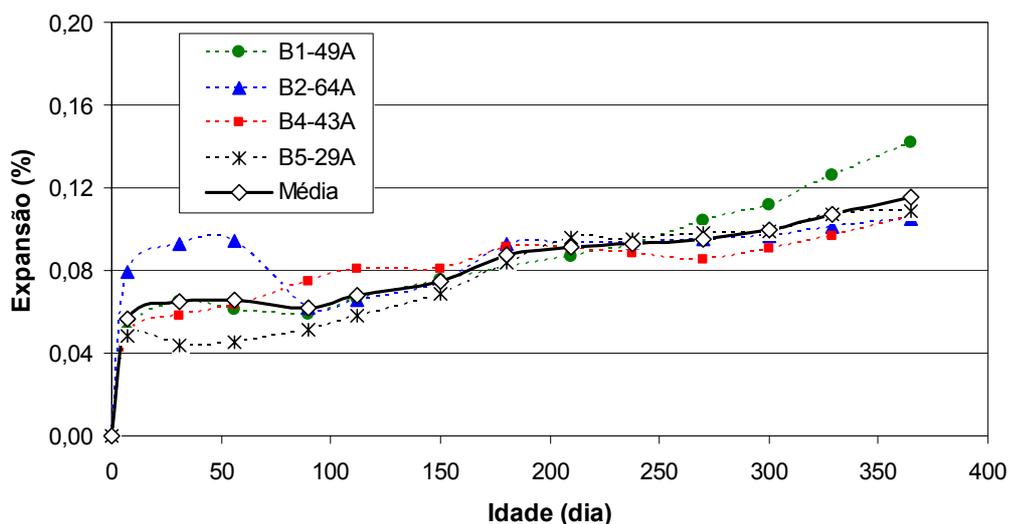


Figura 92: Expansão residual - Classe 1 - Condição E4 - Imersão em solução com relação molar de 0,74 M LiNO₃ : 1 M NaOH

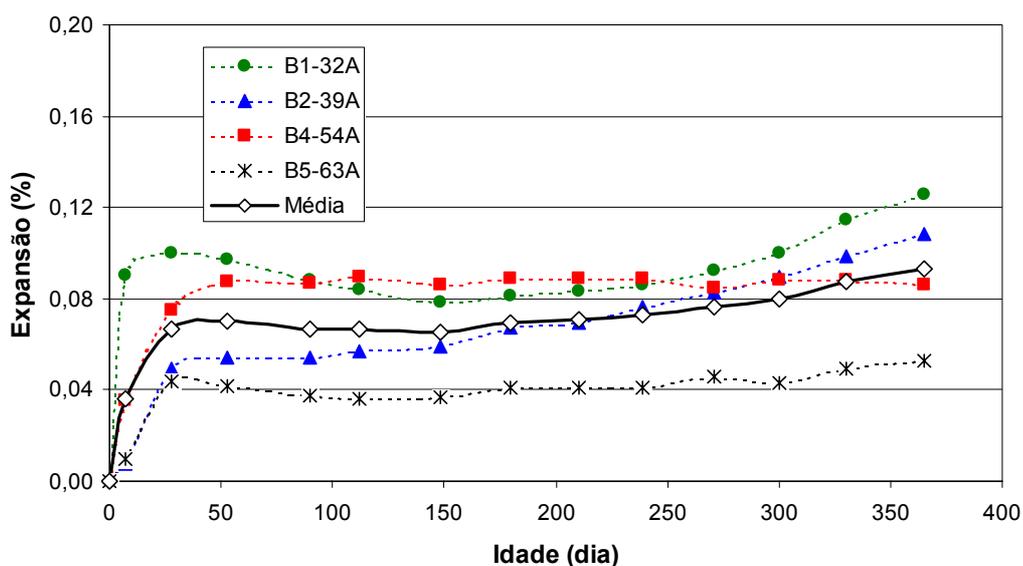


Figura 93: Expansão residual - Classe 1 - Condição E5 - Imersão em 1M de NaOH (38°C) após tratamento com lítio.

A partir das Figuras 92 e 93, com os testemunhos ensaiados na solução composta por lítio e sódio (E4) e após tratamento com lítio (E5), verifica-se também nas primeiras idades um ganho de expansões, até aproximadamente 28 dias. Após esta idade ainda ocorre crescimento, porém de forma bastante lenta e pouco expressiva, de forma distinta ao ocorrido na condição E3. Em média, as expansões atingem aos 365 dias 0,12% e 0,09%, respectivamente para as condições E4 e E5. É interessante comentar que os valores de expansão obtidos nesta etapa do estudo com o lítio mantiveram-se sempre inferiores à média das expansões obtidas para a classe 1 na condição de imersão em NaOH (valor médio obtido em E3=0,14%).

Com o objetivo de verificar estatisticamente as possíveis diferenças nas expansões nas diferentes condições de exposição (E3 – imersão em NaOH; E4 – imerso em solução de 0,74M de LiNO₃ e 1M de NaOH e E5 – tratado com lítio e imerso em 1M de NaOH), foi realizada uma análise de variâncias nas idades de 180 e 365 dias e os resultados se encontram apresentados na Tabela 34. Uma vez que já foi verificado anteriormente que a classe 1 e 2 fazem parte de grupos homogêneos na condição E3, as duas classes foram analisadas nesta etapa em comparação com a classe 1 submetida às duas condições de lítio (E4 e E5).

Tabela 34: Análise de variância para as expansões nas condições C1-E3, C2-E3, C1-E4 e C1-E5.

Idade (dia)	Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Signif.
180	Classe do concreto	0,004474	3	0,001491	6,47	3,49	S
	Erro	0,002765	12	0,000230			
	Total	0,007239	15	---			
365	Classe do concreto	0,008312	3	0,002771	3,36	3,49	NS
	Erro	0,009909	12	0,000826			
	Total	0,018221	15	---			

Com base nos resultados da análise de variâncias, verifica-se que existe diferença significativa (S) entre as 4 condições estudadas, e na idade de 180 dias analisada, para um nível de significância de 0,05. Já aos 365 dias esta diferença não se mostrou significativa, apesar do F_{cal} se aproximar bastante do F_{0,05}. Através do teste de Duncan, verificou-se aos 180 dias a existência de 3 grupos, conforme representação apresentada na Tabela 35.

Tabela 35: Agrupamento das médias obtido pelo método de Duncan.

180 dias	C1-E3	C2-E3	C1-E4	C1-E5
Grupo 1	****	****		
Grupo 2		****	****	
Grupo 3			****	****

Nota-se pelos agrupamentos obtidos que existem condições que se encontram em mais de um grupo em função da proximidade entre alguns resultados de expansão determinados. Um comportamento evidente é que a condição de estudo C1-E5 (tratamento com lítio e exposição em NaOH) é a que se apresenta em grupo distinto aos 180 dias, mostrando uma condição diferenciada em relação às demais, e mostrando o efeito benéfico do tratamento do lítio no comportamento expansivo.

Estudos realizados por Kaneyoshi, Uchida & Kano (2004) mostram, a partir de ensaios acelerados em testemunhos de concreto extraídos de um pilar de ponte, que as expansões residuais podem ser reduzidas em mais do que 50%, se a concentração de lítio aplicada no tratamento for adequada.

Em relação à maioria dos ensaios de expansão, realizados nos testemunhos de concreto, deve-se comentar neste item 5.2.5 sobre alguns problemas ocorridos durante as leituras, apresentando às vezes resultados inconsistentes, falha nas leituras ou mesmo momentos onde não foi possível determiná-las, além de oscilações nos valores encontrados, como pôde ser observado em alguns dos gráficos apresentados. Estes comportamentos ocorreram provavelmente em virtude de algum problema na leitura dos pinos (que foram fixados nas superfícies dos testemunhos), posicionamento do testemunho no aparelho (que devido às suas dimensões e peso podem, em determinado momento, se movimentar ou tombar ligeiramente, influenciando a leitura) ou mesmo devido a alterações intrínsecas ainda não totalmente compreendidas. O importante neste item é deixar bem claro sobre as dificuldades da realização deste tipo de ensaio de expansão residual em testemunhos de concreto extraídos, ao fazer uma adaptação a partir da norma ASTM C-1293, desde a fase de preparação dos testemunhos, fixação de pinos, até a fase do ensaio e leituras, sendo que este tipo de problema não ocorreu com os concretos moldados em laboratório e ensaiados integralmente pela ASTM C-1293. Isto mostra a carência de normas específicas neste assunto envolvendo amostras extraídas. Oscilações nas leituras de expansões também podem ser observadas, por exemplo, em alguns estudos realizados por Kuperman *et al.* (1997), mostrando as dificuldades e

semelhança de comportamento neste tipo de ensaio. Os valores individuais das expansões, para cada condição estudada, encontram-se no Apêndice G.

5.2.5.1. Ajustes dos resultados de expansão

Com o objetivo de verificar o tipo de comportamento expansivo nas várias condições estudadas foram realizados vários testes para modelagem matemática dos resultados, sendo apresentado neste item as melhores equações obtidas para os dados possíveis de serem ajustados.

As condições de exposição E1 (ambiente úmido a 38°C) e E2 (imersão em água) apresentaram comportamentos semelhantes, do tipo exponencial, sendo os ajustes realizados com a equação do tipo:

$$y = a . (1 - \exp (-b . x)) \quad (10)$$

onde y representa a expansão (em %) e x o tempo (em dia).

Nas Tabelas 36 e 37 encontram-se apresentados os parâmetros a, b e R² dos ajustes para cada condição estudada e, na Figuras 94 a 99, estão apresentados graficamente as curvas ajustadas e os respectivos dados experimentais mostrando a aderência às curvas determinadas.

Tabela 36: Parâmetros determinados nos ajustes da condição E1.

E1	y = a . (1 - exp (- b . x))		
Amostra	a	b	R²
C0-AB1	0,04	0,08	0,84
C0-AB2	0,02	0,01	0,75
C0-AB4	0,03	0,04	0,77
C0-AB5	0,02	0,05	0,68
C0-Am	0,03	0,05	0,88
C1-AB1	0,06	0,05	0,76
C1-AB2	0,03	0,09	0,83
C1-AB4	0,08	0,04	0,89
C1-AB5	0,05	0,03	0,95
C1-Am	0,05	0,05	0,91
C2-AB1	0,03	0,04	0,81
C2-AB2	0,05	0,04	0,91
C2-AB4	0,04	0,08	0,86
C2-AB5	0,03	0,06	0,92
C2-Am	0,04	0,04	0,96

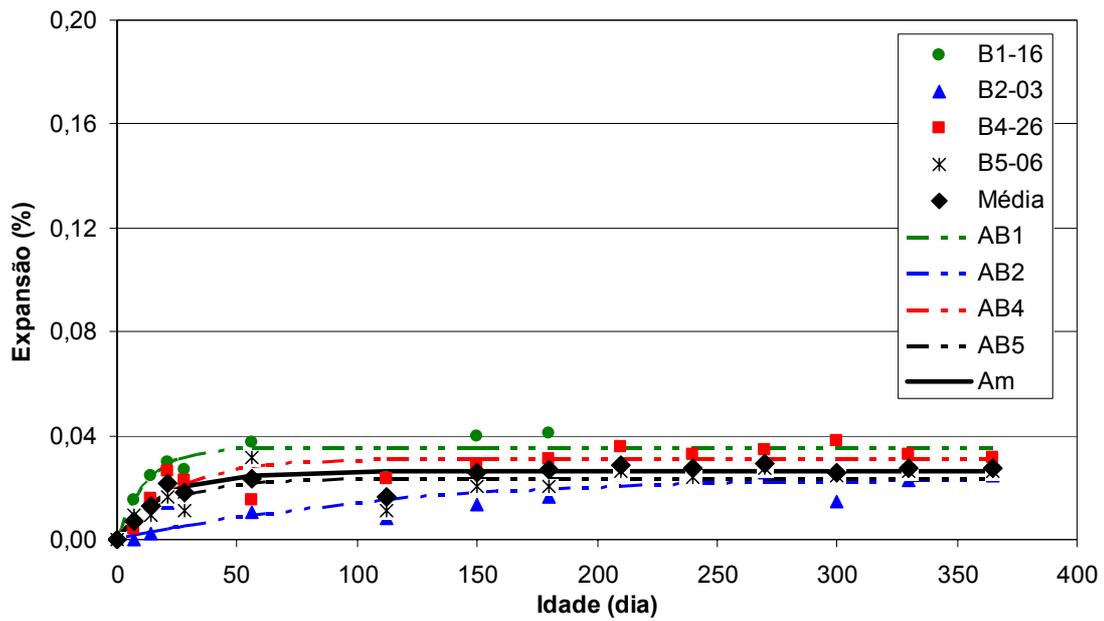


Figura 94: Curvas ajustadas para a condição C0-E1.

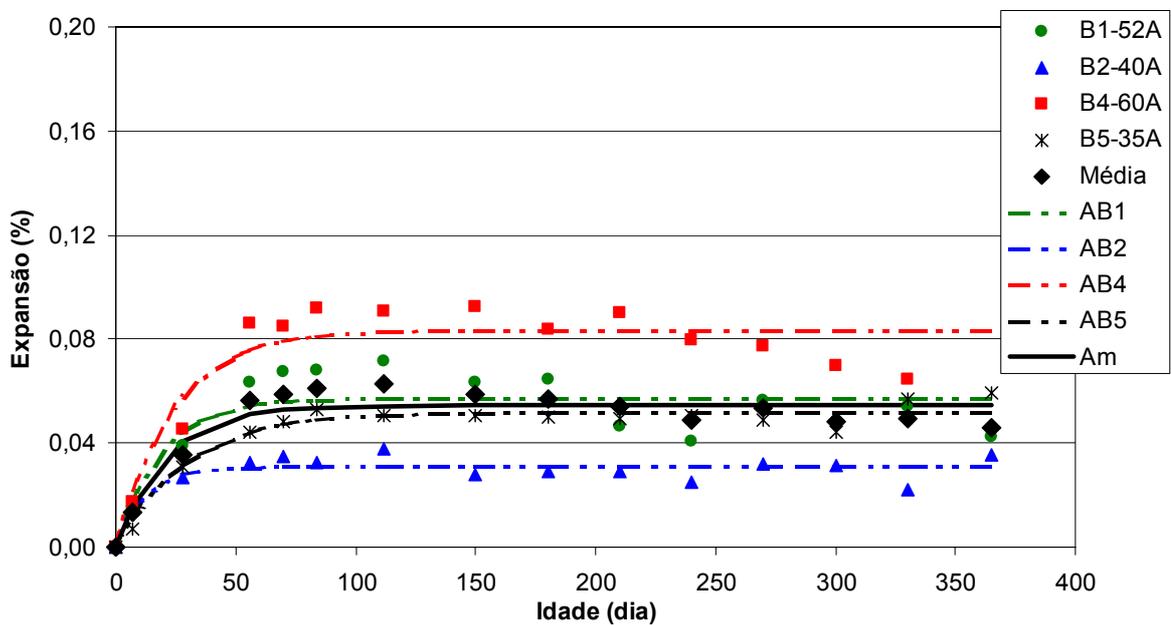


Figura 95: Curvas ajustadas para a condição C1-E1.

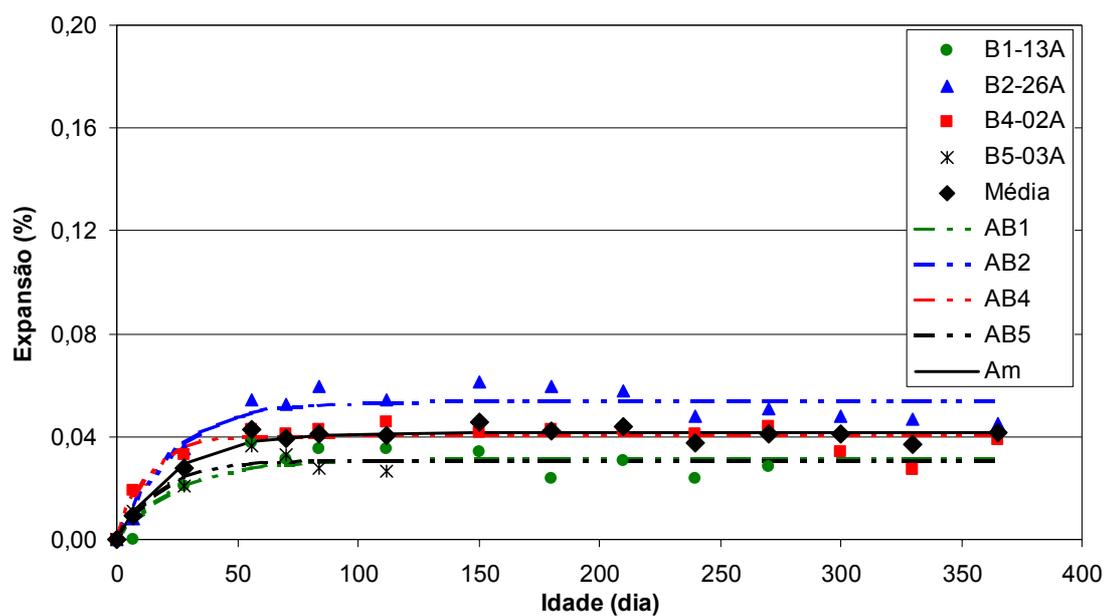


Figura 96: Curvas ajustadas para a condição C2-E1.

Tabela 37: Parâmetros determinados nos ajustes da condição E2.

E2	$y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$		
Amostra	a	b	R ²
C0-AB1	0,07	0,07	0,81
C0-AB4	0,07	0,04	0,86
C0-Am	0,05	0,06	0,88
C1-AB1	0,09	0,18	0,88
C1-AB2	0,12	0,14	0,89
C1-AB4	0,08	0,37	0,92
C1-AB5	0,09	0,38	0,93
C1-Am	0,10	0,22	0,96
C2-AB1	0,11	0,46	0,99
C2-AB2	0,09	0,13	0,89
C2-AB5	0,09	0,16	0,98
C2-Am	0,09	0,50	0,96

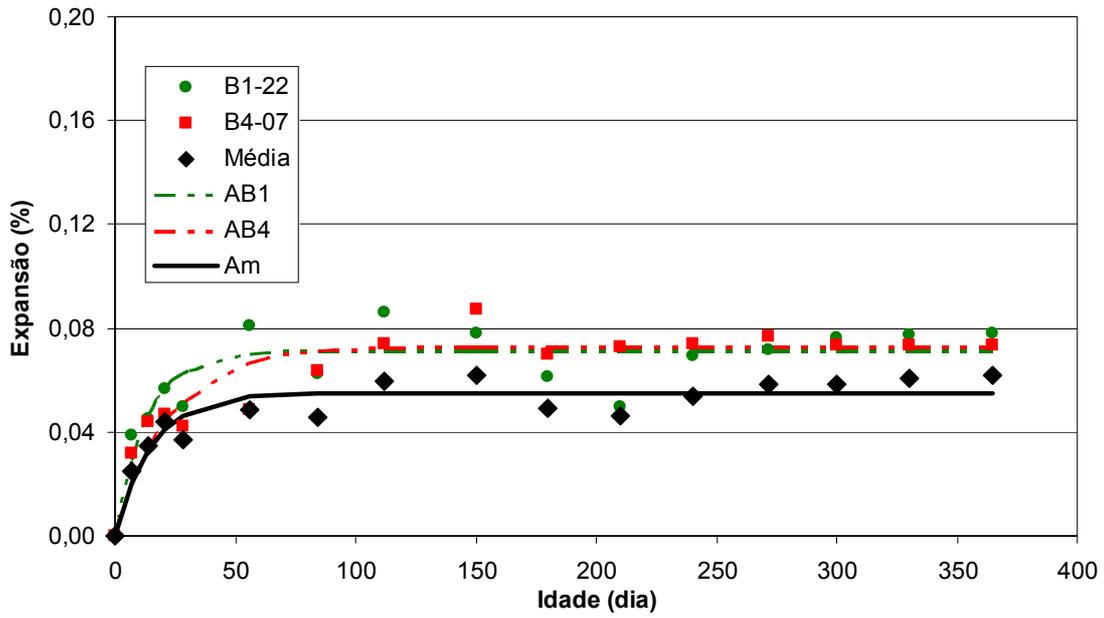


Figura 97: Curvas ajustadas para a condição C0-E2.

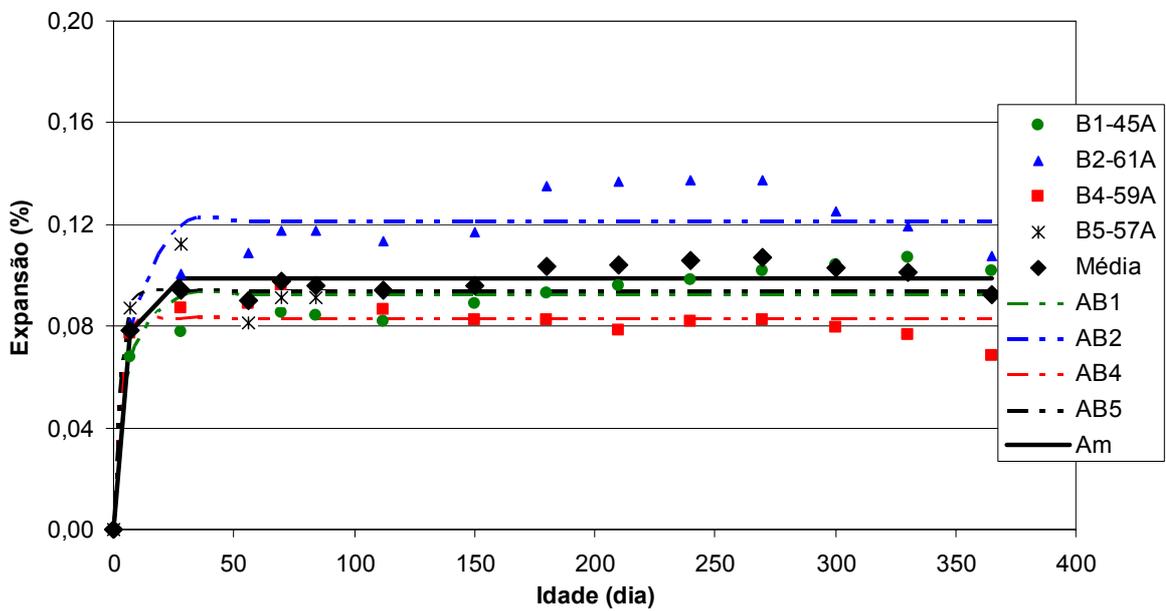


Figura 98: Curvas ajustadas para a condição C1-E2.

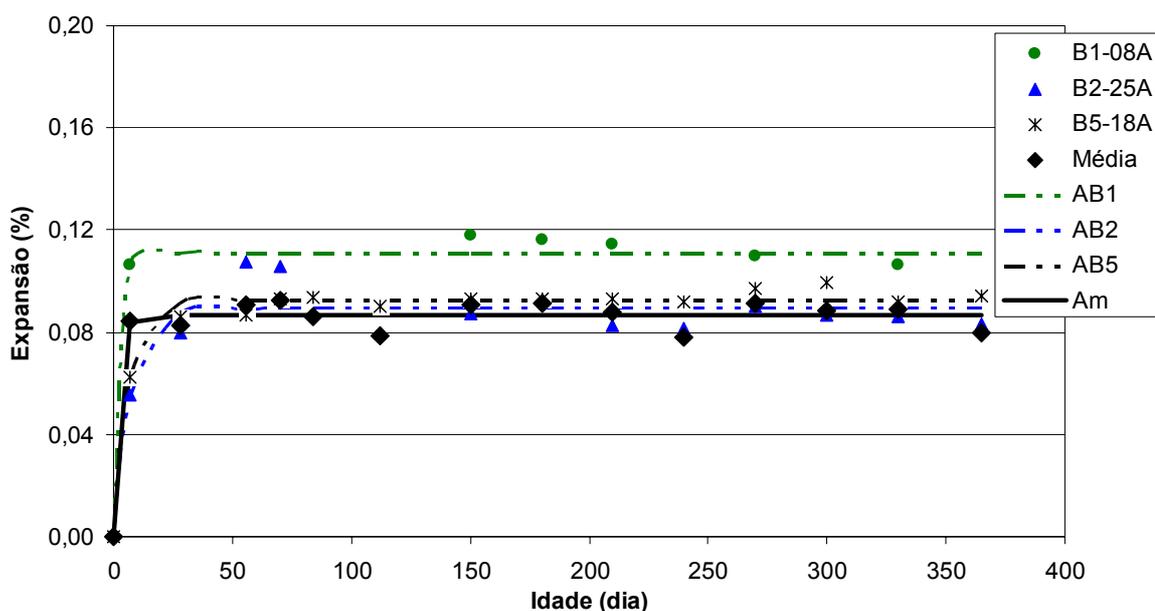


Figura 99: Curvas ajustadas para a condição C2-E2.

Já para a condição de exposição E3 (imersão em NaOH a 38°C), o comportamento não segue o modelo da exponencial apresentada nas condições E1 e E2 uma vez que os dados não se comportam de forma semelhante e não tendem a estabilizar as expansões no tempo estudado. Conforme já discutido anteriormente (item 5.2.5), a condição E3 possui grande fonte de álcalis para alimentar as reações e, conseqüentemente as expansões, perdurando por mais tempo e não se comportando de forma exponencial. Enquanto nas condições E1 e E2, a disponibilidade de álcalis fica restringida àqueles presentes efetivamente no concreto. Sendo assim, a melhor curva ajustada a este tipo de comportamento expansivo, para a maioria dos resultados na condição E3, foi a do tipo:

$$y = 1 / (a + b \cdot x^c) \quad (11)$$

onde y representa a expansão (em %) e x o tempo (em dia).

Na Tabela 38 encontram-se apresentados os parâmetros a, b, c e R² dos ajustes para cada condição estudada e na Figuras 100 a 102 estão apresentados graficamente as curvas ajustadas e os respectivos dados experimentais mostrando a aderência às curvas determinadas.

Tabela 38: Parâmetros determinados nos ajustes da condição E3.

E3	$y = 1 / (a + b \cdot x^c)$			
Amostra	a	b	c	R ²
C0-AB1	103,68	-66,43	0,05	0,94
C0-AB2	87,86	-63,19	0,03	0,91
C0-AB4	117,24	-85,05	0,04	0,90
C0-Am	91,55	-63,73	0,04	0,95
C1-AB1	72,62	-42,44	0,08	0,92
C1-AB2*	0,09	0,25	---	0,90
C1-AB4	44,35	-25,93	0,07	0,92
C1-AB5	29,14	-9,71	0,13	0,81
C1-Am	32,17	-12,12	0,12	0,91
C2-AB1	17,21	-1,27	0,37	0,82
C2-AB2	29,27	-5,89	0,23	0,95
C2-AB4	47,79	-30,95	0,05	0,93
C2-AB5	176,75	-157,50	0,01	0,86
C2-Am	28,54	-8,76	0,15	0,90

Nota: A amostra C1-AB2 teve comportamento exponencial
 $y = a \cdot (1 - \exp (- b \cdot x))$

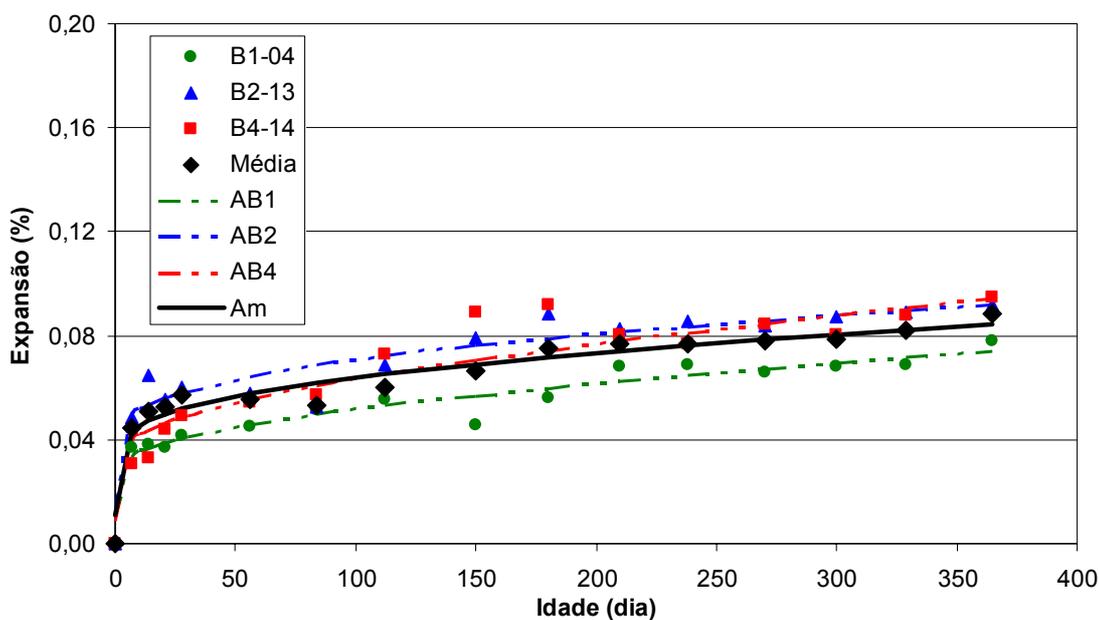


Figura 100: Curvas ajustadas para a condição C0-E3.

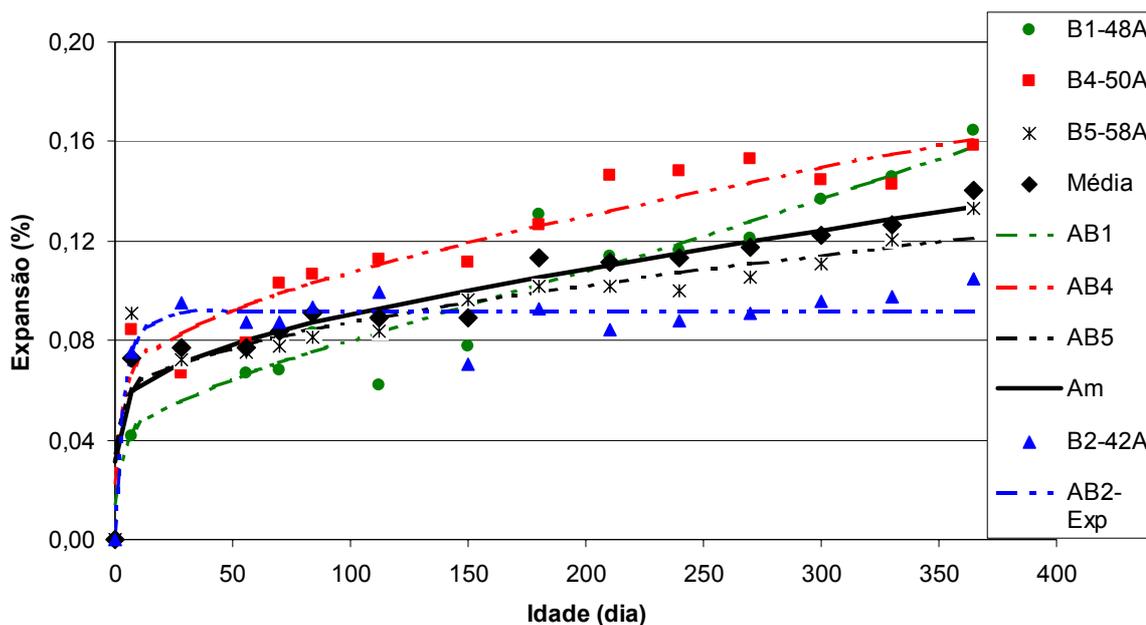


Figura 101: Curvas ajustadas para a condição C1-E3.

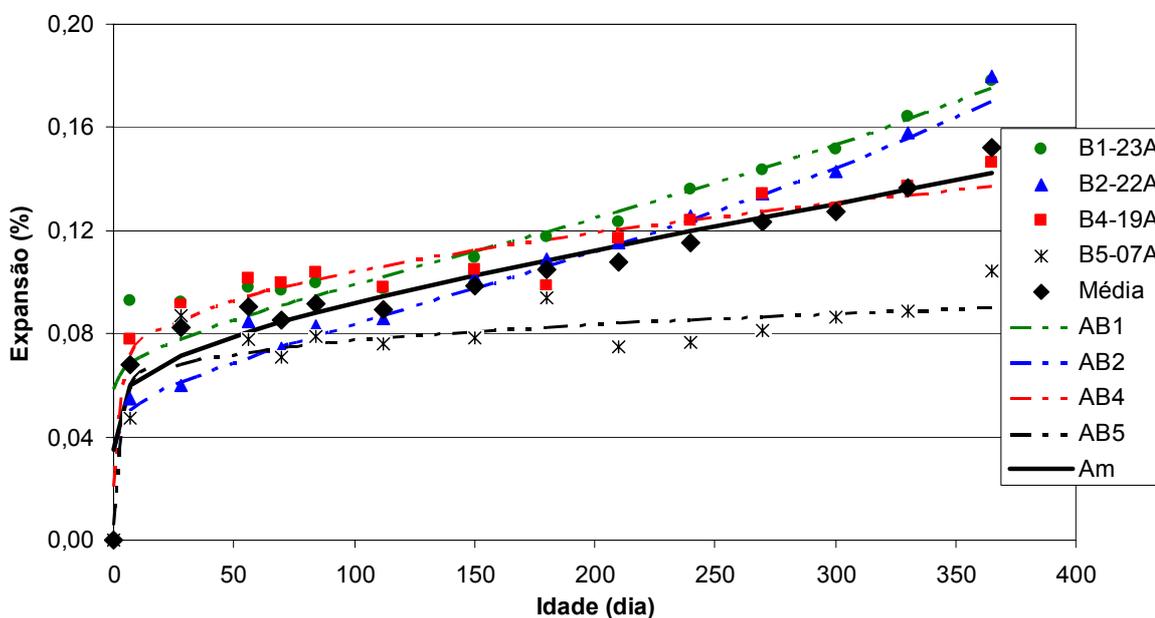


Figura 102: Curvas ajustadas para a condição C2-E3.

Em relação às condições de exposição E4 (imerso em solução de 0,74M de LiNO_3 e 1M de NaOH) e E5 (tratado com lítio e imerso em 1M de NaOH), o comportamento também não segue perfeitamente um modelo da exponencial, na sua maioria, apesar de nas primeiras idades haver uma certa estabilização das expansões, e se nota crescimento ao longo do tempo,

porém de forma menos intensa do que o observado para a condição de imersão em NaOH (E3). Do ponto de vista matemático, a melhor equação que se ajustou para a maioria dos dados, porém não tão fielmente quando à condição E3, foi a do tipo $y = 1 / (a + b \cdot x^c)$, onde y representa a expansão (em %) e x o tempo (em dia).

Na Tabela 39, encontram-se apresentados os parâmetros a , b , c e R^2 dos ajustes para as condições E4 e E5 estudadas e, nas Figuras 103 e 104, estão apresentadas graficamente as curvas ajustadas e os respectivos dados experimentais.

Tabela 39: Parâmetros determinados nos ajustes da condição C1-E4 e C1-E5.

C1-E4		$y = 1 / (a + b \cdot x^c)$		
Amostra	a	b	c	R^2
AB1	23,20	-0,39	0,63	0,87
AB4	156,84	-131,75	0,02	0,97
AB5	40,39	-8,91	0,22	0,90
Am	33,92	-8,35	0,19	0,88
C1-E5		Eq.1 - $y = 1 / (a + b \cdot x^c)$		
		Eq.2 - $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$		
Amostra	a	b	c	R^2
AB2-Eq.1	172,70	-124,72	0,05	0,94
AB4-Eq.2	0,09	0,07	---	1,00
AB5-Eq.2	0,04	0,07	---	0,86
Am-Eq.1	172,55	-146,35	0,02	0,92

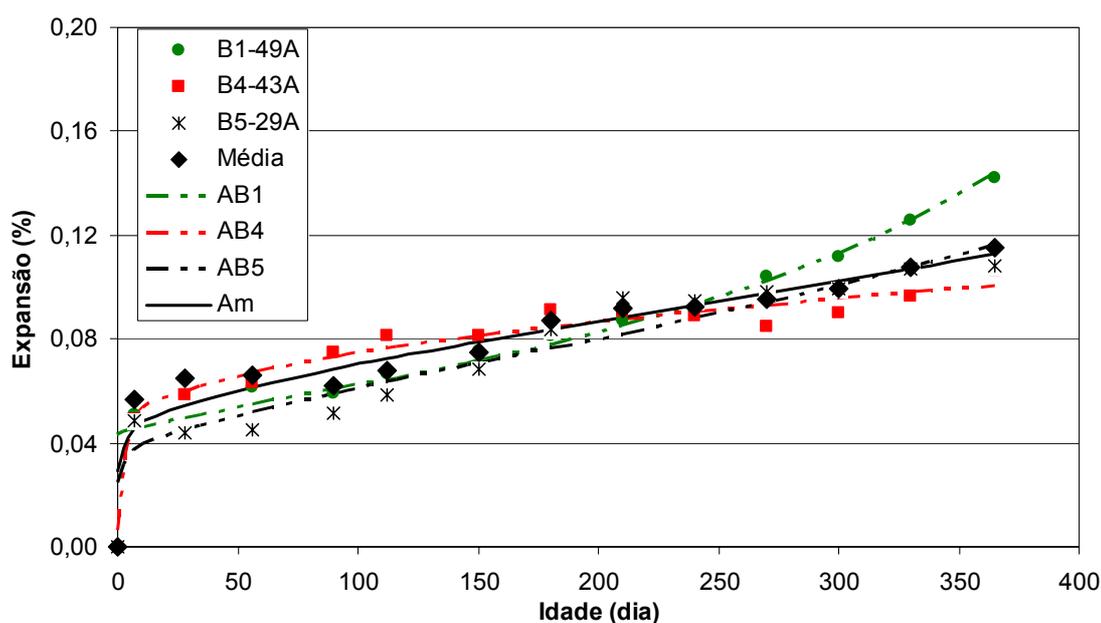


Figura 103: Curvas ajustadas para a condição C1-E4.

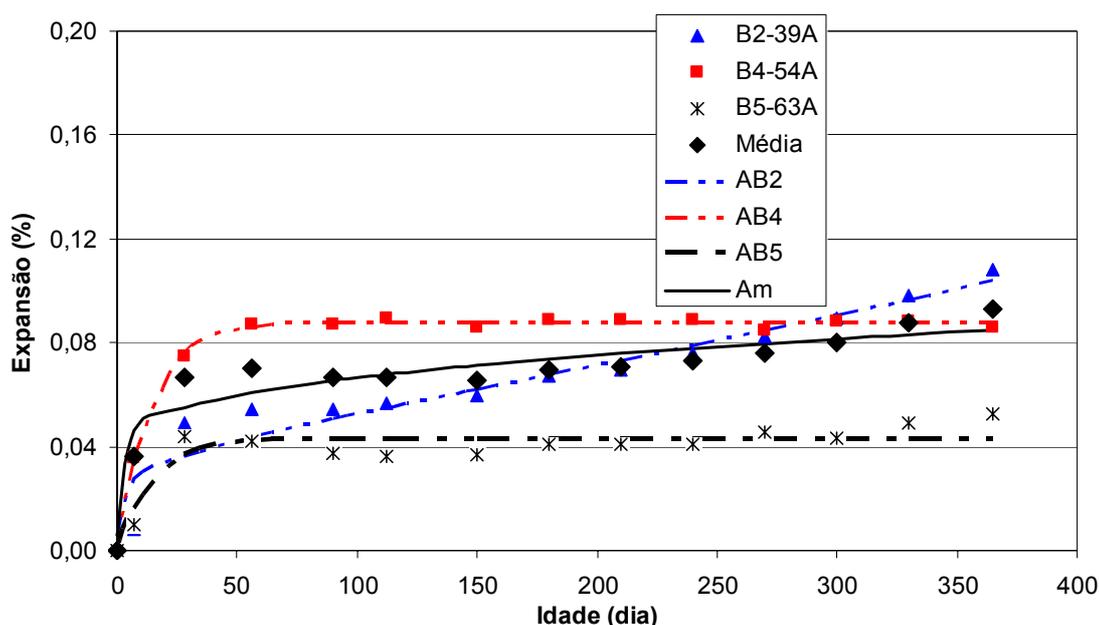


Figura 104: Curvas ajustadas para a condição C1-E5.

Interessante comentar que alguns testemunhos tratados com lítio, e expostos à condição E5, apresentaram tendência de estabilização (B4-54A e B5-63A), mostrando o efeito benéfico do lítio. Já para a condição E4, este comportamento não foi verificado em nenhum dos testemunhos ensaiados, indicando provavelmente que a condição de 0,74M de $\text{LiNO}_3:\text{NaOH}$ não foi a mais apropriada para combater as expansões da RAA, apesar de terem promovido uma redução nas expansões quando comparada com os demais testemunhos ensaiados na condição E3.

5.2.6. Análise comparativa entre o comportamento expansivo médio dos testemunhos de concreto nas condições E1, E2 e E3

Com o objetivo de comparar o comportamento médio das 3 classes de concreto estudadas (C0, C1 e C2), observa-se nas Figuras 105 a 107 as curvas de ajuste para as condições E1, E2 e E3, respectivamente.

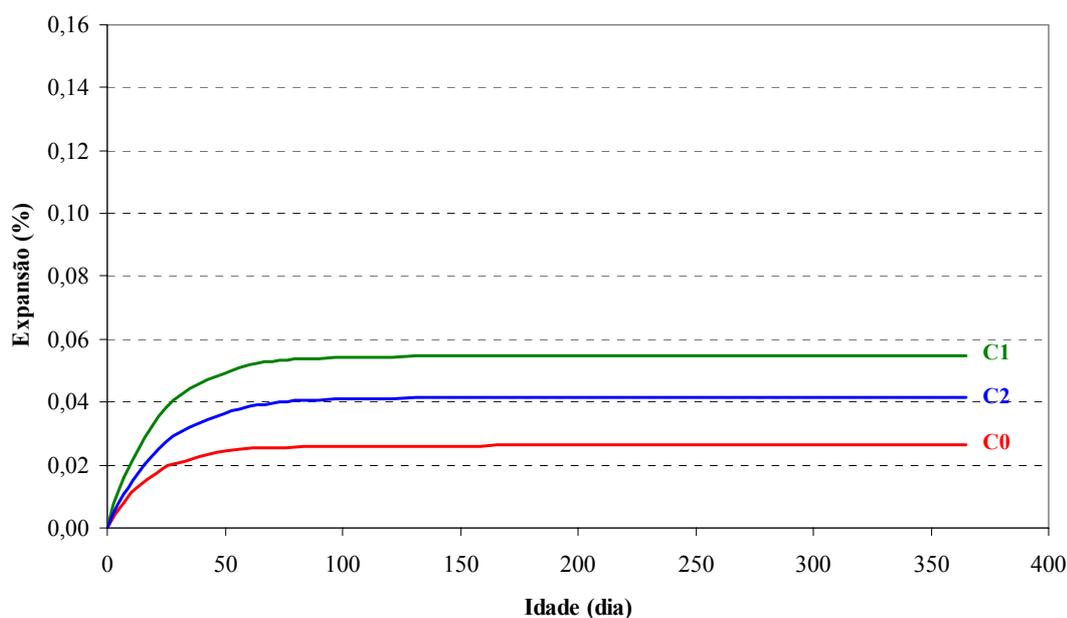


Figura 105: Comportamento médio das classes C0, C1 e C2 na condição E1 – elevada umidade (38°C).

A classe C0 apresenta, em média, expansões inferiores às classes C2 e C1, nesta ordem. O concreto à jusante, em ambiente úmido e temperatura de 38°C, tem menor potencial para expandir do que os concretos extraídos à montante, sendo as expansões mais expressivas representadas pela classe 1. É interessante comentar que a classe 0 foi a que apresentou menor teor de álcalis na análise química dos concretos, além de menor incidência de gel pré-existente formado e menor nível de fissuração, conforme abordado no item 5.2.5, mostrando coerência destes resultados de expansão. Já para as classes 1 e 2, não se nota correlação direta dos álcalis uma vez que não existe tendência clara dos seus teores na análise química, de qualquer forma, se observam teores mais elevados para estas classes de concreto quando comparados com a classe 0. Adicionalmente, a incidência de gel e fissuração é mais intensa nestas classes, justificando as maiores expansões observadas. Verifica-se ainda que a expansão média da classe 1 supera o limite de 0,04% da norma ASTM C-1293 e a classe 2 se aproxima deste limite.

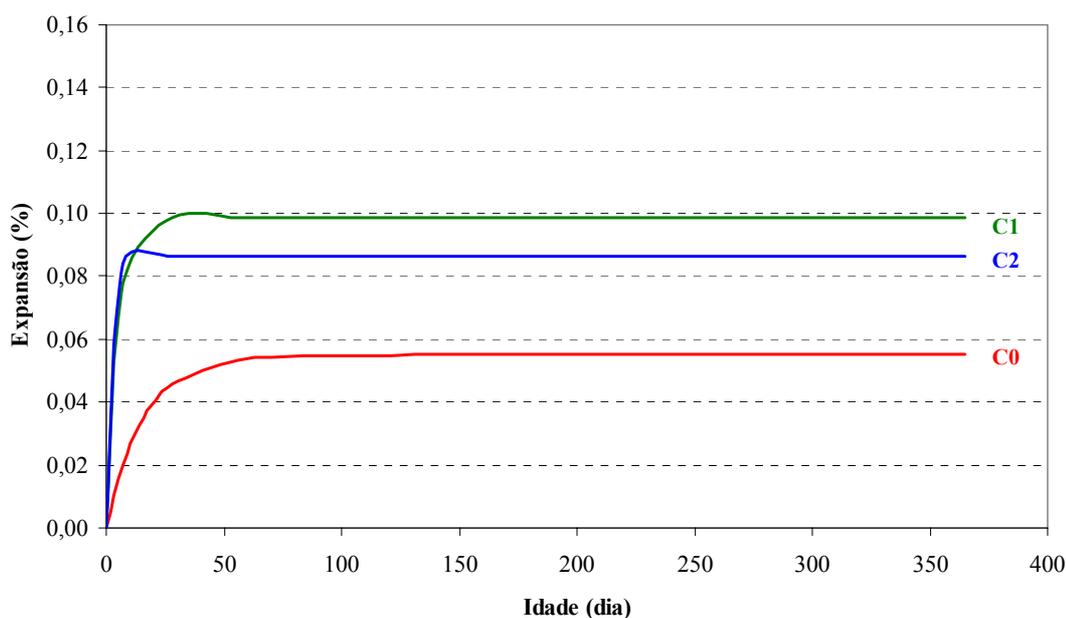


Figura 106: Comportamento médio das classes C0, C1 e C2 na condição E2 – imersão em água (38°C).

Comportamento semelhante foi observado na condição de imersão em água – E2, com exceção dos níveis de expansão, que se apresentam bem superiores quando comparados à condição E1. Isto mostra o importante papel da água nas expansões, apresentando-se em média, superior à 0,04%. Os ganhos de massa, dos concretos selecionados para acompanhamento ao longo do ensaio de expansão, mostram-se mais expressivos nas primeiras idades, de forma semelhante às expansões. Os dados de variação de massa encontram-se apresentados no Apêndice G.

O ganho expressivo das expansões nas primeiras idades poderia estar relacionado unicamente à absorção de água do concreto, sendo que o intumescimento poderia ser o principal causador das elevadas expansões verificadas em um concreto isento da RAA. Porém, como os concretos analisados já se encontram em estágio avançado de deterioração pela RAA, e com a presença de gel na sua estrutura interna e exsudado na externa, fato este comprovado pelas análises microscópicas e inspeções visuais, não se acredita que as expansões estejam apenas relacionadas ao simples intumescimento, e sim a um possível efeito combinado da absorção do concreto e adsorção de água pelo gel existente, seguido de expansão.

Com o objetivo de entender melhor este mecanismo, foi desenvolvido uma parte experimental em argamassas, em paralelo com o programa experimental da tese, sendo todo o detalhamento

e os resultados apresentados no APÊNDICE A. Com base nos resultados alcançados, se verificou que amostras de referência, isentas de RAA, e amostras atacadas pela RAA absorvem água de forma similar, porém nas amostras de referência não são notadas expansões; já nas amostras atacadas existem expansões residuais elevadas, corroborando as hipóteses levantadas da adsorção do gel.

Uma outra pesquisa nesta mesma linha foi desenvolvida por Larive, Laplaud & Coussy (2000). Resultados semelhantes em concretos foram observados pelos pesquisadores, abordando de forma bastante interessante sobre o papel da água na RAA e apresentando dados similares de concretos atacados e não atacados, mostrando taxas de absorção semelhantes. Quando o concreto já se encontra deteriorado pela RAA, e perde parte da água (seca), segundo os autores supracitados, tanto as reações químicas responsáveis pela formação dos produtos da RAA quanto as expansões param por falta de água, podendo ser reativadas de forma bastante rápida quando a água é novamente fornecida ao sistema, por imersão.

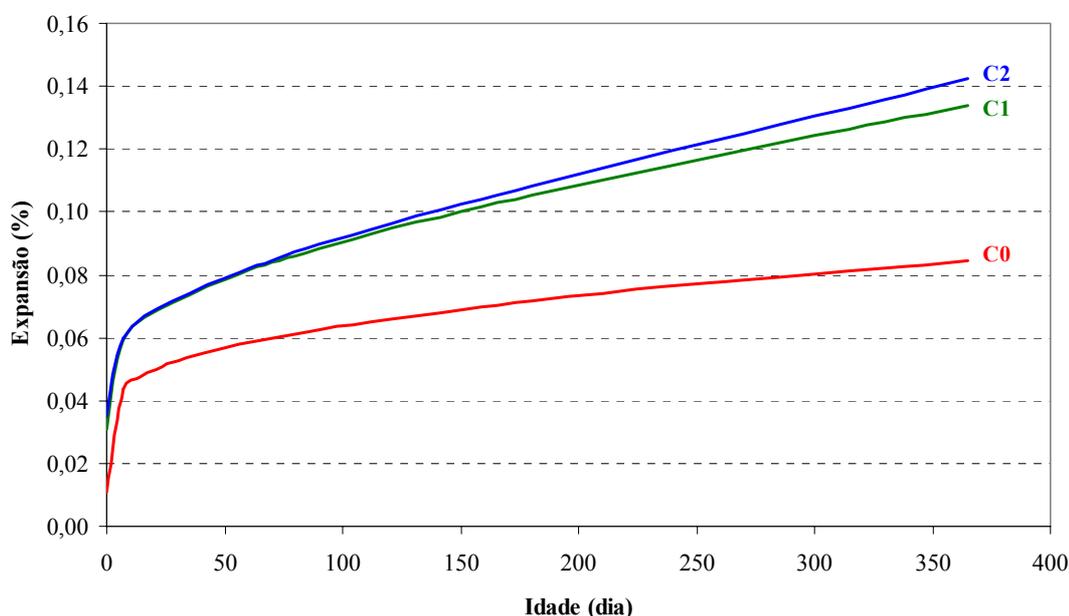


Figura 107: Comportamento médio das classes C0, C1 e C2 na condição E3 - imersão em NaOH (38°C).

Já em relação à condição de imersão em NaOH a 38°C, é interessante observar o distinto comportamento com as expansões sempre crescendo no tempo, principalmente para as classes C1 e C2, porém de forma menos intensa para a classe 0, que parece querer estabilizar em uma

idade mais avançada. Nas classes 1 e 2, o comportamento expansivo é bastante próximo, sempre ascendente e não havendo indícios de estabilização no tempo. Acredita-se que enquanto houver minerais reativos no quartzo para reagir, e os álcalis são constantes nesta condição, as expansões não vão cessar. Com base nestes resultados, verifica-se o importante papel dos álcalis no desenvolvimento e incremento intenso das expansões.

Já a classe 0, mesmo provocando um elevado teor alcalino nesta condição, as expansões não foram tão elevadas, indicando uma menor quantidade de gel formado internamente. Adicionalmente, a microfissuração devido à RAA observada é menor quando comparada com as classes 1 e 2, que se apresentam mais deterioradas, podendo estar dificultando o ingresso dos álcalis da solução para o interior dos concretos, refletindo em menores expansões.

Uma outra possibilidade, de acordo com Kihara (1997), é que a carbonatação mais elevada pode influenciar de forma positiva nas expansões, minimizando a formação dos produtos da reação, fato este também observado para a classe 0 (conforme item 5.2.3.5).

5.2.7. Análise comparativa entre o comportamento expansivo médio dos testemunhos de concreto expostos ao lítio e nas condições E3, E4 e E5

Com o objetivo de comparar o comportamento médio das condições E3, E4 e E5 e verificar de forma mais clara o efeito do lítio nas expansões, tem-se as curvas médias ajustadas na Figura 108.

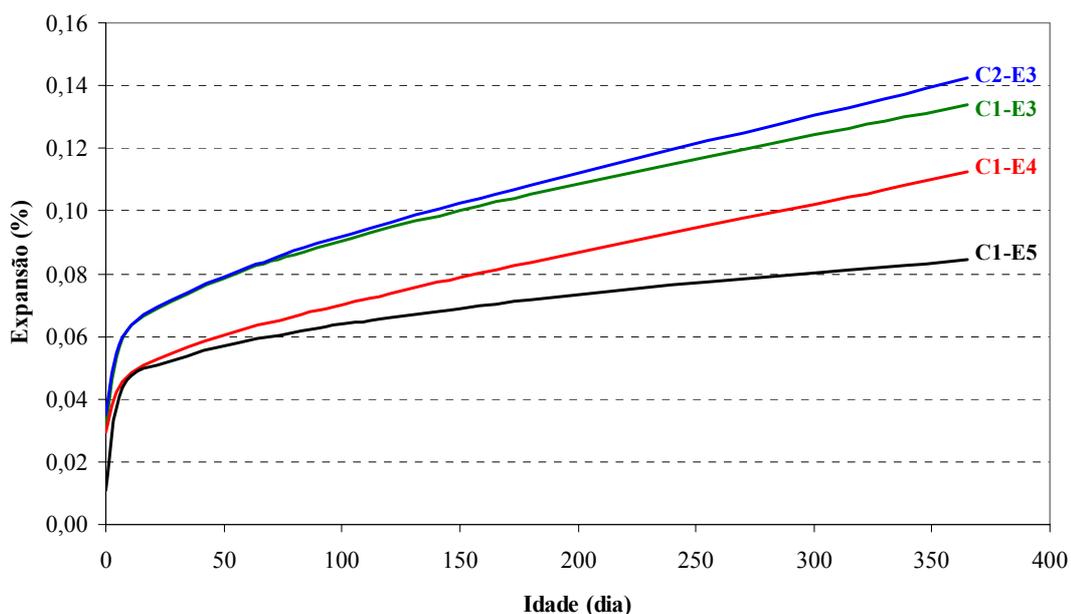


Figura 108: Comportamento médio das condições E3, E4 e E5.

Analisando o comportamento expansivo médio das condições apresentadas na Figura 96, nota-se claramente a grande influência do lítio nas expansões (C1-E4 e C1-E5). Apesar de ainda se apresentar crescente a curva ajustada, verificam-se menores expansões nas condições E4 e E5.

O tratamento prévio com produto a base de lítio (E5) se mostrou mais eficiente do que a condição de imersão em solução de 0,74M de nitrato de lítio e 1M de NaOH (E4). Possivelmente a saturação prévia das amostras de concreto (E5) permitiu a maior penetração dos íons de lítio além da solução possuir surfactantes, segundo informações sobre o produto comercial, promovendo um melhor efeito e proteção quando as amostras foram imersas na solução de NaOH. No caso da solução de lítio:sódio, existem várias discussões a respeito da concentração ótima a ser empregada entre os dois elementos, dependendo do agregado a ser utilizado, minerais reativos presentes e condições de exposição dos concretos (FOLLIARD, THOMAS & KURTIS, 2003). Portanto, apesar da condição E4 ter proporcionado uma redução nas expansões, pode não ter sido a melhor concentração para os materiais e condição estudada. Seriam necessários estudos adicionais para se verificar a concentração ótima no presente caso, não sendo foco desta pesquisa, gerando novos desafios a serem alcançados.

5.2.8. Ultra-som na expansão

As Figuras 109 a 114 a seguir apresentam os resultados de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas obtidos nos testemunhos durante os ensaios de expansão, nas condições de exposição E1, E2 e E3, para as Classes 0, 1 e 2 até a idade de 365 dias. Os valores individuais das leituras estão registrados no Apêndice H.

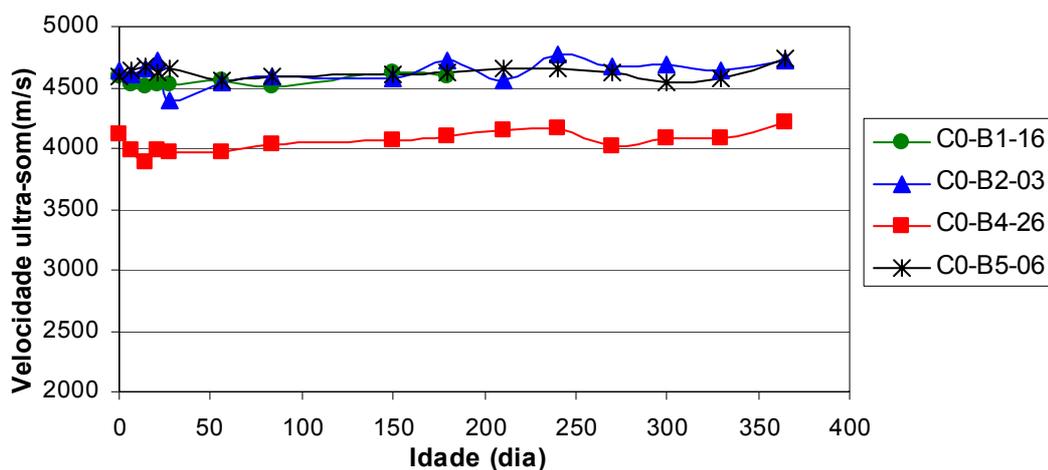


Figura 109: Velocidades ultra-sônicas - classe 0, condição E1 - elevada umidade (38°C).

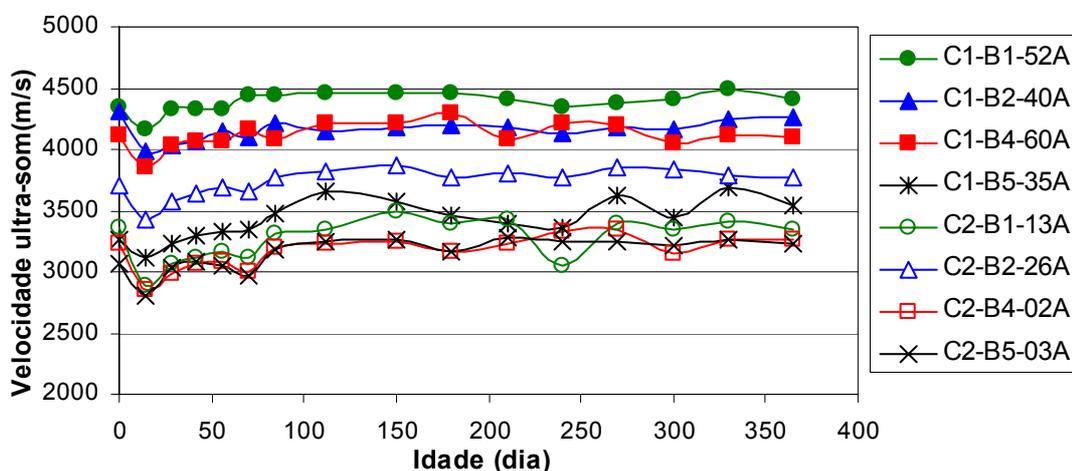


Figura 110: Velocidades ultra-sônicas - classe 1 e 2, condição E1 - elevada umidade (38°C).

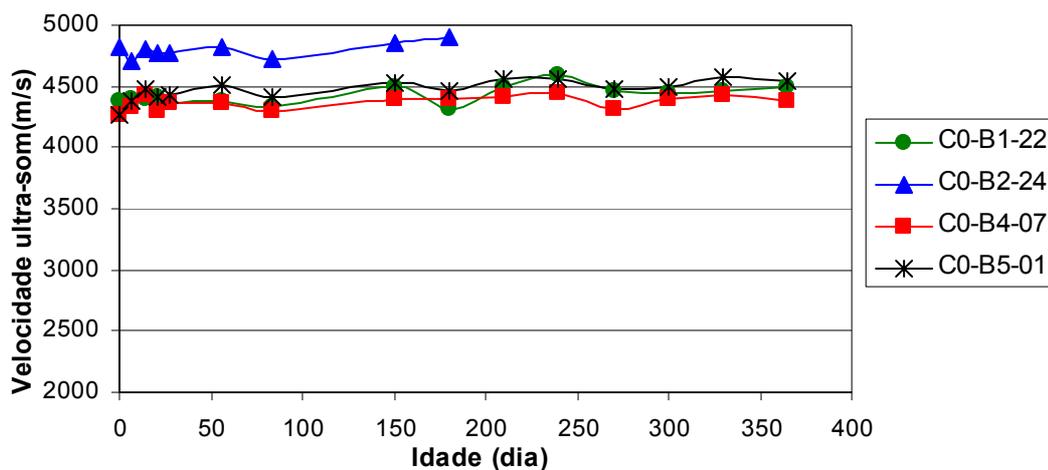


Figura 111: Velocidades ultra-sônicas - classe 0, condição E2 - elevada umidade (38°C).

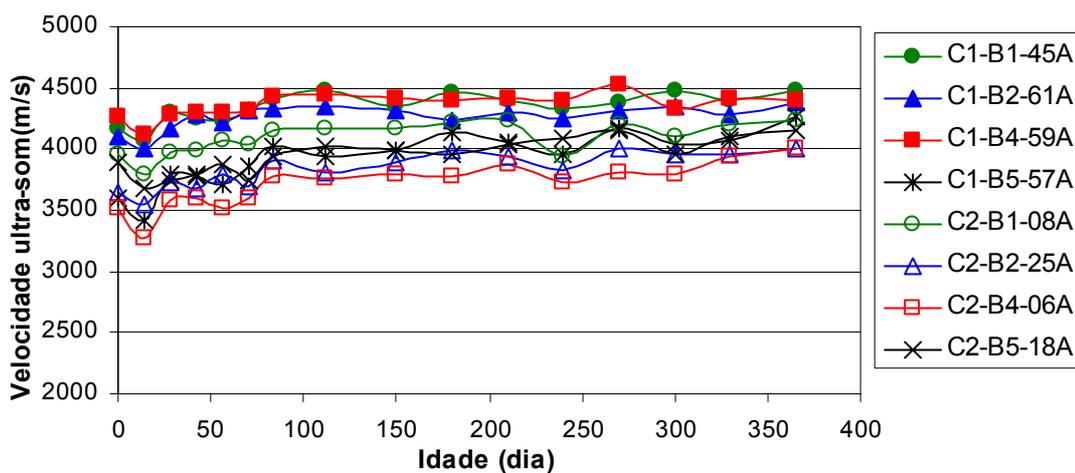


Figura 112: Velocidades ultra-sônicas - classe 1 e 2, condição E2 - elevada umidade (38°C).

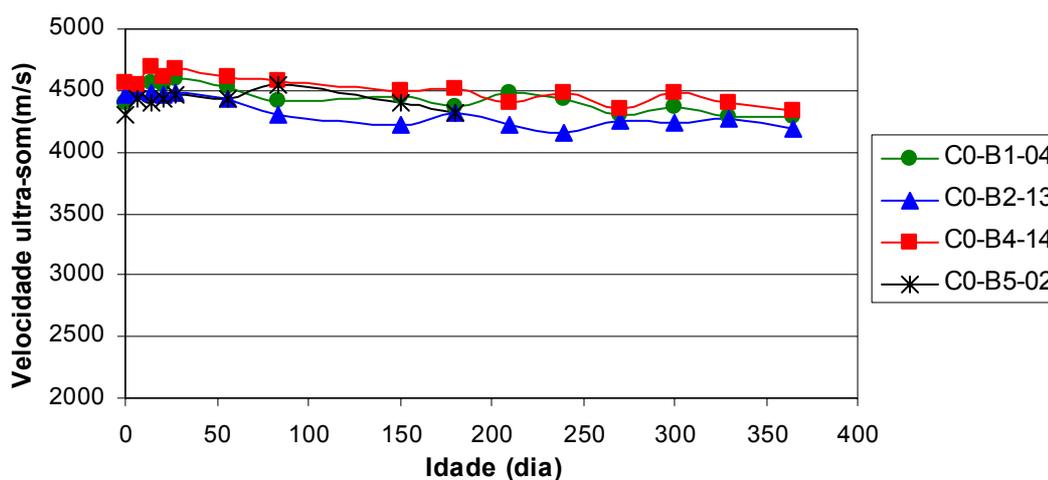


Figura 113: Velocidades ultra-sônicas - classe 0, condição E3 - elevada umidade (38°C).

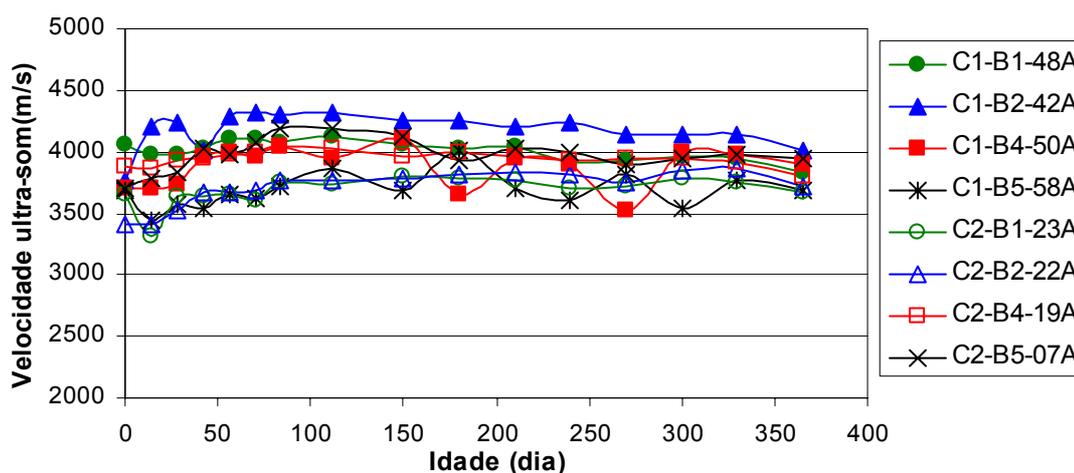


Figura 114: Velocidades ultra-sônicas - classe 1 e 2, condição E3 - elevada umidade (38°C).

A partir das figuras apresentadas, não se nota uma variação significativa da velocidade de propagação de ondas ao longo de todo o ensaio de expansão até um ano, para as três condições estudadas (E1, E2 e E3). Rivard *et al.* (2004a) também não observaram variações significativas da velocidade ultra-sônica ao longo de ensaios de expansão em testemunhos de concreto, quando expostos tanto a condições de elevada umidade como de imersão em NaOH a 38°C.

5.2.9. Análise comparativa entre os resultados de ultra-som pelo método direto e indireto

Com o objetivo de correlacionar os resultados dos ensaios ultra-sônicos pelos métodos de transmissão direta, realizados nos testemunhos extraídos, e indireta, realizados no concreto da galeria “in loco”, todos os resultados obtidos foram agrupados na Figura 115 a partir da ordenação global dos testemunhos para as várias classes estudadas.

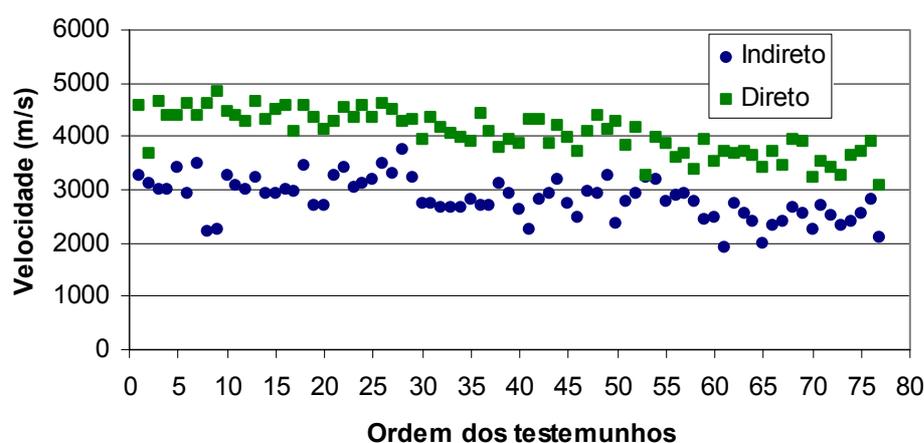


Figura 115: Velocidades ultra-sônicas pelo método direto e indireto.

Verifica-se que existem diferenças através dos dois métodos empregados, para todos os testemunhos investigados, sendo notada também uma redução no valor da velocidade à medida que o grau de deterioração aumenta, comportamento este já discutido anteriormente (item 5.2.2). Os resultados obtidos através do método indireto são sempre inferiores ao do método direto, representando em média 70% ($\pm 8\%$) da velocidade determinada no método direto, independente da classe estudada (ver Figura 116).

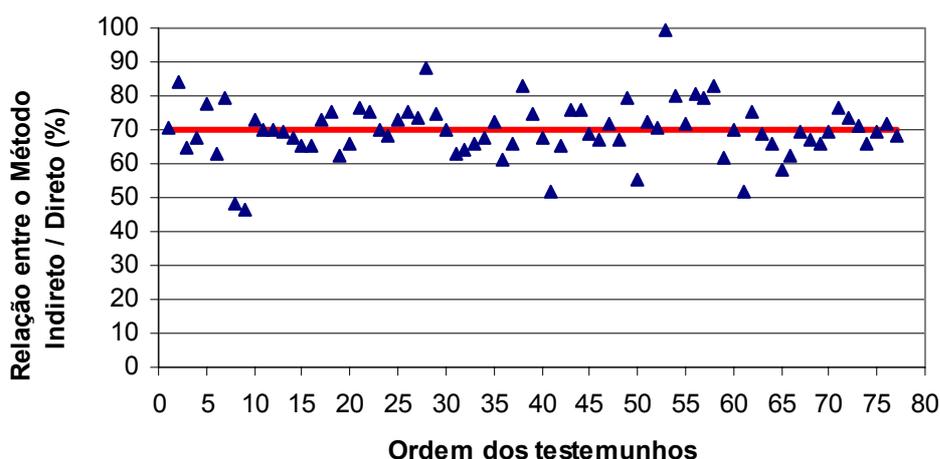


Figura 116: Relação entre o método de transmissão direta e indireta.

Estudos realizados por Kobori *et al.* (2004), em concretos afetados pela RAA, também mostram que existe uma relação entre os dois tipos de método de ensaio nas investigações realizadas. Segundo Nogueira & Willan (2001), as diferenças encontradas entre os métodos transversal (indireto) e longitudinal (direto) podem ser atribuídas às diferenças na direção de oscilação das partículas.

5.2.10. Correlação entre o módulo de elasticidade e a velocidade ultra-sônica

Na Figura 117 encontram-se apresentados apenas os resultados da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em função do módulo de elasticidade estático determinado nos testemunhos de concreto pertencentes às classes C0, C1 e C2. Observa-se que existe uma correlação entre as duas propriedades obtidas, sendo que à medida que o módulo cai, a sua velocidade também cai, mostrando o efeito da microfissuração a partir da RAA nestas propriedades.

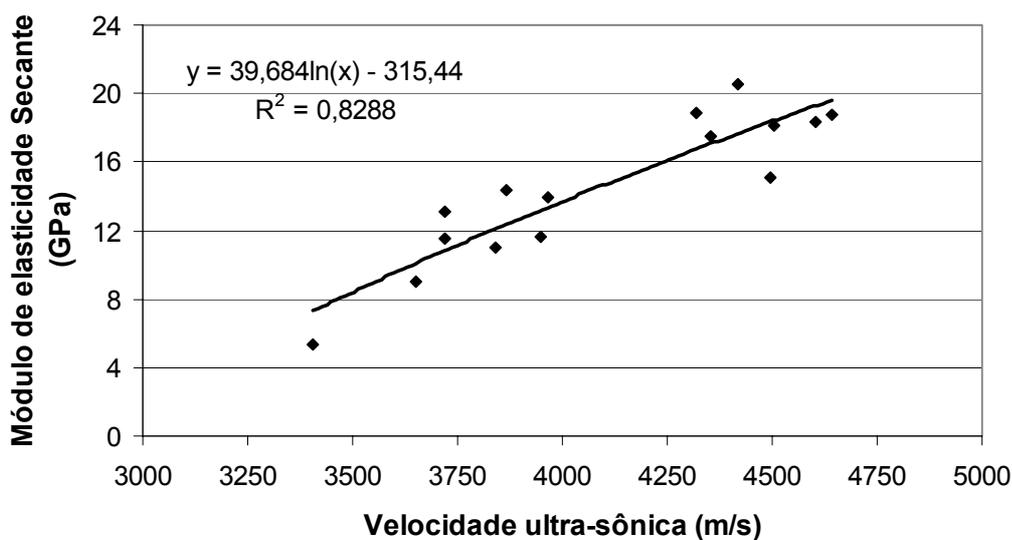


Figura 117: Módulo de elasticidade secante x velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.

O módulo dinâmico foi calculado a partir da velocidade de ondas ultra-sônicas, considerando-se o coeficiente de Poisson igual a 0,2 e a massa específica real média igual a $2,56 \text{ kg/m}^3$ (Apêndice C), obtida em laboratório a partir de 5 testemunhos de concreto extraídos e destinados a este ensaio. Assim, na Figura 118 encontram-se os resultados referentes ao módulo dinâmico calculado sendo correlacionado com o módulo de elasticidade secante - estático - determinado para os 15 testemunhos, mostrando também a existência de uma correlação entre estas duas propriedades e a eficiência do ensaio de ultra-som na investigação da RAA.

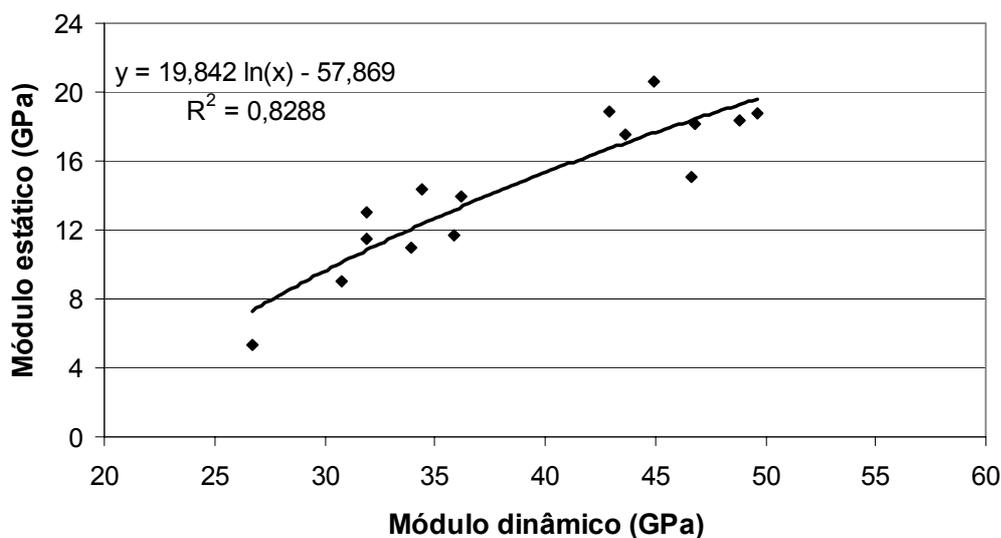


Figura 118: Módulo de elasticidade secante x módulo dinâmico dos testemunhos de concreto.

As correlações apresentadas neste item permitiram verificar a eficiência do emprego do ultra-som, sendo promissora a sua utilização em estruturas de concreto já atacadas pela reação álcali-agregado ou com suspeita da sua instalação.

Nos estudos utilizando o ultra-som realizados por Kobori *et al.* (2004), onde foram avaliados testemunhos de concreto atacados pela RAA extraídos de uma barragem no Japão, foi observada também a sensibilidade da técnica quando da deterioração da barragem.

5.2.11. Correlação entre o comportamento expansivo e a velocidade ultra-sônica dos testemunhos

Nas Figuras 119 e 120 observa-se a variação da velocidade ultra-sônica com as expansões na condição E3, com imersão em solução de NaOH (1N) a 38°C para as classes C0, C1 e C2.

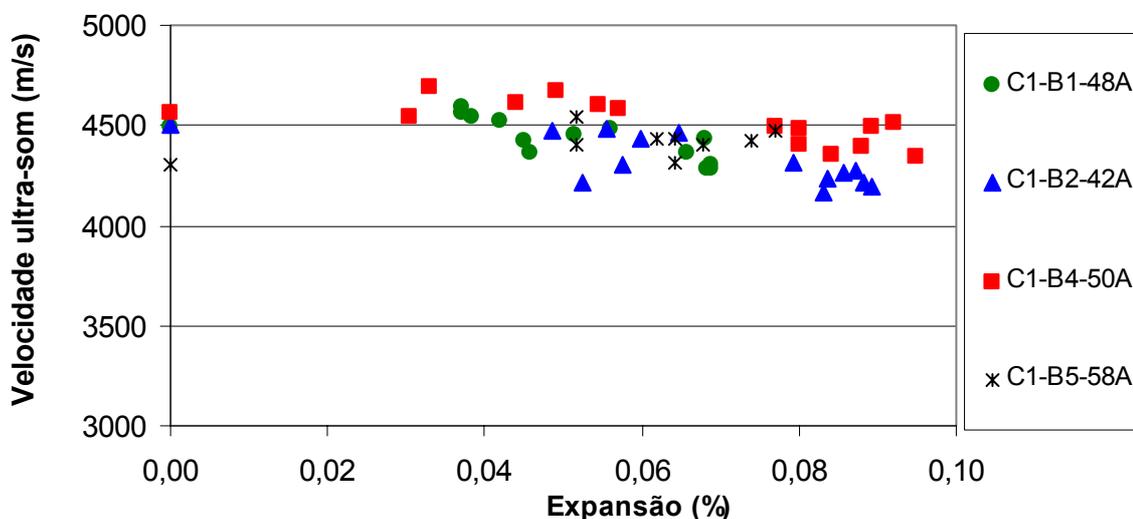


Figura 119: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras da classe C0 (Jusante).

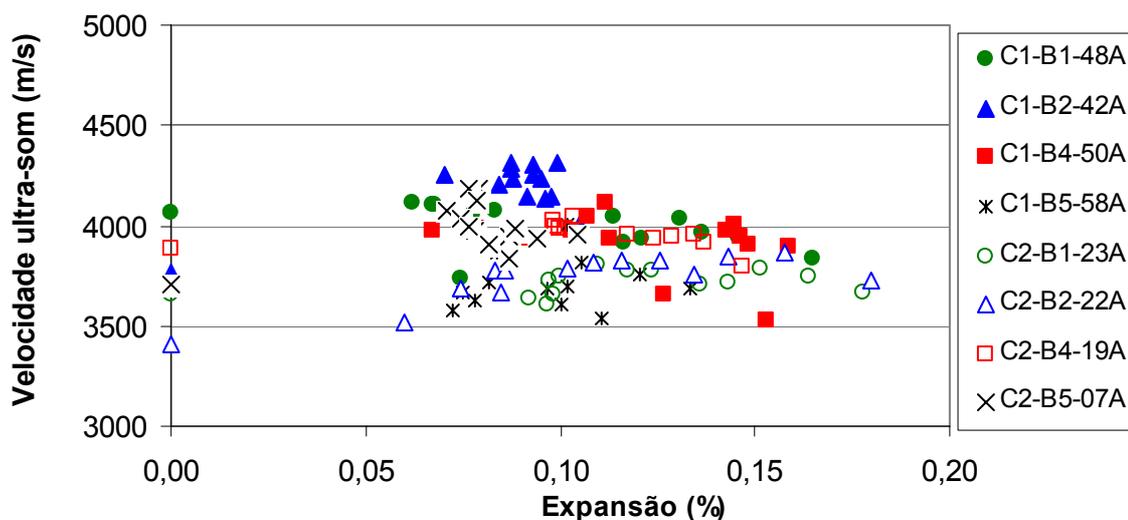


Figura 120: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras da classe C1 e C2 (Montante).

A partir das Figuras 119 e 120, não se verifica uma tendência clara na redução da velocidade ultra-sônica à medida que as expansões aumentam, nas amostras de testemunhos ensaiadas na condição E3. Adicionalmente, não foi observada nenhuma correlação entre a velocidade ultra-sônica e as expansões nos ambiente de exposição E1 (elevada umidade) e E2 (imersão em água). Nos estudos realizados por Rivard *et al.* (2004a), não foram também observadas variações significativas da velocidade ultra-sônica com o acompanhamento das expansões de testemunhos de concreto em condições tanto de elevada umidade como de imersão em NaOH a 38°C. Hobbs (1988) comenta que, dependendo do nível de expansão, a velocidade de ultra-som pode não ser sensível às alterações decorrentes da RAA. De qualquer forma, o ultra-som se mostrou sensível para o módulo de elasticidade nesta pesquisa.

5.2.12. Comportamento dos testemunhos após ensaios de expansão

Após a finalização dos ensaios de expansão nas condições E1, E2 e E3, todos testemunhos de concreto foram rompidos, sendo determinados também o módulo de elasticidade. Com o objetivo de fazer uma correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade determinados nos testemunhos, avaliando o modelo para o módulo apresentado na NBR 6118 ($E_{ci} = 0,85.5,6. f_{ck}^{1/2}$), tem-se a Figura 121 apresentada a seguir.

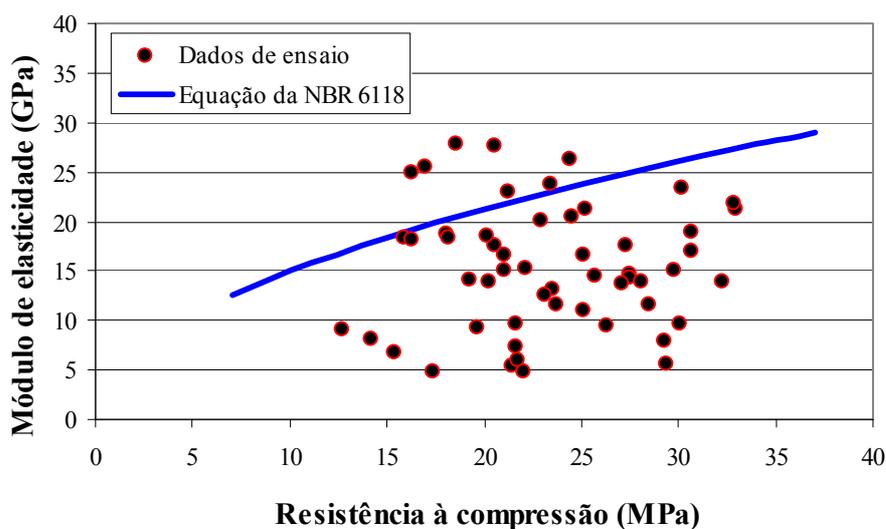


Figura 121: Comparação entre os resultados dos ensaios mecânicos e a curva da norma brasileira para os testemunhos extraídos.

Observa-se que os valores do módulo determinados apresentaram-se na faixa de 4,8 a 27,8 GPa (ver Apêndice I). Nota-se ainda que a maioria dos dados experimentais (87%) apresenta-se abaixo da curva apresentada pela norma para o módulo de elasticidade, indicando que não há proporcionalidade entre as duas propriedades avaliadas quando um concreto encontra-se afetado pela RAA. Se existisse proporcionalidade entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade no concreto deteriorado, tomando-se os dados extremos das resistências determinadas, o módulo de elasticidade deveria se apresentar na faixa de 17 a 27 GPa, segundo equação apresentada pela norma. À medida que o nível de degradação aumenta, mais afastados da curva da norma os pontos se encontram. Comportamento semelhante já foi observado por Hasparyk *et al.* (2004b) em testemunhos afetados pela RAA extraídos de outras estruturas de concreto em usinas hidrelétricas.

Interessante comentar que os únicos valores que se apresentaram acima da curva representam testemunhos de concreto pertencentes à classe 0, menos alterada (concreto extraído a jusante), e foram ensaiados logo após a extração ou após serem submetidos às condições E1 e E2. Esta classe, além de conter um menor teor alcalino (item 5.2.3.6), possui menor incidência de gel formado no seu interior (item 5.2.4.2). Sabe-se que a RAA pode provocar intensa microfissuração interna no concreto, sendo provavelmente a principal responsável pelo comportamento observado. As discussões relativas a este comportamento podem ser observadas no item 5.2.3.2.

Com o objetivo de correlacionar as propriedades mecânicas de resistência à compressão e de módulo de elasticidade com as expansões determinadas nas idades nas quais os testemunhos (pertencentes às classes C0, C1 e C2) foram retirados do ensaio de expansão, nas várias condições de exposição (E1, E2 e E3) em idades variando de 6 meses, 1 ano e 2 anos, tem-se as Figuras 122 e 123, a seguir.

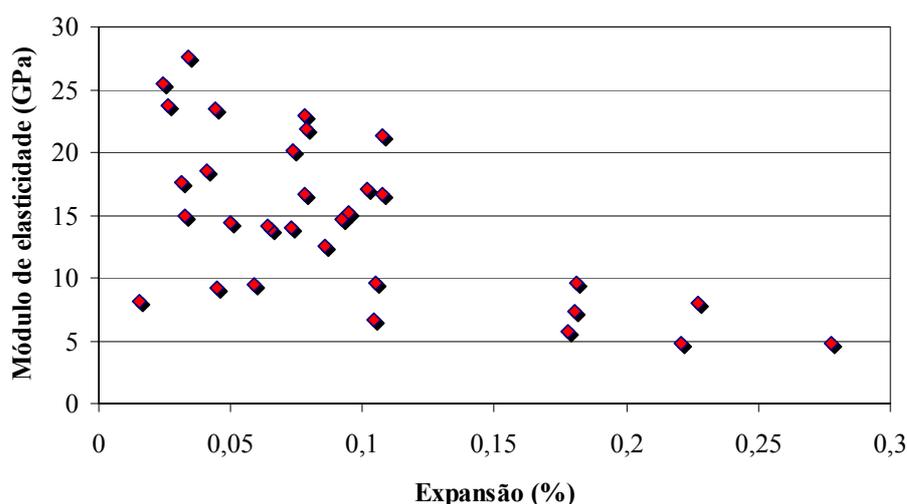


Figura 122: Comparação entre os resultados de expansão e o módulo de elasticidade.

Nota-se que à medida que as expansões ficam bastante elevadas, o módulo tende a cair, apesar de não existir uma correlação clara nas expansões mais baixas. O nível da microfissuração aumenta à medida que as expansões geradas pela RAA se processam, mostrando que o módulo é sensível a estas variações.

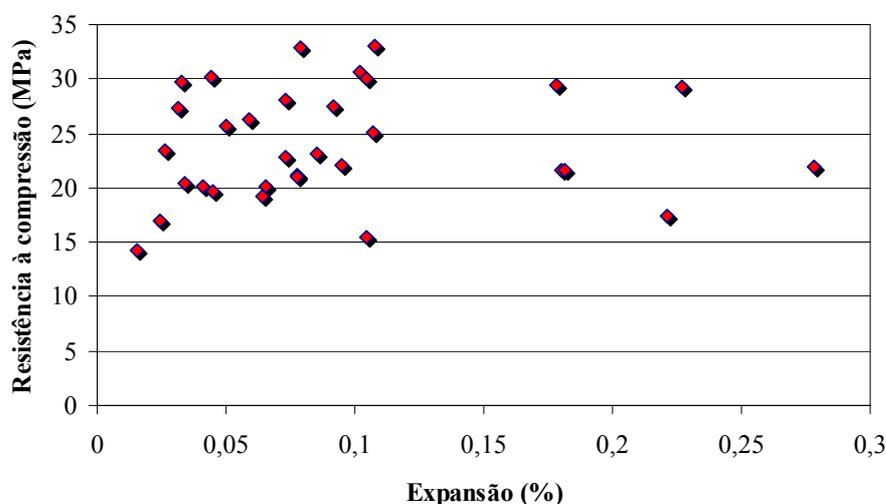


Figura 123: Comparação entre os resultados de expansão e a resistência à compressão.

Já para a resistência à compressão, não se nota nenhuma tendência à medida que as expansões aumentam, não havendo correlação entre esta propriedade e as expansões. Ao mesmo tempo em que está se processando a reação e ocorrendo expansões, ocorre o preenchimento de vazios com os produtos formados (refletindo em ganhos de resistência), porém a microfissuração pode ser aumentada (refletindo em queda de resistência); assim, os dois fenômenos ocorrendo simultaneamente podem promover uma compensação nesta propriedade.

5.2.13. Modelagem das propriedades mecânicas dos testemunhos

As propriedades mecânicas resistência à compressão e módulo de elasticidade foram analisadas com o objetivo de verificar o seu comportamento no tempo durante o ataque da RAA, de forma a terem seus dados ajustados matematicamente. Sendo assim, todos os resultados destas propriedades determinadas, tanto nos testemunhos extraídos e ensaiados imediatamente após extração (pertencentes às classes 0, 1 e 2), como os testemunhos ensaiados na expansão e pertencentes às mesmas classes, porém em idades e ambientes de exposição distintos (E1, E2 e E3), conforme planejamento dos experimentos apresentado, foram contemplados neste item.

A partir dos resultados obtidos para todas as amostras mencionadas, estimou-se um tempo equivalente à idade que o concreto teria nas condições de deterioração na qual se encontrava. Para definição do tempo equivalente, considerou-se como ponto de partida a idade da barragem hoje, igual a 44 anos, representada pelo concreto da classe 0, sendo contemplada nesta etapa como uma “referência” e os demais tempos equivalentes determinados em função do nível de deterioração (C1 e C2), dos ambientes expostos (E1, E2 e E3) e dos comportamentos das propriedades analisadas dos testemunhos em relação à referência. Assim, os tempos equivalentes foram determinados a partir da aplicação de pesos em função destes comportamentos observados (Apêndice I).

Inicialmente foram feitas várias tentativas de ajuste dos dados para a resistência à compressão e, com base no comportamento desta propriedade analisada, chegou-se ao seguinte modelo que o melhor representa:

$$Y = \exp (a + b/x + c \cdot \ln(x)) \quad (12)$$

Para o módulo de elasticidade, após várias tentativas e com base no comportamento da resistência à compressão verificado, o melhor ajuste observado tanto do ponto de vista matemático como do ponto de vista técnico representou a mesma equação da resistência à compressão, mudando apenas os parâmetros a, b e c.

Na definição dos ajustes, foram também levados em consideração os desvios dos resíduos obtidos, que representam as dispersões dos dados em relação à curva ajustada, auxiliando na avaliação do desempenho da equação utilizada, além do comportamento visual dos dados frente ao ajuste. Os parâmetros relativos a cada propriedade encontram-se apresentados na Tabela 40.

Tabela 40: Modelos utilizados no comportamento das propriedades mecânicas.

Propriedade	Equação ajustada	S
Resistência à compressão Rc	$Rc = \exp (41,26 - 444,02/t - 7,45 \cdot \ln(t))$	2,34
Módulo de elasticidade E	$E = \exp (5,87 + 12,35/t - 0,84 \cdot \ln(t))$	2,85

Rc=resistência à compressão (MPa); E=módulo de elasticidade (GPa); t=tempo (dia); S=desvio dos resíduos.

Nas Figuras 124 e 125 observa-se, graficamente, o comportamento dos dados de ensaio para a resistência à compressão e módulo de elasticidade, respectivamente.

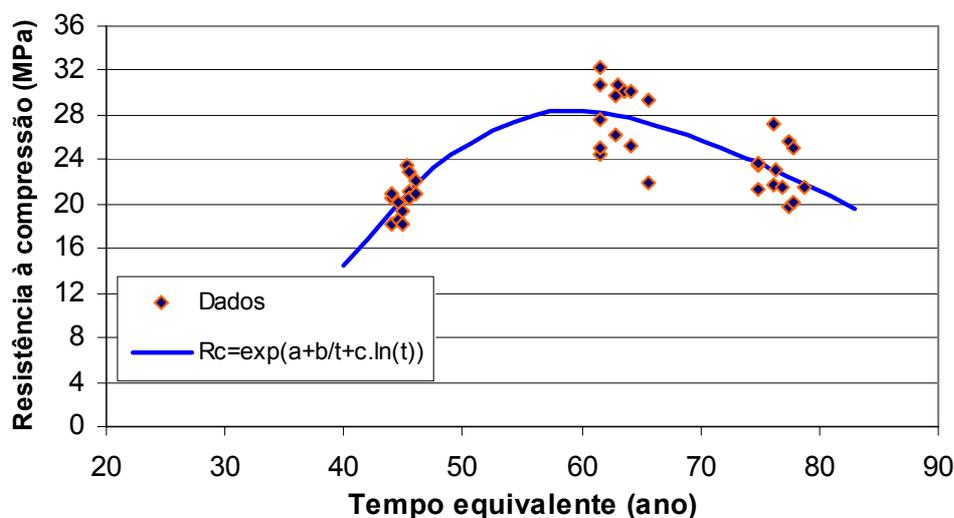


Figura 124: Modelo referente à resistência à compressão e resultados de ensaio.

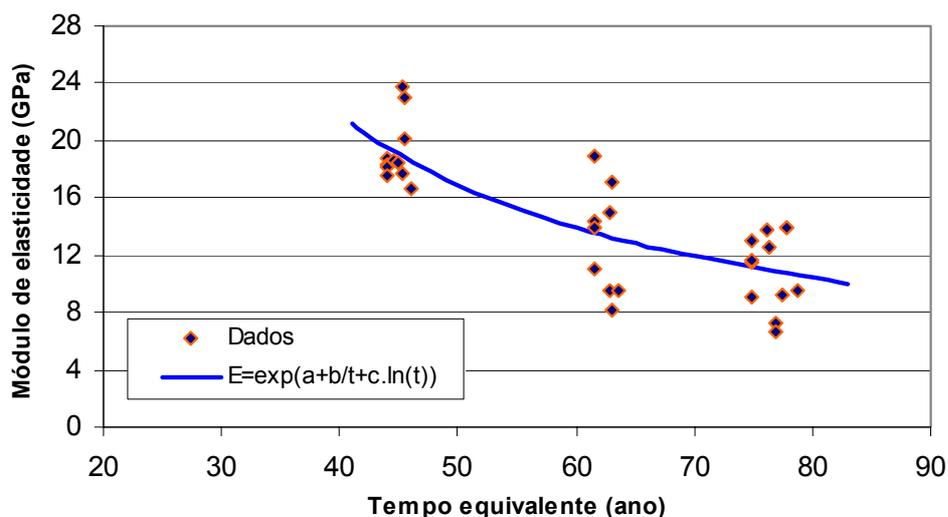


Figura 125: Modelo referente ao módulo de elasticidade e resultados de ensaio.

Em termos de comportamento, nota-se claramente que o módulo cai desde o princípio, e ao longo do período analisado, de forma exponencial à medida que o concreto vai se deteriorando pela RAA. Já a resistência mostra, em um primeiro estágio, um comportamento diferenciado, crescendo no tempo à medida que o concreto se deteriora; porém, em idades mais avançadas, a tendência é que ocorra queda no seu valor, conforme dados apresentados e ajuste definido.

Analisando individualmente o módulo de elasticidade com base no ajuste definido na faixa do tempo equivalente estipulado a partir dos dados de ensaio (de 44 anos até cerca de 79 anos), verifica-se uma queda da ordem de 46% no seu valor em 35 anos de deterioração no concreto pela RAA (pelo ajuste variando na ordem de 20 GPa a 11 GPa). Já para a resistência à compressão, e para este mesmo período, verifica-se um ganho total de aproximadamente 12%, ou seja, as resistências na idade final analisada ainda mantêm-se superiores à resistência referente à idade inicial analisada, 44 anos (inicia em cerca de 19 MPa e chega a 22 MPa). Porém deve-se destacar que em um primeiro estágio (\cong 16 anos) a resistência à compressão cresce bastante (entre 44 anos e 60 anos), representando cerca de 46% de aumento no seu valor (saindo com cerca de 19 MPa e chegando a 28 MPa) enquanto, possivelmente, os produtos da RAA conseguem se depositar nos vazios sem gerar grandes tensões de tração e, conseqüentemente, fissurações. Entretanto, a partir deste ponto máximo (Figura 124), verifica-se uma queda desta propriedade (entre 60 e 79 anos) chegando a uma redução da ordem de 24% em 19 anos (iniciando em 28 MPa até chegar a 22 MPa).

Adicionalmente, para uma mesma faixa de tempo (de 44 anos a 60 anos), neste caso então em 16 anos, a resistência cresce (46%) e o módulo cai (28%), passando de 19 GPa a 14 GPa. Como visto anteriormente, em idades mais avançadas, de 60 anos até cerca de 79 anos (19 anos), a resistência e o módulo caem na mesma magnitude em 24%, sendo o módulo de 14 a 11 GPa, mostrando que a partir deste estágio existe uma semelhança no comportamento das duas propriedades.

Os modelos permitiram comprovar o comportamento das propriedades analisadas. O efeito maior da queda do módulo de elasticidade já foi discutido anteriormente (item 5.2.3.2), sendo confirmado pelo ajuste apresentado. Acredita-se que as microfissurações que surgem na pasta e também próximas às zonas de transição com o agregado, uma vez que os produtos gerados se formam principalmente nesta região, como observado pelas inspeções visuais e por MEV, possam estar afetando a capacidade do agregado de impedir as deformações do concreto, refletindo assim em menor módulo de elasticidade.

No que diz respeito à resistência à compressão, também, já discutido no item 5.2.3.1, o modelo proposto representa bem o comportamento observado. Os dados apresentados na literatura indicam, na maioria das vezes, queda no valor da resistência; entretanto nem sempre se tem disponível uma referência para comparação, ou quando é apresentada, se trata de resistência de projeto. Observa-se pelos dados analisados na presente pesquisa que, dependendo do nível de deterioração e da idade em que a propriedade é avaliada, o comportamento pode ser completamente diferente. Portanto, quando se avalia uma idade muito jovem como referência para uma idade bem mais avançada, pode-se concluir que a propriedade não foi afetada, o que pode nem sempre ser verdade.

Portanto, com base nos resultados e na literatura, pode-se inferir que o módulo de elasticidade é o primeiro a ser afetado negativamente. Posteriormente, o fenômeno afeta a resistência à compressão, quando o concreto se encontra com a RAA instalada, e seus comportamentos se apresentam bastante diferentes dentro de uma faixa inicial de tempo, se aproximando em idades mais avançadas. De qualquer forma, os modelos aqui apresentados foram feitos com as informações e dados que se dispunha durante a pesquisa, sendo necessária a realização de um número maior de ensaios de forma a reduzir as variações encontradas e validar ou aperfeiçoar os modelos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA INVESTIGAÇÃO DO AGREGADO QUARTZITO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados dos estudos desenvolvidos com o agregado quartzito. Estes estudos visaram buscar um melhor entendimento do comportamento do agregado, empregado nos concretos que se encontram deteriorados da barragem, para explicar a reatividade observada nos testemunhos de concreto extraídos, com o objetivo de se ter parâmetros de laboratório.

6.1. ESTUDO MINERALÓGICO DO AGREGADO

O quartzito é uma rocha de natureza metamórfica, apresentando-se com coloração creme acinzentado e com estrutura foliada no exame macroscópico. Através das investigações microscópicas, por microscopia ótica por luz transmitida, a composição mineralógica estimada foi:

Quartzo: 90 %; muscovita: 5 % a 10 %; minerais opacos: < 5 %.

A rocha possui granulação fina, textura granoblástica e nítida foliação metamórfica, definida pela orientação preferencial dos cristais alongados (laminares) de muscovita e dos cristais estirados de quartzo tensionados e com contatos suturados. A muscovita ocorre sob a forma de pequenas palhetas orientadas entre os cristais de quartzo.

Os cristais de quartzo ocorrem sob a forma de cristais com dimensões reduzidas (em média 0,10 mm), apresentando freqüente extinção ondulante em face da deformação tectônica intensa sofrida pela rocha, porém não foi possível a sua medição em função dos cristais não apresentarem faces bem definidas, sendo assim não há como ter medidas exatas deste ângulo. Os minerais opacos ocorrem disseminados por toda a rocha, a maioria associados às micas.

A composição mineralógica e as feições texturais presentes são indicativas de uma rocha derivada do metamorfismo sobre sedimentos arenosos. A Figura 126 apresenta os principais minerais constituintes do quartzito em estudo, observados originalmente a um aumento de 40x.

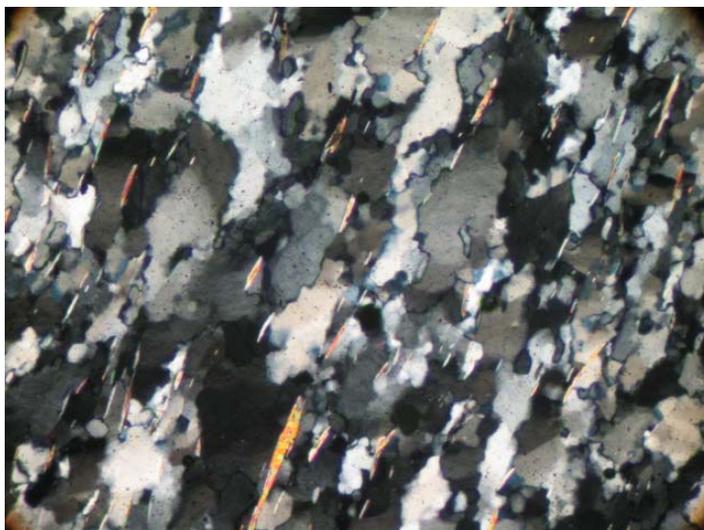


Figura 126: Detalhe do agregado quartzito exibindo grãos de quartzo estirados, suturados e com extinção ondulante, e finas palhetas de muscovita (coloridas) orientadas entre os grãos de quartzo. Imagem ao microscópio ótico, polarizador cruzado.

Na análise dos opacos por microscopia ótica de luz refletida foram realizadas 3 seções polidas, sendo identificados os seguintes minerais: pirita (sulfeto de ferro), hematita (óxido de ferro) e limonita (hidróxido de ferro). A pirita ocorre preferencialmente com formatos subhédricos, com alteração nas bordas para limonita, porém apenas alguns cristais foram observados na amostra analisada, representando cerca de 0,3% em massa. A Figura 127 registra os minerais opacos identificados.

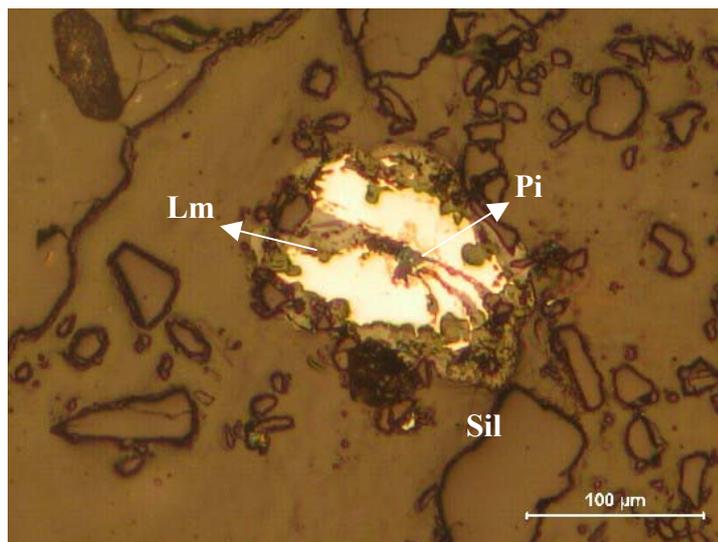


Figura 127: Fotomicrografia do quartzito mostrando apenas um grão de pirita (Pi) com hábito subhédrico alterando-se para limonita (Lm) nas bordas e com microfratura no centro em meio aos silicatos (Sil).

A partir das análises por microscopia ótica nota-se grande semelhança entre o quartzito analisado e empregado nesta etapa do estudo na investigação das expansões e propriedades dos concretos e os agregados constituintes dos testemunhos de concreto extraídos da UHE de Furnas. Portanto, o agregado quartzito utilizado pode retratar a rocha utilizada na execução dos concretos empregados nas estruturas de concreto da UHE Furnas.

A partir do estudo mineralógico do quartzito, tem-se como constituinte reativo do ponto de vista da reação álcali-silica o quartzo tensionado (KIHARA, 1986; HOBBS, 1988; ANDERSEN & THAULOW, 1989; SHAYAN, 1993; RODRIGUES, KIHARA & SBRIGHI, 1997; VIEIRA & OLIVEIRA, 1997; HASPARYK, 1999). A presença freqüente dos grãos de quartzo deformados e estirados indica deformação da rocha, sendo o estiramento resultante de processos de deformação, principalmente devido ao cisalhamento ocorrido na rocha (VIEIRA & OLIVEIRA, 1997). Adicionalmente, as dimensões reduzidas dos cristais de quartzo intensificam a sua reatividade, conforme já demonstrado por outros pesquisadores. (VIEIRA & OLIVEIRA, 1997; RODRIGUES, KIHARA & SBRIGHI, 1997).

É importante comentar quanto às limitações do parâmetro ângulo de extinção ondulante do quartzo na definição do grau de deformação da rocha. Sabe-se que quando uma rocha foi submetida a grandes deformações quando do seu metamorfismo, o ângulo de extinção ondulante pode desaparecer, fornecendo resultados falsos quanto à sua medida. Outra metodologia, como a análise de textura da rocha, consegue correlacionar a sua deformação.

Através desta metodologia, pode-se verificar diferentes graus de deformação em rochas bastante semelhantes, sendo o desenvolvimento da orientação preferencial da mica, responsável pela foliação da rocha, o principal fator relacionado à sua reatividade. (MONTEIRO *et al.*, 2001).

No que diz respeito aos opacos sabe-se que os minerais sulfetados, quando presentes na rocha e dependendo da intensidade e condições de exposição, ao oxidarem podem se tornar uma fonte interna de íons sulfato e atacar o concreto (HASPARYK *et al.*, 2005). Na amostra de quartzito analisada foram observados alguns cristais de pirita, porém em baixa quantidade. Como este tipo de ataque não é foco da presente pesquisa, a análise foi feita com o objetivo apenas de indicar a sua presença, sendo que uma análise mais apurada quanto à possível deterioração do concreto pelos sulfetos será feita oportunamente.

6.2. ENSAIO DE EXPANSÃO PELO MÉTODO ACELERADO

A Figura 128 apresenta o comportamento expansivo das barras de argamassa preparadas com o quartzito ao longo do tempo, até a idade de ensaio de 60 dias, a partir da metodologia de ensaio apresentada pela ASTM C-1260. Na Tabela 41 encontram-se apresentados os resultados individuais de expansão das 3 barras de argamassa (BA1, BA2 e BA3) bem como o valor médio (BAm) obtido para as idades de 16, 30 e 60 dias. Os resultados individuais ao longo do tempo encontram-se apresentados no Apêndice D.

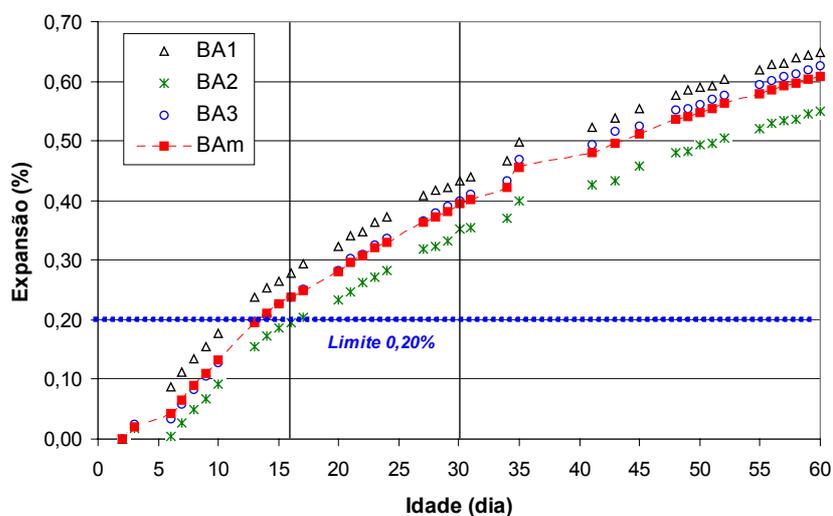


Figura 128: Comportamento expansivo do agregado quartzito através do método acelerado.

Tabela 41: Expansões (%) obtidas para o quartzito, método acelerado.

Idade (dia)	BA1	BA2	BA3	BAm
16	0,28	0,20	0,24	0,24
30	0,43	0,35	0,40	0,39
60	0,65	0,55	0,63	0,61

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que as expansões na presença do quartzito suplantam o limite de 0,20% apresentado pela ASTM C-1260 já na idade de 13 dias para duas das barras estudadas. Aos 30 dias de ensaio, as expansões apresentaram-se bastante elevadas, em média igual a 0,39%. Interessante observar que, aos 60 dias de ensaio, as expansões não cessaram, alcançando elevados valores e mostrando a continuidade da reação com a presença de quarto deformado ainda disponível para reagir. Este crescimento entre a idade de 30 e 60 dias foi bastante marcante. Desta forma, define-se para o quartzito um comportamento deletério, mostrando a sua reatividade na presença do cimento com alto teor de álcalis estudado.

Apesar do quartzito estudado na presente pesquisa ter se apresentado reativo já aos 16 dias, é importante comentar sobre os estudos realizados por Silveira *et al.* (2002), que mostram os cuidados que devem ser tomados com agregados lentamente reativos, sugerindo a avaliação das expansões no ensaio acelerado em idades mais avançadas, como aos 45 dias ou até mesmo aos 60 dias, dependendo do tipo de agregado.

Assim, ressalta-se a importância de estudar cada agregado individualmente, de várias procedências, em combinação com o cimento a ser utilizado na obra, pois podem ser notadas diferenças nas expansões ou no comportamento entre agregados de mineralogias bastante semelhantes, como por exemplo, o quartzito estudado por Hasparyk (1999). Na pesquisa mencionada, apesar do quartzito apresentar valores semelhantes de expansão aos 16 dias (igual a 0,26%), aos 30 dias as expansões giraram em torno de 0,53%, mostrando maior reatividade quando comparado com o quartzito aqui apresentado na idade de 30 dias.

6.3. ENSAIO DE EXPANSÃO PELO MÉTODO DOS PRISMAS DE CONCRETO

As Figuras 129 e 130 apresentam o comportamento expansivo dos prismas de concreto de referência e tratados com lítio, ao longo do ensaio até a idade de um ano, a partir da metodologia de ensaio apresentada pela ASTM C-1293. Os resultados individuais ao longo do tempo encontram-se apresentados no Apêndice D.

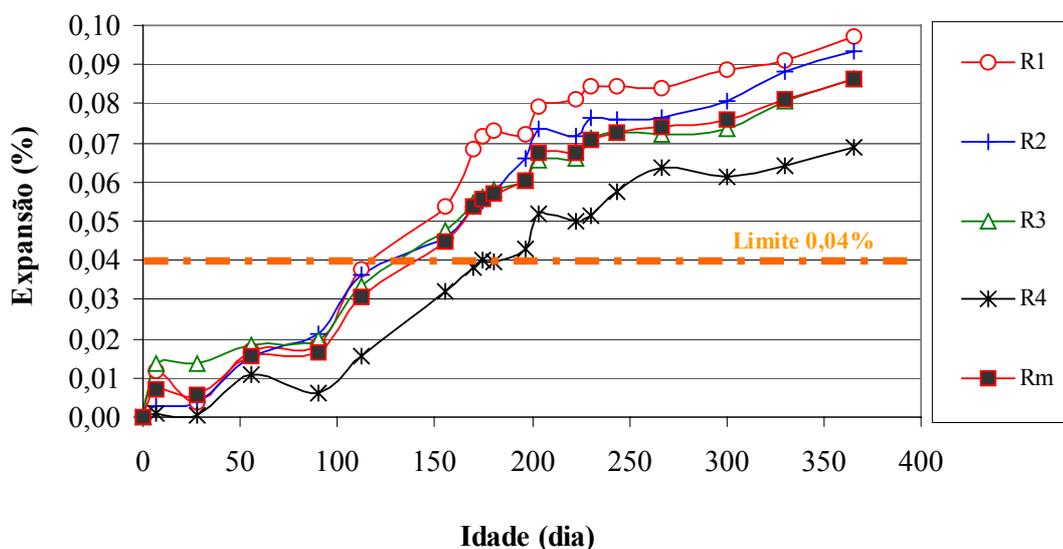


Figura 129: Comportamento expansivo dos prismas de concreto de referência.

Os resultados de expansão obtidos nas amostras de referência suplantam o limite de 0,04% apresentado pela ASTM C-1293 já na idade de 155 dias, para a maioria dos prismas ensaiados. Aos 365 dias de ensaio, as expansões apresentaram-se bastante elevadas, em média igual a 0,09%. O comportamento expansivo observado nesta etapa é sempre ascendente, ou seja, as expansões não cessaram em nenhuma das idades analisadas, mostrando o potencial do agregado ainda para reagir enquanto possuir álcalis disponíveis na solução dos poros do concreto.

Em estudos realizados através da ASTM C-1293, Batic, Giaccio & Zerbino (2004) verificaram ganhos mais expressivos nas primeiras semanas, ocorrendo tendência de estabilização após 150 dias de ensaio na presença de agregado contendo também quartzo reativo. Este comportamento não foi observado na presente pesquisa.

Com base nos resultados desta pesquisa, define-se para o quartzito um comportamento deletério a partir do método dos prismas de concreto, mostrando e confirmando a sua reatividade na presença do cimento com alto teor de álcalis estudado. De qualquer forma, deve-se comentar que existe dispersão dos resultados observada entre os 4 prismas de concreto ensaiados, porém as constatações feitas dizem respeito principalmente aos comportamentos expansivos.

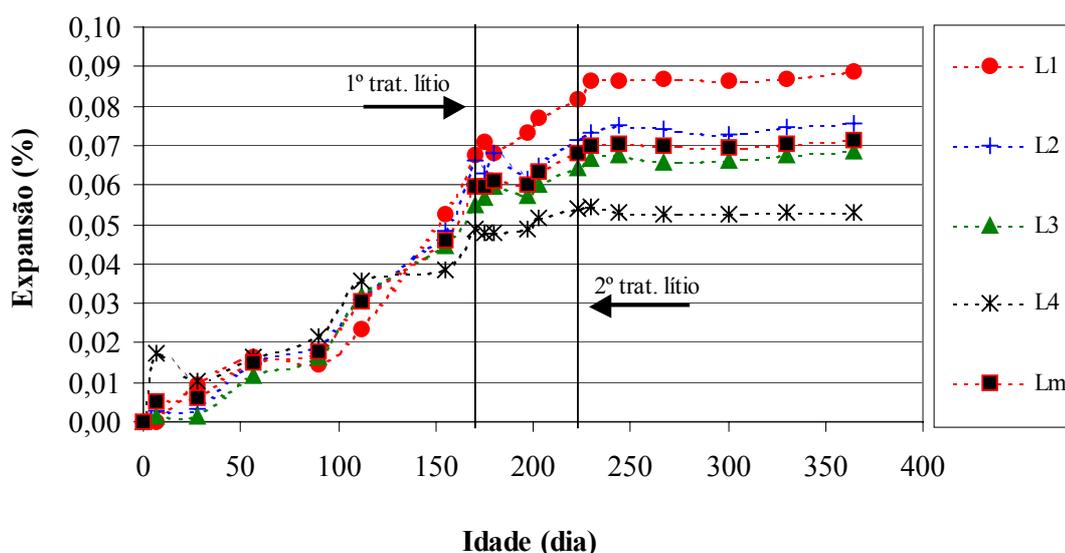


Figura 130: Comportamento expansivo dos prismas de concreto tratados com lítio.

Em relação aos prismas que foram submetidos ao tratamento, tem-se que o primeiro tratamento com produto a base de lítio foi realizado após a idade na qual as expansões suplantaram o limite de 0,04% (aos 155 dias) da norma ASTM C-1293, sendo então adotada esta idade e o tratamento estendendo-se por 7 dias (5 dias secando e 2 dias em imersão na solução de lítio). Um segundo tratamento foi necessário e ocorreu posteriormente uma vez que os prismas ensaiados apresentaram ainda algum crescimento das expansões dentro de cerca de 50 dias após este primeiro tratamento, conforme pode se observar na Figura 130. Sendo assim, a idade do segundo tratamento iniciou aos 203 dias aumentando-se os tempos do tratamento (7 dias secando e 5 dias em imersão na solução de lítio) com o objetivo de promover uma melhor eficiência e penetração dos íons lítio na solução dos poros.

Analisando as expansões dos prismas de concreto que foram submetidos ao tratamento com o lítio, verifica-se que após o primeiro tratamento houve uma redução no crescimento das

expansões, porém ainda ocorre crescimento. A expansão média logo após este tratamento foi de 0,059% (170 dias) e antes do segundo tratamento de 0,063% (203 dias). Quando ocorreu o segundo tratamento a expansão média já se encontrava em 0,068%, atingindo 0,072% aos 365 dias. Observa-se graficamente (Figura 130), após os tratamentos, uma tendência assintótica das expansões mostrando um retardo no seu valor. Da mesma forma que para as amostras de referência, também foi observada dispersão dos resultados entre os 4 prismas de concreto ensaiados.

Na Tabela 42 encontram-se apresentados, para a idade de 365 dias, os resultados individuais de expansão obtidos a partir dos 4 prismas de concreto e o valor médio calculado.

Tabela 42: Expansões (%) obtidas pelo método dos prismas de concreto aos 365 dias.

Amostra	1	2	3	4	Média
Referência -R	0,10	0,09	0,09	0,07	0,09
Tratado c/ lítio - L	0,09	0,08	0,07	0,05	0,07

Na Figura 131 podem-se notar as diferenças entre os comportamentos das expansões médias calculadas a partir das amostras de referência e tratadas com lítio.

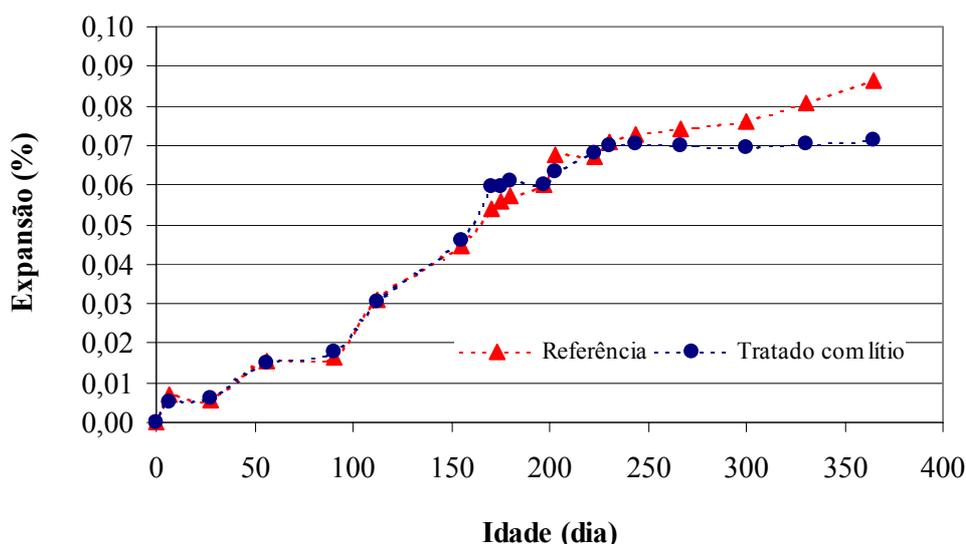


Figura 131: Comparação entre o comportamento médio da expansão a partir das amostras de referência e tratadas com lítio.

Após o primeiro tratamento, ainda não são observadas diferenças (170 dias), porém um certo período após o segundo tratamento (244 dias) as curvas começam a se afastar, mostrando comportamento assintótico para as amostras tratadas com lítio e crescimento acentuado para as amostras de referência. As expansões médias verificadas aos 365 dias foram iguais a 0,086% e 0,072%, para as amostras de referência e tratadas com lítio, respectivamente. De qualquer forma, nota-se nesta etapa de estudo o efeito benéfico do lítio na redução das expansões da RAA.

Fazendo uma análise de variâncias das expansões entre a condição de referência e a tratada com lítio com as 8 amostras ensaiadas, por idade, a partir de 267 dias até 365 dias (ver Apêndice D), não se observam diferenças significativas entre as amostras analisadas. Apenas nota-se uma tendência de aumento no valor de F calculado, sugerindo uma possível aproximação do valor de $F_{0,05}$. Este comportamento pode estar relacionado com o afastamento, no tempo, das expansões nas duas condições analisadas, conforme comentado anteriormente, e a possibilidade das diferenças se tornarem expressivas em uma idade mais avançada.

Em virtude das diferenças nas expansões terem ocorrido apenas em idades bastante elevadas e serem pequenas ainda, uma análise mais apurada seria oportuna, em uma idade um pouco mais avançada, com o objetivo de delinear melhor os dois comportamentos e verificar se existirão realmente diferenças significativas para se tirar conclusões mais aprofundadas. Sendo assim, ficou definido que os ensaios terão continuidade até 2 anos de idade e não poderão compor a presente tese.

Adicionalmente, durante o ensaio de expansão, os prismas de concreto eram inspecionados visualmente com o objetivo de verificar o surgimento de sintomas de deterioração da RAA. Sendo assim, aos 4 meses já se notava alguma manifestação decorrente da reação, começando a surgir manchamento escuro e alguns pontos brancos na superfície da maioria das amostras (Figura 120), reforçando que neste momento ainda não havia ocorrido o tratamento dos concretos. Ao longo do tempo estas características foram ficando mais intensas, sendo observado comportamento visual diferenciado das amostras de referência e tratadas com lítio. As eflorescências brancas se espalharam totalmente nas superfícies de todos os prismas de concreto de referência com intenso manchamento, porém, nas amostras tratadas a intensidade era bem menor. As fotografias apresentadas nas Figuras 132 a 136 registram as principais características observadas.



Figura 132: Vista geral dos prismas de concreto aos 4 meses apresentando algumas manchas escuras e precipitado branco aos 4 meses.



Figura 133: Vista geral dos prismas de concreto de referência com espalhamento de eflorescências brancas na superfície - 12 meses.



Figura 134: Detalhe mais ampliado de um dos prismas mostrando a abrangência dos sintomas na amostra de referência aos 12 meses.



Figura 135: Vista geral dos prismas de concreto tratados com lítio aos 12 meses indicando uma menor deterioração visual.



Figura 136: Detalhe mais ampliado mostrando algum manchamento e pontos brancos, quase imperceptíveis, espalhados no concreto tratado com lítio - 12 meses.

O efeito benéfico do lítio nas expansões já vem sendo avaliado por alguns pesquisadores, sendo vários os tipos de compostos a base de lítio sugeridos na inibição da RAA. O composto nitrato de lítio é o que tem sido mais recomendado atualmente em função de apresentar boa eficiência e não aumentar o pH do concreto. Porém, recomenda-se a utilização de surfactantes na solução com o objetivo de melhorar a penetração dos íons (FOLLIARD, THOMAS & KURTIS, 2003). Thomas & Stokes (2004) atestam a eficiência do lítio na redução das expansões, entretanto, a partir dos resultados obtidos pelos pesquisadores em estudos em laboratório através da ASTM C-1293, recomendam que seja feita a impregnação a vácuo do lítio de forma a garantir um efeito mais satisfatório.

No caso de uma aplicação tópica fazendo-se o uso de spray, por exemplo, sabe-se que não se pode garantir uma boa penetração, mantendo superficial o tratamento, dependendo do tipo de concreto. Nesse sentido têm-se alguns estudos que indicam a aplicação tópica de soluções de lítio, após secagem das amostras, e uma posterior reaplicação para garantir a penetração e conseqüente eficiência (STARK *et al.*, 1993; STOKES, THOMAS & SHASHIPRAKASH, 2000; FOLLIARD, THOMAS & KURTIS, 2003; THOMAS & STOKES, 2004). Na presente pesquisa, foi necessário um tratamento repetido uma vez que não se verificou completa estabilização das expansões após o primeiro tratamento. Após o segundo tratamento, já se obteve uma melhora no comportamento expansivo ao comparar com a referência, porém as expansões apresentadas ainda se mostraram elevadas. Sendo assim, nota-se a importância da aplicação de um tratamento adequado e idade de intervenção bem analisada. Possivelmente a penetração dos íons de lítio no concreto estudado não foi satisfatória, mantendo-se mais superficial, em função da baixa permeabilidade observada nos concretos (ver item 6.7.4). Neste caso, outros métodos que poderiam melhorar a penetração dos íons e conseqüentemente a eficiência do tratamento seria a impregnação a vácuo ou por campo elétrico (WHITMORE & ABBOTT, 2000; FOLLIARD, THOMAS & KURTIS, 2003; FOURNIER *et al.*, 2005). A idade do concreto também pode ter sido muito avançada para a aplicação do tratamento, ou a idade de análise das expansões ainda ser prematura, conforme observado e comentado anteriormente.

Uma outra hipótese mencionada na literatura (DIAMOND, 1999), é que o lítio pode ser adsorvido nos produtos de hidratação do cimento, reduzindo a sua disponibilidade e conseqüente eficiência no combate às expansões, caso o teor empregado não seja adequado. Acredita-se também que a velocidade da RAA foi tão alta, em função da elevada reatividade

do quartzito, não dando tempo suficiente para o lítio agir a contento. De qualquer forma, a incidência de manifestações decorrentes da RAA na superfície dos concretos apresenta-se menor nos concretos tratados. Pode ser que o efeito do lítio nas expansões ocorra lentamente, mais em longo prazo, conforme tendência de estabilização das expansões observada aos 365 dias, quando comparada com a referência.

Ou seja, cada caso será uma condição diferente a ser analisada e dependerá de vários fatores como a reatividade do agregado, a condição de exposição, o composto a base de lítio utilizado, o tipo e duração do tratamento, entre outros, sendo perigoso afirmar condições genéricas ótimas, conforme visto neste capítulo. Sabe-se que o lítio pode reduzir as expansões, porém muitos estudos ainda deverão ser feitos para definição de condições de tratamento específicas para cada caso.

6.4. COMPARAÇÃO ENTRE EXPANSÕES OBTIDAS PELO MÉTODO ACELERADO E MÉTODO DOS PRISMAS DE CONCRETO

Com o objetivo de verificar a validade dos resultados de expansão e compatibilidade entre as normas de barras de argamassa, através do método acelerado da ASTM C-1260, e de prismas de concreto, através da ASTM C-1293, foram apresentados graficamente na Figura 137 os resultados individuais e médios nas idades de referência de 16 dias e 365 dias das duas normas, respectivamente.

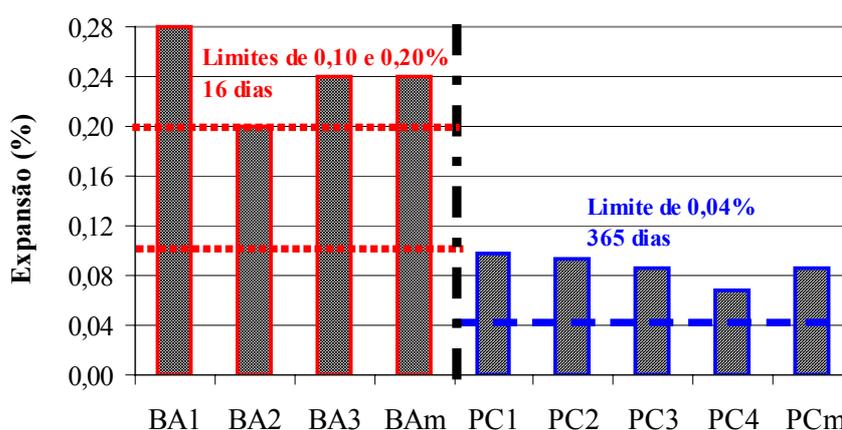


Figura 137: Comparação entre os resultados de expansão em barras de argamassa (BA) e prismas de concreto (PC).

Verifica-se que, para o quartzito ensaiado, os resultados são compatíveis entre as normas utilizadas. Das três amostras de argamassa (BA1 a BA3) ensaiadas no método acelerado,

todas suplantam o limite de 0,20% da ASTM C-1260 aos 16 dias. Porém, analisando o nível de expansão das argamassas em relação ao suposto limite de 0,10%, tem-se em média (A_m) cerca de 2,4 vezes este valor. Neste mesmo sentido, em relação às quatro amostras ensaiadas pelo método dos prismas de concreto (PC1 a PC4), todas também excedem o limite proposto pela norma ASTM C-1293 de 0,04% aos 365 dias, sendo em média superior ao limite em cerca de 2,5 vezes. Sendo assim, para o quartzito em estudo, as duas normas apresentam compatibilidade quanto aos seus resultados e limites propostos, ambas denotando comportamento potencialmente deletério. Porém, em termos de níveis de expansão em relação aos limites, os comportamentos são semelhantes quando se compara o limite de 0,10% aos 16 dias (ASTM C-1260) com o de 0,04% aos 365 dias (ASTM C-1293).

No que diz respeito ao crescimento das expansões no tempo, as duas normas de expansão também apresentam compatibilidade no seu comportamento, sem estabilização das expansões até a idade final de ensaio (Figuras 128 e 129).

6.5. ULTRA-SOM NA EXPANSÃO

As Figuras 138 e 139 apresentam o comportamento da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas dos prismas de concreto de referência e tratados com lítio, ao longo do ensaio de expansão, até a idade de um ano. Os resultados individuais ao longo do tempo encontram-se apresentados no Apêndice J.

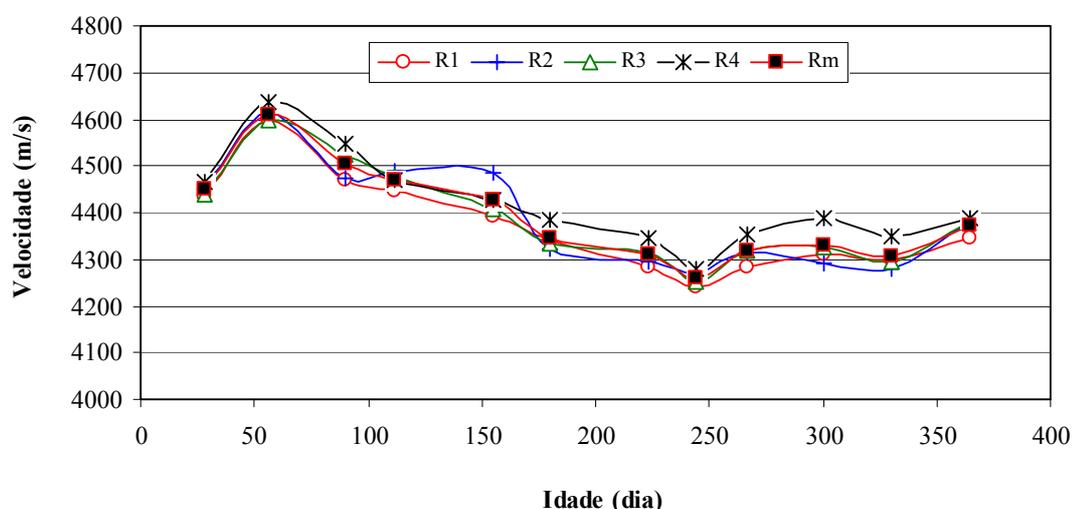


Figura 138: Comportamento da velocidade ultra-sônica dos prismas de concreto de referência ao longo do ensaio de expansão.

As velocidades determinadas nas amostras de referência ensaiadas na expansão caem ao longo do tempo, desde a idade de 56 dias até 244 dias, mantendo valores praticamente constantes entre 267 e 365 dias, apesar de ocorrer em um primeiro estágio um crescimento de 28 dias para 56 dias. A queda observada desde o ponto máximo até idade de 365 dias não é elevada (em média de 4611 m/s para 4374 m/s), porém o ensaio mostra a sensibilidade do ultra-som no acompanhamento das alterações intrínsecas do concreto quando da presença e desenvolvimento da RAA em laboratório. Segundo a ASTM C-597-02 esta metodologia pode ser aplicada para investigar a deterioração do concreto e o surgimento de fissuras, quando do seu monitoramento, e avaliar as alterações nas suas propriedades.

Estudos realizados por Swamy (1992) mostram comportamento bastante semelhante ao verificado na presente pesquisa. Verifica-se um certo ganho de velocidade nas primeiras idades, mas ao longo do tempo, o pesquisador também verifica queda expressiva na velocidade de várias amostras no ensaio de expansão contendo agregados reativos, seguido no final por estabilização; as idades de análise foram estendidas até 365 dias.

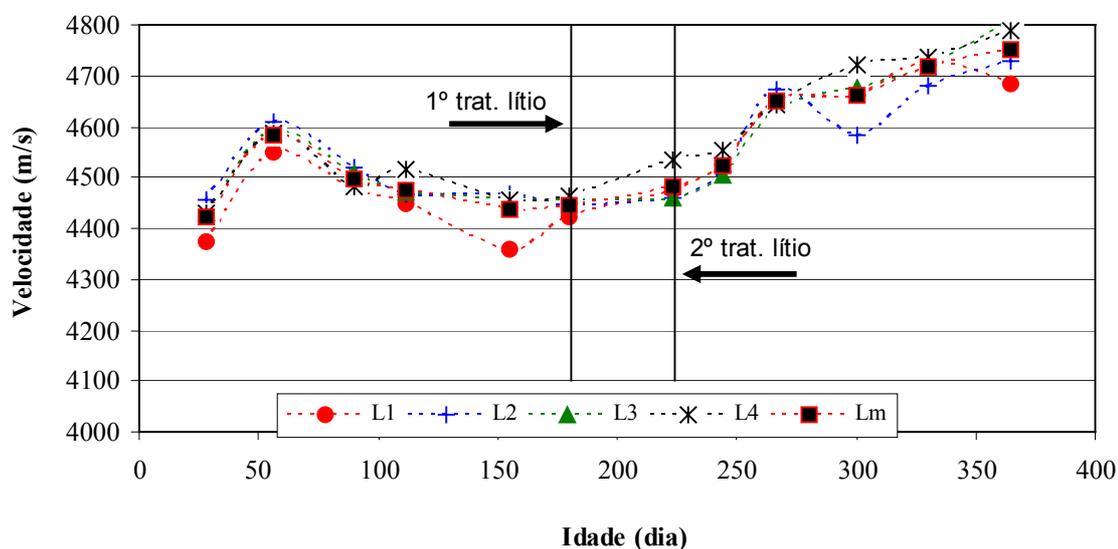


Figura 139: Comportamento da velocidade ultra-sônica dos prismas de concreto de referência ao longo do ensaio de expansão.

Em relação aos prismas que foram submetidos ao tratamento, não se observam quedas de velocidade após os tratamentos. As quedas ocorreram, porém no período que antecedeu o primeiro tratamento, de 56 dias até 155 dias (de forma idêntica às amostras de referência).

Entre o primeiro e o segundo tratamento, não se observam alterações importantes na velocidade determinada. Após o segundo tratamento, mas não imediatamente após, sendo passados aproximadamente 30 dias, as velocidades começam a crescer de forma intensa (de 244 a 365 dias), mostrando um efeito inverso ao ocorrido nas amostras de referência. Os valores médios obtidos para 244 e 365 dias foram 4525 e 4752 m/s, respectivamente. Sabe-se que o grau de saturação do concreto pode aumentar em até 5% a velocidade ultra-sônica (ASTM C-597-02), porém o crescimento observado nas amostras não ocorre imediatamente após a imersão em solução de lítio (em nenhum dos dois tratamentos realizados), mas posteriormente (após 30 dias da imersão). Este comportamento inesperado pode estar aliado às alterações intrínsecas ocorridas no concreto a partir do efeito positivo dos íons lítio na estrutura dos produtos formados, reduzindo assim as micro-fissurações e o grau de deterioração e, possivelmente densificando a matriz.

Na Figura 140 é possível observar as diferenças no comportamento das velocidades médias calculadas a partir das amostras de referência e tratadas com lítio. Após tratamento, a configuração gráfica é bastante diferente, possuindo a amostra de referência um comportamento descendente e a tratada com lítio ascendente, sendo aos 365 dias as velocidades médias iguais a 4374 m/s 4752 m/s, respectivamente.

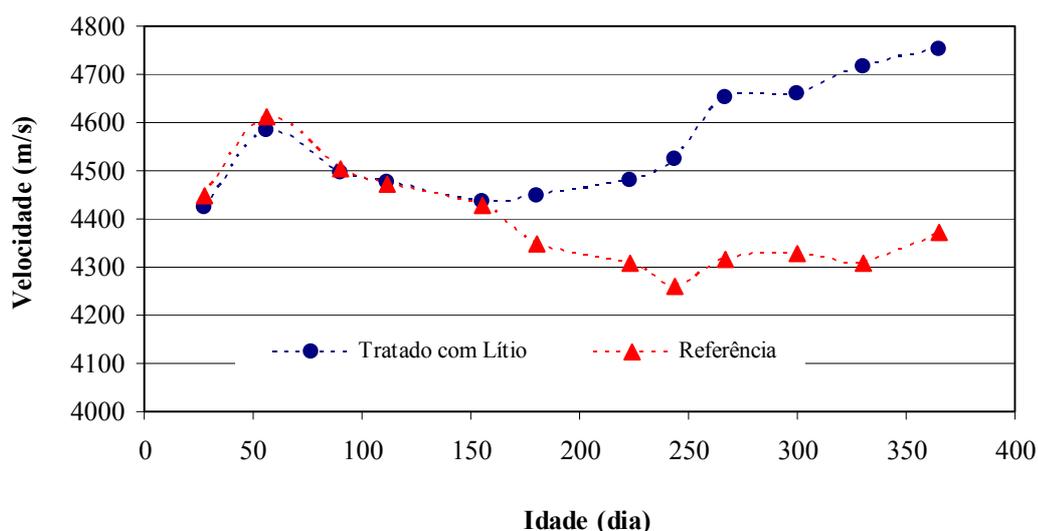


Figura 140: Correlação entre o comportamento médio da velocidade ultra-sônica a partir das amostras de referência e tratadas com lítio ao longo do ensaio de expansão.

A partir da análise de variâncias das velocidades ultra-sônicas, por idade, a partir de 267 dias até 365 dias (ver Apêndice D) entre a condição de referência e a tratada com lítio com as 8 amostras ensaiadas, se observaram diferenças significativas entre as duas condições testadas em todas as idades analisadas. Sendo assim, a velocidade de ondas ultra-sônicas se mostrou bem mais sensível do que as expansões na observação dos dois diferentes comportamentos observados.

6.6. CORRELAÇÃO ENTRE EXPANSÕES E A VELOCIDADE ULTRA-SÔNICA NOS PRISMAS DE CONCRETO

Na Figura 141 observa-se a variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras de referência.

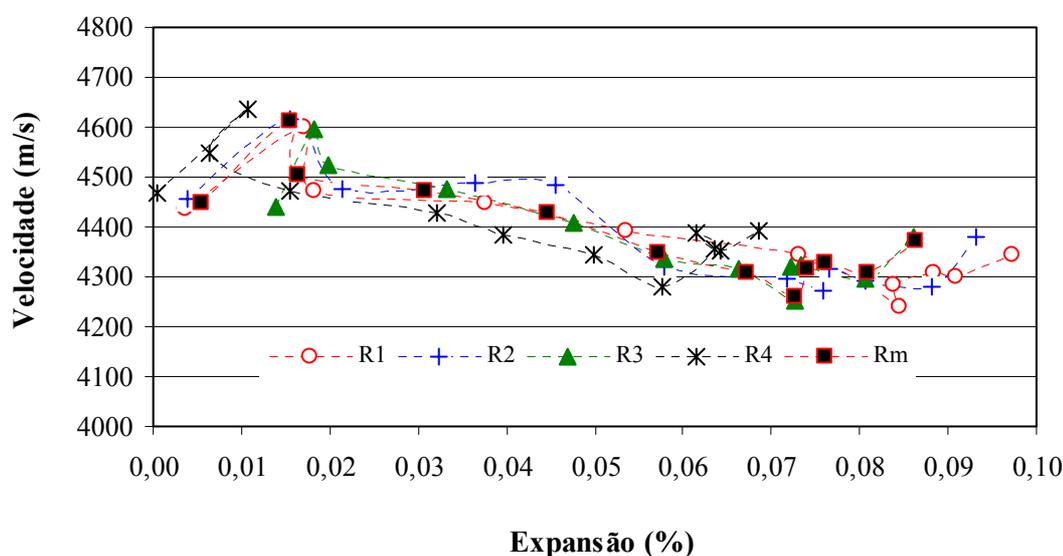


Figura 141: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras de referência.

A partir da Figura 141, verifica-se que existe uma correlação entre as velocidades determinadas e as expansões geradas, sendo que à medida que as expansões aumentam as velocidades caem para as amostras de referência analisadas. Swamy (1992), em seus estudos com ultra-som, também verificou este tipo de comportamento e correlação da velocidade e

expansão em concretos afetados pela RAA, mostrando a sensibilidade do método e indicando a sua utilização por se tratar de um ensaio não destrutivo, podendo acusar alterações nos concretos de forma antecipada às expansões ou outras propriedades.

Na Figura 142 observa-se a variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras tratadas com lítio.

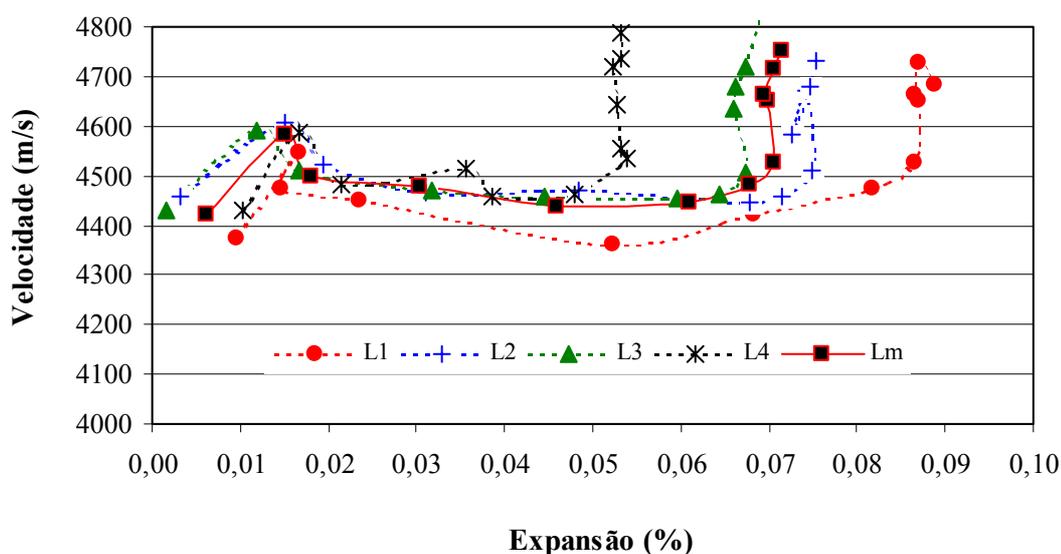


Figura 142: Variação da velocidade ultra-sônica com as expansões para as amostras tratadas com lítio.

Interessante observar que, após os tratamentos com lítio, as expansões tendem a estabilizar e a velocidade aumentar ao invés de cair, mostrando uma influência expressiva do lítio na velocidade ultra-sônica. Este comportamento foi observado para todas as amostras analisadas. Ou seja, quando ocorre estabilização das expansões a velocidade não estabiliza, indicando que estão ocorrendo alterações em nível microestrutural capazes de serem notadas apenas por ultra-som. Não foi encontrado nenhum dado da literatura relativo à correlação da velocidade de ultra-som e expansões da RAA, na presença de lítio. Portanto, este tipo de investigação deve ser mais aprofundado com o objetivo de esclarecer melhor o comportamento verificado.

A Figura 143 apresenta o comportamento médio da amostra de referência e tratada com lítio com o objetivo de se notar as diferenças obtidas.

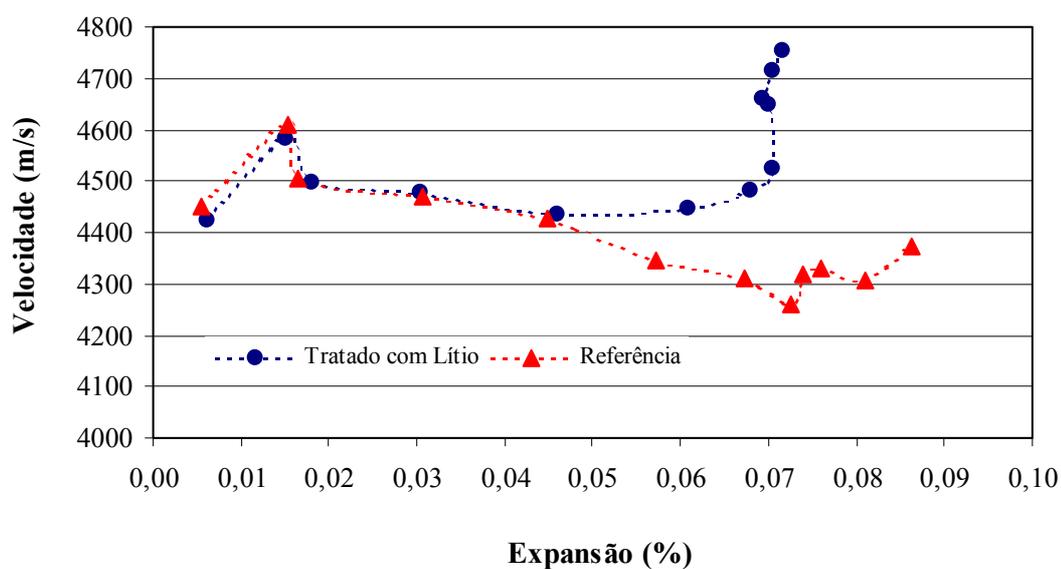


Figura 143: Correlação entre variação média da velocidade ultrassônica com as expansões para as amostras de referência e tratadas com lítio.

6.7. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS MOLDADOS

6.7.1. Resistência à compressão

Na Tabela 43 estão apresentados os resultados da resistência à compressão determinada nos corpos-de-prova mantidos em câmara úmida e nos estocados em ambiente com elevada umidade a 38°C. Na Figura 144 estão apresentados graficamente os resultados médios obtidos no tempo.

Tabela 43: Resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova.

Idade (dia) =>	28	90	180	365
C.U. =>CP's mantidos em câmara úmida				
CP1	31,40	31,10	35,90	38,90
CP2	31,70	31,40	35,40	32,80
CP3	32,60	32,00	37,20	38,30
Média (MPa)	31,90	31,50	36,17	36,67
Desvio Padrão (MPa)	0,62	0,46	0,93	3,36
38G =>CP's mantidos em elevada umidade a 38°C				
CP1	28,30	33,90	29,00	35,70
CP2	30,50	28,80	29,70	37,90
CP3	31,10	29,50	31,00	34,10
Média (MPa)	29,97	30,73	29,90	35,90
Desvio Padrão (MPa)	1,47	2,76	1,01	1,91

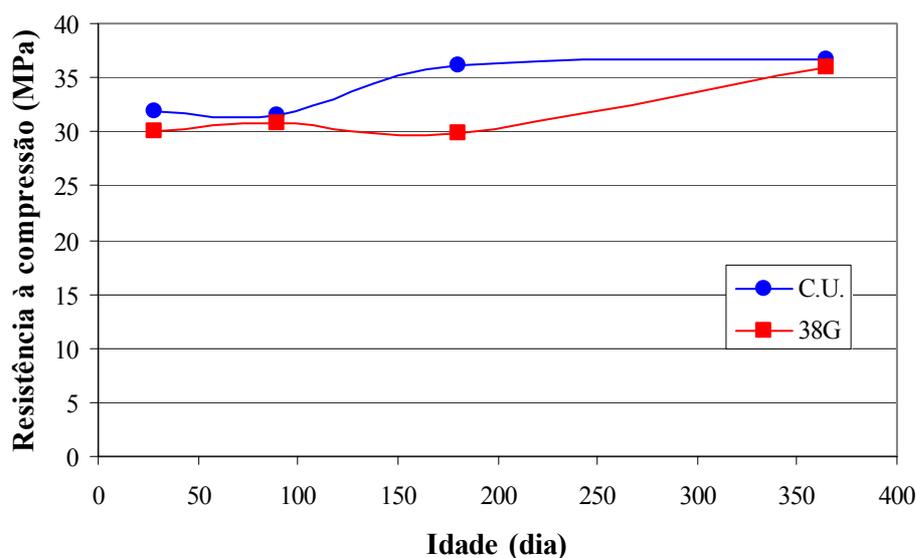


Figura 144: Resistência à compressão média dos corpos-de-prova ao longo do tempo.

A partir da Figura 144, verifica-se que praticamente não existem diferenças dos dois ambientes estudados (câmara úmida e ambiente de elevada umidade a 38°C) nas resistências determinadas nas idades de 28, 90 e 365 dias, com exceção da idade de 180 dias. O crescimento da resistência à compressão na câmara úmida ocorre de 90 a 180 dias, estabilizando a partir desta data. Já a 38°C, um comportamento atípico ocorreu, onde não se nota crescimento entre as idades de 90 e 180 dias, porém se observa um crescimento em

idades mais avançadas, entre 180 e 365 dias na mesma ordem de magnitude da C.U., entre 90 e 365 dias. Talvez o ambiente de 38°C aliado ao desenvolvimento mais intenso da RAA internamente, fato este comprovado pelo grande incremento das expansões até esta idade (item 6.3), tenha influenciado neste comportamento diferenciado, não permitindo um desenvolvimento natural da resistência até os 180 dias. O crescimento da resistência só foi verificado em idades mais avançadas (um ano), provavelmente devido à formação dos produtos da reação, e não à taxa de crescimento natural da resistência. Este comportamento foi verificado nos testemunhos de concreto ensaiados, ao se comparar os diferentes níveis de deterioração, nas classes 0, 1 e 2 (item 5.2.3.1).

Com o objetivo de avaliar estatisticamente as diferenças observadas na resistência à compressão, foi realizada uma análise de variâncias (Tabela 44). A partir dos resultados, verifica-se que o ambiente (câmara úmida ou elevada umidade) e a idade apresentaram a mesma influência, sendo significativas as diferenças observadas. Já a interação ambiente x idade não foi significativa.

Tabela 44: Análise de variância para a resistência à compressão.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F_{0,05}	Signif.
Ambiente	35,53	1	35,53	10,43	4,49	S
Idade	110,99	3	37,00	10,86	3,24	S
Ambiente x Idade	30,75	3	10,25	3,01	3,24	NS
Erro	54,51	16	3,41	---	---	---
Total	232	23	---	---	---	---

A partir do teste de Duncan verificou-se, tanto para o ambiente como para a idade, dois grupos distintos, sendo para idade um grupo homogêneo composto por 28, 90 e 180 dias e outro independente para os 365 dias, mostrando que nesta idade o efeito do crescimento da resistência foi mais expressivo na análise global, contribuindo para as hipóteses levantadas.

6.7.2. Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade obtidos para os corpos-de-prova mantidos em câmara úmida e os estocados em ambiente com elevada umidade a 38°C encontram-se apresentados na Tabela 45 e na Figura 145.

Tabela 45: Resultados de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova.

Idade (dia) =>	28	90	180	365
C.U. =>CP's mantidos em câmara úmida				
CP1	21,70	24,30	21,60	21,89
CP2	25,20	25,30	30,40	19,13
CP3	24,20	27,20	23,60	15,91
Média (GPa)	23,70	25,60	25,20	18,98
Desvio Padrão (GPa)	1,80	1,47	4,61	2,99
38G =>CP's mantidos em elevada umidade a 38°C				
CP1	21,00	22,70	17,50	19,84
CP2	22,10	24,60	22,40	17,86
CP3	21,90	25,40	25,30	18,42
Média (GPa)	21,67	24,23	21,73	18,71
Desvio Padrão (GPa)	0,59	1,39	3,94	1,02

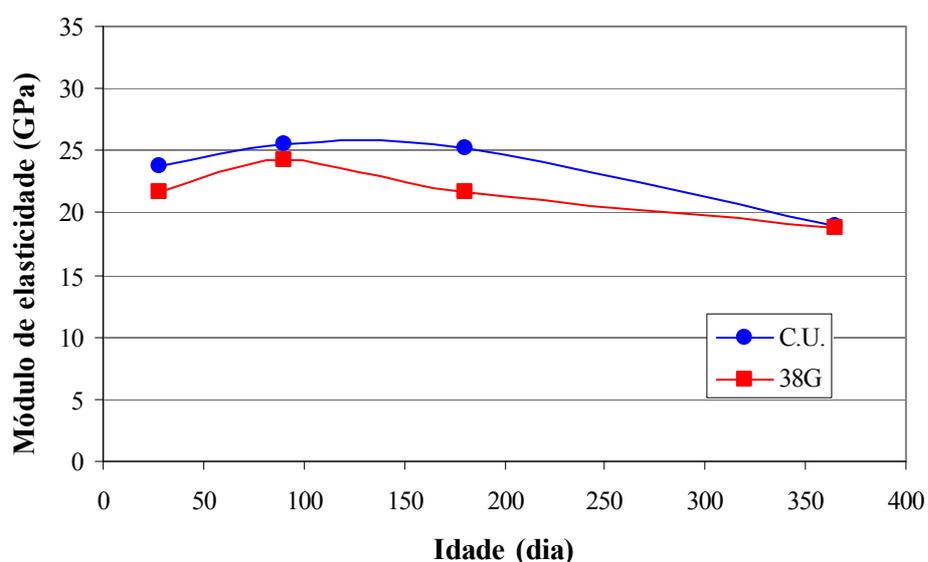


Figura 145: Módulo de elasticidade médio dos corpos-de-prova ao longo do tempo.

De forma semelhante à resistência à compressão, os dois ambientes estudados (câmara úmida e ambiente de elevada umidade a 38°C) apresentam valores de módulo de elasticidade próximos nas idades de 28, 90 e 365 dias, com exceção da idade de 180 dias. Porém em termos de crescimento desta propriedade o comportamento não segue de forma similar ao da resistência à compressão. O crescimento do módulo só ocorre de 28 para 90 dias, sendo que a partir desta data, independente do ambiente estudado, ocorre um decréscimo no seu valor até a idade de 365 dias (cerca de 24% de redução no seu valor, em média).

A partir da análise de variâncias (Tabela 46), observou-se comportamento semelhante dos efeitos idade e interação ambiente x idade na resistência à compressão, apesar de no ambiente não terem sido notadas diferenças significativas. Os agrupamentos por Duncan foram os mesmos do que para a resistência à compressão, indicando que aos 365 dias a queda no módulo se apresenta expressiva para os dois ambientes estudados.

Tabela 46: Análise de variância para o módulo de elasticidade.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Signif.
Ambiente	19,10	1	19,10	2,80	4,49	NS
Idade	121,08	3	40,36	5,92	3,24	S
Ambiente x Idade	8,04	3	2,68	0,39	3,24	NS
Erro	109,00	16	6,81	---	---	---
Total	257,22	23	---	---	---	---

Interessante ainda é comentar que, enquanto a resistência cresce até 365 dias, o módulo se encontra em queda, indicando já os efeitos das alterações intrínsecas do concreto nos ensaios em laboratório, como também observado através das expansões, devido à formação dos produtos da RAA, gerando microfissurações internas e refletindo negativamente nesta propriedade.

De acordo com Marzouk & Langdon (2003), o módulo de elasticidade pode cair de forma significativa quando um concreto se encontra afetado pela RAA. Em seus estudos em laboratório, foram verificadas quedas de até 80% após 12 semanas de exposição em ambiente bastante agressivo (NaOH a 80°C). Nos estudos de Batic, Giaccio & Zerbino, estima-se quedas na ordem 40% aos 120 dias de ensaio, pela ASTM C-1293, quando se compara um concreto reativo com uma referência isenta da RAA. Rivard *et al.* (2004a) também atestam queda de módulo em concretos afetados pela RAA, mostrando que esta propriedade pode ser mais afetada do que a resistência à compressão.

6.7.3. Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 47 estão registrados os resultados da tensão de tração obtidos para os corpos-de-prova mantidos em câmara úmida e estocados em ambiente com elevada umidade a 38°C, e na Figura 146 estão apresentados graficamente os resultados médios obtidos no tempo.

Tabela 47: Resultados de resistência à tração dos corpos-de-prova.

Idade (dia) =>	28	90	180	365
C.U. =>CP's mantidos em câmara úmida				
CP1	3,86	3,40	3,56	3,86
CP2	3,80	3,57	4,12	3,93
CP3	3,49	3,65	3,00	3,86
Média (MPa)	3,72	3,54	3,56	3,88
Desvio Padrão (MPa)	0,20	0,13	0,56	0,04
38G =>CP's mantidos em elevada umidade a 38°C				
CP1	3,37	2,74	2,62	4,11
CP2	3,49	2,99	2,43	4,05
CP3	3,37	3,12	2,68	4,24
Média (MPa)	3,41	2,95	2,58	4,13
Desvio Padrão (MPa)	0,07	0,19	0,13	0,10

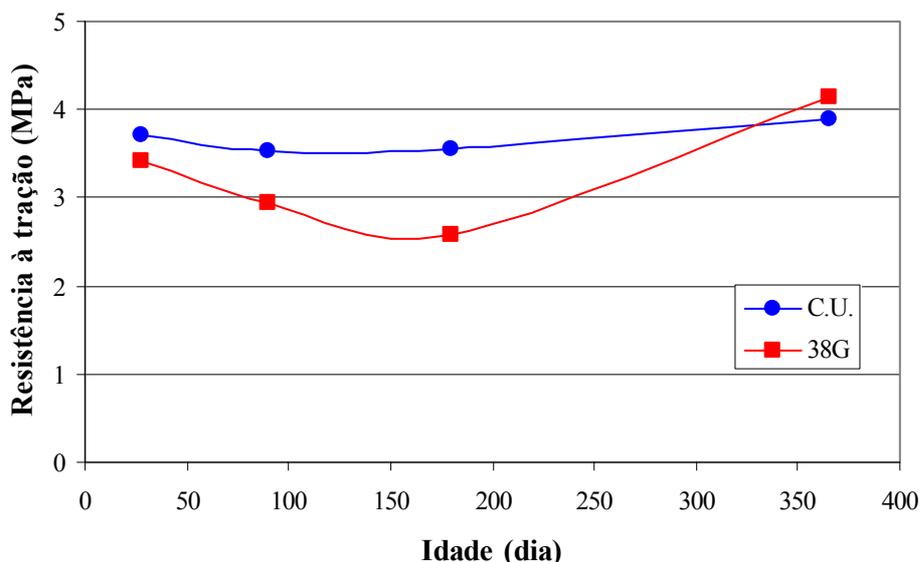


Figura 146: Resistência à tração por compressão diametral média dos corpos-de-prova ao longo do tempo.

Observa-se que na câmara úmida as resistências apresentam-se sempre superiores às obtidas a 38°C, até 180 dias. Já aos 365 dias ocorre uma inversão neste comportamento, porém as diferenças não são tão expressivas. Ao longo do tempo, os CP's estocados em câmara úmida não apresentam qualquer crescimento importante, mantendo-se praticamente estabilizada a resistência à tração quando comparadas aos 28 e 365 dias. Já no ambiente a 38°C, as resistências crescem de forma expressiva de 28 até 365 dias, na ordem de 20%. Porém, observou-se um comportamento inesperado entre 28 e 180 dias no ambiente de 38°C, onde a resistência à tração cai.

Com base na análise de variâncias, conforme Tabela 48, notam-se diferenças significativas de todos os efeitos avaliados para a resistência à tração, sendo as idades agrupadas em 3 três grupos (28 dias; 90 e 180 dias; 365 dias), mostrando que 90/180 dias e 365 dias representam 2 grupos independentes. Novamente, a idade 365 dias mostrou-se diferenciada, comprovando estatisticamente os maiores valores observados, particularmente para a condição de 38°C. Os crescimentos da resistência à tração até 365 dias parecem acompanhar a resistência à compressão (item 6.7.1), mostrando certa coerência entre as duas propriedades e possível influência das alterações devido à RAA em laboratório.

Tabela 48: Análise de variância para a resistência à tração por compressão diametral.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F_{0,05}	Signif.
Ambiente	1,00	1	1,00	18,13	4,49	S
Idade	3,06	3	1,02	18,58	3,24	S
Ambiente x Idade	1,21	3	0,40	7,35	3,24	S
Erro	0,88	16	0,05	---	---	---
Total	6,15	23	---	---	---	---

6.7.4. Permeabilidade

Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de percolação de água sob pressão e mantidos em câmara úmida e estocados em ambiente com elevada umidade a 38°C encontram-se apresentados na Tabela 49.

Tabela 49: Resultados de coeficiente de permeabilidade dos corpos-de-prova.

Idade (dia) =>	28	180	365
C.U. =>CP's mantidos em câmara úmida			
CP1	0	0	0
CP2	1,75E-12	0	0
CP3	1,37E-12	0	0
Média (m/s)	1,04E-12	0	0
Desvio Padrão (m/s)	9,21E-13	0	0
38G =>CP's mantidos em elevada umidade a 38°C			
CP1	1,89E-11	1,08E-11	1,08E-11
CP2	2,15E-11	1,09E-11	5,01E-12
CP3	1,73E-11	2,19E-11	1,82E-11
Média (m/s)	1,92E-11	1,45E-11	1,13E-11
Desvio Padrão (m/s)	2,15E-12	6,40E-12	6,61E-12

Todos os valores do coeficiente de permeabilidade determinados, independente do ambiente estudado, apresentam-se dentro da faixa para este tipo de concreto, denotando concretos de baixa permeabilidade (NEVILLE, 1997). Destaca-se apenas que existe uma tendência dos CP's mantidos em câmara úmida apresentarem mais baixa permeabilidade do que os estocados a 38°C, sendo esta diferença comprovada por análise de variâncias (Tabela 50). Através do teste de Duncan, os ambientes se apresentaram em dois grupos distintos, porém as idades analisadas compõe um único grupo homogêneo.

Tabela 50: Análise de variância para permeabilidade.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F _{0,05}	Signif.
Ambiente	9,70E-22	1	9,70E-22	64,56	4,75	S
Idade	6,17E-23	2	3,09E-23	2,05	3,89	NS
Ambiente x Idade	3,54E-23	2	1,77E-23	1,18	3,89	NS
Erro	1,80E-22	12	1,50E-23	---	---	---
Total	1,25E-21	17	---	---	---	---

A menor permeabilidade observada para os concretos da câmara úmida está ligada à menor porosidade e, por conseqüência, às maiores resistências à compressão obtidas, uma vez que existe relação direta entre estas propriedades (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

6.8. CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Com o objetivo de correlacionar todos os dados de resistência à compressão e o módulo de elasticidade determinados nos corpos-de-prova moldados, independente da idade e condição de exposição, avaliando o modelo para o módulo apresentado na NBR 6118 ($E_{ci} = 0,85 \cdot 5,6 \cdot f_{ck}^{1/2}$), tem-se a Figura 147 apresentada a seguir.

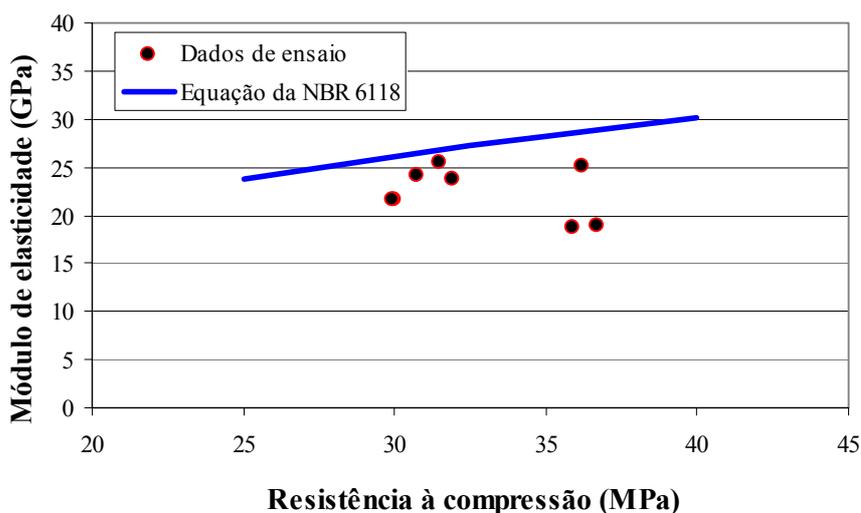


Figura 147: Comparação entre os resultados dos ensaios mecânicos e a curva da norma brasileira para os concretos moldados.

Nota-se que todos os dados experimentais encontram-se situados abaixo da curva apresentada pela norma para o módulo de elasticidade, de forma semelhante ao ocorrido para os testemunhos extraídos (item 5.2.12), reforçando a ausência de proporcionalidade entre estas duas propriedades quando se trata de concretos atacados pela RAA.

Analisando o nível da resistência à tração em relação à resistência à compressão (R_c) a partir dos valores médios calculados nas várias idades de ensaio analisadas (Figura 148), nota-se comportamento semelhante ao obtido para os testemunhos.

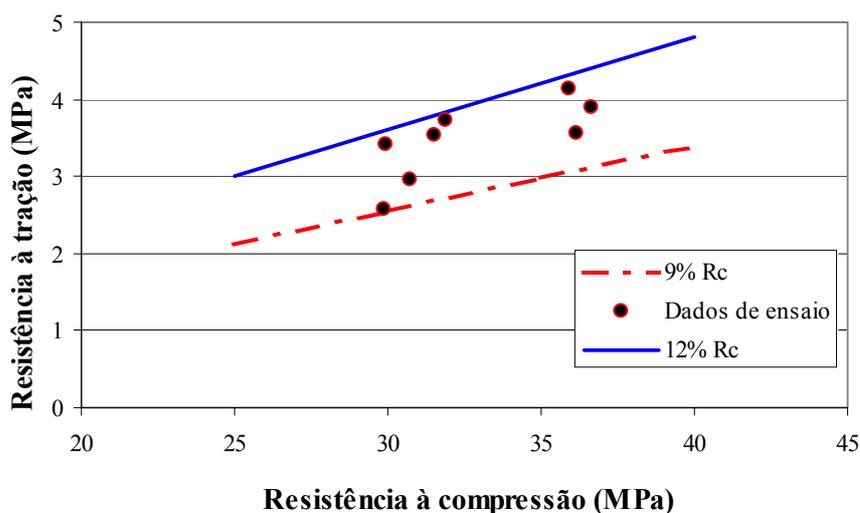


Figura 148: Correlação entre os dados da resistência à compressão e tração diametral para os concretos moldados.

Embora não tenha sido possível estabelecer uma correlação entre as duas propriedades, observa-se que todos os pontos da resistência à tração se situam entre cerca de 9 a 12% da compressão. Comportamento distinto foi observado por Hasparyk *et al.* (2004b), porém o estudo foi realizado em testemunhos de concreto, se notando valores mais baixos, na faixa de 5 a 10% da resistência à compressão, indicando provavelmente uma maior influência da RAA nesta propriedade.

As investigações realizadas neste capítulo com o quartzito puderam mostrar a sua semelhança com os agregados constituintes dos testemunhos de concreto e sua alta reatividade, corroborando as expansões residuais observadas nos testemunhos de concreto. O estudo do lítio nos concretos moldados em laboratório mostrou que este elemento, quando combinado na forma de nitrato, pode ser capaz de influenciar o comportamento expansivo do concreto, confirmando os resultados positivos obtidos para os testemunhos de concreto. De uma maneira geral, acredita-se que este capítulo contribuiu para explicar a maior parte dos comportamentos obtidos com os testemunhos de concreto extraídos e ensaiados em laboratório.

7. PROPRIEDADES E CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA DO GEL EXSUDADO

O “gel” exsudado é um material rígido semelhante a um vidro, em função das características apresentadas e por se quebrar quando golpeado. Deve-se deixar bem claro que o gel exsudado estudado nesta etapa da pesquisa é um produto, formado a partir RAA, que se encontra localizado na superfície exposta do concreto, não se referindo àqueles produtos da reação que são encontrados no interior do concreto, se apresentando diferenciado em alguns aspectos.

O termo gel pode ser definido como uma partícula coloidal no qual a sua interação com o líquido induz o aumento de viscosidade, tornando-se uma massa com partículas organizadas no meio da dispersão. Maiores quantidades de líquido podem ser imobilizadas por retenção mecânica dentro de agregados de partículas. Isso ocorre quando se formam precipitados volumosos e floculentos de hidróxidos. Em soluções de longas moléculas, as suas cadeias podem se interligar por processos físicos ou químicos, e/ou emaranhar-se mecanicamente a tal ponto que se forme uma estrutura reticular tridimensional contínua. Se todo o líquido for retido mecanicamente e imobilizado dentro deste retículo, o sistema como um todo adquire o aspecto de um sólido rígido, e é chamado de gel. (MAAR, 1975; JAFELICCI JÚNIOR & VARANDA, 1999)

7.1. ANÁLISE VISUAL E POR LUPA

A partir das inspeções visuais realizadas nas várias amostras coletadas na superfície do concreto da galeria de drenagem do vertedouro, observou-se que o “gel” exsudado se apresenta na forma de pequenos fragmentos, com tamanho máximo aproximado de 2,0 cm, em sua maioria. Os formatos apresentavam-se variados (arredondados, anguloso e filamentosos) e a aparência vítrea. Na sua maioria, apresentam-se com superfície lisa a rugosa, e às vezes aspecto botrioidal. Este material é rígido, sendo semelhante a um vidro por se quebrar quando golpeado.

Notou-se a incidência de quatro diferentes tipos de gel no que diz respeito às suas características óticas, conforme apresentado na Figura 149, sendo denominados gel “A, B, C e D” conforme segue:

- Gel A: semi-transparente a translúcido
- Gel B: translúcido com tendência a acinzentado
- Gel C: opaco, fosco e esbranquiçado
- Gel D: opaco, fosco e amarelado

O gel A ocorre com maior abundância exsudado na superfície do concreto, sendo objeto da maior parte das análises em função de ter sido obtido quantidade suficiente para as investigações.

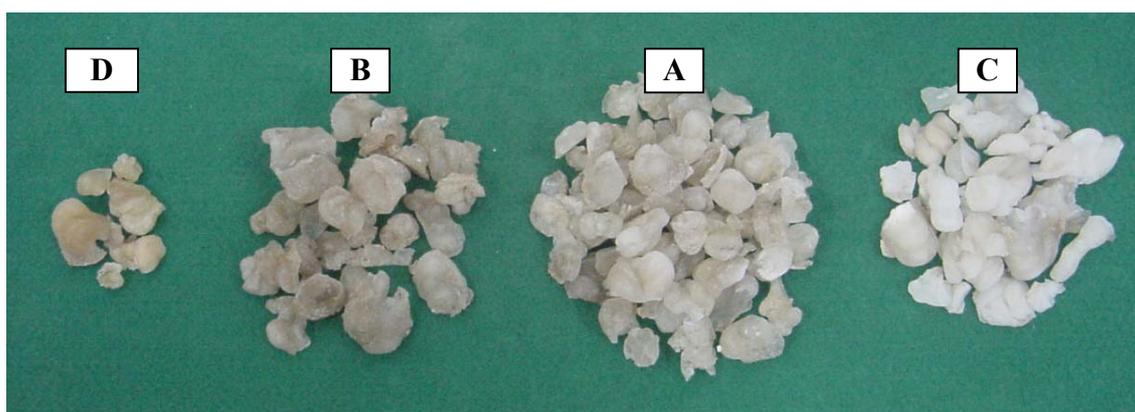


Figura 149: Aparência dos géis coletados na superfície do concreto afetado pela RAS.

As Figuras 150 e 151 registram em maior detalhe o gel A. As suas superfícies apresentam-se de forma lisa ou rugosa com aspecto botrioidal, conforme pode ser observado nas Figuras 152 e 153, obtidas por lupa.



Figura 150: Amostras de gel.



Figura 151: Formatos variados do gel.

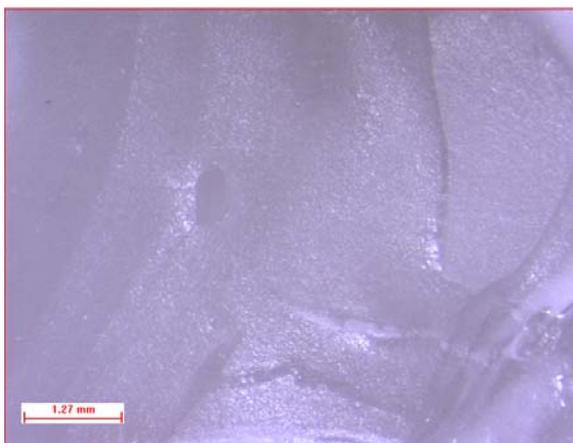


Figura 152: Aspecto vítreo com superfície lisa do gel.



Figura 153: Superfície rugosa.

7.2. ANÁLISES QUÍMICAS

A Tabela 51 apresenta a porcentagem dos principais componentes químicos dos 4 tipos de gel analisado na forma de óxidos e a perda ao fogo.

Tabela 51: Principais componentes químicos dos géis (em massa).

% Óxidos	A	B	C	D
SiO ₂	60,90	60,31	54,61	61,06
K ₂ O	16,83	17,04	19,16	15,62
Na ₂ O	2,53	2,46	3,79	4,77
CaO	0,73	1,05	0,85	0,27
Al ₂ O ₃	0,16	0,38	0,10	0,28
Fe ₂ O ₃	0,04	0,09	0,16	0,17
MgO	0,24	0,24	0,01	0,01
Perda ao fogo	18,58	18,43	21,31	17,83
Na ₂ Oeq	13,60	13,67	16,40	15,04

Os compostos majoritários identificados no gel (silício, potássio e sódio) estão de acordo com a literatura (TAYLOR, 1997; MINDESS & YOUNG, 1981). A maior parcela de álcalis encontrada nos géis diz respeito ao potássio, estando compatível com o elemento alcalino que compõe a maior parte dos álcalis normalmente encontrados no cimento.

De uma maneira geral, a partir dos resultados químicos, não se observam grandes diferenças entre os 4 tipos de gel, de qualquer forma é importante registrar os maiores teores de álcalis para os géis C e D. A perda ao fogo representa a água combinada no gel e presença de possíveis fases carbonáticas, sendo superior no gel C.

Na Tabela 52 está apresentada a proporção dos principais componentes do gel em termos de quantidades molares.

Tabela 52: Quantidades molares dos principais componentes da amostra.

Gel	Componente	Massa molar	% em massa	Razão molar	% em mol
A	SiO ₂	60	60,90	1,01	44,8
	H ₂ O	18	18,58	1,03	45,5
	K ₂ O	94	16,83	0,18	7,9
	Na ₂ O	62	2,53	0,04	1,8
B	SiO ₂	60	60,31	1,01	44,7
	H ₂ O	18	18,43	1,02	45,5
	K ₂ O	94	17,04	0,18	8,1
	Na ₂ O	62	2,46	0,04	1,8
C	SiO ₂	60	54,61	0,91	38,6
	H ₂ O	18	21,31	1,18	50,2
	K ₂ O	94	19,16	0,20	8,6
	Na ₂ O	62	3,79	0,06	2,6
D	SiO ₂	60	61,06	1,02	45,2
	H ₂ O	18	17,83	0,99	44,0
	K ₂ O	94	15,62	0,17	7,4
	Na ₂ O	62	4,77	0,08	3,4

A partir da razão molar calculada (Tabela 52) é possível estimar a composição dos géis conforme se pode observar na Tabela 54.

Tabela 53: Composição estimada do gel.

Gel	Composição do Gel
A	0,22 (Na ₂ O + K ₂ O) . 1,01 . SiO ₂
B	0,22 (Na ₂ O + K ₂ O) . 1,01 . SiO ₂
C	0,26 (Na ₂ O + K ₂ O) . 0,91 . SiO ₂
D	0,25 (Na ₂ O + K ₂ O) . 1,02 . SiO ₂

Analisando a relação álcali/silica a partir da composição estimada, verifica-se que esta se situa entre 0,22 e 0,26, apresentando-se próxima da faixa de alguns géis apresentados na literatura (relações entre 0,27 e 0,53). Em Helmuth (1993), a composição química do gel proveniente de várias estruturas afetadas pela reação é apresentada onde se nota uma semelhança dos teores de óxidos estudados, destacando apenas para os géis analisados na presente pesquisa uma maior incidência de potássio e menor teor de cálcio. Alguns pesquisadores comentam que não existe homogeneidade química no gel (STRUBLE & DIAMOND, 1981a;b), fato este não observado nesta pesquisa, porém os valores apresentados na literatura nem sempre são somente do gel exsudado, mas também dos produtos formados no interior do concreto.

7.3. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Os dados utilizados na determinação da densidade (ρ) da amostra de gel A encontram-se apresentados na Tabela 54 a seguir, sendo empregados dois picnômetros de tamanhos diferentes.

Tabela 54: Determinação da densidade do gel A.

Parâmetro	Determinação 1	Determinação 2
w₁ (g)	25,4105	10,7637
w₂ (g)	28,0330	11,4532
w₃ (g)	63,3418	19,3045
V_{pic} (mL)	34,8500	7,7952
Densidade calculada (g/cm³)	2,1450	2,1696
Densidade Média (g/cm³)	2,1573 ± 0,0174	

Nota: Densidade do óleo de silicone = 1,05 g/cm³

Segundo dados da literatura, os vidros comuns apresentam densidade na faixa de $2,4 \text{ g/cm}^3$ a $2,8 \text{ g/cm}^3$ (HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS, 1990), apresentando o gel resultados próximos a esta faixa.

7.4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA

Com o objetivo de verificar a absorção do gel A, foi inicialmente realizado um teste no qual o gel foi colocado em imersão em água à temperatura ambiente. Após algumas horas (entre 3 e 4 horas) foi observada a dissolução quase que total da amostra em ensaio. Evaporando-se uma parte da água desta suspensão, verificou-se a formação de um gel rígido, não sendo possível verificar a absorção da amostra de gel com imersão. Optou-se então por realizar o ensaio de absorção de água utilizando-se apenas o vapor de água a temperatura ambiente.

Ao longo do tempo, em idades mais avançadas, notou-se um acúmulo de líquido dentro de cada béquer onde as amostras estavam acondicionadas individualmente. Uma vez que não foi observada a presença de gotículas de água no dessecador, decorrentes, por exemplo, de alguma variação térmica, acredita-se que o líquido é proveniente da própria amostra de gel como consequência de sua dissolução. Sendo assim, foi definido nesta etapa o acompanhamento da variação de massa de duas das amostras mantendo-se o líquido cumulativo formado nos béqueres e, para as outras duas amostras, o líquido em excesso formado nos béqueres era seco antes de cada medida de massa. Na Figura 154 encontra-se apresentado o comportamento médio e o desvio padrão da absorção de água no tempo para amostras mantidas no ambiente saturado de vapor de água.

Observa-se a partir da Figura 154 que a amostra intumescce acentuadamente ao longo do tempo de exposição ao vapor de água. Até cerca de 8 dias de exposição, não foi observado qualquer acúmulo excessivo de líquido nos recipientes contendo as amostras, sendo os valores apresentados no gráfico uma média de quadruplicata. Após 8 dias de exposição, nota-se uma diferença de comportamento das amostras secas e com líquido cumulativo, sendo os resultados apresentados a partir de duplicata.

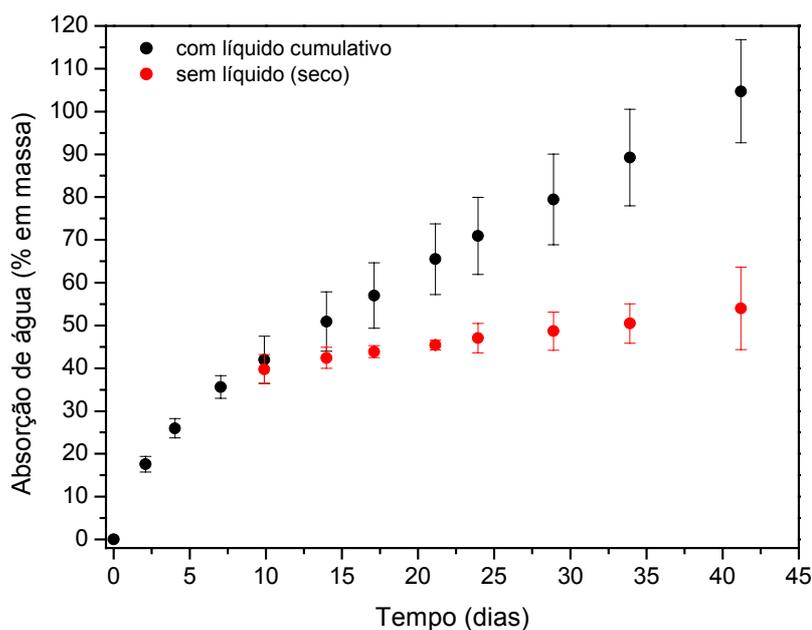


Figura 154: Absorção de água em função do tempo para amostras de gel submetidas a ambiente saturado de vapor de água.

As amostras com líquido cumulativo apresentam um aumento constante na absorção de vapor de água, caracterizando um processo de dissolução, sem estabilização até a idade avaliada (41 dias), com cerca de 100% de ganho de massa por absorção. Para as amostras cujo líquido formado era seco antes da pesagem observou-se a formação de um patamar consistente com a dissolução paulatina do gel, representando aproximadamente 50% de absorção na mesma idade.

7.5. COMPORTAMENTO TÉRMICO

Na Figura 155 é mostrada a alteração visual ocorrida no aspecto da amostra de gel quando submetida a diferentes temperaturas. O gel A encontra-se na sua forma original na foto na temperatura ambiente, mas quando permanece por 24 horas em estufa a 110°C o gel expande em função da liberação da água livre presente. À medida que a temperatura aumenta, chegando a 500°C, nota-se um aumento volumétrico acentuado (expansão) do gel em virtude provavelmente da liberação de água quimicamente combinada na amostra. Quando a temperatura sobe, acima de 1000°C, ocorre a liberação de toda a água presente na amostra.

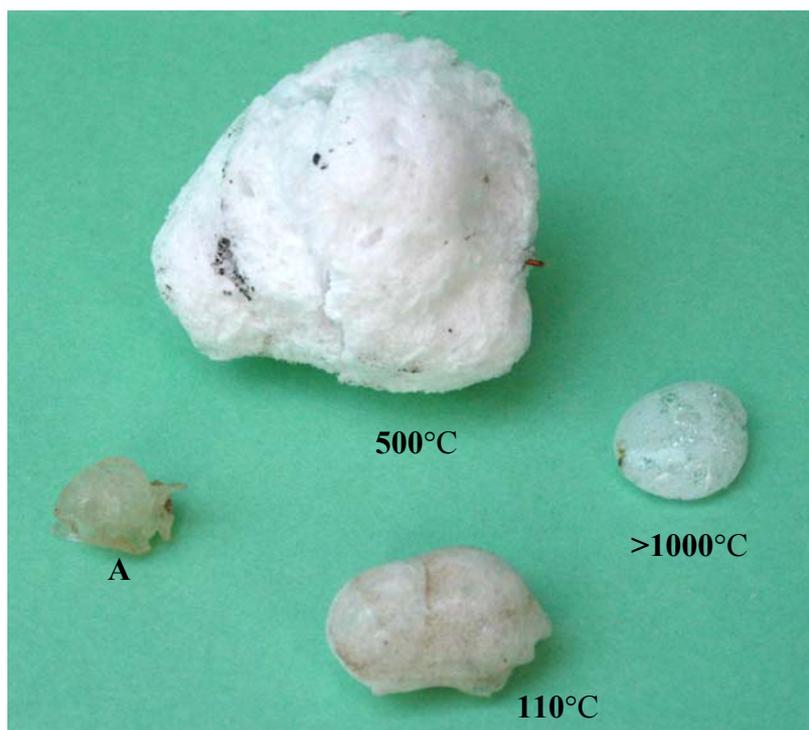


Figura 155: Amostras de gel original (A) e submetidas a diferentes temperaturas: 110°C, 500°C e acima de 1000°C.

Na Figura 156 pode-se observar o aspecto esponjoso do interior da amostra exposta a uma temperatura de 500°C e a sua porosidade interna. Na Figura 157 pode-se visualizar uma outra amostra que foi estirada em temperaturas acima de 1000°C.



Figura 156: Porção interna da amostra de gel A após exposição a 500°C.



Figura 157: Detalhe de uma amostra de gel estirada a temperaturas acima de 1000°C.

7.6. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA

Os dados relativos à determinação do coeficiente de expansão térmica do gel estão apresentados na Tabela 55 a seguir.

Tabela 55: Dados sobre o coeficiente de expansão térmica.

Temperatura (°C)	ΔT (°C)	ΔV (mL)	β (°C ⁻¹)	α (°C ⁻¹)
50	22	0,093	$3,5 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$

$T_0=28^\circ\text{C}$; V_0 do gel=1,22cm³; β e α : coeficientes de expansão térmica volumétrico e linear

O valor do coeficiente de expansão térmica obtido para o gel foi bastante elevado, considerando-se que dados na literatura (LANGE'S HANDBOOK OF CHEMISTRY, 1985) mostram para o vidro valores de coeficiente de expansão térmica volumétrico da ordem de $3 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ($0,03 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

Esta discrepância pode ter ocorrido devido, possivelmente, à vaporização da água livre presente na amostra, que causa uma expansão acentuada. Apesar de triturada, a amostra é expansiva pela vaporização da água, cujo efeito é a formação de bolhas, como observado durante a análise do comportamento térmico do gel no item 7.5.

7.7. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ZETA

Os resultados do potencia zeta obtidos para a suspensão coloidal das duas amostras distintas do gel analisadas nos 4 pHs estão apresentados na Figura 158. Observa-se uma boa correlação entre as duas amostras analisadas, sendo o ajuste feito através de uma sigmoidal, usualmente adotado para este tipo de parâmetro. Os valores obtidos para o potencial zeta nos vários pHs encontram-se no Apêndice K.

No caso do gel, os prótons e hidroxilas são os íons determinantes de potencial zeta. Os silicatos contém grupos silanóis ($\equiv\text{Si-OH}$) em sua superfície que se dissociam segundo a equação 13, formando o grupo $\equiv\text{Si-O}^-$ que origina uma superfície carregada negativamente. (HORN & ONODA, 1978; BIRMASCK *et al.*, 2004). A carga positiva decorre da protonação e acontece em pH's muito baixos (equação 14).

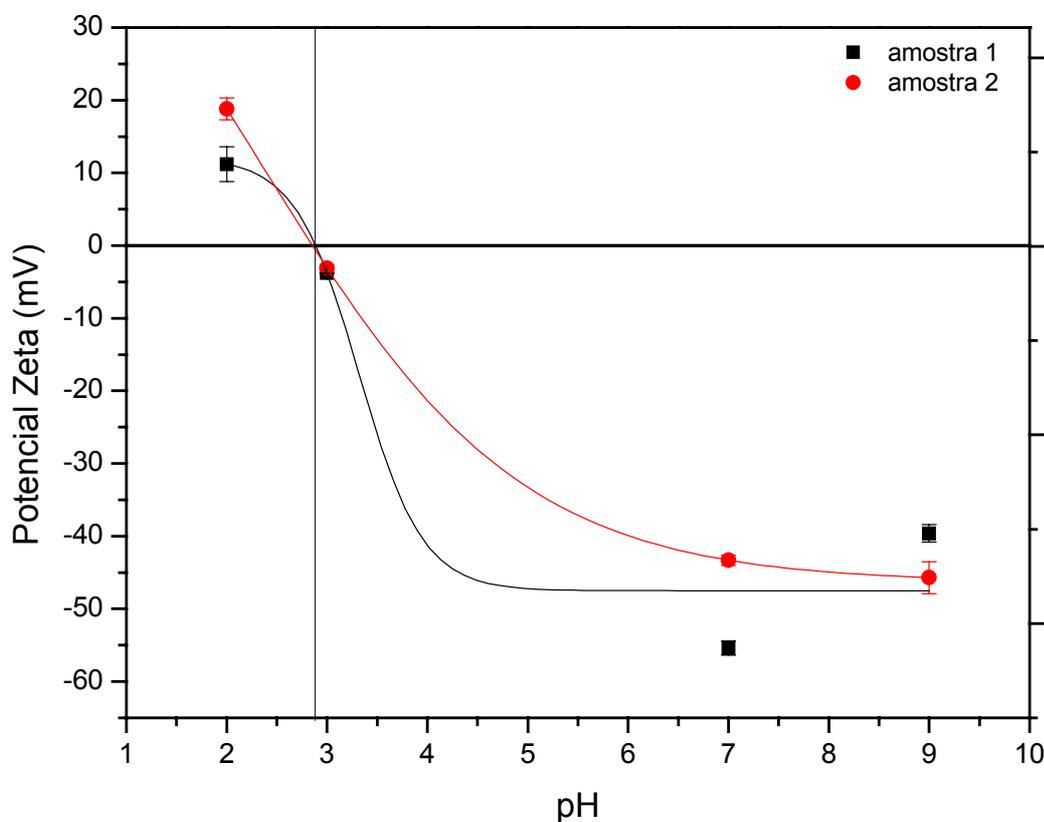


Figura 158: Potencial zeta em função do pH para suspensões aquosas de gel - média de dez medidas para cada amostra.

As partículas de gel exibem potencial zeta negativo em uma grande faixa de pH, indicando a predominância de cargas negativas na sua superfície em função da grande facilidade que possui de dissociar os grupos silanol em água. Quanto maior o pH, maior o número de grupos $\equiv\text{Si-O}^-$ formados. Diminuindo-se o pH, há uma diminuição na reação de dissociação dos grupos hidroxila da superfície, diminuindo o caráter negativo do potencial zeta. O ponto isoelétrico do gel encontra-se aproximadamente em pH 2,8, bastante ácido, sendo que este ponto representa a condição da suspensão coloidal na qual não existem as forças eletrostáticas (potencial zeta igual a zero). Este valor está de acordo com os valores de ponto isoelétrico descritos na literatura para silicatos vítreos. (HORN & ONODA, 1978; CHIBOWSKI, 1979; OLIVEIRA *et al.*, 2000; BISMARCK *et al.*, 2004)

O baixo valor de pH onde se encontra o ponto isoelétrico significa que os grupos superficiais da amostra possuem uma baixa afinidade por prótons (responsáveis pela carga positiva). Para pH acima de 2,8 o gel apresenta carga superficial negativa e para pH abaixo desse valor sua carga superficial é positiva. Acima de pH 5 os valores de potencial zeta atingem um patamar, estando de acordo com os resultados obtidos na literatura para silicatos vítreos (HORN & ONODA, 1978; CHIBOWSKI, 1979; BISMARCK *et al.*, 2004), e iniciando em valores de potencial zeta em torno de -40 mV. Este patamar sugere a continuidade do potencial zeta no pH usual do concreto, mostrando-se bastante afastado do ponto isoelétrico, ou seja, provocando um aumento de potencial elétrico, com provável aumento na carga elétrica superficial, conseqüentemente reduzindo a coagulação e refletindo no aumento das forças de repulsão.

7.8. ANÁLISES TÉRMICAS

7.8.1. Análise termogravimétrica e térmica diferencial

As curvas geradas a partir das análises térmicas do gel A puro estão apresentadas a seguir, onde se podem verificar as principais ocorrências durante o aquecimento da amostra:

- Curva TG ou termogravimétrica, gerada a partir da perda de massa (% em relação à massa inicial da amostra) em função da temperatura (°C) e apresentada na Figura 147;

- Curva DTG, gerada a partir da primeira derivada da curva TG em relação à temperatura, utilizada para estabelecer os limites de temperatura das reações que causam as variações de massa da amostra (Figura 147);
- Curva DTA, gerada a partir da diferença de temperatura entre a amostra e a referência e utilizada para verificar a presença de picos endotérmicos ou exotérmicos (Figura 159).

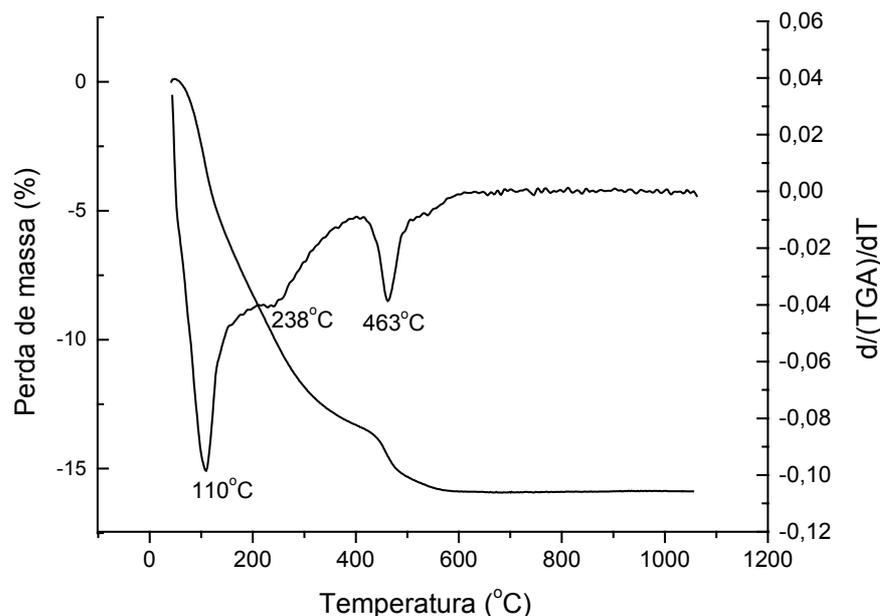


Figura 159: Curvas TG/DTG do gel puro.

É possível, a partir da Figura 159, verificar que há três reações principais que causam perda de massa da amostra durante seu aquecimento. A primeira ocorre em temperatura próxima a 110°C, a segunda em 238°C e a terceira em aproximadamente 463°C. A curva DTA da mesma amostra, apresentada na Figura 160, também apresenta picos nas mesmas faixas de temperatura das três primeiras reações, todos endotérmicos, e um outro pico em 772,9°C.

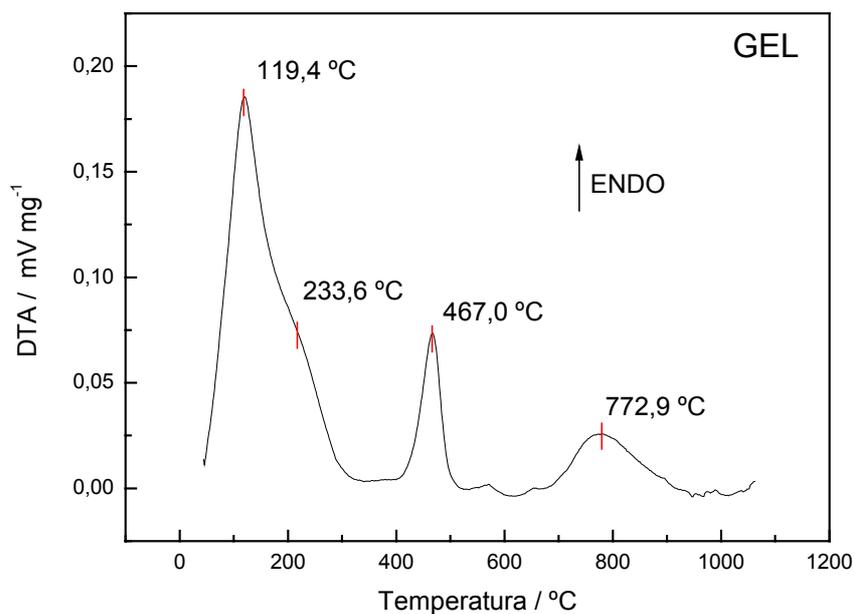


Figura 160: Curvas DTA do gel puro apresentando apenas picos endotérmicos.

A perda de massa ocorre em função da perda de água da amostra ou da decomposição das fases presentes. Observa-se a partir do termograma (TG/DTG) da Figura 159 e da curva DTA da Figura 160 uma perda de massa inicial relativa à desidratação do gel, correspondente provavelmente à evaporação de água livre e fisicamente adsorvida até aproximadamente 110°C que está associada ao pico endotérmico apresentado em 119°C (Figura 160). Em função desta perda ter se apresentado bastante acentuada, a perda de água observada também pode estar associada à água ionicamente associada às várias espécies hidratadas presentes na amostra de gel (LANGILLE *et al.*, 1991). A segunda reação ocorre em temperatura de 238°C, podendo estar também associada à água de hidratação do gel. As perdas de massa que ocorrem nas duas primeiras reações representam cerca de 15%.

A terceira reação é observada na região de 463°C (referente ao pico endotérmico na curva DTA em 467°C), correspondendo à perda de água que se encontra fortemente ligada ao gel (LANGILLE *et al.*, 1991). Nesta temperatura, a perda de massa também poderia estar associada aos carbonatos de sódio (WENDLANDT, 1985) presentes no gel, e que também foram observados a partir das análises por difração de raios-X (item 7.10) sendo identificados como a trona. A perda de massa total estimada na terceira região foi cerca de 2,5%.

A partir da curva de calorimetria diferencial (DTA) do gel puro observa-se também um outro pico endotérmico (773°C), porém desta vez sem qualquer associação a perdas de massa na

TG, sugerindo uma mudança de fase e estando compatível com a temperatura de transição vítrea (T_g) determinada nas análises apresentadas no item 7.8.2.

A quantidade de água total perdida no gel puro durante a análise térmica corresponde a cerca de 17,5%, valor próximo ao obtido na determinação da perda ao fogo do gel A durante as análises químicas. A partir dos resultados obtidos nas análises térmicas, pode-se dizer que o gel puro, além de possuir água livre, possui uma grande parcela de água quimicamente combinada na sua estrutura.

7.8.2. Determinação da temperatura de transição vítrea

A temperatura de transição vítrea (T_g) é definida como a temperatura a partir da qual regiões amorfas adquirem mobilidade (MANO & MENDES, 1999). Em outras palavras, ela está associada às regiões de uma amostra sólida, sendo a temperatura da passagem do estado vítreo para o estado elastomérico. Abaixo da T_g , o material não tem energia interna suficiente para permitir movimento de um grupo estrutural de forma a dissipar tensões por mudanças conformacionais. Ou seja, um material amorfo a uma temperatura abaixo da T_g , se quebra como um vidro quando golpeado; mas, se estiver acima da temperatura T_g , se deforma.

A temperatura de transição vítrea obtida para o gel foi $740 \pm 10^\circ\text{C}$, sendo confirmado através da quebra da amostra de gel quando golpeado a temperaturas inferiores à apresentada.

De acordo com Shelby (1976), Richet & Bottinga (1980) e Stoch, Waclawska & Sroda (2004) os silicatos contendo sódio e potássio apresentam valores de T_g inferiores ao obtido para o gel, da ordem de 500°C . Porém, deve ser comentado que apesar das similaridades do gel com os vidros, ainda existem diferenças que podem refletir em diferentes características e/ou propriedades dos materiais analisados.

7.9. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura, em superfícies de fratura, mostraram que o gel é um produto com estrutura maciça, contendo os elementos silício e potássio nela e apresentando certa porosidade fechada no seu interior. Em algumas amostras

foram verificados poros ovalados, sendo observado durante a preparação da amostra que o sentido do alongamento dos poros coincidia com a direção da formação do gel exsudado.

Algumas fases cristalinas tabulares foram verificadas depositadas na superfície interna do gel possuindo elevado teor alcalino e, principalmente o elemento sódio, em sua maioria. Em todas as amostras analisadas (gel A, B, C e D) foram verificadas estas fases tabulares, porém na amostra de gel “C”, com menos intensidade e na amostra de gel D de forma mais marcante. Foram também verificadas algumas finas acículas ricas em potássio e sódio no interior dos poros do gel, sendo mais abundantes nas amostras de gel A e D. As Figuras 161 a 166 registram as fases observadas no gel A.

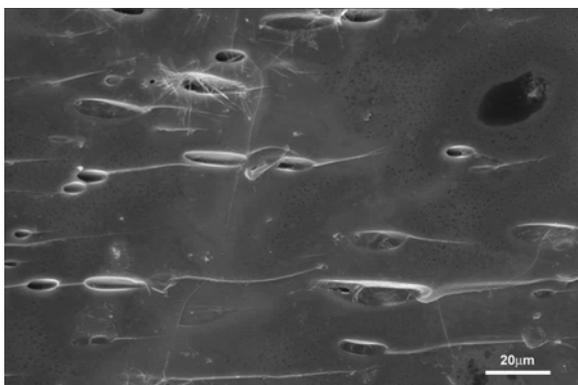


Figura 161: Detalhe da fase maciça do gel A.

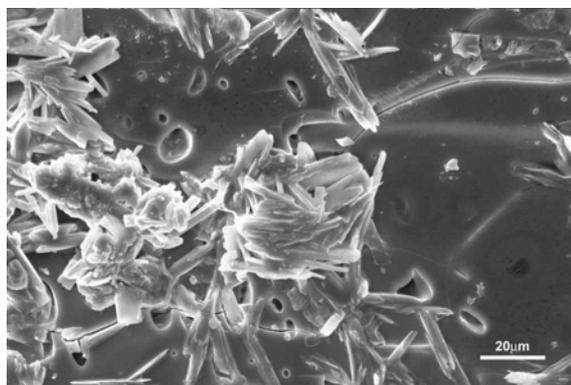


Figura 162: Detalhe dos produtos cristalizados - gel A.

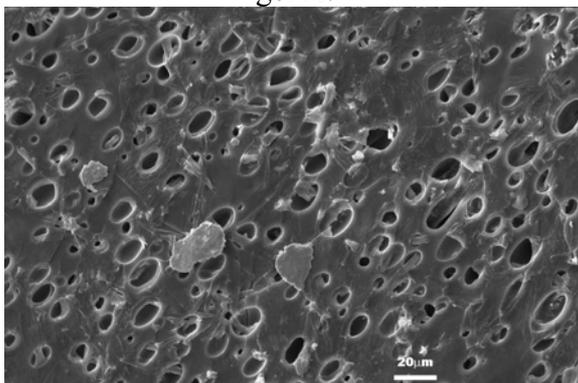


Figura 163: Detalhe de uma região com grande concentração de poros - gel A.

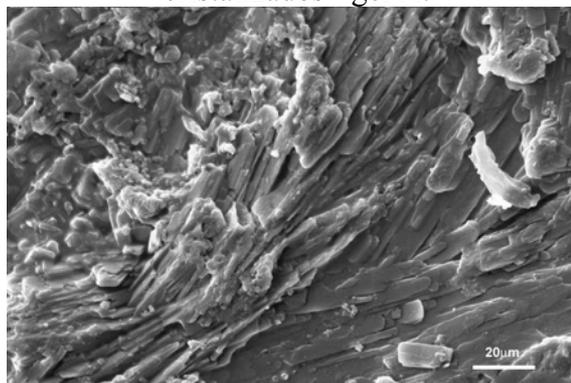


Figura 164: Fases tabulares ricas em sódio depositadas na superfície do gel tipo A.

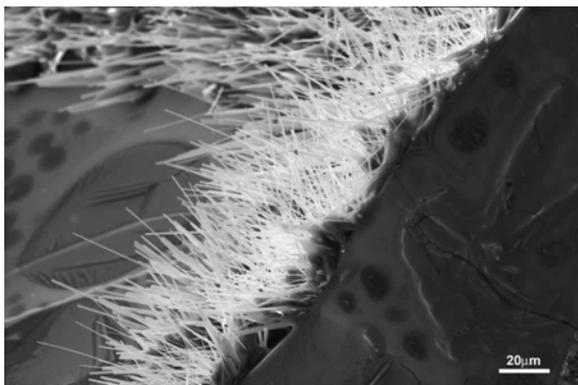


Figura 165: Acículas no poro do gel A

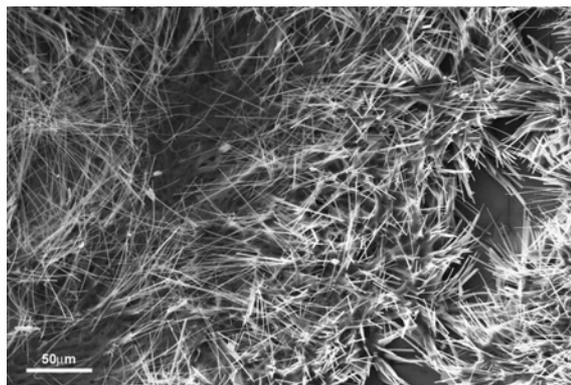


Figura 166: Outra região com cristais aciculares dispersos no gel A

A composição química semi-quantitativa da fase maciça (Figura 167) é bastante homogênea, conforme pode ser observado na Tabela 56.

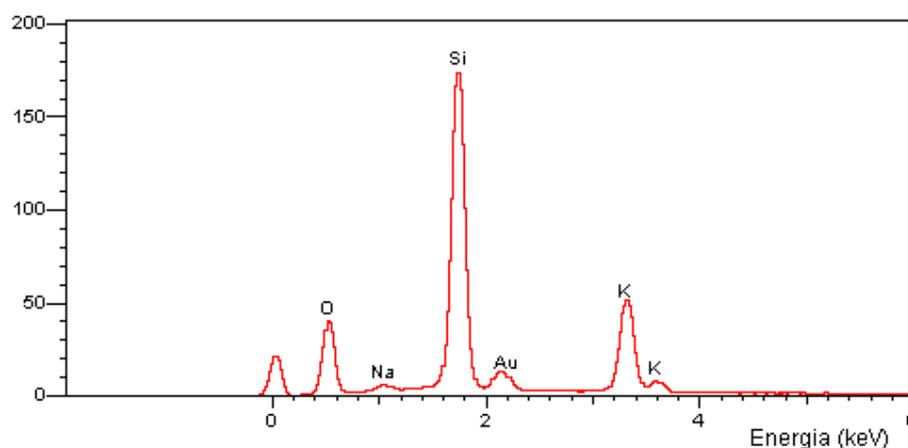


Figura 167: Espectro de raios X da região maciça da porção interna do gel.

Tabela 56: Microanálise por EDX (%) de 4 pontos selecionados na fase maciça do gel.

Ponto/Óxidos	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
1	60	37	3
2	58	40	2
3	60	38	2
4	58	40	2
Média	59	39	2
Desvio Padrão	1	2	1

Os espectros referentes às fases tabulares e aciculares estão apresentados nas Figura 168 e 169.

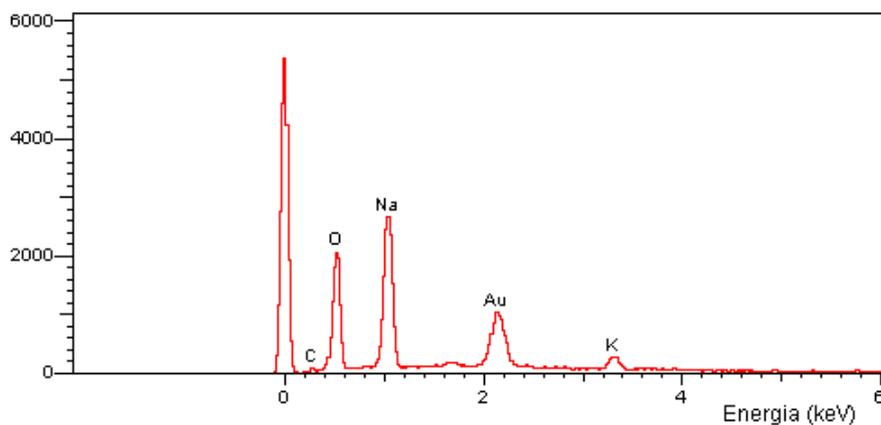


Figura 168: Espectro de raios X característico da fase tabular.

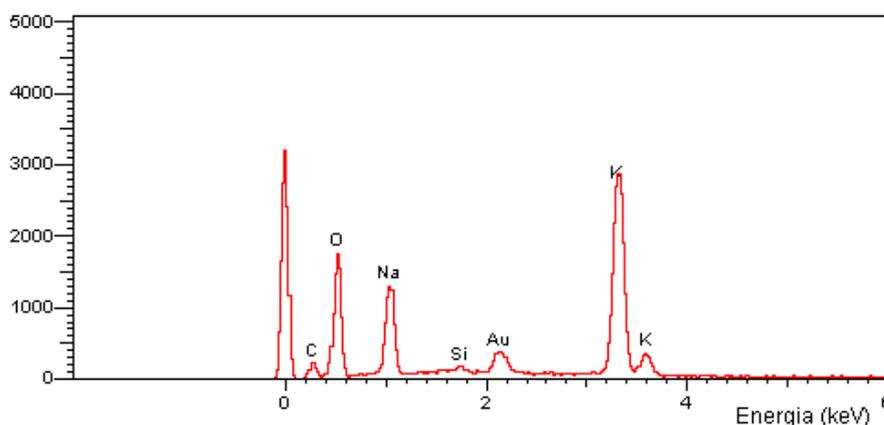


Figura 169: Espectro de raios X dos produtos aciculares.

As Figuras 170 a 173 a seguir registram as principais características dos demais géis (B, C e D).

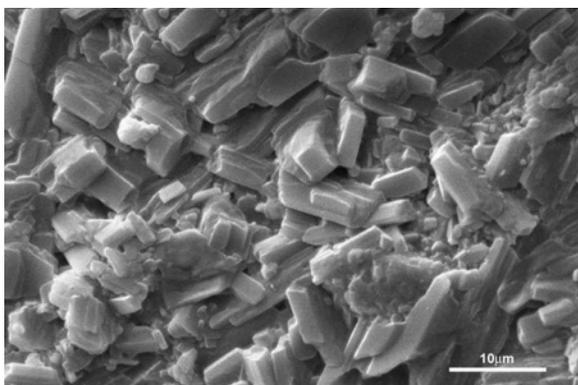


Figura 170: Fases tabulares bem cristalizadas presentes no gel B.

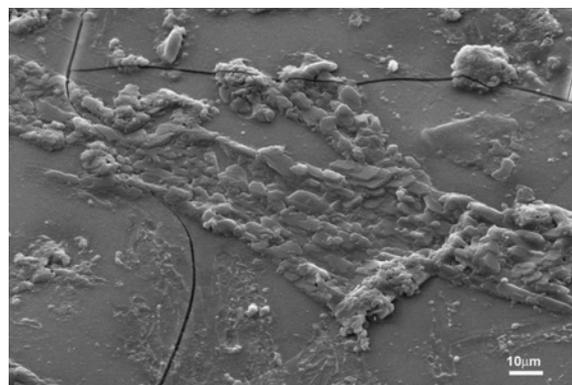


Figura 171: Região maciça contendo algumas fases tabulares presentes no gel C.

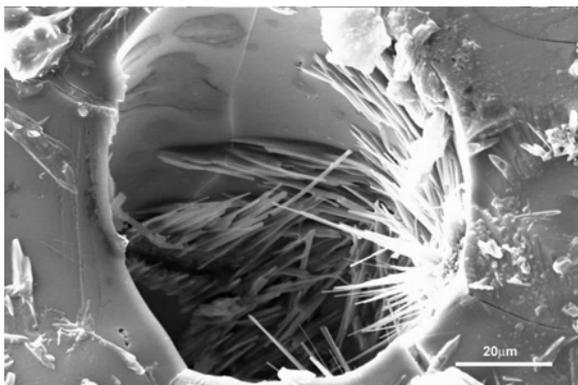


Figura 172: Deposição de cristais aciculares no poro do gel D.

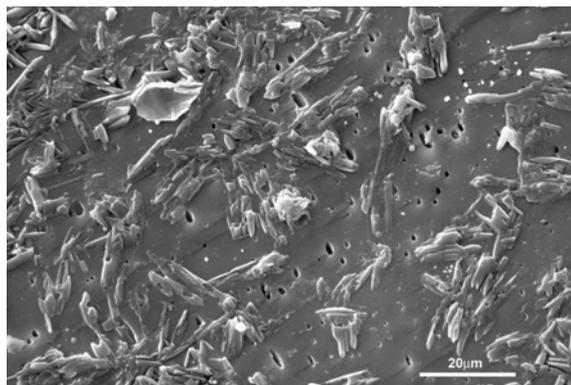


Figura 173: Concentração de fases cristalizadas e poros fechados no gel D.

Na porção externa do gel, observa-se uma região mais densa, com aspecto gretado devido à secagem da amostra no vácuo e tamponamento parcial ou total dos poros com produtos ricos em sódio, em todas as amostras analisadas, conforme pode ser observado nas micrografias nas Figuras 174 e 175.

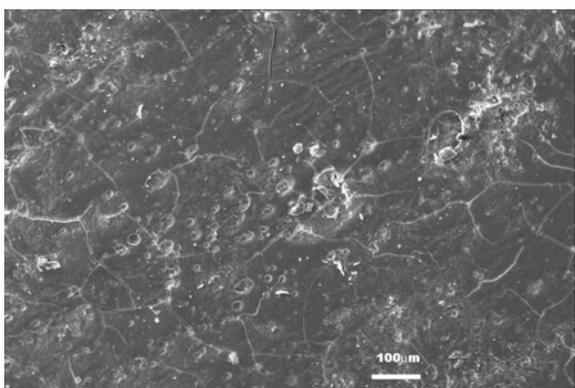


Figura 174: Região externa do gel A.

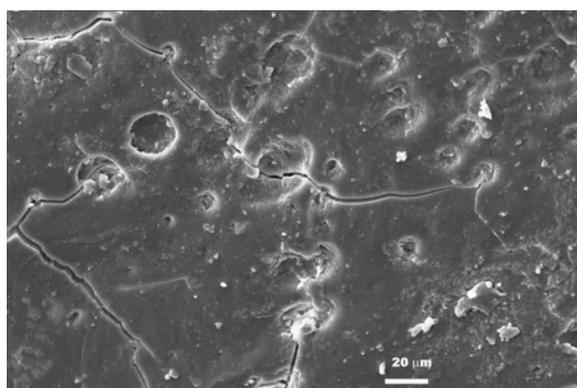


Figura 175: Detalhe da Micrografia 162.

As características dos géis observadas por microscopia eletrônica de varredura estão de acordo com estudos já realizados anteriormente com géis exsudados de várias barragens e apresentados por Veiga, Gonçalves & Hasparyk (1997).

Os géis analisados por microscopia eletrônica mostram na fase maciça (a fase mais abundante do gel) uma composição química bastante homogênea contendo, na sua maioria, os elementos químicos silício e potássio, estando de acordo com as análises químicas realizadas e representando a fase amorfa do gel. As fases tabulares e aciculares representam produtos cristalizados, sendo na maior parte das vezes compostas por altos teores de sódio e às vezes

potássio. Provavelmente estas fases cristalizadas estão relacionadas aos carbonatos alcalinos, sendo também observadas por difração de raios x (conforme abordado no item 7.10 a seguir).

7.10. DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A Figura 176 apresenta os difratogramas de raios X das 4 amostras de gel puro analisadas (A, B, C e D).

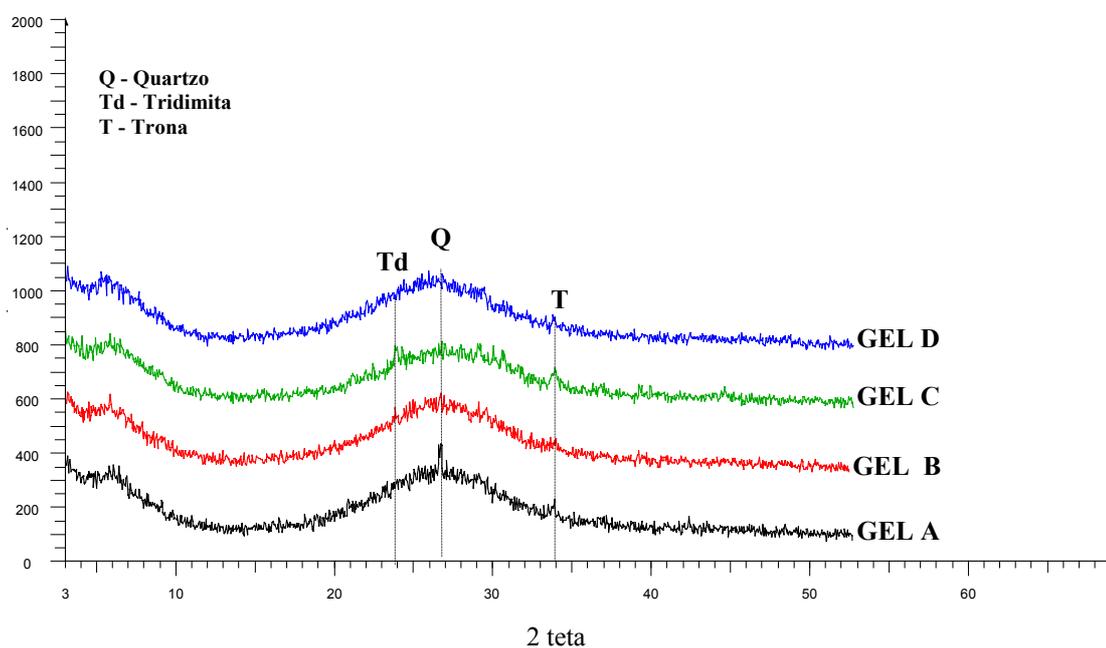


Figura 176: Difratograma de raios X das amostras de gel A, B, C e D.

Observa-se a partir dos difratogramas apresentados que os géis analisados são bastante semelhantes. A forte reflexão observada nos géis em 2 teta de 26° é compatível com os silicatos amorfos, e que normalmente surge entre 24 e 31° (IMAOKA, HASEGAWA & YASUI, 1983; AOKI *et al.*, 1986). As regiões em 6°, apresentadas nos difratogramas dos quatro géis, representam grandes distâncias interplanares, típicas de espaços entre camadas nos silicatos contendo água. Este comportamento já foi previamente observado por Hou *et al.* (2005) em géis sintéticos que foram hidratados, e mostra o grau de desordem do gel.

Alguns picos foram detectados indicando a presença de algumas fases cristalinas, sendo a maioria associada a uma fase rica em sódio, a trona, representando um carbonato de sódio

hidratado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Outras fases, porém de forma pouco expressiva, representam o quartzo (podendo ser proveniente do mineral quartzo presente no agregado quartzito) e a tridimita. A trona justifica a presença do álcali sódio encontrado tanto na análise química dos géis como nas fases cristalizadas pelo MEV. Este composto já foi observado em outros estudos envolvendo a RAA por Hasparyk *et al.* (2002). Porém, por difração de raios X não foi encontrada nenhuma fase cristalizada contendo nem o elemento potássio (que representa a maior parcela de álcalis presente nos géis) e o silício, indicando que estes elementos se encontram associados à fase amorfa do gel, como foi observado por microscopia eletrônica no gel maciço.

As análises por difração de raios X também foram realizadas para a amostra de gel A após exposição à solução de nitrato de lítio/hidróxido de sódio na relação molar de 0,74. O difratograma apresentado na Figura 177 mostra as possíveis fases presentes na amostra de gel A atacado.

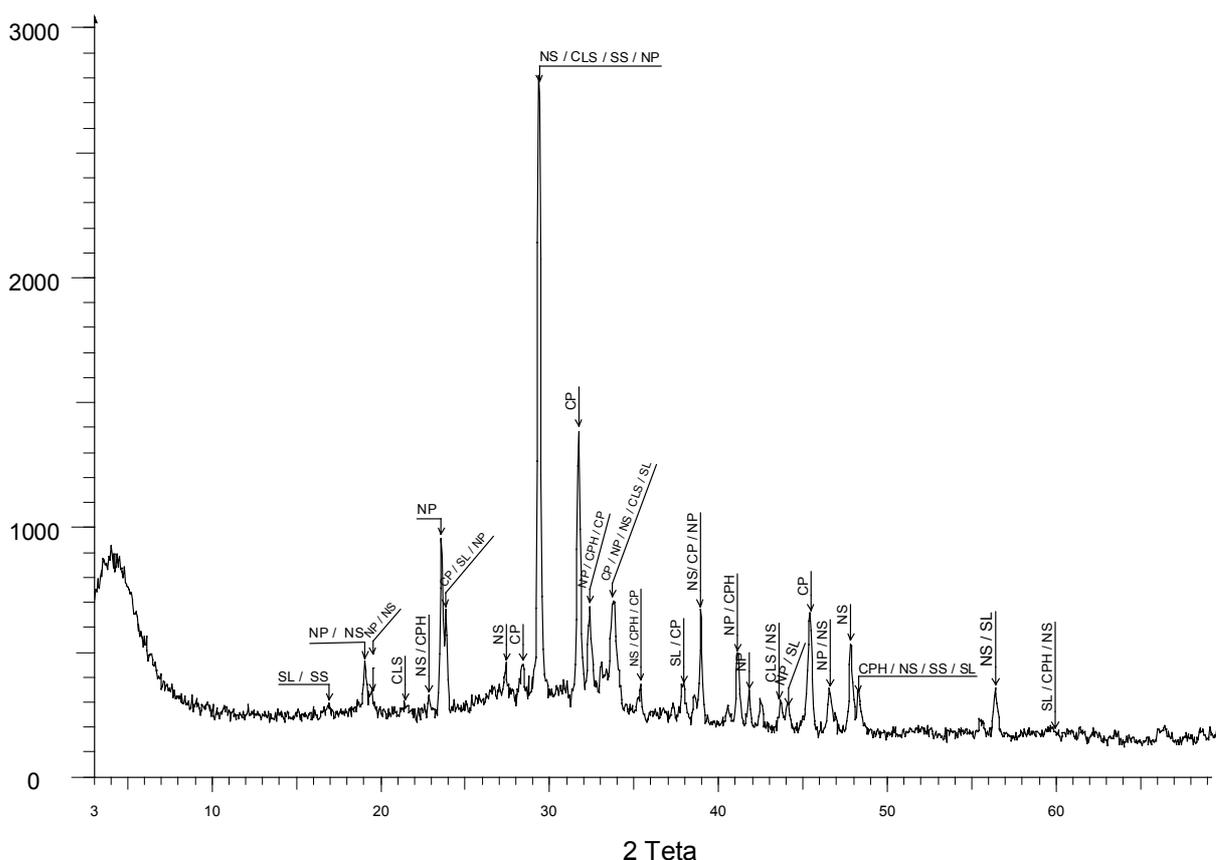


Figura 177: Difratograma de raios X da amostras de gel A atacado.

Onde SL=silicato de lítio; NP=nitrato de potássio; CP=carbonato de potássio; CPH=carbonato de potássio hidratado; SS=silicato de sódio; NS=nitrato de sódio; CLS=carbonato de lítio de sódio.

A Figura 178 mostra os difratogramas dos géis puro e atacado com objetivo de verificar as diferenças entre as amostras.

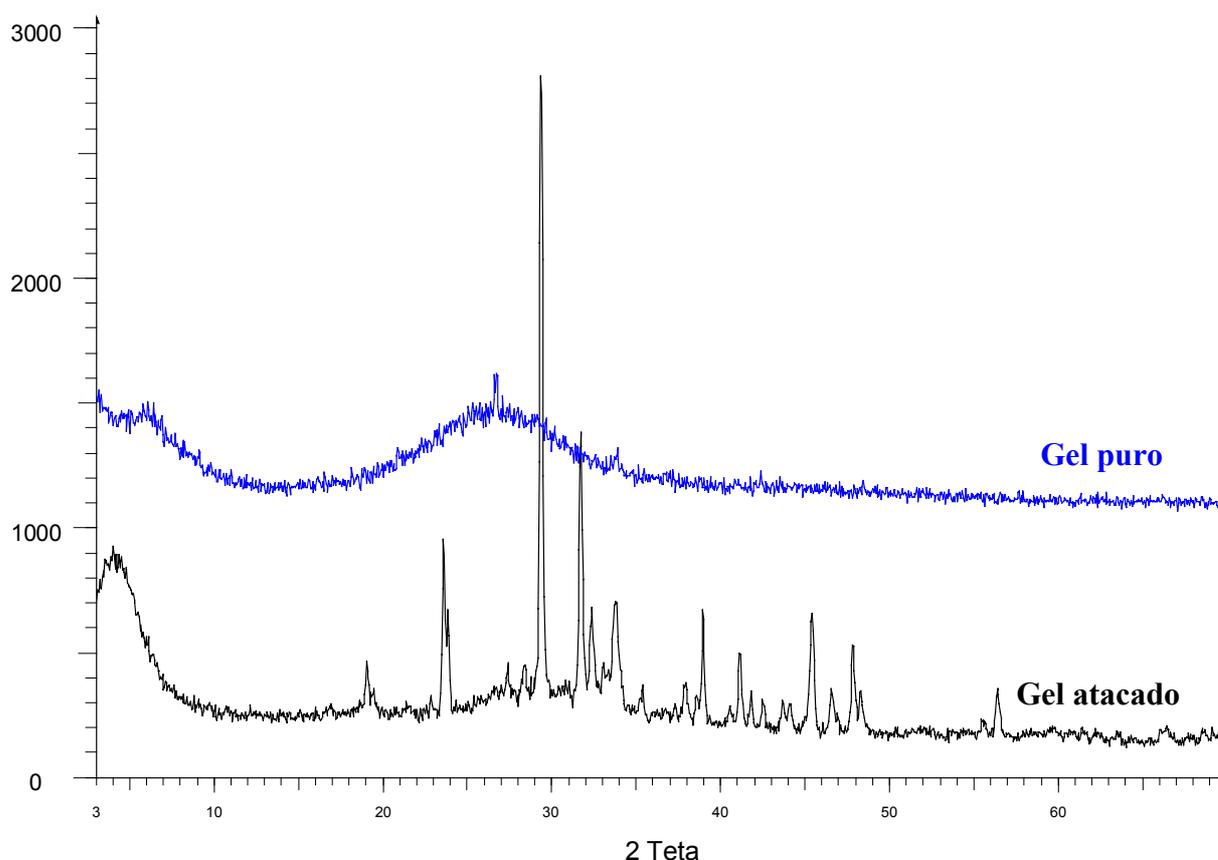


Figura 178: Difratograma de raios X das amostras de gel A puro e gel A atacado.

Observa-se através da Figura 178 uma configuração do difratograma bastante diferenciada do gel atacado (submetido em solução de $\text{LiNO}_3:\text{NaOH}$) quando comparado com o gel puro. Praticamente a banda amorfa centralizada em 2 teta cerca de 26° foi mascarada ou eliminada pelo surgimento de muitas fases cristalizadas, mostrando alterações no gel quando exposto à solução de lítio/sódio.

As fases presentes no gel atacado, verificadas a partir da Figura 177, representam compostos neoformados e provavelmente derivados a partir de reações químicas que ocorreram ou entre

o gel e a solução ou entre os próprios reagentes usados no ataque, representando, possivelmente, os seguintes compostos a partir da análise de suas distâncias interplanares: silicato de lítio, nitrato de potássio, carbonatos de potássio, silicato de sódio, nitrato de sódio e carbonato de sódio e lítio. Porém considera-se que estudos adicionais devem ser realizados para se confirmar a presença destes compostos.

Com o objetivo de descartar qualquer possibilidade de picos associados aos reagentes utilizados no ataque do gel, foram analisados também o LiNO_3 e o NaOH (Apêndice L), não sendo observada nenhuma coincidência de picos destes reagentes com o difratograma do gel atacado.

Mitchell, Beaudoin & Grattan-Bellew (2004), em seus estudos por difração de raios X, também indicaram a presença de picos ao estudar o efeito do lítio na reação álcali-sílica, sugerindo um novo produto cristalizado formado. Nas pesquisas realizadas por Tremblay *et al.* (2004), ao estudar o efeito do lítio quando em contato com agregados reativos, os pesquisadores observaram, por difração de raios X, que após o tratamento havia a formação de um silicato de lítio, indicando que a sua formação era responsável pelo desempenho do LiNO_3 no combate a RAA.

Adicionalmente, a possível presença de compostos neoformados contendo potássio (nitrato de potássio, carbonato de potássio) sugere que o gel tenha perdido certa quantidade deste elemento da sua estrutura, através de troca com o lítio. Isto pode mostrar o possível efeito dos íons de lítio na estrutura do gel quando exposto à solução.

7.11. ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO

Os espectros de transmitância de infravermelho relativos aos números de onda (cm^{-1}), obtidos no gel puro e no gel após exposição à solução de 0,74M de $\text{LiNO}_3/\text{NaOH}$, encontram-se apresentados nas Figuras 179 e 180. Observa-se, a partir dos espectros obtidos, que a configuração do espectro do gel exposto à solução de lítio é alterada para alguns números de onda, principalmente nas bandas de 800 cm^{-1} a 1350 cm^{-1} .

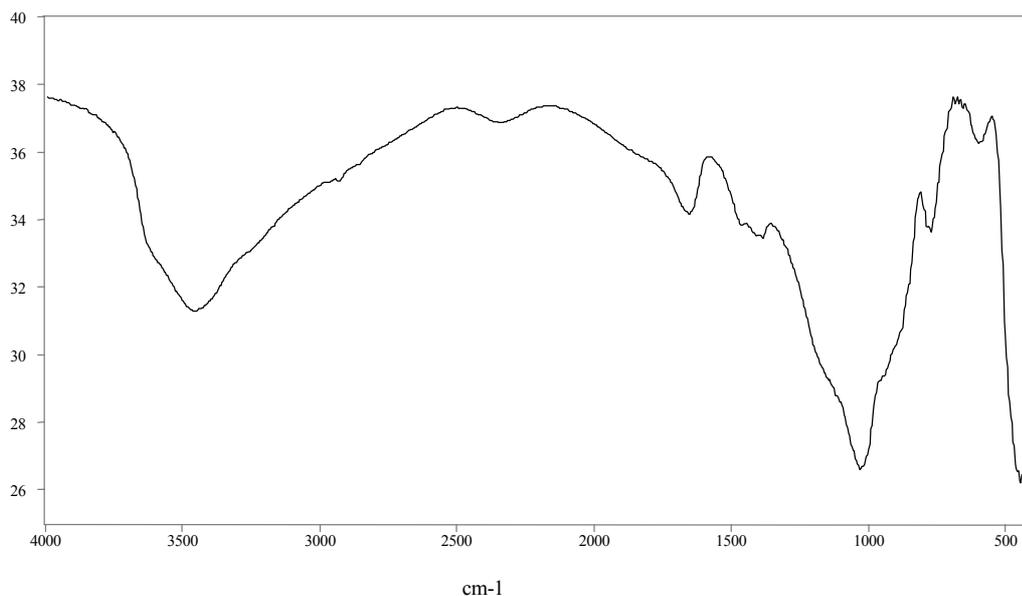


Figura 179: Espectro de transmitância de infravermelho do gel puro.

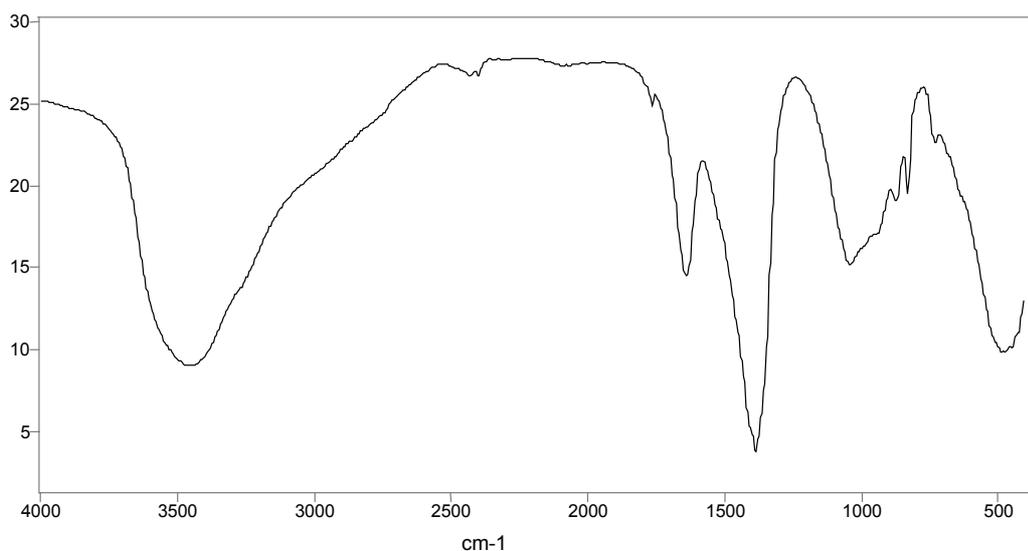


Figura 180: Espectro de transmitância de infravermelho do gel, após exposição à solução de lítio/sódio.

As interpretações das bandas obtidas pela espectroscopia no infravermelho tiveram como referência dados apresentados por alguns pesquisadores na literatura coletados a partir de (HANNA & SU, 1964; FERRARO & MANGHNANI, 1972; UCHINO *et al.*, 1989; RICOL & VERNAZ, 1997; SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000, TAKADAMA *et al.*, 2001, SILVA, 2001, GHOSH, 2001, SUTTER *et al.*, 2005).

As bandas comuns relativas aos dois espectros analisados (gel puro e gel atacado) e suas prováveis atribuições foram:

- 2300 a 3600 cm^{-1} : vibração de estiramento de X-OH (X=Si, H), atribuída ao OH;
- 1642 a 1660 cm^{-1} : banda gerada pela vibração de deformação da água (H_2O);
- 1037 cm^{-1} : vibração de estiramento simétrico da ligação Si-O;
- 457 e 600 cm^{-1} : banda gerada pela vibração de deformação da ligação O-Si-O;

As bandas apresentadas a seguir são exclusivas das amostras de gel puro, não sendo portanto encontradas no gel atacado:

- 1470 cm^{-1} : banda causada pela vibração do ânion CO_3^{-2} (carbonatos);
- 1154 cm^{-1} : vibração de estiramento assimétrico da ligação O-Si-O;
- 953 cm^{-1} : vibração de estiramento do Si-O- X^+ (X=íons alcalinos como K e Na);
- 783 cm^{-1} : vibração de estiramento simétrico da ligação O-Si-O;

É importante comentar que não é possível distinguir por infravermelho o $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ e $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ por absorverem radiação na mesma região, sendo assim, a banda em 953 cm^{-1} é atribuída tanto às espécies Si-O-Na como Si-O-K (UCHINO *et al.*, 1989; TAKADAMA *et al.*, 2001; SERRA *et al.*, 2003).

Já as seguintes bandas são particularidades da amostra de gel, após exposição com a solução de lítio, ou mesmo mudanças de banda com atribuições semelhantes ao do gel puro:

- 1381 cm^{-1} : nova banda gerada provavelmente pela vibração dos nitratos (NO_3), uma vez que a solução contém nitrato e o gel puro não possuía, podendo estar atribuída a um nitrato de sódio;
- 937 cm^{-1} : banda atribuída à vibração de estiramento do Si-O- X^+ (X=íons alcalinos como K, Na ou possivelmente o lítio incorporado), apresentando-se deslocado em relação à banda desta natureza do gel puro (953 cm^{-1});
- 873 cm^{-1} : banda causada provavelmente pela vibração do ânion CO_3^{-2} (provavelmente dos novos carbonatos formados após o ataque). Esta banda não existia no gel puro;

- 827 cm^{-1} : vibração relativa provavelmente ao estiramento simétrico da ligação da O-Si-O;
- 729 cm^{-1} : vibração podendo ser atribuída ao estiramento simétrico da ligação O-Si-O, e apresentando-se deslocado em relação à banda desta natureza do gel puro (783 cm^{-1}) ou ao ânion CO_3^{-2} ;
- 483 cm^{-1} : banda gerada pela vibração de deformação (no plano) da ligação O-Si-O;

As bandas de absorção situadas entre 1100 e 1200 cm^{-1} retratam a sílica vítrea (HANNA & SU, 1964; SERRA *et al.*, 2003) confirmando o caráter vítreo do gel puro, conforme resultados já obtidos e confirmados por difração de raios X. Quando o material (neste caso o gel) se encontra combinado com íons alcalinos, normalmente o número de onda relativo a esta fase apresenta-se menor, conforme observado para as duas amostras de gel analisadas no infravermelho (1037 cm^{-1}). Isto pode ocorrer em função do decréscimo na constante de força das ligações associada à formação da ligação iônica.

Uma vez que o gel contém água sorvida¹ na sua estrutura, demonstrando seu caráter expansivo, pode ser observada a sua presença nas bandas de 1660 cm^{-1} e na região de 2200 a 3600 cm^{-1} (SILVERSTEIN & WEBSTER, 2000; GHOSH, 2001). A banda em 1470 cm^{-1} presente no gel puro, ainda que proporcionalmente pequena, indica a presença de carbonatos no gel, provavelmente relacionado à trona, produto este já constatado por difração de raios-X.

É interessante comentar a respeito da faixa de número de onda entre 800 cm^{-1} a 1350 cm^{-1} , convertendo o espectro de unidades de transmitância para unidades de absorbância ($A = -\log T$) com o objetivo de visual melhor os detalhes apresentados (sendo mais comumente apresentada na literatura para materiais desta natureza). As Figuras 181 e 182 registram estas diferenças.

¹ O termo água sorvida está relacionado com a associação da água absorvida e adsorvida conjuntamente uma vez que não se pode separar com certeza os dois tipos de água (BIKERMAN, 1970); a água adsorvida representa a água interfacial, ou seja, aquela que se encontra na superfície do sólido podendo ser ligada fisicamente e regida por forças de van der Waals (fissorção) ou ligada quimicamente (quimissorção); já a água absorvida se refere à água que penetra e se fixa no interior de um sólido (ADAMIAN & ALMENDRA, 2002).

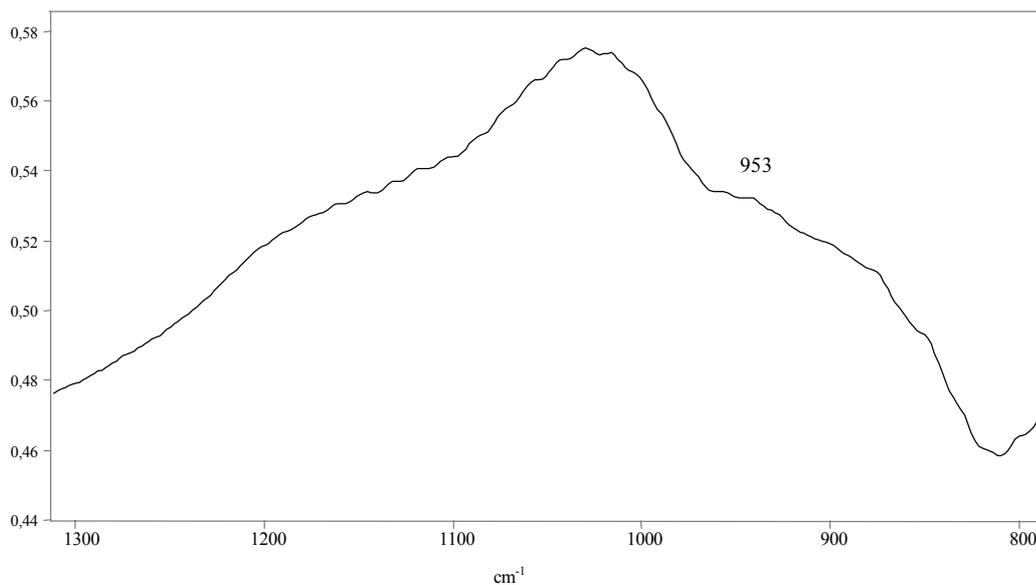


Figura 181: Ampliação da região de número de onda entre 800 e 1300 cm⁻¹ do espectro de infravermelho do gel puro. Espectro convertido para unidades de absorvância.

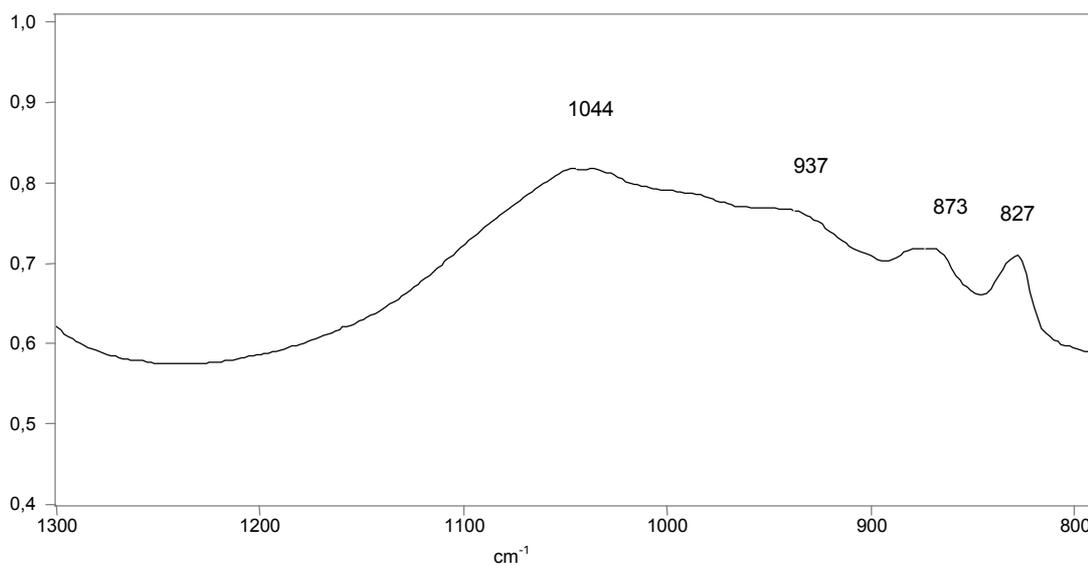


Figura 182: Ampliação da região de número de onda entre 800 e 1300 cm⁻¹ do espectro de infravermelho do gel após exposição ao lítio. Espectro convertido para unidades de absorvância.

Analisando a Figura 181 referente ao gel puro, e fazendo uma analogia aos vidros contendo álcalis potássio e sódio apresentados na literatura (SANDERS, PERSON & HENCH, 1974), observa-se a semelhança dos espectros (ver Figura 183).

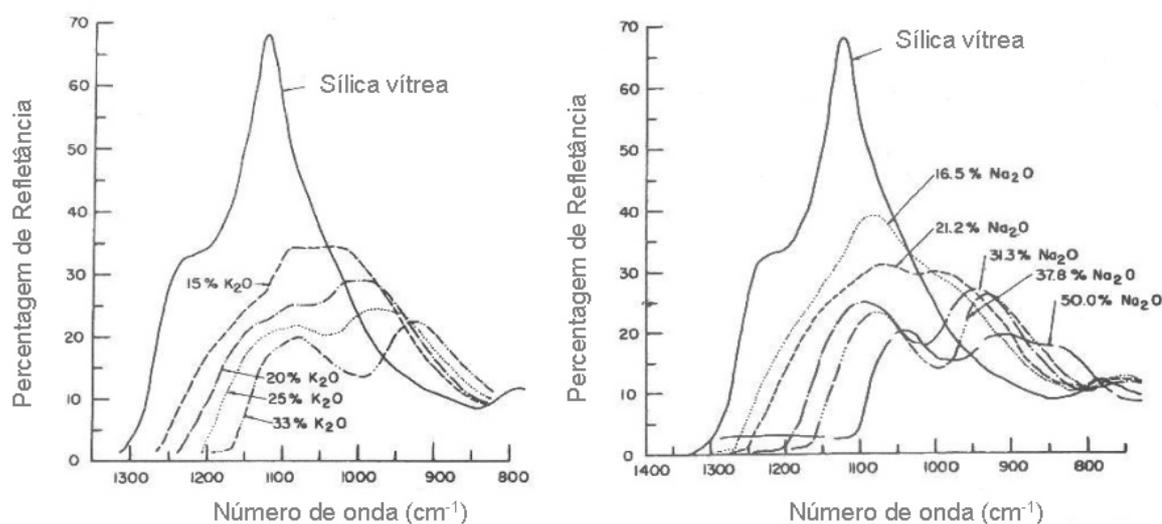


Figura 183: Regiões entre 800 e 1400 cm^{-1} de espectros de infravermelho, obtidos na literatura (SANDERS, PERSON & HENCH, 1974) de vidros contendo K_2O e Na_2O em diferentes porcentagens molares na composição.

Porém, apesar das similaridades do gel com os vidros, a banda referente à sílica (no valor de 1037 cm^{-1}) apresenta-se deslocada e em menor número de onda quando comparada com os vidros. Já a banda do gel puro refere-se ao ombro em 950 cm^{-1} . Geralmente a sílica vítrea se encontra em 1100 cm^{-1} e o ombro, nos vidros contendo sódio ou potássio, ocorre entre 900 cm^{-1} e 1000 cm^{-1} .

Fazendo agora uma analogia entre o gel submetido à solução de $0,74\text{M}$ de $\text{LiNO}_3/\text{NaOH}$, o gel puro e o vidro, observam-se modificações bastante importantes no espectro em absorvância, no seu formato, havendo desdobramentos e alargamento da banda. Verifica-se, por exemplo, que o ombro de 937 cm^{-1} se encontra deslocado em relação ao gel puro e aos vidros. Já o ombro apresentado em 827 cm^{-1} apresenta-se bem definido (enquanto no gel puro não era facilmente detectado, mas aparece para o vidro contendo sódio na literatura) estando provavelmente relacionado à incorporação do sódio na estrutura do gel em função da exposição à solução alcalina. Em relação ao pico em 873 cm^{-1} , que não existia no gel puro e nem no vidro, supõe-se a presença de carbonatos ou a incorporação dos íons lítio na estrutura do gel provocando alterações nas ligações da sílica criando este novo ombro, sugerindo a possibilidade da modificação estrutural do gel na presença do lítio. Os espectros apresentados na Figura 182 mostram os ombros que surgem à medida que os teores de álcalis aumentam.

Estas modificações/inserções de novas fases/ligações também foram notadas através de difração de raios-X e ressonância nuclear magnética no gel atacado.

Uma outra possibilidade interessante a partir das análises por infravermelho é a de permitir uma avaliação quantitativa de álcalis em vidros. Observa-se na Figura 183 um desdobramento das bandas na região de 900 a 1100 cm^{-1} à medida que a concentração dos álcalis aumenta e uma diminuição da intensidade da banda na região de 900 cm^{-1} e o seu deslocamento para valores mais altos de número de onda, à medida que a concentração de álcalis diminui, fazendo com que esta banda se sobreponha à banda que absorve em 1100 cm^{-1} .

Analisando o vidro em uma proporção molar de 15% de K_2O (Figura 183), por exemplo, observa-se o surgimento da banda em aproximadamente 1000 cm^{-1} , em uma intensidade bem menor e já na forma de “ombro”. Já em proporções maiores (18%) como, por exemplo, no gel da reação álcali-sílica (RAS) a banda surge deslocada, na região de 950 cm^{-1} , do tipo ombro e de intensidade bem menor do que a banda em 1000-1100 cm^{-1} .

Portanto, a partir dos resultados obtidos na espectroscopia por infravermelho, pode-se caracterizar o gel da RAS como um silicato hidratado de potássio e/ou sódio, possuindo alguma semelhança com os vidros apresentados na literatura. Já o gel submetido à solução de lítio, apesar das semelhanças com o gel puro e os vidros, e mantendo-se ainda um silicato, apresenta-se com a inserção de outras bandas relativas às novas ligações/alterações geradas a partir do ataque químico promovido.

7.12. ESPECTROMETRIA DE RESSONÂNCIA NUCLEAR MAGNÉTICA

Os espectros de RNM do silício (^{29}Si) gerados a partir das análises por espectrometria de ressonância magnética dos quatro géis (A, B, C e D) estão apresentados na Figura 184. As linhas pontilhadas representam ajustes feitos pelos mínimos quadrados (através do Software Peakfit, versão 4 for Win32) a partir dos dados experimentais dos desvios químicos obtidos para cada espécie de Q^n através de distribuição Gaussiana.

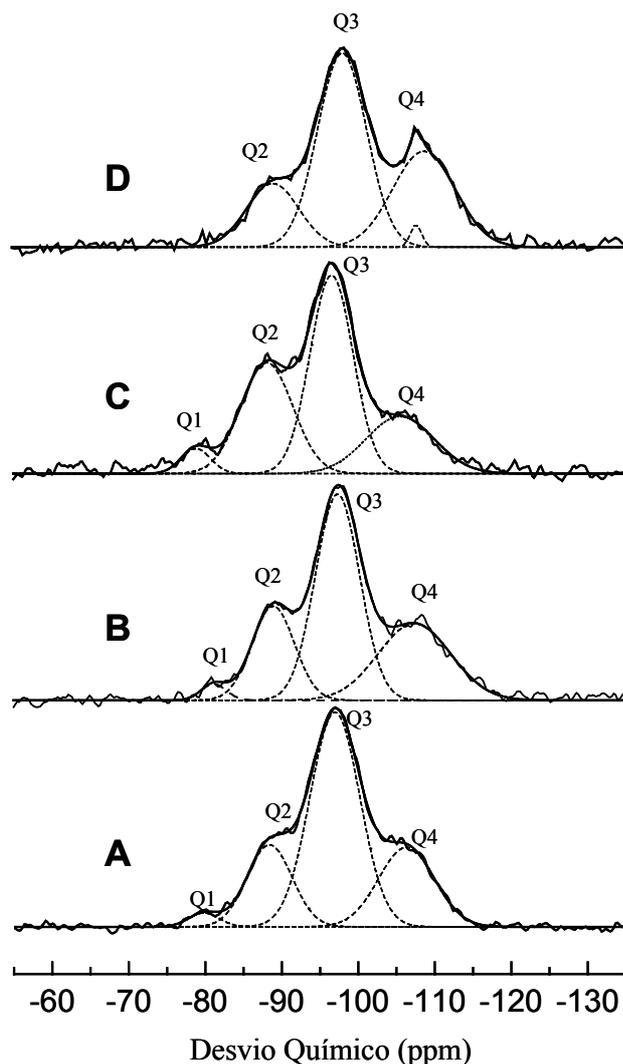


Figura 184: Espectros de RNM do ^{29}Si referentes aos quatro géis.

Observam-se vários picos alargados típicos de uma distribuição de valores de desvios químicos causados por desordem estrutural. Estes picos são atribuídos, na literatura (KIRKPATRICK, 2001, ENGELHARDT & MICHEL, 1987), às vizinhanças dos diferentes tetraedros da sílica nos silicatos. O símbolo Q^n identifica o grau de conectividade do silicato (Si-O-Si), e n corresponde ao número de pontes de oxigênio (*Non-Bridging Oxygens*) - NBO. A Figura 185 ilustra, de forma esquemática, as ligações da sílica para os vários grupos Q^n .

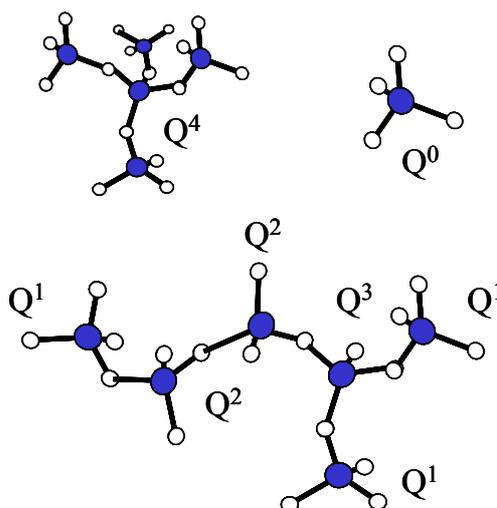


Figura 185: Representação esquemática dos grupos Q^n .

(Fonte: Schneider, 2005)

Os centros dos picos em aproximadamente -79 ppm, -88ppm, -97ppm e -106ppm representam os grupos Q^1 , Q^2 , Q^3 e Q^4 , respectivamente. Q^4 representa a unidade com maior grau de conectividade enquanto as demais (afastadas entre si cerca de 10 ppm) mostram menos pontes de oxigênio (NBO) (ENGELHARDT & MICHEL, 1987). É interessante observar que a amostra de gel D difere um pouco das demais, apresentando dois picos em Q^4 , sendo um correspondente aos sítios de silício amorfo no gel, também observado nos demais géis (A, B e C), e outro representando o quartzo cristalino ou uma sílica menos reativa (SHERRIF, GRUNDY & HARTMAN, 1991).

O número médio de NBO por tetraedros silicatos pode ser calculado a partir da fórmula 15 a seguir (SHELBY, 1997):

$$4 \times I(Q_0) + 3 \times I(Q_1) + 2 \times I(Q_2) + 1 \times I(Q_3) + 0 \times I(Q_4) \quad (15)$$

Onde $I(Q_i)$ representa a fração de tetraedros do tipo Q_i , (número de Q_n / número total de tetraedros) que é diretamente proporcional à área embaixo do sinal de RMN correspondente (intensidade integrada da linha de RMN).

As intensidades relativas (**I**), calculadas a partir do ajuste Gaussiano para cada desvio (Q^4), os **NBO** e as larguras espectrais, que representam as larguras dos picos a meia altura, (**FWHM**) encontram-se apresentados na Tabela 57.

Tabela 57: Informações sobre os espectros ^{29}Si dos 4 géis A e A atacado.

Gel	Q ₁			Q ₂			Q ₃			Q ₄			NBO
	δ (ppm)	I (%)	FWHM (ppm)										
A	-79,8	2	5	-88,4	19	7	-96,9	56	8	-106,3	23	9	1,01
B	-81,1	2	4	-88,8	21	6	-97,3	48	7	-107,3	29	11	0,96
C	-78,8	4	4	-88,0	30	8	-96,5	45	6	-105,5	21	10	1,18
D	-	-	-	-88,8	17	7	-97,8	50	7	-108,5	32	10	0,86
										-107,5	1	3	

De acordo com os resultados do ^{29}Si , o gel pode ser considerado um silicato com estrutura desordenada, contendo tetraedros com diferentes graus de conectividade e distorções estruturais. Em relação ao número de NBO, este parâmetro pode auxiliar na estimativa quantitativa do grau de polimerização do silicato. De acordo com a Tabela 57, os géis A, B e C apresentam semelhanças, com predominância do grupo Q³, estando de acordo e validando a teoria da dupla camada proposta por Prezzi *et al.*, (1997, 1998). Já em relação à amostra D, o menor valor de NBO indica uma maior polimerização da sílica deste gel.

Fazendo uma analogia aos vidros silicatos alcalinos, mais especificamente aos potássicos apresentados por Maekawa *et al.* (1991), onde se tem intensidades iguais a 51% e 49%, respectivamente para os grupos Q³ e Q⁴ e NBO igual a 0,51, verifica-se que os géis possuem um menor grau de polimerização (NBO aproximadamente 1). Adicionalmente, as diferenças observadas nos valores dos desvios químicos indicam diferenças nas vizinhanças das espécies analisadas.

Os espectros de RNM do sódio (^{23}Na) gerados a partir das análises por ressonância magnética dos 4 géis (A, B, C e D) estão apresentados na Figura 186.

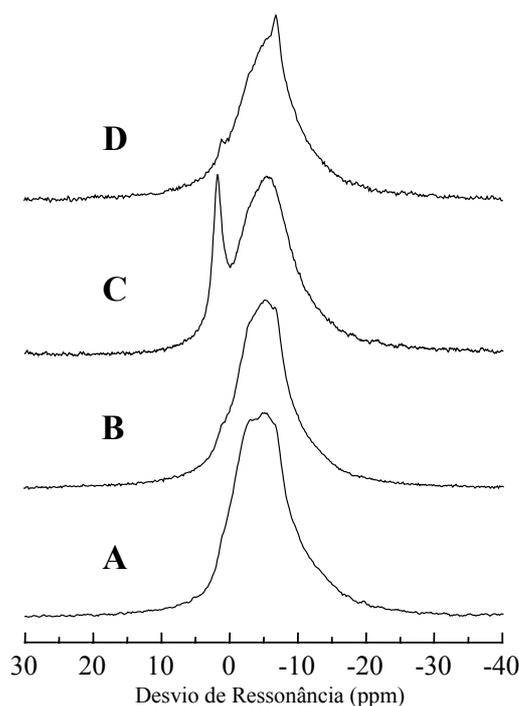


Figura 186: Espectros de RNM do ^{23}Na referentes aos quatro géis.

Os valores dos desvios químicos principais e a largura dos picos a meia altura (FWHM) para o ^{23}Na encontram-se apresentados na Tabela 58.

Tabela 58: Desvios químicos e largura dos picos dos géis A, B, C e D para o ^{23}Na .

Gel	δ (ppm)	FWHM (ppm)
A	-4,6	8,1
B	-5,2	8,4
C	-5,3	8,7
D	-6,4	9,2

Observa-se que os espectros dos quatro géis apresentam-se semelhantes, com desvio químico principal aparecendo entre -4,6 a -6,4ppm, com pequeno aumento no seu valor (do gel A para D) e largura da banda, mostrando que para este núcleo ^{23}Na , o composto presente possui as mesmas ligações, representando provavelmente o mesmo tipo de fase nas amostras analisadas, sugestivo da trona (carbonato de sódio hidratado), conforme também verificado por DRX. A única diferença ocorre em relação ao pico verificado em 1,7 ppm, principalmente na amostra de gel C (com baixo FWHM e igual a 1,6). A quantidade desta espécie corresponde a

aproximadamente 15% de intensidade no gel C e menos do que 4% nas amostras de gel B e D, não sendo detectada no gel A. Esta espécie poderia estar relacionada a duas atribuições, sendo uma relacionada a um cristal contendo sódio hidratado e a outra ao sódio presente na própria estrutura do gel amorfo. Entretanto, a baixa abundância desta espécie não permite uma clara identificação da sua origem.

Em relação ao gel atacado (submetido à solução de 0,74M de $\text{LiNO}_3:\text{NaOH}$), verifica-se alterações importantes nos espectros medidos. O espectro de RNM do silício (^{29}Si) gerado para o gel atacado está apresentado na Figura 187. As linhas pontilhadas representam ajustes feitos pelos mínimos quadrados (*Software Peakfit*) através de distribuição Gaussiana.

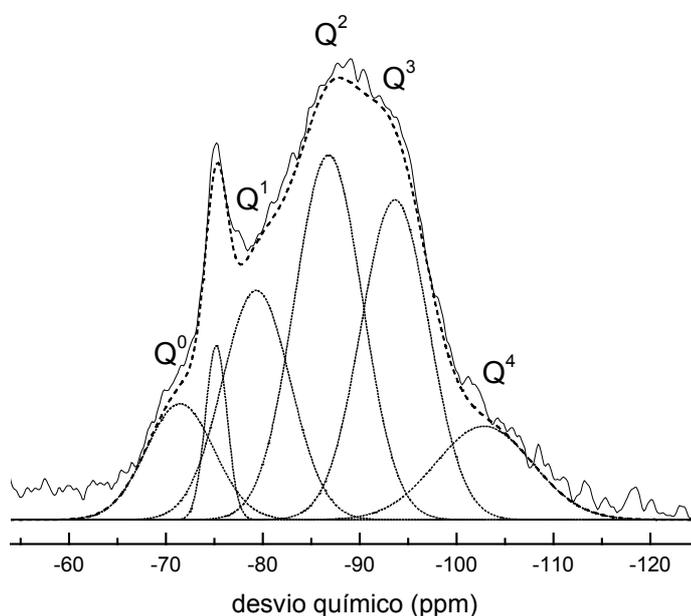


Figura 187: Espectros de RNM do ^{29}Si referente ao gel A atacado com lítio.

Na Figura 188 está apresentado juntamente o espectro do ^{29}Si do gel A puro e atacado com o objetivo de se notar as diferenças obtidas.

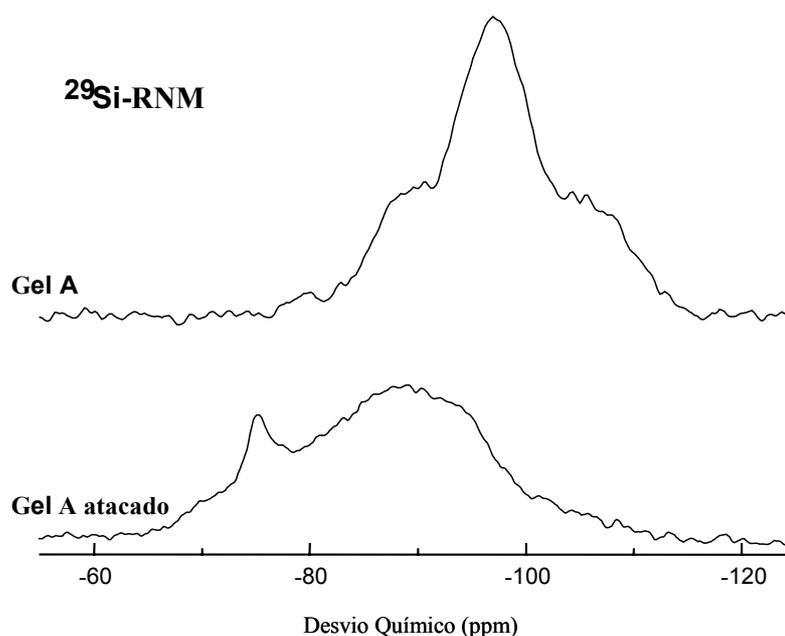


Figura 188: Comparação entre os espectros de RNM do ^{29}Si do gel A puro e gel A atacado.

As intensidades relativas (I) calculadas a partir do ajuste Gaussiano para cada desvio (Q^4), a largura a meia altura (FWHM) do gel A puro e gel A atacado encontram-se apresentados na Tabela 59.

Tabela 59: Informações sobre os espectros ^{29}Si dos géis A e A atacado.

Gel	Q_0			Q_1			Q_2			Q_3			Q_4		
	δ (ppm)	I (%)	FWHM (ppm)	δ (ppm)	I (%)	FWHM (ppm)	δ (ppm)	I (%)	FWHM (ppm)	δ (ppm)	I (%)	FWHM (ppm)	δ (ppm)	I (%)	FWHM (ppm)
A	-	-	-	-79,8	2	5	-88,4	19	7	-96,9	56	8	-106,3	23	9
A Atac.	-71,5	9,5	8	-79,3	19	8	-86,8	30	8	-93,7	26	8	-102,8	11	12

Nota-se a partir dos dados dos espectros um deslocamento dos picos Q^n da amostra de gel atacado para esquerda (valores menos negativos), indicando a presença mais intensa dos grupos Q^1 e Q^2 (e conseqüentemente a redução dos grupos Q^3 e Q^4) e o surgimento do grupo Q^0 , quando comparado com o gel puro. Em relação ao NBO, verificou-se que após o ataque o valor quase dobrou (de 1,01 para 1,89 para o gel A puro e atacado, respectivamente), mostrando numericamente o grau de depolimerização após exposição à solução no ataque. A depolimerização é particularmente interessante neste caso, pois representa uma redução do tamanho médio da cadeia, aumentando assim a velocidade de difusão dos íons lítio dentro dela, mostrando uma estrutura mais dispersa, até com tetraedros Q_0 , sem conexão.

Adicionalmente, outra espécie relacionada provavelmente ao grupo Q^2 surgiu na amostra de gel atacado (em 75,2 ppm), podendo estar atribuída a um silicato com outro tipo de ligação química, ou seja, outro cátion associado (Li ou Na) substituindo o K do gel (Maekawa *et al.*, 1991), como por exemplo, o grupo Q^2 do **silicato de lítio**, que na literatura se apresenta em 74,5 ppm, segundo Magi *et al.* (1984), bastante próximo do encontrado na presente pesquisa. Helmuth (1993) também sugere a formação de um silicato de lítio na presença de compostos a base de lítio, atribuindo a este composto formado um efeito inibidor na RAA. De qualquer forma, a atribuição encontrada no presente estudo ainda teria que ser mais profundamente investigada com outras análises.

Estudos realizados por Mitchell, Beaudoin & Grattan-Bellew (2004) também mostraram que, na presença do lítio, as vizinhanças dos átomos de silício podem variar, indicando a presença de espécies provavelmente correspondentes a uma fase de gel não expansivo.

Com base nos resultados, o comportamento notado é que ao submeter o gel a uma solução composta por lítio e sódio, as ligações da sílica do gel podem ser efetivamente alteradas, conforme observado nos desvios dos grupos Q^n (tanto de intensidade quanto de posição), mostrando a presença de outras espécies e possível combinação destes íons (lítio e sódio) na estrutura do gel através da formação de novos compostos. A proporção de unidades e a estrutura do gel atacado são diferentes do gel puro, sendo o tipo de cátion associado também.

A Figura 189 a seguir mostra o espectro do ^{23}Na dos géis A puro e A atacado.

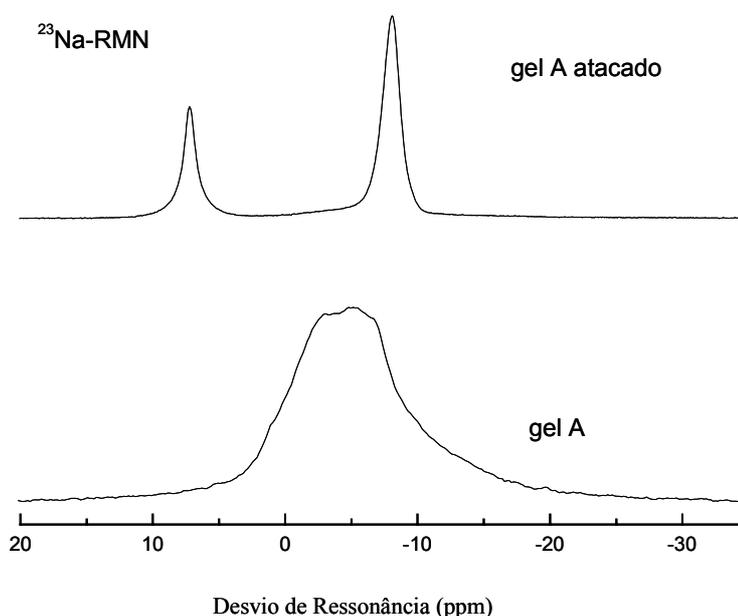


Figura 189: Comparação entre os espectros de RNM do ^{23}Na do gel A puro e gel A atacado.

Verifica-se, a partir das análises de ^{23}Na , que a configuração do espectro do gel atacado apresenta-se bastante diferente do gel puro, com duas fases distintas (7,2ppm e -8,0ppm), refletindo em diferentes ligações químicas presentes no Na, além da já existente anteriormente em aproximadamente -4,6ppm (trona), que aparece na forma de ombro ao lado esquerdo da fase de -8,0ppm, de baixa intensidade, apresentando na amostra um total de três atribuições.

A partir de referências rodadas (ver espectros no Apêndice M) com os reagentes utilizados no ataque do gel como o hidróxido de sódio, e outros possíveis compostos formados após ataque (silicato de sódio e nitrato de sódio), se verifica que a atribuição em -8,1ppm (da referência do nitrato de sódio) representa exatamente o pico da direita neste valor observado na amostra de gel atacado do ^{23}Na . Já as demais referências não são prováveis de estarem presentes na amostra analisada.

Adicionalmente, com base nos espectros do ^{29}Si e no surgimento da outra fase observada a partir da análise em ^{23}Na do gel atacado (pico em 7,2 ppm), é possível que esteja associada ao sódio incorporado na estrutura do silicato do gel, fase esta ainda a ser melhor investigada.

Na Tabela 60 encontram-se desvios químicos, as intensidades relativas e as larguras espectrais encontradas.

Tabela 60: Informações sobre os espectros de ^{23}Na dos géis A e A atacado.

Gel	δ (ppm)	I (%)	FWHM (ppm)
A	-4,6	100	8,1
	-4,6	<8	<i>nd</i>
A Atacado	-8,0	62	1,5
	+7,2	30	1,2

Nota: *nd* => não determinado uma vez que o pico da trona (-4,6ppm) se sobrepõe com o pico em -8ppm, não se pode precisar o valor de FWHM.

No caso do ^7Li analisado no gel atacado e comparado com a referência de nitrato de lítio (Apêndice M), não se verifica a presença do reagente nitrato de lítio na amostra de gel analisada, pois o centro dos picos ocorre em desvios químicos e larguras distintas (+0,25ppm/4,4ppm e -0,25ppm e 0,3ppm para o gel atacado e a referência, respectivamente),

conforme Figura 190. Sendo assim, pode-se dizer que o lítio analisado apresenta-se ligado a outro tipo de atribuição/espécie. Como foi sugerido no espectro do ^{29}Si a presença do silicato de lítio a partir do desvio verificado em 75,2ppm, existe uma possibilidade deste lítio, verificado na análise do ^7Li , ser o incorporado neste silicato de lítio.

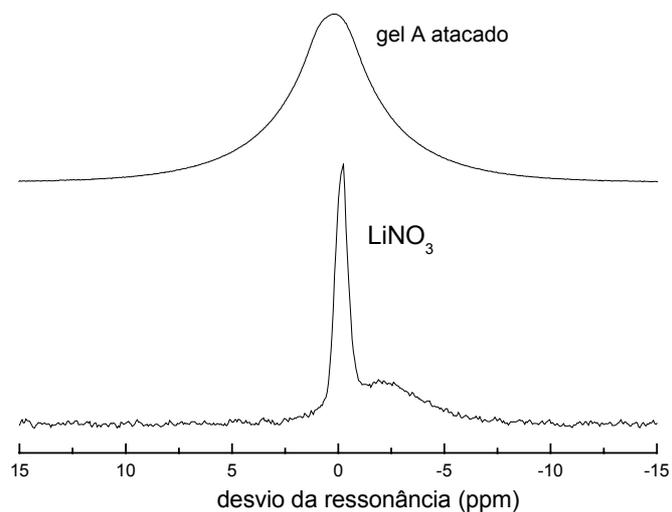


Figura 190: Comparação entre os espectros de RNM do ^7Li do gel A atacado e da referência LiNO_3 .

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. CONCLUSÕES

Neste item estão apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos resultados do programa experimental, sendo válidas para as condições e materiais estudados. Serão apresentadas em forma de item, por assunto em função dos objetivos apresentados.

8.1.1. Reatividade do agregado quartzito

O quartzito proveniente da região da UHE Furnas é um agregado com grande potencialidade reativa, do ponto de vista da reação álcali-sílica. Os minerais responsáveis pela sua alta reatividade são os cristais de quartzo bastante tensionados com contatos suturados e os grãos de quartzo estirados alinhados com as micas, em função da intensa deformação tectônica sofrida pela rocha de origem, aliados à fina granulometria da matriz de quartzo (quartzos microgranulares). No que diz respeito ao parâmetro extinção ondulante, este não foi possível de ser medido em função tanto do alto grau de deformação da rocha como dos contatos suturados, impedindo assim sua determinação com precisão e reprodutibilidade. A fina granulometria da matriz também dificultou a sua medida. Todavia, o desenvolvimento da orientação preferencial da mica, responsável pela foliação da rocha, pode ser o principal fator relacionado à sua reatividade, não sendo possível de ser investigada a análise de textura da rocha na presente pesquisa.

A reação expansiva causada pelo quartzito foi considerada do tipo álcali-sílica, sendo as expansões determinadas em argamassas através do método acelerado bastante elevadas, chegando em média a 0,24% e 0,39% aos 16 e 30 dias, respectivamente, superando os limites da norma (0,10 e 0,20%). Interessante comentar que aos 30 dias as expansões não cessam, mostrando ainda o potencial do quartzito para expandir, através dos minerais deformados presentes, enquanto houver álcalis disponíveis para reagir. Os valores obtidos na idade de 60 dias atingiram, em média, 0,61% de expansão, não apresentando ainda qualquer sinal de estabilização. Nos ensaios em prismas de concreto, o comportamento foi compatível com os

ensaios acelerados, mostrando também crescimento constante das expansões, de forma bastante elevada, e da ordem de 0,09%, superando o limite de 0,04% apresentado por norma.

Os ensaios laboratoriais e análises petrográficas continuam sendo referências para delinear o comportamento reativo dos agregados, sendo observado coerência entre os resultados obtidos na presente pesquisa para o agregado quartzito estudado entre os métodos acelerado em barras de argamassa (ASTM C-1260) e dos prismas de concreto (ASTM C-1293).

8.1.2. Características e comportamento do gel exsudado

O “gel” exsudado é um material rígido semelhante a um vidro, em função das características apresentadas, e por se quebrar quando golpeado. Este gel representa aquele produto da reação álcali-agregado localizado na superfície exposta do concreto, não se referindo aos produtos da reação que são encontrados no interior do concreto.

O gel exsudado apresenta-se com características macroscópicas variadas, porém as características físico-químicas, cristalográficas, microestruturais e atômicas são bem semelhantes, provando ser um silicato de potássio hidratado, com baixa concentração de sódio, contendo também água livre e sorvida. A água quimicamente combinada se apresenta fortemente ligada à estrutura do gel. O material exsudado contém, às vezes, alguns carbonatos precipitados nos seus vazios e na superfície relacionados ao sódio principalmente, denominados trona. O silicato se assemelha, em parte, aos vidros (silicatos alcalinos) em função de apresentar algumas características e propriedades próximas como a densidade, a composição química, a cristalografia, o potencial zeta e a estrutura em nível atômico.

O silicato amorfo possui grande capacidade de expandir por sorção quando exposto à umidade, em ambiente com vapor d'água mantendo a temperatura constante (28°C), podendo atingir 100% de aumento de massa em 40 dias de exposição. Quando simplesmente imerso em água, ocorre a sua dissolução quase por completo. À medida que a temperatura aumenta, em condições normais e fixas de umidade ambiente, o gel vai expandindo gradativamente, apresentando internamente uma estrutura bastante porosa em função principalmente da evaporação de água presente. Em temperaturas bastante elevadas, acima de 1000°C, o gel passa para o estado elastomérico sendo, portanto moldável. O coeficiente de expansão térmica

volumétrico do gel analisado, determinado para uma variação de temperatura igual a 22°C, representou valor bastante elevado e expressivo, da ordem de $3,5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

A determinação do potencial zeta do silicato amorfo, em diferentes pHs, permitiu um melhor entendimento do seu comportamento expansivo e, conseqüentemente dos mecanismos de expansão envolvidos na reação, a partir da teoria da dupla camada elétrica. O potencial zeta indicou uma tendência de estabilização em pHs a partir de cinco (como normalmente observado para os vidros), chegando, em média, a cerca de -40mV, podendo considerar para este valor baixa estabilidade das partículas de gel em suspensão. Como normalmente não ocorrem grandes variações no potencial zeta, uma vez atingindo este patamar, acredita-se que no pH do concreto, e em condições normais, o silicato se apresentará afastado do ponto isoelétrico, refletindo em maiores forças de repulsão na dupla camada, justificando o seu elevado caráter expansivo. O ponto isoelétrico determinado para o silicato ocorreu em pH bastante baixo, e ácido (pH=2,8), sendo a condição ideal para minimizar as forças eletrostáticas existentes uma vez que, neste ponto, ocorre a coagulação das partículas e conseqüentemente a redução da espessura da dupla camada elétrica e as expansões geradas. Sendo assim, uma solução para inibir o comportamento expansivo do gel seria através da acidificação do meio em que ele se encontra, porém, não se torna uma condição possível de ser considerada em virtude de afetar negativamente o concreto através da desestabilização de seus hidratos por um eventual ataque ácido. Além disto, com a redução expressiva de pH pode ocorrer a despassivação da armadura e, no caso de um concreto armado, comprometer a sua estabilidade. Ou seja, ao resolver o problema da reação álcali-agregado outros seriam gerados.

Quando o silicato amorfo (gel exsudado) é submetido a uma solução à base de lítio (0,74M de $\text{LiNO}_3\text{:NaOH}$), o material resultante possui características físico-químicas, cristalográficas e estruturais em nível atômico bem distintas do gel puro, conforme resultados obtidos por difração de raios x, espectroscopia no infravermelho e por ressonância nuclear magnética. São formadas fases cristalizadas decorrentes efetivamente da reação do silicato potássico (gel) com os reagentes em solução, destacando o desprendimento do potássio ligado ao gel para formar novos produtos sugestivos do nitrato de potássio e carbonato de potássio. Existe também a possibilidade da formação do silicato de lítio, produto este cristalizado, mostrando a fixação dos íons lítio na estrutura do gel. De qualquer forma é fato que o lítio é capaz de afetar a estrutura do gel, quando em solução, indicando sua depolimerização, sendo este

comportamento verificado principalmente por ressonância nuclear magnética, através das alterações nas ligações do silício em nível atômico observadas.

O estudo mais aprofundado do gel exsudado, produto da reação, pode auxiliar na investigação de soluções para o combate ou redução das expansões residuais em uma estrutura já afetada.

8.1.3. Comportamento das propriedades dos concretos afetados pela RAA

Os testemunhos estudados extraídos na galeria de drenagem do vertedouro, a partir da definição de três classes distintas do ponto de vista das manifestações patológicas visuais observadas, possuem diferenças nas suas propriedades. A classe definida como 0 representa o concreto extraído no sentido jusante, não apresentando indícios visuais da RAA; já os concretos pertencentes às classes 1 e 2 foram extraídos a montante e se apresentam com manifestações visuais da RAA, sendo a classe 1 menos alterada e a classe 2 mais alterada. A resistência à compressão varia, em média, desde 18 MPa a 28 MPa, sendo os maiores valores obtidos para a classe 1 seguida da classe 2, ambas extraídas à montante, representando a classe 1 de grau de alteração intermediário quando comparada com as demais classes (C0 e C2). Acredita-se que neste estágio de alteração, e devido à formação dos produtos decorrentes da reação, esteja ocorrendo uma colmatção dos poros (verificado pelas inspeções visuais e MEV) aumentando a resistência à compressão, sem prejuízos negativos ainda a esta propriedade.

O módulo de elasticidade dos testemunhos é bastante baixo, variando desde cerca de 5 GPa a 28 GPa. A classe 2, a mais alterada, é a que apresentou os valores mais baixos, confirmando a sua maior deterioração devida à microfissuração da RAA. Já a resistência à tração determinada tanto nos testemunhos de concreto extraídos como nos corpos-de-prova moldados em laboratório não se mostrou sensível à deterioração, apresentando-se dentro da faixa de 8 a 17% da resistência à compressão.

Entre as propriedades estudadas nos concretos moldados, e ensaiados em laboratório, verificou-se também que o módulo de elasticidade foi a propriedade mais afetada no tempo, apresentando valores abaixo da curva teórica de norma, não mostrando, portanto, proporcionalidade com a resistência à compressão. A resistência à compressão aumenta no tempo para os concretos moldados, apresentando, em média, ganhos cerca de 17% em 9

meses (entre 90 e 365 dias) enquanto que o módulo cai aproximadamente 24% para este mesmo período. Pode-se sugerir que, em um curto tempo de ensaio e independente da condição de exposição empregada (câmara úmida a 21°C ou ambiente com elevada umidade a 38°C), já está ocorrendo a deterioração do concreto pela RAA a partir da alta reatividade do quartzito e do cimento com elevado teor alcalino empregado nos concretos (1,32%).

A permeabilidade dos testemunhos de concreto pertencentes às classes 1 e 2 (montante) é ligeiramente menor do que a classe 0 (sem indícios visuais de alteração), mostrando coerência com os dados de resistência à compressão obtidos e sugerindo a menor penetração da água, sob pressão, nos concretos mais atacados em virtude da densificação da matriz a partir da formação dos produtos da RAA e conseqüente colmatação nos poros e capilares. Nos concretos moldados, os coeficientes de permeabilidade determinados indicam, para todos os concretos estudados, permeabilidade muito baixa.

De uma maneira geral, pode-se dizer que as propriedades mecânicas de concretos são efetivamente afetadas pela reação álcali-agregado, sendo que o comportamento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão apresenta-se diferenciado nos concretos estudados. O módulo de elasticidade se mostrou mais sensível aos efeitos da microfissuração causada pela RAA, sendo o primeiro a ser influenciado, e de forma muito mais intensa, e somente depois a resistência à compressão é afetada. Os dados experimentais com os testemunhos de concreto e a sua modelagem permitiram constatar que enquanto o módulo cai, a resistência pode aumentar até atingir um pico a partir do qual passa a cair ao longo do tempo. Durante um tempo equivalente de 35 anos o módulo cai cerca de 46% enquanto que em um primeiro estágio, em 16 anos, a resistência aumenta em até 46% até atingir um ponto máximo e depois cai no tempo. Os modelos mostram que as quedas tanto do módulo como da resistência à compressão, em idades mais avançadas e em torno de 20 anos, chegam a aproximadamente 24%. Deve-se salientar que os tempos e valores aqui apresentados devem ser considerados com cuidado uma vez que se restringem à amostragem realizada para a presente pesquisa e condições de ensaio empregadas, sendo necessária a realização de um número maior de ensaios de forma a validar ou aperfeiçoar os modelos.

8.1.4. Comportamento expansivo dos testemunhos de concreto e corpos-de-prova moldados

Os ensaios de expansão nos testemunhos de concreto extraídos indicam que os agregados presentes ainda possuem minerais potencialmente reativos para reagir e manter a reação por algum tempo, mostrando a existência de expansões residuais. Nas condições de elevada umidade e imersão em água, ambos a 38°C, apesar do nível de expansão ser diferenciado, representando em média para todas as classes de concreto analisadas 0,04% e 0,08%, respectivamente, a tendência é que ocorra estabilização das expansões no tempo avaliado (um ano). Interessante comentar que a condição de elevada umidade à 38°C seria umas das mais próximas da realidade na galeria, destacando que o valor médio encontra-se no limite da norma ASTM C-1293 (0,04%). Já na condição de imersão em NaOH, as expansões não mostram caráter assintótico, crescendo de forma significativa no tempo, chegando a expansões de até 0,18% em um ano. Nesta última condição, a classe de concreto extraída a jusante apresentou menores expansões, da ordem de 0,09% quando comparadas com as classes extraídas a montante (0,15%, em média). A variação nos níveis de expansão apresentados ocorre em virtude da água disponível, da alcalinidade da solução exposta e da presença de gel pré-existente, sendo que a temperatura acelera ainda mais as reações químicas envolvidas.

Em relação às duas primeiras condições avaliadas (elevada umidade e imersão em água), deve-se aqui deixar claro que o nível de expansão atingido não ocorreu devido única e exclusivamente à absorção de água e intumescimento, e sim a um provável efeito combinado da saturação do concreto e sorção do gel formado já existente, mostrando ganhos iniciais bastantes expressivos de expansão. Conforme foi demonstrado no estudo da água adsorvida, sendo corroborado pela literatura, tem-se que dois concretos semelhantes, confeccionados com os mesmos materiais, porém um apresenta a RAA instalada e o outro não, podem absorver a mesma água, contudo gerando diferentes níveis de expansão em função do efeito de sorção do gel aliado à sua expansão térmica. Sendo assim, não se achou pertinente em nenhum momento da pesquisa que fosse descontado qualquer valor de expansão associado apenas à saturação em função dos efeitos poderem estar ocorrendo simultaneamente não sendo, portanto, possível de separá-los de forma precisa.

Nos prismas de concreto de referência moldados em laboratório, e expostos em ambiente de elevada umidade, a 38°C, as expansões apresentaram-se bastante elevadas (0,09%), justificando a alta reatividade do quartzito apresentada nos testemunhos de concreto e, conseqüentemente, as expansões detectadas. Quando os prismas foram tratados com o produto à base de lítio, as expansões médias atingem 0,07% em um ano.

Nos testemunhos de concreto, pertencente à classe 1, ensaiados nas duas condições, uma após tratamento com lítio, sendo imersos em seguida em solução de NaOH e a outra imersos diretamente em solução com concentração molar de 0,74 $\text{LiNO}_3\text{:NaOH}$, as expansões se apresentaram inferiores àquelas obtidas para a condição apenas de imersão em NaOH, chegando a níveis médios de 0,09% e 0,12% em um ano, respectivamente.

O resultados e métodos de expansão residual mostraram-se satisfatórios para delinear o comportamento de um concreto afetado pela RAA. As metodologias empregadas, embora apresentem algumas dificuldades, podem ser utilizadas na investigação de outras estruturas com o mesmo tipo de patologia, desde que sejam tomados cuidados com a condição estudada. Conforme verificado nesta pesquisa, a reação álcali-agregado pode desencadear diferentes níveis de deterioração dependendo da condição em que o concreto se encontra (elevada umidade, imersão em água e imersão em NaOH), portanto não existe regra geral para definir um comportamento, sendo necessários estudos específicos para cada caso ou estrutura, sendo compatíveis com o ambiente no qual ela se encontra.

8.1.5. Avaliação do ensaio ultra-sônico na investigação da RAA

Os resultados apresentados nesta pesquisa indicam que existe uma forte correlação entre as 3 classes de concreto estudadas que se apresentavam deterioradas em diferentes estágios pela RAA e a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, tanto pelo método de transmissão direta como pela transmissão indireta. A classe 2 apresenta velocidades bem mais baixas quando comparada com a classe 0 e 1. Analisando individualmente os testemunhos de concreto, verificou-se que a velocidade ultra-sônica obtida pelo método direto é inversamente proporcional ao nível de alteração da amostra estudada, sendo que à medida que o grau de alteração (ordem do testemunho) aumenta, a velocidade cai de forma expressiva.

Juntamente com o módulo de elasticidade, a velocidade de ondas ultra-sônicas se mostrou mais sensível do que a resistência à compressão aos efeitos da microfissuração causada pela RAA. No que diz respeito às expansões, dependendo da condição estudada, pode haver uma correlação entre a velocidade de ondas ultra-sônicas e as expansões. Os estudos realizados na presente pesquisa com prismas de concreto de referência, moldados em laboratório e expostos às condições da ASTM C-1293, mostraram que à medida que as expansões aumentam a velocidade cai, confirmando a sensibilidade da técnica neste ensaio e a possibilidade de acompanhamento das alterações intrínsecas, principalmente da incidência de microfissuração.

Nos ensaios com os prismas de concreto tratados com lítio, verificou-se também a sensibilidade da técnica uma vez que ao combater a reação, o lítio proporciona alterações em nível microestrutural que foram notadas pelo ultra-som. Neste ensaio de expansão, não se notaram quedas na velocidade durante o ensaio, sendo observado até um certo crescimento nas idades mais avançadas de ensaio, estando compatível com as expansões observadas; quando as expansões estabilizaram pelo efeito do lítio, ao invés da velocidade estabilizar ela aumentou de valor. Este tipo de comportamento apresentou-se bastante inesperado, devendo ser feito um estudo mais aprofundado com o objetivo de esclarecer melhor o comportamento verificado.

Entretanto, já na avaliação das expansões residuais com os testemunhos de concreto, este comportamento não foi observado. Possivelmente o nível de deterioração em que o concreto se encontrava já era bastante elevado e o desenvolvimento de novas expansões não foi expressivo a ponto de permitir que fossem notadas alterações ao nível de ultra-som. Estudos adicionais em testemunhos de concreto deteriorados tornam-se necessários com o objetivo de explicar melhor este comportamento diferenciado. Cabe aqui mencionar que os resultados obtidos na presente pesquisa são considerados válidos, uma vez que todas as determinações foram feitas ao longo do tempo, por um ano, em 36 testemunhos, totalizando 510 leituras com um único operador.

Com base no exposto verifica-se que, dependendo do caso, pode ser possível fazer o uso do ultra-som para avaliar a deterioração do concreto pela RAA. De qualquer forma, é importante sempre mencionar que este tipo de método possui algumas limitações, e que seus resultados podem ser influenciados pela umidade, temperatura, frequência empregada, geometria da peça, presença de armadura, entre outras, devendo-se analisar cuidadosamente cada caso.

Fazendo-se uma avaliação das investigações não destrutivas realizadas nesta pesquisa, verifica-se que a inspeção visual e o ensaio de ultra-som são métodos de investigação bastante interessantes, uma vez que pode existir uma correlação entre eles, as propriedades mecânicas e as expansões do concreto. Verificou-se que o módulo de elasticidade foi a propriedade mais afetada pela RAA, desta forma, o uso do ultra-som mostra-se promissor no estudo da sua deterioração. Porém, investigações adicionais em outras estruturas de concreto tornam-se necessárias para validar esta aplicação. De qualquer forma, além da determinação das propriedades do concreto a partir da extração de testemunhos e das investigações microestruturais e de expansões residuais, estas investigações não destrutivas podem ser ferramentas auxiliares bastante úteis no monitoramento do concreto na reação álcali-agregado, podendo auxiliar na recomendação de eventuais reparos na estrutura.

8.1.6. Microestrutura dos concretos afetados pela RAA

As investigações microestruturais realizadas mostraram-se bastante eficientes no diagnóstico da RAA através da identificação dos minerais reativos e dos produtos característicos formados nos concretos.

Do ponto de vista mineralógico, e por microscopia ótica, os agregados constituintes dos concretos são bastante semelhantes ao quartzito coletado na região da usina, sendo o quartzo deformado e estirado o principal constituinte responsável pela alta reatividade dos agregados empregados nos concretos da usina, além da fina granulometria dos cristais.

Os testemunhos de concreto analisados por microscopia eletrônica de varredura encontram-se com a reação já instalada, uma vez que foi possível identificar os produtos neoformados através das várias fases presentes. Foram visualizadas tanto as fases amorfas, representando o gel maciço gretado, e às vezes botrioidal, como as cristalizadas, constituídas pelos cristais aciculares, rendados ou sob a forma de rosáceas. A composição química de todas as fases indica produtos sílico-cálcico potássicos estando, às vezes, presente o elemento sódio. Portanto, a maioria dos sintomas detectados por inspeção visual representa os produtos da reação visualizados durante as análises no MEV.

A única diferença mais expressiva observada pelo MEV foi a menor incidência destas fases nas amostras pertencentes à classe C0 que representa, por investigações visuais superficiais efetuadas durante a inspeção na galeria de drenagem do vertedouro, o concreto sem indícios

da reação. A classe 2, considerada a mais alterada, foi a que apresentou maior incidência de produtos e morfologias variadas, mostrando resultados bastante compatíveis.

8.1.7. Efeito do lítio na reação álcali-agregado

O efeito do lítio na reação álcali-agregado pode ser benéfico, dependendo das condições empregadas. As expansões residuais nos testemunhos de concreto foram reduzidas na sua presença. Quando os testemunhos de concreto foram previamente tratados com produto a base de lítio, antes do ensaio de expansão em NaOH, as reduções foram expressivas, podendo atingir cerca de 40%, em média, dependendo da classe de concreto avaliada. Em solução com concentração molar de 0,74 $\text{LiNO}_3:\text{NaOH}$, apesar de haver reduções de até 24%, estas foram menores do que na condição anterior. A concentração empregada neste caso talvez não tenha sido a ótima, apesar de várias citações na literatura indicarem este valor, pois cada agregado se comporta de forma distinta, influenciando em diferentes demandas por lítio. Com base nos dados apresentados, pode-se dizer que em uma estrutura de concreto que já se encontra afetada pela RAA, o tratamento com produto a base de lítio pode ser uma alternativa eficiente no combate de futuras expansões residuais que porventura possam ocorrer.

Entretanto, o comportamento do lítio nas expansões geradas em prismas de concreto moldados em laboratório não se mostrou tão eficiente, quando aplicado como tratamento durante o desenvolvimento das expansões, no ensaio até a idade de um ano. Apesar de também haver uma certa redução nas expansões (em média da ordem de 17%), estas não foram tão satisfatórias, podendo não ter ocorrido uma profunda penetração do lítio em virtude da baixa permeabilidade dos concretos observada. De qualquer forma, a incidência de manifestações decorrentes da RAA na superfície dos concretos é notavelmente reduzida nos concretos tratados. Pode ser que o efeito do lítio nas expansões ocorra lentamente, mais em longo prazo, conforme tendência de estabilização das expansões observada aos 365 dias, quando comparada com a referência.

Conclui-se, a partir dos resultados, que o momento da aplicação do tratamento é muito importante, pois dependendo do nível de expansão já atingido, o efeito do lítio pode não ser tão satisfatório ou ser demorado. O número e a duração dos tratamentos também é um fator

determinante para a sua eficiência, e a melhor condição representa aquela na qual existe maior saturação e conseqüente penetração dos íons de lítio no interior do concreto. As possíveis justificativas do efeito benéfico do lítio nas expansões do gel já foram abordadas de forma científica no item 8.1.2.

8.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Em virtude da necessidade de melhor entendimento do comportamento da reação álcali-agregado e de se combater o fenômeno de forma eficaz, são listadas a seguir algumas sugestões para futuras pesquisas, questões ainda não resolvidas ou que necessitam ser mais aprofundadas, destacando:

- a) Estudar as propriedades de concretos afetados pela reação álcali-agregado procedentes de outras estruturas de concreto massa, mas também de concretos armado ou protendido, onde ocorrem mais confinamento das expansões do concreto, com o objetivo de verificar o nível de influência do fenômeno patológico;
- b) Estudar outros agregados brasileiros, principalmente aqueles potencialmente reativos contendo silicatos com quartzo deformado, para verificar se há de fato compatibilidade entre o método acelerado e método dos prismas de concreto;
- c) Ampliar os estudos com emprego de ultra-som no concreto atacado pela RAA, através tanto de método transversal como longitudinal, com vistas à sua aplicação rotineira para monitoramento de estruturas afetadas;
- d) Ampliar as investigações de estruturas afetadas pela RAA fazendo uso da inspeção visual, ultra-som e monitoramento das estruturas através da instalação de um sistema de instrumentação, com acompanhamento das alterações no concreto como deformações, abertura de fissuras, deslocamentos, entre outros, de forma a se obter correlações entre o nível de deterioração das estruturas e os ensaios laboratoriais. Estas correlações poderiam auxiliar na definição das medidas de reparo a serem empregadas no concreto deteriorado;

- e) Investigar, em nível nanométrico, concretos deteriorados pela reação e que apresentam ganhos iniciais de resistência com queda de módulo de elasticidade, com o objetivo de entender melhor o fenômeno que ocorre;
- f) Estudar, através de análise de textura, rochas metamórficas brasileiras, com o objetivo de melhor caracterizá-las e prever com mais confiança a sua reatividade;
- g) Aprofundar os estudos do gel exsudado, gerado a partir de diferentes cimentos e agregados e proveniente de outras estruturas, bem como de rochas reativas através de ressonância nuclear magnética com o intuito de corroborar todas as suposições apresentadas e abrir vertentes para descobertas de formas de eliminar a reação e desenvolver métodos de reparo mais eficientes;
- h) Ampliar os estudos com compostos à base de lítio com o objetivo de verificar as melhores concentrações, tempo e tipos de tratamentos para que seja obtida uma melhor eficiência do produto, dependendo da rocha reativa;
- i) Modelar os resultados de expansão e propriedades de outros concretos afetados pela RAA.

REFERÊNCIAS

ADAMIAN, R.; ALMENDRA, E. *Físico-química: uma aplicação aos materiais*. Rio de Janeiro: COOPE-UFRJ, 2002.

ACI COMMITTEE 221. *ACI 221.1R-98*. State-of-the-art: Report on alkali-aggregate reactivity. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, p.1-31, 1998.

ANDERSEN, K. T.; THAULOW, N. The application of undulatory extinction angles (UEA) as an indicator of alkali-silica reactivity of concrete aggregates, les réactions liants-granulats dans les bétons. *Journées d'étude*, Paris: École Nationale des Ponts et Chaussées, 20-21 juin 1989.

AOKI, N.; HASEGAWA, H.; YASUI, I. X-ray diffraction studies and molecular dynamics calculations of the structure of alkali disilicate glasses. *Journal YGKSA*, Ed. Yogyo Kyokaishi, v. 94, n. 6 p. 539-544, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C.39/C39M*: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, 2003.

_____. *ASTM C 114*: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. West Conshohocken, 1997.

_____. *ASTM C 150*: Standard specification for Portland cement. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C 151*: Standard test method for autoclave expansion of Portland cement. West Conshohocken, 2000.

_____. *ASTM C.295*: Standard Guide for petrographic examination of aggregates for concrete. West Conshohocken, 2003.

_____. *ASTM C.469*: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C. 597*: Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C.856*: Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. West Conshohocken, 2002.

_____. *ASTM C.1260*: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken, 2001.

_____. *ASTM C.1567*: Standard test method for determining the potential alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method). West Conshohocken, 2004.

_____. *ASTM C.1293*: Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. West Conshohocken, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). *Apreciação petrográfica do concreto com ênfase na avaliação de sua durabilidade e eventual ocorrência de reações expansivas*. Relatórios n. 5831, 6062, 6136, 6320 e 6336, 1994, 1995 e 1996.

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

_____. *NBR 5732*: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5743*: Cimento Portland: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1989.

_____. *NBR 5744*: Cimento Portland: determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 1989.

_____. *NBR 5745*: Cimento Portland: determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 1989.

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

_____. *NBR 5748*: Análise química de cimento portland: determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 1993.

_____. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 7211*: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 7215*: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro 1996.

_____. *NBR 7222*: Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NBR 7227*: Cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 1989.

_____. *NBR 7389*: Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro, 1992.

_____. *NBR 7680*: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 1983.

_____. *NBR 8522*: Concreto: determinação do módulo de deformação estática e diagrama - tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1984.

_____. *NBR 8802*: Concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

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

_____. *NBR 9773*: Agregado: reatividade potencial de álcalis em combinações cimento-agregado. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 10786*: Concreto endurecido: determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 1989.

_____. *NBR 11579*: Cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira nº 200. Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 11581*: Cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 12826*: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 1993.

_____. *NBR NM 23*: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 30*: Agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 52*: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 53*: Agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 76*: Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. *NBR NM 248*: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BATIC, O.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. On the effect of ASR cracking on the mechanical behaviour of concrete in tension and compression. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, Beijing/China. *Proceedings...* Beijing/China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 1136-1141.

BÉRUBÉ, M. A.; TREMBLAY, C.; FOURNIER, B.; THOMAS, M. D.; STOKES, D. B. Influence of lithium-based products proposed for counteracting ASR on the chemistry of pore solution and cement hydrates. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 1645-1660, 2004.

BÉRUBÉ, M. A.; SMAOUI, N.; CÔTÉ, T. Expansion tests on concrete cores from ASR-affected structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 821-832.

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

BIKERMAN, J. J. *Physical surfaces*. New York: Academic Press, 1970.

BISMARCK, A.; BOCCACINI, A. R.; EGIA-AJURIAGOJEASKOA, E.; HULSENBERG, D.; LEUTBECHER, T. Surface characterization of glass fibers made from silicate waste: zeta-potential and contact angle measurements. *Journal of Materials Science*, v. 39, n. 2, p. 401-412, 2004.

BULLETIN 79 - ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE DAMS - REVIEW AND RECOMENDATIONS. Paris: CIGB/ICOLD, 1991.

CALLISTER JR; W. D. *Materials science and engineering: an introduction*. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P.; BOURDAROT, E. Modeling alkali-aggregate reaction - effects in concrete dams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTIONS IN HYDROELECTRIC PLANTS AND DAMS, 2. 1995, Chattanooga/Tennessee. *Proceedings...* Chattanooga/Tennessee: United States Committee On Large Dams (USCOLD), 1995. p. 441-455.

CASTRO, A. *Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2003. 215p.

CASTRO, C. H.; GUERRA, E. A.; FONTOURA, J. T.; GRAÇA, N. G. Estudo comparativo de propriedades do concreto afetado pela reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997, p. 45-51.

CHATTERJEE, A. K. X-Ray diffraction. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. Norwich/New York/U.S.A.: Noyes Publications / Willian Andrew Publishing, 2001, cap. 8, p. 275-332.

CHIBOWSKI, E. Zeta potential and surface free energy changes: quartz/n-heptane-water system. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 69, n. 2, p. 326-329, 1979.

DANIELS, F. *Experimental physical chemistry*. 7. ed. New York: McGraw-hill, 1970, p. 494.

- 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.
- DIAMOND, S. Unique response of LiNO₃ as an alkali silica reaction-preventive admixture. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p.1271-1275, 1999.
- DUNCAN, M. A. G.; GILLOTT, J. E.; SWENSON, E. G. Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia II: field and petrographic studies. *Cement and Concrete Research*, v. 3, n. 2, p. 119-128, 1973.
- ELETROBRÁS; CBGB; IBRACON. *Concreto massa no Brasil: memória técnica e registro histórico*. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1989. p. 157-172. v. 1.
- ENGELHARDT, G., MICHEL, D. *High resolution solid-state NMR of silicates and zeolites*. Norwich: John Wiley & Sons, 1987.
- EVERETT, D. H. *Basic principles of colloid science*. London: Royal Society of Chemistry, 1988.
- FENG, X.; THOMAS, M. D. A.; BREMNER, T. W.; BALCOM, B. J.; FOLLIARD, K. J. Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p.1789-1796, 2005.
- FENG, X.; YOUNG, J. J.; THOMAS, M. D. A.; BALCOM, B. J.; BREMNER, T. W. Lithium measurements by magnetic resonance imaging and pore solution expression. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 505-511.
- FERRARO, J. R., MANGHNANI, M.H. Infrared absorption spectra of sodium silicate glasses at high pressures. *Journal of Applied Physics*, v. 43, n. 11, p. 4595-4599, 1972.
- FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M.D.A.; KURTIS, K.E. *Report No.FHWA-RD-03-047: Research, Development, and Technology: Guidelines for the use of lithium to mitigate or prevent alkali-silica reaction (ASR)*, - Turner-Fairbank Highway Research Center, FHWA – Federal Highway Administration, 2003, 86p.
- FONTOURA, J. T. F.; SILVA, M. F. A.; GUEDES, Q. M.; GÓZ, R. S. Estado atual do acompanhamento da reação álcali-agregado na UHE Furnas. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997, p. 301-303.

FOURNIER, B; BÉRUBÉ, M. A.; THOMAS, M. D. A.; FOLLIARD, K. J. Mitigation of the effect of alkali-silica reaction in concrete structures and recent advances in concrete materials and testing. IV.HPC – International ACI/CANMET CONFERENCE on Quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing, 2005, Olinda. *Proceedings...* São Paulo: ACI / IBRACON, 2005.

FUKUSHIMA, E.; ROEDER, S. B. W. *Experimental pulse NMR: a nuts and bolts approach*. Massachusetts: Addison & Wesley, 1981, 510p.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. *Relatório DCT.T.1.041.95-R0*: Usina Hidroelétrica de Furnas, Visita de inspeção à Usina Hidroelétrica de Furnas. p. 1-15, 1995.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. *Relatório DCT.T.10.009.99-R0*: Departamento de Produção Minas, Usina de Furnas, Recuperação dos pilares do vertedouro face montante. p. 1-19, 1999.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. *Relatório DCT.T.10.026.2000-R0*: Departamento de Produção Minas, Usina de Furnas, Recuperação dos pilares do vertedouro face montante, 2ª etapa. p. 1-19, 2000.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. *Relatório DCT.T.10.048.2001-R0*: Departamento de Produção Minas, Usina de Furnas, Reforços e reparos nas selas e apoio e blocos de ancoragem dos condutos forçados. p. 1-30, 2001.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. *Procedimento 01.002.068*: Análise química por espectrofotometria de absorção atômica: técnica da solubilização ácida e da fusão alcalina. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2003.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. *Procedimento 01.002.133*: Cimento e materiais em pó: granulometria a laser: determinação. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2005.

_____. *Procedimento 01.006.017*: Reconstituição do traço de concreto endurecido. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2004.

_____. *Procedimento 01.011.001*: Concreto endurecido: determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2003.

_____. *Procedimento 04.015.011*: Difractometria de raios-X: análise. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2000.

_____. *Procedimento 04.015.012*: Concreto: análise da microestrutura. Manual da Qualidade. Departamento de Apoio e Controle Técnico. Goiânia, 2005.

FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. *Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades*. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade/PINI, 1997. cap.17.

FURNAS S/A, CENTRAL ELÉTRICA. Laboratório de Concreto. *Relatório Mensal*. Furnas. Janeiro a Agosto, 1961.

GALLETTI, A. A. B.; SILVEIRA, J. F. A.; ANDRADE, M. A. S.; PERES, R. G. Inspeções realizadas nas usinas de Furnas para detectar a reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...Goiânia*: CBGB/FURNAS, 1997, p. 277-283.

GHOSH, S. N. IR Spectroscopy. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*. Norwich/New York/U.S.A.: Noyes Publications / Willian Andrew Publishing, 2001, cap. 5, p.174-203.

GILLOTT, J. E. Alkali-aggregate reactions in concrete. *Engineering Geology*, v. 9, p.303-326, 1975.

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

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

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

GOULART NETO, A. A.; GALLETTI, A. A. B.; TORTORELLO, F. I.; HASPARYK, N. P. A.; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI, W. A. Metodologia para verificação da influência da RAA em estruturas de concreto no campo e no laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (REIBRAC), 40., 1998, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBRACON, 1998. trab-66, p. 1-22.

GRATTAN-BELLEW, P. E.; DANAY, A. Comparison of laboratory and field evaluation of alkali-silica reaction in large dams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE ALKALI-AGGREGATE REACTIONS IN HYDROELECTRIC PLANTS AND DAMS, 1., 1992, Fredericton, *Proceedings...* Fredericton: Canadian Electrical Association (CEA), 1992. p. 1-23.

GROSBOIS, M.; FONTAINE, E. Evaluation of the potential alkali reactivity of concrete aggregates: performance of testing methods and a producer's point of view. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec City, Canada, *Proceedings...* Québec City, Canada: Edited by M. A. Bérubé, B. Fournier & B. Durand, 2000a, p. 267-276.

_____. Performance of the 60°C: accelerated concrete prism test for the evaluation of potential alkali-reactivity of concrete aggregates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec City, Canada, *Proceedings...* Québec City, Canada: Edited by M. A. Bérubé, B. Fournier & B. Durand, 2000b, p. 277-286.

HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS. 71. ed. Boca Raton: CRC Press, 1990, p. 15-40.

HANNA, R.; SU, G-J. Infrared absorption spectra of sodium silicate glasses from 4 to 30 μ . *Journal of the American Ceramic Society*. v. 47, n. 12, p. 597-601, 1964.

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

HASPARYK, N. P.; ARMELIN, J. L.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI DE ANDRADE, W. Investigação da reação álcali-agregado em testemunhos de concreto através de microscopia eletrônica de varredura. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 2., 1998, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora:UFJF, 1998, p. 437-446.

HASPARYK, N. P.; GOMIDES, M. J.; ANDRADE, M. A. S.; SILVA, H. H. A. B.; CARASEK, H. Estudo em laboratório de concretos contendo agregados com sulfetos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. *Anais...* São Paulo:IBRACON, 2005.

HASPARYK, N. P.; GONÇALVES, I. N.; VEIGA, F. N. Reação álcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., / CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 4., 1997, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: UFRGS.CPGEC, 1997. v. 1, p.655-662.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVEIRA, J. F. A. Expansions due to AAR verified in concrete cores and mortars from several power plants in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, Beijing/China. *Proceedings...* Beijing/China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004, v. II, p.888-897.

_____. Deterioration index and properties of concretes from Paulo Afonso Power Plants – Brazil – affected by the alkali-aggregate reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, Beijing/China. *Proceedings...* Beijing/China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. v. II , p. 898-906.

HASPARYK, N. P.; SILVEIRA, A. L. Z.; ARMELIN, J. L.; FONTOURA, J. T. F.; GUIMARÃES, E. M.; LENHARO, S. L. R. Investigação de deterioração em testemunhos de concreto contendo agregado de natureza granítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA AMBIENTAL, 10., 2002, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto, 2002, p. 1-13.

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.

HELMUTH, R. *SHRP C-342: Alkali-silica reactivity: an overview of research*. Washington,DC: Strategic Highway Research Program, 1993, p.1-105.

HOBBS, D. W. *Alkali-silica reaction in concrete*. London: Thomas Telford, 1988. 183p.

HORN, Jr, J. M.; ONODA Jr, G. Y. Surface charge of vitreous silica and silicate glasses in aqueous electrolyte solutions. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 61, n. 11-12, p. 523-527, 1978.

HOU, X.; KIRKPATRICK, R. J.; STRUBLE, L. J.; MONTEIRO, P. J. M. Structural investigations of alkali silicate gels. *Jornal American Ceramic Society*, v. 88, n. 2, p. 943-949, 2005.

HUNTER, R. J. *Introduction to modern colloid science*. New York: Oxford Science Publication, 1993.

_____. *Zeta potential in colloid science: principles and applications*. New York: Academic Press, 1981.

IMAOKA, M.; HASEGAWA, H.; YASUI, I. X-ray diffraction study of the structure of silicate glasses. *Physics and Chemistry of Glasses*, v. 24, 1983.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *BOLETIM N. 25: Métodos de análises químicas adotados no I.P.T: Reconstituição do traço de concreto e argamassas*. São Paulo: IPT, 1940. p.75-84.

JAFELICCI JÚNIOR, M.; VARANDA, L. C. O mundo dos colóides. In: *Química Nova na Escola*, p. 9-13, 1999. v. 9.

KANEYOSHI, A.; UCHIDA, H.; KANO, H. Development of ASR suppressing technology (The AAR/Li Method). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 584-591.

KESTENBACH, H. J.; BOTTA FILHO, W. J. *Microscopia eletrônica: transmissão e varredura*. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1989. 103p.

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.

_____. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, 1993. v. 1, p. 319-337.

_____. A influência da carbonatação no mecanismo de expansão da reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997, p. 161-164.

KIRKPATRICK, R. J. Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*. Norwich/New York/U.S.A.: Noyes Publications / Willian Andrew Publishing, LLC, 2001, cap. 6, p. 205-230.

KNUDSEN, T.; THAULOW, N. Quantitative microanalyses of alkali-silica gel in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 5, n. 5, p. 443-454, 1975.

KOBORI, O.; TANIGUCHI, Y.; UDAGAWA, Y.; HIRANO, M. Aged concrete strength and propagation velocity ratio of longitudinal and transverse wave. In: WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING, 16., 2004, Montreal. *Proceedings...* Montreal: Cindct-Indt, 2004. p. 1-6.

KUPERMAN, S. C.; VIEIRA, S. R. S.; FERREIRA, W. V. F.; TIBA, R. Tentativas para determinação do término da reação álcali-agregado na estrutura de uma tomada d'água. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p. 129-136.

KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanisms of control. *Journal of Materials Science*, v. 38, p. 2027-2036, 2003.

KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; BROWN, J. T.; MEYER-ILSE, W. Imaging of ASR gel by soft x-ray microscopy. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 3, p. 411-421, 1998.

LANGE'S HANDBOOK OF CHEMISTRY. 13. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1985. p.10-129.

LANGILLE, K.B.; NGUYEN, D.; BERNT, J.O.; VEINOT, D.E.; MURTHY, M.K. Mechanism of dehydration and intumescence of soluble silicates – Part I: effect of silica to metal oxide molar ratio. *Journal of Materials Science*, v. 26, n. 3, p. 695-703, 1991.

LARIVE, C. *Apport combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-reaction et ses effets mécaniques*. Paris, 1997, Thesis (PhD), École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1997.

LARIVE, C., LAPLAUD, A., COUSSY, O. The role of water in alkali-silica reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec City, Canada. *Proceedings...* Québec City, Canada: Edited by M. A. Bérubé, B. Fournier & B. Durand, 2000, p. 61-69.

LUMLEY, J. S. ASR Suppression by lithium compounds. *Cement and Concrete Research*. v. 27, n. 2, p. 235-244, 1997.

MAAR, J. H. *Introdução à química dos colóides e de superfícies*. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1975, cap. 1, p. 1-11.

- MAEKAWA, H., MAEKAWA, T., KAWAMURA, K. YOKOKAWA, T. The structural groups of alkali silicate glasses determined from silicon-29 MAS-NMR. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 127, n. 53, p. 53-64, 1991.
- MAGI, M., LIPPMAA, E., SAMOSON, A., ENGELHARDT, G., GRIMMER, A. R. Solid-State high-resolution silicon-29 chemical shifts in silicates. *Journal of Physical Chemistry*, v. 88, p. 1518-1522, 1984.
- MALVAR, L. J.; CLINE, G. D.; BURKE, D. F.; ROLLINGS, R.; SHERMAN, T. W.; GREENE, J. L. Alkali-Silica Reaction Mitigation: state of the art and recommendations. *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 5, p. 480-489, 2002.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. *Introdução a polímeros*, 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1999.
- MARFIL, S. A.; MAIZA, P. J. Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina. *Cement and Concrete Research*. v. 31, p.1017-1021, 2001.
- MARZOUK, H.; LANGDON, S. The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, p. 549-556, 2003.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto - estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ed. Pini, 1994.
- MINDESS, S.; YOUNG, J. F. *Concrete*, New Jersey: Ed. Prentice-Hall, 1981.
- MITCHELL, L. D.; BEAUDOIN, J. J.; GRATTAN-BELLEW, P. The effects of lithium hydroxide solution on alkali-silica reaction gels created with opal. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 641-649, 2004.
- MO, X.; YU, C.; XU, Z. Long-term effectiveness and mechanism of LiOH in inhibiting alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 115-119, 2003.
- MONTEIRO, P.J.M.; SHOMGLIN, K.; WENK, H. R.; HASPARYK, N. P. Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*, v. 98, n. 2, p. 179-183, 2001.
- MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. *Análise térmica de materiais*. São Paulo: editora São Paulo, 2002.
- MYERS, D. *Surfaces, interfaces, and colloids: principles and applications*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- NANI, L. F.; RIBEIRO, J. L. *Planejamento e avaliação dos experimentos*. Porto Alegre: UFRGS, 1987. 228p.

NATESAIYER, K. C.; HOVER, K. C. Chemical agents for reducing solubility of silica in 1N sodium hydroxide. *Cement and Concrete Research*, v. 22, n. 4, p. 653-662, 1992.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini, 1997. p. 488-492.

NISHIBAYASHI, S.; OKADA, K.; KOBAYASHI, K.; KOJIMA, T.; MIYAGAWA, T.; NAKANO, K.; ONO, K. Alkali-silica reaction: Japanese experience. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p. 281-291.

NOGUEIRA, C. L.; WILLAN, K. J. Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression. *ACI Materials Journal*. v. 98, p. 265-275, 2001.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R. G.; PANDOFELLI, V. C. *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico*. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

OZOL, M. A. Alkali-carbonate rock reaction. In: KLIEGER, P.; LAMOND J. F. *ASTM/STP 169C: Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. Philadelphia: ASTM, 1994. p.372-387.

PADILHA, A. F.; AMBRÓSIO FILHO. *Técnicas de análise microestrutural*. São Paulo: HERMUS Editora Ltda., 1985. 190p.

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

POOLE, A. B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p.1-29.

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: CBGB/FURNAS, 1997, p.173-196.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. Alkali-silica reaction, Part 1: use of the double layer theory to explain the behaviour of reaction-product gels. *ACI Materials Journal*, v.94, n.1, p.10-17, 1997.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. Alkali-silica reaction, Part 2: the effect of chemical admixtures. *ACI Materials Journal*, v. 95, n. 1, p. 3-10, 1998.

QINGHAN, B.; NISHIBAYASHI, S.; XUEQUAN, W.; YOSHINO, A.; HONG, Z.; TIECHENG, W.; MINGSHU, T. Preliminary study of effect of LiNO₂ on expansion of mortars subjected to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 8, p. 1647-1654, 1995.

RAMACHANDRAN, V. S. Thermal Analysis. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*. Norwich/New York/U.S.A.: Noyes Publications / Willian Andrew Publishing, 2001, cap. 4, p.127-173.

REGOURD, M. Alteration interne des bétons – la reaction alcalis-granulats: *La durabilité des structures beton en béton*. Paris: Travaux, mars 1988, p.62-67.

RELATORIO FINAL - *Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto*. Goiânia: CBGB/ FURNAS, 1999.

REUNIÓN INTERNACIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATERIAUX E LES CONSTRUCTIONS – RILEM. Measurement of hardened concrete carbonation depth : Rilem Recommendation CPC-18. *Materials and Structures*, p.453-455, 1988.

RICHET, P.; BOTTINGA, Y. Heat capacity of liquid silicates: new measurements on $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ and $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 44, n. 10, p. 1535-1541, 1980.

RICOL, S.; VERNAZ, E. Synthesis of gels in the system $\text{Na}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2$. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, v. 8, n. 1-3, p. 229-233, 1997.

RIVARD, P.; SAINT-PIERRE, F.; BALLIVY, G.; SAURIOL, B. Ultrasonic methods applied for assessing the progression of alkali-silica reaction in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004a, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004a. p. 973-982.

RIVARD, P.; BÉRUBÉ, M. A.; OLLIVIER, J-P.; BALLIVY, G. Expression of concrete pore solution for assessing expansion of ASR-affected structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004b, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004b. p. 964-972.

RODRIGUES, E. P. *Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da Barragem de Pedro Beicht*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1994.

RODRIGUES, E. P.; KIHARA, Y.; SBRIGHI, C. N. A reatividade álcali-agregado de rochas “granitóides” e “quartzíticas”: proposta de índice de reatividade potencial. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p.151-159.

SANDERS, D. M.; PERSON, W.B.; HENCH, L.L. Quantitative analysis of glass structure with the use of infrared reflection spectra. *Applied Spectroscopy*, v. 28, n. 3, p. 247-255, 1974.

SANTOS, P. S. *Ciência e tecnologia das argilas*. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1989.

- SARKAR, S. L.; AIMIN, X, JANA, D. *Scanning electron microscopy, X-Ray Microanalysis of concretes*. In: RAMACHANDRAN, V. S. ; BEAUDOIN, J. J. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. Norwich/New York/U.S.A.: Noyes Publications / Willian Andrew Publishing, 2001, cap. 7, p. 231-274.
- SERRA, J.; GONZALEZ, P.; LISTE, S.; SERRA, C.; CHIUSI, S.; LEON, B.; PEREZ-AMOR, M.; YLANEN, H.O.; HUPA, M. FTIR and XPS studies of bioactive silica based glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 332, n. 1-3, p. 20-27, 2003.
- SHAYAN, A. Alkali-reactivity of deformed granitic rocks: a case study. *Cement and Concrete Research*, v. 23, n. 5, p. 1229-1236, 1993.
- SHELBY, J. E. Thermal expansion of mixed-alkali silicate glasses. *Journal of Applied Physics*, v. 47, n. 10, p. 4489-4496, 1976.
- SHELBY, J. E. *Introduction to glass science and technology*. Cambridge: Ed. The Royal Society of Chemistry, 1997, 244p.
- SHERIFF, B. L.; GRUNDY, H. D.; HARTMAN, J. S.. The relationship between ^{29}Si MAS NMR chemical shift and silicate mineral structure. *European Journal of Mineralogy*, n. 3, p. 751-768, 1991.
- SHOEMAKER, D. P.; GARLAND, C. W.; NIBLER, J. W. *Experiments in physical chemistry*. 5. ed. New York: McGraw-hill, 1989, p. 15.
- SILVA, D.A. *Efeito dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento portland*. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2001.
- SILVA FILHO, L. C. P. *Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994. 143p.
- SILVEIRA, J. F. A. Parecer técnico sobre as estruturas de concreto da UHE Furnas. *Relatório FR-01/96-R0*. p. 1-31, 1996.
- 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 de ensaios acelerados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 44., 2002, Belo Horizonte/MG Anais... IBRACON: São Paulo, 2002, III-052, p. 1-15.
- SILVERSTEIN, R. M., WEBSTER, F. X. *Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos*. 6. ed. Rio de Janeiro/Brasil: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000, cap. 3, 4 e 7.
- SIMS, I. Alkali-silica reaction: UK experience. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, cap.5.

JOHN St., D. A. Alkali-aggregate reaction: New Zealand experience. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p. 265.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, v. 66, n. 10. Dec. 1940, p. 1781-1811.

_____. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1940. *Proceedings...* p. 1781-1811.

STARK, D. Lithium salt admixtures – an alternative method to prevent expansive alkali-silica reactivity. In: RESEARCH AND DEVELOPMENT INFORMATION. *Reprinted from Proceedings of 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London, July, 1992.

STARK, D., MORGAN, B., OKAMOTO, P., DIAMOND, S. *SHRP-C-343: Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, 1993, p.1-266.

STIEVENARD-GIREAUD, D. *Etude de la réaction alcalis-silice dans les bétons*. Paris: LCPC, 1987. 104p.

STOCH, L.; WACLAWSKA, I.; SRODA, M. Thermal study of the influence of chemical bond ionicity on the glass transformation in (Na₂O, CaO, MgO)-Al₂O₃-SiO₂ glasses”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 77, n. 1, p. 57-63, 2004.

STOKES, D.; THOMAS, M. D. A.; SHASHIPRAKASH, S. G. Development of a lithium-based material for decreasing ASR-induced expansion in hardened concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec City, Canada, *Proceedings...* Québec City, Canada: Edited by M. A. Bérubé, B. Fournier & B. Durand, 2000, p. 1079-1087.

STRUBLE, L. J.; DIAMOND, S. Swelling properties of synthetic alkali silica gels. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 64, n. 11, p. 652-655, 1981a.

STRUBLE, L. J.; DIAMOND, S. Unstable swelling behavior of alkali silica gels. *Cement and Concrete Research*, v. 11, n. 4, p. 611-617, 1981b.

SUTTER, B.; DALTON, J. B.; EWING, S. A.; AMUNDSON, R.; McKAY, C. P. Infrared spectroscopic analyses of sulfate, nitrate, and carbonate-bearing Atacama desert soils: analogs for the interpretation of infrared spectra from the Martian surface. *Lunar and Planetary Science*, n. 36, 2005.

SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. 1. ed. London: Blackie and Son Ltda, 1992. p. 72-95.

TAKADAMA, H.; KIM, H-M.; KOKUBO, T.; NAKAMURA, T. Mechanism of biomineralization of apatite on a sodium silicate glass: TEM-EDX study in vitro. *Chemistry of Materials*, v. 13, n. 3, p.1108-1113, 2001.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

THOMAS, M.; STOKES, D. Lithium impregnation of ASR-affected concrete: preliminary studies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 659-667.

TOMOSAWA, F.; TAMURA, K.; ABE, M. Influence of water content of concrete on alkali-aggregate reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION (ICAAR), 8., 1989, Kyoto. *Proceedings...* Kyoto: Edited by K. Okada, S. Nishibayashi & M. Kawamura, 1989. p.881-885.

TREMBLAY, C.; BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B.; THOMAS, M. D.; STOKES, D. B. Performance of lithium-based products against ASR: application to Canadian reactive aggregates, reaction mechanisms, and testing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 668-677.

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.

UCHINO, T.; SAKKA, T.; HOTTA, K., IWASAKI, M. Attenuated total reflectance Fourier-transform infrared spectra of a hydrated sodium silicate glass. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 72, n. 11, p. 2173-2175, 1989.

VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S.. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*, v. 7, n. 6, p. 643-648, 1977a.

VAN VLACK, L. H. *Princípios de ciência dos materiais*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1970.

VEIGA, F. N.; SANTOS, M. C.; GUEDES, Q. M. Investigação e estudo da reação álcali-agregado nas estruturas de concreto da UHE Furnas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, 1996, p. 103-118.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; HASPARYK ANDRADE, N. P. Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétricas. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997, p. 69-80.

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

- VISVESVARAYA, H. C.; MULLICK, A. K.; GEORGE SAMUEL, S. K.; SINHA, S. K.; WASON, R. C. Alkali reactivity of granitic rock aggregates. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., 1986, Rio de Janeiro, *Proceedings...* Rio de Janeiro, 1986. v. 5, p. 208-213.
- VIVIAN, H. E. Studies in cement-aggregate reaction. XIX: The effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate. *Australian Journal of the Applied Science*, v. 2, p. 488-494, 1951.
- WENDLANDT, W. W. *Thermal analysis*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- WHETSEL, K. Infrared spectroscopy. *Chemical & Engineering News*, v. 46, p. 82-96, 1968.
- WITHMORE, D.; ABBOTT, S. Use of an applied electric field to drive lithium ions into alkali-silica reactive structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec City, Canada, *Proceedings...* Québec City, Canada: Edited by M. A. Bérubé, B. Fournier & B. Durand, 2000, p. 1089-1098.
- XU. G. J. Z.; WATT, D. F.; HUDEC, P. P. Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 6, p. 1225-1236. 1995.
- YIN Qi; WEM ZI-YUN. Effects of lithium hydroxide on alkali silica reaction gels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, China. *Proceedings...* China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 801-804.

**APÊNDICE A - INVESTIGAÇÃO DA ÁGUA ADSORVIDA, EXPANSÕES E
VARIAÇÃO DE MASSA**

1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de entender melhor o comportamento expansivo do gel da RAA na presença do quartzito, foi incluído no programa de pesquisa a investigação da água adsorvida, conforme metodologia apresentada por Xu, Watt & Hudec (1995), o estudo das expansões e o acompanhamento de massa de barras de argamassa moldadas conforme a ASTM C-1260. A seguir está apresentado um fluxograma com as etapas realizadas e em seguida, de forma detalhada, cada uma dessas etapas envolvidas na investigação.

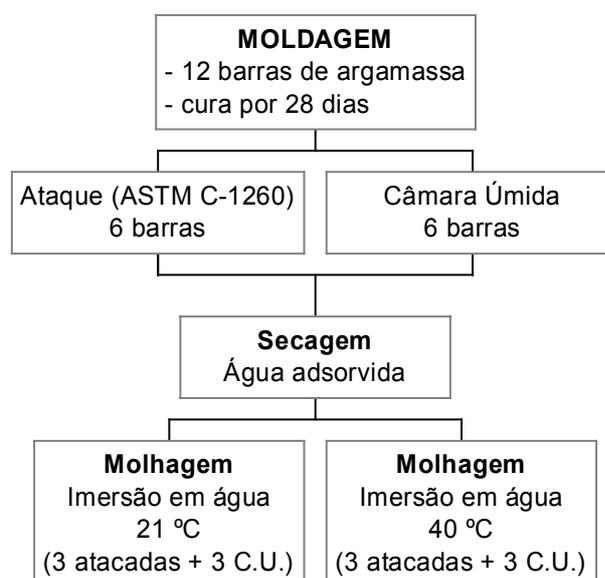


Figura A-1: Fluxograma das Etapas realizadas com as argamassas.

Etapa 1 - Moldagem de 12 barras e cura por 28 dias

Foram moldadas 12 barras de argamassa seguindo o traço apresentado na ASTM C-1260-00, de 1:2,25 e a/c fixo e igual a 0,47. Após desforma, as barras foram mantidas em câmara úmida, sem imersão em água, até completar a idade de 28 dias.

Etapa 2 - Ataque x Câmara Úmida

a) Ataque: Após os 28 dias de cura, 6 barras foram colocadas em imersão em água a 80 °C por 1 dia seguido por imersão em NaOH a 1N (conforme ASTM C-1260), sendo realizadas periodicamente (diariamente) leituras de comprimento até apresentarem expansões superiores àquelas obtidas para as amostras de argamassa confeccionadas com o quartzito no método

acelerado da ASTM C-1260 aos 16 dias de idade (ver Apêndice D). Como houve certa variação na expansão entre as 3 amostras pela ASTM C-1260 (de 0,20% a 0,28%), adotou-se a maior expansão obtida, 0,28%. Sendo assim, a idade na qual as amostras nesta etapa saíram do ataque foi de 13 dias com expansão média igual a 0,31%. O ataque foi realizado e interceptado aos 13 dias com o objetivo de produzir a RAA em um estágio intermediário, pois se nota crescimento das expansões no tempo e até 60 dias (Apêndice D).

b) Câmara Úmida - Referência: Após os 28 dias de cura, as 6 barras restantes ficaram mantidas em câmara úmida até a idade definida no item anterior (ataque), ou seja, por mais 13 dias, realizando-se leituras de comprimento com a mesma periodicidade das barras do ataque.

Etapa 3 - Secagem – Água adsorvida

Após a etapa 2, as 12 barras (6 atacadas e 6 referências) foram ensaiadas conforme metodologia apresentada por Xu, Watt & Hudec (1995) com o objetivo de determinar a água adsorvida. Nesta etapa, além do acompanhamento de massa prescrito nesta metodologia, foi incluído também o acompanhamento da variação de comprimento das barras de argamassa.

De acordo com este método, as amostras foram submetidas a vários intervalos de secagem (evaporação) em diversas temperaturas. Inicialmente as amostras foram secas por 24 horas a 65 °C e em seguida imersas em água por 3 dias. Procedeu-se a fervura das mesmas por 6 horas, seguido por um resfriamento em água por 24 horas. Após este período foi realizada a primeira medida de massa para o cálculo da água adsorvida, sendo incluída também a leitura de comprimento. Em seguida, as amostras foram secas de acordo com as condições apresentadas na Tabela A-1.

Tabela A-1: Condições de secagem das barras de argamassa.

Intervalo de secagem	Temperatura de secagem (°C)	Tempo de secagem (horas)	Tempo acumulado (horas)
D1	23	24	24
D2	65	24	48
D3	105	24	72
D4	105	24	96
D5	105	24	120
D6	105	24	144

A duração total desta etapa para determinação da água adsorvida foi de 11 dias. Após cada intervalo de secagem, as amostras foram pesadas e medidas, e a evaporação acumulada foi calculada. A água adicional de evaporação também foi determinada, e representa a diferença entre os resultados obtidos para as amostras submetidas ao ensaio acelerado e as amostras de controle (mantidas em câmara úmida), após intervalo de secagem D6.

Etapa 4 - Molhagem - Imersão em água a 21 °C e 38°C:

Após a etapa 3, e estando todas as amostras na mesma condição e bem secas, foram selecionadas 3 barras atacadas e 3 de referência e colocadas em imersão em água a 21°C. O restante das barras (3 atacadas e 3 de referência) foram colocadas em imersão em água a 38°C. O objetivo deste procedimento foi avaliar a influência da temperatura na saturação e expansão.

Com o objetivo de verificar o comportamento ao longo do tempo foram realizadas, periodicamente, leituras de comprimento e massa até a idade de 180 dias de ensaio. Nesta idade já se tinha atingido uma estabilização das expansões e massa.

2. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As Figuras A-2 a A-5 apresentam graficamente a variação de massa do longo do tempo até a idade de 180 dias e após a cura realizada por 28 dias, mostrando todo o acompanhamento durante o ensaio.

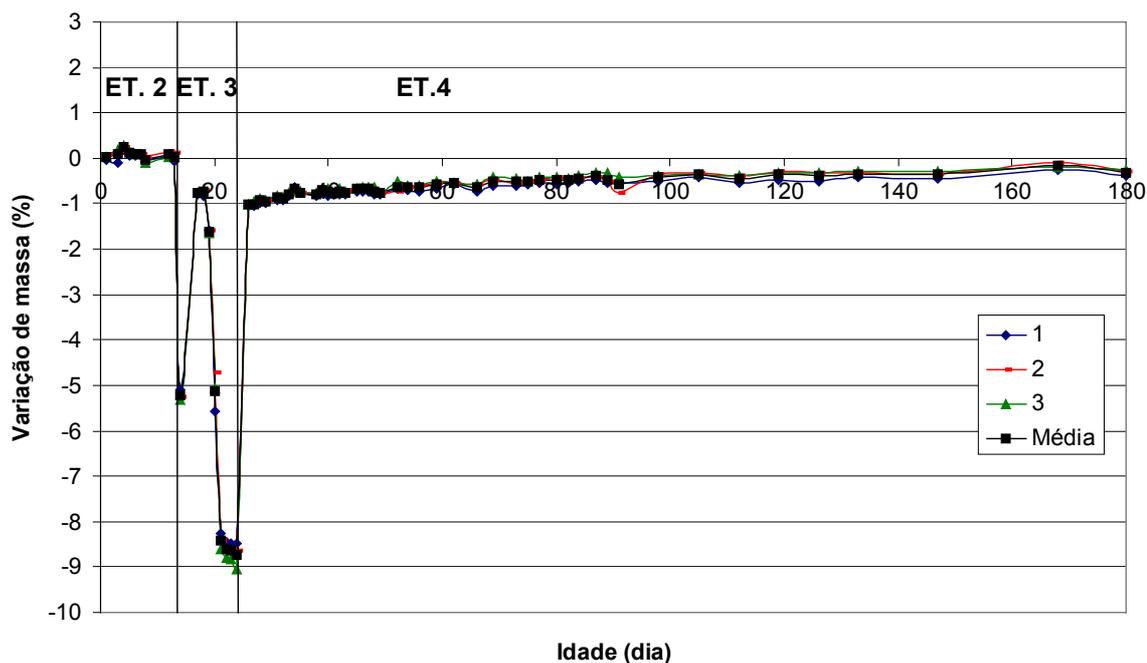


Figura A-2: Variações de massa nas amostras de referência e imersas em água a 21°C.

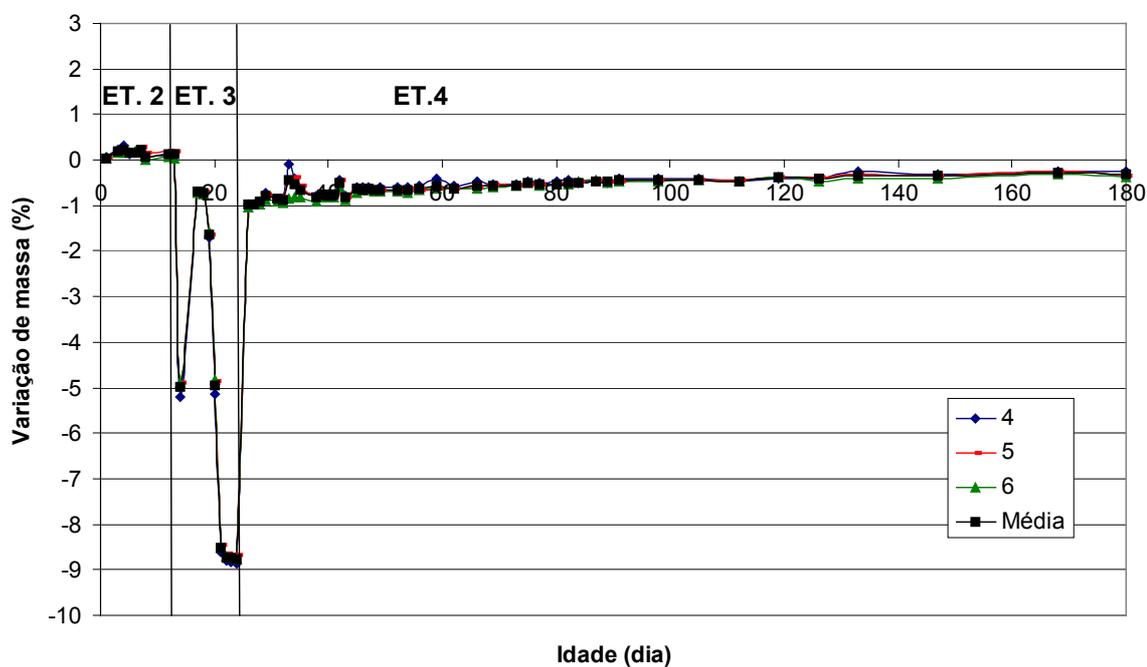


Figura A-3: Variações de massa nas amostras de referência e imersas em água a 38°C.

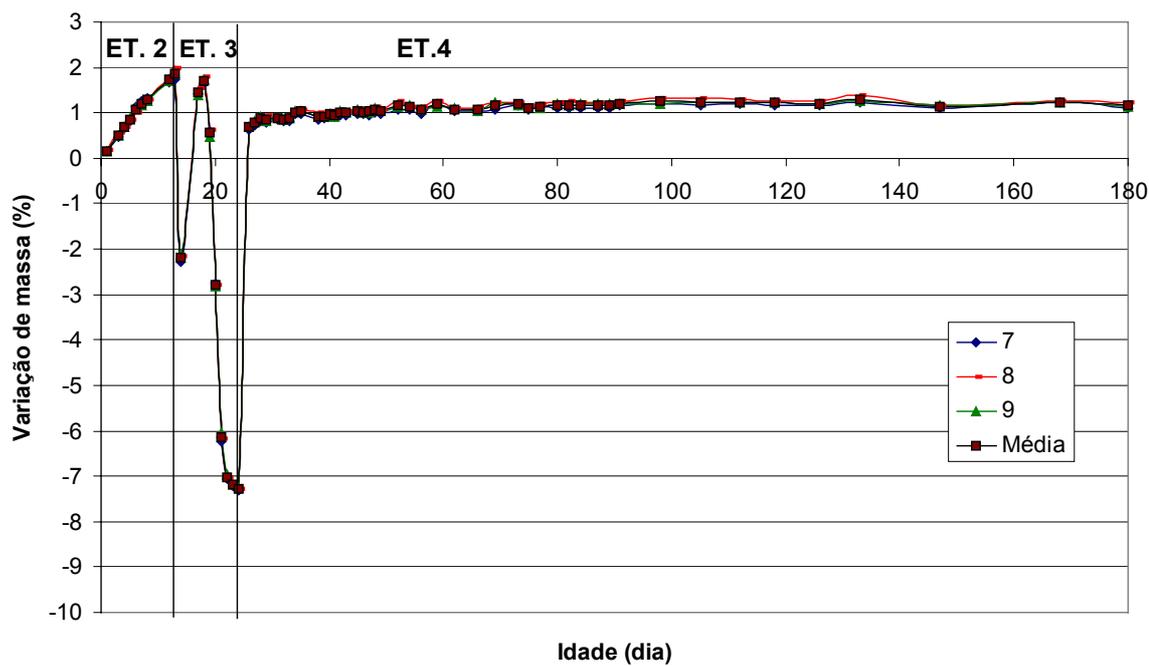


Figura A-4: Variações de massa nas amostras atacadas e imersas em água a 21°C.

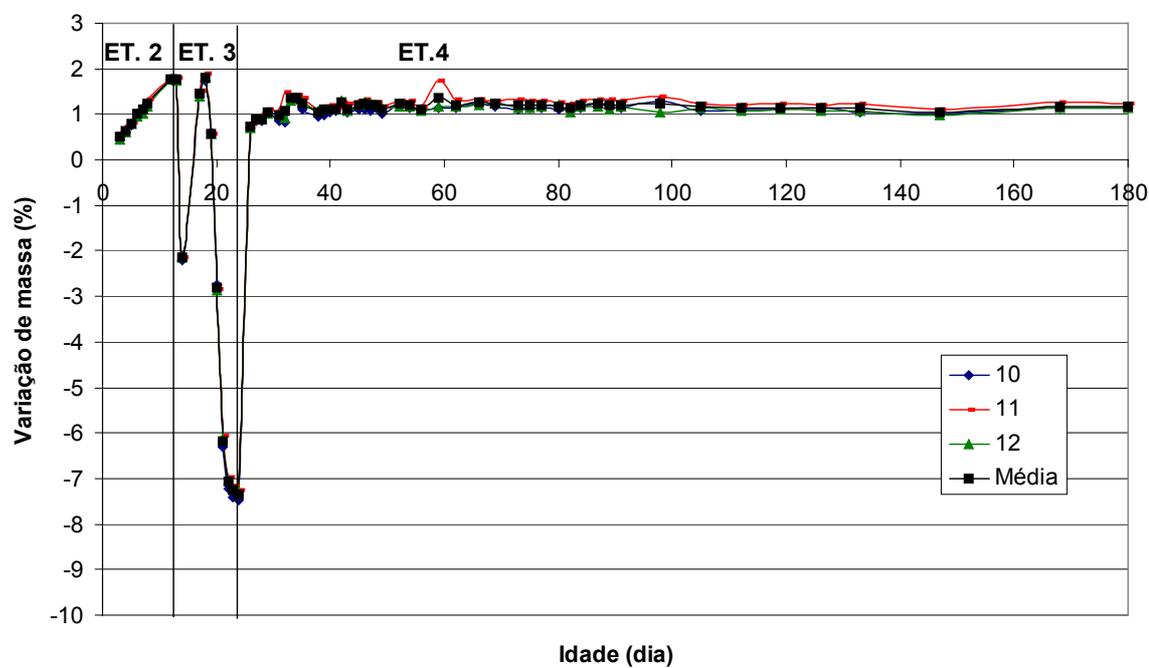


Figura A-5: Variações de massa nas amostras atacadas e imersas em água a 38°C.

O ganho de massa por saturação, ou o intumescimento, ocorre logo nas primeiras idades de ensaio, após secagem, e foi praticamente o mesmo para as 4 condições estudadas, sendo as amostras atacadas ou não previamente. Os ganhos médios de massa chegaram aos 180 dias a 8,4% para ambas as amostras imersas em água a temperatura ambiente (21°C), tanto as de referência como as atacadas (os ganhos de massa foram sempre calculados a partir da idade de imersão, 180 dias menos 24 dias, ou seja, dentro da etapa 4 – ET.4). Na amostras imersas a 38°C, o ganho médio foi igual a 8,5% tanto para as amostras de referência como as atacadas. Ou seja, as amostras atacadas ou não apresentaram, para uma mesma temperatura analisada, os mesmos ganhos de massa.

As Figuras A-6 a A-9 apresentam graficamente o comportamento expansivo ao longo do tempo, após a cura realizada por 28 dias, ou seja, desde o período de ataque seguido pela secagem e posterior imersão (Etapas ET. 2, 3 e 4), nas 4 condições analisadas ao longo do tempo, até 180 dias de ensaio.

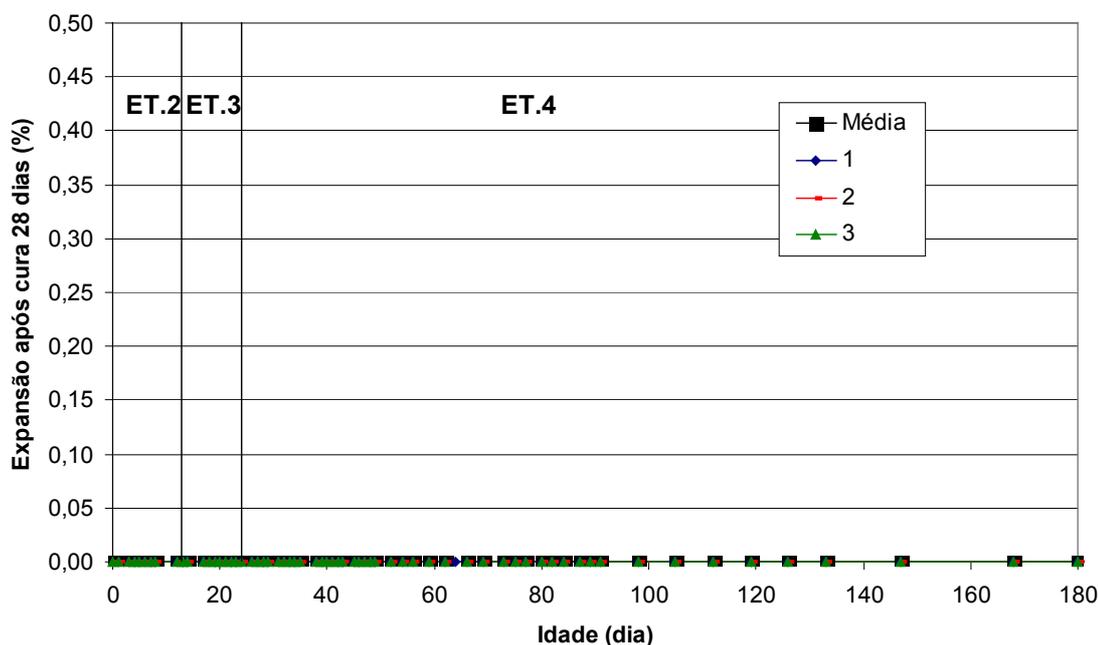


Figura A-6: Expansões medidas nas amostras de referência e imersas em água a 21°C.

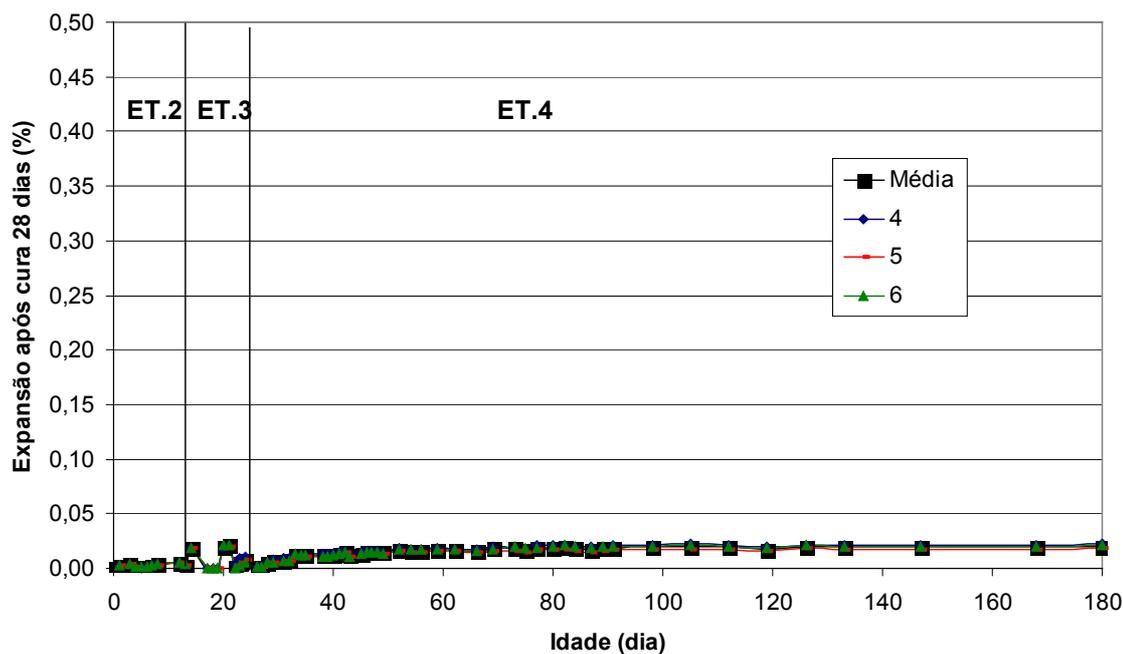


Figura A-7: Expansões medidas nas amostras de referência e imersas em água a 38°C.

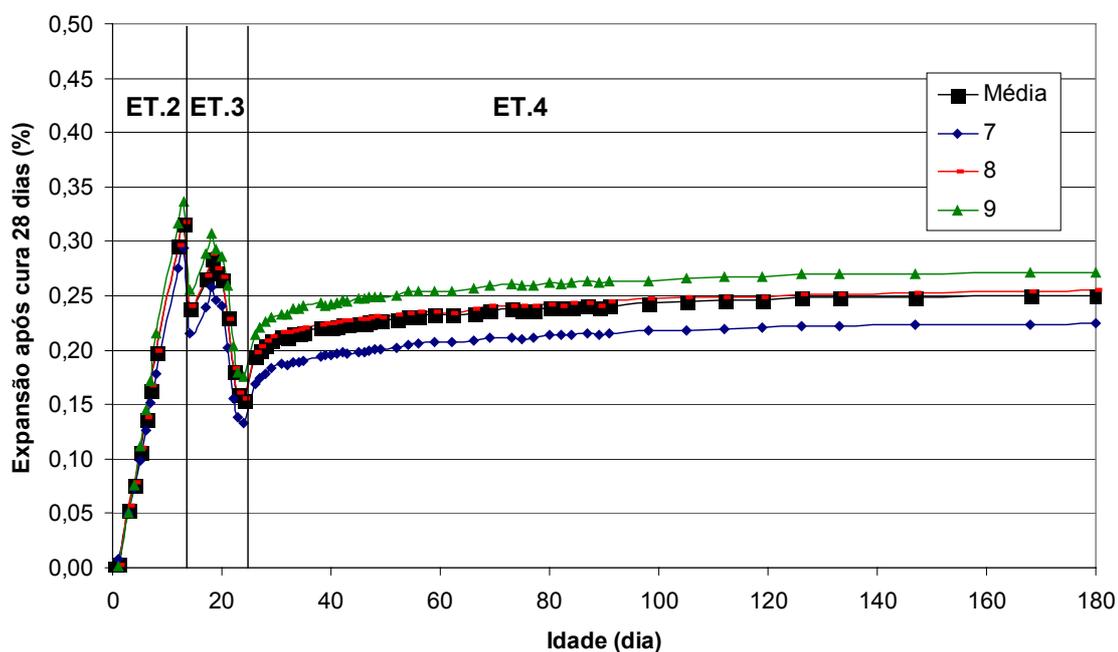


Figura A-8: Expansões medidas nas amostras atacadas e imersas em água a 21°C.

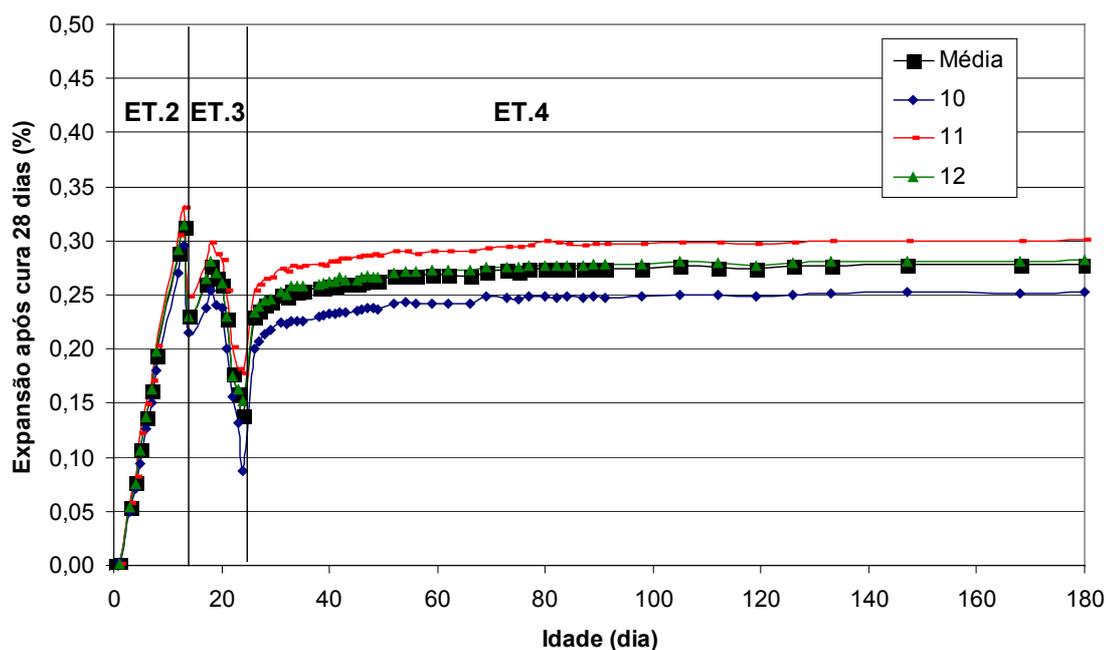


Figura A-9: Expansões medidas nas amostras atacadas e imersas em água a 41°C.

Não se observam expansões nas amostras de referência após a imersão em água, tanto a 21°C como a 38°C, sendo os valores médios obtidos iguais a 0,00% e 0,01% aos 180 dias de idade, respectivamente (os valores de expansão foram sempre calculados a partir da idade de imersão, 180 dias menos 24 dias, ou seja, dentro da etapa 4 – ET.4). Já nas amostras atacadas, se observam expansões logo no início do período de imersão, sendo bastante significativas aos 180 dias e iguais a 0,10% e 0,14% para as temperaturas de 21°C e 38°C, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que para as mesmas condições de imersão e saturação, amostras previamente atacadas, que já contém o gel formado no seu interior, expandem não só pelo seu intumescimento, mas principalmente pela adsorção de água pelo gel já existente, que ao entrar em contato com a água expande. Comparando as expansões das amostras de referência e amostras atacadas e imersas na água a 21°C, não existe expansão para a referência (0%), mesmo intumescendo, ou saturando e existe para a atacada (0,10%). O mesmo vale para 38°C, onde a expansão média medida na referência foi desprezível (0,01%) e ocorreu devido única e exclusivamente devido ao efeito da temperatura mais elevada (expansão térmica); já na amostra atacada, a expansão representou em média 0,14% aos 38°C. Tem-se ainda que o efeito da expansão térmica não contribui apenas com 0,01% das expansões nas amostras atacadas, valor este que ocorreu apenas nas amostras de referência. O

efeito da temperatura provoca com muito mais intensidade as expansões uma vez que a temperatura funciona como catalisador das reações químicas, representando, em média, uma contribuição nas expansões na ordem de 0,04% nas amostras atacadas.

A Tabela A-2 apresenta os resultados da evaporação acumulada ao longo dos intervalos de secagem (IS) aos quais as amostras confeccionadas com o quartzito de Furnas e o quartzito e basalto extraídos da literatura (HASPARYK, 1999) foram submetidas, bem como o resultado final da água adicional.

A água adicional (AD) representa a diferença entre a água de evaporação das amostras submetidas ao ensaio de reatividade (RA) e amostras de controle (NRA) ao final do ensaio, após intervalo de secagem D6. Cada intervalo de secagem teve duração de 24 horas, com temperaturas específicas, conforme apresentado anteriormente. Adicionalmente estão apresentados na Tabela A-2 os resultados das expansões obtidas aos 30 dias, no ensaio da ASTM C-1260/94.

Tabela A-2: Evaporação acumulada durante o período de secagem – amostras confeccionadas com o quartzito de Furnas (referente à presente pesquisa) e o quartzito e o basalto apresentado por Hasparyk (1999).

Agreg.	QUARTZITO FURNAS		QUARTZITO ¹		BASALTO ¹	
	RA	NRA	RA	NRA	RA	NRA
D1-23°	1,17	0,90	2,00	2,20	1,40	2,00
D2-65°	4,49	4,34	5,00	4,20	5,70	5,00
D3-105°	7,78	7,81	8,20	7,50	9,60	8,50
D4-105°	8,66	8,00	9,20	7,70	10,50	8,70
D5-105°	8,83	8,03	9,40	7,90	10,70	8,90
D6-105°	8,91	8,08	9,50	8,00	10,80	9,00
AD (%)	0,83		1,50		1,80	
Exp.(%)	0,31		0,53		1,10	

Nota 1 – Dados apresentados por Hasparyk (1999)

O gráfico apresentado na Figura A-10 mostra o comportamento da evaporação acumulada entre as amostras de referência e as submetidas ao ensaio de expansão confeccionados com o quartzito de Furnas.

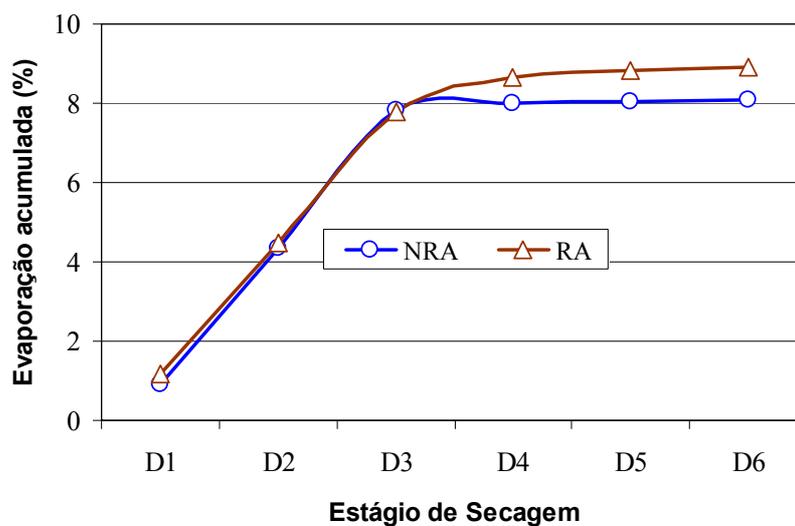


Figura A-10: Comparativo entre a amostra de referência e submetida ao ensaio de reatividade (RA) para a evaporação acumulada do quartzito de Furnas.

Nota-se que a amostra submetida ao ensaio de reatividade (RA) apresenta evaporação acumulada superior à amostra de referência (NRA). Adicionalmente, observa-se que uma maior porcentagem de perda de água ocorreu nos primeiros intervalos de secagem.

Na Figura A-11 está apresentada uma correlação entre as expansões ao fim do ensaio de expansão e a água adsorvida referente aos dados apresentados na Tabela A-2. No caso do quartzito de Furnas, o ataque terminou em 13 dias e os demais em 30 dias.

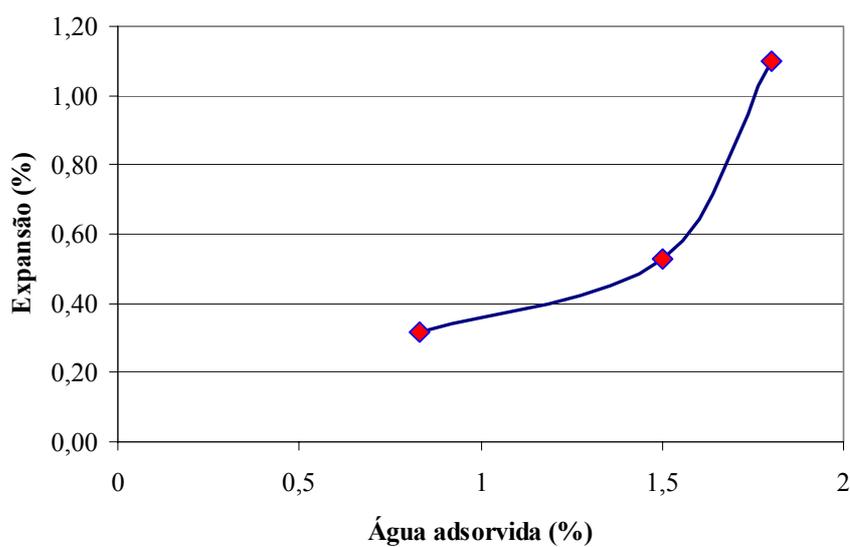


Figura A-11: Expansão x água adsorvida.

Nota-se que à medida que a água adsorvida aumenta as expansões aumentam mostrando a forte influência deste parâmetro na deterioração pela RAA. Segundo Xu, Watt & Hudec (1995), esta a água provém principalmente da água presente no gel da reação álcali-agregado e os resultados desta etapa mostraram este comportamento, conforme também já demonstrado anteriormente por Hasparyk (1999).

Tabela A-3: Dados das expansões (%) individuais no tempo após imersão.

Idade	Referência 21°C				Referência 40°C				Atacado 21°C				Atacado 40°C			
	B1	B2	B3	Média	B4	B5	B6	Média	B7	B8	B9	Média	B10	B11	B12	Média
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,04	0,11	0,08	0,08	0,09
27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,04	0,12	0,08	0,09	0,10
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,05	0,13	0,09	0,09	0,10
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,06	0,05	0,05	0,13	0,09	0,09	0,10
31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,06	0,06	0,06	0,14	0,10	0,10	0,11
32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,06	0,06	0,06	0,14	0,09	0,10	0,11
33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,06	0,06	0,06	0,14	0,10	0,11	0,12
34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,06	0,06	0,06	0,14	0,10	0,11	0,11
35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,07	0,07	0,06	0,14	0,10	0,11	0,11
38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,07	0,07	0,07	0,14	0,10	0,11	0,12
39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,07	0,07	0,07	0,14	0,10	0,11	0,12
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,07	0,07	0,07	0,15	0,10	0,11	0,12
41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,06	0,07	0,07	0,07	0,15	0,10	0,11	0,12
42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,07	0,07	0,07	0,15	0,11	0,11	0,12
43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,07	0,07	0,07	0,15	0,11	0,11	0,12
45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,07	0,07	0,07	0,07	0,15	0,11	0,11	0,12
46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,07	0,07	0,07	0,15	0,11	0,11	0,12
47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,07	0,07	0,07	0,15	0,11	0,12	0,13
48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,07	0,07	0,15	0,11	0,11	0,13
49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,07	0,07	0,15	0,11	0,11	0,12
52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,07	0,07	0,16	0,11	0,12	0,13
54	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,08	0,08	0,16	0,11	0,12	0,13
56	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,08	0,08	0,16	0,11	0,12	0,13
59	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,08	0,08	0,16	0,11	0,12	0,13
62	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08	0,08	0,08	0,15	0,11	0,12	0,13
66	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,08	0,08	0,08	0,15	0,11	0,12	0,13
69	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,08	0,08	0,16	0,12	0,12	0,13
73	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,08	0,08	0,16	0,12	0,12	0,13
75	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,08	0,08	0,08	0,16	0,12	0,12	0,13
77	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,08	0,08	0,16	0,12	0,12	0,14
80	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,09	0,08	0,16	0,12	0,12	0,14
82	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,08	0,09	0,09	0,08	0,16	0,12	0,12	0,14
84	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,09	0,08	0,16	0,12	0,12	0,14
87	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,09	0,09	0,16	0,12	0,12	0,13
89	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,09	0,08	0,16	0,12	0,13	0,14
91	-0,01	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,09	0,09	0,16	0,12	0,13	0,14
98	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,09	0,09	0,16	0,12	0,13	0,14
105	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,09	0,09	0,09	0,09	0,16	0,12	0,13	0,14
112	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,09	0,09	0,09	0,09	0,16	0,12	0,13	0,14
119	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09	0,09	0,09	0,09	0,16	0,12	0,12	0,14
126	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,09	0,10	0,09	0,09	0,16	0,12	0,13	0,14
133	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,09	0,10	0,09	0,09	0,17	0,12	0,13	0,14
147	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09	0,10	0,09	0,09	0,17	0,12	0,13	0,14
168	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09	0,10	0,10	0,10	0,16	0,12	0,13	0,14
180	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,09	0,10	0,10	0,10	0,17	0,12	0,13	0,14

Tabela A-4: Dados dos ganhos de massa (%) individuais no tempo após imersão.

Idade	Referência 21°C				Referência 40°C				Atacado 21°C				Atacado 40°C			
	B1	B2	B3	Média	B4	B5	B6	Média	B7	B8	B9	Média	B10	B11	B12	Média
26	7,4	7,7	8,0	7,7	7,9	7,8	7,7	7,8	7,9	8,0	8,0	8,0	8,2	8,0	8,0	8,1
27	7,4	7,7	8,1	7,7	7,9	7,7	7,8	7,8	8,0	8,1	8,1	8,1	8,3	8,2	8,2	8,2
28	7,5	7,8	8,2	7,8	8,0	7,8	7,8	7,9	8,1	8,2	8,2	8,2	8,3	8,2	8,2	8,2
29	7,5	7,7	8,1	7,8	8,2	7,9	7,9	8,0	8,1	8,2	8,1	8,1	8,5	8,3	8,3	8,4
31	7,6	7,8	8,2	7,9	8,0	7,9	7,9	7,9	8,2	8,2	8,1	8,1	8,3	8,3	8,3	8,3
32	7,6	7,8	8,2	7,8	8,0	7,9	7,8	7,9	8,1	8,2	8,1	8,1	8,3	8,7	8,2	8,4
33	7,6	7,8	8,3	7,9	8,8	8,3	7,9	8,3	8,1	8,2	8,2	8,2	8,8	8,6	8,6	8,7
34	7,9	8,0	8,4	8,1	8,5	8,3	7,9	8,2	8,3	8,3	8,3	8,3	8,8	8,7	8,6	8,7
35	7,7	7,9	8,3	8,0	8,3	8,1	7,9	8,1	8,3	8,3	8,3	8,3	8,6	8,6	8,6	8,6
38	7,6	7,9	8,3	7,9	8,1	7,9	7,9	7,9	8,2	8,3	8,2	8,2	8,4	8,4	8,4	8,4
39	7,7	7,9	8,4	8,0	8,1	8,0	7,9	8,0	8,2	8,2	8,2	8,2	8,5	8,4	8,4	8,4
40	7,7	7,9	8,4	8,0	8,1	7,9	7,9	8,0	8,2	8,3	8,2	8,3	8,5	8,4	8,4	8,5
41	7,7	7,9	8,3	8,0	8,1	8,0	8,0	8,0	8,2	8,2	8,2	8,2	8,5	8,4	8,4	8,4
42	7,7	7,9	8,4	8,0	8,4	8,3	8,2	8,3	8,2	8,4	8,3	8,3	8,7	8,5	8,6	8,6
43	7,7	7,9	8,3	8,0	8,1	7,9	7,9	7,9	8,2	8,3	8,3	8,3	8,5	8,5	8,4	8,5
45	7,7	8,0	8,4	8,0	8,3	8,1	8,0	8,1	8,3	8,4	8,3	8,3	8,6	8,5	8,5	8,5
46	7,8	8,0	8,4	8,0	8,3	8,0	8,1	8,1	8,3	8,3	8,3	8,3	8,6	8,6	8,5	8,6
47	7,7	8,0	8,4	8,1	8,3	8,1	8,1	8,1	8,2	8,4	8,3	8,3	8,6	8,5	8,5	8,5
48	7,7	7,9	8,4	8,0	8,2	8,0	8,1	8,1	8,3	8,4	8,4	8,4	8,6	8,5	8,5	8,5
49	7,7	7,9	8,3	8,0	8,3	8,0	8,1	8,1	8,3	8,4	8,3	8,3	8,5	8,4	8,4	8,5
52	7,8	7,9	8,6	8,1	8,3	8,0	8,1	8,1	8,4	8,5	8,4	8,4	8,7	8,5	8,5	8,6
54	7,8	8,0	8,5	8,1	8,3	8,1	8,1	8,1	8,4	8,4	8,4	8,4	8,6	8,5	8,5	8,5
56	7,8	8,0	8,4	8,1	8,3	8,0	8,1	8,1	8,3	8,4	8,3	8,3	8,6	8,4	8,4	8,5
59	7,8	8,1	8,5	8,1	8,5	8,1	8,1	8,2	8,5	8,5	8,4	8,5	8,6	9,0	8,4	8,7
62	7,9	8,1	8,5	8,2	8,3	8,0	8,1	8,2	8,3	8,4	8,4	8,4	8,6	8,6	8,5	8,5
66	7,7	8,1	8,5	8,1	8,4	8,1	8,2	8,2	8,3	8,4	8,3	8,3	8,7	8,6	8,5	8,6
69	7,9	8,1	8,6	8,2	8,3	8,2	8,2	8,2	8,4	8,5	8,5	8,4	8,6	8,5	8,5	8,6
73	7,9	8,1	8,6	8,2	8,3	8,1	8,2	8,2	8,5	8,5	8,4	8,5	8,6	8,6	8,4	8,5
75	7,9	8,1	8,6	8,2	8,4	8,2	8,3	8,3	8,4	8,4	8,4	8,4	8,6	8,5	8,4	8,5
77	7,9	8,1	8,6	8,2	8,4	8,2	8,2	8,3	8,4	8,5	8,4	8,4	8,6	8,5	8,5	8,5
80	7,9	8,2	8,6	8,2	8,4	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,4	8,4	8,6	8,5	8,5	8,5
82	8,0	8,2	8,6	8,3	8,4	8,2	8,2	8,3	8,4	8,5	8,4	8,4	8,6	8,5	8,3	8,5
84	8,0	8,2	8,7	8,3	8,4	8,2	8,3	8,3	8,4	8,5	8,5	8,5	8,6	8,5	8,5	8,5
87	8,0	8,2	8,7	8,3	8,4	8,2	8,3	8,3	8,4	8,5	8,5	8,4	8,7	8,6	8,4	8,6
89	7,9	8,1	8,7	8,3	8,4	8,2	8,3	8,3	8,4	8,5	8,5	8,5	8,7	8,6	8,4	8,5
91	8,0	7,9	8,6	8,2	8,5	8,2	8,3	8,3	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	8,5	8,5	8,5
98	8,0	8,3	8,7	8,3	8,5	8,2	8,3	8,3	8,5	8,6	8,5	8,5	8,8	8,6	8,3	8,6
105	8,1	8,3	8,7	8,4	8,5	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,5	8,5	8,6	8,5	8,4	8,5
112	7,9	8,2	8,7	8,3	8,4	8,2	8,3	8,3	8,5	8,6	8,5	8,5	8,6	8,4	8,4	8,5
119	8,0	8,3	8,7	8,4	8,5	8,3	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	8,6	8,5	8,4	8,5
126	8,0	8,3	8,7	8,3	8,5	8,3	8,3	8,4	8,4	8,5	8,4	8,5	8,6	8,4	8,4	8,5
133	8,1	8,3	8,8	8,4	8,6	8,4	8,4	8,4	8,5	8,6	8,5	8,6	8,5	8,5	8,4	8,5
147	8,0	8,3	8,8	8,4	8,6	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,5	8,4	8,3	8,4
168	8,2	8,6	8,9	8,5	8,6	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	8,5	8,4	8,5
180	8,1	8,4	8,8	8,4	8,6	8,4	8,4	8,5	8,4	8,5	8,4	8,4	8,6	8,5	8,4	8,5

APÊNDICE B - IDENTIFICAÇÃO DOS TESTEMUNHOS

Identificação dos testemunhos da classe 0 - jusante.

Classe	Nº Testemunho	Comprimento (cm)
0 (sem indícios visuais de alteração)	1	30,5
	2	32
	3	35
	4	36
	5	19
	6	41
	7	29
	8	20
	9	22
	10	38
	11	31
	12	43
	13	36
	14	38
	15	38
	16	32
	17	37
	18	33
	19	32
	20	37
	21	38
	22	40
	23	40
	24	31
	25	20
	26	40
	27	33
	28	38,5
	29	30,5
	30	17

Identificação dos testemunhos da classe 1 - montante.

Classe	N° Testemunho	Comprimento (cm)	
		A	B
1 (menos afetado)	29	35	fragmentos
	30	40	-
	31	31	8
	32	32	2
	33	34	4
	34	20	14
	35	35	3
	36	29	16
	37 ¹	(13+13)	8
	38	24	13
	39	31	10
	40	40	-
	41	42	-
	42	35	-
	43	34	fragmentos
	44	32	fragmentos
	45	32	2 + fragmentos
	46	14	25
	47	27	5
	48	29	5
	49	32	2
	50	40	-
	51	25	10
	52	31	fragmentos
	53	24	-
	54	37	-
	55	20	20
	56	35	-
	57	39	-
	58	36	5
	59	34	5
	60	34	2
61	36	fragmentos	
62	30	5,5	
63	37	-	
64	32	fragmentos	
65	31	2	
66 ¹	(13+6+10)	-	
36e2	41	-	

Nota 1 – Os testemunhos 37A, 53A e 66A sofreram uma queda acidentalmente, fragmentando-se durante manipulação, não sendo portanto possível de serem ensaiados.

Nota 2 – O testemunho 36e2 faz parte da segunda campanha de extração.

Identificação dos testemunhos da classe 2 - montante.

Classe	N° Testemunho	Comprimento (cm)	
		A	B
2 (mais afetado)	1	27	8
	2	38	-
	3	36	-
	4 ¹	36	-
	5	34	9
	6	29	11
	7	38	-
	8	31	8
	9	41	-
	10	33	8
	11	31	10
	12	21	17
	13	39	4
	14	17	22
	15	21	21
	16	26	9
	17	28	11
	18	32	11
	19	37	-
	20	29	5
	21	35	-
	22	35	-
	23	31	14
	24	33	-
	25	36	-
	26	37	-
	27	34	-
	28	29	15
31e2	34	-	
32e2	28	-	
33e2	26	-	
34e2	25	-	
35e2	34	-	

Nota 1 – O testemunho 4 foi perdido acidentalmente em função de ter se fragmentado totalmente durante a sua manipulação.

Nota 2 – Os testemunhos 31e2 a 35e2 fazem parte da segunda campanha de extração

Nota 3 – Os testemunhos 31e2 e 32e2 foram extraídos com o objetivo de estudar o gel que se encontrava exsudado na superfície do concreto

**APÊNDICE C - ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DOS
TESTEMUNHOS DE CONCRETO**

Classe 0 - Jusante

Nº DO TESTEMUNHO	ABSORÇÃO (%)		ÍNDICE DE VAZIOS (%)		MASSA ESPECÍFICA (kg/dm³)			
	após Saturação (SSS)	após Saturação e Fervura	Após Saturação (SSS)	após Saturação e fervura	Seca	Após Saturação (SSS)	Após Saturação e Fervura	Real
B1-12B	2,15	2,39	5,28	5,86	2,44	2,49	2,49	2,59
B2-03B	3,33	4,02	7,83	9,43	2,31	2,39	2,40	2,55
B3-10B	3,17	3,46	7,60	8,27	2,38	2,46	2,46	2,59
B4-26B	3,51	3,84	8,26	9,03	2,33	2,42	2,42	2,56
B5-06B	3,73	4,25	8,72	9,95	2,31	2,39	2,41	2,56
MEDIA	3,18 %	3,59 %	7,54 %	8,51 %	2,35 kg/dm³	2,43 kg/dm³	2,44 kg/dm³	2,57 kg/dm³
MÁXIMO	3,73 %	4,25 %	8,72 %	9,95 %	2,44 kg/dm³	2,49 kg/dm³	2,49 kg/dm³	2,59 kg/dm³
MÍNIMO	2,15 %	2,39 %	5,28 %	5,86 %	2,31 kg/dm³	2,39 kg/dm³	2,40 kg/dm³	2,55 kg/dm³
DESVPAD	0,61 %	0,73 %	1,33 %	1,60 %	0,06 kg/dm³	0,04 kg/dm³	0,04 kg/dm³	0,02 kg/dm³
VAR	0,374	0,535	1,777	2,568	0,003	0,002	0,001	0,000
CV	19,24 %	20,36 %	17,68 %	18,83 %	2,38 %	1,82 %	1,55 %	0,73 %

Classe 1 - Montante

Nº DO TESTEMUNHO	ABSORÇÃO (%)		ÍNDICE DE VAZIOS (%)		MASSA ESPECÍFICA (kg/dm³)			
	após Saturação (SSS)	após Saturação e Fervura	Após Saturação (SSS)	após Saturação e fervura	Seca	Após Saturação (SSS)	Após Saturação e Fervura	Real
B1-48B	3,12	3,37	7,45	8,05	2,38	2,45	2,46	2,58
B2-47A	2,67	2,82	6,47	6,84	2,42	2,48	2,49	2,59
B3-30A	2,86	3,22	6,85	7,70	2,38	2,44	2,45	2,57
B4-46B	2,60	2,85	6,22	6,82	2,38	2,44	2,45	2,55
B5-63A	3,45	3,72	8,12	8,66	2,34	2,42	2,43	2,57
MEDIA	2,94 %	3,20 %	7,02 %	7,61 %	2,38 kg/dm³	2,45 kg/dm³	2,45 kg/dm³	2,57 kg/dm³
MÁXIMO	3,45 %	3,72 %	8,12 %	8,66 %	2,42 kg/dm³	2,48 kg/dm³	2,49 kg/dm³	2,59 kg/dm³
MÍNIMO	2,60 %	2,82 %	6,22 %	6,82 %	2,34 kg/dm³	2,42 kg/dm³	2,43 kg/dm³	2,55 kg/dm³
DESVPAD	0,35 %	0,37 %	0,77 %	0,79 %	0,03 kg/dm³	0,02 kg/dm³	0,02 kg/dm³	0,02 kg/dm³
VAR	0,121	0,140	0,593	0,631	0,001	0,000	0,000	0,000
CV	11,86 %	11,71 %	10,97 %	10,44 %	1,11 %	0,87 %	0,82 %	0,61 %

Classe 2 - Montante

Nº DO TESTEMUNHO	ABSORÇÃO (%)		ÍNDICE DE VAZIOS (%)		MASSA ESPECÍFICA (kg/dm³)			
	após Saturação (SSS)	após Saturação e Fervura	Após Saturação (SSS)	após Saturação e fervura	Seca	Após Saturação (SSS)	Após Saturação e Fervura	Real
B1-13A	2,81	2,86	6,81	6,93	2,42	2,49	2,49	2,60
B2-26A	3,46	3,90	8,01	9,00	2,29	2,37	2,38	2,52
B2-27A	3,67	4,13	8,45	9,52	2,28	2,36	2,38	2,52
B4-02A	4,05	4,44	9,41	10,31	2,30	2,40	2,41	2,57
B5-07A	3,68	3,81	8,68	8,96	2,35	2,44	2,44	2,58
MEDIA	3,53 %	3,83 %	8,27 %	8,95 %	2,33 kg/dm³	2,41 kg/dm³	2,42 kg/dm³	2,56 kg/dm³
MÁXIMO	4,05 %	4,44 %	9,41 %	10,31 %	2,42 kg/dm³	2,49 kg/dm³	2,49 kg/dm³	2,60 kg/dm³
MÍNIMO	2,81 %	2,86 %	6,81 %	6,93 %	2,28 kg/dm³	2,36 kg/dm³	2,38 kg/dm³	2,52 kg/dm³
DESVPAD	0,46 %	0,59 %	0,96 %	1,25 %	0,06 kg/dm³	0,05 kg/dm³	0,05 kg/dm³	0,04 kg/dm³
VAR	0,208	0,353	0,926	1,566	0,003	0,003	0,002	0,001
CV	12,92 %	15,51 %	11,64 %	13,99 %	2,46 %	2,14 %	1,96 %	1,48 %

**APÊNDICE D - DADOS DE EXPANSÃO PELO MÉTODO ASTM C-1260, ASTM
C1293, ANOVA E GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS**

Resultados de expansão (%) da areia quartzosa para as 3 barras de argamassa ao longo do tempo, até 30 dias.

Idade (dia)	AREIA NATURAL			
	A1	A2	A3	Am
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,01	0,01	0,01
7	0,01	0,01	0,01	0,01
8	0,02	0,02	0,02	0,02
9	0,02	0,02	0,02	0,02
11	0,04	0,04	0,04	0,04
12	0,04	0,05	0,04	0,04
13	0,05	0,05	0,05	0,05
14	0,06	0,06	0,06	0,06
15	0,06	0,07	0,06	0,06
16	0,07	0,07	0,07	0,07
19	0,09	0,09	0,09	0,09
20	0,10	0,10	0,11	0,10
21	0,11	0,11	0,11	0,11
22	0,11	0,12	0,12	0,12
23	0,12	0,13	0,13	0,13
26	0,15	0,15	0,15	0,15
27	0,15	0,16	0,16	0,15
28	0,16	0,16	0,16	0,16
29	0,17	0,17	0,17	0,17
30	0,18	0,18	0,18	0,18

Resultados de expansão (%) do agregado quartzito para as 3 barras de argamassa ao longo do tempo, até 60 dias.

Idade (dia)	QUARTZITO			
	Q1	Q2	Q3	Qm
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,02	0,02	0,02	0,02
6	0,09	0,00	0,03	0,04
7	0,11	0,03	0,06	0,07
8	0,13	0,05	0,08	0,09
9	0,16	0,07	0,11	0,11
10	0,18	0,09	0,13	0,13
13	0,24	0,15	0,20	0,20
14	0,25	0,17	0,21	0,21
15	0,26	0,19	0,23	0,23
16	0,28	0,20	0,24	0,24
17	0,29	0,20	0,25	0,25
20	0,32	0,23	0,28	0,28
21	0,34	0,25	0,30	0,30
22	0,35	0,26	0,31	0,31
23	0,36	0,27	0,32	0,32
24	0,37	0,28	0,34	0,33
27	0,41	0,32	0,37	0,36
28	0,42	0,32	0,38	0,37
29	0,42	0,33	0,39	0,38
30	0,43	0,35	0,40	0,39
31	0,44	0,36	0,41	0,40
34	0,47	0,37	0,43	0,42
35	0,50	0,40	0,47	0,46
41	0,52	0,43	0,49	0,48
43	0,54	0,43	0,52	0,50
45	0,55	0,46	0,53	0,51
48	0,58	0,48	0,55	0,54
49	0,59	0,48	0,55	0,54
50	0,59	0,49	0,56	0,55
51	0,59	0,50	0,57	0,55
52	0,60	0,51	0,58	0,56
55	0,62	0,52	0,59	0,58
56	0,63	0,53	0,60	0,59
57	0,63	0,53	0,61	0,59
58	0,64	0,54	0,61	0,60
59	0,64	0,55	0,62	0,60
60	0,65	0,55	0,63	0,61

Resultados de expansão (%) para os 4 prismas de concreto (Referência e Tratado com lítio), ao longo do tempo, até 365 dias.

Idade (dia)	REFERÊNCIA					TRATADO COM LÍTIO				
	R1	R2	R3	R4	Rm	L1	L2	L3	L4	Lm
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,012	0,003	0,013	0,001	0,007	0,000	0,003	0,001	0,017	0,005
28	0,004	0,004	0,014	0,000	0,005	0,010	0,003	0,002	0,010	0,006
56	0,017	0,015	0,018	0,011	0,015	0,017	0,015	0,012	0,017	0,015
90	0,018	0,021	0,020	0,006	0,016	0,015	0,019	0,017	0,021	0,018
112	0,038	0,037	0,033	0,015	0,031	0,023	0,031	0,032	0,036	0,030
155	0,054	0,046	0,048	0,032	0,045	0,052	0,048	0,044	0,038	0,046
170	0,068	0,054	0,055	0,038	0,054	0,067	0,066	0,055	0,049	0,059
175	0,072	0,055	0,056	0,040	0,056	0,071	0,063	0,057	0,048	0,060
180	0,073	0,058	0,058	0,040	0,057	0,068	0,068	0,060	0,048	0,061
197	0,072	0,066	0,060	0,043	0,060	0,073	0,062	0,057	0,049	0,060
203	0,079	0,073	0,065	0,052	0,068	0,077	0,065	0,060	0,052	0,063
223	0,081	0,072	0,066	0,050	0,067	0,082	0,071	0,064	0,054	0,068
230	0,085	0,076	0,071	0,052	0,071	0,087	0,073	0,067	0,054	0,070
244	0,085	0,076	0,073	0,058	0,073	0,087	0,075	0,067	0,053	0,071
267	0,084	0,077	0,072	0,063	0,074	0,087	0,074	0,066	0,053	0,070
300	0,088	0,081	0,073	0,062	0,076	0,087	0,073	0,066	0,052	0,069
330	0,091	0,088	0,081	0,064	0,081	0,087	0,075	0,067	0,053	0,071
365	0,097	0,093	0,086	0,069	0,086	0,089	0,075	0,069	0,053	0,072

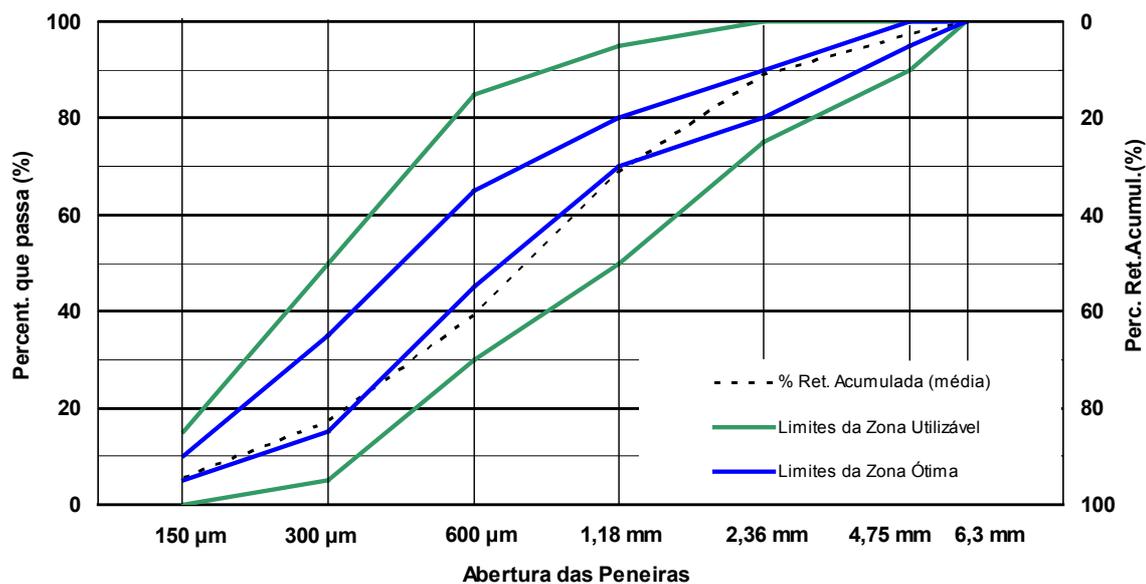
Resultados da análise de variâncias das expansões medidas nos 8 prismas de concreto (Referência e Tratado com lítio), entre idades de 267 e 365 dias.

Efeito - 267D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	0,000033	1	0,000033	0,24	5,99	NS
Erro	0,000832	6	0,000139			
Total	0,000865	7	---			
Efeito - 300D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	0,000086	1	0,000086	0,52	5,99	NS
Erro	0,000996	6	0,000166			
Total	0,001082	7	---			
Efeito - 330D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	0,000217	1	0,000217	1,27	5,99	NS
Erro	0,001023	6	0,000170			
Total	0,001240	7	---			
Efeito - 365D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	0,000437	1	0,000437	2,30	5,99	NS
Erro	0,001141	6	0,000190			
Total	0,001578	7	---			

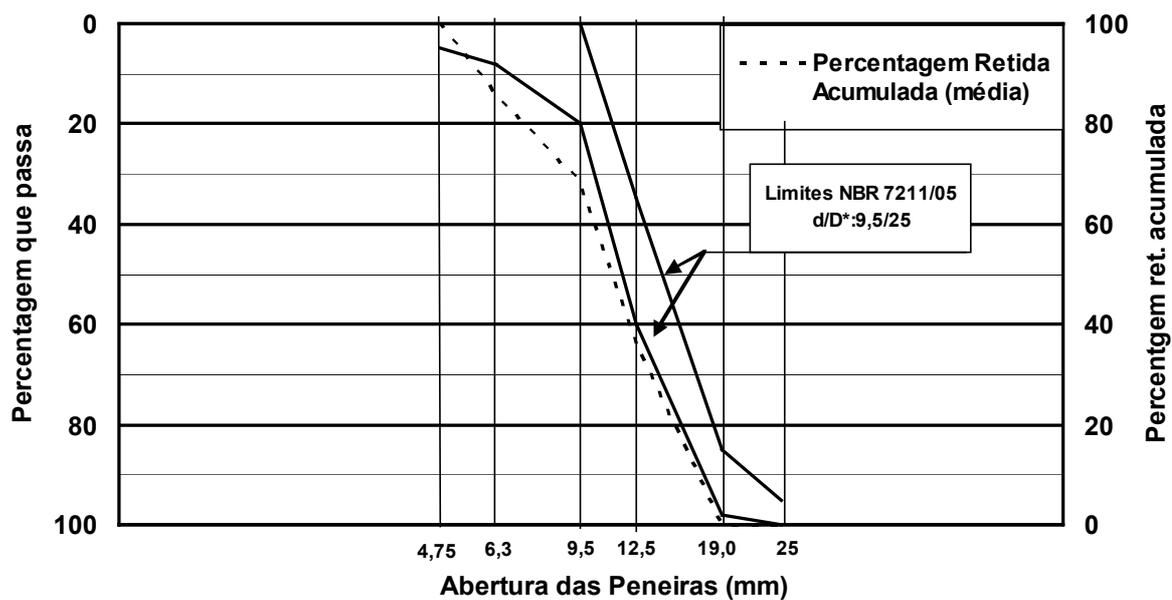
Resultados da análise de variâncias das velocidades ultra-sônicas medidas nos 8 prismas de concreto (Referência e Tratado com lítio), entre idades de 267 e 365 dias.

Efeito - 267D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	221491,09	1	221491,09	399,00	5,99	S
Erro	3330,68	6	555,11			
Total	224821,77	7	---			
Efeito - 300D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	222309,37	1	222309,37	89,60	5,99	S
Erro	14886,29	6	2481,05			
Total	237195,66	7	---			
Efeito - 330D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	335585,77	1	335585,77	425,63	5,99	S
Erro	4730,71	6	788,45			
Total	340316,47	7	---			
Efeito - 365D	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
Tipo de amostra	286696,61	1	286696,61	162,66	5,99	S
Erro	10575,38	6	1762,56			
Total	297271,99	7	---			

Granulometria do agregado miúdo (areia quartzosa) empregado



Granulometria do agregado graúdo (quartzito 19 mm) empregado



**APÊNDICE E - DADOS DOS ENSAIOS ULTRA-SÔNICOS COM O CONCRETO DA
GALERIA**

Velocidade ultra-sônicas (m/s) determinadas no concreto da galeria (in loco – método Indireto) e nos testemunhos após extração (longitudinalmente – método Direto)

N. Amostra	Ordem na Classe	Ordem Global	Indireto	Direto
Classe C0				
16	1	1	3250	4586
23	2	2	3098	4485
18	3	3	2994	4641
17	4	4	2984	4392
22	5	5	3403	4374
12	6	6	2916	4628
4	7	7	3495	4394
27	8	8	2225	4603
24	9	9	2242	4827
13	10	10	3270	4466
8	11	11	3074	4402
5	12	12	2996	4271
3	13	13	3217	4637
9	14	14	2935	4323
29	15	15	2940	4506
20	16	16	2988	4568
10	17	17	2979	4096
14	18	18	3432	4559
25	19	19	2709	4359
26	20	20	2718	4120
7	21	21	3274	4274
19	22	22	3427	4555
28	23	23	3051	4353
6	24	24	3119	4588
11	25	25	3174	4335
30	26	26	3469	4623
21	27	27	3302	4498
1	28	28	3755	4265
2	29	29	3208	4300
15	30	30	2750	3934

N. Amostra	Ordem na Classe	Ordem Global	Indireto	Direto
Classe C1				
52A	1	31	2725	4342
45A	3	32	2672	4173
48A	4	33	2668	4061
49A	5	34	2681	3961
32A	7	35	2812	3891
51A	8	36	2713	4418
61A	10	37	2714	4104
42A	11	38	3124	3770
64A	12	39	2929	3936
39A	13	40	2614	3877
40A	14	41	2245	4313
56A	17	42	2812	4317
30A	19	43	2926	3865
44A	21	44	3189	4195
33A	22	45	2737	3964
50A	23	46	2484	3701
43A	25	47	2944	4096
54A	26	48	2929	4378
60A	27	49	3255	4107
59A	28	50	2374	4272
31A	30	51	2783	3839
63A	32	52	2943	4175
35A	33	53	3234	3262
29A	34	54	3189	3978
65A	36	55	2790	3878
57A	37	56	2893	3592
58A	38	57	2922	3683
Classe C2				
13A	3	58	2792	3363
8A	4	59	2437	3951
16A	5	60	2465	3515
15A	6	61	1917	3720
23A	7	62	2749	3657
1A	8	63	2563	3721
25A	10	64	2406	3647
22A	11	65	1996	3411
26A	12	66	2308	3704
24A	15	67	2396	3452
21A	17	68	2650	3947
19A	19	69	2555	3884
2A	20	70	2245	3236
6A	21	71	2691	3522
11A	22	72	2498	3406
5A	24	73	2324	3272
9A	25	74	2404	3653
7A	26	75	2566	3711
18A	29	76	2799	3887
3A	30	77	2096	3067

APÊNDICE F - MEDIDAS DE CARBONATAÇÃO

Medidas de frente de carbonatação dos testemunhos de concreto ensaiados à tração por compressão diametral

Classe 0 - Testemunhos extraídos no sentido jusante

LEITURAS COM 30 MINUTOS APÓS A APLICAÇÃO DA FENOLFTALEÍNA

Leituras (mm)	Classe 0				
	23j	8j	20j	19j	15j
D1	61,70	28,56	18,94	51,10	35,00
D2	38,00	13,80	40,50	48,32	32,58
D3	40,00	40,00	20,36	36,58	31,01
D4	20,48	41,67	31,87	20,98	34,28
Dmáx	63,59	nt	nt	nt	nt
Dnatural	0,73	1,21	1,13	2	0,77
Doutro	nt	4,71	nt	nt	nt
MEDIA	40,05	31,01	27,92	39,25	33,22
STD	16,89	12,87	10,19	13,71	1,79
VAR	285,30	165,55	103,88	187,87	3,20
MÁXIMO	61,70	41,67	40,50	51,10	35,00
MÍNIMO	20,48	13,80	18,94	20,98	31,01
VC (%)	42,18	41,49	36,51	34,93	5,38
Tipo de frente	b	b	b	b	a

LEITURAS COM 24 HORAS APÓS A APLICAÇÃO DA FENOLFTALEÍNA

Leituras (mm)	Classe 0				
	23j	8j	20j	19j	15j
D1	61,78	28,96	18,97	52,28	36,04
D2	40,41	13,78	41,32	48,98	32,58
D3	39,98	38,64	22,42	37,96	30,36
D4	20,08	42,56	33,47	19,78	34,83
Dmáx	62,76	nt	nt	nt	nt
Dnatural	0,93	1,21	1,03	2,28	1,1
Doutro	nt	4,89	nt	nt	nt
MEDIA	40,56	30,99	29,05	39,75	33,45
STD	17,03	12,82	10,26	14,65	2,51
VAR	290,03	164,23	105,22	214,73	6,31
MÁXIMO	61,78	42,56	41,32	52,28	36,04
MÍNIMO	20,08	13,78	18,97	19,78	30,36
VC (%)	41,98	41,36	35,32	36,86	7,51
Tipo de frente	b	b	b	b	a

Classes 1 e 2 - Testemunhos extraídos no sentido montante

LEITURAS COM 30 MINUTOS APÓS A APLICAÇÃO DA FENOLFTALEÍNA

Leituras (mm)	CLASSE 01					CLASSE 02				
	B1-55B	B2-36A	B3-41A	B4-38A	B5-34A	B1-28A	B2-15B	B3-20A	B4-12A	B5-17A
D1	0	19,18	9,97	12,72	0	20,65	0	22,25	0	22,4
D2	0	20,33	8,84	7,01	0	12,37	0	19,51	0	14,07
D3	0	20,44	8,11	13,06	0	12,93	0	8,5	0	18,81
D4	0	22,02	9,66	23,12	0	17,08	0	9,98	0	26,3
Dmáx	13,8	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	0,1*	39,32
Dnatural	0,6	0,5	2,07	0,72	0,2	2,2	0,85	0	2,16	0,5
Doutro	nt	nt	1,26	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt
MEDIA	---	20,49	9,15	13,98	---	15,76	---	15,06	---	20,40
STD	---	1,17	0,84	6,70	---	3,88	---	6,84	---	5,21
VAR	---	1,36	0,70	44,85	---	15,05	---	46,78	---	27,14
MÁXIMO	---	22,02	9,97	23,12	---	20,65	---	22,25	---	26,30
MÍNIMO	---	19,18	8,11	7,01	---	12,37	---	8,50	---	14,07
VC (%)	---	5,69	9,17	47,91	---	24,62	---	45,42	---	25,54
Tipo de frente	nt	a	a	b	nt	b	nt	X/b	nt	b/c

*superficial

LEITURAS COM 24 HORAS APÓS A APLICAÇÃO DA FENOLFTALEÍNA

Leituras (mm)	CLASSE 01					CLASSE 02				
	B1-55B	B2-36A	B3-41A	B4-38A	B5-34A	B1-28A	B2-15B	B3-20A	B4-12A	B5-17A
D1	0	19,58	9,73	12,43	0	20,89	0	22,74	0	21,7
D2	0	20,29	9,2	6,54	0	12,69	0	18,98	0	13,75
D3	0	20,63	8	13,16	0	12,71	0	8,02	0	19,35
D4	0	22,02	10	23,5	0	16,74	0	9,32	0	26,12
Dmáx	14,11	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	0,2*	39,12
Dnatural	0,76	0,79	1,93	0,5	0,23	2,22	0,71	0,7	2,16	0,8
Doutro	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt
MEDIA	---	20,63	9,23	13,91	---	15,76	---	14,77	---	20,23
STD	---	1,02	0,89	7,05	---	3,92	---	7,22	---	5,15
VAR	---	1,05	0,79	49,68	---	15,33	---	52,17	---	26,54
MÁXIMO	---	22,02	10,00	23,50	---	20,89	---	22,74	---	26,12
MÍNIMO	---	19,58	8,00	6,54	---	12,69	---	8,02	---	13,75
VC (%)	---	4,97	9,60	50,68	---	24,85	---	48,92	---	25,47
Tipo de frente	nt	a	a	b	nt	b	nt	X/b	nt	b/c

*superficial

Observações:

- 1 - Foram realizadas 4 leituras superficiais de carbonatação em cada testemunho (D1 a D4), após aspersão com fenolftaleína - as medidas foram feitas após 30 min. e 24 horas, segundo recomendações da Rilem.
- 2 - Dmáx representa, no caso de uma fissura, a profundidade máxima medida nela ao longo da frente de carbonatação - pode não existir.
- 3 - Dnatural representa o maior valor obtido para a carbonatação natural ao longo das várias faces do CP, esta ocorrida entre data da extração e a data do ensaio de carbonatação.
- 4 - Doutro - medida de carbonatação natural em outro local, que não de maior carbonatação.
- 5 - Tipo de frente, segundo Rilem: a) frente uniforme; b) frente irregular; c) frente uniforme, com presença de Dmáx; nt - não existe frente; X - frente não especificada pela metodologia da Rilem.

**APÊNDICE G - DADOS DE EXPANSÃO E VARIAÇÃO DE MASSA NA EXPANSÃO
DOS TESTEMUNHOS**

Classe C0: Expansões (%) dos testemunhos de concreto extraídos a jusante.

Condição	E1					E2				E3				
	C0-B1-16	C0-B2-03	C0-B4-26	C0-B5-06	C0-E1-Média	C0-B1-22	C0-B4-07	C0-B5-01	C0-E2-Média	C0-B1-04	C0-B2-13	C0-B4-14	C0-B5-02	C0-E3-Média
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,015	0,000	0,004	0,010	0,007	0,038	0,032	0,004	0,025	0,037	0,049	0,031	0,062	0,045
14	0,025	0,002	0,016	0,009	0,013	0,045	0,044	0,015	0,035	0,038	0,065	0,033	0,068	0,051
21	0,030	0,014	0,026	0,017	0,022	0,057	0,047	0,029	0,044	0,037	0,056	0,044	0,074	0,053
28	0,027	0,012	0,023	0,011	0,018	0,050	0,042	0,018	0,037	0,042	0,060	0,049	0,077	0,057
56	0,038	0,010	0,015	0,031	0,024	0,081	0,048	0,017	0,049	0,045	0,058	0,054	0,064	0,055
84	--	--	--	--	--	0,062	0,063	0,011	0,046	0,051	0,052	0,057	0,052	0,053
112	0,024	0,008	0,023	0,011	0,017	0,086	0,074	0,018	0,059	0,055	0,069	0,073	0,043	0,060
150	0,040	0,013	0,028	0,021	0,026	0,078	0,087	0,020	0,062	0,046	0,079	0,089	0,052	0,067
180	0,041	0,017	0,031	0,020	0,027	0,061	0,070	0,016	0,049	0,056	0,088	0,092	0,064	0,075
210	--	0,025	0,036	0,026	0,029	0,050	0,073	0,017	0,047	0,068	0,083	0,080	--	0,077
240	--	0,027	0,032	0,024	0,028	0,069	0,074	0,018	0,054	0,069	0,086	0,077	--	0,077
270	--	0,026	0,034	0,027	0,029	0,072	0,077	0,027	0,058	0,066	0,084	0,084	--	0,078
300	--	0,015	0,038	0,025	0,026	0,076	0,074	0,025	0,058	0,068	0,087	0,080	--	0,079
330	--	0,023	0,033	0,027	0,027	0,077	0,074	0,031	0,061	0,069	0,089	0,088	--	0,082
365	--	0,025	0,031	0,026	0,027	0,078	0,073	0,034	0,062	0,078	0,092	0,095	--	0,088

Nota 1: Não foram realizadas leituras de expansão aos 84 dias para a condição E1.

Nota 2: Os testemunhos que finalizaram leituras de expansão aos 180 dias foram os selecionados para os ensaios mecânicos com o objetivo de compor as amostras da modelagem realizada.

Nota 3: O testemunho C0-B2-24 não permitiu qualquer leitura de expansão desde o princípio do ensaio, sendo eliminado do ensaio de expansão e rompido aos 180 dias, após imersão em água a 38°C.

Classe C1: Expansões (%) dos testemunhos de concreto extraídos a montante.

Condição	E1					E2					E3				
	C1-B1-52A	C1-B2-40A	C1-B4-60A	C1-B5-35A	C1-E1-Média	C1-B1-45A	C1-B2-61A	C1-B4-59A	C1-B5-57A	C1-E2-Média	C1-B1-48A	C1-B2-42A	C1-B4-50A	C1-B5-58A	C1-E3-Média
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,015	0,014	0,017	0,007	0,013	0,068	0,081	0,077	0,087	0,078	0,041	0,075	0,084	0,091	0,073
28	0,039	0,027	0,046	0,031	0,035	0,078	0,101	0,087	0,112	0,094	0,074	0,095	0,067	0,072	0,077
56	0,063	0,032	0,086	0,044	0,056	0,081	0,109	0,089	0,081	0,090	0,067	0,087	0,079	0,075	0,077
70	0,067	0,035	0,085	0,048	0,059	0,086	0,118	0,095	0,091	0,097	0,068	0,087	0,103	0,078	0,084
84	0,068	0,032	0,092	0,053	0,061	0,084	0,117	0,092	0,091	0,096	0,083	0,093	0,107	0,082	0,091
112	0,071	0,038	0,091	0,050	0,063	0,082	0,113	0,087	--	0,094	0,062	0,099	0,112	0,084	0,089
150	0,063	0,028	0,092	0,050	0,059	0,089	0,117	0,083	--	0,096	0,078	0,071	0,112	0,096	0,089
180	0,064	0,029	0,083	0,050	0,057	0,093	0,135	0,082	--	0,103	0,131	0,093	0,127	0,102	0,113
210	0,046	0,029	0,090	0,050	0,054	0,096	0,137	0,079	--	0,104	0,114	0,084	0,146	0,102	0,111
240	0,041	0,025	0,080	0,051	0,049	0,098	0,137	0,082	--	0,106	0,116	0,088	0,148	0,100	0,113
270	0,056	0,032	0,077	0,049	0,054	0,102	0,137	0,082	--	0,107	0,121	0,091	0,153	0,105	0,118
300	0,048	0,031	0,070	0,044	0,048	0,104	0,125	0,079	--	0,103	0,137	0,096	0,145	0,111	0,122
330	0,054	0,022	0,064	0,057	0,049	0,107	0,119	0,077	--	0,101	0,146	0,098	0,143	0,120	0,127
365	0,043	0,035	--	0,059	0,046	0,102	0,107	0,069	--	0,093	0,165	0,105	0,159	0,133	0,140

Nota 4: Algumas amostras, durante o ensaio, apresentaram problemas nas leituras indicando valores inconsistentes devido à questões adversas, não sendo portanto calculada a expansão naquela idade.

Classe C2 – Expansões (%) dos testemunhos de concreto extraídos a montante

Condição	E1					E2					E3				
	C2-B1-13A	C2-B2-26A	C2-B4-02A	C2-B5-03A	C2-E1-Média	C2-B1-08A	C2-B2-25A	C2-B4-06A	C2-B5-18A	C2-E2-Média	C2-B1-23A	C2-B2-22A	C2-B4-19A	C2-B5-07A	C2-E3-Média
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,008	0,019	0,011	0,010	0,106	0,056	0,112	0,063	0,084	0,093	0,055	0,078	0,047	0,068
28	0,021	0,035	0,033	0,021	0,027	--	0,080	0,082	0,086	0,082	0,092	0,060	0,091	0,087	0,083
56	0,037	0,055	0,043	0,036	0,043	--	0,108	0,077	0,086	0,090	0,098	0,085	0,101	0,078	0,091
70	0,031	0,053	0,041	0,033	0,039	--	0,106	0,078	0,093	0,092	0,097	0,075	0,100	0,071	0,086
84	0,035	0,059	0,043	0,028	0,041	--	0,094	0,071	0,094	0,086	0,100	0,083	0,104	0,079	0,091
112	0,035	0,054	0,045	0,027	0,040	--	0,080	0,066	0,090	0,079	0,097	0,086	0,098	0,076	0,089
150	0,034	0,061	0,041	--	0,046	0,118	0,087	0,065	0,093	0,091	0,109	0,102	0,105	0,079	0,099
180	0,024	0,060	0,043	--	0,042	0,116	0,093	0,063	0,093	0,091	0,117	0,109	0,099	0,094	0,105
210	0,031	0,058	0,043	--	0,044	0,114	0,082	0,061	0,093	0,088	0,123	0,116	0,117	0,075	0,108
240	0,024	0,048	0,041	--	0,038	--	0,082	0,060	0,092	0,080	0,136	0,125	0,124	0,077	0,116
270	0,028	0,051	0,044	--	0,041	0,110	0,090	0,067	0,097	0,091	0,143	0,134	0,134	0,081	0,123
300	--	0,048	0,034	--	0,041	0,099	0,087	0,068	0,099	0,088	0,152	0,143	0,129	0,087	0,127
330	--	0,047	0,027	--	0,037	0,106	0,086	0,071	0,092	0,089	0,164	0,158	0,137	0,089	0,137
365	--	0,045	0,039	--	0,042	--	0,083	0,061	0,094	0,080	0,178	0,180	0,147	0,104	0,152

Nota 5: Algumas amostras, durante o ensaio, apresentaram problemas nas leituras indicando valores inconsistentes devido à questões adversas, não sendo portanto calculada a expansão naquela idade.

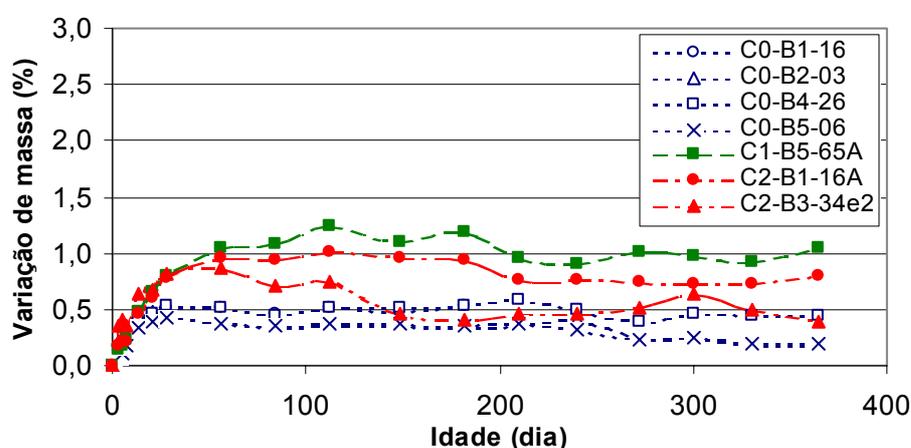
Classe C1 – Expansões (%) dos testemunhos de concreto extraídos a montante nas condições E4 e E5

Condição	E4					E5					
	Idade (dia)	C1-B1-49A	C1-B2-64A	C1-B4-43A	C1-B5-29A	C1-E4-Média	C1-B1-32A	C1-B2-39A	C1-B4-54A	C1-B5-63A	C1-E5-Média
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,051	0,079	0,049	0,048	0,057	0,090	0,008	0,036	0,010	0,036	0,036
28	0,065	0,093	0,058	0,044	0,065	0,100	0,049	0,075	0,044	0,067	0,067
56	0,061	0,094	0,063	0,045	0,066	0,097	0,054	0,087	0,042	0,070	0,070
84	0,059	0,062	0,075	0,052	0,062	0,088	0,054	0,087	0,037	0,067	0,067
112	0,067	0,065	0,081	0,058	0,068	0,084	0,057	0,089	0,036	0,067	0,067
150	0,075	0,074	0,081	0,068	0,075	0,078	0,059	0,086	0,037	0,065	0,065
180	0,081	0,093	0,091	0,084	0,087	0,081	0,067	0,089	0,041	0,070	0,070
210	0,087	0,093	0,091	0,096	0,092	0,083	0,069	0,089	0,041	0,071	0,071
240	0,093	0,094	0,089	0,095	0,092	0,086	0,076	0,089	0,041	0,073	0,073
270	0,104	0,095	0,085	0,098	0,095	0,092	0,082	0,085	0,046	0,076	0,076
300	0,112	0,097	0,090	0,099	0,100	0,100	0,089	0,088	0,043	0,080	0,080
330	0,126	0,101	0,097	0,107	0,108	0,115	0,098	0,088	0,049	0,088	0,088
365	0,142	0,105	0,107	0,108	0,115	0,125	0,108	0,086	0,053	0,093	0,093

Condição E1 – Variação de massa – Vm (%) dos testemunhos de concreto

Condição	E1							
	Idade (dia)	C0-B1-16	C0-B2-03	C0-B4-26	C0-B5-06	C1-B5-65A	C2-B1-16A	C2-B3-34e2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,14	0,07	0,14	0,10	0,14	0,18	0,35	0,35
5	0,22	0,08	0,17	0,11	0,18	0,21	0,40	0,40
7	0,31	0,16	0,25	0,17	0,24	0,21	0,36	0,36
14	0,36	0,35	0,40	0,33	0,48	0,46	0,64	0,64
21	0,45	0,48	0,47	0,40	0,65	0,60	0,68	0,68
28	0,51	0,44	0,53	0,42	0,80	0,78	0,82	0,82
56	0,51	0,38	0,52	0,36	1,05	0,96	0,87	0,87
84	0,46	0,34	0,45	0,35	1,08	0,94	0,71	0,71
112	0,51	0,35	0,51	0,37	1,24	1,00	0,74	0,74
150	0,49	0,36	0,51	0,37	1,11	0,96	0,46	0,46
180	0,54	0,34	0,52	0,35	1,20	0,94	0,40	0,40
210	--	0,35	0,59	0,37	0,96	0,76	0,46	0,46
240	--	0,41	0,49	0,32	0,91	0,76	0,47	0,47
270	--	0,25	0,39	0,24	1,00	0,74	0,51	0,51
300	--	0,25	0,46	0,25	0,97	0,72	0,65	0,65
330	--	0,18	0,45	0,19	0,92	0,73	0,50	0,50
365	--	0,18	0,45	0,19	1,04	0,80	0,39	0,39

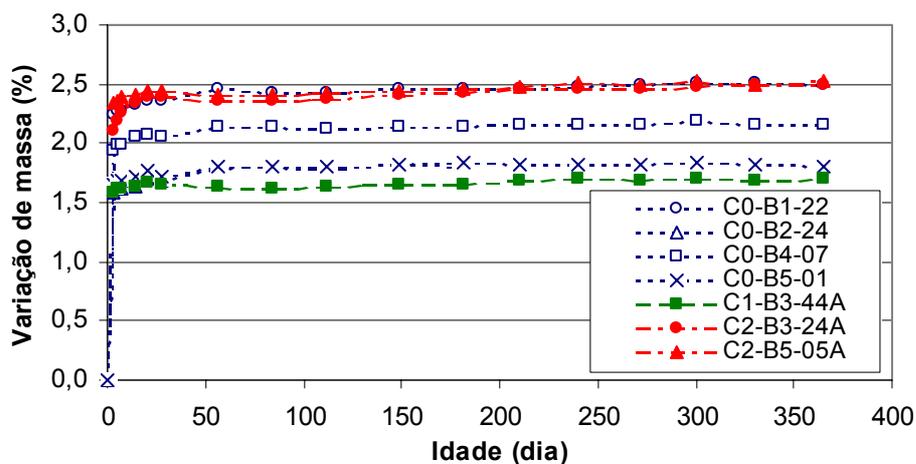
Nota 6: O testemunho C0-B1-16 finalizou as leituras de expansão aos 180 dias uma vez que foi selecionado para os ensaios mecânicos com o objetivo de compor as amostras da modelagem realizada.



Condição E2 – Variação de massa – Vm (%) dos testemunhos de concreto

Condição Idade (dia)	E2						
	C0-B1-22	C0-B2-24	C0-B4-07	C0-B5-01	C1-B3-44A	C2-B3-24A	C2-B5-05A
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	2,25	1,58	1,95	1,65	1,59	2,11	2,34
5	2,28	1,63	1,99	1,69	1,62	2,20	2,37
7	2,27	1,62	2,00	1,68	1,62	2,25	2,39
14	2,32	1,64	2,06	1,72	1,64	2,34	2,41
21	2,36	1,70	2,08	1,77	1,67	2,40	2,45
28	2,36	1,68	2,06	1,72	1,66	2,39	2,45
56	2,46	1,78	2,15	1,81	1,64	2,36	2,41
84	2,43	1,80	2,15	1,80	1,62	2,36	2,41
112	2,43	1,78	2,13	1,80	1,64	2,38	2,42
150	2,46	1,82	2,14	1,82	1,66	2,41	2,44
180	2,46	1,81	2,13	1,83	1,66	2,42	2,46
210	2,47	--	2,15	1,83	1,69	2,46	2,48
240	2,48	--	2,16	1,82	1,70	2,47	2,51
270	2,49	--	2,15	1,83	1,69	2,46	2,50
300	2,51	--	2,19	1,84	1,70	2,49	2,53
330	2,51	--	2,16	1,82	1,69	2,49	2,50
365	2,50	--	2,16	1,81	1,70	2,50	2,52

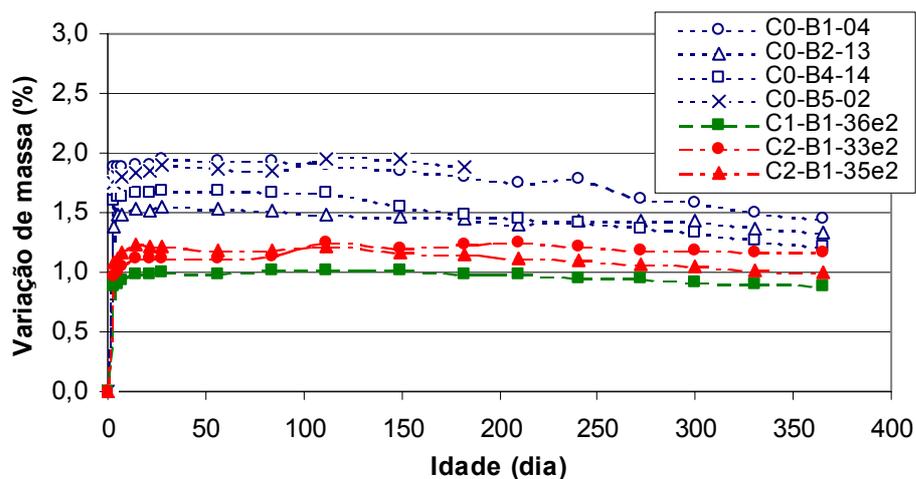
Nota 7: O testemunho C0-B2-24 finalizou as leituras de expansão aos 180 dias uma vez que foi selecionado para os ensaios mecânicos com o objetivo de compor as amostras da modelagem realizada.



Condição E3 – Variação de massa – Vm (%) dos testemunhos de concreto

Condição	E3						
Idade (dia)	C0-B1-04	C0-B2-13	C0-B4-14	C0-B5-02	C1-B1-36e2	C2-B1-33e2	C2-B1-35e2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,88	1,38	1,61	1,75	0,89	0,97	1,08
5	1,88	1,48	1,63	1,80	0,89	1,00	1,11
7	1,89	1,49	1,63	1,79	0,93	1,05	1,16
14	1,89	1,53	1,66	1,84	0,98	1,11	1,23
21	1,90	1,52	1,66	1,85	0,98	1,12	1,21
28	1,94	1,54	1,68	1,89	1,00	1,12	1,22
56	1,94	1,53	1,69	1,87	0,98	1,12	1,18
84	1,93	1,51	1,66	1,85	1,01	1,14	1,18
112	1,90	1,49	1,66	1,96	1,02	1,24	1,22
150	1,85	1,46	1,55	1,96	1,01	1,21	1,17
180	1,79	1,45	1,49	1,89	0,98	1,23	1,14
210	1,75	1,40	1,45	--	0,98	1,24	1,12
240	1,78	1,43	1,42	--	0,94	1,22	1,10
270	1,61	1,43	1,36	--	0,94	1,18	1,07
300	1,59	1,43	1,34	--	0,92	1,18	1,05
330	1,50	1,37	1,26	--	0,90	1,16	1,02
365	1,45	1,34	1,21	--	0,89	1,16	0,99

Nota 8: O testemunho C0-B5-02 finalizou as leituras de expansão aos 180 dias uma vez que foi selecionado para os ensaios mecânicos com o objetivo de compor as amostras da modelagem realizada.



**APÊNDICE H - DADOS DOS ENSAIOS ULTRA-SÔNICOS NA EXPANSÃO COM
OS TESTEMUNHOS**

Classe C0 – Velocidade ultra-sônicas (m/s) dos testemunhos de concreto extraídos a jusante

Condição	E1				E2				E3			
	C0-B1-16	C0-B2-03	C0-B4-26	C0-B5-06	C0-B1-22	C0-B2-24	C0-B4-07	C0-B5-01	C0-B1-04	C0-B2-13	C0-B4-14	C0-B5-02
0	4586	4637	4120	4588	4374	4827	4274	4265	4394	4466	4559	4300
7	4522	4614	3979	4636	4394	4710	4325	4383	4497	4504	4544	4432
14	4505	4657	3885	4668	4394	4806	4427	4474	4557	4474	4694	4405
21	4523	4718	3984	4630	4413	4769	4292	4410	4539	4467	4615	4425
28	4529	4388	3960	4660	4363	4771	4364	4433	4591	4484	4670	4468
56	4562	4535	3969	4564	4386	4817	4363	4506	4523	4434	4604	4430
84	4503	4583	4025	4593	4337	4727	4296	4418	4419	4301	4578	4538
150	4622	4573	4060	4601	4499	4850	4400	4532	4455	4218	4497	4401
180	4597	4724	4102	4627	4317	4898	4400	4463	4362	4315	4514	4316
210	---	4560	4153	4655	4488	---	4420	4555	4479	4214	4405	---
240	---	4774	4165	4649	4584	---	4448	4564	4431	4164	4488	---
270	---	4664	4017	4622	4469	---	4314	4483	4305	4259	4354	---
300	---	4689	4088	4545	4446	---	4401	4501	4360	4234	4485	---
330	---	4646	4079	4574	4463	---	4430	4568	4286	4271	4394	---
365	---	4717	4219	4734	4487	---	4387	4545	4282	4196	4341	---

Nota: Os testemunhos que não apresentam leitura após 180 dias foram aqueles retirados nesta idade para determinação das propriedades mecânicas para compor os dados da modelagem realizada.

Classe C1 – Velocidade ultra-sônicas (m/s) dos testemunhos de concreto extraídos a montante

Condição	E1				E2				E3			
	C1-B1-52A	C1-B2-40A	C1-B4-60A	C1-B5-35A	C1-B1-45A	C1-B2-61A	C1-B4-59A	C1-B5-57A	C1-B1-48A	C1-B2-42A	C1-B4-50A	C1-B5-58A
0	4342	4313	4107	3262	4173	4104	4272	3592	4061	3770	3701	3683
14	4158	3977	3860	3110	4065	4001	4127	3418	3979	4210	3709	3445
28	4325	4027	4031	3224	4299	4171	4281	3802	3971	4238	3738	3575
42	4331	4058	4060	3289	4244	4277	4300	3771	4025	4010	3954	3540
56	4322	4150	4070	3335	4235	4222	4298	3715	4105	4281	3988	3662
70	4435	4096	4165	3346	4301	4317	4321	3855	4106	4315	3970	3628
84	4436	4212	4079	3483	4419	4330	4432	4021	4077	4305	4049	3713
112	4461	4147	4209	3650	4482	4344	4445	3946	4118	4315	3939	3869
150	4459	4186	4218	3571	4341	4316	4414	3986	4056	4254	4115	3684
180	4462	4192	4303	3456	4460	4231	4390	4142	4031	4251	3656	4003
210	4413	4179	4086	3397	4404	4294	4419	4056	4041	4208	3944	3699
240	4350	4127	4218	3366	4328	4245	4390	3954	3919	4231	3901	3610
270	4375	4187	4194	3629	4385	4312	4530	4164	3937	4144	3526	3815
300	4402	4165	4056	3442	4476	4341	4325	4042	3961	4137	4000	3533
330	4488	4244	4109	3683	4398	4285	4407	4065	3943	4141	3980	3761
365	4415	4259	4091	3533	4470	4380	4392	4270	3834	4005	3900	3690

Classe C2 – Velocidade ultra-sônicas (m/s) dos testemunhos de concreto extraídos a montante

Condição	E1				E2				E3			
	C2-B1-13A	C2-B2-26A	C2-B4-02A	C2-B5-03A	C2-B1-08A	C2-B2-25A	C2-B4-06A	C2-B5-18A	C2-B1-23A	C2-B2-22A	C2-B4-19A	C2-B5-07A
0	3363	3704	3236	3067	3951	3647	3522	3887	3657	3411	3884	3711
14	2882	3423	2854	2811	3791	3545	3280	3678	3319	3413	3872	3790
28	3061	3573	2979	3035	3976	3727	3578	3750	3635	3517	3935	3840
42	3122	3644	3063	3078	3995	3681	3594	3792	3644	3662	3947	4030
56	3157	3693	3084	3047	4077	3789	3517	3869	3659	3665	3981	3980
70	3109	3661	2993	2967	4043	3695	3600	3743	3606	3691	3989	4073
84	3316	3770	3204	3180	4152	3901	3779	3938	3744	3771	4047	4187
112	3347	3813	3233	3250	4170	3814	3762	4018	3729	3776	4021	4187
150	3492	3861	3254	3267	4170	3898	3798	3987	3807	3783	3959	4123
180	3395	3773	3156	3171	4215	3982	3773	3949	3780	3812	3993	3932
210	3429	3809	3230	3276	4228	3941	3874	4032	3773	3829	3956	4030
240	3053	3773	3331	3242	3942	3822	3733	4087	3707	3824	3935	3994
270	3391	3852	3340	3242	4201	4011	3816	4154	3717	3753	3952	3903
300	3337	3833	3143	3206	4106	3949	3794	3955	3782	3845	3942	3941
330	3403	3787	3268	3265	4199	3961	3946	4096	3744	3870	3915	3985
365	3339	3773	3264	3236	4230	4011	4011	4144	3663	3727	3792	3952

**APÊNDICE I - DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS TESTEMUNHOS**

Pesos =>		1	1,4	1,7	1,3	1,5	2	Tempo Equivalente (ano)	Rc MPa	E GPa
CP	C0	C1	C2	E1	E2	E3				
1	C0-B1-18	44						44	18,10	18,75
2	C0-B2-27	44						44	<u>15,90</u>	18,31
3	C0-B3-29	44						44	<u>16,30</u>	18,11
4	C0-B4-28	44						44	20,50	17,49
5	C0-B5-21	44						44	21,00	<u>15,11</u>
6	C0-B1-16	44			0,5			44,7	20,10	18,60
7	C0-B1-17	44			0,5			44,7	18,60	<u>27,80</u>
8	C0-B2-24	44				0,5		44,8	<u>16,30</u>	<u>24,90</u>
9	C0-B3-10	44				0,5		44,8	<u>24,40</u>	<u>26,30</u>
10	C0-B2-02	44					0,5	45	19,30	<u>14,10</u>
11	C0-B5-11	44					0,5	45	18,20	18,40
12	C0-B2-03	44			1			45,3	<u>17,00</u>	<u>25,50</u>
13	C0-B4-26	44			1			45,3	<u>27,30</u>	17,65
14	C0-B5-06	44			1			45,3	23,40	23,77
15	C0-B1-22	44				1		45,5	21,20	23,00
16	C0-B4-07	44				1		45,5	22,90	20,12
17	C0-B5-01	44				1		45,5	20,50	<u>27,61</u>
18	C0-B1-04	44					1	46	21,00	16,70
19	C0-B2-13	44					1	46	<u>27,50</u>	<u>14,62</u>
20	C0-B4-14	44					1	46	22,10	<u>15,25</u>
21	C1-B1-51A		44					61,6	24,50	<u>20,58</u>
22	C1-B2-56A		44					61,6	30,70	18,87
23	C1-B3-30A		44					61,6	27,50	14,31
24	C1-B4-33A		44					61,6	32,30	13,98
25	C1-B5-31A		44					61,6	25,10	10,97
26	C1-B4-60A		44		1			62,9	29,80	15,00
27	C1-B5-35A		44		1			62,9	26,30	9,50
28	C1-B1-45A		44			1		63,1	30,70	17,10
29	C1-B2-61A		44			1		63,1	<u>33,00</u>	<u>21,30</u>
30	C1-B5-57A		44			1		63,1	<u>14,20</u>	8,20
31	C1-B2-42A		44				1	63,6	30,10	9,60
32	C1-B1-52A		44		2			64,2	30,20	<u>23,43</u>
33	C1-B2-40A		44		2			64,2	25,20	<u>21,31</u>
34	C1-B4-59A		44			2		64,6	<u>32,90</u>	<u>21,90</u>
35	C1-B1-48A		44				2	65,6	22,00	<u>4,80</u>
36	C1-B4-50A		44				2	65,6	29,30	<u>8,00</u>
37	C1-B5-58A		44				2	65,6	<u>17,40</u>	<u>4,80</u>
38	C2-B1-15A			44				74,8	<u>28,50</u>	11,52
39	C2-B2-01A			44				74,8	23,50	13,07
40	C2-B3-21A			44				74,8	23,70	11,66
41	C2-B4-11A			44				74,8	21,40	<u>5,35</u>
42	C2-B5-09A			44				74,8	<u>12,70</u>	9,06
43	C2-B1-13A			44	1			76,1	27,10	13,70
44	C2-B5-03A			44	1			76,1	21,70	<u>6,00</u>
45	C2-B1-08A			44		1		76,3	23,10	12,60
46	C2-B1-23A			44			1	76,8	<u>29,40</u>	<u>5,70</u>
47	C2-B2-22A			44			1	76,8	21,60	7,30
48	C2-B5-07A			44			1	76,8	<u>15,40</u>	6,70
49	C2-B2-26A			44	2			77,4	25,70	<u>14,40</u>
50	C2-B4-02A			44	2			77,4	19,70	9,21
51	C2-B2-25A			44		2		77,8	<u>28,10</u>	13,95
52	C2-B4-06A			44		2		77,8	20,20	13,90
53	C2-B5-18A			44		2		77,8	25,10	<u>16,70</u>
54	C2-B4-19A			44			2	78,8	21,60	9,60

Nota: Os valores sublinhados indicam os espúrios, representando os pontos que se afastaram em mais ou menos um desvio padrão da média dos resultados para uma mesma faixa de idade, no intervalo de no máximo 4 anos.

APÊNDICE J – DADOS DOS ENSAIOS ULTRA-SÔNICOS NA EXPANSÃO COM OS PRISMAS DE CONCRETO

Resultados de velocidade de propagação de ondas (m/s) para os 4 primas de concreto (Referência e Tratado com lítio), ao longo do tempo, até 365 dias.

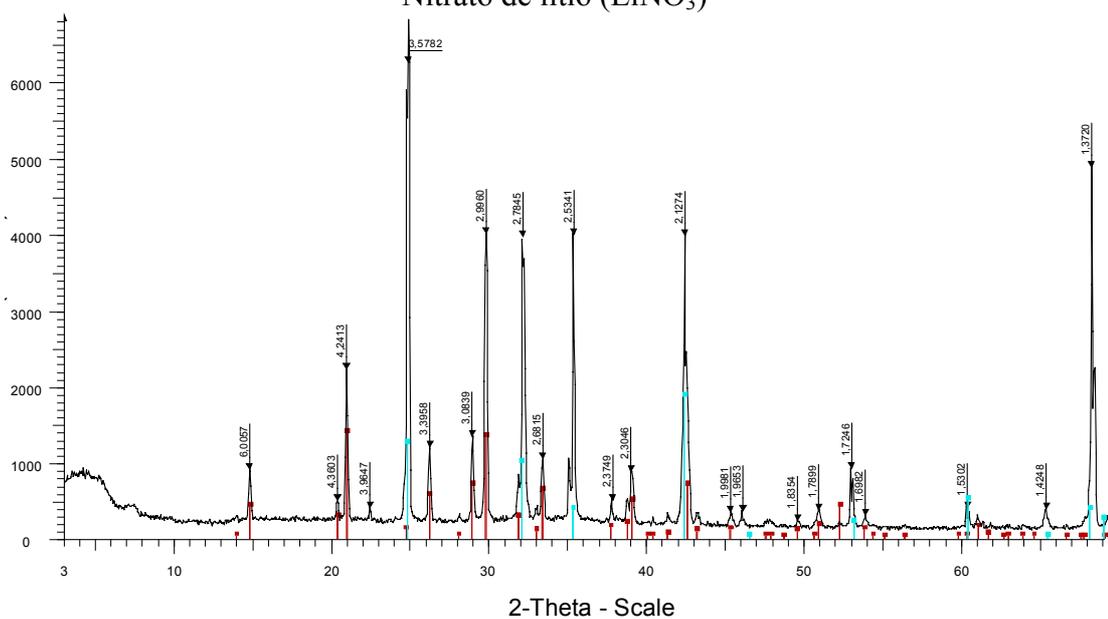
Idade (dia)	Prismas de referência					Prismas tratados com lítio				
	R1	R2	R3	R4	Rm	L1	L2	L3	L4	Lm
28	4435	4455	4440	4467	4449	4375	4457	4430	4431	4423
56	4599	4614	4596	4636	4611	4548	4609	4592	4588	4584
90	4472	4475	4522	4548	4504	4475	4521	4510	4481	4497
112	4446	4489	4476	4471	4470	4450	4467	4472	4516	4476
155	4393	4486	4407	4427	4428	4360	4469	4459	4457	4436
180	4343	4322	4335	4386	4347	4422	4445	4456	4462	4446
223	4284	4295	4315	4346	4310	4473	4458	4461	4533	4481
244	4242	4272	4254	4279	4262	4527	4512	4507	4555	4525
267	4283	4315	4318	4354	4318	4650	4673	4636	4642	4650
300	4309	4292	4326	4387	4328	4664	4584	4678	4721	4662
330	4299	4279	4296	4351	4307	4728	4681	4719	4737	4716
365	4344	4380	4380	4390	4374	4684	4731	4806	4788	4752

APÊNDICE K - DADOS RELATIVOS AO POTENCIAL ZETA

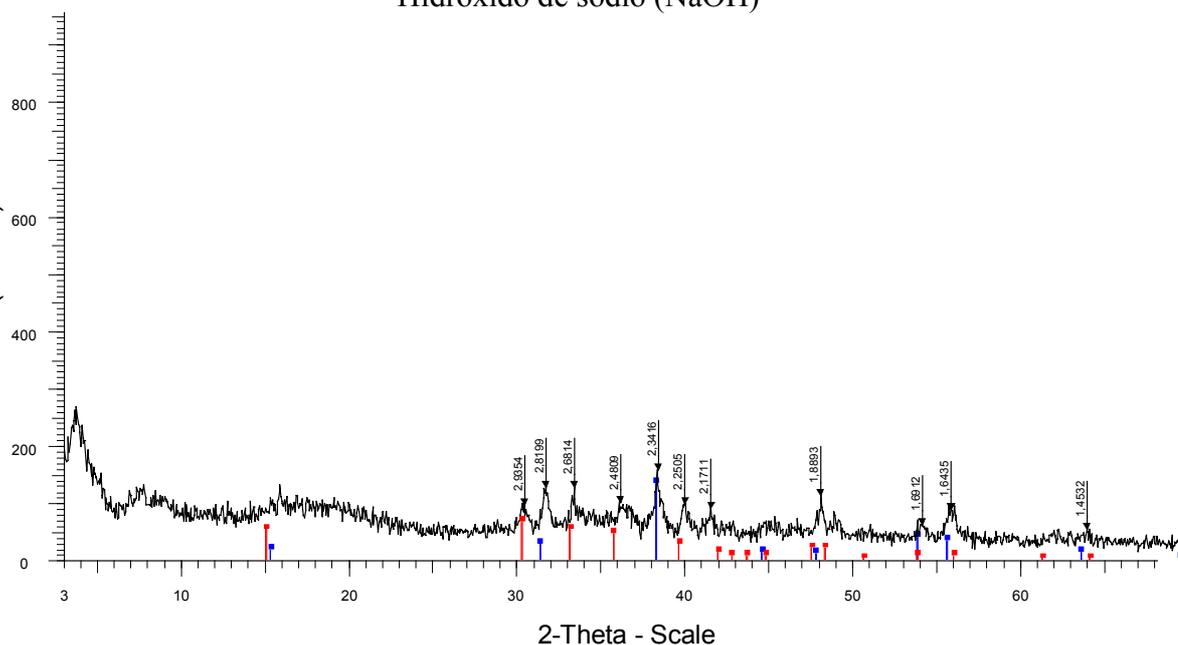
Valores de potencial zeta experimentalmente determinados para quatro condições distintas de pH do meio (2,3,7 e 9)

<i>Medições</i>	Potencial Zeta (mV)							
	<i>Amostra 1</i>				<i>Amostra 2</i>			
	pH = 2	pH = 3	pH = 7	pH = 9	pH = 2	pH = 3	pH = 7	pH = 9
1°	+12,9	-3,7	-55,2	-40,5	+17,7	-3,4	-44,4	-44,0
2°	+13,4	-4,0	-55,0	-40,9	+16,3	-3,7	-43,2	-45,2
3°	+11,2	-4,0	-54,7	-40,0	+20,2	-3,3	-42,4	-48,4
4°	+8,3	-3,8	-55,0	-37,9	+20,2	-3,4	-42,2	-46,4
5°	+9,3	-3,8	-55,7	-37,2	+19,7	-3,0	-43,5	-47,5
6°	+15,4	-3,8	-57,4	-39,9	+18,1	-2,4	-43,2	-46,3
7°	+12,9	-3,8	-56,5	-39,4	+18,3	-3,1	-43,9	-45,5
8°	+9,6	-3,7	-56,0	-39,5	+17,8	-2,6	-44,1	-43,6
9°	+9,6	-3,7	-55,1	-40,9	+20,8	-2,2	-43,2	-48,4
10°	+8,5	-3,6	-53,7	-39,6	+20,2	-3,4	-43,3	-41,7
Média	+11,2	-3,8	-55,4	-39,6	+18,8	-3,1	-43,3	-45,7
Desvio Padrão	2,4	0,1	1,0	1,2	1,5	0,5	0,7	2,2

APÊNDICE L - DIFRATOGRAMAS DOS REAGENTES

Nitrato de lítio (LiNO_3)

Reg. 1.3098.05 - nitrato de lítio - File: 1,3098,05.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1.
 Operations: Import
 24-0645 (*) - Lithium Nitrate Hydrate - $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ - Y: 20.45 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Orthorhombic - I/Ic PDF 1. - S-Q 42.9 %
 01-1225 (D) - Lithium Nitrate Oxide - LiNO_3 - Y: 27.27 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Rhombohedral - I/Ic PDF 1. - S-Q 57.1 %

Hidróxido de sódio (NaOH)

Reg. 1.3099.05 - Hidróxido de sódio (NaOH) - File: 1,3099,05.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.050 ° -
 Operations: Import
 01-1173 (D) - Sodium Hydroxide - NaOH - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Orthorhombic - I/Ic PDF 1. - S-Q 66.7 %
 02-0706 (N) - Sodium Hydroxide Hydrate - $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ - Y: 25.00 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - I/Ic PDF 1. - S-Q 33.3 %

APÊNDICE M - ESPECTROS DE RNM DOS PADRÕES UTILIZADOS

