

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL

TIAGO ANDRADE COUTO

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

ESTUDO DO FENÔMENO EM ROCHAS SILICOSAS

Goiânia

2008

TIAGO ANDRADE COUTO

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

ESTUDO DO FENÔMENO EM ROCHAS SILICOSAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Dra. Helena Carasek

Co-orientadora: Dra. Nicole Pagan Hasparyk

Goiânia

2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

Couto, Tiago Andrade

C871r Reação álcali-agregado [manuscrito]: estudo do fenômeno em rochas silicosas / Tiago Andrade Couto. – 2008
xix, 191 f.: il., color, figs., tabs., graf.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek; Co-orientadora: Dr^a. Nicole Pagan Hasparyk

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008.

Bibliografia: f.143-154.

Inclui lista de figuras, tabelas e abreviaturas e siglas.
Anexos.

1. Reação álcali-agregado 2. Patologia de Construção 3. Concreto – Corrosão I. Carasek, Helena. II. Hasparyk, Nicole Pagan. III. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil IV. Título.

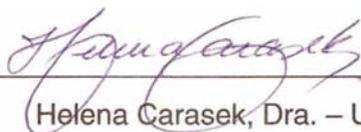
CDU: 691.54-032.5

TIAGO ANDRADE COUTO

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

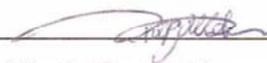
ESTUDO DO FENÔMENO EM ROCHAS SILICOSAS

Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do grau de Mestre, aprovada em 29 de agosto de 2008, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:



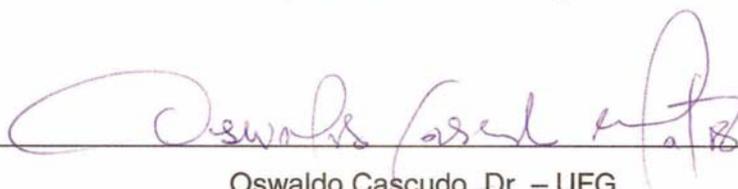
Helena Carasek, Dra. – UFG

(ORIENTADORA)



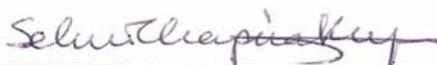
Nicole Pagan Hasparyk, Dra. – FURNAS

(CO-ORIENTADORA)



Oswaldo Cascudo, Dr. – UFG

(EXAMINADOR INTERNO)



Selmo Chapira Kuperman, Dr. – USP

(EXAMINADOR EXTERNO)

*Aos meus pais, Lauro e Rosana
exemplos e incentivadores do prazer da
leitura e da pesquisa, com muito
carinho.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não estaria devidamente concluído sem que nele expressasse meus mais sinceros agradecimentos e reconhecimento àqueles que de alguma forma contribuíram para sua elaboração.

Agradeço aos meus pais, Lauro e Rosana, meus primeiros e maiores orientadores, me apoiando ao longo de toda minha vida. Sem o incentivo e carinho de vocês certamente o caminho teria sido muito mais difícil. É impossível não deixar de agradecer aos meus irmãos Lara, Filipe e José, que mesmo estando distantes nunca deixaram de acreditar no meu sucesso.

À Márcia, minha amiga e companheira, pelo amor, paciência e ajuda nos bons e maus momentos. Te amo! Obrigado por tudo!

Agradeço a Prof^ª. Dra. Helena Carasek por quem tive o privilégio de ser orientado, pelo incansável apoio e contribuições decisivas ao longo deste trabalho, sempre manifestadas de forma amiga

À Dra. Nicole Hasparyk, quero expressar meu mais profundo agradecimento pela amizade, dedicação e estímulo. Devo a orientação, permanente incentivo, apoio concedido, sem nunca esquecer o quanto aprendi. Muito obrigado por tudo. Este trabalho também é seu!

Agradeço a todos os professores do CMEC que foram decisivos para meu aprendizado, Oswaldo Cascudo, André Geyer e Ênio Pazzini, além dos funcionários Tancredo e Mário pela amizade. Aos amigos e companheiros de mestrado Renata, Danúbia, Alessandra, Allyne, Cecília, Danilo e Mário, muito obrigado por tudo. Não poderia deixar de agradecer aos amigos do GECON: Wilson, Marcelo e Guma.

Ao Mateus, que o tenho hoje como irmão, por ter aberto as portas para mim quando cheguei a Goiânia; Liomar e Jossenilson pela amizade e solidariedade constante durante esses quase dois anos de companheirismo na república. Agradeço aos meus tios Austerno e Iris e meus primos Yan e Victor por terem sido meus “pais” e “irmãos” nesses quase 1.400 km longe de casa.

Agradeço ao Emílio, Danillo, Guilherme e Hudson responsáveis diretos por minha participação em eventos sócio-culturais em todo o estado de Goiás e adjacências. Também não poderia deixar de registrar meus agradecimentos ao Café Cancun, It's, House Garden, Wolff, Pecuária, GO Music, Eclipse, cidade de Goiás e Três Ranchos, Distribuidora Queiroz de Bebidas, Bar da Tia, Calambau, Postinho, choppadas e as “goianas”.

A todos os amigos que fiz em Goiânia ao longo desses quase dois anos: Pedro, Hasis, Tati, Cíntia, Gabi, Gisele, Kelly, Carol, Andressa, Raquel, Érika, Samuel, Gustavo,

Ana Elisa, Maria Tereza, Tibério, Karen, Manel, Antônio, Raimundo, Élcio, Diogo, Auro, Renato, Ana Teresa, Sérgio, Luciana e a todos aqueles que certamente não caberiam nesta página, espero que a distância não permita que nossa amizade se perca!

Agradeço a Cristiane, que sempre esteve me ajudando no que fosse possível e impossível, ao Tizzo, Danilo, Alcício e Ademir pela vontade e dedicação na preparação e execução dos ensaios e a todos os outros funcionários de Furnas que de alguma forma contribuíram para este trabalho: Júlio, José Reis, Douglinhas, Cléber, Divino, Zezé, Vilmar, Adão, Zito, Élcio Guerra, Juliana, Fátima, Alceu, Ricardo, Alexandre, Ziza, Jésus, “Mão de Onça”, Reynaldo, Renato Fernandes, André, Joaquim, Cícero, Renato e àqueles que encurtaram minhas caminhadas diárias a Furnas me concedendo caronas.

Ao Paulo Monteiro, idealizador do projeto Aneel e a todos os integrantes que durante nossas reuniões apresentaram considerações importantes para enriquecimento deste trabalho: Francieli Tiecher, Márcia Gomes, José Schneider, Luiz Eiger, Moacir Andrade, Rogério Prado, Vladimir Paulon, Denise Dal Molin, Philippe Gleize, Paulo Henrique Rolim, Cristiane Silva, Wilson Cândido e Danilo Gonçalves.

Agradeço aos geólogos Carlos Reis e Ana Livia e em especial a Heloísa e Márcia Gomes pela dedicação e disponibilidade na interpretação das análises petrográficas e DRX além das aulas de geologia e mineralogia.

Agradeço a SABESP, por ter aberto as portas e prontificado em ceder amostras da Barragem de Pedro Beicht, em nome da Eng^a Wong Sui Tung e do motorista Carlos, que se disponibilizaram em acompanhar a coleta, sem nunca se esquecerem do apoio dado pelo Dr. Selmo Kuperman que nos forneceu este contato. À CEMIG, em nome da Maria Cecília por ter cedido amostras de agregado da UHE Jaguará. À CHESF, em nome da Eng^a Patrícia Silva pelo agregado da UHE Moxotó. Por fim aos fornecedores das amostras: Antônio Moro Neto, Artur Alves Gomes da Silva, Divino Batista Corrêa, Vicente Moreira da Silva, Salim Mamed Abdalla Filho, Flávio Rassi, Ozílio Domingues da Silva, Antônio, José Batista de Oliveira, Lindomar Martins, Sônia Maria, Kalium Fernando Tum e Sérgio Henrique Bernardes.

Ao Romério, Geraldo Carvalho e Raul companheiros de profissão durante meu primeiro emprego na Valemix que sempre me incentivaram e com quem muito aprendi. Agradeço também a toda equipe da Camargo Corrêa Cimentos pelo apoio no final da dissertação.

E por fim, a Furnas Centrais Elétricas S.A, dentro do Programa de P&D da ANEEL pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa do projeto intitulado "Identificação de agregados reativos e combate da reação álcali-agregado em barragens" dentro do ciclo 2004/2005", bem como a CAPES pela bolsa de mestrado, à UFG e ao Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS por terem viabilizado o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

COUTO, T.A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, 2008.

Desde 1997, quando as reações expansivas do tipo álcali-agregado ganharam uma maior difusão no âmbito nacional com o primeiro Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado (RAA), foi observado um envolvimento mais expressivo de diversos profissionais da área na busca de soluções para este problema. Atualmente, no Brasil, esta manifestação patológica que até então, de uma maneira geral, era exclusiva de obras hidráulicas, já vem sendo observada em estruturas residenciais e comerciais dentro de grandes centros, como os casos relatados da região metropolitana de Recife durante o segundo Simpósio sobre RAA em 2006. No estado de Goiás esta preocupação não foi diferente e, em virtude disto, este trabalho tem por objetivo apresentar a investigação da potencialidade reativa de agregados deste estado comparando com o comportamento de agregados procedentes de algumas obras que representam casos clássicos brasileiros com a UHE Furnas (MG), UHE Moxotó (AL/BA), Barragem de Pedro Beicht (SP) e UHE Jaguará (SP), além de agregados utilizados em obras civis de Pernambuco e um basalto altamente reativo do Paraná. Foram, portanto, selecionados vinte e dois agregados com litologias variadas para este trabalho. A utilização da técnica de petrografia e do método acelerado em barras de argamassa (NBR 15577) foram objeto de estudo da pesquisa, incluindo a análise dos agregados por meio do método químico (NBR 9774) e pelo método dos prismas de concreto (NBR 15577), adaptado na versão acelerada. Foram empregados dois tipos de cimento de mesmo clínquer (cimento A e B) procedentes do estado de Goiás. Os resultados indicaram potencialidades reativas variadas entre os agregados e comportamentos distintos entre alguns métodos de ensaio para o mesmo agregado, bem como a viabilidade do combate da RAA, dependendo do cimento empregado.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; agregado; expansão; durabilidade.

ABSTRACT

COUTO, T.A. **Alkali-aggregate reaction: a study of the phenomenon in siliceous rocks.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, 2008.

The symposium on Alkali-Aggregate Reaction (AAR) held in Goiânia in 1997 led to a greater dissemination of this deleterious reaction in Brazil, motivating engineers to find solutions for the problem. Recently, in Brazil, this occurrence has occurred in several building foundations in the Recife metropolitan area besides hydraulic powers plants, as can be seen in some publications from the last AAR Symposium in 2006. This study presents an investigation of several aggregates commercially used in the State of Goiás, Brazil, in order to determine their potential reactivity. In addition, their behavior were compared to the ones from aggregates from several Brazilian classic cases such as Furnas HPP (MG), Moxotó HPP (AL/BA), Pedro Beicht Dam (SP/MG) and Jaguara HPP (SP), beyond aggregates used in civil works of Pernambuco and also a highly reactive basalt from Paraná. The experimental program tested twenty-two rock samples with varied lithology and two local types of cements that had the same clinker (cement A and B). The research uses petrographic analyses, accelerated mortar bar test (NBR 15577), chemical test method (NBR 9774) and accelerated concrete prisms test (based on NBR 15577), to assess the reactivity of the rocks. The results indicate that aggregates show varied expansivity and reactivity among them and sometimes one specific aggregate present different behavior by comparing the results form the test methods performed. This study also discusses the possibility of preventing deleterious expansion from tested aggregates by using the correct type of cement.

Keywords: alkali-aggregate reaction; aggregate; expansion; durability.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1	IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	20
1.1.1	PANORAMA NACIONAL	24
1.1.2	NORMALIZAÇÃO NACIONAL	28
1.2	OBJETIVOS GERAIS DA PESQUISA	32
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS DA PESQUISA	32
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	33

CAPÍTULO II – MINERAIS E ROCHAS

2.1	ESTRUTURA E CROSTA TERRESTRE	34
2.2	MINERAIS	35
2.2.1	GENERALIDADES	35
2.2.2	PRINCIPAIS MINERAIS FORMADORES DAS ROCHAS	38
2.3	ROCHAS	40
2.3.1	GENERALIDADES	40
2.3.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS	42
2.3.2.1	<i>Rochas Ígneas</i>	42
2.3.2.2	<i>Rochas Sedimentares</i>	44
2.3.2.3	<i>Rochas Metamórficas</i>	44

CAPÍTULO III – A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

3.1	ASPECTOS GERAIS	50
3.2	TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	51
3.2.1	REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA	51
3.2.1.1	<i>Reação Álcali-Silicato</i>	52
3.2.2	REAÇÃO ÁLCALI-CARBONATO	53
3.3	A QUÍMICA DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA	55
3.4	MECANISMOS DE EXPANSÃO	57
3.5	AGENTES CAUSADORES DA RAA	61
3.5.1	TEOR DE ÁLCALIS NO CONCRETO	62
3.5.2	AGREGADOS	65
3.5.3	UMIDADE	69
3.5.4	OUTROS FATORES	70

CAPÍTULO IV – A RAA NAS ROCHAS SILICOSAS

4.1	MINERAIS E ROCHAS POTENCIALMENTE REATIVOS.....	71
4.1.1	QUARTZO.....	73
4.1.2	OPALA.....	74
4.1.3	VIDRO VULCÂNICO.....	75
4.1.4	FELDSPATO.....	75
4.1.5	OUTROS MINERAIS.....	77
4.2	OUTROS AGENTES ASSOCIADOS À RAA.....	79
4.3	ÍNDICE DE REATIVIDADE POTENCIAL – IRP.....	80

CAPÍTULO V – PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1	ASPECTOS GERAIS.....	82
5.2	MATERIAIS.....	83
5.1.1	CIMENTO.....	83
5.1.2	AGREGADO.....	85
5.3	MÉTODOS.....	87
5.1.3	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	88
5.1.4	MÉTODO QUÍMICO.....	88
5.1.5	MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA.....	89
5.1.6	MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO.....	91
5.1.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	95

CAPÍTULO VI – RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA.....	97
6.1.1	BASALTOS.....	97
6.1.2	GRANITOS.....	99
6.1.3	GRANODIORITO.....	100
6.1.4	MILONITO.....	101
6.1.5	QUARTZO-XISTOS.....	102
6.1.6	QUARTZITOS.....	104
6.2	ANÁLISE DE SEÇÃO POLIDA.....	104
6.3	MÉTODO QUÍMICO.....	105
6.4	MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA.....	108
6.5	MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO.....	120
6.6	INTERAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DE ENSAIO.....	122
6.6.1	MÉTODO QUÍMICO X MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA E EM PRISMAS DE CONCRETO.....	123
6.6.2	MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA X MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO.....	126
6.6.3	MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO X ULTRA-SOM X VARIAÇÃO DE MASSA.....	129
6.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	133

6.8	ANÁLISE DE RISCO: CÁLCULO DO IRP.....	137
6.9	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS EMPREGADAS	138
CAPÍTULO VII – CONSIDERAÇÕES FINAIS		
7.1	CONCLUSÕES	140
7.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	141
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
	ANEXO A	155
	ANEXO B	156
	ANEXO C	159
	ANEXO D	175
	ANEXO E	176
	ANEXO F	177
	ANEXO G	188

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Figura 1.1 – Fissuras causadas pela RAA em edifício público de 13 pavimentos, construído em 1994 com agregado milonítico contendo quartzo deformado, microcristalino e recristalizado	22
Figura 1.2 – Fissuras causadas pela RAA em edifícios da RMR	23
Figura 1.3 – Fluxograma geral para uso do agregado em concreto	30

CAPÍTULO II – MINERAIS E ROCHAS

Figura 2.1 – O ciclo das rochas	41
Figura 2.2 – Composição química média dos magmas	42
Figura 2.3 – Relação de algumas características com as rochas ígneas mais comuns	43
Figura 2.4 – Metamorfismo regional ou dinamotermal	45
Figura 2.5 – Metamorfismo de contato ou termal	46
Figura 2.6 – Metamorfismo cataclástico ou dinâmico	47
Figura 2.7 – Metamorfismo de soterramento	47
Figura 2.8 – Metamorfismo hidrotermal	48
Figura 2.9 – Metamorfismo de fundo oceânico	48
Figura 2.10 – Metamorfismo de impacto	49

CAPÍTULO III – A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Figura 3.1 – Tipos de sílica, cristalina e amorfa	51
Figura 3.2 – Características do agregado antes (a) e depois da reação (b)	53
Figura 3.3 – Esquema mostrando as etapas da reação álcali-carbonato.	54
Figura 3.4 – Ruptura das ligações do grupo siloxano pelo pH elevado.	55
Figura 3.5 – Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas	56
Figura 3.6 – Ruptura das ligações do grupo siloxanos pelas hidroxilas	57
Figura 3.7 – Estrutura do gel	57
Figura 3.8 – Modelo idealizado para representar a indução de fissuras	59
Figura 3.9 – Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, segundo o conceito da dupla camada difusa	59
Figura 3.10 – Mecanismo de expansão da Teoria da Dupla Camada Elétrica	60

Figura 3.11 – Fatores necessários para gerar a RAA deletéria	62
Figura 3.12 – Classificação do comportamento da reação em função da relação entre os álcalis disponíveis e o consumo de cimento no concreto	63
Figura 3.13 – Teor de álcalis ($\text{kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_e$) fornecido pelo cimento ao concreto em função da dosagem de cimento (kg/m^3) e do teor de álcalis do cimento ($\%\text{Na}_2\text{O}_e$)	63
Figura 3.14 – Resultados de expansão segundo a ASTM C 227	64
Figura 3.15 – Influência do tamanho do agregado na expansão do concreto	65
Figura 3.16 – Relação entre expansão e tamanho da partícula do agregado	66
Figura 3.17 – Relação entre expansão e módulo de finura do agregado	67
Figura 3.18 – Relação entre expansão e área específica do agregado	67
Figura 3.19 – Influência da forma dos grãos nas expansões do ensaio acelerado	68
Figura 3.20 – Comportamento péssimo do agregado	68

CAPÍTULO IV – A RAA NAS ROCHAS SILICOSAS

Figura 4.1 – Textura, morfologia e composição de algumas rochas susceptíveis a RAA e características do modelo de desenvolvimento da reação	73
Figura 4.2 – Liberação de álcalis dos agregados em solução supersaturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e água destilada a 80°C aos 28 dias em diversas granulométricas	77
Figura 4.3 – Influência das esmectitas no método químico	78

CAPÍTULO V – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Figura 5.1 – Fluxograma do programa experimental	83
Figura 5.2 – Principais tipos litológicos dos agregados para concreto no estado de Goiás	86
Figura 5.3 – Detalhe do equipamento (Leitz, modelo Ortholux 2 Pol-BK) utilizado na análise petrográfica	88
Figura 5.4 – Alguns detalhes do método químico	89
Figura 5.5 – Alguns detalhes do método acelerado em barras de argamassa	91
Figura 5.6 – Expansões médias da areia padrão do IPT com cimento A	92
Figura 5.7 – Algumas etapas do método acelerado em prismas de concreto	94
Figura 5.8 – Alguns detalhes do ensaio de ultra-som em prismas de concreto	95
Figura 5.9 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado na pesquisa	96

CAPÍTULO VI – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 6.1 – Média dos resultados obtidos no método químico	106
Figura 6.2 – Média dos resultados obtidos no método químico em função dos litotipos	107
Figura 6.3 – Aspecto final das barras de argamassa moldadas com a amostra QZ.2 e cimento A	108
Figura 6.4 – Expansões médias dos basaltos com cimento A	109
Figura 6.5 – Expansões médias das rochas granitóides com cimento A	110
Figura 6.6 – Expansões médias dos quartzo-xistos com cimento A	111
Figura 6.7 – Expansões médias dos quartzitos com cimento A	112
Figura 6.8 – Média dos resultados obtidos no método acelerado em barras de argamassa em função dos litotipos – Cimento A	113
Figura 6.9 – Expansões médias dos basaltos com cimento B	114
Figura 6.10 – Expansões médias das rochas granitóides com cimento B	114
Figura 6.11 – Expansões médias dos quartzo-xistos com cimento B	115
Figura 6.12 – Expansões médias dos quartzitos com cimento B	115
Figura 6.13 – Média dos resultados obtidos no método acelerado em barras de argamassa em função dos litotipos – Cimento B	116
Figura 6.14 – Mitigação das expansões aos 16 e 30 dias	118
Figura 6.15 – Modelo ajustado para as amostras analisadas e intervalo de confiança	119
Figura 6.16 – Expansões médias dos basaltos pelo método acelerado dos prismas de concreto ...	121
Figura 6.17 – Aspecto final de um dos prismas de concreto moldado com a amostra BA.3	122
Figura 6.18 – Superfície da correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289.	124
Figura 6.19 – Projeção da correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289 ..	124
Figura 6.20 – Correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289	125
Figura 6.21 – Correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289	126
Figura 6.22 – Correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-1293	127
Figura 6.23 – Velocidades ultra-sônicas dos prismas de concreto	129
Figura 6.24 – Correlação entre as velocidades ultra-sônicas e as expansões dos prismas de concreto	131
Figura 6.25 – Variação de massa dos prismas de concreto	132
Figura 6.26 – Correlação entre a variação de massa e a velocidade ultra-sônica dos prismas de concreto	133
Figura 6.27 – Micrografias apresentando a vista geral das amostras	134
Figura 6.28 – Micrografias apresentando as morfologias dos géis encontrados nas amostras	135
Figura 6.29 – Espectros apresentados na região central das microanálises da Figura 6.31	136
Figura 6.30 – Micrografias apresentando a perda de aderência entre a matriz e o agregado	136

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Tabela 1.1 - Principais estruturas hidráulicas afetadas pela RAA	21
Tabela 1.2 – Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição	29
Tabela 1.3 – Medidas de mitigação	31

CAPÍTULO II – MINERAIS E ROCHAS

Tabela 2.1 – Sistemas cristalinos	37
Tabela 2.2 – Principais minerais formadores das rochas silicosas do grupo dos silicatos	39
Tabela 2.3 – Principais minerais formadores das rochas silicosas do grupo dos não-silicatos	40
Tabela 2.4 – Classificação sistemática dos minerais da classe dos silicatos	40
Tabela 2.5 – Principais minerais das rochas ígneas	43
Tabela 2.6 – Principais características das rochas metamórficas	49

CAPÍTULO IV – A RAA NAS ROCHAS SILICOSAS

Tabela 4.1 – Agregados ígneos potencialmente reativos	71
Tabela 4.2 – Agregados metamórficos potencialmente reativos	72
Tabela 4.3 – Rochas, minerais e constituintes sintéticos reativos deletérios	72
Tabela 4.4 – Índice de reatividade potencial – IRP	80
Tabela 4.5 – Estudo de caso – IRP	81
Tabela 4.6 – Estudo de caso – IRP	81

CAPÍTULO V – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tabela 5.1 – Características mecânicas dos cimentos	84
Tabela 5.2 – Características químicas dos cimentos	84
Tabela 5.3 – Características físicas dos cimentos	85
Tabela 5.4 – Agregados utilizados na pesquisa	87

Tabela 5.5 – Frações granulométricas dos agregados para o ensaio da ASTM C-1260	90
Tabela 5.6 – Volume compactado seco de agregado graúdo / m ³ de concreto	93
Tabela 5.7 – Frações granulométricas do agregado graúdo para o ensaio da ASTM C-1293	93

CAPÍTULO VI – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 6.1 – Características gerais dos basaltos	98
Tabela 6.2 – Características gerais dos granitos	100
Tabela 6.3 – Característica geral do granodiorito	101
Tabela 6.4 – Característica geral do milonito	102
Tabela 6.5 – Características gerais dos quartzo-xistos	103
Tabela 6.6 – Características gerais dos quartzitos	104
Tabela 6.7 – Média dos resultados obtidos no método químico	105
Tabela 6.8 – Propostas de limites de expansão para o método acelerado em prismas de concreto	121
Tabela 6.9 – Condição de utilização do concreto pela velocidade ultra-sônica	130
Tabela 6.10 – Análise de risco – Cálculo do IRP	137
Tabela 6.11 – Resumo de todos os resultados obtidos a partir dos métodos empregados	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Cimento Portland
ANOVA – Análise de variâncias
ASTM – American Society for Testing and Materials
BA – Basalto
CESP – Companhia Energética de São Paulo
CF/AM – Clorofeita/argilominerais
CP – Corpo-de-prova
CP II-F – Cimento Portland composto com adição de filler
CP IV – Cimento Portland pozolânico
CSA – Canadian Standards Association
E.O. – Extinção ondulante
EDS – Espectrômetro por energia dispersiva de raios X
Eq. alcalino ou $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ – Equivalente alcalino = $\text{Na}_2\text{O} + (0,658 * \text{K}_2\text{O})$
GD – Granodiorito
GR – Granito
HPP – Hydroelectric power plant
IRP – Índice de reatividade potencial.
MABA – Método acelerado em barras de argamassa.
MAPC – Método acelerado em prismas de concreto.
MEV – Microscópio eletrônico de varredura
ML – Milonito
MPC – Método dos prismas de concreto
MV – Matriz vítrea
NBR – Norma Brasileira Regulamentada
PI – Potencialmente inócuo
PR – Potencialmente reativo
QX – Quartzo-xisto
QZ – Quartzito
QzEO – Quartzo com extinção ondulante
QzMG – Quartzo microgranular
Ra – Redução da alcalinidade
RAA – Reação álcali-agregado
RAC – Reação álcali-carbonato.
RAS – Reação álcali-sílica
RASS – Reação álcali-silicato
RMR – Região metropolitana de Recife

Sd – Sílica dissolvida

SIAL – Camada da crosta composta de silício e alumínio

SIMA – Camada da crosta composta de silício e magnésio

UFG – Universidade Federal de Goiás

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHE – Usina Hidroelétrica

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Desde a década de 30, várias manifestações patológicas de caráter expansivo ocorreram em pontes e pavimentos nos Estados Unidos, sem se saber a real causa. No entanto, apenas nos anos 40 quando Thomas E. Stanton publicou seus primeiros relatos identificando que tais expansões eram provenientes de reações envolvendo um alto teor de álcalis presente no cimento associado com certos agregados contendo opala e *chert*, tinham sua parcela de contribuição nas expansões causadas pela Reação Álcali-Agregado (RAA) (STANTON, 1940; HOBBS, 1988; LEPS, 1995).

No Brasil, os primeiros trabalhos sobre a potencialidade reativa de agregados se deram na década de 60, quando Heraldo Gitahy realizou estudos envolvendo materiais pozolânicos para o complexo de Urubupungá da CESP, contemplando as UHE's de Jupia e Ilha Solteira, utilizando argila calcinada para a mitigação da RAA. O sucesso em seu trabalho é tamanho que até o momento não se tem registros deste tipo de reação nas obras citadas (PAULON, 1981; PACELLI, 1999). No entanto, apenas em 1985, conforme relatado por Kihara e Scandiuzzi (1993), foi divulgado a primeira suspeita de RAA no Brasil, tratando-se do caso consagrado da Usina Hidroelétrica Apolônio Sales (Moxotó). Posteriormente, vários outros casos foram diagnosticados, conforme apresentado pela Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Principais estruturas hidráulicas afetadas pela RAA

Estrutura	Fim da construção	Evidenciado a RAA	Litologia	Local afetado pela RAA	Ref.
Barragem Atibainha	1973	1992	Biotita gnaissse cataclástico	Muro da Tulipa	4
Barragem Cascata	1976	1992	Granito-gnaissse	Travessia a jusante	4
Barragem de Pedras	1970	1990	Quartzito	Barragem	3
Barragem de Pirapora	1956	1998	-	Barragem	5
Barragem Joanes II	1971	1994	Gnaissse	Barragem	3
Barragem Paiva Castro	1972	1992	Biotita granito-gnaissse	Vertedouro e Muro esquerdo	4
Barragem Reguladora Billings-Pedra	1926	1995	Granito	Barragem	3
Barragem Reguladora Pedro Beicht	1932	1995	Granito-gnaissse	Barragem	3
Barragem Ribeirão do Campo	1962	1992	Biotita gnaissse cataclástico	Galeria	4
Barragem Rio das Pedras	1970	1996	Gnaissse	Barragem	3
Barragem Tapacurá	1975	1990	-	Barragem	2
Túnel 2	1973	1992	Granito	Emboque	4
Túnel 7	1981	1992	Granito-gnaissse cataclástico	Contraforte	4
UHE Furnas	1964	1976	Quartzito	Barragem	3
UHE Ilha dos Pombos	1930	1990	Gnaissse	Barragem	3
UHE Jaguará	1971	1996	Quartzito	Barragem	3
UHE Jaguarí	1982	1992	Gnaissse milonitizado	Crista vertedouro	4
UHE Jurupará	1970	1995	Gnaissse	Barragem	3
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	-	-	Quartzito	Vertedouro	1
UHE Mascarenhas de Moraes	1957	-	Quartzito	Barragem	1
UHE Moxotó	1977	1985	Granito-gnaissse	Casa de força	3
UHE Paulo Afonso I	1954	1978	Granito-gnaissse	Barragem	3
UHE Paulo Afonso II	1960	1978	Granito-gnaissse	Barragem	3
UHE Paulo Afonso III	1973	1978	Granito-gnaissse	Barragem	3
UHE Paulo Afonso IV	1979	1985	Granito-gnaissse	Barragem	3
UHE Peti	1946	1990	Gnaissse	Barragem	3
UHE Porto Colômbia	1973	1985	Cascalho e Basalto	Vertedouro e Casa de Força	1
UHE Sá Carvalho	1975	1995	Gnaissse	Barragem	3
UHE Santa Branca	1960	1995	Gnaissse	Barragem	3
Usina Elevatória de Traição	1940	1990	Milonito	Barragem	3
UTE Piratininga	1962	2002	-	Recalque do pórtico	5

Referências

- 1 – Veiga, Gonçalves e Hasparyk (1997)
- 2 – Hasparyk (1999)
- 3 – Andriolo (2000)
- 4 – Tung et al. (2006)
- 5 – Braun (2006)

Recentemente, as atenções no meio técnico têm se voltado para as obras civis da Região Metropolitana do Recife (RMR) desde o ano de 2004, quando motivado pelo desabamento do edifício Areia Branca, foi realizada uma extensa inspeção nos elementos de fundação dos edifícios vizinhos, e ao final de vários diagnósticos de diversos profissionais, foram verificados alguns indícios da RAA, embora esta manifestação patológica não tenha sido a causa do colapso da referida estrutura. A partir de então, até o ano de 2006, mais de 25 casos de RAA foram constatados na região, apontando como causas principais a existência de agregados contendo quartzo extremamente deformados,

microcristalinos e recristalizados associado à baixa profundidade do lençol freático próximo à superfície e a disponibilidade de álcalis solúveis, em especial potássicos, além das altas temperaturas ambientais. O mais interessante, é que, diferentemente de casos clássicos da literatura, onde as expansões deletérias se dão em longo prazo, algumas obras da RMR apresentaram fissurações deletérias em até três anos após a construção (ANDRADE, 2006; ANDRADE *et al.*, 2006a; ANDRADE *et al.*, 2006b; PECCHIO *et al.*, 2006).

Pecchio *et al.* (2006) ressaltam que não há na literatura registro similar da ocorrência da RAA com essa magnitude em edificações urbanas e com tamanho impacto social. Em alguns casos, somados a outros agentes, as tensões de tração internas no concreto chegaram a valores extremamente elevados, como se pode observar pela ruptura do estribo apresentado na Figura 1.1. Nas fotografias apresentadas na Figura 1.2 subsequente, é mostrada a magnitude dessas expansões causadas pela RAA nas obras da RMR.



Figura 1.1 – Fissuras causadas pela RAA em edifício público de 13 pavimentos, construído em 1994 com agregado milonítico contendo quartzo deformado, microcristalino e recristalizado (ANDRADE *et al.*, 2006b).



(a)

Bloco de edifício com 9 anos de idade;
Agregado: *Milonito contendo quartzo deformado, microcristalino e recristalizado*



(b)

Bloco de edifício com 11 anos de idade;
Agregado: *Hornblenda gnaiss contendo quartzo deformado e microcristalino*



(c)

Bloco de edifício com 21 anos de idade;
Agregado: *Gnaiss cataclástico contendo quartzo deformado, microcristalino e recristalizado*



(d)

Bloco de edifício de 10 anos de idade;
Agregado: *Granito porfírico contendo quartzo deformado e Gnaiss e Milonito cataclástico contendo quartzo deformado, microcristalino e recristalizado*

Figura 1.2 – Fissuras causadas pela RAA em edifícios da RMR (ANDRADE, 2006)

Passados cerca de 70 anos desde os primeiros trabalhos de Stanton, várias outras pesquisas e estudos foram realizados mundialmente. Muitos trabalhos abordam de forma eficiente e clara como evitar a reação antes que ela se consolide, podendo ser pela utilização de adições minerais e químicas, limitação do teor de álcalis do cimento, dentre outras, mostrando a importância de se trabalhar na prevenção. No que diz respeito ao tratamento da RAA em obras já executadas, o que se tem visto são medidas provisórias como injeção de materiais cimentícios nas fissuras, monitoramento das expansões ou até mesmo cortes para alívio das tensões ocasionadas pela RAA.

1.1.1 PANORAMA NACIONAL

No Brasil, ao longo de quase trinta anos foram defendidos alguns trabalhos acadêmicos a respeito da reatividade dos agregados com os álcalis do cimento. Foram selecionadas as principais dissertações e teses, bem como seus resultados mais relevantes encontrados por seus autores, a saber:

- **Paulon (1981):** o autor fez uma extensa revisão da bibliografia, apresentando os principais casos clássicos de obras nacionais e internacionais com manifestações patológicas causadas pela RAA; apontou os principais ensaios para averiguação da potencialidade reativa dos agregados e teceu alguns comentários a respeito da mitigação da reação indicando o uso de adições minerais como alternativa para mitigação da RAA, sendo o primeiro trabalho nacional sobre o tema.
- **Hasparyk (1999):** a autora constatou que alguns métodos de avaliação apresentaram resultados “falso negativos” como os métodos Osipov e Químico, sendo que a análise petrográfica e o método acelerado em barras de argamassa mostraram-se eficientes na investigação da RAA. Os métodos de ensaio, a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram a confirmação dos produtos da RAA, mostrando as várias morfologias do gel, além de permitir uma análise semi-quantitativa dos elementos presentes no gel usando o detector de elétrons retroespalhados em amostras polidas e uma posterior correlação com as expansões geradas. Constatou-se que tanto a sílica ativa quanto a cinza de casca de arroz foram eficazes quanto à mitigação das expansões em adição ao cimento em 12%. Por fim, foi constatada uma forte correlação entre a relação C/S, taxa E_{BIV} e equivalente alcalino do gel, que quanto maiores estes parâmetros do gel, maiores as expansões causadas pela RAA.
- **Farage (2000):** a autora apresentou uma modelagem e implementação numérica das expansões causadas pela RAA, onde por meio de um programa de elementos finitos e comparando com resultados experimentais, este se mostrou capaz de reproduzir o comportamento do concreto reativo sob determinadas condições de tensão.
- **Valduga (2002):** a autora estudou o comportamento reativo de 36 rochas comercializadas no estado de São Paulo, revelando a análise petrográfica como uma técnica muito útil, assim como o método acelerado em barras de argamassa e a microscopia eletrônica de varredura. No entanto, o método químico não foi

considerado eficiente para os tipos de agregados amostrados. Sendo assim, cerca de 60% dos agregados analisados demonstraram reatividade potencial.

- **Sabbag (2003):** o autor estudou concretos extraídos da UHE Mascarenhas sob a ótica da RAA. Em análises petrográficas e por MEV, ficou comprovado a presença do gel expansivo na interface agregado/argamassa, poros e nas microfissuras do agregado. Também se observou que mesmo passados 30 anos, as amostras de concreto extraídas da UHE apresentaram expansões residuais de até 0,20% pelo método acelerado normalmente usado para barras de argamassa.
- **Lopes (2004):** a autora apresentou um modelo computacional que simula o estado de tensões causado pela RAA em concretos de barragens. O modelo leva em consideração a temperatura, umidade, poro-pressão do gel e sua microfissuração, sendo os parâmetros que caracterizam a RAA determinados de ensaios de expansão livre. Os resultados mostraram que o modelo pode ser utilizado em exemplos com um grande número de graus de liberdade, constituindo-se em uma ferramenta que permite a simulação da RAA para casos reais.
- **Hasparyk (2005):** a autora investigou em uma primeira etapa testemunhos de concretos extraídos da UHE Furnas afetada pela RAA, onde foram observados reflexos negativos nas propriedades mecânicas pela RAA, em especial o módulo de elasticidade. Também se verificou tensões residuais nos corpos-de-prova extraídos quando expostos a determinadas condições ambientais. Numa segunda etapa, procurou-se investigar a potencialidade reativa do agregado utilizado na UHE, onde o agregado mostrou-se com expansões bastante elevadas pelo método preconizado pela ASTM C-1260 e ASTM C-1293. Nos concretos moldados, também ficou evidente que o módulo de elasticidade foi à propriedade mais afetada pela RAA. No estudo da mitigação das expansões residuais, o lítio mostrou-se potencial tanto para os concretos extraídos quanto para os moldados. Por fim, numa terceira etapa, foi feito um amplo estudo no gel exsudado da superfície do concreto *in loco*, tratando-se de um silicato potássico hidratado amorfo com grande potencialidade para expandir.
- **Ribeiro (2006):** a autora faz uma extensa pesquisa focando a caracterização mineralógica de 25 agregados comercializados na Região Metropolitana do Rio de Janeiro para utilização em concretos estruturais e comenta que alguns agregados apresentaram fases reativas pela petrografia, sendo necessários estudos em concreto e argamassa para averiguação da potencialidade reativa dos agregados.

- **Silveira (2006):** a autora, diferentemente dos demais trabalhos, estudou um tipo particular, pouco comum no mundo, da RAA chamado reação álcali-carbonato (RAC). Foram estudados seis diferentes tipos de rochas carbonáticas que apresentavam as características favoráveis à RAC. Também se verificou que as rochas carbonáticas podem contribuir para a reação álcali-silicato, pois apresentam na sua composição silicatos, que reagem e se transformam, sendo fonte para a formação de novos produtos expansivos.
- **Tiecher (2006):** A autora estudou a potencialidade reativa de 40 agregados do sul do Brasil associados a quatro tipos diferentes de cimentos Portland encontrados no mercado. Todos os agregados apresentaram minerais reativos pela petrografia, sendo suas expansões medidas conforme a ASTM C-1260 onde todas as amostras foram classificadas como potencialmente reativas ou reativas para os cimentos CP V-ARI, CP V-ARI RS e CP II-Z. No entanto, somente o CP IV reduziu as expansões a valores que as classificam como inócuas. Foi constatado que as maiores expansões ocorreram nas rochas ígneas vulcânicas, em especial nos basaltos, em função da presença minerais muito finos e do vidro vulcânico, também conhecido como mesóstase silicosa. Averiguou que mesmo nas amostras menos expansivas houve a formação de produtos da RAA, porém sem o caráter deletério.
- **Munhoz (2007):** o autor estudou o efeito de quatro adições minerais (escória de alto-forno, cinza volante, metacaulim e sílica ativa) na mitigação da RAA em dois tipos de agregados: basalto e milonito granítico, sendo encontrados minerais reativos em suas mineralogias. No basalto, suas fases reativas vítreas e amorfas reagiram rapidamente ao serem comparadas com as estruturas cristalizadas de quartzo e feldspatos presentes no milonito. Todas as adições mostraram-se eficientes no combate da RAA, para os agregados testados, dependendo do teor testado. O gel originado da reação álcali-sílica do basalto estava localizado na superfície dos agregados sugerindo baixa viscosidade, ao contrário do gel formado pela reação álcali-silicato, que estava presente nos poros da matriz cimentícia.
- **Silva, P. (2007):** a autora estudou concretos de 20 e 50 anos afetados pela RAA de cinco hidroelétricas do Complexo Hidroelétrico Paulo Afonso. Os resultados mostram que, embora os concretos tenham sido moldados há décadas, estes ainda apresentam elevada potencialidade reativa, mas que as estruturas de concreto se apresentam pouco deterioradas quando comparadas a outras estruturas. Com relação às propriedades mecânicas, não se observou redução

significativa das resistências à compressão, tração e fluência, tendo sido o módulo de elasticidade a propriedade mais sensível aos efeitos da RAA.

- **Silva, I. (2007):** o autor estudou três formas de mitigação da RAA, com cinza de casa de arroz amorfa (CCA A) e cristalina (CCA C) e sílica ativa em concretos e argamassas moldados com agregado quartzítico da UHE Furnas. Pelos ensaios em argamassa ficou evidente a redução das expansões a valores aceitáveis por norma aos 16 dias apenas para o teor de 20%, na presença da CCA C e sílica ativa. Já o teor de 20% de CCA A demonstrou ser um teor péssimo, extremamente deletério, uma vez que intensificou as expansões. Com relação ao ensaio em concretos, estes foram uma adaptação do método ASTM C-1293, porém a 60°C, por um período de 3 meses. Foi constatado que as expansões ultrapassam todos os valores propostos já nas primeiras idades indicativo de um agregado extremamente deletério. Porém, as adições de cinza de casca de arroz amorfas e cristalinas utilizadas, reduziram as expansões em até 71% com relação ao prisma de concreto de referência.
- **Valduga (2007):** a autora, em seu novo trabalho, verificou a influência de alguns parâmetros nas expansões, fazendo uso de um dos métodos de ensaios mais consagrados para avaliação da potencialidade reativa de agregados, o método acelerado em barras de argamassa. Os fatores do ensaio avaliados foram a relação água/cimento, a consistência da argamassa e a forma do grão. Foi observado que existe influência da relação água/cimento nos resultados de expansão por RAA, bem como da consistência da argamassa, originada pela forma do grão, sendo a influência da consistência maior que a da relação água/cimento. A autora ainda comenta que as maiores expansões são causadas por agregados de grãos com formato mais arredondado e por argamassas com menores relações água/cimento, pois em ambos os casos têm-se menor porosidade e conseqüentemente maior densificação da matriz.
- **Sanchez (2008):** o autor estudou a eficiência e confiabilidade dos principais e mais utilizados métodos de ensaios laboratoriais para análise de agregados e sua combinação com o cimento, utilizando seis agregados reativos de diversas litologias encontrados no Brasil. Foi encontrada boa correlação entre os métodos em concreto (MPC – método dos prismas de concreto, MAPC – método acelerado dos prismas de concreto, MAPCIS – método acelerado dos prismas de concreto imerso em solução) podendo, segundo o autor, ser utilizado qualquer um destes métodos para a classificação da reatividade potencial de agregados. Entretanto, o método acelerado em barras de argamassa (MABA) apresentou

discrepância de avaliações quando comparado com a petrografia e os ensaios em concreto.

Conforme apresentado, existem diversos trabalhos de extrema importância publicados no Brasil. Ressalta-se que se encontram em andamento diversos outros estudos em universidades como: UFG, UFRGS, UFRJ, UFSC dentre outras, sendo o presente estudo mais uma contribuição para o meio técnico.

1.1.2 NORMALIZAÇÃO NACIONAL

Nota-se em muitos trabalhos, e levando muitas vezes diversos profissionais a tomarem medidas extremamente radicais ao se deparem com ensaios de reatividade, em especial aos fornecidos pela petrografia e método acelerado em barras de argamassa por serem os mais utilizados, a falta de suporte de uma normalização clara e voltada para a realidade dos agregados brasileiros, que em grande parte são de origem metamórfica.

Sendo assim, a nova norma brasileira ABNT NBR 15577 (2008), recentemente publicada, concentra-se em realizar uma análise de risco da possibilidade da ocorrência da reação álcali-agregado levando em consideração as condições de exposição, dimensões e responsabilidade estrutural da estrutura ou do elemento de concreto de modo a indicar uma possível ação preventiva. No entanto, a norma ainda não contempla reparos e/ou ações mitigadoras em situações onde já estão instaladas as manifestações patológicas da RAA.

Na Tabela 1.2 é apresentada a classificação proposta pela nova norma da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição.

Tabela 1.2 – Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição (extraído da ABNT NBR 15577-1, 2008).

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Estruturas provisórias ¹		Estruturas ou elementos estruturais correntes ²		Estruturas especiais ³	
	Classificação da ação preventiva	Exemplo de estrutura	Classificação da ação preventiva	Exemplo de estrutura	Classificação da ação preventiva	Exemplo de estrutura
Não maciço e seco ^{4, 5}	Desnecessária	Edificações provisórias não expostas à umidade atmosférica	Desnecessária	Superestruturas de obras residenciais, comerciais, industriais e outras	Mínima	
Maciço e seco ^{4, 5, 6}	Desnecessária	Edificações provisórias não expostas à umidade atmosférica	Moderada	Bases internas para equipamento pesado. Edifícios com revestimento externo	Forte	Superestruturas de hospitais, estações, <i>shopping centers</i> , estádios e outras
Não maciço e exposto a umidade ou em contato com água ^{4, 5}	Desnecessária	Proteções de taludes rochosos com concreto projetado, fundações de edificações provisórias, caixas d'água, canteiro de obras	Moderada	Postes, cruzetas, tubos e outros elementos similares de concreto	Forte	Estruturas de obras de arte. Comportas de concreto. Fundações de subestações. Pré-moldados externos e de galerias. Pavimentos externos. Elementos de fundações de grandes obras residenciais, comerciais e industriais
			Forte	Vigas baldrame e elementos de fundações correntes		
Maciço e em contato com água ^{4, 7}	Mínima	Canteiro de obras. Ensecadeiras galgáveis ou integralmente em concreto. Fundações de edificações provisórias	Forte	Estádios. Estações de tratamento de esgoto. Estruturas de fundações	Forte	Infraestruturas de obras de arte. Estruturas hidráulicas. Estruturas de usinas termoeletricas, nucleares e eólicas

1) Estruturas provisórias são aquelas com curto período de vida útil de projeto. Para os efeitos desta Norma considera-se que um curto período de vida útil de projeto corresponde ao máximo de 5 anos.

2) Estruturas correntes são consideradas as construções prediais, residenciais, industriais e comerciais em geral.

3) Estruturas especiais que englobam as obras com vida útil elevada, com grande responsabilidade estrutural, cuja ruína pode acarretar danos expressivos, grande perda de vidas ou dificultar o socorro às vítimas. Nesta categoria estão incluídas estruturas de grande porte, estruturas de aproveitamentos hidráulicos, usinas térmicas, instalações nucleares, obras de arte de engenharia e estruturas nas quais grandes reparos são impossíveis de ser realizados ou inviáveis do ponto de vista financeiro.

4) Elemento maciço é aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1 m (CSA.A23.2-27A). Esta limitação refere-se à possibilidade de reação devida à umidade interna do concreto, mesmo quando exposto a ambientes secos.

5) Para os efeitos desta norma, considera-se que ambiente seco corresponde à ausência permanente de umidade em contato com o concreto da estrutura. Os elementos estruturais enterrados são considerados úmidos. Elementos estruturais revestidos não enterrados são considerados protegidos da umidade.

6) A reação álcali-agregado pode ocorrer em elementos de estruturas maciças, em ambientes secos, uma vez que o concreto pode possuir internamente umidade relativa suficiente para o desenvolvimento da reação.

7) Elemento maciço em contato com água diretamente ou umidade proveniente do solo ou de rochas.

NOTA Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de estrutura ou elementos estruturais de concreto. Meios agressivos e manifestações patológicas podem contribuir para acelerar o processo deletério iniciado pela reação álcali-agregado.

Para a decisão de uso do agregado e, eventualmente, de medidas mitigadoras, a norma recomenda a utilização do fluxograma apresentado na Figura 1.3, levando em consideração a análise de risco e seus fatores ditos anteriormente.

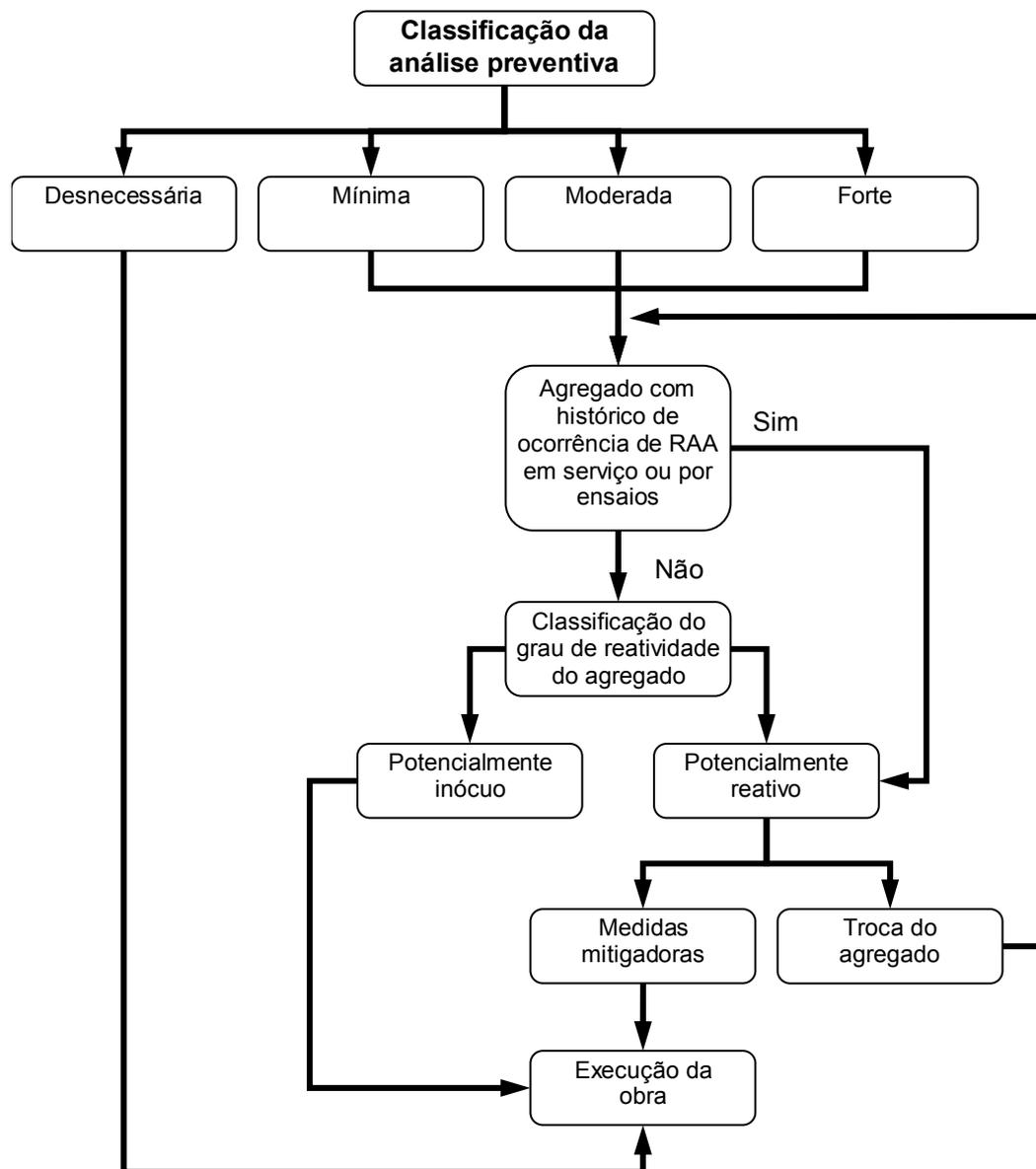


Figura 1.3 – Fluxograma geral para uso do agregado em concreto (adaptado de ABNT NBR 15577-1, 2008)

Ainda de acordo com o fluxograma da Figura 1.3, sempre que se for necessário classificar o grau de reatividade de um agregado, deverá ser realizada a análise petrográfica e posteriormente o ensaio de reatividade pelo MABA (ABNT NBR 15577-4), sendo que o limite de expansão para classificar o agregado como potencialmente reativo é igual ou superior a 0,19% aos 30 dias. Caso se queira confirmar os resultados obtidos pelo MABA ou uma avaliação mais precisa da reatividade de um agregado, deverá fazer uso do MPC, sendo o limite de expansão igual ou superior a 0,04% a um ano de ensaio para o agregado

ser considerado potencialmente reativo, e valores abaixo deste limite para considerar o agregado potencialmente inócuo. Caso haja discrepância na avaliação entre o MABA e o MPC, sugere-se que se faça uso dos resultados dos ensaios em concreto.

Na presença de um agregado potencialmente reativo, poderá fazer-se a troca do agregado ou a utilização de medidas mitigadoras, que em função da intensidade da ação preventiva, deve se seguir o exposto na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Medidas de mitigação (extraído de ABNT NBR 15577-1, 2008)

Intensidade da ação preventiva	Medida de mitigação
Mínima	a) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 3,0 kg/m ³ de Na ₂ O equivalente ^{1), 2)} ou b) Utilizar cimentos CP II-E ou CP II-Z, conforme ABNT NBR 11578, ou CP III, conforme ABNT NBR 5735, ou CP IV, conforme ABNT NBR 5736, ou c) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade moderada
Moderada	a) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m ³ Na ₂ O equivalente ^{1), 2)} ou b) Utilizar cimento CP III, com no mínimo 60% de escória conforme ABNT NBR 5735 ou c) Utilizar cimento CP IV com no mínimo 30% de pozolana conforme ABNT NBR 5736 ou d) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade forte
Forte	a) Utilizar materiais inibidores da reação de acordo com a tabela 3, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio previsto em 7.2 ou b) Substituir o agregado em estudo.

NOTAS:

1) Aceita-se considerar o aporte de álcalis trazido ao concreto pelo cimento (álcalis totais determinados pela ABNT NBR NM 11, ABNT NBR NM 17 ou ABNT NBR 14656), na ausência de ensaios de todos os componentes do concreto.

2) Na₂O_{eq} = 0,658 K₂O + Na₂O.

Na utilização de medidas mitigadoras, deverão ser adotados como materiais inibidores da reação álcali-sílica os cimentos CP II-E, CP III, CP II-Z e CP IV, ou adições de sílica ativa e metacaulim em combinação com qualquer tipo de cimento, desde que em teores suficientes para mitigar as expansões em barras de argamassa a níveis de expansão inferiores a 0,10% aos 16 dias quando ensaiados pelo MABA (ABNT NBR 15577-5, 2008), ou menores que 0,04% num período de 2 anos, como previsto pelo MPC (ABNT NBR 15577-6). Ressalta-se que em obras especiais de concreto massa, como é o caso das barragens, podem ser usados outros materiais, ou misturas de materiais como inibidores da reação álcali-agregado, tendo em vista à grande necessidade de se reduzir a retração térmica do concreto nesse caso e, portanto, de controlar o desenvolvimento do calor de hidratação do cimento, sendo desejável alcançar elevadas deformações em função do proporcionamento dos materiais, o que diferencia essas estruturas das convencionais.

Sendo assim, a partir de um conjunto de informações cruzadas com foco na RAA, como: a análise do tipo da estrutura e sua condição de exposição ambiental, histórico de utilização dos agregados, ensaios dos materiais e avaliação da eficiência das medidas mitigadoras da expansão, é possível viabilizar a utilização de um concreto exposto a uma determinada situação. Ressalta-se que a nova norma não contempla reações do tipo álcali-

carbonato, sendo necessário consultar outras normalizações disponíveis como a canadense (CSA A23.2-14A e CSA A23.2-26A) e a americana (ASTM C-1105) para este caso.

1.2 OBJETIVOS GERAIS DA PESQUISA

A presente pesquisa, busca identificar e caracterizar a possível reatividade potencial de agregados silicosos provenientes de rochas ígneas e metamórficas para desenvolvimento da reação álcali-sílica (RAS), por meio de métodos aplicáveis em exemplares de rocha, argamassa e em concreto, de forma a buscar entender a influência da mineralogia das rochas silicosas correlacionando com os métodos de avaliação em laboratório. A preocupação em buscar uma alternativa para mitigação da reação também é um dos objetivos da presente pesquisa, sendo que para tal é proposto a utilização do cimento CP IV, disponível no mercado de Goiás, para minimização da reação.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DA PESQUISA

A seguir são apresentados os principais objetivos específicos da pesquisa, a saber:

- Avaliar as características mineralógicas de 22 agregados por análise petrográfica bem como sua potencialidade reativa pelos métodos químico (ABNT NBR 9774) e método acelerado em barras de argamassa (ABNT NBR 15577);
- Investigar a capacidade de três basaltos em reagir com os álcalis e gerar expansões pelo método acelerado dos prismas de concreto (ABNT NBR 15577-6 adaptado);
- Correlacionar parâmetros mineralógicos com os comportamentos potencialmente reativos dos agregados avaliados para todos os métodos de ensaios;
- Modelar os dados do método químico de forma a correlacionar com os resultados de expansão;
- Correlacionar ensaios de expansão em concretos com ensaios não destrutivos através de velocidades ultra-sônicas a fim de acompanhar as alterações microestruturais do concreto;
- Comparar a reatividade potencial de agregados utilizados para concreto do estado de Goiás com casos clássicos de obras brasileiras;

- Testar o conceito de análise de risco para concretos preparados com rochas granitóides por meio do índice de reatividade potencial (IRP).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em sete capítulos, sendo os mesmos descritos resumidamente a seguir.

No capítulo 1 – “INTRODUÇÃO” – são apresentadas considerações iniciais contemplando a importância e relevância da pesquisa, seus objetivos e por fim a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 – “MINERAIS E ROCHAS” – é contemplado a estrutura da crosta terrestre, bem como, seus minerais e rochas formadores, onde é dada uma abordagem especial ao grupo das rochas ígneas e metamórficas.

O capítulo 3 – “A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO” – consiste numa revisão teórica da literatura a respeito de manifestações patológicas envolvendo a RAA, abordando seus aspectos gerais, tipos, aspectos químicos, mecanismos de expansão e seus fatores intervenientes.

No capítulo 4 – “A RAA NAS ROCHAS SILICOSAS” – é descrita a influência de certos minerais e rochas no desenvolvimento da RAA.

No capítulo 5 – “PROGRAMA EXPERIMENTAL” – são detalhadas as características dos materiais, o planejamento dos experimentos, bem como os métodos de ensaios utilizados na pesquisa.

O capítulo 6 – “RESULTADOS E DISCUSSÕES” – contém a apresentação e discussões dos ensaios e análises obtidos no programa experimental.

Por fim, no capítulo 7 – “CONSIDERAÇÕES FINAIS” – são registradas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

MINERAIS E ROCHAS

2.1 ESTRUTURA E CROSTA TERRESTRE

O globo terrestre possui um raio de aproximadamente 6.370 km, sendo constituído de três camadas concêntricas distintas, sendo elas (ALMEIDA; RIBEIRO, 1998; LEINZ; AMARAL, 2003):

- **Núcleo:** espessura de 3.300 km - É constituído de Fe e Ni derretidos e sua temperatura varia de 2.200°C na parte superior até cerca de 5.000°C nas regiões mais profundas. Apesar da alta temperatura, a parte central do núcleo é formada de níquel e ferro em estado sólido como consequência da grande pressão no interior do globo;
- **Manto:** espessura de 2.900 km - Camada pastosa (material magmático) composta de alguns elementos químicos, a saber: silício, alumínio, ferro e magnésio. O manto constitui 83% do volume e 65% da massa interna do nosso planeta. Sua temperatura pode variar de 870°C, junto à crosta, até 2.200°C, junto à parte externa do núcleo;
- **Litosfera ou Crosta:** espessura de 120 km - A crosta não é uma camada única, sendo constituída de várias placas tectônicas, divididas em três seções: continentes, plataformas continentais (extensões das planícies costeiras que declinam suavemente abaixo do nível do mar) e os assoalhos oceânicos (nas profundidades abissais dos oceanos). Sua espessura varia de 5 a 10 km sob os oceanos e, de 25 a 90 km, nos continentes. É formada por três grandes grupos de rochas: magmáticas ou ígneas, metamórficas e sedimentares.

A crosta terrestre é a camada menos densa da Terra e a mais consistente. É constituída de duas camadas: uma mais externa (SIAL) e outra mais interna (SIMA), com uma variação de temperatura de 15°C até 1.200°C. Segundo Almeida e Ribeiro (1998) e Leinz e Amaral (2003), as camadas da crosta da terra são:

- **SIAL:** são encontrados os elementos químicos que concentram 90% dos minerais formadores das rochas do subsolo da crosta, como o silício, alumínio, oxigênio e ferro. O SIAL apresenta espessuras variáveis, sendo mais espesso

nas áreas continentais (25 a 90 km) e praticamente zero nos oceanos e mares, salvo a pouca distância dos blocos continentais;

- **SIMA:** os elementos químicos dominantes são: silício e magnésio e há o predomínio de rocha vulcânica de constituição basáltica. Sua espessura é nula nas áreas continentais, já na litosfera dos oceanos oscila de 5 a 10 km, daí as ilhas oceânicas serem de natureza basáltica. É também chamado de camada oceânica.

2.2 MINERAIS

2.2.1 GENERALIDADES

Sob a luz da Ciência dos Materiais, segundo Van Vlack (1970), os minerais são fases cerâmicas ou fases de uma rocha. Alguns autores tais como: Dana e Hurlbut (1969), Ernst (1971), Frascá e Sartori (1998), Madureira Filho, Atencio e McReath (2000) e Leinz e Amaral (2003), fazendo-se uso da geologia e mineralogia, definem estes como sendo: compostos químicos homogêneos, sólidos (água somente em forma de gelo) ou líquidos (mercúrio), formados por processos inorgânicos e encontrados naturalmente na crosta terrestre. Normalmente, são formados a partir de determinados arranjos entre átomos e, se formados em condições favoráveis, terão estrutura atômica ordenada condicionando sua forma cristalina e suas propriedades físicas.

Alguns conceitos referentes a termos geológicos e mineralógicos são facilmente confundidos ou mal interpretados no meio técnico, em função disso, Dana e Hurlbut (1969), Ernst (1971) e Santos (1989) conceituam alguns destes, a saber:

- **Mineral:** é qualquer partícula mineral limitada por faces planas – faces de cristal – que possui uma relação geométrica definida quanto ao arranjo atômico;
- **Mineralóide:** é qualquer sólido ou líquido que ocorra naturalmente na natureza, e que não possui um arranjo sistemático (cristalino) dos átomos que o constitui;
- **Argilomineral:** é um grupo de minerais constituídos de silicatos de alumínio hidratado ou filossilicatos, geralmente cristalinos e de granulação fina;
- **Rocha:** é um agregado natural e multi-granular formado de um ou mais minerais e/ou mineralóides.

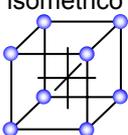
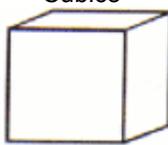
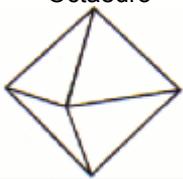
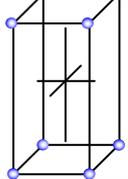
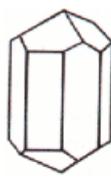
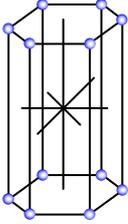
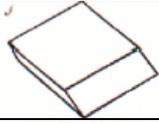
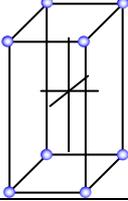
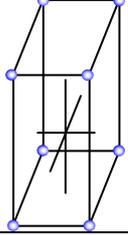
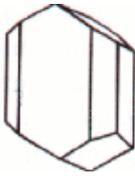
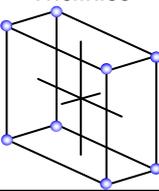
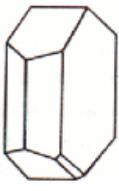
Como já dito, os minerais ocorrem no estado cristalino, ou seja, quando uma molécula tem uma regularidade estrutural, devido suas ligações atômicas (que podem ser

do tipo iônicas, covalentes, metálicas e de Van der Waals)¹ determinarem um número específico de vizinhos para cada átomo, e sua orientação no espaço dos mesmos.

Na Tabela 2.1, estão apresentados os sistemas cristalinos que podem ser encontrados nos cristais (estruturas não-amorfas) dos minerais, onde sua microestrutura está diretamente relacionada com a forma externa do cristal, dentre outras propriedades físicas como dureza, clivagem, etc. (VAN VLACK, 1970; ERNST, 1971).

¹ Nas ligações iônicas, cátions e ânions se unem como resultado de uma atração mútua eletrostática, onde o primeiro adquire uma configuração de gás nobre por perda de elétrons, e o segundo por ganho. Nas ligações covalentes, ocorre o compartilhamento de elétrons com um átomo adjacente. As ligações metálicas são aquelas em que se formam “nuvens de elétrons”, como nos elementos nativos (ouro, prata, cobre, etc.). Já nas forças de Van der Waals, que são ligações muito fracas, resultado da distribuição não uniforme de cargas (assimetria eletrônica) ou da polarização de diferentes átomos neutros, moléculas ou complexos iônicos (VAN VLACK, 1970).

Tabela 2.1 – Sistemas cristalinos (FRASCÁ; SARTORI, 1998)

Sistema cristalino	Eixos e ângulos cristalográficos	Formas	Minerais
<p>Cúbico ou isométrico</p> 	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	<p>Cúbico</p>  <p>Octaedro</p> 	<p>Halita Magnetita Granada Pirita</p>
<p>Tetragonal</p> 	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	<p>Prismas e pirâmides tetragonais</p> 	<p>Zircão</p>
<p>Hexagonal e trigonal</p> 	$a_1 = a_2 = a_3 \neq e$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	<p>Prismas e pirâmides trigonais</p> 	<p>Quartzo Grafita</p>
		<p>Romboedro</p> 	<p>Calcita Dolomita</p>
		<p>Prismas e pirâmides hexagonais</p> 	<p>Nefelina</p>
<p>Ortorrômbico</p> 	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	<p>Prismas e pirâmides rômbricas</p> 	<p>Olivina Barita</p>
<p>Monoclínico</p> 	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	<p>Prismas com faces inclinadas</p> 	<p>Ortoclásio Augita Hornblenda Biotita Muscovita Gipso</p>
<p>Triclínico</p> 	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	<p>Pinacóides (pares de faces paralelas)</p> 	<p>Plagioclásio Microclínio</p>

É interessante ressaltar que podem existir minerais que tenham essencialmente a mesma composição química, mas estruturas cristalinas diferentes, acarretando em propriedades morfológicas e físicas distintas, para isto, dá-se o nome de polimorfismo. Ao passo que minerais com estrutura cristalina semelhante, mas composição química distinta, ou variável dentro de determinados limites são ditos minerais isomorfos (VAN VLACK, 1970; ERNST, 1971; FRASCÁ; SARTORI, 1998; MADUREIRA FILHO; ATENCIO; MCREATH, 2000).

2.2.2 PRINCIPAIS MINERAIS FORMADORES DAS ROCHAS

Devido à grande importância dos minerais na constituição das rochas, e baseado em estudos de Dana e Hurlbut (1969), Frascá e Sartori (1998), Deer, Howie e Zussman (2000) e Leinz e Amaral (2003), são apresentados neste item, os principais minerais e suas características, encontrados nas rochas silicosas (ígneas e metamórficas), que é o alvo principal deste trabalho, e estão divididos em dois grupos, silicatos e não silicatos, e encontram-se resumidos na Tabela 2.2 e Tabela 2.3, respectivamente. No Anexo A são apresentadas as principais características dos minerais que compõem as rochas.

Tabela 2.2 – Principais minerais formadores das rochas silicosas do grupo dos silicatos (ALMEIDA; RIBEIRO, 1998)

Sub-grupo	Mineral	Rocha	Característica / alteração	
Nesosilicatos	Olivina	Ígneas básicas e ultrabásicas	Sua alteração hidrotermal produz serpentina e óxidos de ferro (magnetita)	
	Granada	Metamórficas (xistos e gnaiss), ígneas ultrabásicas e graníticas	Sua alteração produz clorita e hidróxidos de ferro (limonita)	
	Titanita	Ígneas	Sua alteração produz leucoxênio	
	Zircão	Ígneas plutônicas	Praticamente inalterável nas condições atmosféricas	
Inossilicatos	Augita	Ígneas básicas e ultrabásicas	Sua alteração hidrotermal produz clorita, serpentina, talco e óxidos de ferro	
	Diopsídio	Metamórficas (calciossilicáticos)		
	Hiperstênio	Ígneas básicas e ultrabásicas		
Anfibólios	Hornblenda	Ígneas e metamórficas	Sua alteração hidrotermal produz argilominerais e óxidos de ferro	
Filossilicatos	Micas	Muscovita	Metamórficas (gnaisse, xisto e quartzito) e ígneas	Na forma de sericita é um mineral secundário derivado de aluminossilicatos. Por intemperismo pode se alterar em caulinita ou gibbsita
		Biotita	Ígneas ácidas, intermediárias e metamórficas (xisto e gnaiss)	Altera-se em clorita e quando aquecida (100°C), se desfolha e desprega em fragmentos vermiformes
	Argilominerais	Montmorilonita	Sedimentares detríticas e ígneas (basaltos alterados)	Expande-se em meio aquoso
	Filossilicatos de alteração	Clorita	Ígneas, sedimentares e metamórficas	Formado da alteração da biotita, piroxênios, anfibólios, granadas e olivinas. Pode-se comportar como argilomineral, é flexível e não elástico
		Serpentina	Metamórficas (serpentinóis)	Formada pela alteração hidrotermal da olivina e piroxênio. É um isolante térmico e acústico
		Talco	Metamórficas (pedra sabão e xistos)	Formado pela alteração de silicatos magnesianos
Tectosilicatos	Feldspatos	Feldspato potássico	Ígneas (granito, sienito), sedimentares (arenito e arcóseo) e metamórficas (gnaisse e xisto)	Altera-se hidrotermalmente em sericita e intempericamente em caulinita
		Plagioclásios	Ígneas e metamórficas (gnaisse)	Altera-se hidrotermalmente em calcita e sericita e intempericamente em sericita e argilominerais
	Sílica	Quartzo	Ígneas (granito e riolito), sedimentares (arenito) e metamórficas (quartzito, gnaiss e xisto)	Bastante resistente a alteração, preenche veios de rochas e possui várias colorações
		Calcedônia		Variedade criptocristalina do quartzo
		Opala		Sílica hidratada e amorfa
	Feldspatoídes	Nefelina	Ígneas	Altera-se hidrotermalmente em albita, muscovita, zeólitas e outros feldspatoídes
	Zeólitas	Analcita	Ígneas	Derivado de alguns feldspatoídes

Tabela 2.3 – Principais minerais formadores das rochas silicosas do grupo dos não-silicatos (ALMEIDA; RIBEIRO, 1998)

Sub-grupo	Mineral	Rocha	Característica / alteração
Elementos nativos	Elemento na forma não combinada	Metamórficas (xistos)	Tem-se a grafita, composta basicamente de carbono
Sulfetos	Pirita ²	Ígneas, sedimentares e metamórficas	Altearam-se em limonita e sulfatos
Óxidos e hidróxidos	Magnetita, hematita, ilmenita	Ígneas, sedimentares e metamórficas	Alteram-se em limonita (apenas a ilmenita é estável)
Carbonatos	Calcita	Sedimentares (calcário) e metamórficas (mármore)	Solúvel em ácido, encontrado em veios e fraturas de rochas diversas

Esta classificação sistemática dos minerais, em especial da classe silicato, é baseada no grau de polimerização dos tetraedros de sílica (SiO_4^{4-}) e, conseqüentemente, pela razão Si : O dos ânions, como expostos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Classificação sistemática dos minerais da classe dos silicatos (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 2000)

Sub-grupo	Arranjo dos tetraedros	Si : O	Exemplo
Nesosilicatos	Isolados	1 : 4	Olivina, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
Sorossilicatos	Duplos	2 : 7	Hemimorfita, $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$
Ciclossilicatos	Anéis	1 : 3	Berilo, $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$
Inossilicatos	Cadeia simples (Piroxênios)	1 : 3	Enstatita, $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$
	Cadeia dupla (Anfibólios)	4 : 11	Tremolita, $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
Filossilicatos	Folheados	2 : 5	Talco, $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Tectossilicatos	Tridimensionais	1 : 2	Quartzo, SiO_2

2.3 ROCHAS

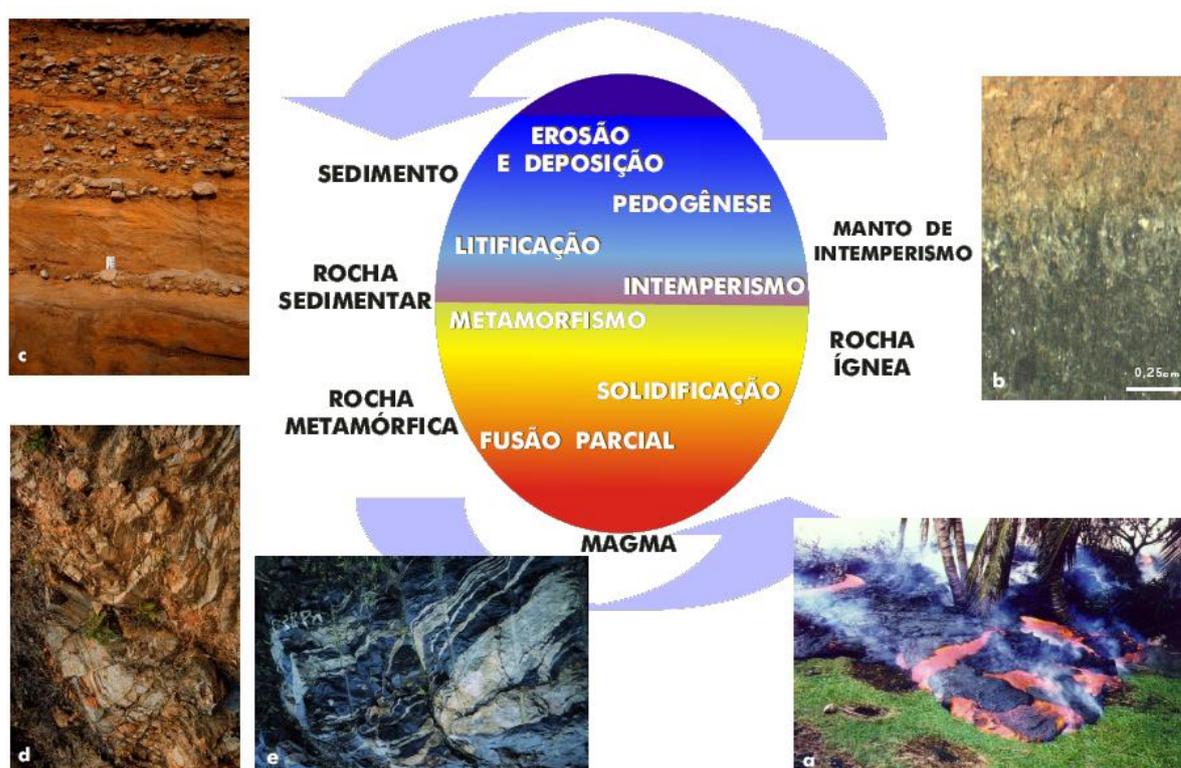
2.3.1 GENERALIDADES

Uma rocha é por definição um produto consolidado, resultante da união natural de um ou mais minerais (inclusive material não-cristalino como vidro vulcânico e matéria orgânica), arranjados segundo condições de temperatura e pressão, que constitui uma parte essencial da crosta terrestre (FRASCÁ; SARTORI, 1998; MADUREIRA FILHO; ATENCIO; MCREATH, 2000; LEINZ; AMARAL, 2003).

² Além da pirita (FeS_2), também podem ser encontrados nos maciços rochosos os seguintes sulfetos: pirrotita (Fe_{1-x}S), marcasita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), arsenopirita (FeAsS), esfalerita (ZnS) e galena (PbS) (GOMIDE *et al.* 2007)

É de conhecimento geral que as rochas são classificadas em três grandes grupos, em função de sua formação geológica na natureza, a saber: rochas ígneas ou magmáticas, rochas sedimentares e rochas metamórficas.

Desde os primórdios da formação da Terra, quando se formaram as primeiras rochas oriundas do resfriamento da massa inicial incandescente, deu-se início ao chamado ciclo das rochas, onde estas sofreram e sofrem modificações em sua estrutura em função de temperaturas, pressão interna, abalos sísmicos, movimentos tectônicos, atividades vulcânicas, intemperismo, etc. Em suma, a Terra é um planeta vivo em contínua modificação. Em poucas palavras, pode-se dizer que o ciclo das rochas estabelece a história de formação das várias unidades de rochas, mostrando o relacionamento genético que existe entre elas e, ao mesmo tempo, delas com as fontes primárias e secundárias das rochas da crosta. Este ciclo se encontra melhor exposto na Figura 2.1 (ERNST, 1971; MADUREIRA FILHO; ATENCIO; MCREATH, 2000; LEINZ; AMARAL, 2003).



a – Formação de rocha ígnea por vulcanismo; b – Manto de intemperismo, constituído de material frível; c – Decomposição de sedimentos (litificação); d – Dobras em uma rocha metamórfica; e – Fusão parcial de uma rocha

Figura 2.1 – O ciclo das rochas (MADUREIRA FILHO; ATENCIO; MCREATH, 2000)

2.3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS

2.3.2.1 Rochas Ígneas

As rochas ígneas, ou magmáticas, resultam da solidificação de material rochoso, parcial a totalmente fundido, denominado magma, gerado no interior da crosta terrestre, em que, se o resfriamento ocorrer no interior do globo, a rocha resultante será do tipo ígnea intrusiva (plutônica). Já se o magma conseguir chegar à superfície, a rocha será do tipo ígnea extrusiva (vulcânica) e dependendo deste tempo de resfriamento do magma, a estrutura e a textura da rocha podem variar (DANA; HURLBUT, 1969; FRASCÁ; SARTORI, 1998; MADUREIRA FILHO; ATENCIO; MCREATH, 2000; LEINZ; AMARAL, 2003).

Basicamente a composição de um magma está intimamente ligada à constituição da rocha geradora, das condições e taxas em que ocorreu a fusão e da história evolutiva desde o local de sua origem até seu sítio de consolidação. Em função disto, são conhecidos três tipos de magma que são classificados, bem com as rochas ígneas, de acordo com seu percentual de sílica, sendo eles: magma granítico, andesítico e basáltico (SZABÓ; BABINSKI; TEIXEIRA, 2000). A Figura 2.2 registra estes percentuais.

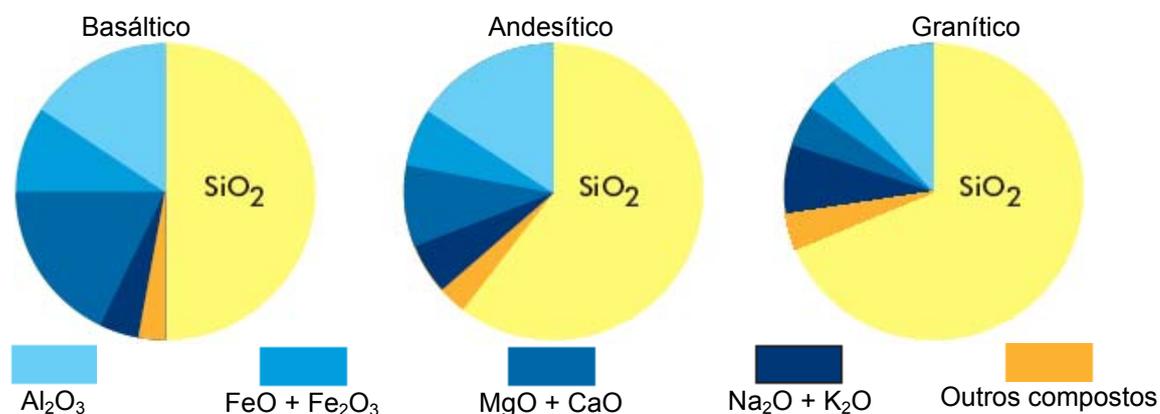


Figura 2.2 – Composição química média dos magmas (SZABÓ; BABINSKI; TEIXEIRA, 2000)

Segundo Dana e Hurlbut (1969), as rochas ígneas são compostas essencialmente de minerais silicosos que se formam à medida que a temperatura atinge seus pontos de cristalização. As rochas ígneas podem ser divididas em dois grupos:

- **Máficos:** constituído dos minerais olivina, piroxênios, anfibólios (hornblenda) e micas (biotita) e apresentam uma coloração mais escura em virtude de serem minerais ricos em magnésio e ferro;

- **Félsicos:** constituídos dos minerais plagioclásios cálcicos, plagioclásios sódicos, feldspatos alcalinos, quartzo e mica (muscovita) e apresentam uma coloração mais clara por serem minerais ricos em silício e alumínio.

Em função de várias características como: cor, textura, composição mineralógica essencial e, implicitamente, da composição química, são consideradas as seguintes principais "famílias" das rochas ígneas conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Principais minerais das rochas ígneas (FRASCÁ; SARTORI, 1998).

	Rocha	Minerais essenciais
PLUTÔNICAS	Granito	Quartzo, plagioclásio, feldspato potássico (biotita/hornblenda)
	Diorito	Plagioclásio, biotita, hornblenda (quartzo/feldspato potássico)
	Sienito / Nefelina Sienito	Feldspato potássico (biotita/hornblenda) (aegirina) (nefelina/sodalita)
	Gabro/ Diabásio	Plagioclásio cálcico, augita, opacos
	Peridotito/ Piroxênio	Olivina/piroxênio
VULCÂNICAS	Riolito	Quartzo, plagioclásio, feldspato potássico (biotita/hornblenda)
	Andesito	Plagioclásio, biotita, hornblenda (quartzo/feldspato potássico)
	Traquito	Feldspato potássico (biotita/hornblenda) (aegirina)
	Fonólito	(nefelina/sodalita)
	Basalto	Plagioclásio cálcico, augita, opacos

A variedade de composição das rochas ígneas é consequência natural da variedade composicional dos magmas a partir dos quais se consolidaram. Atualmente existem várias formas de classificar uma rocha ígnea por meio de diversas características, sendo elas: modo de ocorrência, composição química, cristalinidade, forma e tamanho dos minerais, granulação, estrutura, textura, índice de cor, dentre outras. Na Figura 2.3 apresenta-se um cruzamento dos tipos litológicos com algumas das suas características (DANA; HURLBUT, 1969; ERNST, 1971; MAZON, 1971).

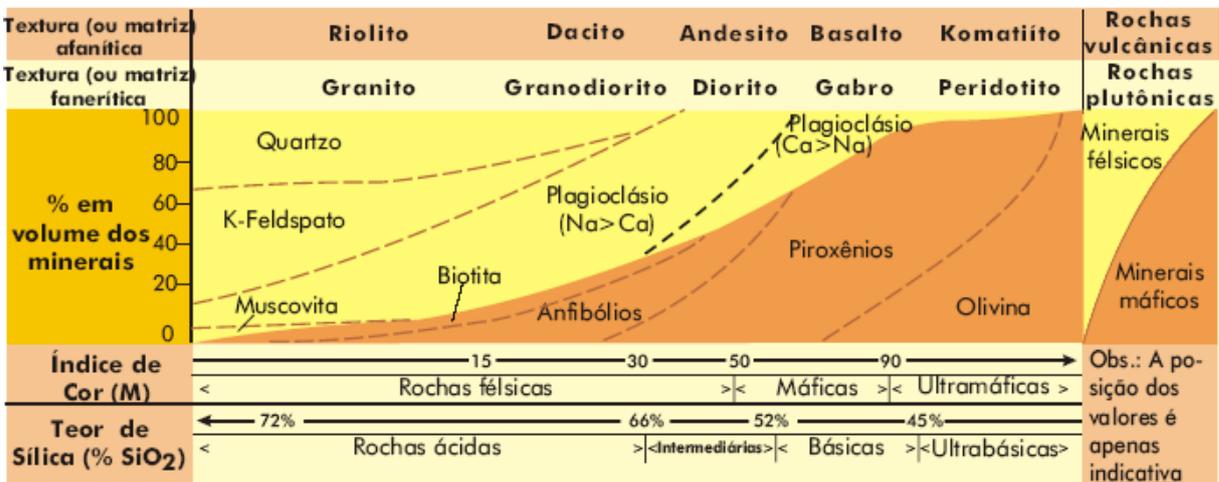


Figura 2.3 – Relação de algumas características com as rochas ígneas mais comuns (SZABÓ; BABINSKI; TEIXEIRA, 2000)

A cristalinidade das rochas ígneas pode ser classificada de duas formas, a saber: fanerítica e afanítica. A cristalinidade fanerítica é caracterizada pela presença de cristais individuais visíveis a olho nu; relativa às rochas plutônicas. Já a afanítica, característica de rochas vulcânicas, apresenta cristais não visíveis a olho nu, podendo estar presentes na forma amorfa até totalmente cristalinos. Quando microcristalinos, os cristais podem ser reconhecidos ao microscópio, já quando criptocristalinos, não são reconhecidos ao microscópio (FRASCÁ; SARTORI, 1998; SZABÓ; BABINSKI; TEIXEIRA, 2000; LEINZ; AMARAL, 2003).

2.3.2.2 Rochas Sedimentares

As rochas sedimentares são resultantes da consolidação de sedimentos, ou seja, de partículas (clastos) minerais provenientes da desagregação e do transporte de rochas pré-existentes (ígneas, metamórficas ou sedimentares), ou da precipitação química, ou, ainda, de ação biogênica. Caso a rocha sedimentar seja constituída por clastos pré-existentes, ela é classificada como clástica ou detriticas e o processo de união das partículas é chamado de litificação ou diagênese (condição geológica de baixa pressão e temperatura da ordem de 250°C). Já quando estas são formadas por precipitação química dos radicais salinos, que foram produzidas pelo intemperismo químico e agora se encontram dissolvidos nas águas superficiais, são ditas não-clásticas. Por fim, são ditos sedimentos orgânicos aqueles formados pelo acúmulo e compactação de restos de organismos, embora existam alguns autores que afirmam que estas são apenas pseudo-rochas, porque suas partículas agregadas não são minerais (FRASCÁ; SARTORI, 1998; MADUREIRA FILHO; ATENCIO; MCREATH, 2000; LEINZ; AMARAL, 2003).

Segundo Dana e Hurlbut (1969) e Leinz e Amaral (2003) os principais minerais constituintes das rochas sedimentares são: quartzo, feldspato, mica, calcita, dolomita, certas variedades criptocristalinas de quartzo, como por exemplo: a calcedônia e a sílica hidratada amorfa, ou opala. Os autores ainda listam as rochas mais comuns desta categoria, a saber: argilito, silito, arenito, conglomerado, brecha, tilito, calcário e marga, dolomito, sílex.

2.3.2.3 Rochas Metamórficas

Autores como: Dana e Hurlbut (1969), Frascá e Sartori (1998), Madureira Filho, Atencio e McReath (2000) e Leinz e Amaral (2003), classificam as rochas metamórficas como resultado da transformação (recristalização) de uma rocha pré-existente (ígneas,

sedimentar ou metamórfica), que sofreu mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, no estado sólido, devido à ação de novas condições de temperatura, pressão, presença de agentes voláteis ou fortes atritos, desde que fora dos limites diagenéticos. Devido à recristalização dos minerais, estas não apresentam nunca textura fragmentária nem matéria vítrea.

Quando ocorre o metamorfismo em uma rocha, esta é exposta a duas situações: ou a rocha pode se comportar como um sistema fechado, sem ganho ou perda de elementos químicos, ou ser submetida a variações composicionais intensas (FRASCÁ; SARTORI, 1998; RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000). O primeiro caso é dito como sendo um metamorfismo isoquímico, já o outro processo, o de substituição química, é conhecido com metassomatismo, e ocorre com maior ou menor frequência em todas as rochas recristalizadas (ERNST, 1971).

Independentemente do processo físico-químico, categoricamente, são identificados três cenários ou tipos metamórficos fundamentais: **regional ou dinamotermal, de contato ou termal, e dinâmico ou cataclástico**. Entretanto Ruberti, Szabó e Machado (2000) afirmam que existem outros tipos que apresentam particularidades suficientes para serem ditos tipos de metamorfismo, sendo eles: de soterramento, hidrotermal, de fundo oceânico e de impacto.

O **metamorfismo regional ou dinamotermal**, como apresentado na Figura 2.4, ocorre em grande escala na formação de cadeias de montanhas (orogênese), onde as rochas são sujeitas a ações combinadas de **pressões** (litostática e dirigida) e **temperaturas** elevadas e deformação intensa que persistem por centenas a milhares de anos. As rochas regionalmente metamorfisadas ocupam faixas de centenas de quilômetros, sendo típicas de terrenos pré-cambrianos (mas não somente), apresentam geralmente estrutura foliada e constituem uma grande variedade de ardósias, filitos, xistos, gnaisses, anfibolitos, granulitos e migmatito (ERNST, 1971; FRASCÁ; SARTORI, 1998; RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000).



Figura 2.4 – Metamorfismo regional ou dinamotermal (RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000)

O **processo metamórfico de contato ou termal**, como apresentado na Figura 2.5, é resultado de **aquecimento** através de intrusão de um corpo ígneo que aumenta a temperatura das rochas encaixantes, formando as auréolas de metamorfismo de contato. As rochas mais próximas à intrusão sofrem os efeitos da temperatura em maior escala à medida que decresce a distância relativa ao corpo. Sem um efeito de pressão e deformação, e somente da temperatura, há cristalização e crescimento dos minerais metamórficos num arranjo aleatório, ou seja, sem foliação. Sendo a rocha típica do metamorfismo de contato é denominada hornfels (ou cornubianito), apresentando uma textura granular fina, isótropa e estrutura maciça (ERNST, 1971; FRASCÁ; SARTORI, 1998; RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000).

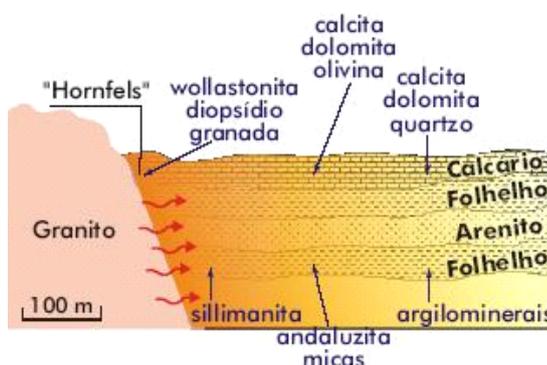


Figura 2.5 – Metamorfismo de contato ou termal (RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000)

No **metamorfismo cataclástico ou dinâmico**, ilustrado na Figura 2.6, pelo o qual **pressões** dirigidas de grande intensidade causam movimentação e ruptura na crosta, em faixas longas e estreitas nas adjacências de falhas ou zonas de cisalhamento, é conhecido como catáclase ou metamorfismo dinâmico, e as rochas nas quais o fraturamento mecânico é notável são denominadas rochas cataclásticas. Como conseqüência, neste tipo de metamorfismo predomina a deformação, em geral, acompanhada da redução na granulação e recristalização subsequente, sendo que em posições mais superficiais as deformações são do tipo rúptil, e os minerais são fragmentados ou mesmo pulverizados, ao passo que em zonas de cisalhamento mais profundas, devido a condições de temperatura e pressão elevadas, os minerais passam a se comportar de forma dúctil, sofrendo forte deformação plástica e estiramento (ERNST, 1971; FRASCÁ; SARTORI, 1998; RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000).

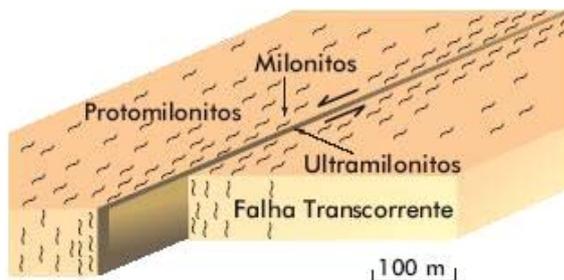


Figura 2.6 – Metamorfismo cataclástico ou dinâmico (RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000)

Conforme Frascá e Sartori (1998) os minerais componentes das rochas respondem de maneira diferenciada ao processo do metamorfismo cataclástico. O quartzo de imediato se deforma intracristalinamente, exibindo feições de deformação microscópicas como a extinção ondulante. Após o término dos esforços, ocorre a recristalização, onde no local antes ocupado por um único grão pode se formar um agregado, em mosaico, de grãos recristalizados. A presença de extinção ondulante e de grãos de quartzo muito finos (< 0,15 mm), propiciam uma relação direta na reação entre os hidróxidos alcalinos do cimento e o quartzo, formando compostos expansivos que danificam as estruturas de concreto, mais conhecido como reação álcali-agregado (FRASCÁ; SARTORI, 1998).

Segundo Ruberti, Szabó e Machado (2000) o **metamorfismo de soterramento**, ilustrado pela Figura 2.7, é bastante semelhante ao regional, embora este ocorra apenas em bacias sedimentares em subsidência, que é resultado do soterramento de espessas camadas de rochas sedimentares e vulcânicas a profundidades onde se encontram temperaturas próximas a 300°C e relativa pressão litostática, atuando juntas na sua formação da rocha.

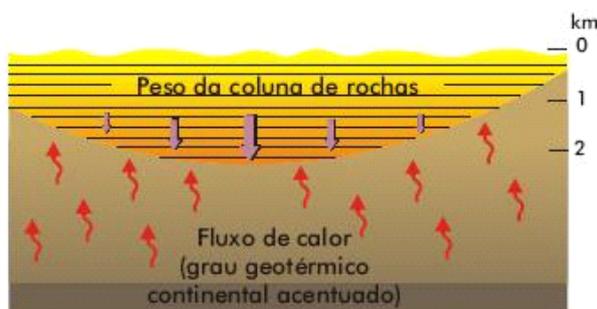


Figura 2.7 – Metamorfismo de soterramento (RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000)

O **metamorfismo hidrotermal**, exposto na Figura 2.8, se assemelha ao metamorfismo de contato, embora se desenvolva por processo metassomático, através de trocas iônicas, pela ação de fluidos aquosos e quentes que percolam rochas próximas a intrusões magmáticas, ou que se encontram em zonas de cisalhamento ou falhamento,

levando a hidratação dos minerais constituintes (DANA; HURLBUT, 1969; FRASCÁ; SARTORI, 1998; RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000).



Figura 2.8 – Metamorfismo hidrotermal (RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000)

Segundo Ruberti, Szabó e Machado (2000) o **metamorfismo de fundo oceânico** pode ser considerado do tipo hidrotermal, porém em escala muito ampla. Este processo é visto nas vizinhanças dos rifts das cadeias meso-oceânicas, onde a crosta recém-formada e quente interage com a água fria do mar através de processos metassomáticos e metamórficos termais. A Figura 2.9 ilustra este tipo de metamorfismo.



Figura 2.9 – Metamorfismo de fundo oceânico (RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000)

Por fim, Ruberti, Szabó e Machado (2000) mostram que o **metamorfismo de impacto**, ilustrado na Figura 2.10, desenvolve-se em locais submetidos ao impacto de grandes **meteoritos**, por este fato é de extensão reduzida na crosta terrestre. A energia de impacto é dissipada na forma de ondas de choque que fraturam e deslocam as rochas formando a cratera de impacto, além de ondas de calor com temperaturas da ordem de 5.000°C. No quartzo, por exemplo, sua recristalização se dá de forma instantânea, transformando-o em stishovita e coesita (polimorfos de alta pressão). No Brasil, este tipo de rocha é encontrado no Domo de Araguinha em Goiás, ou a estrutura de Colônia, na parte sul da cidade de São Paulo.

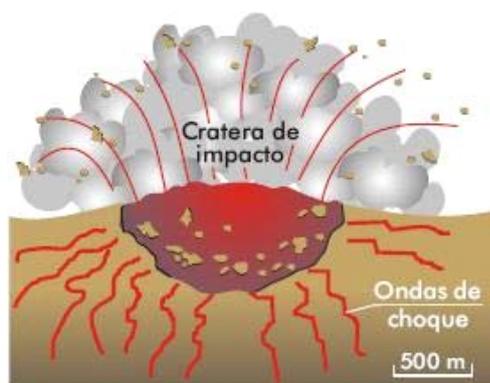


Figura 2.10 – Metamorfismo de impacto (RUBERTI; SZABÓ; MACHADO, 2000)

Na Tabela 2.6 estão apresentadas as rochas metamórficas mais comuns e seus minerais essenciais.

Tabela 2.6 – Principais características das rochas metamórficas (FRASCÁ; SARTORI, 1998).

Rocha	Minerais essenciais
Ardósia	Sericita, quartzo
Filito	Sericita, quartzo
Xisto	Micas, quartzo
Gnaisse	Feldspatos, quartzo, biotita e/ou hornblenda
Migmatito	Feldspatos, quartzo, biotita e/ou hornblenda
Milonito	Sericita, feldspato, quartzo
Cataclasito ³	Variada
Brecha tectônica	Variada
Hornfels	Variada
Quartzito ⁴	Quartzo, micas
Mármore	Calcita e/ou dolomita
Anfibolito	Hornblenda, plagioclásio
Serpentinito	Serpentina
Esteatito	Talco

³ Este tipo de rocha é resultado de metamorfismo dinâmico com atuações combinadas de fragmentação (cataclase) e recristalização (blastese), e pode se subdividir em três sub-classes, a saber: **brechas tectônicas** (falhas), **cataclasitos** e **milonitos**, sendo os dois primeiros de estrutura não orientada e o terceiro de estrutura orientada. A diferença básica entre as brechas tectônicas e os cataclasitos é que o primeiro não possui coesão primária, ao contrário dos cataclasitos, embora ambos sejam rochas predominantemente dúcteis. Já os milonitos, também são rochas dúcteis que possuem estruturação bem definida (foliação ou lineação) e granulação fina (DANA; HURLBUT, 1969; ERNST, 1971; KLEIN; HURLBUT, 1999).

⁴ É uma rocha derivada do metamorfismo do arenito composta basicamente de quartzo recristalizado em arranjo granoblástico (minerais de tamanho aproximadamente igual em arranjos tipo mosaico). Os grãos de quartzo da constituição original iniciam um crescimento na superfície, invadindo os interstícios, gerando grãos intercrescidos. Possui elevada dureza e resistência a britagem, tendo coloração branca com variações de rósea ou vermelha. Uma das suas variações é o itabirito, que possui grande quantidade de hematita em sua constituição (DANA; HURLBUT, 1969; ERNST, 1971; KLEIN; HURLBUT, 1999).

Capítulo 3

A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

3.1 ASPECTOS GERAIS

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é uma manifestação que, na maioria das vezes, tem caráter expansivo, podendo ser considerada patológica. Por meio de reações químicas entre hidróxidos alcalinos (provenientes, em sua maioria, do cimento e algumas vezes da água de amassamento, aditivos químicos, adições minerais, e outros) e alguns tipos de minerais reativos presentes nos agregados, formam compostos que, na presença de umidade, são expansivos e podem levar a fissurações, deslocamentos e até mesmo a completa deterioração das estruturas de concreto.

Segundo Taylor (1997), o tempo para que se manifeste este fenômeno é variável, podendo surgir em questões de dias ou até mesmo anos. Esta amplitude na velocidade de desenvolvimento da RAA está relacionada a uma série de fatores como: o teor de álcalis solúveis disponíveis, a natureza, tamanho e quantidade dos agregados reativos, temperatura ambiente, disponibilidade de umidade e eventuais restrições físicas à expansão podendo ser internas ou externas.

Em função dos tipos de minerais presentes nos agregados, a RAA pode ser classificada em: reação álcali-silica (RAS) e álcali-carbonato (RAC). Mais recentemente, a norma ABNT NBR 15577 (2008) trata como uma particularidade da reação álcali-silica a reação álcali-silicato (RASS), onde as conseqüências da RAA são: ocorrência de fissuras mapeadas (ou paralelas ao sentido da armadura em estruturas de concreto armado), bordas escuras em torno dos agregados e a formação de um gel expansivo sílico-alcálico, sendo este último ausente apenas na reação álcali-carbonato.

Embora a RAA já seja conhecida desde os anos 40, seus mecanismos ainda não estão totalmente esclarecidos, levando diversos pesquisadores, tais como: Stanton, Hansen, Vivan, Van Aardt, Visser, Dent Glasser, Kataoka, Diamond, Hobbs, Taylor, Prezzi, Monteiro e Hasparyk, a encontrarem medidas mais eficazes para seu tratamento e entendimento da expansão.

3.2 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

3.2.1 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

A reação química entre certas formas de sílica presente nos agregados e os hidróxidos alcalinos (NaOH e KOH) das pastas de cimento hidratadas são conhecidas como Reação Álcali-Sílica (RAS). Todavia, quando a sílica reage com estes hidróxidos, a reação se inicia pelo ataque dos íons hidroxilas presente no meio, sendo posteriormente incorporados à estrutura da sílica os íons alcalinos e eventualmente os de íons de cálcio, formando um gel expansivo, na presença de umidade, responsável por muitos danos em estruturas de concreto, principalmente em obras hidráulicas.

Em outras palavras, a norma ABNT NBR 15577-1 (2008) conceitua a RAS como sendo:

“um tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros. Este é o tipo de reação álcali-agregado que mais rapidamente se desenvolve”.

No entanto, o processo químico da RAS se torna mais claro ao se compreender as formas na qual a sílica se encontra nos agregados. Basicamente existem dois tipos de sílica presentes nos agregados: sílica cristalina e sílica amorfa (Figura 3.1)

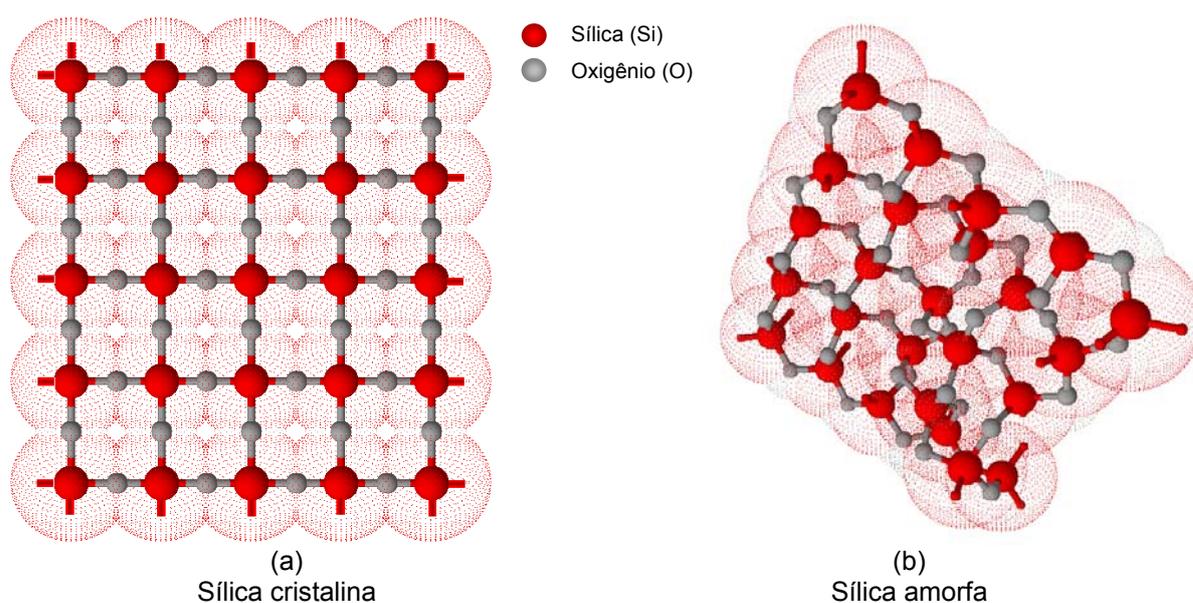


Figura 3.1 – Tipos de sílica, cristalina e amorfa

Dent Glasser e Kataoka (1981a) explicam que em função da organização estrutural da sílica, o ataque dos íons hidroxila se dá principalmente em sua superfície, uma vez que poucos íons de sílica passam para a fase fluída, tornando este processo lento (Figura 3.1 (a)). Por outro lado, na Figura 3.1 (b), a sílica amorfa permite a penetração dos íons hidroxilas e alcalinos (Na^+ ou K^+) no interior de seu arranjo estrutural, causando a ruptura das ligações do grupo siloxano ($\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$), formando então uma estrutura polieletrólítica contendo íons alcalinos, formando um gel expansivo mais rapidamente.

3.2.1.1 Reação Álcali-Silicato

A norma ABNT NBR 15577-1 (2008) conceitua a reação álcali-silicato (RASS) como sendo:

“um tipo específico de reação álcali-silica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros. Geralmente, esta reação é mais lenta do que a RAS.”

Para Regourd (1988) este tipo de reação possui o mesmo princípio da RAS, no entanto, esta ocorre mais lentamente pelo fato de seus minerais reativos estarem mais disseminados no retículo cristalino do agregado. Compartilhando desta mesma opinião, Hobbs (1988) e Poole (1992) salientam que os produtos da reação álcali-silica são semelhantes ao da álcali-silicato e podem ser encontrados num mesmo concreto.

Van Aardt e Visser (1977a; 1977b), estudaram a influência dos feldspatos e folhelhos argilosos, onde se propôs uma teoria para o mecanismo conhecida como “Solution Theory”. De acordo com os autores, esta teoria trata-se de uma auto-reação, onde ao se iniciar as reações de hidratação do cimento forma-se uma camada aderente (constituída basicamente de C-S-H e $\text{Ca}(\text{OH})_2$) entre a matriz cimentícia e o agregado, que com o passar do tempo e o aumento da umidade, o CH reagirá com o feldspato, em geral alcalino. Além disto, a cal que por ventura penetrar no agregado também poderá reagir, fazendo com que os álcalis dos feldspatos sejam liberados na forma de NaOH, KOH e/ou silicatos de sódio e potássio, sendo o silicato de sódio liberado na forma de gel parcialmente solúvel em água. Quando os álcalis chegarem a uma determinada concentração, os silicatos de cálcio (aderência) tenderão a se dissolver em silicato de sódio e potássio, formando um vidro (gel), contendo cálcio, sódio, potássio e sílica em torno ou até mesmo no interior do agregado.

Esse gel é parcialmente solúvel em água e pode expandir ou contrair com a movimentação de água (chegada ou saída). A Figura 3.2 esquematiza este mecanismo.

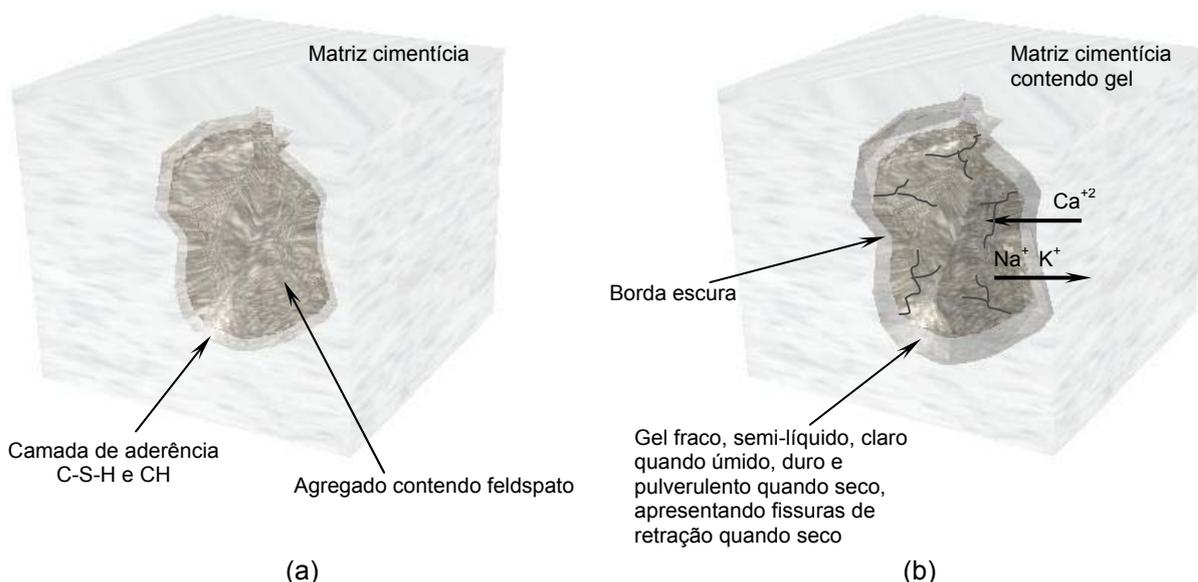


Figura 3.2 – Características do agregado antes (a) e depois da reação (b).⁵

Como manifestação deste tipo de reação álcali-silicato, podem ser encontradas zonas escuras na interface matriz cimentícia/agregado, ou seja, bordas de reação, que são formadas por um gel de silicato alcalino. Outra característica que pode estar presente são depósitos brancos sobre os agregados e em seus planos de clivagem, tendo em sua constituição: silício, potássio e cálcio. (BULLETIN 79, 1991).

3.2.2 REAÇÃO ÁLCALI-CARBONATO

Até 1935 não havia registros a respeito de reações deletérias envolvendo rochas carbonáticas, sendo em 1957, este tipo de reação deletéria diagnosticada no Canadá por Swenson, baseadas em investigações de expansão, fissuramento e soergimento de concretos da região de Kingston (SILVEIRA, 2006).

Diversos autores como: Biczok (1972), Gillot (1975) e Ozol (1994), dizem que a Reação Álcali-Carbonato (RAC) é uma interação química entre os álcalis e as dolomitas presentes nos calcários, promovendo a formação da brucita, processo conhecido como “desdolomitização”, que gera fissurações e o enfraquecimento da zona de transição.

Uma particularidade da reação álcali-carbonato é que os álcalis não se incorporam nos produtos finais formados, eles apenas têm a função de catalisadores entre a

⁵ Baseado na teoria de Van Aardt e Visser (1977a)

portlandita e os íons carbonatos, fato este que explica a ausência do gel sílico-alcálico na matriz, como nas reações álcali-sílica e álcali-silicato (PAULON, 1981; FURNAS, 1997).

Para Deng e Tang (1993), os hidróxidos alcalinos do cimento reagem com a dolomita disponível do agregado formando brucita ($Mg(OH)_2$), calcita ($CaCO_3$) e carbonato alcalino ($Na_2(K_2 \text{ ou } Li_2)CO_3$), conforme Equação 3.1. Por sua vez, estes cristais formados de brucita e calcita são partículas finas e circundados por muito vácuo, fazendo com que ocupem um volume maior que a dolomita, de maneira que o crescimento dos cristais eleva a pressão de cristalização, tendo como consequência, expansão e fissuração. A Figura 3.3 exemplifica este processo.

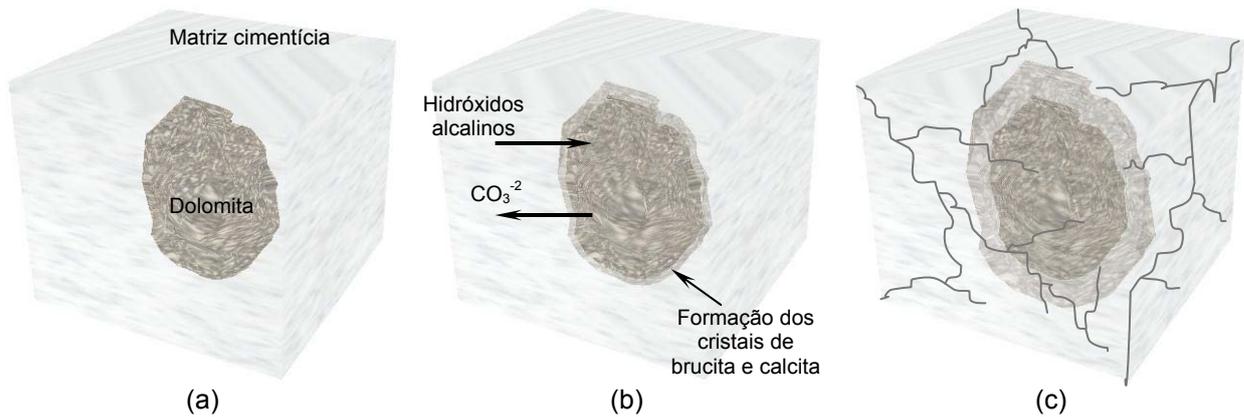
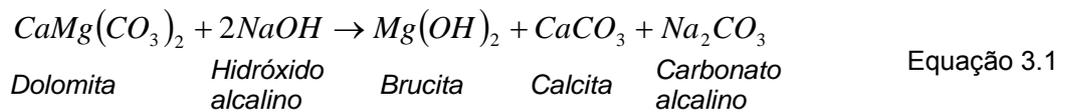
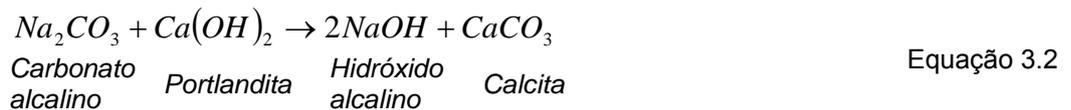


Figura 3.3 – Esquema mostrando as etapas da reação álcali-carbonato.⁶

Concomitantemente a este processo, o carbonato alcalino, reage com a portlandita presente na solução dos poros do concreto, formando nova calcita e renovando a fonte de hidróxidos alcalinos, levando a desdolomitização, até que se esgote a dolomita (Equação 3.2).



Tang *et al.* (1994) afirmam que apenas uma pequena concentração de álcalis poderia catalisar sucessivamente a reação pelo fato do pH da reação ser elevado em função das reações dos carbonatos alcalinos com o hidróxido de cálcio, diferentemente da reação álcali-sílica, que a alcalinidade é função da concentração equivalente de álcalis.

⁶ Baseado na teoria de Deng e Tang (1993).

Embora este tópico seja de extrema importância, em especial no exterior, haja vista que até o presente momento não se tem relato oficialmente divulgado deste tipo de reação no Brasil, este não faz parte do programa experimental desta dissertação, uma vez que se tem por objetivo um estudo detalhado da reação álcali-sílica/silicato. Outras informações a respeito deste tema podem ser encontradas em Silveira (2006).

3.3 A QUÍMICA DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Diversos autores como: Dent Glasser (1979), Dent Glasser e Kataoka (1981a,b), Paulon (1981), Turriziani (1986), Hobbs (1988), Bulletin 79 (1991), Glasser (1992), Furnas (1997), Garcia-Diaz *et al.* (2006) e Chatterji (2005), partilham da mesma opinião a respeito da química da RAS, onde esta pode ser descrita em dois estágios. No entanto, em um primeiro momento, os íons hidroxilas (OH^-) responsáveis pelo elevado pH da solução dos poros do concreto, reagem com a superfície da sílica presente no agregado formando ligações do tipo silanol ($\text{Si} - \text{OH}$), para então dar início aos estágios da reação, conforme a Equação 3.3 e ilustrado na Figura 3.4.



Equação 3.3

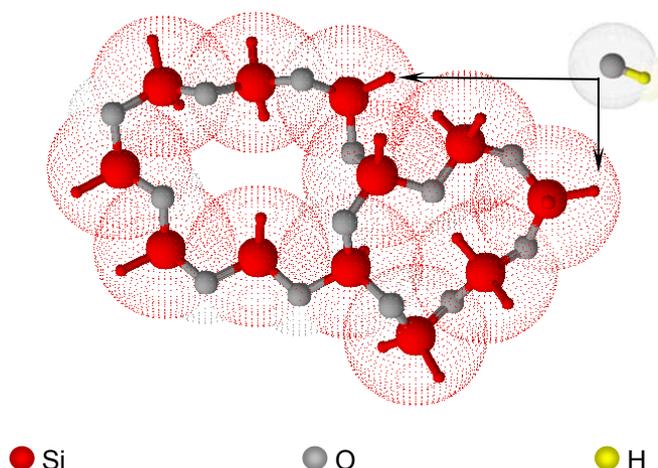


Figura 3.4 – Ruptura das ligações do grupo siloxano pelo pH elevado.

- **Estágio 1:** inicialmente os íons hidroxilas (OH^-), dissociados na solução alcalina dos poros do concreto, atacam o grupo silanol ($\text{Si} - \text{OH}$) presente na superfície da sílica, característica de uma reação ácido-base, onde a sílica adquire um caráter ácido (SiO^-) e a solução dos poros, básico (Equação 3.4).

Posteriormente, a equação é balanceada pelos íons alcalinos formando um gel sílico-alcalino, conforme descrito pela Equação 3.5 e apresentado na Figura 3.5.

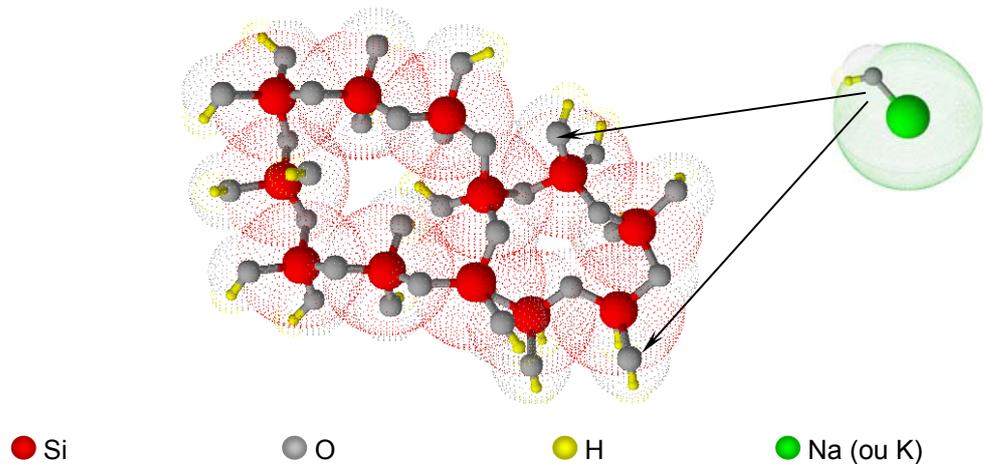
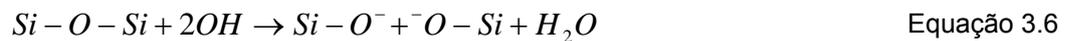


Figura 3.5 – Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas⁷

- **Estágio 2:** por fim, devido ao excesso dos íons hidroxilas que estão sempre se renovando nas reações, estes passam a atacar as ligações mais internas da sílica (grupo siloxano), conforme as Equações 3.6 e 3.7, levando a desintegração da estrutura da sílica deixando em solução monômeros de silicatos (H_4SiO_4 , $H_3SiO_4^-$ e $H_2SiO_4^{2-}$) solúveis (Equação 3.8), permitindo assim a adsorção de água e dos íons alcalinos (Equação 3.9). As Figuras 3.6 e 3.7 esquematizam este processo.



⁷ Baseado na teoria de Turriziani (1986).

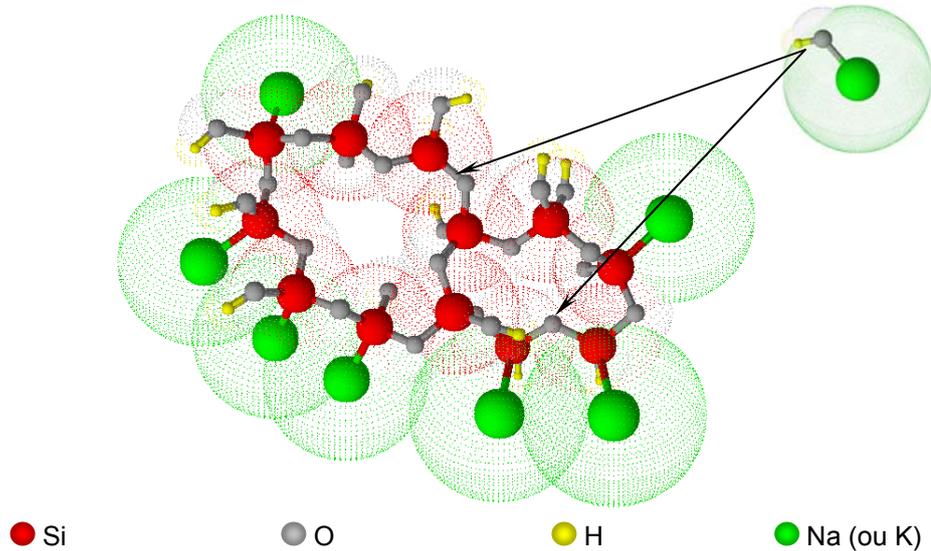


Figura 3.6 – Ruptura das ligações do grupo siloxanos pelas hidroxilas⁸

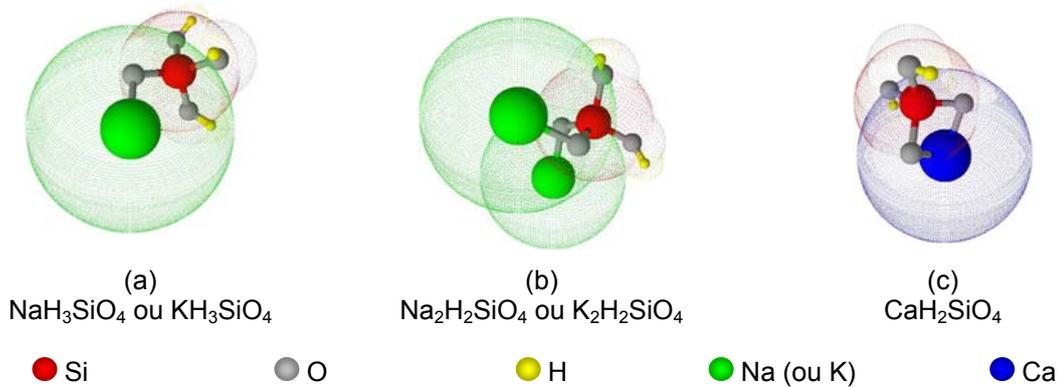


Figura 3.7 – Estrutura do gel

3.4 MECANISMOS DE EXPANSÃO

Logo após a descoberta da reação álcali-agregado (RAA) por Stanton (1940), Hansen publicou em 1944 a primeira teoria a respeito do seu mecanismo de expansão, a qual se fundamentou na pressão osmótica exercida pelos produtos da reação álcali-sílica (RAS) que se encontravam confinados no interior de uma membrana semipermeável da

⁸ Baseado na teoria de Turriziani (1986).

pasta de cimento. Esta teoria foi aceita por vários pesquisadores da década de 40, dentre eles: Parsons, Insley, McConnel, Pike, Verbeck e Gramlich (DIAMOND, 1975).

Segundo esta teoria, ao iniciar as reações de hidratação do cimento (por dissolução-precipitação), as fases aluminatos, silicatos e os íons alcalinos são dissolvidos, e a partir daí, com a precipitação dos compostos hidratados que estão ionizados, o pH do meio se eleva (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Com isto, os íons hidroxilas atacam as partículas do agregado reativo dando origem a um gel alcalino, que por sua vez é higroscópico, atraindo moléculas aquosas da pasta de cimento, por osmose, causando assim sua expansão (FURNAS, 1997).

No entanto, Vivian e outros pesquisadores criticaram esta teoria, afirmando que se esta fosse verdadeira, ao início das reações de hidratação do cimento, esta membrana osmótica semipermeável, que permite a entrada de moléculas de água para o gel, mas não deste para solução alcalina dos poros, romperia-se dissipando então as tensões de tração que causariam as fissurações na matriz (DIAMOND, 1975; HOBBS, 1988). Diamond (1975) ainda comenta que, segundo Vivian, as causas das expansões e da fissuração em si, são as pressões mecânicas exercidas nas estruturas, pelos produtos da reação encontrados nos estados sólidos e ou semi-sólidos.

Esta teoria, intitulada de teoria da adsorção, está ligada ao aumento do volume do gel quando saturado, e dependente da concentração volumétrica, taxa de crescimento e propriedades físicas do gel. Com isto, quando se tem uma pequena taxa de expansão, a pressão interna é dissipada com a migração do gel pela matriz. Entretanto se a expansão for grande, a pressão interna aumenta a ponto de causar fissuração na matriz (HOBBS, 1988).

A Figura 3.8 ilustra a teoria desenvolvida por Vivian, onde (HOBBS, 1988):

- **Estágio 1:** há um crescimento do gel, porém as tensões internas geradas não são capazes de causar microfissurações;
- **Estágio 2:** as tensões internas induzidas são capazes de gerar fissurações na vizinhança das partículas, ocasionando expansões mínimas;
- **Estágio 3:** o gel migra para dentro das microfissuras, levando a um ligeiro aumento das tensões internas;
- **Estágio 4:** as tensões internas induzidas ao redor das microfissuras que estão preenchidas pelo gel são grandes o suficiente para causar extensas microfissuras resultando em elevadas expansões.

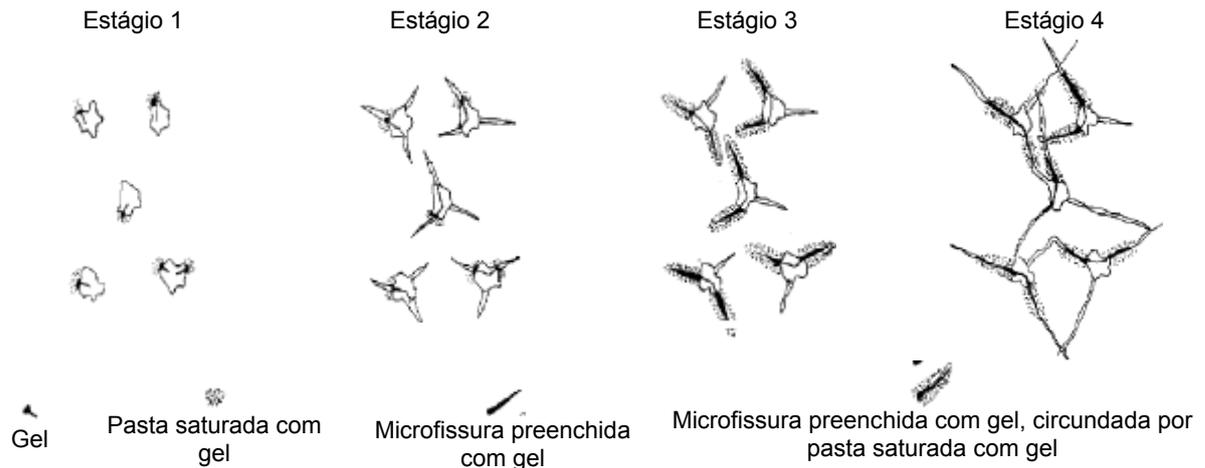


Figura 3.8 – Modelo idealizado para representar a indução de fissuras (HOBBS, 1988)

Outra hipótese descrita por Prezzi, Monteiro e Sposito (1997) a respeito dos mecanismos de expansão da RAA foi elaborada a partir da formação da dupla camada elétrica de acordo com a teoria de Gouy-Chapman, posteriormente esta teoria foi confirmada por Hasparyk (1999). Segundo esses autores, quando uma fase sólida entra em contato com uma líquida, suas superfícies eletrificam-se, fazendo com que suas propriedades modifiquem (Figura 3.9).

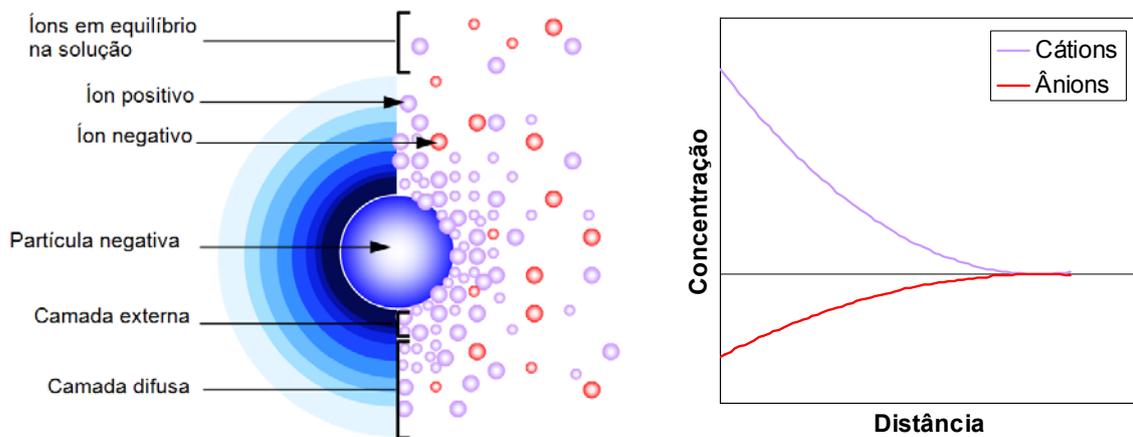


Figura 3.9 – Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, segundo o conceito da dupla camada difusa (adaptado de MITCHELL, 1992)

Os íons H^+ e OH^- , em solução aquosa, são os que determinam o potencial do sistema, ou seja, tanto o potencial quanto a carga são determinados pelo pH da suspensão, onde em pH ácido o potencial de superfície é positivo e negativo em pH básico (HUNTER, 1981; EVERETT, 1988; HUNTER, 1993; MYERS, 1999).

No caso da RAS o processo de formação da expansão pode ser simplificado de acordo com os seguintes estágios, fundamentados na teoria desenvolvida por Prezzi, Monteiro e Sposito (1997), são eles:

- **Estágio 1** (Figura 3.10 (a)): Não há contato da sílica reativa presente no agregado com a solução alcalina presente nos poros do concreto (íons Na^+ , K^+ e Ca^{++});
- **Estágio 2** (Figura 3.10 (b)): Após esse contato, a superfície da sílica é altamente carregada negativamente, sendo a alcalinidade dos poros responsável pela despolimerização da sílica e formação de uma dupla camada difusa em suas proximidades. A sílica é constantemente dissolvida, desde que haja continuidade da solução dos poros para que os íons fiquem difusos nas áreas afetadas;
- **Estágio 3** (Figura 3.10 (c)): Como resultado deste processo, as concentrações dos íons e o volume da dupla camada das áreas afetadas aumentam com o tempo. As partículas vão se aproximando uma das outras até que as forças de Van der Waals superem as forças de repulsão formando o gel, que é expansivo e deletério apenas em contato com a água. Porém, se algum fluxo de água ocorrer das regiões não afetadas para as afetadas, a probabilidade de dano é grande.

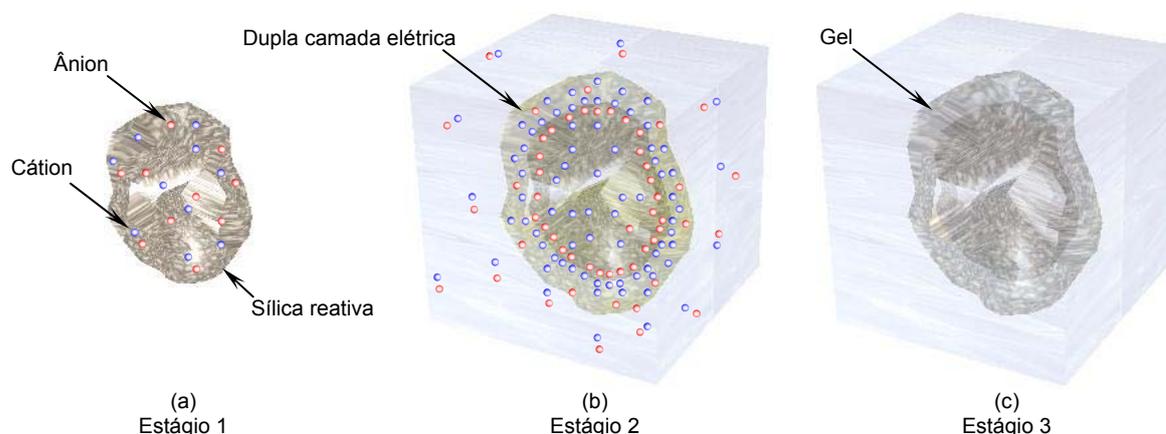


Figura 3.10 – Mecanismo de expansão da Teoria da Dupla Camada Elétrica.⁹

Os autores Oliveira *et al.* (2000) e Prezzi, Monteiro e Sposito (1997), ainda afirmam que quanto maior a área interfacial, maior será a quantidade de água adsorvida e conseqüentemente, maiores forças de repulsão se desenvolverão acarretando em maiores expansões. A valência e a concentração dos íons determinarão a espessura e as forças de repulsão, onde em concentrações iguais, os íons monovalentes (Na^+ e K^+) produzem maiores forças de repulsão e maiores espessuras na dupla camada do que os íons bivalentes (Ca^{++}), ou seja, nesta situação um gel rico em sódio tenderá a apresentar uma maior capacidade de se expandir do que um gel rico em cálcio.

⁹ Baseado na teoria de Prezzi, Monteiro e Sposito (1997).

Embora tenham sido apresentados três mecanismos de expansão do gel formado pela RAA, ainda não há um consenso entre pesquisadores a respeito de qual seria a melhor teoria. (PREZZI, MONTEIRO; SPOSITO, 1997).

3.5 AGENTES CAUSADORES DA RAA

Vários fatores influenciam na micromecânica da RAA, podendo atuar isoladamente ou simultaneamente a outros, agindo de forma a inibir ou até mesmo acelerar a deterioração do concreto. Para Wang e Gillott (1991) tais fatores que possam vir a intervir na RAA são agrupados da seguinte forma:

- Agentes relacionados ao concreto: relação água/cimento, teor de álcalis do cimento, dimensão das partículas dos agregados;
- Agentes que controlam a reação e a expansão: adições pozolânicas, teor de ar incorporado, porosidade dos agregados, aditivos químicos que inibem a expansão.
- Agentes químicos: presença de sais, aditivos aceleradores de pega, aditivos redutores de água e superplastificantes;
- Agentes relacionados ao meio ambiente: umidade, temperatura, ciclos de molhagem e secagem;

De uma forma geral, são três os fatores condicionantes que quando ocorrem simultaneamente em estruturas de concreto podem causar a RAA deletéria, sendo eles: a presença de um agregado reativo; a concentração elevada de hidróxidos alcalinos (Na^+ , K^+ , OH^-) na solução dos poros do concreto; e a presença de umidade suficiente (Figura 3.11). Por se tratar de um material heterogêneo e de uma reação complexa, elementos de concreto afetados pela RAA podem responder de maneira bem diferentes um dos outros, no entanto na ausência de um destes fatores, a reação com caráter deletério não ocorrerá (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000).

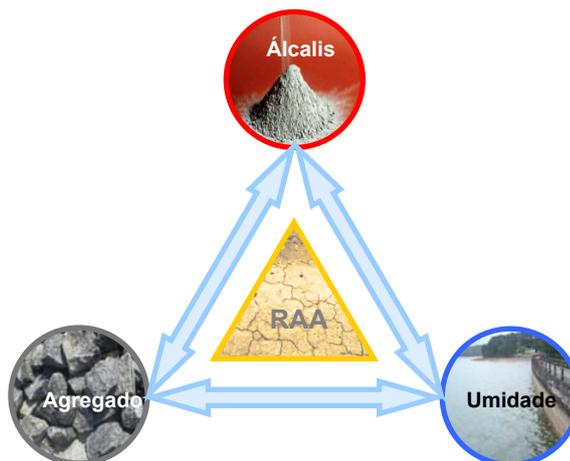


Figura 3.11 – Fatores necessários para gerar a RAA deletéria

3.5.1 TEOR DE ÁLCALIS NO CONCRETO

A presença dos álcalis provém do processo de calcinação do clínquer do cimento, em especial das argilas e outros compostos silicosos que o constitui. Em virtude deste processo se passar a altas temperaturas, os íons sódio e potássio são volatilizados e se condensam sobre o clínquer formando uma camada superficial alcalina ao longo do seu transporte através do forno de clínquerização. Sendo assim, estes álcalis que permaneceram na superfície do clínquer irão ser consumidos mais rapidamente do que os que se localizam no interior da estrutura do clínquer durante o processo de hidratação (DIAMOND, 1975).

O teor de álcalis normalmente é medido em relação ao teor de óxido de sódio ou potássio e é expresso como teor de equivalente em óxido de sódio, como mostra a Equação 3.10, a partir de cálculos estequiométricos:

$$Na_2O_{eq}(\%) = Na_2O(\%) + 0,658 \cdot K_2O(\%) \quad \text{Equação 3.10}$$

Uma forma teórica de minimizar os efeitos da RAA seria a utilização de cimentos com teores abaixo de 0,60% de Na_2O_{eq} e $3,0 \text{ kg/m}^3$ de álcalis no concreto. Com relação ao conteúdo de álcalis solúveis no concreto, Oberholster, Van Aardt e Brandt (1983) mostram que o comportamento deletério de um concreto devido às reações expansivas manifesta-se de acordo com os limites de sódio equivalente encontrados no cimento para seu determinado consumo por metro cúbico de concreto, como expostos na Figura 3.12. Entretanto, atualmente verifica-se que estes limites não são totalmente confiáveis.

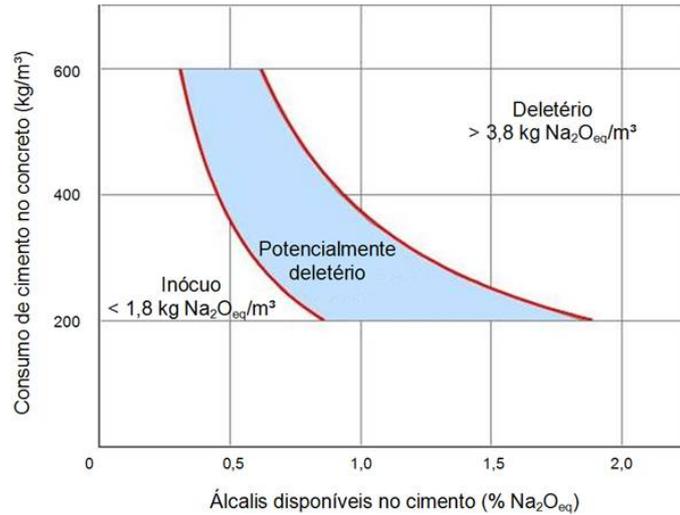


Figura 3.12 – Classificação do comportamento da reação em função da relação entre os álcalis disponíveis e o consumo de cimento no concreto (OBERHOLSTER, VAN AARDT; BRANDT, 1983).

De forma semelhante Fournier e Bérubé (2000) aplicaram o conceito da limitação do teor de álcalis no concreto em agregados canadenses, e verificaram que as expansões podem ser reduzidas ou até mesmo prevenidas dependendo do grau de reatividade do agregado, das condições de exposição da estrutura e da vida útil, estando este “limite seguro” na faixa de 1,8 kg/m³ a 3,0 kg/m³ de Na₂O_e no concreto. A Figura 3.13 apresenta a quantidade de álcalis fornecidos para a reação em função da quantidade de álcalis presente em cimentos com diversos teores alcalinos.

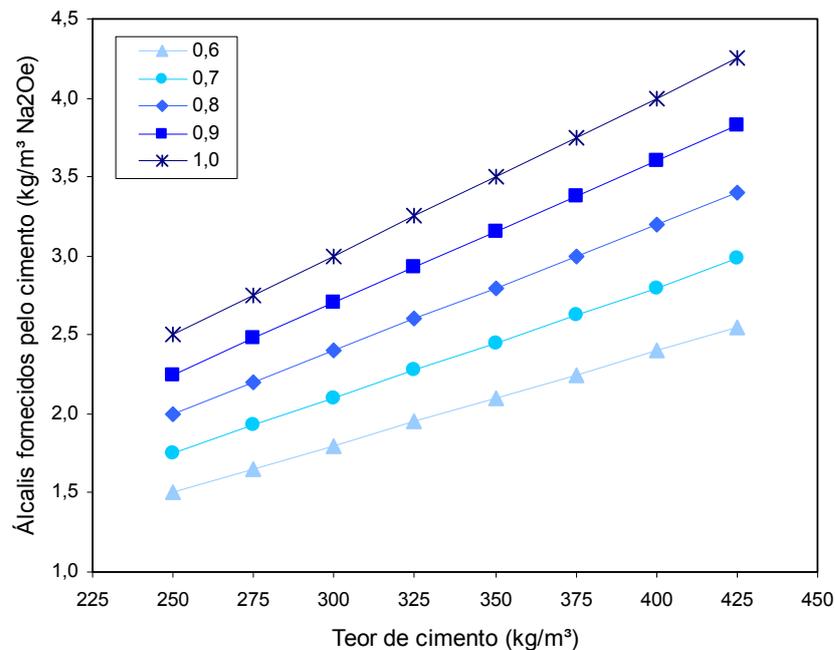


Figura 3.13 – Teor de álcalis (kg/m³ Na₂O_e) fornecido pelo cimento ao concreto em função da dosagem de cimento (kg/m³) e do teor de álcalis do cimento (% Na₂O_e) (FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000).

Entretanto, há casos em que apenas a redução do teor alcalino do concreto não é suficiente para mitigação da reação, conforme apresentado por Stark (1980) na Figura 3.14. Os resultados obtidos através da metodologia preconizada pela ASTM C-227, mostram um agregado contendo 10% de material reativo composto por andesito e riolito de estrutura vítrea a criptocristalina ensaiado com um mesmo tipo de cimento, porém, com teores distintos de álcalis. O autor vincula o insucesso na mitigação da RAS ao fato da expansão potencial, neste caso, ser função da reatividade do agregado e não apenas da quantidade total de álcalis.

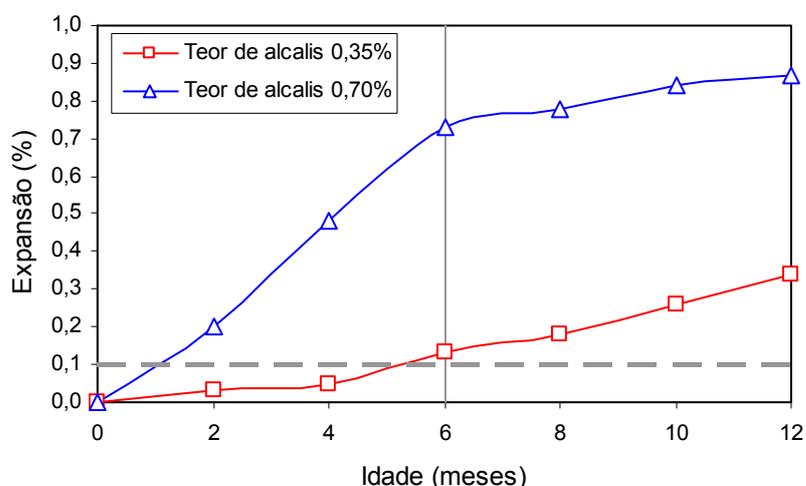


Figura 3.14 – Resultados de expansão segundo a ASTM C 227 (STARK, 1980)

Hasparyk *et al.* (2007) estudaram o efeito do teor dos álcalis e da finura do cimento nas expansões causadas pela RAA, através do método acelerado em barras de argamassa, na presença de uma rocha de origem granítica conhecidamente reativa da região metropolitana do Recife (RMR). Os resultados obtidos indicam que existem diferenças significativas entre os álcalis estudados, o mesmo ocorrendo para as finuras testadas, mostrando que ambos os parâmetros influem na RAA. Entretanto, a finura, na faixa estudada, apresentou um maior efeito nas expansões quando comparada com os teores de álcalis abordados. Com base nos resultados, os autores comentam que a utilização de um cimento com uma finura bastante elevada poderia desencadear maiores expansões do que a de um cimento com alto teor alcalino, dentro da faixa estudada.

Por fim, o cimento é a fonte principal de álcalis no concreto, mas não a única. Os agregados, segundo Lu *et al.* (2006), podem liberar seus álcalis tanto na presença de água como em solução de Ca(OH)_2 , intensificando sua concentração na solução dos poros de um concreto. No entanto, sua taxa de liberação é influenciada pelo tamanho das partículas do agregado e pela temperatura. As adições minerais corriqueiramente adicionadas ao concreto como a escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa, também podem ser fontes

de alcalinidade, dependendo do teor adicionado, velocidade de hidratação e a forma de ocorrência (GLASSER, 1992).

3.5.2 AGREGADOS

Um dos maiores desafios referentes à RAA está intimamente ligado a algumas características e minerais presentes nas rochas, que em quantidades e condições favoráveis, podem levar ao surgimento manifestações patológicas de caráter expansivo. Dentre as fases silicosas potencialmente reativas pode-se destacar o vidro vulcânico, a sílica nas formas amorfas, microcristalinas e criptocristalinas, a tridimita, a cristobalita, a calcedônia, a opala, o quartzo microgranular e deformado, e feldspatos deformados. Não somente os minerais constituintes das rochas têm influência na potencialidade reativa das rochas, mas também algumas particularidades dos agregados como: forma do grão, dimensão das partículas e teor de agregado reativo, as quais vêm sendo alvo de estudos.

Foi verificado por vários autores que o tamanho dos grãos do agregado pode influenciar diretamente nos valores de expansão. A grosso modo, a própria comparação entre os limites de expansão de 0,1% aos 16 dias e de 0,04% aos 12 meses, nos ensaios preconizados pela ASTM C-1260, que utiliza agregados com menores dimensões, e pela ASTM C-1293, respectivamente, é um indicativo desta influência.

Hobbs (1988) estudou diversas dimensões de agregados contendo opala e verificou este comportamento, conforme apresentado na Figura 3.15.

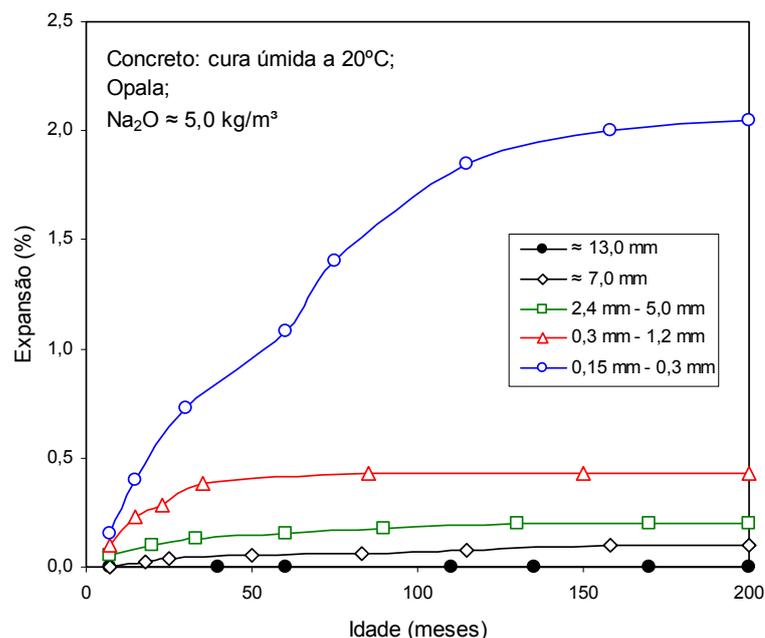


Figura 3.15 – Influência do tamanho do agregado na expansão do concreto (HOBBS, 1988)

Zhang *et al.* (1999) também estudaram a influência do tamanho do agregado através do método de ensaio chinês em autoclave, onde mostraram que para os agregados analisados os tamanhos entre 0,15-10 mm apresentaram maiores expansões que granulometria maiores, sendo que a expansão diminui com o aumento tamanho dos agregados para as amostras. Ressalta-se ainda que na presença de agregados de tamanhos maiores, as expansões foram menores nas primeiras idades, no entanto, também crescem com o passar do tempo, porém em menores proporções que as amostras com agregados de menores dimensões.

De forma semelhante, Kuroda *et al.* (2004) analisaram o comportamento deletério do agregado em função do efeito do tamanho das partículas do agregado, graduação e o teor de agregado reativo, e constataram que as expansões aumentam à medida que: o tamanho da partícula do agregado diminui (Figura 3.16), o modulo de finura diminui (Figura 3.17) e a área específica do agregado reativo aumenta (Figura 3.18). Aliado a este estudo, os pesquisadores ressaltam que nas maiores concentrações alcalinas a influência da dimensão dos agregados é menor.

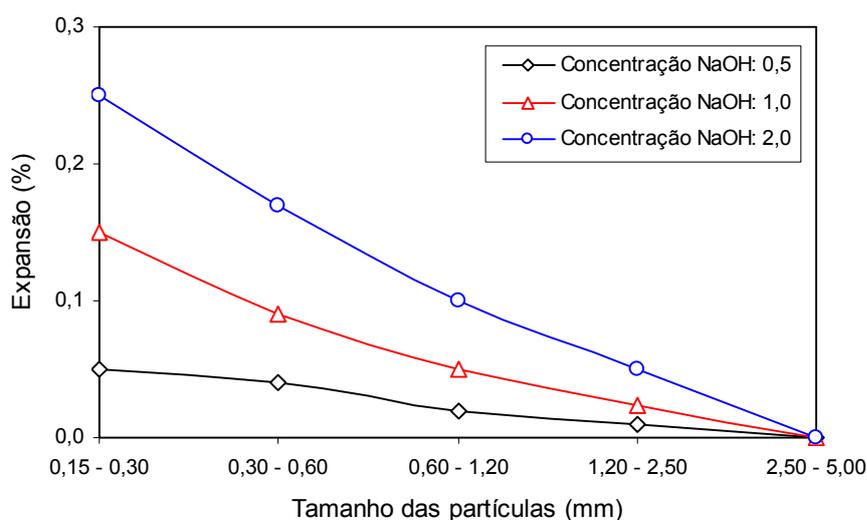


Figura 3.16 – Relação entre expansão e tamanho da partícula do agregado (KURODA *et al.*, 2004).

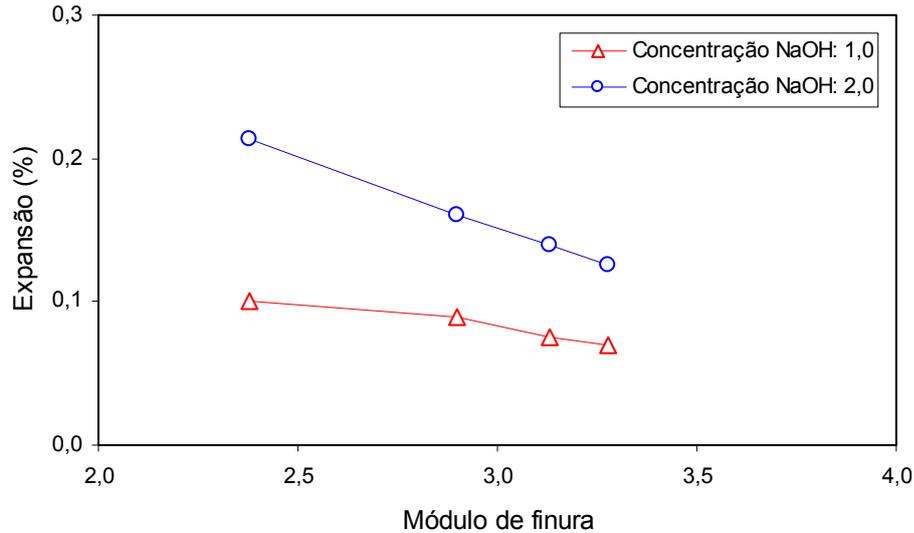


Figura 3.17 – Relação entre expansão e módulo de finura do agregado (KURODA *et al.*, 2004).

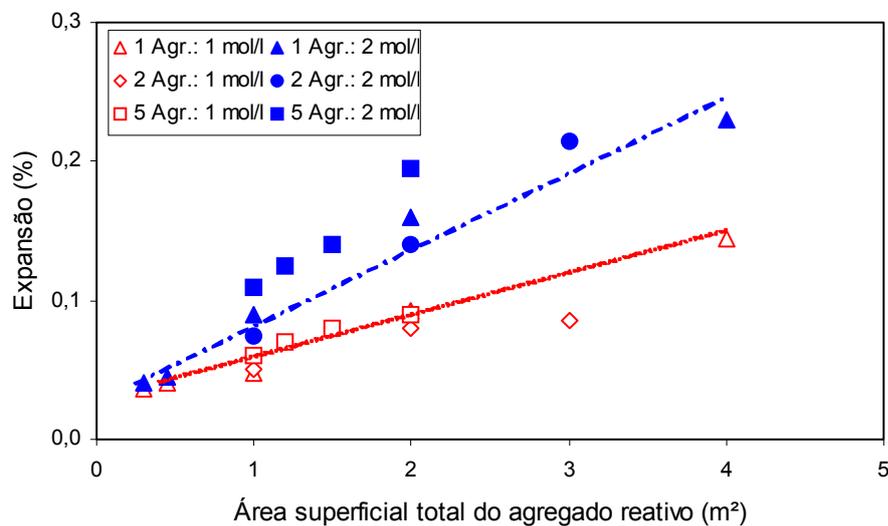


Figura 3.18 – Relação entre expansão e área específica do agregado (KURODA *et al.*, 2004).

Valduga *et al.* (2005), partindo do pressuposto de que a consistência de um concreto ou argamassa varia de acordo com a forma do grão de agregado, analisaram a influência de fatores intervenientes na execução do ensaio da ASTM C-1260, sendo eles: forma do grão, relação água/cimento e consistência da argamassa. Sendo assim, utilizou uma rocha basáltica reativa, sendo esta levada a três tipos diferentes de britadores. Os resultados mostraram que para uma mesma relação água/cimento e agregado, a forma do grão apresenta diferenças significativas, em especial a idade de 16 dias, sendo classificadas nas três faixas da ASTM C 1260 (inócuo, potencialmente reativo ou reativo), conforme pode ser exposto na Figura 3.19.

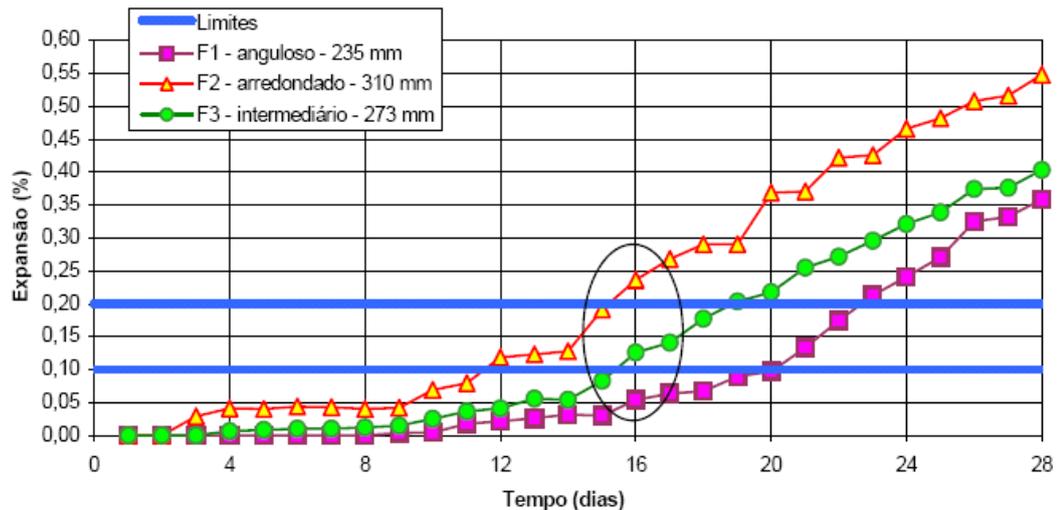


Figura 3.19 – Influência da forma dos grãos nas expansões do ensaio acelerado (VALDUGA *et al.*, 2005)

Barisone e Restivo (2000) avaliaram se a quantidade de agregado reativo exercia influência na expansão de concretos ensaiados de acordo com o prescrito pela ASTM C-1293. Agregados nas proximidades de Turim, na Itália, contendo opala e *flint*¹⁰ foram testados nas seguintes quantidades: 0,2%, 0,5%, 1%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20%. Os pesquisadores relatam que foram identificados teores píssimos de mineral reativo por meio deste ensaio, sendo que para a opala estes valores ficaram entre 3% e 4%, já para o *flint*, por ser menos reativo, seu teor píssimo subiu para casa dos 5% a 7%, conforme a Figura 3.20.

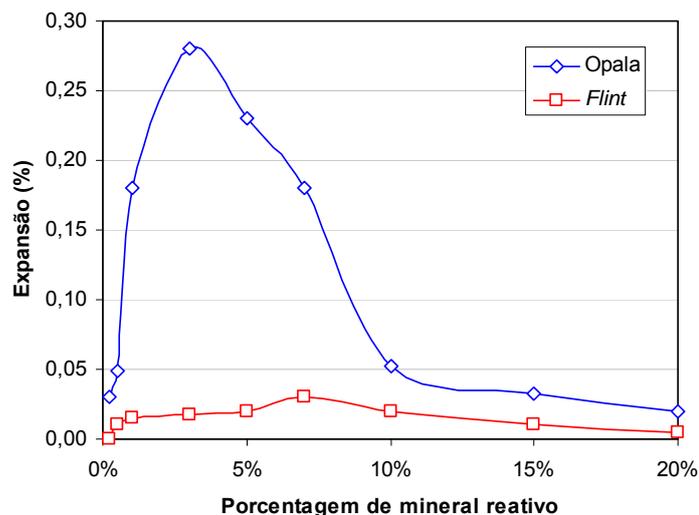


Figura 3.20 – Comportamento píssimo do agregado (BARISONE; RESTIVO, 2000)

No que diz respeito ao comportamento do agregado e ao seu teor píssimo, Hobbs (1988) explica que a reação ocorre em uma fase inicial, entretanto sem causar

¹⁰ Variedade de *chert* (rocha sedimentar composta de minerais de sílica criptocristalina) de cor escura a preta que tem inclusões de matéria orgânica.

fissuração. Já na região próxima ao teor péssimo, existe um excesso de álcalis disponíveis para a reação, causando fissurações. Avançando para a direita do teor péssimo, há uma tendência de redução das reações expansivas podendo ainda ocorrer fissurações, entretanto, o teor de sílica supera o de álcalis. Por fim, em teores mais elevados de minerais reativos existe um excesso de sílica que consome rapidamente os álcalis reduzindo sua concentração ou consumindo-os completamente, sem causar danos.

3.5.3 UMIDADE

É relatado que obras como barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas são mais susceptíveis ao desenvolvimento da RAA em função da umidade elevada em que se encontra o concreto, sendo assim este fator passa ser um requisito indispensável para a ocorrência da RAA deletéria (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Poole (1992) relata que a umidade possui duas funções nas reações deletérias entre os álcalis e as fases silicosas reativas, sendo a primeira de ionizar e transportar os íons alcalinos e a hidroxila ao longo da porosidade da matriz e, o segundo papel, de ser adsorvida pelo produto da RAA, o gel silício alcalino, que expande na presença da água podendo levar a fissuração. O autor ainda comenta que em ensaios laboratoriais, testemunhos de concreto mantidos em umidade relativa inferior a 70% apresentam expansões insignificantes, ao passo que valores acima de 80% as expansões começam a se desenvolver.

Glasser (1992) comenta que parte da água de amassamento do concreto poderá promover umidade suficiente para ocorrer a RAA. Hobbs (1988) apresentou um estudo comprovando esta teoria, onde corpos-de-prova de concreto selados após a moldagem foram estocados em condições controladas de temperatura, onde a água de amassamento em alguns casos foi suficiente para promover fissurações devido à RAA, embora normalmente seja requerida umidade externa.

Um fator agravante referente à umidade do concreto diz respeito à exposição dele a ciclos de molhagem e secagem, pois podem provocar solubilização e migração de álcalis para regiões localizadas do concreto permitindo a intensificação das reações expansivas (KIHARA, 1986).

3.5.4 OUTROS FATORES

Sabe-se que na maioria das reações químicas, a temperatura funciona como acelerador ou retardador das reações químicas, o que não é diferente na RAA. Em geral, o acréscimo de temperatura é diretamente proporcional ao aumento das expansões, este fato é confirmado por um estudo realizado por Shayan e Xu (2004), que verificaram dentre outras propriedades, a influência da temperatura de cura em prismas de concreto fabricados com cimento de alto teor de álcalis (1,4 % em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) e agregado reativo, em duas faixas de temperatura, 85°C e 65°C, encontrando diferenças significativas nas expansões (3,5% e 0,5%, respectivamente, ambas para idade de 1200 dias). Não é por menos que os métodos mais consagrados para determinação da potencialidade reativa de agregados utilizam temperaturas elevadas acelerar ainda mais as reações de expansão, como o método acelerado em barras de argamassa (80°C), método acelerado dos prismas de concreto (60°C) e o método dos prismas de concreto (38°C).

Capítulo 4

A RAA NAS ROCHAS SILICOSAS

4.1 MINERAIS E ROCHAS POTENCIALMENTE REATIVOS

Segundo Diamond (1976) a reação álcali-sílica envolve algumas formas de sílica metaestáveis ou tensionadas eventualmente presentes nos agregados, salientando que seu efeito deletério é dependente da quantidade de álcalis presentes. O pesquisador ressalta que o efeito deletério do quartzo está ligado a sua deformação geológica, da opala em função de sua amorficidade, dos vidros vulcânicos devido a sua amorficidade e característica ácida (ocorre uma reação ácido-base entre os álcalis e o vidro) e por fim, dos silicatos em função de sua capacidade de esfoliação.

Sendo assim, a análise petrográfica tem sido indispensável para identificar estes minerais que podem apresentar uma possível potencialidade reativa. Hasparyk (1999) apresenta uma correlação entre a natureza da rocha, o tipo de agregado e as fases mineralógicas reativas presentes, a partir de informações publicadas por diversos pesquisadores¹¹, conforme a Tabela 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Agregados ígneos potencialmente reativos (HASPARYK, 1999).

Rochas Ígneas	
Tipo de agregado	Fase mineralógica reativa
Andesito, dacito, fonolito, latito, obsidiana, pedra púmice, riolito, traquito e tufo vulcânico.	vidro vulcânico ácido a intermediário, tridimita e minerais de alteração (vidro devitrificado)
Basalto	minerais de alteração (clorofeita), calcedônia, cristobalita, opala, palagonita vidro vulcânico básico
Granito, granodiorito	> 30% ¹² de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e minerais de alteração

¹¹ Kihara (1986); Lê Roux (1988, 1989), Bulletin 79 (1991); Mehta e Monteiro (1994) e Vieira e Oliveira (1997)

¹² No caso do granito e granodiorito, Le Roux (1988) considera > 20%

Tabela 4.2 – Agregados metamórficos potencialmente reativos (HASPARYK, 1999).

Rochas Metamórficas	
Tipo de agregado	Fase mineralógica reativa
Ardósia	quartzo tensionado argilominerais (filossilicatos)
Filito	> 30 de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino vermiculita (filossilicatos)
Hornfel	> 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino vermiculita (filossilicatos)
Gnaise, granulito, micaxisto, quartzito e xisto	> 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$, feldspato deformado e quartzo de granulação fina
Milonito	quartzo tensionado e de granulação fina
Rochas metasedimentares	quartzo tensionado e filossilicatos

Hasparyk (1999) relata que quanto mais desorganizada (amorfa) e instável é a estrutura dos minerais presentes nos agregados, mais reativa será a fase. O Bulletin 79 (1991) e Kihara e Scanduzzi (1993) apresentam em ordem crescente de reatividade encontram-se os minerais de estrutura cristalina (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados), metaestáveis (tridimita e cristobalita), microcristalina a criptocristalina (calcedônia) e amorfa (opala e vidro). Na Tabela 4.3 são apresentadas as principais características físicas e químicas destes minerais.

Tabela 4.3 – Rochas, minerais e constituintes sintéticos reativos deletérios (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Constituintes reativos	Composição química	Características físicas
Opala	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amorfa
Calcedônia	SiO_2	Microcristalina a criptocristalina; normalmente fibrosa
Certas formas de quartzo	SiO_2	Microcristalina a criptocristalina; Cristalina, mas intensamente fraturada, deformada e/ou preenchidas com inclusões
Cristobalita	SiO_2	Cristalina
Tridimita	SiO_2	Cristalina
Vidro presente em riolitos, dacitos, latitos ou andesitos ou produtos de devitrificação criptocristalinos	Silicosos, com proporções menores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , alcalinos e alcalino terrosos	Vidro ou material criptocristalino como a matriz de rochas vulcânica, ou fragmentos em tufo
Vidros silicosos sintéticos	Silicosos, com proporções menores de álcalis, alumina, e/ou outras substâncias	Vidro

Em estudo realizado em rochas japonesas com a utilização dos métodos das barras de argamassa e químico, Wakizaka (2000) afirma que a reatividade de rochas vulcânicas é controlada pela presença de cristobalita, tridimita e vidro vulcânico. A presença desses minerais é afetada pela constituição da idade das rochas, onde as rochas do período

pré-Mioceno não apresentaram reatividade pelos ensaios. Já a reatividade das rochas sedimentares e metamórficas é controlada pela cristalinidade e conteúdo de quartzo.

Neste sentido, na Figura 4.1, é apresentado um modelo idealizado por Idorn, Jakobsen e Thaulow (1992) de reação de alguns tipos de rochas do ponto de vista da RAA, mostrando onde começam as fissuras e qual o comportamento das partículas do agregado.

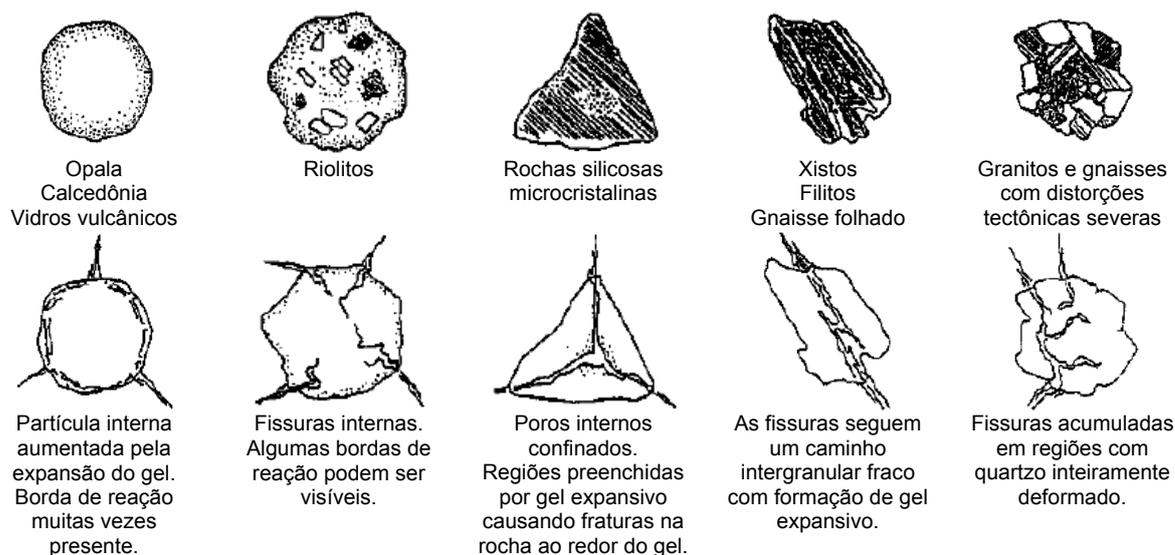


Figura 4.1 – Textura, morfologia e composição de algumas rochas susceptíveis a RAA e características do modelo de desenvolvimento da reação (IDORN, JAKOBSEN; THAULOW, 1992).

A seguir serão destacados alguns minerais potencialmente reativos do ponto de vista da RAS mais comumente relatados na literatura com suas particularidades.

4.1.1 QUARTZO

Sabe-se que o quartzo é um dos minerais mais freqüentes na natureza e termodinamicamente mais estável, entretanto, este pode apresentar feições texturais capazes de tornar o agregado potencialmente reativo quando sujeito ao metamorfismo, apresentando uma extinção ondulante, em função do tensionamento do seu retículo cristalino (KIHARA, 1986; POOLE, 1992).

Segundo Poole (1992), a potencialidade reativa do quartzo, de uma maneira geral, pode ser correlacionada com a intensidade do ângulo de extinção ondulante, embora haja muitas exceções. Dolar-Mantuani (1981) salienta que com o uso da técnica de microscopia ótica de luz polarizada pode-se medir o ângulo de extinção ondulante do quartzo, que representa o ângulo necessário para que, com o movimento da platina, uma

banda clara do grão de quartzo se torne totalmente escura. Estas medidas devem ser feitas por profissionais experientes na área de mineralogia.

Posteriormente, Monteiro *et al.* (2001) estudaram, por meio de análise de textura e difração de nêutrons, a influência do grau de deformação de rochas com mineralogia e estruturas químicas semelhantes sob efeito da RAS, e constataram que quanto maiores as deformações maiores eram suas expansões. Outro fato constatado como indicativo de reatividade diz respeito à orientação preferencial das partículas de mica e não ao ângulo de extinção ondulante do quartzo.

Segundo Ponce e Batic (2006), alguns agregados apresentam lentidão na reatividade dos álcalis com as fases minerais reativas do agregado. Estas estão diretamente relacionadas com a relativa estabilidade da termodinâmica do quartzo tensionado. Defeitos na estrutura cristalina do quartzo conduzem a um aumento da energia livre das redes cristalinas, que o transforma em sílica metaestável, suscetível de ser atacada pela solução alcalina dos poros do concreto.

Hünger (2007) estudou rochas sedimentares do tipo das grauvacas, onde o quartzo foi identificado como a principal fonte liberadora de sílica para reação, porém não foram encontradas relações entre as diferentes características do quartzo (granulometria, superfície específica e cristalinidade) e a sensibilidade de reação com os álcalis. O pesquisador observou que estas rochas podem liberar íons de alumínio provenientes de pequenos minerais de mica, que interagem com a sílica liberada, formando silicatos de alumínio e que parte da sílica que não é consumida, fica disponível para reagir e causar expansões deletérias.

4.1.2 OPALA

Segundo Hobbs (1988), a opala ou sílica amorfa pode ser considerada como a forma mais desordenada e reativa do grupo da sílica. Sendo constituído de sílica hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ocorre nas rochas ígneas em fendas e cavidades (DANA; HURLBUT, 1969).

Diamond e Thaulow (1974), conhecendo da potencialidade reativa da opala, estudaram o efeito do tamanho das partículas deste agregado em três faixas granulométricas: maior que 125 μm , 74 μm a 55 μm e 30 μm a 20 μm . Utilizando um cimento com alto teor alcalino (1,6%), moldaram cilindros de argamassas de 1 cm de diâmetro e 2 cm de altura, sendo acompanhadas suas expansões até a idade de 300 dias. Ao final dos experimentos, os autores constataram que não existe nenhum tamanho limite para que as expansões não se processem, ou caso existam, sua dimensão é inferior a utilizada.

Outro estudo envolvendo a utilização da opala como agregado foi desenvolvido por Rodrigues, Monteiro e Sposito (2001), que investigaram a influência de cátions monovalentes e bivalentes em sua superfície, sendo constatado que os íons bivalentes (Ca^{+2} , Mg^{+2} e Ba^{+2}) ficam adsorvidos à superfície do agregado (opala), reduzindo assim a superfície para trocas iônicas e conseqüentemente as expansões. Já para os cátions monovalentes (Na^+ e K^+) este fenômeno ocorre em menor proporção, fato este que explica o porquê destes álcalis desencadearem a RAS.

Ponce e Batic (2006) atribuíram a presença de opala e calcedônia como as fases principais reativas de um orto-quartzito da província de Chaco

4.1.3 VIDRO VULCÂNICO

Trata-se de um material vítreo (amorfo), como próprio nome diz, gerado pelo resfriamento rápido da lava, sem que haja cristalização da sílica (DANA; HURLBUT, 1969).

Tiecher (2006) estudou o comportamento reativo de agregados da região Sul do Brasil quando se altera o tipo de cimento. Foi constatado que todos os 14 basaltos estudados foram classificados como reativos pela presença do vidro vulcânico pela análise petrográfica e confirmados pela ASTM C-1260 quando se empregou um cimento do tipo CP V-RS. O mesmo comportamento se repetiu com os sete riolitos estudados.

Korkanç e Tugrul (2005) estudaram 11 tipos de basaltos da Turquia, onde foi constatado que a reatividade dos basaltos é controlada pela presença do vidro vulcânico, minerais de alteração e por conteúdos superiores a 50% de SiO_2 em sua constituição. Os resultados obtidos pela ASTM C-1260, de uma forma geral, não foram demasiadamente elevados, sendo que os basaltos com caráter ácido intermediário, conforme a classificação da Figura 2.3, e com a presença de vidro vulcânico em sua matriz, apresentaram expansões superiores a 0,10% aos 16 dias, ao passo que os demais foram considerados inócuos. Embora estes agregados tenham sido classificados como sendo inócuos, foi observada a presença de produtos da RAA, porém em quantidades que não representam risco.

4.1.4 FELDSPATO

Van Aardt e Visser (1977a; 1977b) foram os pioneiros em estudar a influência deste tipo de mineral na RAA. Em seu primeiro documento (1977a) os autores analisaram a reação da portlandita (CH) com feldspatos em suspensão aquosa a 39°C , onde se verificou que os feldspatos e argilas eram capazes de liberar seus próprios álcalis, podendo assim

desencadear a RASS; sendo portanto considerada uma auto-reação. Em um segundo trabalho, Van Aardt e Visser (1977b) analisaram dois tipos de silicatos: potássico (KAlSi_3O_8), sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), concluindo que ambos os feldspatos são capazes de liberar seus álcalis, no entanto os feldspatos potássicos (K-feldspatos) são mais resistentes ao ataque da portlandita do que os feldspatos sódicos. Mais recentemente, Constantiner e Diamond (2003) verificaram justamente o contrário, que os feldspatos potássicos (microclínio) liberam maior quantidade de álcalis à solução dos poros do que os feldspatos sódicos (oligoclásio), podendo estes feldspatos microclínios desencadear maiores expansões.

Leemann e Holzer (2005) estudaram dois agregados suíços a fim de identificar suas fases minerais reativas, através de amostras com superfície polidas imersas em solução alcalina e posteriormente examinadas por microscopia eletrônica de varredura. Verificou-se que o quartzo foi a fase mineral mais reativa, dissolvendo-se com mais frequência que o feldspato, biotita e clorita, sendo o feldspato a segunda fase mais reativa. Tanto o feldspato quanto as micas, liberaram íons alcalinos e de cálcio na solução, podendo influenciar na química da RAA. Na superfície das amostras, observou-se a formação de gel característico da RAA essencialmente compostos de silício e cálcio com variações de sódio, magnésio, ferro e alumínio.

Lu *et al* (2006) estudaram três tipos de agregados contendo feldspatos, visando verificar a influência da liberação de íons alcalinos para solução dos poros do concreto. Para tal, os agregados foram finamente moídos em faixas granulométricas pré-definidas e colocados em ambiente contendo solução supersaturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 80°C . De forma comparativa, o mesmo procedimento foi aplicado, porém em um ambiente com água destilada. Os resultados mostraram que mesmo em um ambiente contendo água destilada, em alta temperatura os íons alcalinos podem ser liberados, sendo a taxa de liberação aumentada em função da concentração alcalina e da finura das partículas dos agregados. Os autores atrelam as maiores taxas de liberação alcalina ao gnaiss, devido a este apresentar alteração mineralógica causada por processos metamórficos. A Figura 4.2 apresenta o exposto.

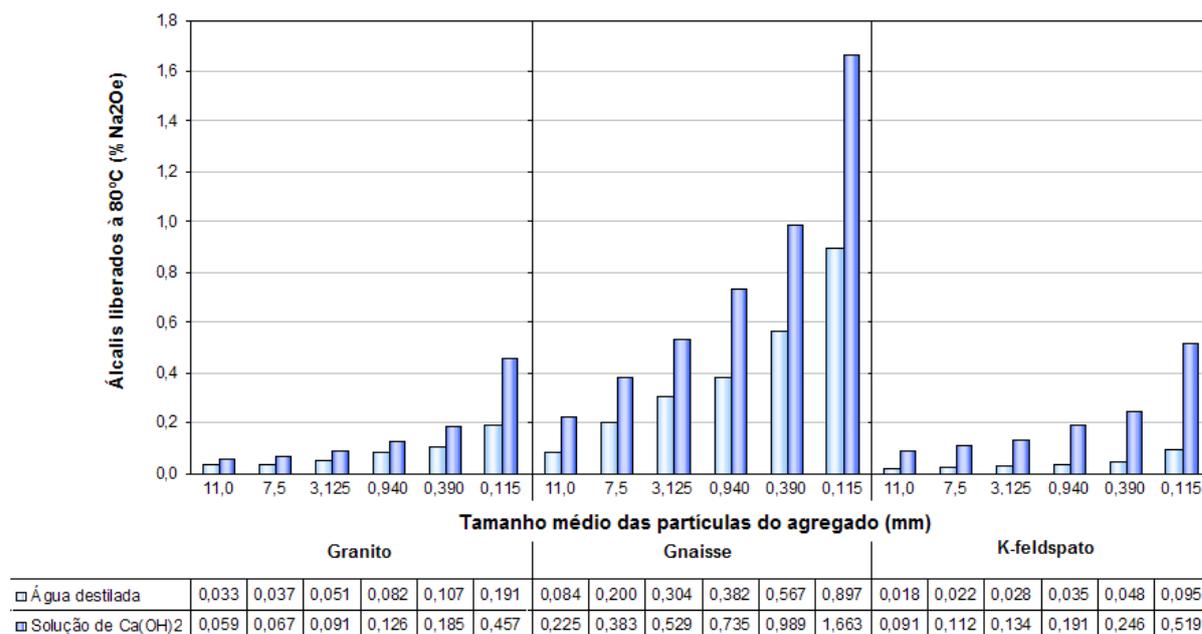


Figura 4.2 – Liberação de álcalis dos agregados em solução supersaturada de Ca(OH)_2 e água destilada a 80°C aos 28 dias em diversas granulométricas (LU *et al.*; 2006).

4.1.5 OUTROS MINERAIS

Segundo Stokes (1971), o termo clorofeita foi utilizado pela primeira vez por MacCulloch em 1819, para descrever um mineral que apresentou uma notável mudança de coloração passando de verde para castanho quando exposto ao intemperismo, estando este mineral comumente presente em basaltos. Já Vieira e Oliveira (1997), classificaram a clorofeita como sendo um mineralóide, por possuir uma estrutura cristalina precária, proveniente de processos de alteração (devitrificação) do vidro, podendo ser também a causa de reações do tipo álcali-silica. Recentemente, a ABNT NBR 15577-3 (2008) classifica a clorofeita como:

“uma mistura de argilominerais de magnésio, ferro e cálcio. Apresenta coloração esverdeada a marrom avermelhada. Por processos secundários, substitui de forma pseudomórfica olivinas, piroxênios e vidros vulcânicos. Ocorre normalmente preenchendo fraturas e vesículas ou ainda, ocupando os espaços intersticiais entre ripas de plagioclásio em basaltos”.

Hasparyk (1999) estudou um basalto que possuía tanto o vidro como a clorofeita e o comparou com um quartzito contendo quartzo tensionado. A pesquisadora verificou que o basalto era capaz de gerar maiores expansões aos 30 dias, no ensaio da ASTM C-1260, do que o quartzito. Tais expansões apresentaram cerca de 100% superiores às aquelas verificadas na presença do quartzito. Isto reforça a afirmação de Kihara e Scanduzzi (1993)

de que quanto mais desorganizada e instável for a estrutura, maior será a reatividade do agregado.

Wakizaka (2000) estudou a influência das esmectitas, que são argilominerais do grupo das montmorilonitas, sendo a presença destes argilominerais verificada em várias rochas vulcânicas japonesas. A presença de esmectitas, de uma forma geral, pelos resultados obtidos pelo método químico (ASTM C-289) eleva os valores de redução da alcalinidade, conforme se pode observar pela Figura 4.3. O autor ressalta que este mesmo comportamento foi relatado por outros pesquisadores, e que rochas vulcânicas do período pré-mioceno não contêm estes argilominerais, de forma que estas rochas apresentaram tanto valores de sílica dissolvida como redução da alcalinidade baixos.

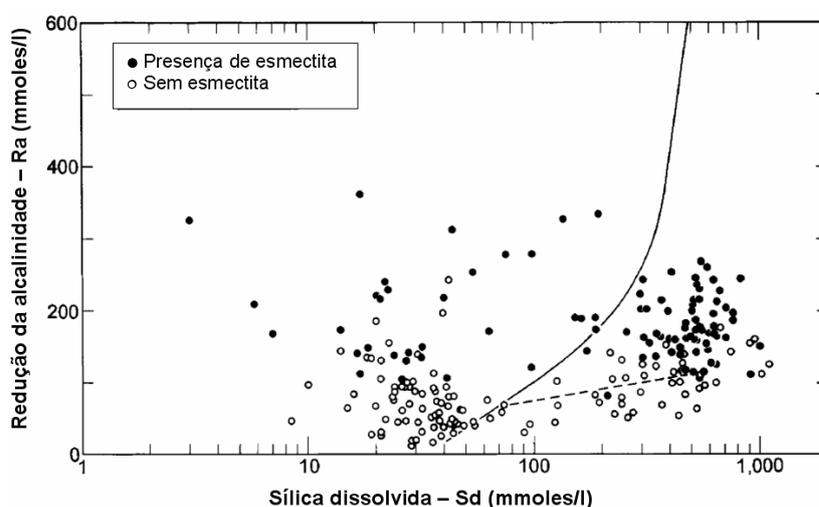


Figura 4.3 – Influência das esmectitas no método químico (WAKIZAKA; 2000)

Segundo Monteiro *et al.* (2001), o grau de deformação das rochas é um indicativo de reatividade com os álcalis. Nas rochas estudadas, esta deformação estava correlacionada com a orientação preferencial de grãos de mica biotita, que permitiram um alinhamento dos cristais gerando uma foliação capaz de aumentar sensivelmente a propensão do agregado reagir com a solução alcalina dos poros do concreto. Este parâmetro, segundo os autores, apresentara-se mais apropriado do que a deformação do quartzo para caracterizar o grau de reatividade da rocha.

Embora este não seja o foco da pesquisa, ao contrário do que parece, existem rochas carbonáticas que podem desenvolver reações do tipo álcali-sílica, como o caso dos agregados carbonáticos (SILVEIRA, 2006).

Gillott e Rogers (2003) estudaram um agregado sílico-carbonático das proximidades de Montreal, no Canadá, comparados a um calcário. Foi verificada a presença de um mineral raro, a dawsonita ($\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) que devido a sua rápida reação com a portlandita, apresentou uma quantidade de aproximadamente 1,5% superior de Na_2O

quando comparado ao calcário. Constatou-se também, que o aumento da temperatura acelerava esta reação.

4.2 OUTROS AGENTES ASSOCIADOS À RAA

Segundo Ekolu, Thomas e Hooton (2007) a coexistência dos mecanismos da RAA e da formação tardia de etringita (DEF – *delayed ettringite formation*), tem sido controversa, tanto na prática quanto na pesquisa, pelo fato de que até o presente momento o fenômeno da DEF ainda não foi bem compreendido. Quando os dois mecanismos deletérios coexistem, é difícil definir isoladamente qual a influência de cada um na deterioração do concreto. Um caso típico foi o ocorrido no final dos anos 50 no Texas (EUA), onde vigas de concreto protendido curadas a elevadas temperaturas ambientais, porém sem uma cura térmica mecanizada, começaram a apresentar fissuras. Na época, surgiram duas vertentes para justificar as fissurações, sendo a primeira devido a DEF e a segunda à RAA, estando a DEF naquele concreto, em segundo plano na sua deterioração.

Pettifer e Nixon (1980) sugeriram que a ocorrência do ataque por sulfatos promove a RAA, devido ao aumento da alcalinidade na solução dos poros. Naturalmente assume-se que a DEF ocorre, antes ou simultaneamente com a RAA. No entanto, estudos posteriores parecem sugerir que a RAA pode ocorrer parcialmente primeiro, reforçada pelo tratamento térmico seguido da cristalização de etringita nas fissuras já formadas. Também foi demonstrado que a formação de etringita é dificultada pela alta alcalinidade, e quando ocorre o consumo da solução alcalina dos poros durante a RAA, este funciona como um indutor químico na cristalização da etringita, por conseguinte, promovendo a DEF. Shayan e Ivanusec (1996) concluíram em seus estudos que a RAA e a DEF coexistem e que a RAA desempenha o papel principal de induzir fissuras.

Marfil e Maiza (2001) estudaram três pavimentos de concreto em processo de deterioração, sendo diagnosticado como a causa principal a RAA, devido a presença de vidro vulcânico, e quartzo deformado e microcristalino na mineralogia dos agregados utilizados nos concretos. Segundo os autores, tanto o gel quanto produtos cristalizados da RAA foram encontrados na interface argamassa-agregado nos concretos, bem como a presença de etringita formada posterior à hidratação do cimento, porém sua influência na degradação do concreto é desconhecida para os autores.

4.3 ÍNDICE DE REATIVIDADE POTENCIAL – IRP

Com base em estudos de Rodrigues, Kihara e Sbrighi (1997) e Kihara, Sbrighi e Pecchio (2006), é possível avaliar se um agregado granitóide ou quartzítico é suscetível à reação álcali-agregado, através de um estudo de uma série de propriedades e parâmetros como: microscópicos (ângulo de extinção ondulante, conteúdo de quartzo microgranular, ocorrência de fraturamento e granulometria média da rocha matriz), ensaios de expansão (ASTM C-1260¹³), conteúdo de álcalis solúveis no cimento, tipo de obra e condições ambientais. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros utilizados para verificar a potencialidade reativa segundo o IRP.

Tabela 4.4 – Índice de reatividade potencial – IRP (KIHARA; SBRIGHI; PECCHIO, 2006)

Parâmetros (A)	Condições		
ASTM C-1260 – 16 dias	< 0,10% (0)	> 0,10% e < 0,20% (2)	> 0,20% (3)
ASTM C-1260 – 30 dias	–	< 0,20% (0)	> 0,20% (3)
Ângulo de extinção ondulante	< 15° (0)	15° a 30° (1)	> 30° (2)
% de quartzo microgranular	< 5% (1)	5% a 15% (2)	> 15% (3)
Granulação da matriz	> 1 mm (0)	0,2 mm a 1,0 mm (1)	< 0,20 mm (2)
Microfissuramento	Ausente ou fraco (0)	Moderado (1)	Forte (2)
Teor de álcalis solúveis	–	< 0,4% (0)	> 0,4% (3)
Tipo de obra (B)	Não hidráulica (0)	Parcialmente (1)	Hidráulica (2)
Condições ambientais (C)	Quente/seco a frio/seco (0)	Moderado/úmido (1)	Quente/úmido (2)
ÍNDICE DE REATIVIDADE POTENCIAL TOTAL (IRP) = A.(B+C)			

Uma vez avaliado o IRP do agregado e a estrutura na qual este será utilizado, o agregado será classificado da seguinte forma:

- IPR > 20: agregado reativo;
- IPR 12 - 20: agregado potencialmente reativo;
- IPR ≤ 12: agregado inócuo.

Fazendo-se uso desta metodologia, Kihara, Neto e Pecchio (2006) apresentaram um estudo aplicado da técnica em obras reais, onde se obteve uma boa correlação dos resultados com a real conjuntura da obra. Os dados deste estudo encontram-se na Tabela 4.5.

¹³ Embora a teoria original desenvolvida seja baseado no método sul africano ABNT NBRI, hoje não se faz mais uso deste método.

Tabela 4.5 – Estudo de caso – IRP (KIHARA; NETO; PECCHIO, 2006)

Parâmetros (a)	Túnel			Pav.	Viga	Barragem		Edifício				Ponte
	1	2	3			1	2	1	2	3	4	
ASTM C-1260 – 16 dias	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3
ASTM C-1260 – 30 dias	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3
Ângulo de extinção ondulante	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1
% de quartzo microgranular	3	1	3	3	3	2	2	1	2	1	3	1
Granulação da matriz	2	2	2	2	2	2	2	0	2	1	2	0
Microfissuramento	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Teor de álcalis solúveis	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Tipo de obra (B)	1	1	1	1	1	2	2	1	-	1	1	1
Condições ambientais (C)	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
(IRP) = A.(B+C)	34	30	34	34	34	48	51	28	34	16	34	26
Ocorrência da RAA	E*	I*	E	E	E	E	E	E	E	N	E	I*

E – evidente; I – incidente; N – não observado

* Ocorrência de coloração esverdeada, indicando presença de escória de alto forno em sua composição do concreto

De forma semelhante, Sanchez (2008) aplicou este conceito em três agregados utilizados em sua pesquisa de mestrado, sendo eles um granito da região de Embu das Artes e um granito e milonito da RMR. Segundo o autor, todos os agregados avaliados podem desenvolver a RAA, mostrando que esta reação é um fenômeno altamente complexo e dependente de diversos fatores, e não simplesmente da reatividade do agregado. A Tabela 4.6 apresenta os resultados encontrados no trabalho supracitado.

Tabela 4.6 – Estudo de caso – IRP (SANCHEZ, 2008)

Parâmetros (A)	Granito	Granito	Milonito
	Embu das Artes	RMR	RMR
ASTM C-1260 – 16 dias	0	0	3
ASTM C-1260 – 30 dias	0	0	3
Ângulo de extinção ondulante	1	1	1
% de quartzo microgranular	1	1	3
Granulação da matriz	0	0	2
Microfissuramento	0	0	1
Teor de álcalis solúveis	3	3	3
Tipo de obra (B)	3	3	3
Condições ambientais (C)	3	3	3
(IRP) = A.(B+C)	30	30	96

Nota-se que embora os parâmetros B e C da Tabela 4.6 estejam acima do sugerido (foi adotado 3 ao invés de 2, na condição mais agressiva) pelos autores idealizadores da teoria, Kihara, Sbrighi e Pecchio (2006), todos os agregados continuam indicando potencialidade em reagir com os álcalis do cimento, quando corrigido estes valores. Sendo assim, os IRP's encontrados foram de 20, 20 e 64 para o granito de Embu das Artes, o granito da RMR e o milonito da RMR, respectivamente.

Capítulo 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 ASPECTOS GERAIS

A metodologia aqui apresentada e empregada na pesquisa teve o objetivo de avaliar rochas silicosas, no que se diz respeito à RAS, por meio de duas vertentes bem definidas, sendo a primeira em nível regional referente aos agregados para concreto do estado de Goiás e a segunda, em nível nacional, representada por agregados reativos procedentes de obras brasileiras. Para isto, foram coletadas 15 amostras de agregados do estado de Goiás e sete rochas de obras de vários estados.

Os agregados foram escolhidos em função do seu potencial de utilização em cada região do estado do Goiás e em obras nas quais já haviam históricos da RAA instalada. Estas rochas foram submetidas à análise petrográfica, difração de raios X, ensaio químico (ABNT NBR 9774) e ensaios acelerados em argamassa (ABNT NBR 15577 / ASTM C-1260) e em concreto (ASTM C-1293 modificado, na versão acelerada), fazendo adicionalmente a este último, leituras com ultra-som e acompanhamento de variação de massa de corpos-de-prova. Posteriormente, nas argamassas foram escolhidas amostras as quais foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) fazendo-se uso da técnica de microanálise por espectrometria de energia dispersiva de Raios X (EDS) a fim de identificar os produtos neoformados a partir da reação álcali-sílica.

Para a escolha dos dois tipos de cimentos fabricados no estado de Goiás tiveram-se duas premissas: a primeira, que fosse o de maior consumo em obras civis e a segunda, que fosse o de maior percentual de adição pozolânica que, em tese, mitigaria a RAA. Portanto, foram escolhidos os cimentos: CP II-F-32 (cimento Portland composto com adição de material carbonático – fíler) denominado: **cimento A**, e CP IV-32 (cimento Portland composto com adição de material pozolânico) denominado: **cimento B**, sendo o primeiro de maior consumo no estado e o segundo, com maior teor de adição.

Na Figura 5.1, é apresentado o fluxograma de organização seguido no programa experimental desta pesquisa.

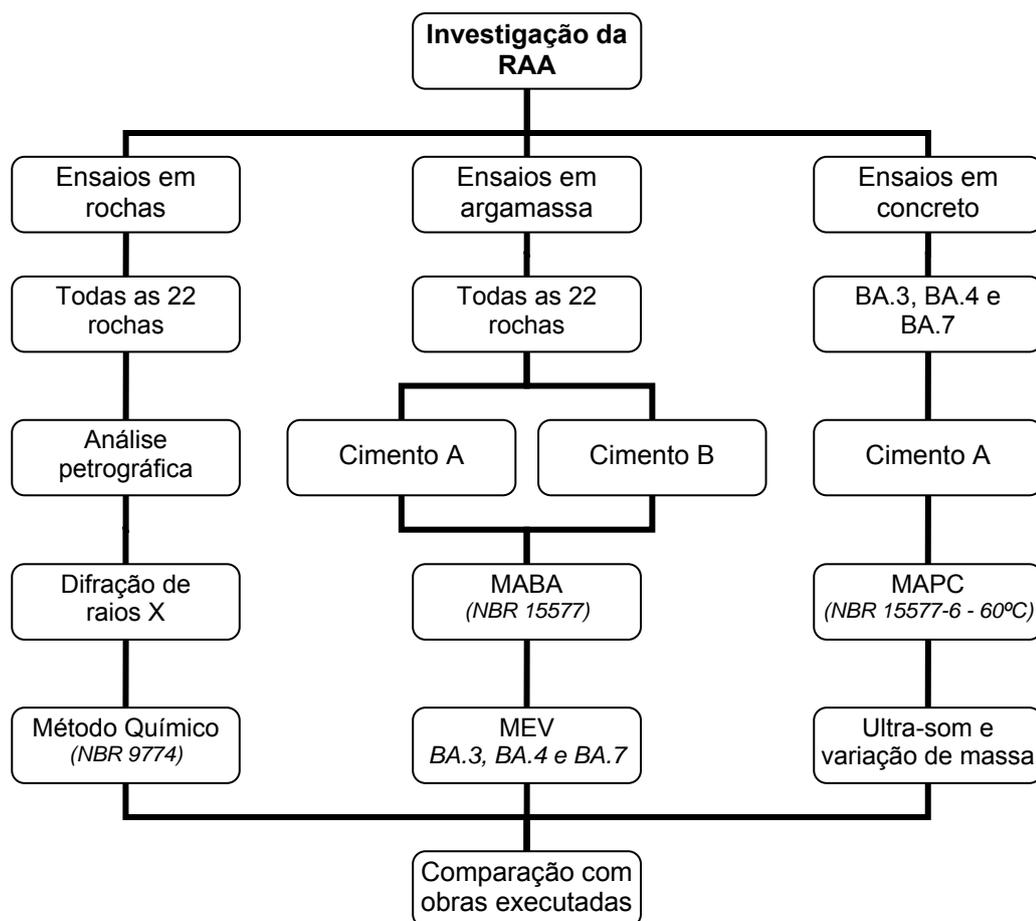


Figura 5.1 – Fluxograma do programa experimental

5.2 MATERIAIS

5.1.1 CIMENTO

Para a escolha do cimento houve a preocupação de se averiguar quais os principais cimentos fabricados e comercializados no estado de Goiás com base em números extraídos do último Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2006), a fim de reproduzir de forma abrangente o possível comportamento deletério para os concretos produzidos com materiais do estado. Outra preocupação foi que estes tivessem o mesmo clínquer, para que então pudesse observar o comportamento do material pozolânico frente à RAA. Portanto optou-se pelos cimentos:

- Cimento A, por ser o de maior consumo tanto em nível nacional quanto estadual;
- Cimento B, objetivando uma possível alternativa para os agregados deletérios

Após a escolha dos cimentos utilizados nesse estudo, fez-se a caracterização mecânica, química e física, as quais são apresentadas nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente.

Tabela 5.1 – Características mecânicas dos cimentos

Resistência à compressão ABNT NBR 7215/96	Cimento A		Cimento B	
	Resultado	Exigência (ABNT NBR 11578/91)	Resultado	Exigência (ABNT NBR 5736/91)
3 dias	21,1 MPa	≥ 10 MPa	31,6 MPa	≥ 10 MPa
7 dias	24,3 MPa	≥ 20 MPa	39,3 MPa	≥ 20 MPa
28 dias	27,7 MPa*	≥ 32 MPa	44,1 MPa	≥ 32 MPa

* Parâmetro não atendido para a idade especificada por norma

Tabela 5.2 – Características química dos cimentos

Propriedades determinadas (%)	Norma	Cimento A		Cimento B	
		Resultado	Exigência (ABNT NBR 11578/91)	Resultado	Exigência (ABNT NBR 5736/91)
Dióxido de silício (SiO ₂)	ABNT NBR NM 11-2/04	30,61	–	26,36	–
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	ABNT NBR NM 11-2/04	6,81	–	13,24	–
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	ABNT NBR NM 11-2/04	3,04	–	2,43	–
Óxido de cálcio (CaO)	ABNT NBR NM 11-2/04	47,74	–	44,84	–
Óxido de magnésio (MgO)	ABNT NBR NM 11-2/04	4,64	≤ 6,5	4,16	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	ABNT NBR NM 11-2/04	2,37	≤ 4,0	3,01	≤ 4,0
Cal livre (CaO)	ABNT NBR NM 13/04	1,5	–	1,4	–
Álcalis totais					
Óxido de sódio (Na ₂ O)	ABNT NBR NM 17/04	0,41	–	0,62	–
Óxido de potássio (K ₂ O)	ABNT NBR NM 17/04	1,00	–	1,04	–
Equivalente alcalino (Na ₂ O _{eq}) ¹⁴	ABNT NBR NM 17/04	1,06	ASTM C-150/05 ≤ 0,6	1,30	ASTM C-150/05 ≤ 0,6
Álcalis solúveis					
Óxido de sódio (Na ₂ O)	ASTM C-114/04	0,28	–	0,17	–
Óxido de potássio (K ₂ O)	ASTM C-114/04	0,43	–	0,20	–
Equivalente alcalino (Na ₂ O _{eq})	ASTM C-114/04	0,57	–	0,30	–
Perda ao fogo	ABNT NBR NM 18/04	2,85	≤ 6,5	3,17	≤ 4,5
Resíduo insolúvel	ABNT NBR NM 15/04	20,50*	≤ 2,5	25,99	–

* Parâmetro não atendido para a idade especificada por norma

¹⁴ Na₂O_{eq} = %Na₂O + 0,658 . %K₂O

Tabela 5.3 – Características físicas dos cimentos

Propriedades determinadas	Norma	Cimento A		Cimento B	
		Resultado	Exigência (ABNT NBR 11578/91)	Resultado	Exigência (ABNT NBR 5736/91)
Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR NM 23/01	3,02	–	2,96	–
Finura Blaine (m ² /kg)	ABNT NBR NM 76/98	482	≥ 260	629	–
Resíduo na peneira # 200 75 µm (%)	ABNT NBR 11579/91	0,9	≤ 12,0	1,8	≤ 8,0
Resíduo na peneira # 325 45 µm (%)	ABNT NBR 12826/93	5,5	–	9,0	–
Dimensão média dos grãos (µm)	Procedimento Furnas 1.002.133	10,58	–	11,64	–
Tempo de início de pega (hh:mm)	ABNT NBR NM 65/03	05:30	≥ 01:00	03:00	≥ 01:00
Tempo de fim de pega (hh:mm)	ABNT NBR NM 65/03	06:00	≤ 10:00*	04:10	≤ 12:00*
Expansibilidade à quente (mm)	ABNT NBR 11582/91	0,0	≤ 5	0,0	≤ 5
Expansibilidade à frio (mm)	ABNT NBR 11582/91	0,0	≤ 5*	2,0	≤ 5*
Expansão em autoclave (%)	ASTM C-151/05	0,1	ASTM C-150/05 ≤ 0,8 ASTM C-1260/05 ≤ 0,2	0,1	ASTM C-150/05 ≤ 0,8 ASTM C-1260/05 ≤ 0,2

* Exigências facultativas

Observa-se que os dois cimentos analisados são materiais constituídos principalmente por SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, que, somados, totalizam mais de 90% da composição química, além de apresentarem expansão em autoclave de 0,10%, quando ensaiada pela ASTM C 151, atendendo à especificação da ASTM C 1260, que prescreve expansão inferior a 0,20%. No entanto o cimento A, não atendeu a dois requisitos de norma, a resistência à compressão a idade de 28 dias e ao teor de resíduo insolúvel, sendo este último bem acima do limite proposto pela ABNT NBR NM 15/04 de igual ou inferior que 2,5%. Já o cimento B atendeu a todos os requisitos prescritos em norma.

5.1.2 AGREGADO

As rochas do estado de Goiás foram, a princípio, coletadas em função de sua utilização por empresas especializadas em concreto usinado (pré-misturado) espalhadas pelo estado.

Porém, como a concentração deste ramo da construção civil se densifica na região metropolitana de Goiânia, optou-se então em estender esta pesquisa deixando de lado esta primeira premissa e passar, então, a focar nas principais rochas silicosas

comercializadas em toda a extensão do estado. Assim, foi feita a divisão do estado em regiões, realizando-se um extenso levantamento nas principais cidades e obtendo-se, então, um mapeamento do estado em relação aos principais tipos litológicos de agregados utilizados para concreto (Figura 5.2).

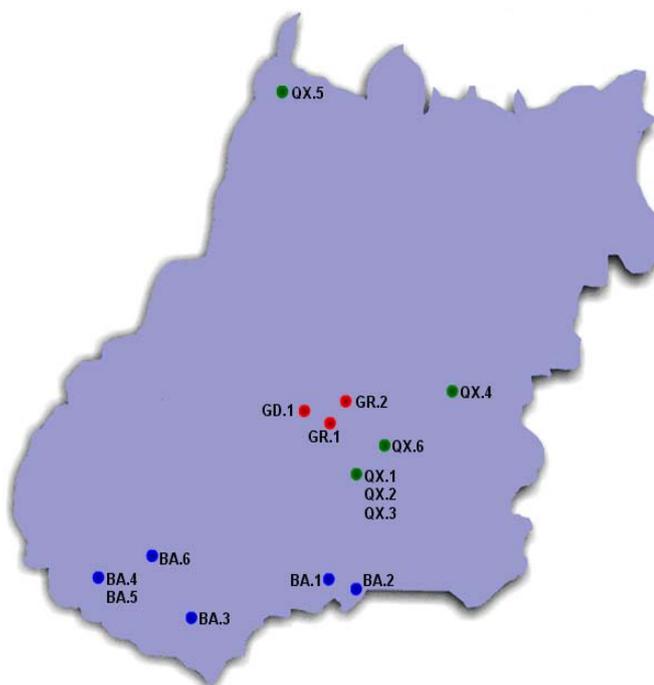


Figura 5.2 – Principais tipos litológicos dos agregados para concreto no estado de Goiás

A localidade exata da coleta das rochas e agregados não foi informada, tampouco o nome das empresas fornecedoras dos agregados, uma vez que alguns destes apenas concordaram em ceder seus materiais desde que não fossem vinculadas quaisquer informações de suas pedreiras com os resultados dos ensaios e análises deste estudo.

Com relação à coleta, estas foram retiradas já beneficiadas no pátio de estocagem das próprias pedreiras, sendo assim, não foi possível estabelecer um padrão nas profundidades de extração das amostras nos maciços rochosos, tampouco a real localização da lavra de cada fornecedor.

As rochas de obras nacionais foram selecionadas tomando como referência àquelas que apresentavam maiores valores de expansões pelo ensaio acelerado em barras de argamassa (ASTM C-1260), encontrados na literatura, em especial nos anais do I e II Simpósio Sobre RAA em Estruturas de Concreto, sendo o primeiro realizado em 1997 na cidade de Goiânia e o segundo, na cidade do Rio de Janeiro em 2006. Em relação à amostra de granito (GR.3), procedente da Região Metropolitana de Recife (RMR), a premissa da potencialidade reativa do agregado foi desconsiderada, e devido à grande

repercussão de novos casos de RAA na região, optou-se por estudar também um caso de rocha considerada potencialmente inócua.

Foi encontrada certa dificuldade em localizar exatamente as pedreiras que forneceram as rochas para as obras selecionadas, em especial as hidráulicas, uma vez que, a sua maioria data da década de 60 a 70, não sendo possível identificar a real localização dos agregados utilizados na época de sua construção, e a sua similaridade. Assim, foi considerando neste estudo apenas que são rochas das proximidades das obras.

Em função destes fatores, optou-se então em utilizar os materiais das obras nas quais já se sabem o potencial reativo dos agregados. Sendo assim, foram coletados os agregados das proximidades das seguintes obras: UHE Apolônio Sales (Moxotó), UHE Furnas, UHE Jaguará, Barragem Reguladora de Pedro Beicht, agregado potencialmente reativo da RMR e agregado potencialmente inócua da RMR.

Na Tabela 5.4 são apresentados todos agregados utilizados na pesquisa.

Tabela 5.4 – Agregados utilizados na pesquisa

Amostra	Litologia	Procedência
BA.1	Basalto	Estado de Goiás
BA.2	Basalto	Estado de Goiás
BA.3	Basalto	Estado de Goiás
BA.4	Basalto	Estado de Goiás
BA.5	Basalto	Estado de Goiás
BA.6	Basalto	Estado de Goiás
BA.7	Basalto	Pedreira Antônio Moro – Ponta Grossa, PR
GD.1	Granodiorito	Estado de Goiás
GR.1	Granito	Estado de Goiás
GR.2	Granito	Estado de Goiás
GR.3	Granito	Recife, PE (potencialmente inócua)
GR.4	Granito	UHE Moxotó – Paulo Afonso, BA
GR.5	Granito	Barragem Reguladora Pedro Beicht – Cotia, SP
ML.1	Milonito	Recife, PE (potencialmente reativo)
QX.1	Quartzo-xisto	Estado de Goiás
QX.2	Quartzo-xisto	Estado de Goiás
QX.3	Quartzo-xisto	Estado de Goiás
QX.4	Quartzo-xisto	Estado de Goiás
QX.5	Quartzo-xisto	Estado de Goiás
QX.6	Quartzo-xisto	Estado de Goiás
QZ.1	Quartzito	UHE Furnas – Alpinópolis, MG
QZ.2	Quartzito	UHE Jaguará – Rifaina, SP

5.3 MÉTODOS

Todos os ensaios aqui descritos e os de caracterização de materiais utilizados na pesquisa foram realizados nas dependências de FURNAS Centrais Elétricas S. A., no

entanto, todos os ensaios e análises foram acompanhados do início ao final pelo autor desta dissertação.

5.1.3 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Este método de investigação baseado na norma ABNT NBR 15577-3 (2008), é realizado em exemplares de rocha visando o conhecimento da mineralogia dos agregados quanto a possível reatividade álcali-agregado por meio da identificação de minerais deletérios, observando-se a textura, estrutura, dimensão, orientação e possível alteração destes. Esta identificação é realizada em microscópio ótico de luz transmitida, observando-se lâminas delgadas com cerca de 30 µm de espessura e confeccionados com as amostras de rocha e/ou agregado.

É importante ressaltar que apenas a identificação dos potenciais da RAA não é suficiente para avaliar o comportamento expansivo do agregado no concreto, pois estes são dependentes das propriedades dos materiais (cimento e agregado), fatores externos (umidade, temperatura e tensões atuantes) e do tempo. Assim, essa técnica deve ser utilizada com cautela e assim associada a outras.

A Figura 5.3 apresenta o equipamento utilizado para execução deste ensaio.



Figura 5.3 – Detalhe do equipamento (Leitz, modelo Ortholux 2 Pol-BK) utilizado na análise petrográfica

5.1.4 MÉTODO QUÍMICO

Este ensaio, denominado método químico e normalizado pela ABNT NBR 9774 (1987) (equivalente ao método da ASTM C 289/2003), avalia a potencialidade reativa de um

agregado previamente preparado, com dimensões suficientes para que passe pela peneira de abertura 0,30 mm e fique retido na 0,15 mm. Posteriormente, são separados 25 g deste material e acondicionado num torpedos acrescido de 25 ml de NaOH a concentração de 1 N, por um período de 24 horas, a temperatura de 80°C. Passada esta etapa, a solução é filtrada e determinada a quantidade de sílica dissolvida (Sd) bem como a redução da alcalinidade (Ra) do hidróxido de sódio, que é medido por titulação com HCl, usando fenolftaleína como indicador. O resultado é colocado em um gráfico contendo três áreas, que em função dos parâmetros determinados, classifica o agregado como sendo inócuo, potencialmente reativo ou deletério. Todos os 22 agregados selecionados foram submetidos ao método químico supracitado.

As vantagens da utilização deste método estão na quantidade da amostra, que é limitada em 75 g de apenas uma faixa granulométrica (passante na peneira 0,3 mm e retida na peneira 0,15 mm), e também no tempo de execução, que é bem menor que em outros métodos. Por outro lado, por se tratar de um ensaio rápido, realizado em alta temperatura e ambiente agressivo, e apenas com a rocha moída, não é totalmente confiável, devendo seus resultados serem comparados de outros métodos.

A Figura 5.4 apresenta os torpedos utilizados na metodologia.

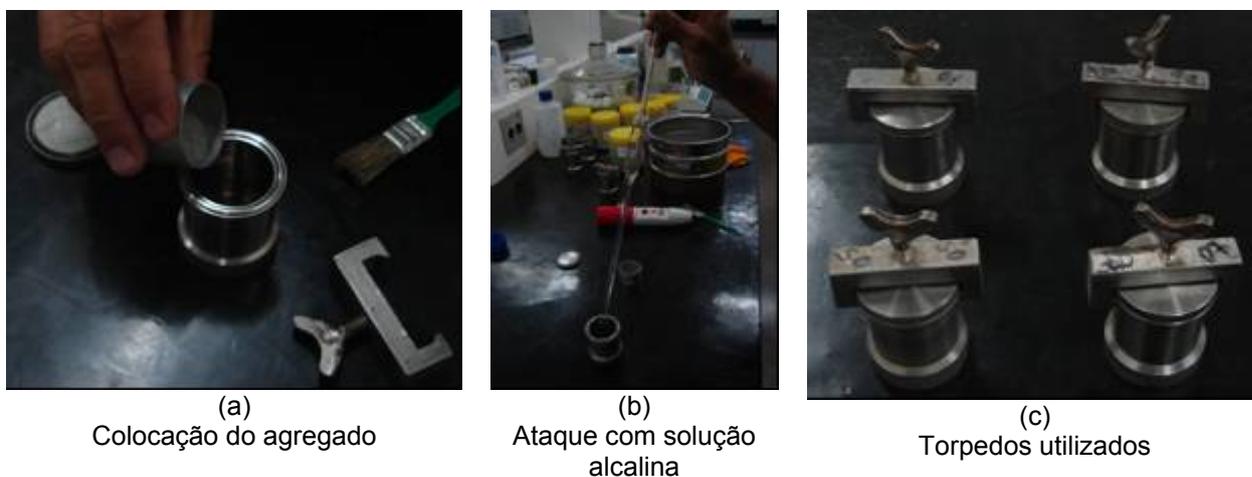


Figura 5.4 – Alguns detalhes do método químico

5.1.5 MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA

Este ensaio de expansão é um dos mais utilizados mundialmente no que se refere à RAA, pelo fato de que com este teste, é possível, em curto prazo, a análise do comportamento deletério dos agregados frente a sua reatividade potencial. Ainda se pode, por meio deste ensaio, estudar alternativas para combater uma eventual expansibilidade deletéria dos agregados (FURNAS, 1997).

Para os ensaios de reatividade potencial em barras de argamassa, fez-se uso da ASTM C-1260 (2007) para avaliar a potencialidade dos 22 agregados. Este método executa os ensaios nos mesmos moldes da nova norma brasileira (ABNT NBR 15577-4/5), que consiste em preparar três barras de argamassa (2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm), com relação a/c igual a 0,47, e uma proporção cimento:agregado de 1:2,25. Após 24 horas da moldagem, as barras são desmoldadas e curadas em água por mais 24 horas a uma temperatura de 80°C. Depois de curadas, estas são retiradas uma a uma, fazendo-se a leitura do comprimento inicial e, acondicionadas em solução aquosa de NaOH 1N, a 80°C, sendo medidos seus comprimentos diariamente até atingir idade mínima de 16 dias, segundo a ASTM C-1260, ou 30 dias, pela nova norma brasileira (ABNT NBR 15577-1/4); e suas expansões calculadas.

Com relação ao cimento utilizado neste ensaio, a ASTM C-1260 comenta que foi verificado em estudos anteriores que o seu teor de álcalis tem efeitos desprezíveis ou mínimos na expansão gerada neste ensaio, embora outros estudos contradigam este comentário (HASPARYK *et al.*, 2007), sendo a única exigência que se tenha expansão em autoclave (determinada pela ASTM C-151) inferior a 0,20%. Já o agregado deve obedecer aos limites granulométricos expostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Frações granulométricas dos agregados para o ensaio da ASTM C-1260

Material passante na peneira (#)	Material retido na peneira (#)	Porcentagem em massa (%)
4,75 mm	2,35 mm	10
2,35 mm	1,18 mm	25
1,18 mm	0,60 mm	25
0,60 mm	0,30 mm	25
0,30 mm	0,15 mm	15

No método de ensaio preconizado pela ASTM C-1260, é estabelecido que expansões superiores a 0,20% aos 16 dias em solução alcalina, o agregado é considerado reativo. Expansões entre 0,10% e 0,20% são considerados potencialmente reativos, sendo necessárias maiores informações sobre o agregado em uso a respeito do seu histórico de reatividade, além de sugerir um acompanhamento das leituras até a idade de 30 dias para decisão quanto à utilização do agregado. Por fim, expansões inferiores a 0,10%, aos 16 dias, indicam que o agregado é considerado inócuo por esta norma. Entretanto, vários pesquisadores como Hasparyk (1999) e Tiecher e Dal Molin (2006) defendem que os ensaios devem ser sempre levados aos 30 dias em função de alguns agregados apresentarem comportamento expansivo lento em função de sua mineralogia específica. Sendo assim, e em relação à norma brasileira (ABNT NBR 15577-1/4), a leitura de avaliação é feita aos 30 dias e, nesse caso, os agregados com expansões inferiores a 0,19% são consideradas potencialmente inócuas. Entretanto, quando testadas na presença de um

cimento padrão, as barras que apresentarem expansão igual ou superior a este valor são consideradas potencialmente reativas.

Já na presença de outros tipos de cimentos e/ou adições incorporadas (ABNT NBR 15577-5, equivalente à ASTM C-1567), como no estudo em questão, o limite passa a ser de 0,10% na idade de 16 dias para as duas normas supracitadas.

A Figura 5.5 exemplifica algumas etapas do método empregado.



(a)

Preparação da argamassa



(b)

Moldagem das barras



(c)

Estocagem das barras



(d)

Leitura das barras

Figura 5.5 – Alguns detalhes do método acelerado em barras de argamassa

5.1.6 MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO

No início dos anos 90, Ranc e Debray propuseram acelerar o tempo de exposição do método de ensaio preconizado pelas normas americana ASTM C-1293, canadense CSA A23.2-14A e recentemente a brasileira ABNT NBR 15577-6, para avaliação das expansões em prismas de concreto, aumentando-se a temperatura de ensaio de 38°C para 60°C, e mantendo-se constantes todas as outras variáveis (FOURNIER, *et al.* 2004).

Segundo Fournier *et al.* (2004), em estudo realizado no Canadá, entre cinco laboratórios visando a confiabilidade do método acelerado dos prismas de concreto,

comparando com a metodologia convencional a 38°C (ASTM C-1293, CSA A23.2-14A e ABNT NBR 15577-6), os autores encontraram fortes correlações entre os dois ensaios, haja vista que, pelo método acelerado, em alguns casos, já se pode diagnosticar um comportamento deletério do agregado com apenas 30 dias. Porém, os pesquisadores salientam que os ensaios devem ser acompanhados até 120 dias.

Sendo assim, a partir de uma adaptação do método de ensaio dos prismas de concreto prescritos pelas normas ASTM C-1293 (2006), CSA A23.2-14A (2000) e ABNT NBR 15577-6 (2008), este ensaio de expansão teve como objetivo no presente estudo verificar a potencialidade reativa de 3 agregados graúdos selecionados (BA.3, BA.4 e BA.7). Esta seleção se deu a partir do método acelerado em barras de argamassa, com base nos três comportamentos possíveis de ocorrer (inócuo, potencialmente reativo e reativo). É importante comentar que as normas supracitadas para concreto não apresentam diferenças expressivas em suas metodologias. Ressalta-se que o método descrito a seguir e empregado ainda não está normalizado por nenhum órgão.

Para tal, na dosagem dos concretos utilizou-se a areia padrão do IPT como agregado miúdo por apresentar expansão inferior a 0,10% aos 16 dias (Figura 5.6), sendo ensaiada previamente pela ASTM C-1260 com cimento A desta pesquisa (Anexo B)

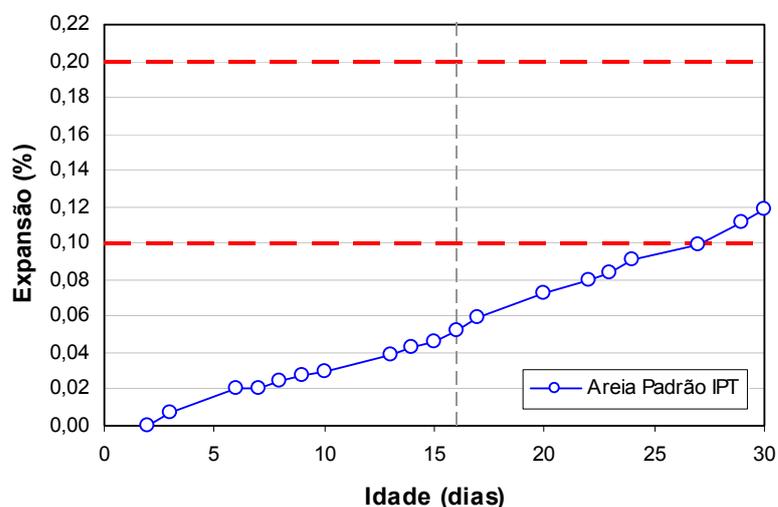


Figura 5.6 – Expansões médias da areia padrão do IPT com cimento A

Ainda sobre o agregado miúdo, as normalizações recomendam que este se apresente com módulo de finura (MF) igual a $2,7 \pm 2$. Sendo assim, atendendo ao limite prescrito, neste trabalho a areia foi composta granulometricamente para se obter um MF igual a 2,8, baseando-se também no fato da ASTM C-1293 (e na nova norma brasileira também, ABNT NBR 15577, parte 6) prescrever que o volume compactado seco do agregado graúdo deverá ser igual a $70\% \pm 0,2\%$ para a dimensão máxima característica de 19 mm, conforme a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Volume compactado seco de agregado graúdo / m³ de concreto (RODRIGUES, 1990)

MF	Dimensão Máxima (D _{máx}), mm				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

A distribuição granulométrica do agregado graúdo foi utilizada como apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Frações granulométricas do agregado graúdo para o ensaio da ASTM C-1293

Material passante na peneira (#)	Material retido na peneira (#)	Porcentagem em massa (%)
19,0 mm	12,5 mm	33
12,5 mm	9,5 mm	33
9,5 mm	4,75 mm	33

O consumo de cimento neste ensaio é fixado em 420 kg/m³ ± 10 kg/m³, devendo este possuir um equivalente alcalino de 1,25% (em massa), caso contrário, deverá ser corrigido com hidróxido de sódio, para que o concreto tenha um elevado teor alcalino de 5,25 kg/m³ para favorecer as reações. Por fim, a relação água/material cimentício deve obedecer ao limite de 0,42 a 0,45. Neste estudo adotou-se então uma relação água/cimento de 0,45.

O concreto foi preparado em um misturador mecânico (betoneira) previamente umedecido com água, sendo colocada toda a brita na condição SSS com dois terços da água de amassamento, iniciando o processo de mistura. Posteriormente, foi adicionado o agregado miúdo (também na condição SSS), o material cimentício e o restante da água de amassamento com a incorporação do hidróxido de sódio adicional necessário para a dosagem atingir o valor especificado por norma de 1,25% para o teor alcalino. O concreto foi misturado durante três minutos, seguidos de três minutos de descanso e, após o descanso, dois minutos a mais de mistura. Durante o período de descanso tomou-se o cuidado de cobrir a cuba com pano umedecido a fim de prevenir a evaporação. Foram medidos o teor de ar incorporado e a consistência do concreto, sendo no Anexo B apresentados os dados das dosagens.

Sendo assim, foram moldados e vibrados em mesa vibratória três corpos-de-prova de dimensões 75 mm x 75 mm x 285 mm, e curados em câmara úmida por 24 horas,

onde foi feita a primeira leitura de expansão, após a sua desmoldagem. Em seguida, os CP's foram colocados em recipientes com elevada umidade (maior ou igual a 95%) a 60°C, sendo acompanhadas as suas expansões até a idade de 182 dias, com leituras periódicas de duas em duas semanas. Antes de cada leitura, os corpos-de-prova foram retirados 16 ± 4 horas da condição de 60°C e levados à câmara úmida com temperatura de $23 \pm 1,7^\circ\text{C}$. Ressalta-se que estas condições nas quais foram submetidos estes corpos-de-prova, não são normalizadas, bem como o tempo de exposição, mas o método executivo foi seguido.

A Figura 5.7 exemplifica algumas etapas de execução do método.



(a)
Preparação do concreto



(b)
Verificação do teor de argamassa adequado



(c)
Abatimento do tronco de cone (*Slump test*)



(d)
Moldagem em mesa vibratória



(e)
Condição de estocagem dos CP's



(f)
Leitura das expansões

Figura 5.7 – Algumas etapas do método acelerado em prismas de concreto

Em paralelo às leituras de expansão realizadas, estes mesmos corpos-de-prova foram submetidos a ensaios ultra-sônicos pelo método direto, onde se mediu o tempo de propagação de onda ao longo de seus comprimentos (medida longitudinal), sendo então calculada a velocidade de propagação de onda, com uma frequência de vibração de onda de 54 kHz, segundo a ABNT NBR 8802/1994 (similar à ASTM C-597). Também foi acompanhada a variação de massa dos CP's a fim de monitorar o comportamento dos concretos e correlacionar com seus estados de alteração. A Figura 5.8 exemplifica algumas etapas de execução das leituras ultra-sônicas.



Figura 5.8 – Alguns detalhes do ensaio de ultra-som em prismas de concreto

5.1.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) tem sido essencial na análise microestrutural de concretos, argamassas e pastas de cimento, sendo o primeiro trabalho no Brasil apresentando a utilização desta técnica no estudo da RAA, data de 1988, quando Kihara e Zampieri confirmaram a presença desta reação na Barragem de Abastecimento de Joanes II (VEIGA *et al.*, 1997).

O princípio de funcionamento do microscópio eletrônico varredura se dá quando a um feixe de elétrons incide sobre a amostra, partindo de um filamento de tungstênio, origina diversos sinais como: elétrons secundários (SE), elétrons retroespalhados (BSE), raios X e outros sinais, coletados independentemente. Estes sinais possibilitam diferentes modos de observação ou microanálise da amostra. (PADILHA; AMBRÓSIO FILHO, 1985; KESTENBACH; BOTTA FILHO, 1989; RAMACHANDRAN; BEAUDOIN, 2001).

Para cumprir os objetivos propostos neste trabalho, fez-se uso apenas do detector de elétrons secundários para a formação topográfica das imagens, levando ao reconhecimento dos produtos de reação pela sua morfologia. Para confirmação da

morfologia foi utilizado o espectrômetro por energia dispersiva de raios X (EDS), em conjunto com o MEV, apresentando de forma qualitativa e semi-quantitativa a composição química dos produtos (PADILHA; AMBRÓSIO FILHO, 1985; SARKAR, AIMIN, JANA, 2001).

Para as observações em MEV e microanálise por EDS, realizadas em um equipamento da marca LEICA, modelo S440i, foram selecionadas as amostras de mesma litologia com variações de comprimento (expansões) distintas no ensaio acelerado em barras de argamassa com o cimento A.

Sendo assim, as amostras foram previamente submetidas a uma análise visual, com lupa estereoscópica a fim de identificar os pontos de interesse, onde foram retirados fragmentos do centro das barras de argamassa, que ficaram em imersão em acetona e posteriormente armazenadas em dessecador contendo sílica gel em seu interior, a fim de paralisar as reações de hidratação do cimento e retirar toda umidade da amostra, para então receber uma névoa de ouro (metalização) cobrindo toda sua superfície, encerrando dessa forma a preparação da amostra.

A Figura 5.9 apresenta o equipamento utilizado para execução das análises por MEV.



Figura 5.9 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado na pesquisa

Capítulo 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA

A seguir, serão apresentados os resultados das análises realizadas nas lâminas delgadas, avaliadas sob microscopia ótica de luz transmitida, nas amostras de rochas estudadas. Paralelamente às análises petrográficas, foram realizadas difrações de raios X de forma a identificar a presença de argilominerais expansivos principalmente nos basaltos, além de facilitar a identificação dos minerais pela petrografia. Estas análises bem como as micrografias encontram-se no Anexo C.

6.1.1 BASALTOS

Os basaltos são caracterizados pela presença de feldspatos, piroxênios e minerais opacos disseminados em uma matriz vítrea comumente chamada de “vidro vulcânico”. No entanto, apenas pela análise petrográfica é difícil de se quantificar e até identificar materiais microcristalinos presentes na matriz vítrea. Devido a isto, é comum encontrar na literatura o termo mesóstase vítrea ao se referir ao vidro vulcânico.

Dentre as amostras estudadas, foi constatado que estas são rochas muito coerentes e são, tratando-se de basaltos de composição toleítica (sem a presença do mineral olivina) de coloração variando de cinza até negra, estrutura maciça e textura porfírica devido à presença de fenocristais (cristais grandes) dispersos numa massa vítrea ou de granulação fina.

No entanto, as amostras BA.3, BA.6 e BA.7 apresentam texturas granulares. O feldspato presente é o plagioclásio, que ocorre sob forma de finas ripas alongadas com terminações irregulares, onde alguns se encontram alterados (saussuritizados) para todas as amostras. O principal piroxênio é o hiperstênio, que é encontrado sob a forma de cristais irregulares.

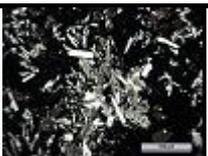
Além das texturas porfírica e granular, também é encontrada, com exceção da amostra BA.7, a textura intersertal que é caracterizada pela presença de vidro vulcânico rico

em ferro, minerais opacos, argilominerais e clorofeíta verde, produto da devitificação do vidro por intemperismo (exceto nas amostras BA.6 e BA.7).

Com relação à amostra BA.7, esta se encontra no limiar entre rochas basálticas e gabros, fato que justifica a ausência da mesóstase vítrea e granulação média, com grãos variando de 1 mm a 5 mm, diferente das demais amostras que possuem granulação fina com grãos menores que 1 mm. Ainda sobre esta amostra, foi encontrado nos interstícios dos grãos o intercrescimento de feldspato alcalino e quartzo microgranular, sendo este último um indicador para o desencadeamento da RAA.

Sendo assim, todas as amostras analisadas pela petrografia foram classificadas como potencialmente reativas pela presença do vidro vulcânico, argilominerais, clorofeíta ou até mesmo do quartzo microgranular como no caso da amostra BA.7. Na Tabela 6.1 são listadas as principais características dos basaltos analisados.

Tabela 6.1 – Características gerais dos basaltos

Amostra	Material intersticial (%)		Feldspato		Piroxênio		Minerais opacos (%)	Imagem
	Matriz vítrea	*CF / AM	Quant. (%)	Tamanho (mm)	Quant. (%)	Tamanho (mm)		
BA.1	20	15	40	0,2 a 0,8	25	0,1	-	
BA.2	20	10	55	0,2	15	0,1	-	
BA.3	15	7	40	0,2 a 0,8	35	0,1 a 0,4	3 (0,2 mm)	
BA.4	3	5	65	0,2 a 0,4	25	0,4 a 0,8	2 (1,0 mm a 0,4 mm)	
BA.5	7	3	40	0,1 a 0,2	40	0,3 a 0,6	10 (0,2 mm)	
BA.6	37	-	40	0,5	20	0,1	3 (0,2 mm)	
BA.7	Intercrescimento de quartzo microgranular e k-feldspato: 10%		58	1,0	30	4,0	2 (1,0 mm)	

* CF / AM – Clorofeíta / Argilominerais

6.1.2 GRANITOS

As cinco amostras de granitos avaliadas são compostas, essencialmente, por feldspatos (alcalinos em maior quantidade que os plagioclásios) e quartzo, sendo estes freqüentemente associados a outros minerais como as micas (biotita e muscovita) e outros minerais de menor importância do ponto de vista da RAA.

De uma forma geral, as amostras de rochas estudadas apresentam coloração cinza claro tendendo a rósea e estrutura maciça (GR.1, GR.3, GR.4) e foliada (GR.2, GR.5). A maioria dos minerais encontrados apresenta granulação média à grossa (GR.3) suficiente para serem identificados macroscopicamente, caracterizando uma textura granular. Também foi averiguada a existência de uma matriz mais fina envolvendo os cristais mais desenvolvidos, sugerindo uma possível deformação nas rochas, de caráter tectônico.

Os plagioclásios encontram-se bem desenvolvidos contendo cristais irregulares com algumas germinações e saussuritizados. O feldspato alcalino, mais abundante, mostra uma incipiente alteração para sericita (mineral semelhante à muscovita) e carbonato. Além disso, observou-se que em algumas amostras são encontrados feldspatos com texturas potencialmente reativas como mirmequítica (intercrescimento de plagioclásio e quartzo em forma de bastões) e pertita em chamuscas (por indicar deformação da rocha). Por fim, o quartzo ocorre em cristais irregulares tendendo a poligonização sugerindo uma recristalização da rocha, sendo comum a presença de extinção ondulante, em maior ou menor incidência.

Embora a análise petrográfica tenha identificado a presença de quartzo deformado com extinção ondulante maior que 30° na amostra GR.1, estes estão presentes em pequenas quantidades, bem como a textura de pertita em chamuscas dos feldspatos. No granito GR.2 observa-se a presença de grãos de quartzo com extinção ondulante de alto grau gerando sub-grãos e cristalização de novos grãos (microgranular), porém em quantidades inferiores a 5%. A amostra GR.3 é a que se encontra com a menor concentração de quartzo, sendo estes pouco deformados. Na amostra GR.4, embora apresente deformação menor que 15° , há a presença de sub-grãos com angulação maior que 30° originados de grãos maiores devido a elevada extinção ondulante. Com relação à amostra GR.5, esta apresenta uma matriz fina rica em quartzo, porém com poucos cristais com extinção ondulante.

Sendo assim, pela análise petrográfica, apenas as amostras GR.1 e GR.5 são consideradas potencialmente inócuas, já as demais potencialmente reativas, fazendo uso das considerações da nova norma ABNT NBR 15577-3 (2008). A Tabela 6.2 resume as principais características dos granitos estudados.

Tabela 6.2 – Características gerais dos granitos

Amostra	Quartzo		Extinção ondulante	Outros	Observações	Imagem
	Quant. (%)	Tamanho (mm)				
GR.1	30	0,3 a 1,2	> 30°	K-Feldspato: 40% (1,2 mm) Plagioclásio: 10% (1,0 mm) Biotita: 10% (1,2 mm) Muscovita: 7% (1,5 mm) Opacos: 1% Epidoto e titanita: 2%	Pequena quantidade de quartzo com E.O. Feldspatos com textura em chamas.	
GR.2	40	0,2 a 2,5	> 30°	K-Feldspato: 35% (2,5 mm) Plagioclásio: 10% (0,8 mm) Biotita: 10% (0,7 mm) Muscovita: 5% (0,5 mm) Epidoto: traços	Feldspatos com textura em chamas e mirmequítica; quartzo microgranular (< 5%).	
GR.3	25	0,1 a 3,0	15° a 30°	K-Feldspato: 35% (8 mm a 10 mm) Plagioclásio: 20% (8 mm a 10 mm) Biotita: 20% (1,0 mm a 1,5 mm)	Feldspatos com textura em chamas e mirmequítica.	
GR.4	30	0,8 a 3,0	< 15°	K-Feldspato: 40% (2 mm) Plagioclásio: 25% (0,8 mm) Biotita, Muscovita e clorita: 5% (0,5 mm)	Presença de subgrãos de quartzo com extinção ondulante maior que 30°.	
GR.5	32	0,8 a 1,0	< 15°	K-Feldspato: 34% (6 mm) Plagioclásio: 22% (4 mm) Biotita: 12% (0,5 mm) Muscovita: traços	Feldspatos com textura em chamas e mirmequítica.	

A fim de simplificar algumas análises que serão apresentadas a seguir quando se discutir os resultados dos outros métodos de ensaio, foi criado o grupo de rocha denominado “granitóides”, composto por fases mineralógicas semelhantes entre si, assim como suas fases reativas: presença de quartzo com extinção ondulante e microgranular e feldspatos com textura em chamas e mirmequítica. Estas rochas pertencentes ao grupo das granitóides são os granitos (GR.1, GR.2, GR.3, GR.4 e GR.5), o granodiorito (GD.1) e o milonito (ML.1) utilizados nesta pesquisa.

6.1.3 GRANODIORITO

Como o próprio nome sugere, o granodiorito é uma rocha plutônica que se encontra no limiar entre os granitos e os dioritos. De uma forma geral, o que difere esta rocha de seus dois extremos é a quantidade de plagioclásio em relação aos feldspatos alcalinos, que comumente são encontrados na razão de 65% a 90%.

Esta rocha apresenta coloração cinza escura com faixas esbranquiçadas, estrutura maciça e textura granular com granulação fina, ou seja, com grãos menores que 1 mm. O feldspato plagioclásio, mais abundante, ocorre em cristais irregulares e levemente

alterados para sericita (saussuritizados), já o feldspato alcalino ocorre em quantidade e cristais menores. O quartzo ocorre em cristais irregulares e a minoria tendendo a poligonização, com pontos triplíceis de junções, sugerindo uma recristalização da rocha; a maioria apresenta extinção ondulante de alto ângulo (ângulo maior que 25°). A biotita ocorre em lamelas alongadas, bem desenvolvidas e em finas palhetas, algumas estão levemente cloritizadas. O anfibólio (hornblenda) apresenta-se em prismas com terminações irregulares e alguns cristais apresentam suas clivagens características, encontra-se, geralmente, associado à biotita e opacos.

A amostra é classificada como potencialmente reativa em função da presença do quartzo tensionado com altos valores de extinção ondulante. As principais características desta rocha encontram-se expostas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Característica geral do granodiorito

Amostra	Quartzo			Outros	Observações	Imagem
	Quant. (%)	Tamanho (mm)	Extinção ondulante			
GD.1	30	0,4 a 2,0	> 30°	Plagioclásio: 35% (0,8 mm) Biotita: 15% (0,8 mm) Anfibólio: 10% (1,0 mm) K-Feldspato: 8% (0,5 mm) Opacos: 2% (0,3 mm)		

6.1.4 MILONITO

Esta rocha, derivada de algum granito que sofreu o processo de metamorfismo dinâmico, processo este discutido no Capítulo 2, apresenta coloração cinza com faixas claras com grãos variando de 1 mm a 5 mm, característicos de uma granulação média e textura milonítica. Sua estrutura foliada é marcada pelas finas camadas de micas e quartzo/feldspatos estirados segundo a leve orientação mineral. O feldspato principal é o plagioclásio que ocorre sob a forma de cristais irregulares, normalmente saussuritizados (alteração para sericita). Em alguns cristais de feldspatos encontram-se as texturas gráfica, em chamas e vermicular, que são oriundas da rocha granítica original. O quartzo ocorre sob a forma de grandes cristais, às vezes com contornos serrilhados, ou formando agregados microcristalinos recristalizados, com grãos estirados, segundo a foliação da rocha ou tendendo à poligonização. Estes cristais apresentam extinção ondulante com ângulo superior a 30°. A biotita e a muscovita ocorrem associadas e sob a forma de finas palhetas alongadas. Algumas biotitas estão cloritizadas. Os minerais opacos ocorrem como cristais irregulares associados à biotita.

Devido à forte deformação do quartzo e apresentando uma quantidade maior que 15% de microgrãos e extinção ondulante com ângulo maior que 30°, esta rocha foi classificada como potencialmente reativa, sendo suas principais características encontradas e listadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Característica geral do milonito

Amostra	Quartzo			Outros	Observações	Imagem
	Quant. (%)	Tamanho (mm)	Extinção ondulante			
ML.1	30	0,01 a 1,0	> 30°	K-Feldspato: 26% (0,4 mm a 2,0mm) Plagioclásio: 23% (0,3 mm a 1,5 mm) Biotita e muscovita: 15% (0,6 mm) Opacos: 3% (1 mm)	Feldspatos com textura em chamás e mirmequítica; quartzo microgranular (> 15%)	

6.1.5 QUARTZO-XISTOS

Nos quartzos-xistos estudados, as deformações tectônicas são evidentes, além da xistosidade, pela presença de mica *fish*¹⁵, dobras e sombras de pressão. Pelo que se pode observar das relações texturais e dos minerais presentes, sugerem que as rochas foram originadas por processos metamórficos, sobre sedimentos pelíticos (silte e argila) e arenosos.

As amostras de rocha apresentam coloração cinza com manchas esbranquiçadas ou verdes. Possuem estrutura xistosa, granulação fina (> 1 mm), com exceção da amostra QX.2, que possui granulação média (5 mm a 1 mm) e textura granolepidoblástica por apresentarem uma orientação das micas (biotita e muscovita).

Estas são compostas, basicamente, pelos minerais quartzo, biotita, muscovita, clorita, granada e feldspatos em maior ou menor quantidade. No quartzo, devido a sua forte deformação gerando grãos microgranulares, seu ângulo de extinção ondulante só foi possível de ser medido em alguns grãos, pois não se consegue evidenciar o começo e término do cristal com precisão, sendo este maior que 30°, com exceção das amostras QX.1 e QX.5, que apresentaram extinção ondulante menor que 15°. Ainda sobre o quartzo, este apresenta cristais irregulares a alongados com tendência a poligonização, com pontos tríplexes, que é indício de recristalização da rocha e uma potencialidade em promover RAS.

A biotita ocorre em lamelas alongadas orientadas segundo uma direção preferencial, onde define a foliação da rocha, algumas estão cloritizadas (associação ou até mesmo alteração da biotita em clorita). Tanto a muscovita quanto a clorita ocorrem como a biotita, em finas palhetas. A granada ocorre principalmente nas faixas micáceas

¹⁵ Micas estiradas por deformações tectônicas em formato que lembra um peixe.

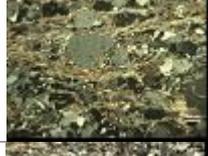
apresentando sombras de pressão e fraturadas com inclusões de quartzo, além de algumas estarem rotacionadas. Os feldspatos alcalinos estão presentes associadas às faixas quartzosas. Os demais minerais como: opacos, piroxênio, epidoto, plagioclásio, cianita e cloritóide (fase de alteração da clorita) ocorrem disseminados nas lâminas.

Todas as amostras são classificadas como potencialmente reativas pela presença representativa de quartzo com extinção ondulante e microgranular, característicos do processo metamórfico (regional ou dinamotermal) deste tipo de rocha, onde estas são sujeitas a ações combinadas de pressões e temperaturas elevadas por centenas a milhares de anos.

Dentre as seis rochas estudadas, a amostra QX.1 foi classificada como Biotita quartzo-xisto, as amostras QX.2, QX.3 e QX.6 como Granada biotita quartzo-xisto e por fim, as amostras QX.4 e QX.5 como Muscovita biotita quartzo-xisto.

Na Tabela 6.5 estão resumidas as principais características das amostras estudadas.

Tabela 6.5 – Características gerais dos quartzo-xistos

Amostra	Quartzo			Outros	Observações	Imagem
	Quant. (%)	Tamanho (mm)	Extinção ondulante			
QX.1	45	0,02 a 1,2	< 15°	Biotita: 30% (0,2 mm a 1,0 mm) Clorita: 10% (0,3 mm) Muscovita: 5% (0,3 mm) Granada: 5% (1,0 mm) K-feldspato: 3% (0,3mm a 0,7 mm) Cloritóide: 2% (0,4 mm)	Quartzo microgranular (5% a 15%)	
QX.2	50	0,1 a 2,0	> 30°	Biotita: 25% (0,7 mm) Clorita: 10% (0,4 mm) Granada: 10% (1,0 mm) Muscovita: 5% (0,4 mm) Plagioclásio: traços	Quartzo microgranular (< 5%)	
QX.3	45	0,1 a 1,5	> 30°	Biotita: 20% (0,4 mm) Muscovita: 15% (0,4 mm) Clorita: 10% (0,4 mm) Granada: 10% (3,5 mm) Plagioclásio e k-feldspato: 5% (0,4 mm)		
QX.4	40	0,1 a 1,5	> 30°	Biotita: 30% (0,4 mm) Muscovita: 20% (0,4 mm) Granada: 5% (3,2 mm) Clorita: 3% (0,2 mm) K-feldspato: 2% (0,6 mm)	Quartzo microgranular (< 5%)	
QX.5	40	0,01 a 0,8	< 15°	Biotita: 20% (0,7 mm) Muscovita: 20% (0,4 mm) Piroxênio, opacos e epidoto: 4% (0,4 mm)	Quartzo microgranular (5% a 15%)	
QX.6	35	0,01 a 1,2	> 30°	K-feldspato: 22% (0,6 mm) Biotita: 20% (0,3 mm) Muscovita: 15% (0,3 mm) Granada: 5% (1,0 mm) Cianita: 3%	Quartzo microgranular (> 15%)	

6.1.6 QUARTZITOS

As duas amostras de rochas analisadas são muito parecidas, formadas quase que exclusivamente de quartzo, que somados as suas relações texturais indicam que as amostras foram derivadas do metamorfismo sobre sedimentos arenosos (arcosianos), o que é característico dos quartzitos, de uma forma geral.

Possuem granulação fina com grãos menores que 1 mm, textura granoblástica e nítida foliação metamórfica, definida pela orientação preferencial dos cristais alongados (lâminares) de muscovita e dos cristais estirados de quartzo tensionados. Os cristais de quartzo apresentam extinção ondulante freqüente, porém apenas alguns cristais permitiram a leitura do ângulo de extinção devido sua forte alteração; nesses cristais medidos, o ângulo é maior que 30°. A muscovita ocorre sob a forma de finas palhetas orientadas entre os cristais de quartzo ou englobadas pelo mesmo, indicando que houve um intercrescimento dos dois minerais ou crescimento do quartzo que englobou a mica. Minerais opacos ocorrem disseminados por toda a rocha e a maioria encontra-se alinhado segundo a orientação preferencial da rocha.

Em função da forte deformação do quartzo, que é encontrado na forma de microgrãos e com valores altos de extinção ondulante, os dois quartzitos são classificados como potencialmente reativos.

Tabela 6.6 – Características gerais dos quartzitos

Amostra	Quartzo			Outros	Observações	Imagem
	Quant. (%)	Tamanho (mm)	Extinção ondulante			
QZ.1	90	0,01 a 0,2	> 30°	Muscovita: 10% (0,1 mm) Opacos: traços	Quartzo microgranular (> 15%)	
QZ.2	90	0,01 a 0,2	> 30°	Muscovita: 10% (0,1 mm) Opacos: traços	Quartzo microgranular (> 15%)	

6.2 ANÁLISE DE SEÇÃO POLIDA

A fim de identificar sulfetos que possam alterar, reagir com a pasta e mascarar as expansões causadas pela RAA, foram confeccionadas seções polidas de todas as amostras, observadas por microscopia ótica por luz refletida, e não foi encontrado em praticamente nenhuma delas qualquer tipo de sulfeto (Anexo D); ou seja, em todas as

amostras analisadas, quando encontrados, a quantidade de sulfetos foi muito menor do que 0,05%. Também foi observada em algumas amostras avaliadas a presença de óxidos e hidróxido de ferro, óxidos ferro e titânio e minerais transparentes (silicatos).

6.3 MÉTODO QUÍMICO

Os resultados médios (a partir dos triplicados) de sílica dissolvida (Sd) e de redução da alcalinidade (Ra) obtidos pelo método químico para os diversos agregados testados estão apresentados na Tabela 6.7. No Anexo E são apresentados os resultados individuais de cada amostra.

Tabela 6.7 – Média dos resultados obtidos no método químico

Amostra	Sd (mmoles/l)	Ra (mmoles/l)
BA.1	76,3	235,9
BA.2	110,8	269,4
BA.3	48,8	259,5
BA.4	138,1	161,8
BA.5	72,9	194,4
BA.6	104,8	333,7
BA.7	16,1	104,8
GD.1	10,1	13,1
GR.1	17,2	12,9
GR.2	21,4	43,7
GR.3	12,3	31,6
GR.4	10,3	38,0
GR.5	19,2	90,1
ML.1	18,8	34,4
QX.1	10,3	31,1
QX.2	9,2	52,4
QX.3	11,7	23,0
QX.4	13,4	24,8
QX.5	12,5	13,8
QX.6	21,2	53,0
QZ.1	64,2	27,2
QZ.2	85,2	27,9

A Figura 6.1 apresenta as médias dos resultados do ensaio químico identificando o comportamento deletério dos agregados avaliados conforme limites prescritos pela ABNT NBR 9774/87. Após a conclusão dos ensaios, verificou-se que apenas as amostra QZ.1 e QZ.2 foram avaliadas como deletérias quanto à sua reatividade com os álcalis presentes no concreto por este método. Já as demais amostras foram classificadas como inócuas.

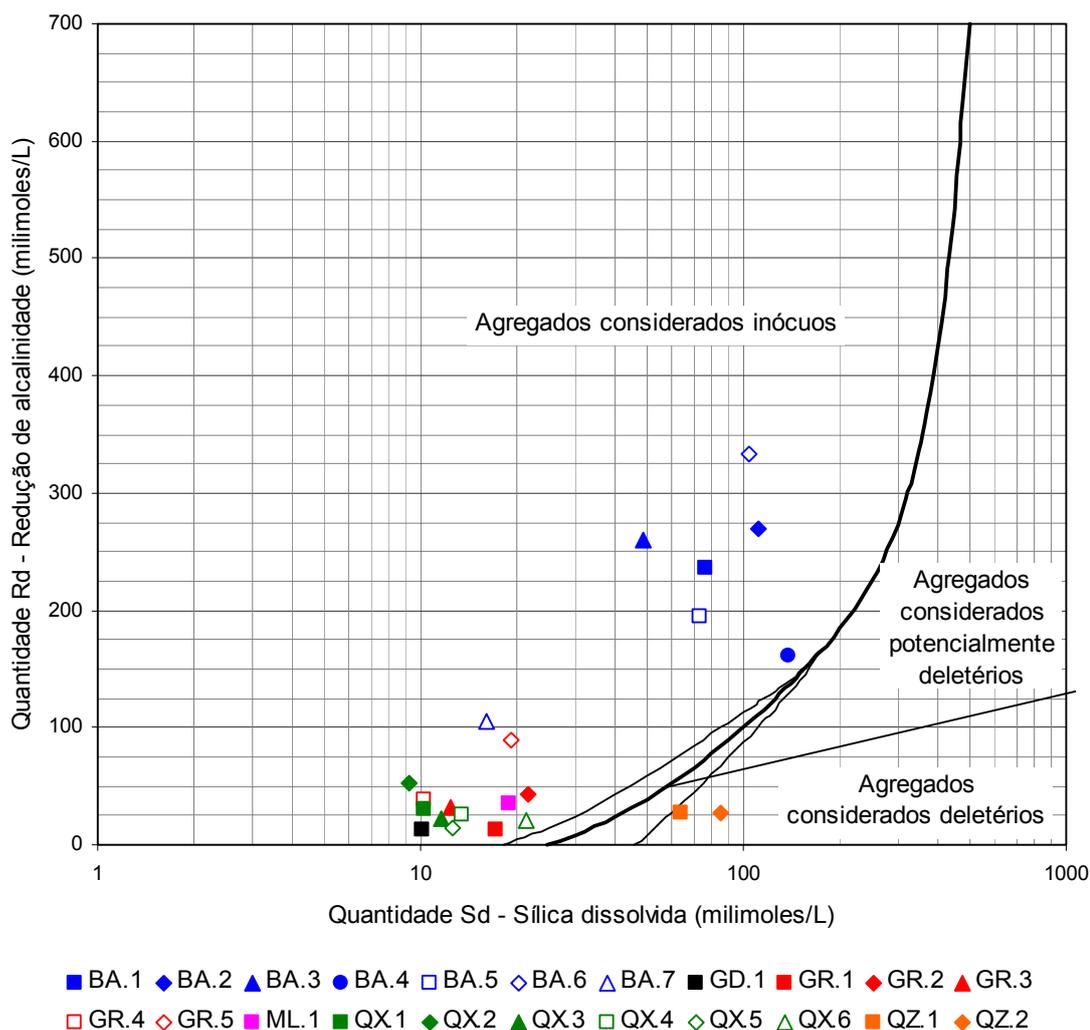


Figura 6.1 – Média dos resultados obtidos no método químico

Ressalta-se que houve uma separação visível dos grupos de rochas. Os basaltos, de uma forma geral, apresentam elevados valores de sílica dissolvida e de redução da alcalinidade em relação aos demais, devido à grande disponibilidade de sílica (amorfa, na sua maioria) ou de clorofeita/argilominerais presentes no material intersetal. Já no outro extremo encontram-se as rochas granitóides e os quartzo-xistos, que se destacam por apresentar menores valores tanto de sílica dissolvida como de redução de alcalinidade. Os quartzitos apresentaram valores de redução da alcalinidade na mesma grandeza que as rochas granitóides e os quartzo-xistos, embora os valores de sílica dissolvida sejam maiores, na mesma grandeza que os basaltos, podendo este comportamento ser justificado por sua mineralogia, onde os quartzitos apresentam 90% de quartzo refletindo também em uma porcentagem elevada de sílica.

Estes grupos de rochas são coerentes com as complexidades dos minerais e suas transformações para a formação das rochas. Nos basaltos, a estrutura da sílica, de uma forma geral, se encontra desorganizada devido a sua rápida solidificação causada pelo

extravasamento do magma (vulcanismo), fato que justifica valores de sílica dissolvida elevados. No entanto, quando a solidificação do magma acontece lentamente, no interior do manto, a sílica se organiza estruturalmente formando uma rede atômica estruturada, como no caso dos granitos, fazendo com que diminuam os valores de sílica dissolvida quando comparados aos basaltos. E, por fim, quando sedimentos arenosos compostos por minerais silicosos sofrem o processo de metamorfismo regional, gerando rochas do tipo quartzo-xisto, estas apresentam minerais silicosos geralmente mais complexos que os de formação granítica, fazendo entender os menores valores de sílica dissolvida de todos os grupos. Contudo, devido a subjetividade da análise petrográfica, não se conseguiu achar até o momento uma relação direta entre os fatores mineralógicos que possam diferenciar estas amostras dentro de seus grupos.

De acordo com a Figura 6.2, são apresentados os valores médios dos resultados obtidos para os litotipos e, paralelamente, foi feita uma análise de variância (ANOVA) a fim de confirmar a significância dos grupos observados, e o teste de *Duncan*, para distinguir os grupos através da comparação múltipla de médias. O resultado foi confirmado, onde para os valores de sílica dissolvida, as amostras dos basaltos e quartzitos são estatisticamente iguais, assim como as rochas granitóides e quartzo-xistos. Já para valores de redução da alcalinidade, os basaltos se mostraram isolados num grupo e as rochas granitóides, quartzo-xistos e quartzitos em outro grupo.

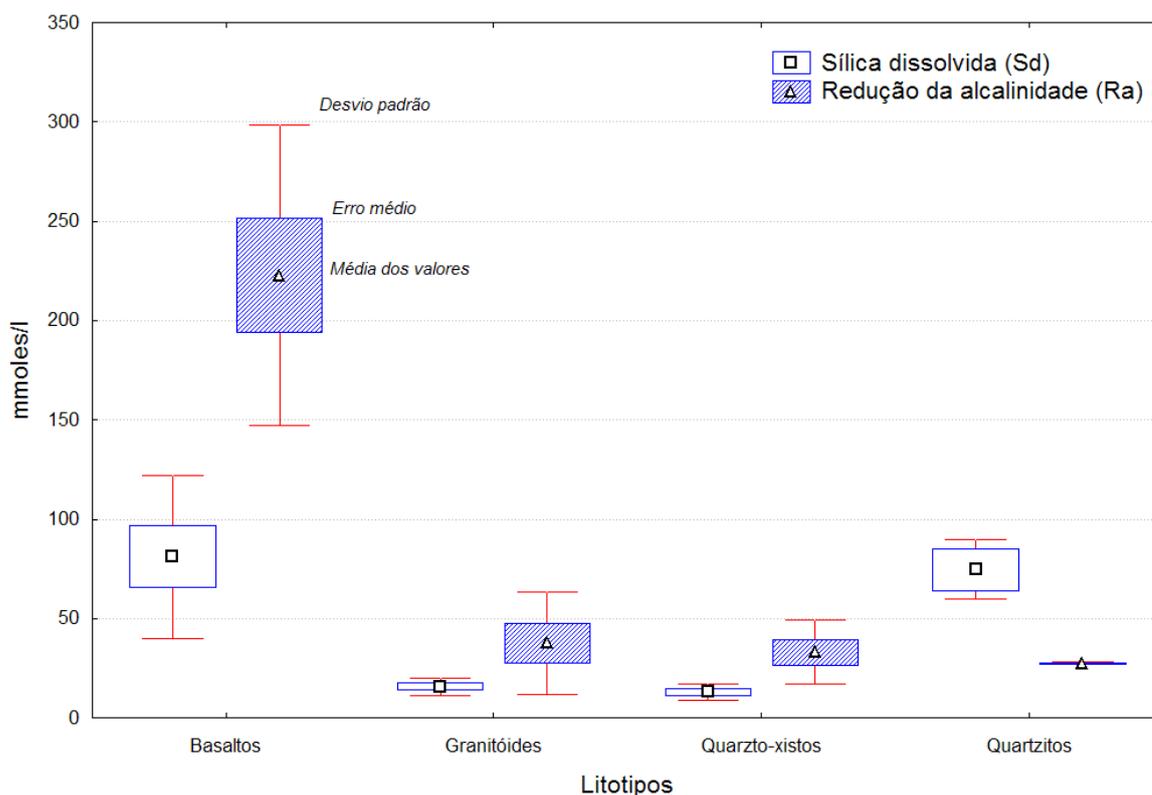


Figura 6.2 – Média dos resultados obtidos no método químico em função dos litotipos

6.4 MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA

A seguir, são apresentados os comportamentos expansivos médios dos corpos-de-prova de argamassa preparados com os agregados em estudo, sendo que os resultados individuais encontram-se apresentados no Anexo F. Salienta-se que nenhuma das barras de argamassa, tanto as confeccionadas com cimento A quanto com o cimento B, apresentaram fissuras ou sinais de deterioração até a idade de 30 dias, quando os experimentos cessaram, apenas um ligeiro empenamento em algumas barras, como se pode verificar pela Figura 6.3.

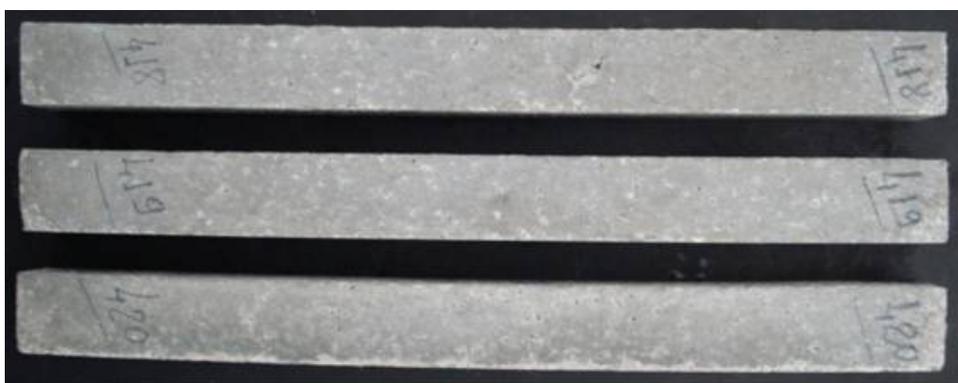


Figura 6.3 – Aspecto final das barras de argamassa moldadas com a amostra QZ.2 e cimento A

Nas Figuras 6.4 a 6.7 são apresentados os resultados de expansão média em barras de argamassa para o cimento A ensaiadas com os vinte e dois agregados desta pesquisa. Em todos os gráficos existem duas linhas vermelhas tracejadas (0,10% e 0,20%) que são referentes aos limites preconizados pela ASTM C 1260 e ABNT NBR 15577 (pela norma brasileira somente a linha de 0,10%, que representa o limite para considerar o agregado potencialmente reativo aos 16 dias).

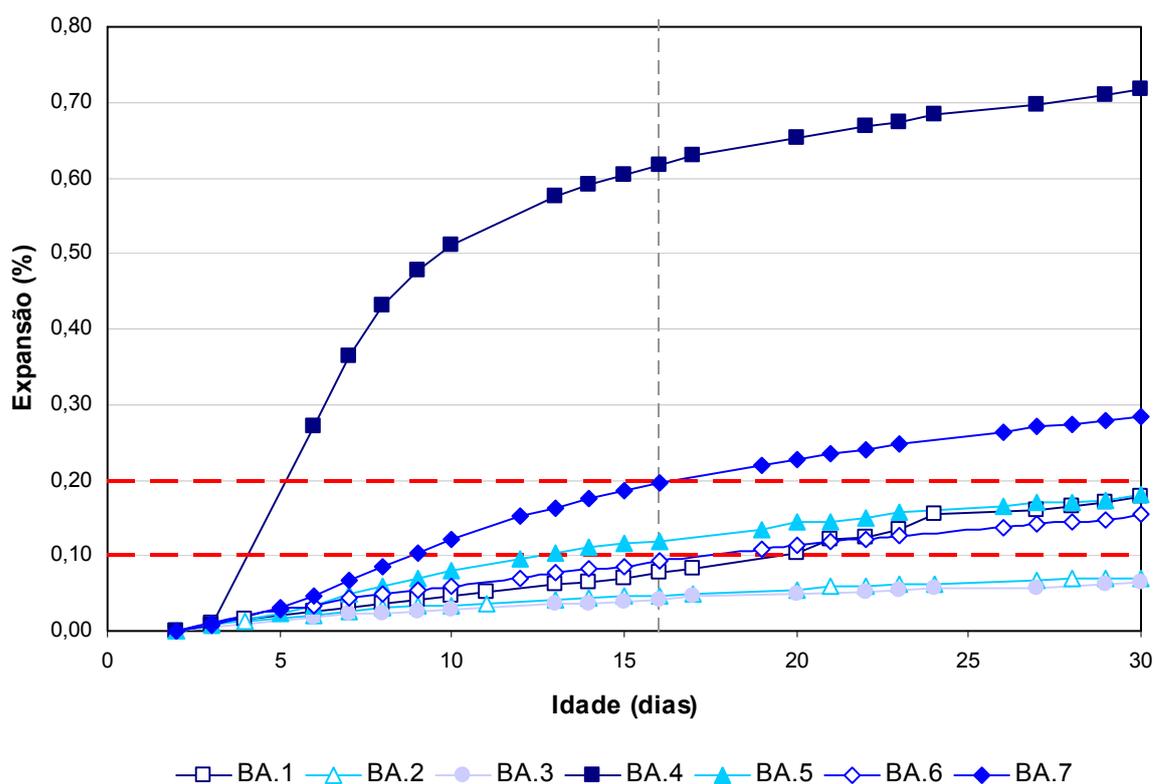


Figura 6.4 – Expansões médias dos basaltos com cimento A

Na Figura 6.4, observa-se a rápida evolução das expansões da amostra BA.4, que já aos 16 dias apresentou um comportamento extremamente deletério (0,62%) pela interpretação da norma americana, e chegando a expansão de 0,72% aos 30 dias de ensaio. Com taxas de evolução mais modestas, as amostras BA.5 e BA.7 apresentaram expansões aos 16 dias entre 0,10% e 0,20%, sendo que aos 30 dias a amostra BA.7 foi classificada como reativa (0,28%) e a BA.5 como potencialmente reativa (0,18%). Por fim, as amostras BA.1, BA.2, BA.3 e BA.6 apresentaram expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias, sendo então classificadas como inócuas.

Já pela interpretação da norma brasileira, que para cimentos com adições de qualquer espécie avalia o potencial reativo de agregados como potencialmente reativos para valores iguais ou maiores que 0,10% aos 16 dias e potencialmente inócuos para valores inferiores a 0,10%, onde as amostras BA.1, BA.2, BA.3 e BA.6 foram classificadas como potencialmente inócuas e as amostras BA.4, BA.5 e BA.7 como potencialmente reativas.

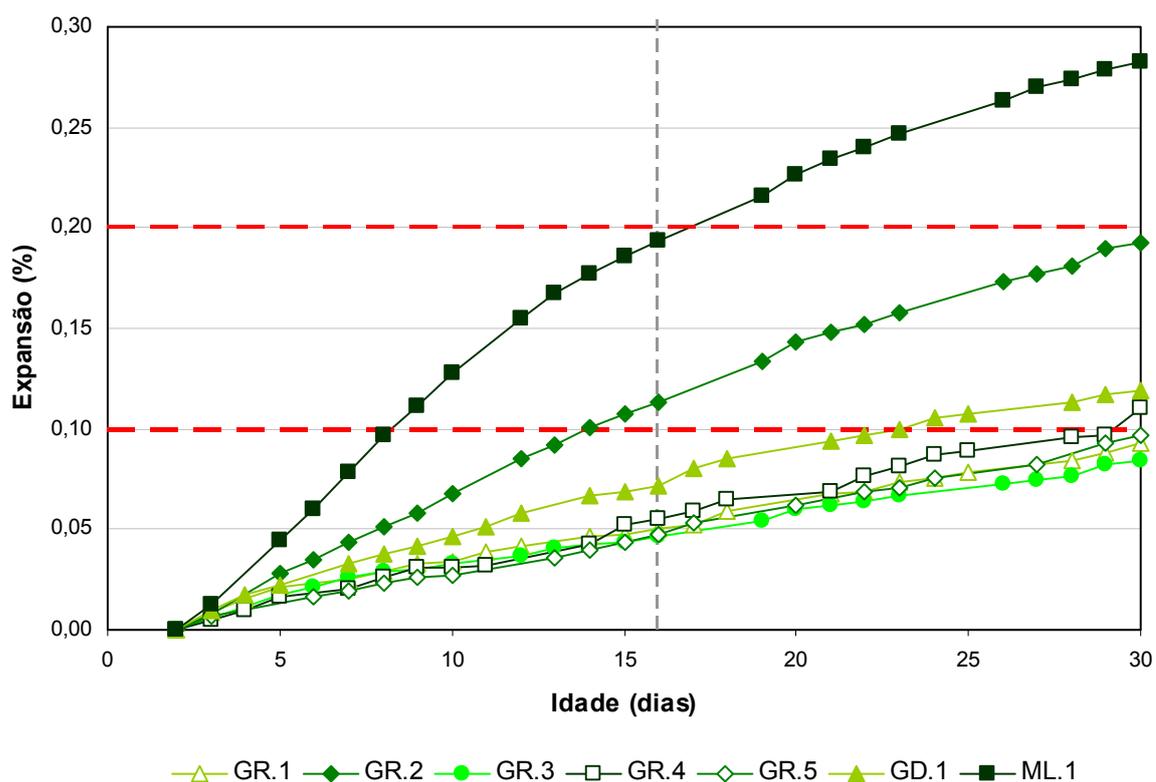


Figura 6.5 – Expansões médias das rochas granitóides com cimento A

De acordo com a Figura 6.5, que apresenta a potencialidade reativa do grupo das rochas granitóides, foi constatado que pela interpretação da ASTM C 1260, apenas o ML.1 foi considerado como reativo, embora tenha atingido 0,19% de expansão aos 16 dias, chegou ao patamar de 0,28% aos 30 dias de ensaio. Já o GR.2 apresentou expansões de 0,11% e 0,19% aos 16 e 30 dias de ensaio, respectivamente, sendo classificado com potencialmente reativo pela ABNT NBR 15577, apenas. As demais amostras, GR.1, GR.3, GR.4, GR.5 e GD.1 foram classificadas como inócuas.

Ao se avaliar pela ABNT NBR 15577, as amostras ML.1 e GR.2 foram consideradas potencialmente reativas e as amostras GR.1, GR.3, GR.4, GR.5 e GD.1 como potencialmente inócuas.

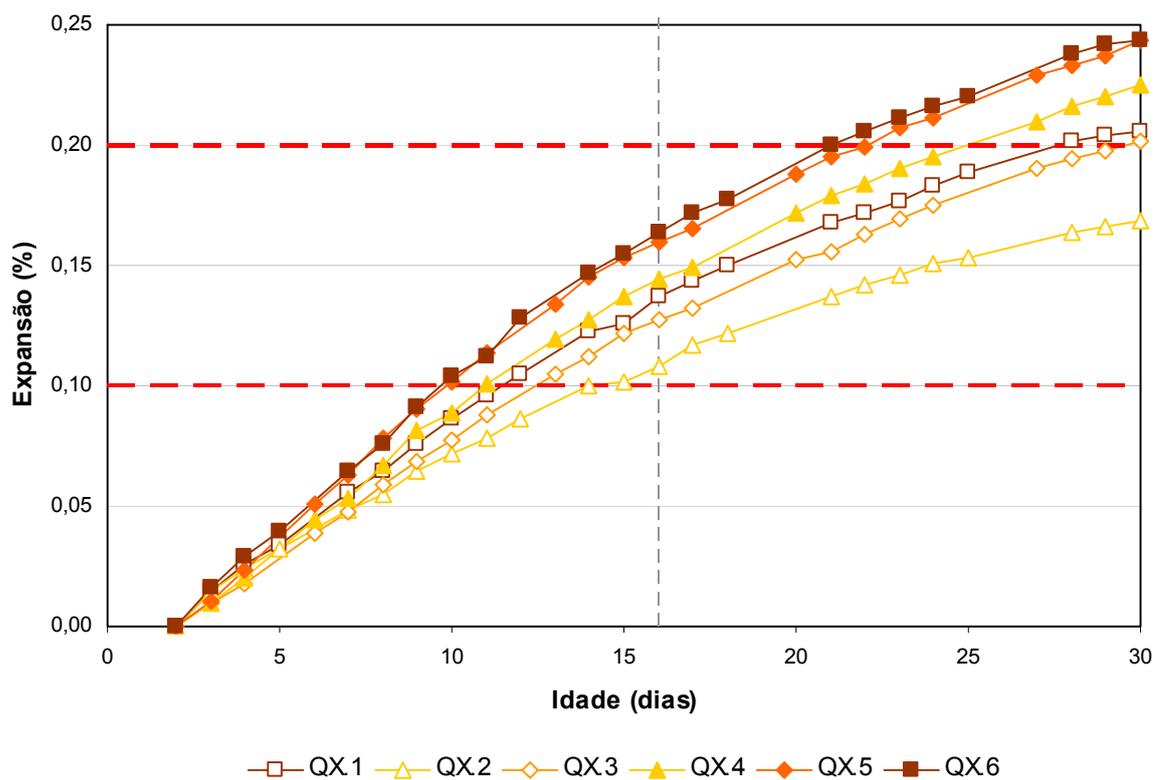


Figura 6.6 – Expansões médias dos quartzo-xistos com cimento A

Observando-se a Figura 6.6, nota-se que todas as amostras apresentaram expansões superiores aos 0,10% aos 16 dias, porém apenas a amostra QX.2 foi classificada como potencialmente reativa por apresentar expansão de 0,17% aos 30 dias. Já as amostras QX.1, QX.3, QX.4, QX.5 e QX.6 foram classificadas como reativas, pois suas expansões aos 30 dias de ensaio são superiores a 0,20%, pelos limites da normalização americana.

Já pela normalização brasileira, todas as amostras foram classificadas como potencialmente reativas uma vez que apresentam expansões superiores a 0,10% aos 16 dias.

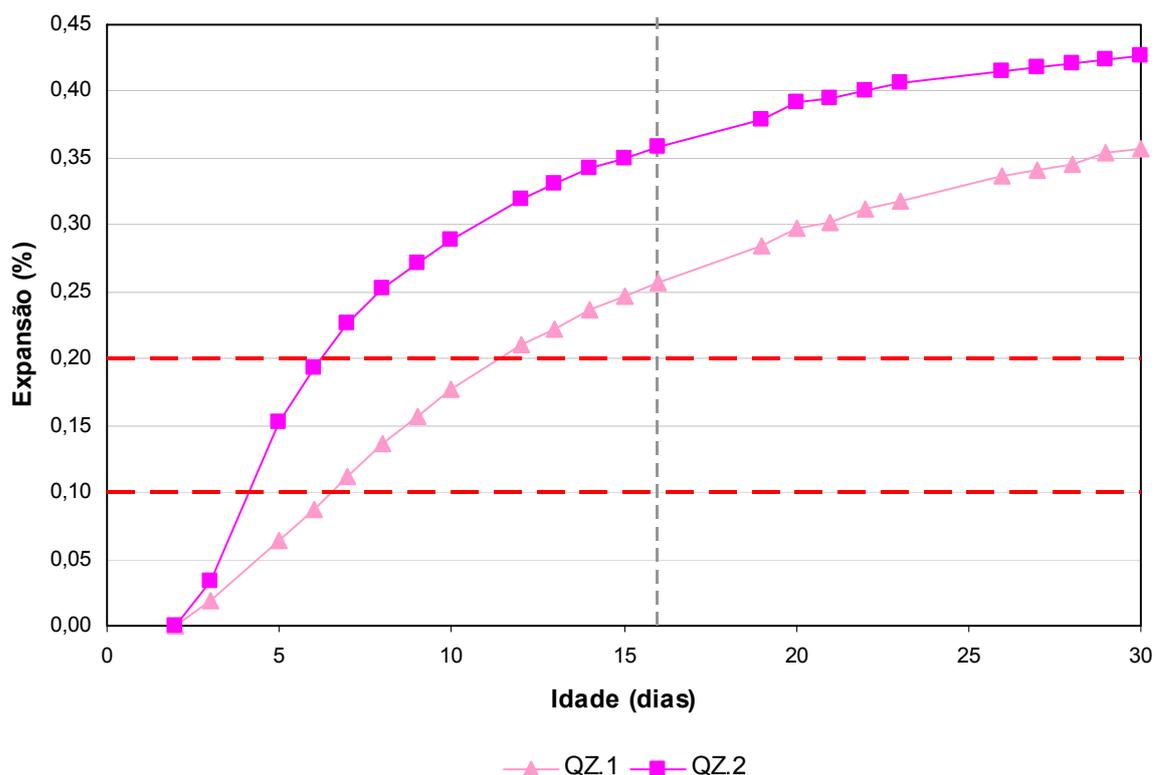


Figura 6.7 – Expansões médias dos quartzitos com cimento A

Por fim, as duas rochas quartzíticas, QZ.1 e QZ.2, foram classificadas como reativas pela ASTM C 1260 e potencialmente reativas pela avaliação da ABNT NBR 15577, sendo seus valores de expansão de 0,26% e 0,37% aos 16 dias e 0,36% e 0,43% aos 30 dias, respectivamente, como observado na Figura 6.7.

Agrupando todos os resultados de expansão por litotipos, de acordo com a Figura 6.8, de uma forma geral os quartzitos apresentam maiores valores médios de expansão tanto para as idades de 16 quanto as de 30 dias, seguidos dos basaltos, quartzo-xistos e das rochas granitóides. No entanto, observa-se que os basaltos apresentaram maiores amplitudes dos desvios padrões do que as demais rochas, mostrando que existem basaltos dos mais diversos tipos de comportamento reativo. Em outro extremo se encontram os quartzo-xistos, que apresentaram valores de expansões próximos entre as rochas componentes de seus respectivos grupos, com desvio padrão relativamente baixos.

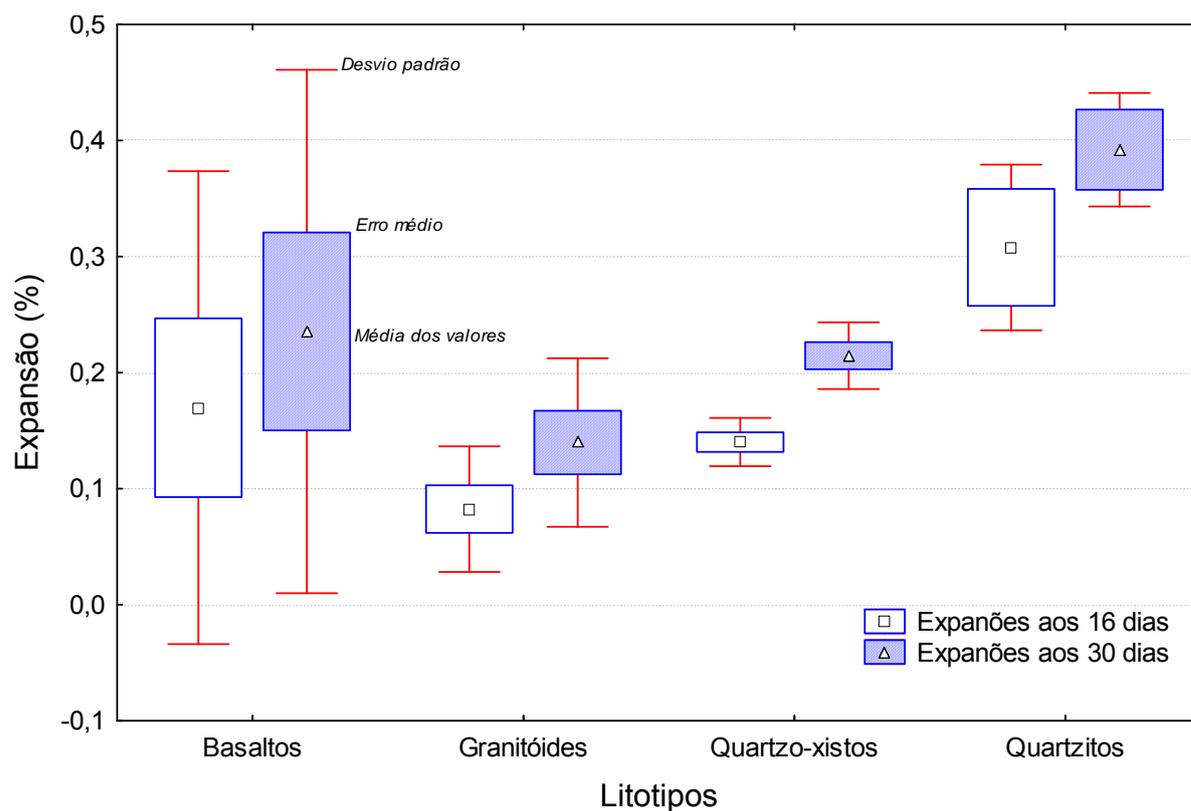


Figura 6.8 – Média dos resultados obtidos no método acelerado em barras de argamassa em função dos litotipos – Cimento A

Nas Figuras 6.9 a 6.12 estão expostos os resultados médios dos mesmos agregados ensaiados com o cimento A, porém, agora, com o emprego do cimento B pozolânico, a fim de promover a mitigação das reações expansivas do cimento com os agregados testados. A linha horizontal tracejada em vermelho é referente ao limite adotado (0,10%) pelas normas americana (ASTM C 1260) e brasileira (ABNT NBR 15577). Embora os limites sejam aplicados para a idade de 16 dias, os ensaios perduram até os 30 dias de idade de forma a conhecer melhor o comportamento dos agregados em idades mais avançadas.

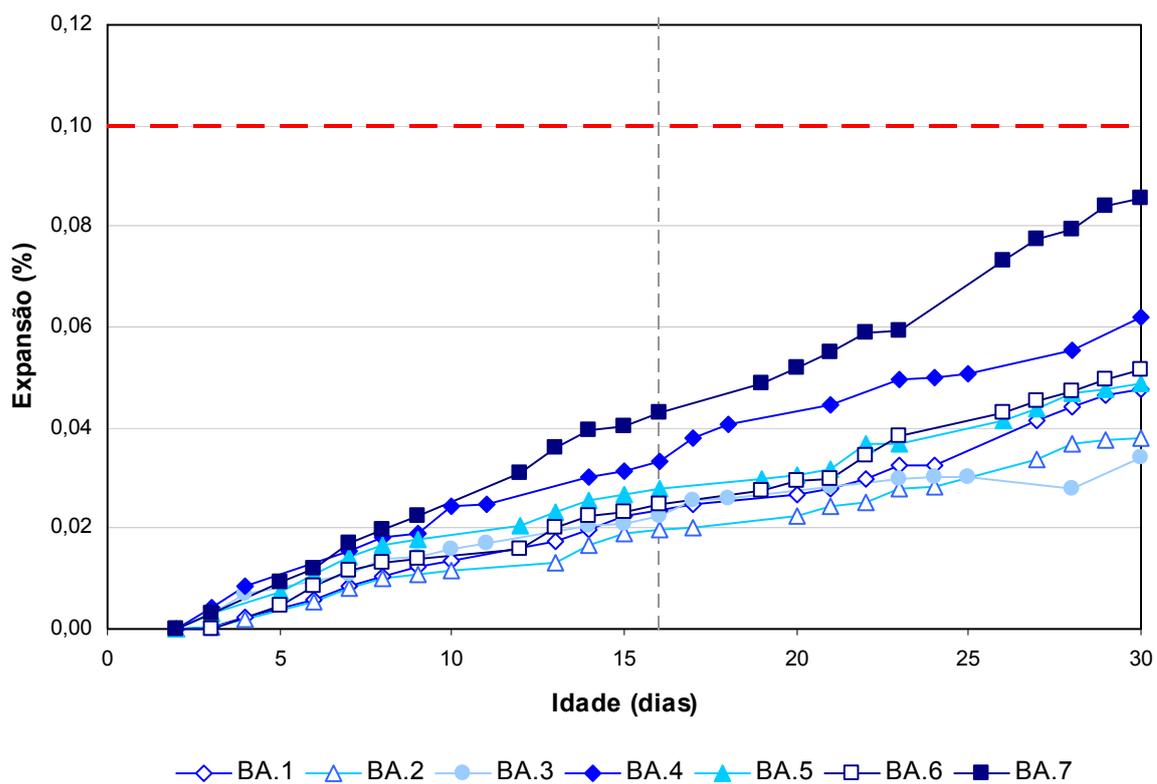


Figura 6.9 – Expansões médias dos basaltos com cimento B

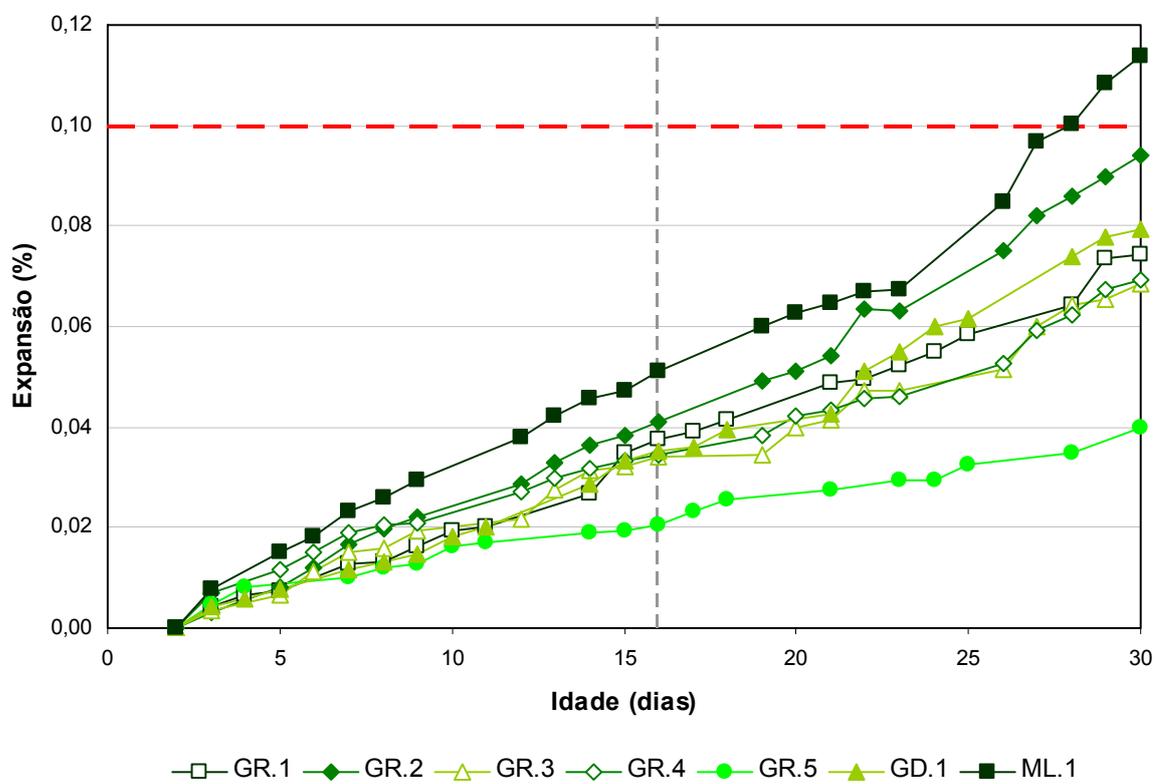


Figura 6.10 – Expansões médias das rochas granitóides com cimento B

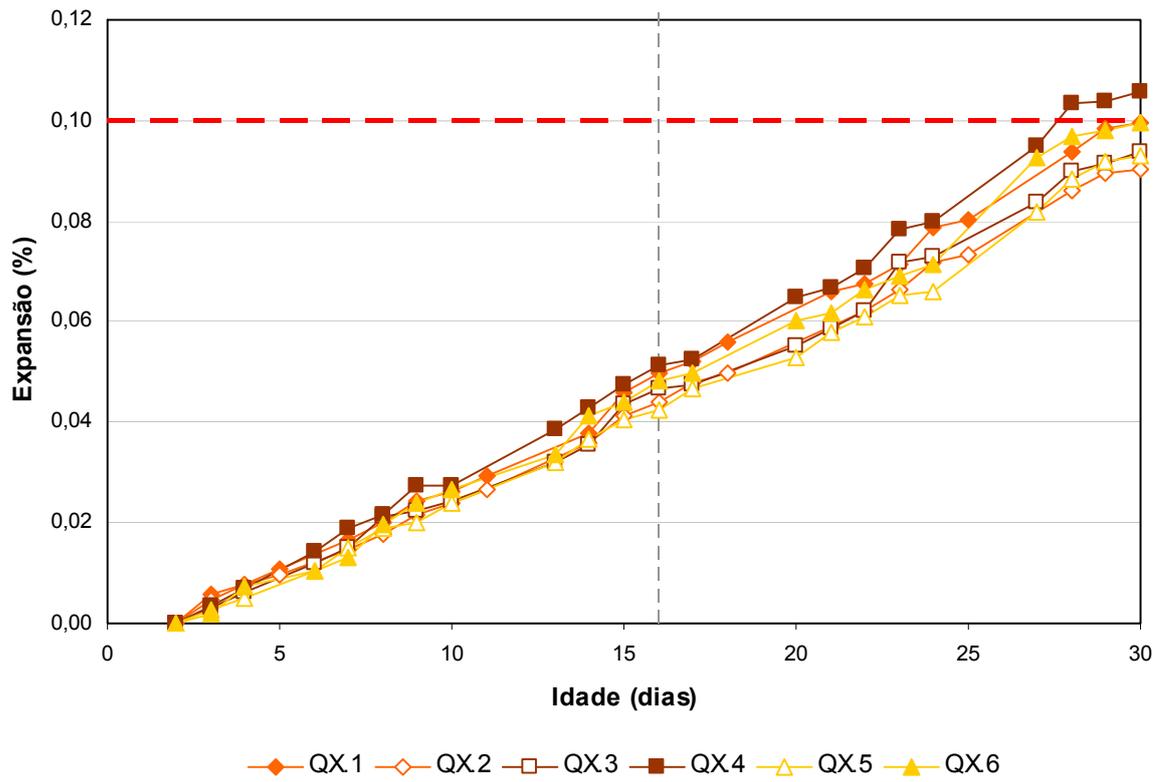


Figura 6.11 – Expansões médias dos quartzos-xistos com cimento B

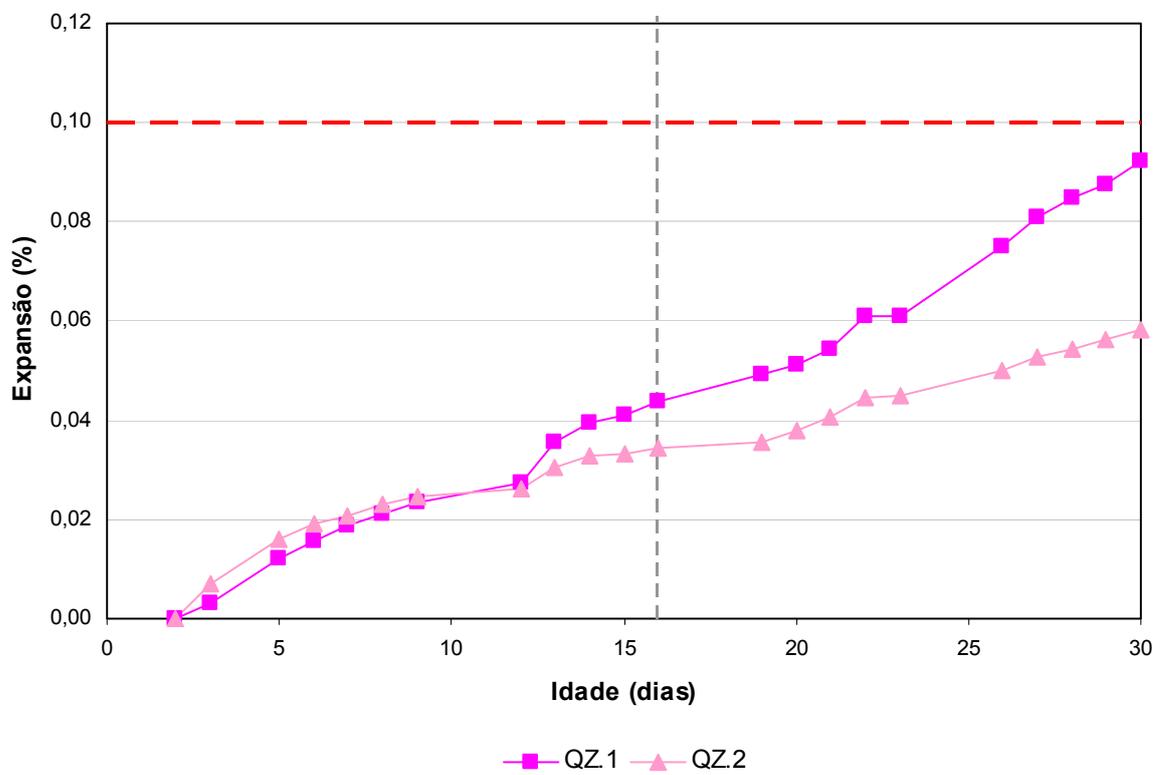


Figura 6.12 – Expansões médias dos quartzitos com cimento B

De acordo com os dados expostos nos gráficos das Figuras 6.9 a 6.12, observa-se que todos os agregados apresentaram expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias, sendo, portanto, todas as amostras classificadas como inócuas pela normalização americana (ASTM C 1260) e que o cimento B foi capaz de mitigar a reação pela interpretação da normalização brasileira (ABNT NBR 15577).

Analogamente, a análise feita com o cimento A, de uma forma geral, para os resultados de expansão realizados com o cimento B, os quartzo-xistos foram as amostras que apresentaram maiores valores médios de expansão tanto para as idade de 16 quanto para as de 30 dias, seguido dos quartzitos e rochas granitóides, estas com praticamente a mesma média e, por fim, os basaltos. Assim como com o cimento A, os quartzo-xistos foram os litotipos que apresentaram menores amplitudes de expansão para as duas idades avaliadas, ao contrário das demais. A Figura 6.13 registra estas considerações.

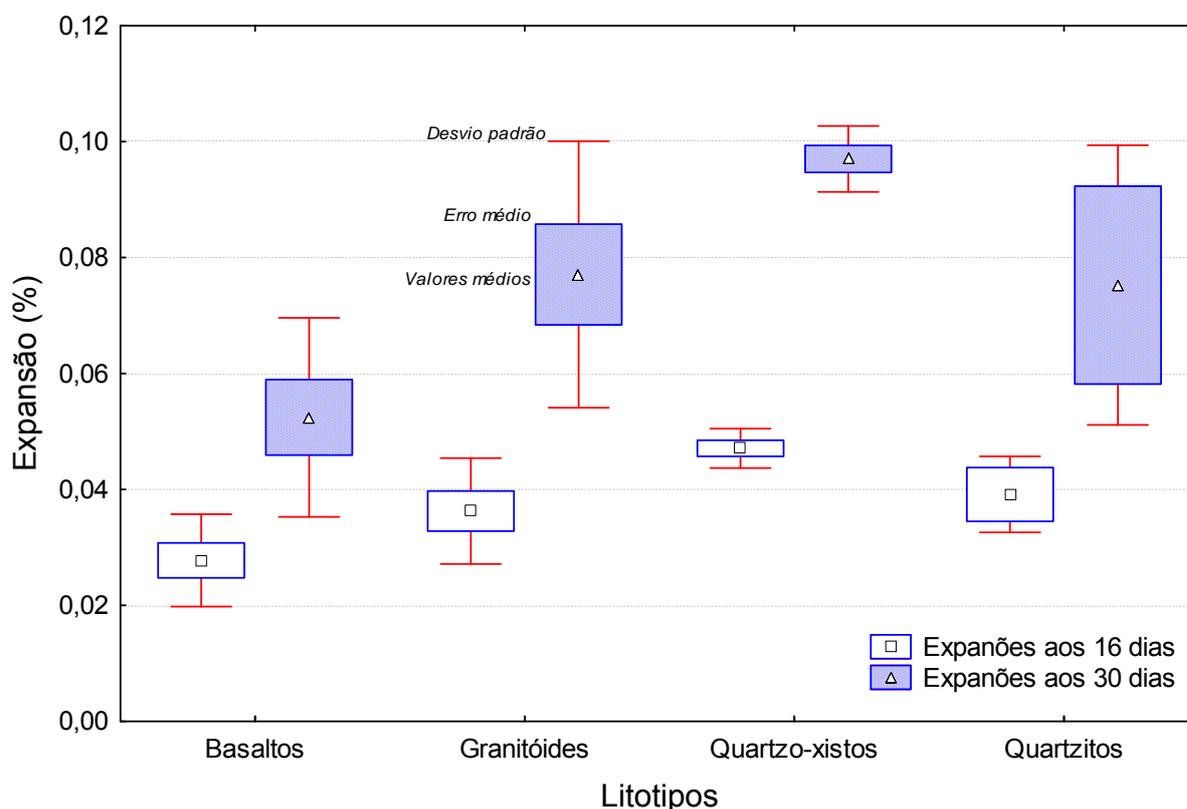


Figura 6.13 – Média dos resultados obtidos no método acelerado em barras de argamassa em função dos litotipos – Cimento B

Conforme já apresentado, o cimento B se mostrou eficaz no combate das reações expansivas causadoras da RAA em todos os agregados, contudo, nas Figuras 6.8 e 6.13 ficam claros os comportamentos dos grupos litológicos estudados quanto à mitigação das reações expansivas, ao se avaliar as expansões nas idades de 16 e 30 dias. Nota-se que o cimento B em combinação com os basaltos, de uma forma geral, tem um

desempenho superior do que quando combinado aos demais litotipos. Acredita-se que como parte dos álcalis disponíveis do ensaio já haviam sido consumidos por reações pozolânicas, devido ao percentual de adições minerais do cimento B, o restante tenha reagido logo nas primeiras idades com a sílica amorfa do agregado, onde haviam condições da matriz absorver as deformações expansivas. Isto se dá em função do processo de formação das rochas vulcânicas, que ocorre por cristalização brusca dos minerais gerando uma matriz vítrea, amorfa na maioria das vezes. Entretanto, não foi possível achar uma correlação quantitativa dos percentuais apenas pelos métodos utilizados neste trabalho, pois não se tem precisão do grau de amorficidade da matriz.

Já o cimento B na presença dos quartzo-xistos demonstrou outro grupo isolado de menor eficiência em relação aos demais na presença do cimento B, porém, de qualquer forma, eficaz no combate da RAA, em função provavelmente da presença de um elevado percentual de quartzo deformado indicado pela petrografia. Por desencadear reações envolvendo silicatos, que possuem estruturas atômicas mais complexas do que as da sílica amorfa (matriz vítrea dos basaltos), as reações se dão mais lentamente.

Por fim, para os grupos das rochas granitóides e dos quartzitos, o desempenho do cimento B no combate das reações expansivas encontra-se em uma posição intermediária ao observado para os basaltos e os quartzo-xistos. Para as rochas granitóides, este comportamento também pode ser explicado pela origem de formação das rochas, por se tratarem de rochas ígneas plutônicas (a exceção do milonito, que é de origem metamórfica), onde a cristalização dos minerais se deu mais lentamente em tempo suficiente para formação total ou parcial de produtos cristalinos. Outro fato está ligado à intensidade de deformação dos grãos, que não foi tão intensa quanto ao processo metamórfico de formação dos xistos já relatado. Com relação aos quartzitos, embora sejam formados por estruturas silicosas complexas, como grande quantidade de quartzo deformado e microgranular, comparadas com a massa vítrea dos basaltos, estas são menos complexas que os quartzo-xistos.

É interessante ressaltar que, de uma maneira geral, conforme se pode averiguar pela Figura 6.14, há uma tendência das amostras que apresentaram maiores expansões tanto aos 16 quanto aos 30 dias com o cimento A, em terem melhores resultados mitigadores quando na presença do cimento B, embora o valor da eficiência na mitigação calculado tenha uma pequena variação quando comparado para as idades de 16 para 30 dias, conforme se pode observar.

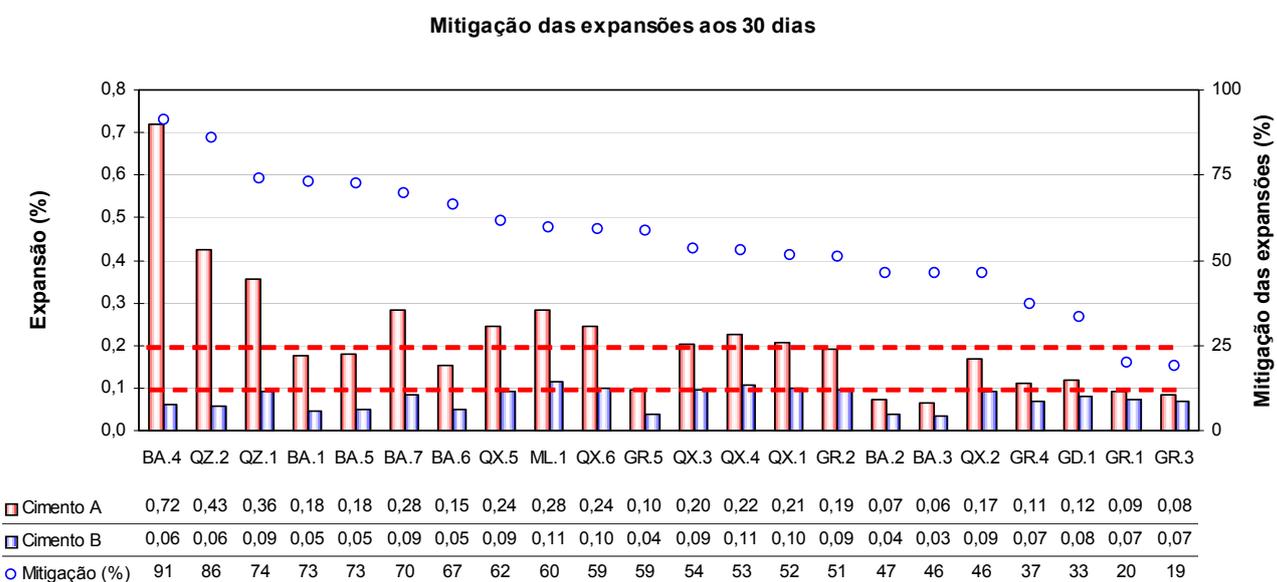
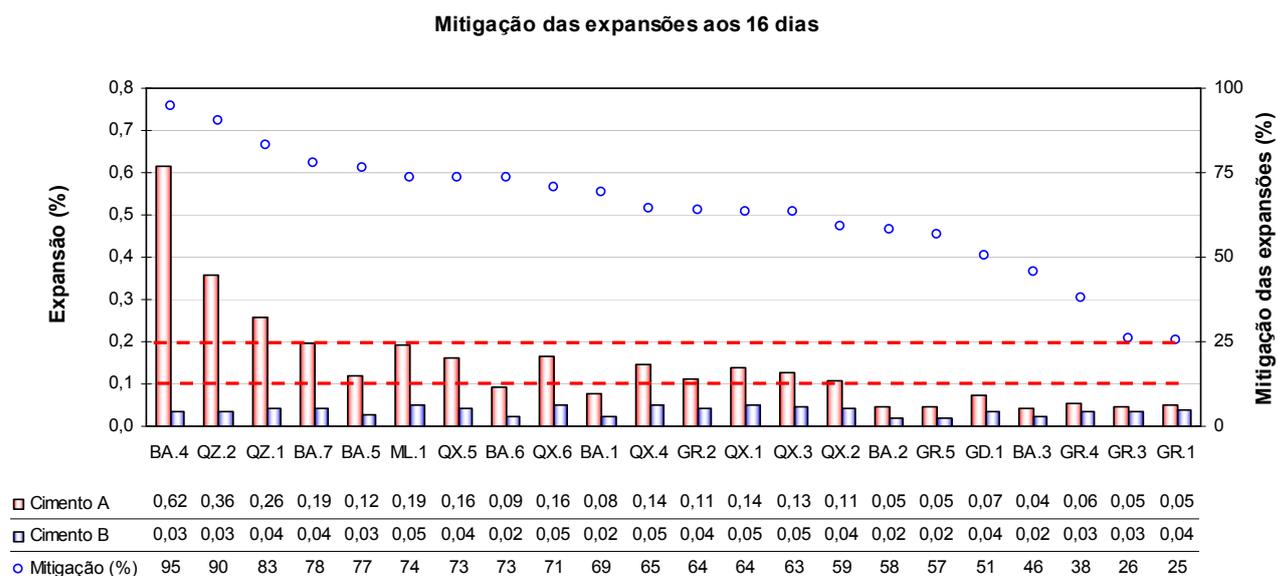


Figura 6.14 – Mitigação das expansões aos 16 e 30 dias

Fato que não passa despercebido, diz respeito ao crescimento das expansões de 16 para 30 dias, que apresentaram uma forte correlação, como pode ser visualizado pela Figura 6.15, onde se pode notar duas linhas vermelhas tracejadas como sendo o intervalo de confiança em que 95% das expansões médias calculadas estão dentro do intervalo estatístico definido. De acordo com a equação linear representativa de todos os tipos de agregados estudados ($r^2 = 0,98$), uma amostra com expansão de 0,10% aos 16 dias teria uma expansão aos 30 dias de 0,16%, bem inferior aos 0,20% e 0,19% propostos pela ASTM-C1260 e pela ABNT NBR 15577-1, respectivamente, sendo estes valores válidos para o cimento A testado. Isto demonstra certa lentidão no desenvolvimento das reações expansivas dos agregados testados neste estudo, coincidindo com os resultados apresentados por Tiecher e Dal Molin (2006) e Hasparyk *et al.* (2008). Portanto, cuidados

devem ser tomados ao avaliar apenas os limites, devendo-se sempre conhecer o tipo de agregado, a sua mineralogia, bem como o seu comportamento expansivo ao longo do tempo aliado à taxa de crescimento das expansões, de forma a prever a sua potencialidade para reagir no tempo, dependendo das condições de exposição na qual a estrutura de concreto estará submetida.

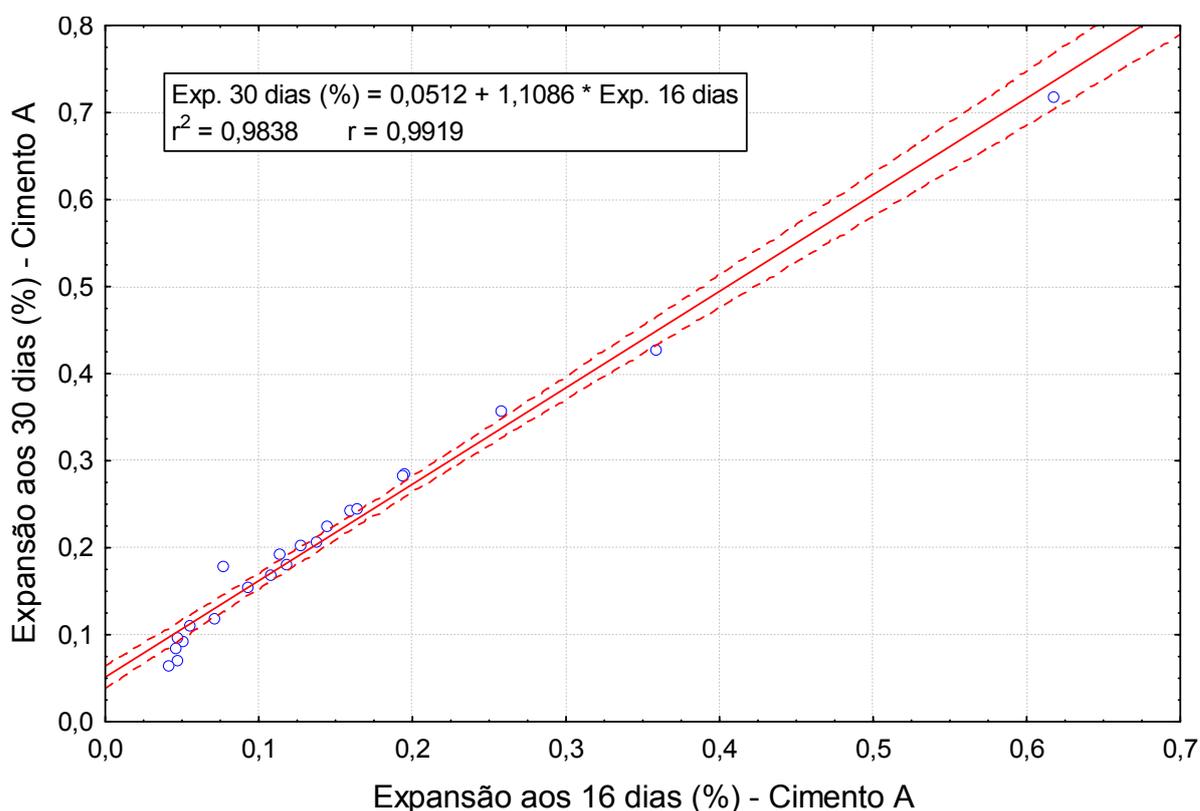


Figura 6.15 – Modelo ajustado para as amostras analisadas e intervalo de confiança

Contudo, tanto para os ensaios executados com os dois tipos de cimento, não foi observada uma correlação quantitativa ou até mesma qualitativa entre a mineralogia identificada em cada amostra pelas análises petrográficas e os resultados de expansão. Para Dolar-Mantuani (1981) e Lindgård e Haugen (2000), esta incompatibilidade entre os métodos se deve pela subjetividade da análise petrográfica, que se limita pela experiência e objetividade do petrógrafo. Monteiro *et al.* (2001) ressaltam que, exceto pelo tamanho dos grãos, informações quantitativas das características das rochas são limitadas. Por fim, Leemann e Holzer (2005) afirmam que a análise petrográfica apenas deve ser utilizada para qualificar um agregado quanto ao seu potencial para desenvolver RAA, quando conhecidas as reatividades dos correspondentes litológicos e minerais.

Outro ponto importante comentado por Hasparyk *et al.* (2008) diz respeito à confiabilidade dos limites utilizados pela avaliação dos ensaios de expansão, pois algumas das vezes podem apresentar resultados “falso negativos”, como foi observado em um dos

agregados de Recife, com valores abaixo do limite de norma, e causando problemas em blocos de fundação (ANDRADE *et al.*, 2006a). Contudo, ocorrem também casos em que estruturas de concreto não apresentarem manifestações patológicas por RAA e os agregados são acusados como reativos pelos ensaios de expansão (resultado “falso positivo”). Segundo Fournier e Bérubé (2000) e a ABNT NBR 15577, recomenda-se que os ensaios de expansão em barras de argamassa não devam ser usados como único parâmetro para rejeitar agregados, sendo o mais indicado o ensaio de expansão em prismas de concreto até a idade de 1 ano, ou 2 anos no caso de estudo de mitigação da reação e uma análise de risco da estrutura (ABNT NBR 15577-1). No entanto, este procedimento na prática das obras nem sempre é possível.

6.5 MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO

Como já mencionado no Capítulo V, o método acelerado em prismas de concreto foi inspirado nas normas ASTM C-1293 e CSA A23.2-14A, que avaliam o potencial reativo de um agregado por meio da medida de expansão de prismas de concreto expostos a uma temperatura de 38°C, por um período de no mínimo um ano, podendo chegar a dois se utilizada alguma adição mineral ou mitigadora da RAA. No entanto, a metodologia adotada neste trabalho, embora não seja normalizada, tem sido largamente empregada por pesquisadores franceses e canadenses, que avaliam a potencialidade reativa do agregado sob uma condição de temperatura de 60°C, a um período de três meses ou seis meses, este último no caso da utilização de adições mitigadoras.

Diferentemente das normalizações americana (ASTM C-1293) e canadense (CSA A23.2-14A), que adotam como limites de expansão média o valor de 0,04% aos 365 dias de ensaio para caracterizar um agregado como sendo reativo, existem diversas propostas de limites quando empregado o método acelerado utilizado nesta pesquisa. Segundo Fournier *et al.* (2004), desde 1992 pesquisadores já vêm propondo limites para a identificação da reatividade de um agregado. Na Tabela 6.8 são apresentados alguns limites propostos para o método acelerado em prismas de concreto extraídos do trabalho acima citado.

Tabela 6.8 – Propostas de limites de expansão para o método acelerado em prismas de concreto (FOURNIER, *et al.*, 2004)

Autor	Referência comparativa (38°C)	Proposta de limite
Ranc e Debray (1992)	0,04% aos 8 meses	* 0,015% as 4 semanas; ou * 0,08% as 8 semanas
Bolotte (1992)	0,04% aos 8 meses	* 0,024% as 8 semanas
Murdock e Blanchette (1994)	0,04% aos 12 meses	* 0,02% as 8 semanas; ou * 0,03% as 13 semanas
De Grosbois e Fontaine (2000)	0,04% aos 12 meses	* 0,04% as 13 semanas para agregados carbonáticos ou sedimentares; ou * 0,025% as 13 semanas para agregados ígneos e metamórficos
Touma <i>et al.</i> (2001)	0,04% aos 12 meses	* 0,04% as 13 semanas
Fournier <i>et al.</i> (2004)	0,04% aos 12 meses	* 0,04% aos 3 meses

Na Figura 6.16 são apresentados os resultados de expansão médios do ensaio acelerado dos prismas de concreto usando-se o cimento A e a areia normal do IPT como agregado miúdo não-reativo e os basaltos BA.3, BA.4 e BA.7 como agregados graúdos, e no Anexo G encontram-se os resultados individuais. Os resultados mostram que, para quaisquer uns dos limites propostos pela Tabela 6.8, assinalados pelas setas no gráfico, todos os três agregados testados são considerado inócuos.

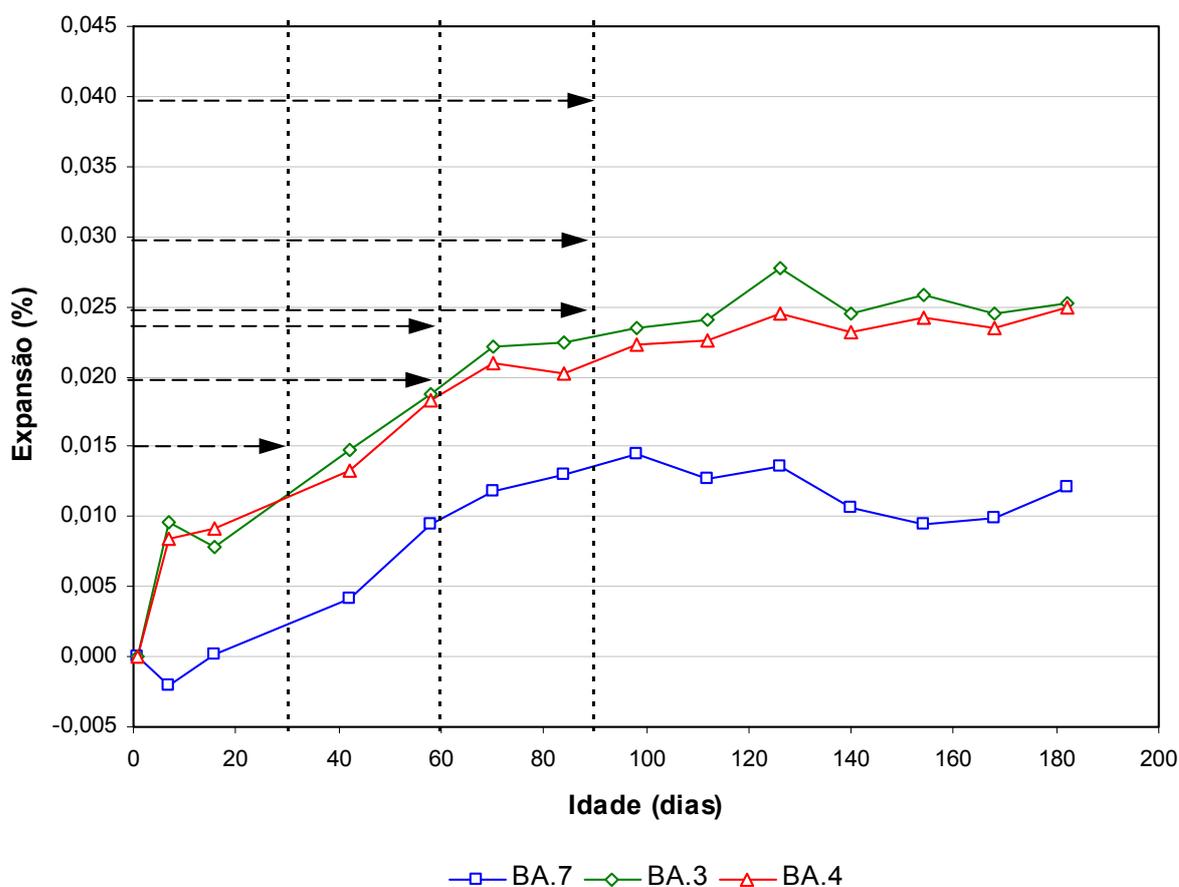


Figura 6.16 – Expansões médias dos basaltos pelo método acelerado dos prismas de concreto

Na Figura 6.16 observa-se que, embora todos os três agregados tenham apresentado modestas expansões, o menos reativo foi o BA.7, seguido do BA.4 e do BA.3. Este desenvolvimento das expansões pode estar ligado à mineralogia das rochas utilizadas, mas também a granulometria dos agregados testados, entre outros. Pela análise petrográfica das amostras, era esperado que o basalto BA.3 apresentasse maiores expansões que o basalto BA.4, pois este primeiro é constituído de cerca de 15% de matriz vítrea, material conhecidamente reativo, ao passo que na outra amostra tem-se apenas 3%. Outro ponto importante é a quantidade de argilominerais/clorofeíta encontrado nas amostras que foi de 7% e 5% para o BA.3 e BA.4, respectivamente. Porém, de qualquer forma, as diferenças nas expansões não foram expressivas. Já com relação ao BA.7, embora não tenha apresentado matriz vítrea em sua mineralogia, sua expansão (embora pequena) é justificada pela presença de quartzo microgranular, característico para o desencadeamento de RASS, sendo esta de carácter mais brando (lento) que as do tipo RAS, característico das outras duas amostras. Desta forma, comparando os BA.3 e BA.4 com o BA.7, apenas pela mineralogia, o comportamento mostra-se coerente.

Na Figura 6.17 é apresentado o aspecto final dos prismas de concreto, ressaltando que nenhum dos prismas apresentou fissuras ou sinais de deterioração até os seis meses de ensaio.



Figura 6.17 – Aspecto final de um dos prismas de concreto moldado com a amostra BA.3.

6.6 INTERAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DE ENSAIO

A seguir são realizadas análises buscando correlações entre os resultados obtidos com os diferentes métodos de ensaios contemplados nesta pesquisa.

6.6.1 MÉTODO QUÍMICO X MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASA E EM PRISMAS DE CONCRETO

Diversos trabalhos vêm de longa data mostrando a incompatibilidade entre o método acelerado em barras de argamassa e o método químico. Neste estudo não foi diferente, o método químico acusou muitos resultados como sendo falsos negativos ao ser comparado com a interpretação da ASTM C 1260.

Embora o método químico tenha sido usado amplamente ao longo dos anos em muitos países, os resultados obtidos nem sempre são satisfatórios, pois os valores de sílica dissolvida e redução da alcalinidade podem ser afetados por uma série de fatores mineralógicos (BÉRUBÉ; FOURNIER, 1993). A exemplo, Grattan-Bellew (2001) comenta que a solubilidade do quartzo aumenta ao se diminuir sua granulometria, assim, o material mais fino que 300 µm pode inadequadamente aumentar o valor da sílica dissolvida. Além dos compostos já citados, o gesso, argilominerais, silicatos de magnésio, óxidos de ferro e matéria orgânica, todos de alguma maneira tem forte influência nos resultados químicos. Segundo Dent Glasser e Kataoka (1981), outra forte influência nos resultados está atrelada a fenolftaleína que é usada como indicador na titulação, falseando os resultados na presença de íons carbonatos e também pela quantidade de sílica em solução. Já a redução da alcalinidade pode ser subestimada devido às reações que envolvem íons de alguns minerais contendo sódio e potássio (GRATTAN-BELLEW, 2001).

Apesar dos limites entre os métodos analisados terem sido discrepantes, os resultados apresentaram uma forte correção entre si com se pode observar pela Figura 6.18, onde foi feita uma correlação entre os ensaios. Nesta figura o eixo Z apresenta os valores de expansão aos 30 dias de ensaio pelo método acelerado das barras de argamassa, o eixo Y a redução da alcalinidade e, por fim, no eixo X os valores de sílica dissolvida. Este gráfico foi obtido através de um modelo matemático aleatório¹⁶, onde todos os termos são estatisticamente significativos, bem como a correlação. Na Figura 6.19 é apresentado um ábaco que nada mais é que uma projeção da curva de superfície obtida pela Figura 6.18, a fim de com valores de sílica dissolvida e redução da alcalinidade ter-se uma idéia do valor de expansão aos 30 dias de qualquer agregado ensaiado com o cimento A.

¹⁶ Modelo utilizado:

$$Exp(\%) = -1,50 \cdot 10^{-6} \cdot Sd^3 + 7,90 \cdot 10^{-8} \cdot Ra^3 + 3,70 \cdot 10^{-4} \cdot Sd^2 - 2,80 \cdot 10^{-5} \cdot Ra^2 - 0,158 \cdot (Sd/Ra)^2 - 8,30 \cdot 10^{-5} \cdot Sd \cdot Ra + 263,401 \cdot 10^{-3} \cdot Sd/Ra - 7,59 \cdot 10^{-3} \cdot Sd + 4,595 \cdot 10^{-3} \cdot Ra + 53,066 \cdot 10^{-3}$$

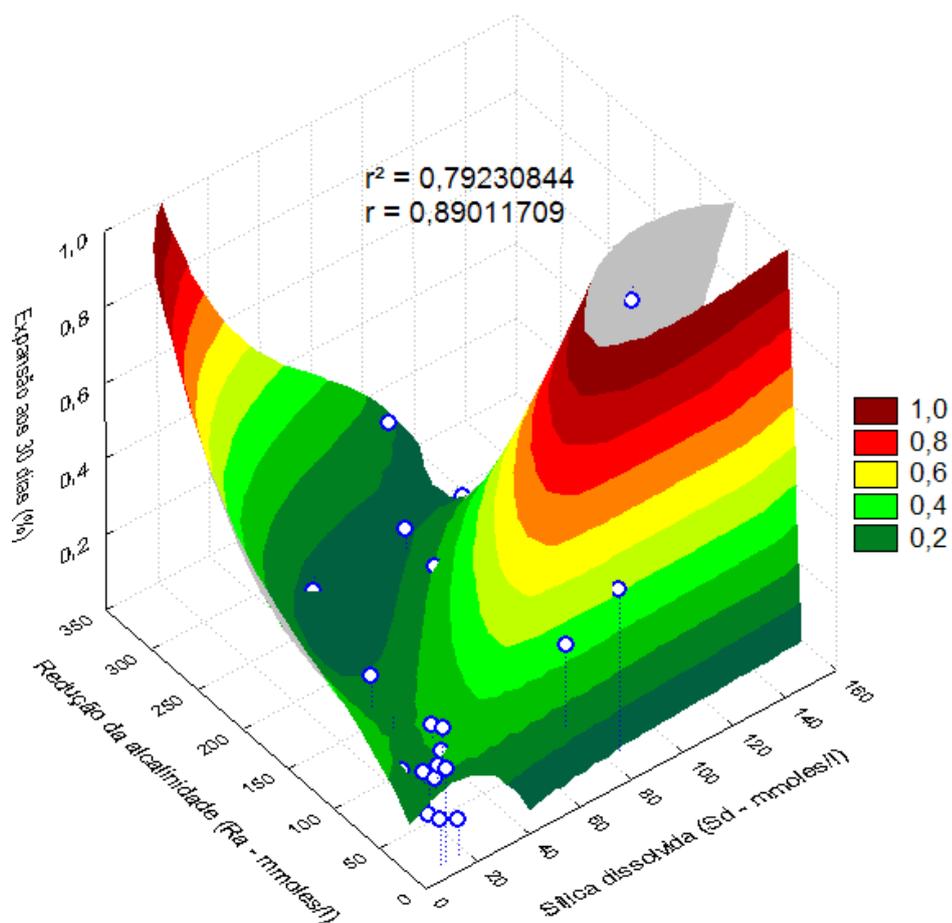


Figura 6.18 – Superfície da correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289

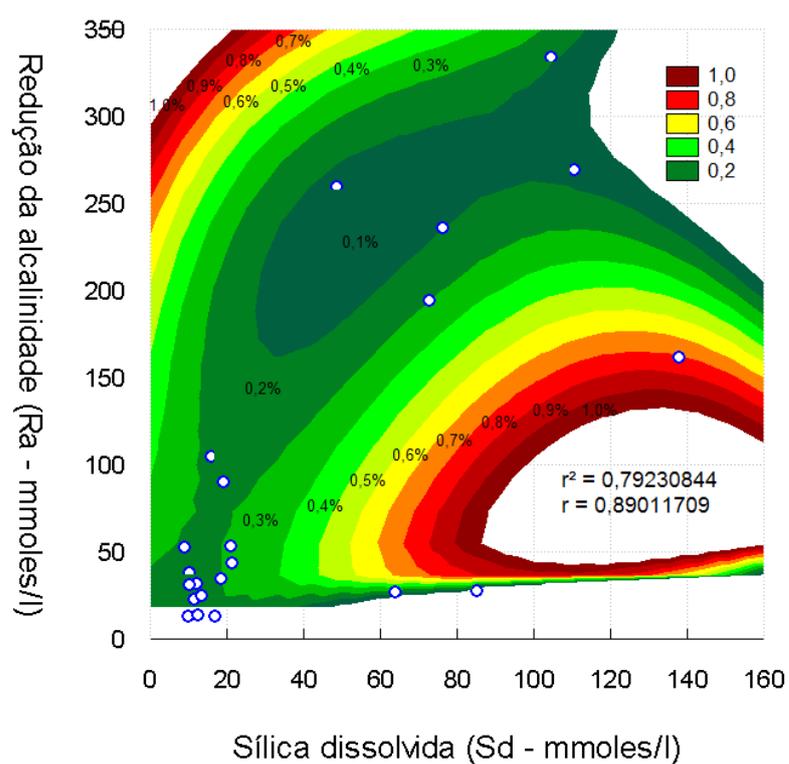


Figura 6.19 – Projeção da correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289

Paralelamente a este estudo, foram coletados 91 resultados de ensaios químicos e de expansão em barras de argamassa realizados com amostras de rochas brasileiras, publicadas por: Gambale *et al.* (1997), Salles e Oliveira (1997), Rodrigues, Kihara e Sbrighi (1997), Hasparyk (1999), Salles (2000) e Valduga (2002), a fim de verificar a mesma correlação entre os dois ensaios avaliados. Infelizmente, utilizando o mesmo modelo matemático, não se obteve um coeficiente de correlação satisfatório, em função da variabilidade das características físicas e químicas dos tipos de cimentos utilizados nas diferentes pesquisas. A Figura 6.20 exemplifica esta situação, onde os pontos em círculos vermelhos foram classificados como potencialmente reativos pela interpretação da ABNT NBR 15577 na idade de 30 dias e os triângulos em verde, como potencialmente inócuos.

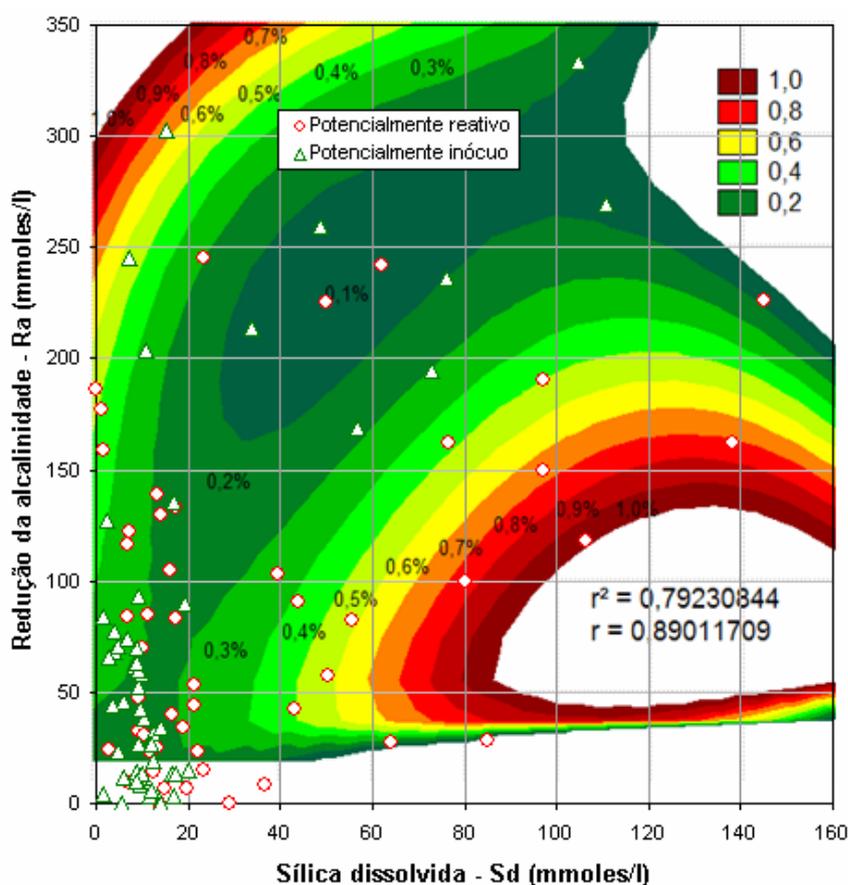


Figura 6.20 – Correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289

Entretanto, foi observado que, ao se traçar uma reta de 45° ¹⁷ entre os eixos X e Y, correspondendo respectivamente aos valores de sílica dissolvida e redução da alcalinidade, os resultados abaixo desta linha que possuem valores de sílica dissolvida

¹⁷ Nota-se que pela Figura 6.20, em função da escala logarítmica no eixo X, a reta de 45° passa a apresentar uma curvatura também logarítmica.

menor ou igual a 20 mmoles/l são considerados potencialmente inócuos pela norma brasileira ABNT NBR 15577. Ainda para os valores abaixo da reta, porém com valores de sílica dissolvida maiores que 20 mmoles/l, foram considerados potencialmente reativos. Já para os valores acima desta reta não se pode concluir nada a seu respeito, sendo necessários outros ensaios para comprovação de sua potencialidade reativa. Na Figura 6.21 é apresentado este cenário.

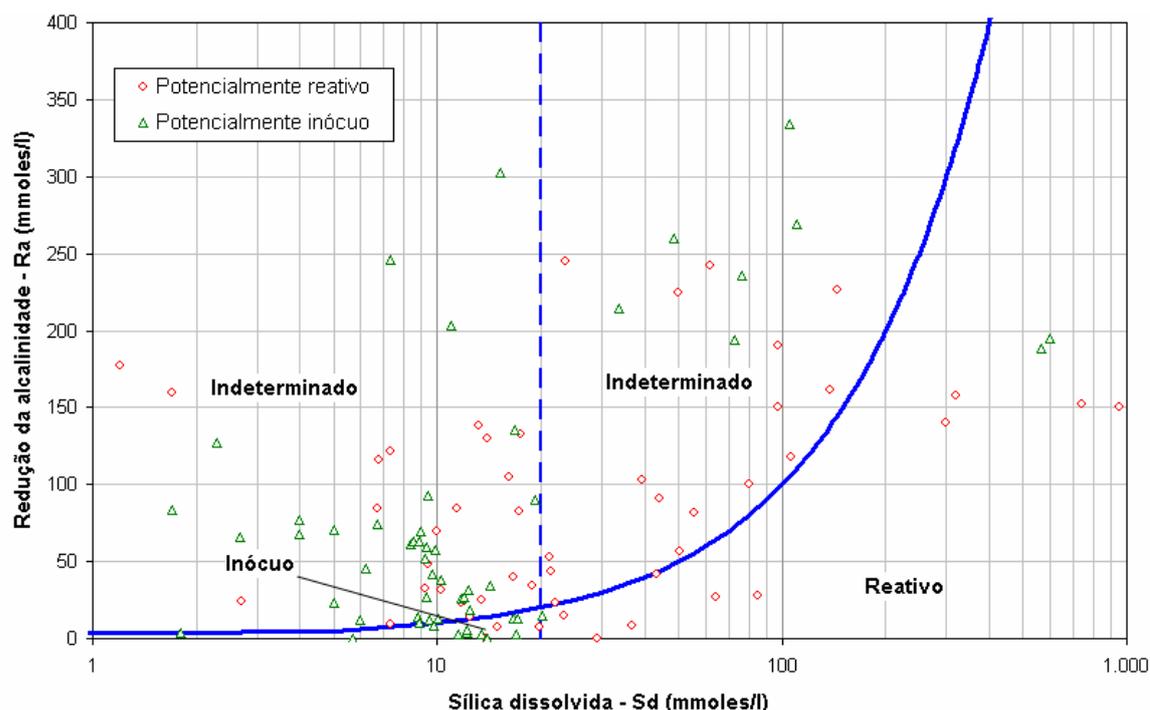


Figura 6.21 – Correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-289

Já com relação aos métodos acelerados em prismas de concreto e método químico, foi encontrada uma forte relação entre os métodos, onde nas três amostras avaliadas os resultados obtidos foram classificados como inócuos pelas duas metodologias. No entanto, não foram encontrados outros estudos que comprovem esta relação entre os dois métodos, sendo necessária uma pesquisa mais aprofundada a este respeito para confirmação desta correlação, inclusive porque o ensaio acelerado em prismas de concreto é um método bem recente.

6.6.2 MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSA X MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO

A Figura 6.22 apresenta uma correlação entre os métodos acelerados em barras de argamassa (MABA) e em prismas de concreto (MAPC), onde no eixo X são apresentadas

as expansões médias aos 16 e 30 dias de ensaio pelo MABA e no eixo Y as expansões médias aos 180 dias do MAPC. Também são demarcadas 4 áreas, que são delimitadas em função dos limites propostos em cada método de ensaio. Os pontos que por ventura se situarem na Área 1 e Área 3 são representativos de incompatibilidade entre os métodos, ou seja, tiveram avaliações distintas. Já os dados situados na Área 2 foram classificados como agregados deletérios pelos dois métodos, e os da Área 4 inócuos também pelos dois ensaios, mostrando portanto compatibilidade.

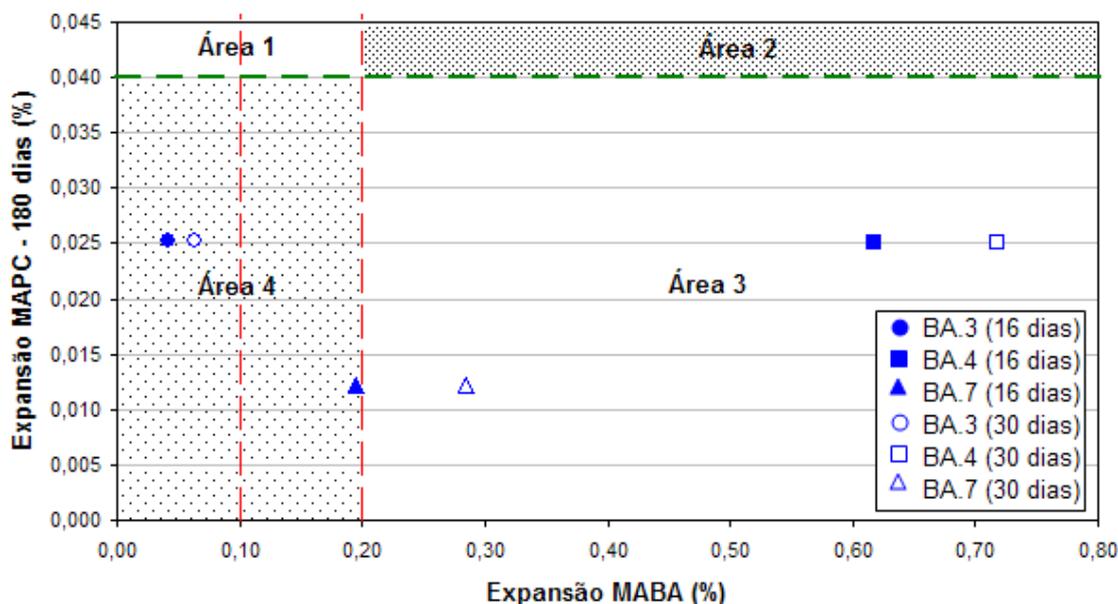


Figura 6.22 – Correlação entre os métodos de ensaio ASTM C-1260 x ASTM C-1293

Os resultados mostram que apenas pelos três valores disponíveis aos 30 dias pelo MABA, não existe uma forte relação entre os ensaios, uma vez que dois dos três agregados se posicionaram na área 3. No entanto, embora aos 16 dias pelo MABA houvesse certa correlação entre os ensaios, o baixo número de exemplares é um fator limitante para se tirar conclusões. Ao contrário do que foi apresentado, Fournier *et al.* (2004), a partir de um extenso estudo envolvendo cinco laboratórios de renome, avaliaram a aplicabilidade do método acelerado em prismas de concreto em questão correlacionando com seu método de origem, ASTM C-1293, e os resultados demonstraram uma correlação de 0,905 entre os dois métodos. Os autores ainda sugerem que o limite de 0,04% aos três meses de ensaio acelerado poderá ser utilizado para averiguação da potencialidade reativa do agregado.

Fournier *et al.* (2006) também confirmaram a aplicabilidade do método com o método convencional em prismas de concreto encontrando uma correlação de 0,861 também para a idade de avaliação do método acelerado de três meses. Os autores ainda comentam que os fatores influentes na variabilidade do método preconizado pela ASTM C-1293 são ampliados na metodologia acelerada.

Analogamente, Lee, Liu e Wang (2004) propuseram um método similar ao realizado nesta pesquisa, onde foi utilizado o mesmo critério de dosagem da ASTM C-1293, porém em condições de cura similares à da ASTM C-1260 (imersos em solução alcalina) e aplicado em 22 agregados de diversos tipos litológicos da ilha de Taiwan, onde apresentou uma boa correlação com o método ASTM C 1293, com uma correlação de 0,892 aos 30 dias de ensaio na metodologia acelerada. Os autores ainda comentam uma forte correlação entre as metodologias preconizadas pelas normas ASTM C-289 e ASTM C-227. Porém, com relação à ASTM C-1260, foi verificado que os limites aos 16 dias de ensaio foram taxados como conservadores, ao passo que se este fosse 0,15% (limite adotado pela norma canadense) a esta mesma idade, o método acelerado proposto apresentaria uma forte correlação assim como os ensaios já citados.

Shayan (2004) estudou alguns basaltos australianos comparando o método acelerado em barras de argamassa com o método convencional de expansão em prismas de concreto, e os resultados foram semelhantes aos comportamentos encontrados com os basaltos brasileiros avaliados pelo MAPC. O autor constatou três comportamentos diferentes, a saber:

- Grupo 1: basaltos que apresentaram expansão insignificante pelos dois métodos avaliados, sendo classificados como não-reativo;
- Grupo 2: basaltos que apresentaram expansão significativa pelos dois métodos avaliados, sendo classificados como reativos;
- Grupo 3: basaltos que apresentam expansão significativa no MABA, porém baixas expansões no método dos prismas de concreto. Estas amostras foram classificadas como inócuas quando utilizados como agregado graúdo, porém na granulometria de areia podem desenvolver expansões deletérias.

Contudo, seguindo a mesma linha de pensamento de Shayan (2004), todas as amostras avaliadas pelo MAPC no presente trabalho foram classificadas como potencialmente inócuas quando utilizadas como agregados graúdos, porém na granulometria de areia, as amostras BA.4 e BA.7 podem apresentar uma potencialidade reativa com os álcalis do concreto.

Ressalta-se, que embora não se tenha uma correlação aos 30 dias nem dados suficientes para confirmar a correlação entre os ensaios, são encontrados na literatura diversos trabalhos (GROSBOIS; FONTAINE, 2000a; GROSBOIS; FONTAINE, 2000b; FOURNIER *et al.*, 2004; SHAYAN, 2004; LEE; LIU; WANG, 2004, GRATTAN-BELLEW *et al.*, 2004; FOURNIER *et al.*, 2006; SANCHEZ, 2008) mostrando a viabilidade e confiabilidade de ensaios acelerados em concretos, sendo necessário um estudo mais amplo com maior número de amostras de agregados brasileiros para se ter argumentos consistentes a respeito da aplicabilidade do método para a realidade dos agregados nacionais.

6.6.3 MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE CONCRETO X ULTRA-SOM X VARIAÇÃO DE MASSA

Adicionalmente ao ensaio acelerado em prismas de concreto, em todas as medidas, além da expansão, foi acompanhada a variação de massa de cada prisma, bem como a velocidade de propagação de ondas, com o objetivo de correlacionar seus resultados com as expansões. No Anexo G encontram-se os resultados individuais obtidos.

Na Figura 6.23 são apresentadas as velocidades de propagação de ondas determinadas por ultra-som. Observa-se que em todas as amostras, há um crescimento das velocidades, o que induz a conclusão de que as reações de hidratação dos concretos, estão ocorrendo e densificando a matriz, diminuindo o número de vazios e o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas e conseqüentemente aumentando as velocidades (SAINT-PIERRE; RIVARD; BALLIVY, 2007). Após a moldagem e cura dos corpos-de-prova a 21°C, as amostras são transferidas para um ambiente de elevada temperatura (60°C) para o ensaio, que ativaria as reações de hidratação.

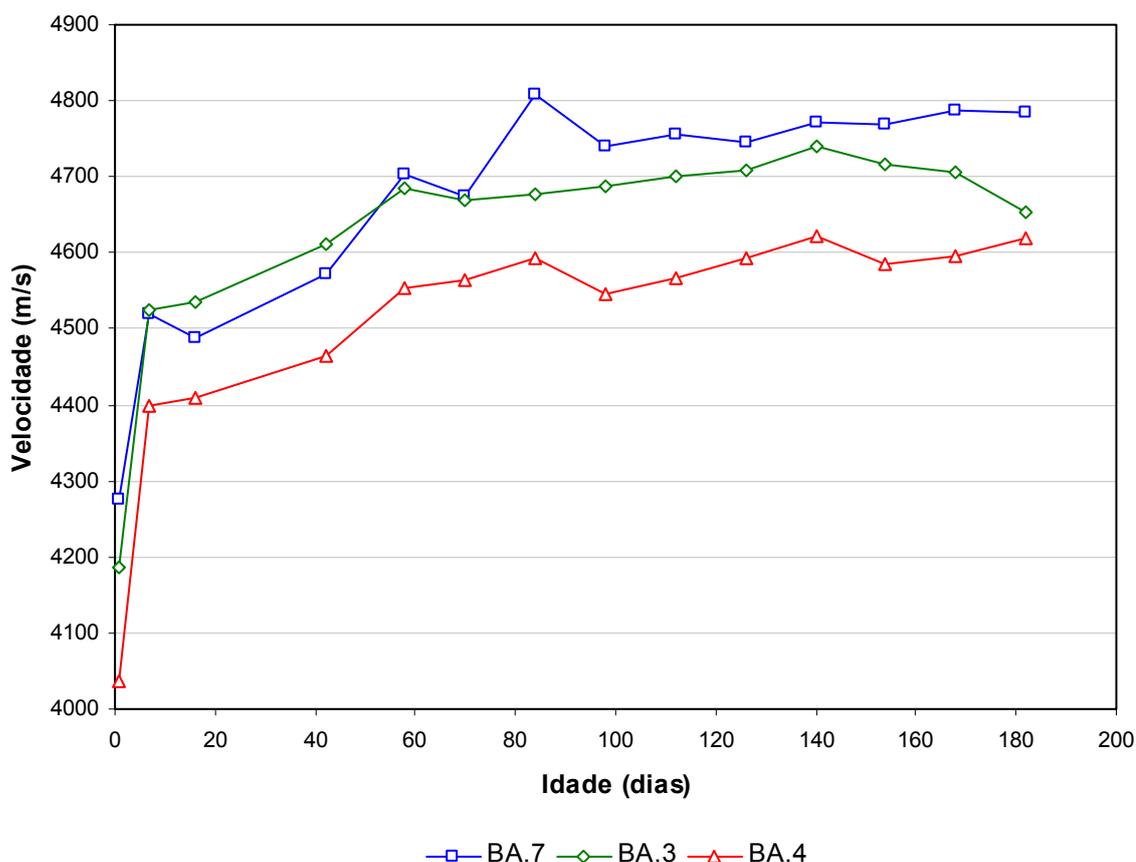


Figura 6.23 – Velocidades ultra-sônicas dos prismas de concreto

Em idades mais avançada, há uma tendência de estabilização das velocidades de propagação de ondas, que sugere que as reações causadas pela RAA até a idade avaliada não estão sendo suficientes para causar uma microfissuração interna intensa a ponto de afetar o módulo de elasticidade do concreto e refletir em mudanças neste parâmetro (velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas). Segundo Thomas *et al.* (1995) a velocidade ultra-sônica tem sido largamente utilizada para mensurar de forma indireta algumas propriedades mecânicas do concreto. Ainda neste trabalho, o autor apresenta uma proposta do critério de avaliação baseado em estudos realizados em 1951 por Whitehurst (1951 *apud* Thomas *et al.*, 1995) que estão expostos na Tabela 6.9. Sendo assim, para as idades de 90 e 180 dias, todos os concretos seriam considerados de excelente condição. Saint-Pierre, Rivard e Ballivy (2007) defendem que o método de determinação da velocidade ultra-sônica não é preciso para se estabelecer um critério de avaliação a respeito de manifestações patológicas envolvendo a RAA. Entretanto, a própria norma americana ASTM C-597, diz que este método pode ser usado para avaliar a deterioração do concreto. Na verdade, a idéia serve para monitorar o concreto no tempo e verificar se este parâmetro pode ser alterado.

Tabela 6.9 – Condição de utilização do concreto pela velocidade ultra-sônica (WHITEHURST, 1951 *apud* THOMAS *et al.*, 1995).

Velocidade (m/s)	Condição de utilização
> 4570	Excelente
3660 – 4570	Geralmente boa
3050 – 3660	Questionável
2130 – 3050	Geralmente ruim
< 2130	Muito ruim

Neste sentido, Swamy (1992), Rivard *et al.* (2004) e Hasparyk (2005) apresentaram resultados inversos aos encontrados nesta pesquisa, porém com um número muito mais expressivo de dados e em amostras mais afetadas pela RAA, onde, num primeiro momento, as velocidades se elevaram até próximo aos 55 dias, o que é característica das reações de hidratação do cimento, posteriormente a isto, decaíram na medida em que se aumentaram as expansões deletérias causadas pela RAA.

Neste trabalho, foi encontrada uma boa correlação entre as velocidades ultra-sônicas e as expansões nos prismas de concreto, conforme se pode averiguar pela Figura 6.24.

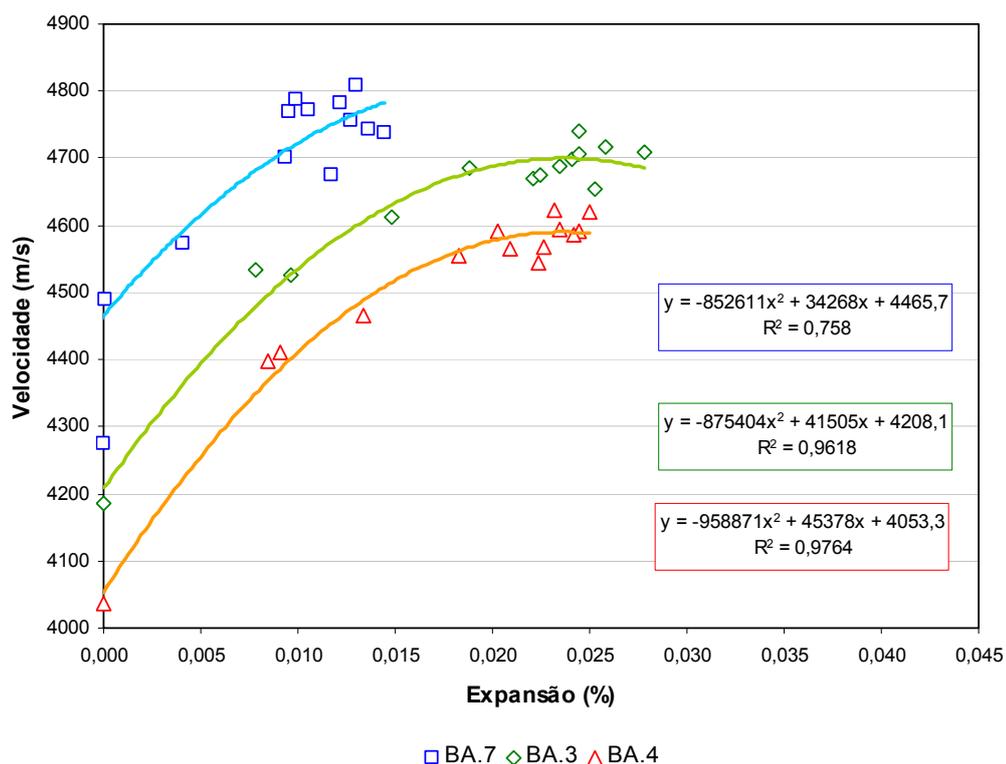


Figura 6.24 – Correlação entre as velocidades ultra-sônicas e as expansões dos prismas de concreto

Pela Figura 6.24 observa-se o aumento das expansões na medida em que se aumentam as velocidades. No entanto, as três curvas aparentam ter chegado num ponto ótimo, apresentando uma tendência em diminuir bruscamente as velocidades a partir dos 0,03% de expansão. Entretanto, o real comportamento apenas poderia ser confirmado com a continuação dos ensaios. Provavelmente, com maiores expansões as velocidades podem vir a cair, conforme constatado por Hasparyk (2005)

Além do ensaio de ultra-som, foi realizado o acompanhamento das variações de massa dos prismas de concreto, com resultados mostrados na Figura 6.25. Em todas as amostras, verificou-se uma acentuada perda de massa, mas apenas nas primeiras idades, característica da perda da água de amassamento que é consumida em parte pelas reações de hidratação e em parte perdida para o ambiente.

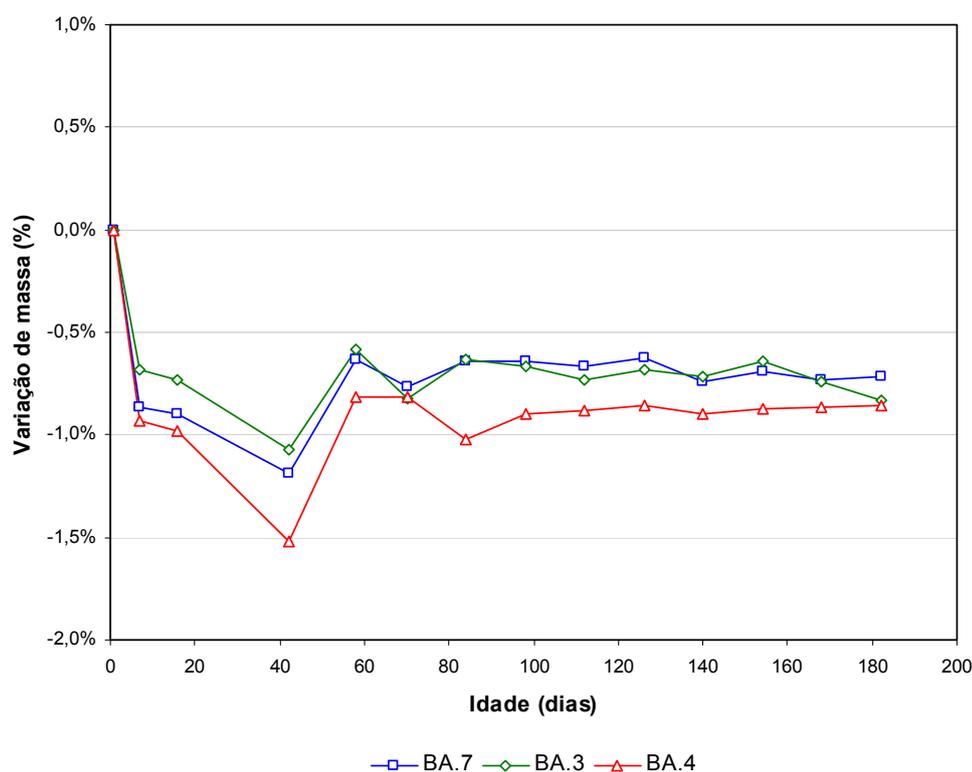


Figura 6.25 – Variação de massa dos prismas de concreto

Diferentemente dos resultados encontrados neste trabalho, Rivard *et al.* (2004) apresentaram em seus estudos resultados de variação de massa crescente. Os pesquisadores analisaram testemunhos de concreto extraídos quando expostos a condições de temperatura de 38°C e imersos em NaOH. Possivelmente este aumento da massa está intimamente ligado à absorção da solução pelo concreto.

Embora não se tenha encontrado uma correlação entre a variação de massa e as expansões dos prismas de concreto, a velocidade ultra-sônica apresentou uma correlação significativa com a variação de massa. Na Figura 6.26 vê-se que, com o avanço da idade de ensaio, os prismas de concreto estão aumentando sua velocidade de propagação de onda (aumento da coesão) e, conseqüentemente, está havendo um decréscimo de massa ocasionado pela perda de água para o ambiente e tendo-se também uma densificação da matriz cimentícia, embora a variação de massa ainda seja negativa.

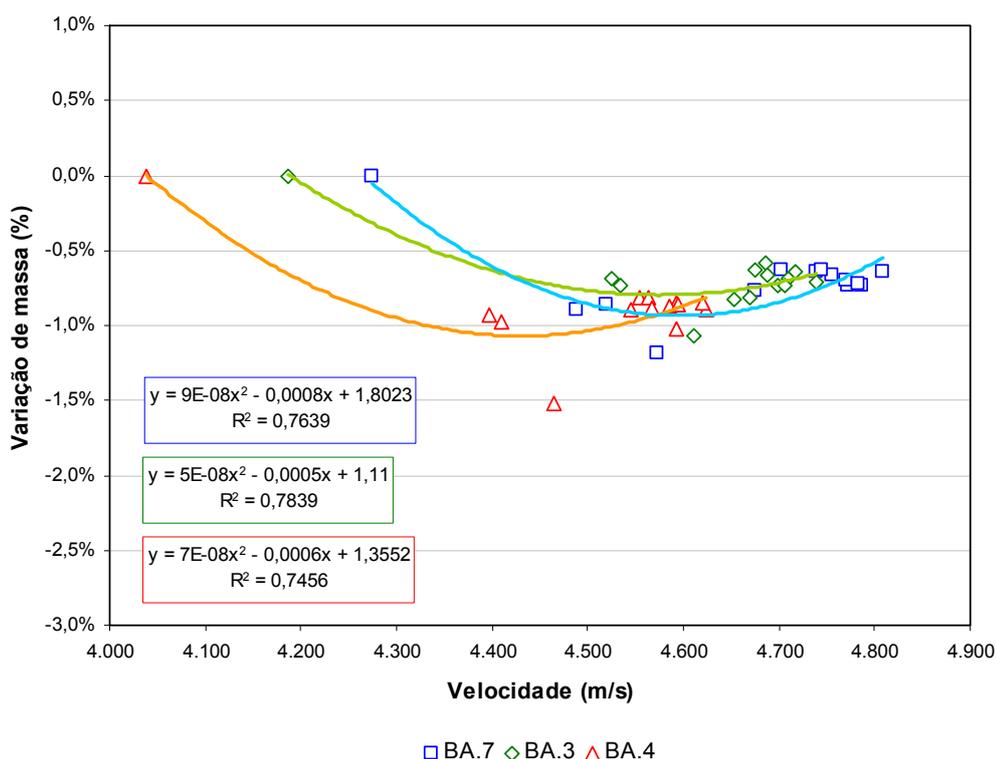


Figura 6.26 – Correlação entre a variação de massa e a velocidade ultra-sônica dos prismas de concreto.

6.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Após os ensaios de expansão pelo método acelerado em barras de argamassa (30 dias), foi selecionada aleatoriamente, uma das três barras moldadas com cimento A para análise por microscopia eletrônica de varredura. As amostras de argamassa selecionadas representam os agregados testados no MAPC, a saber: BA.3, BA.4 e BA.7.

As barras foram fragmentadas tomando-se o cuidado de se retirar um testemunho do terço médio, sendo suas porções internas analisadas visualmente a olho nu a fim de identificar sinais evidentes relativos às manifestações patológicas causadas pela RAA.

Na Figura 6.27 é apresentada uma vista geral das três amostras analisadas a uma resolução de 150 vezes, onde fica clara a falta de coesão e pulverulência da matriz cimentícia da amostra BA.4 (Figura 6.26 (c)) em relação às demais, ocasionada pelas reações expansivas expressiva da RAA. Ainda sobre o aspecto geral das amostras analisadas, não passa despercebido a nítida diferença de compactação observada entre as amostras, que pode ser mensurada qualitativamente pelo tamanho e distâncias entre os poros, onde para a amostra BA.7 (a) os poros são tão menores que nesta resolução mal é

observado, ao contrário da amostra BA.3 onde estes são bem definidos. Já na amostra BA.4, em função da pulverulência, os poros não são identificados facilmente, embora se apresentem maiores que as demais amostras.

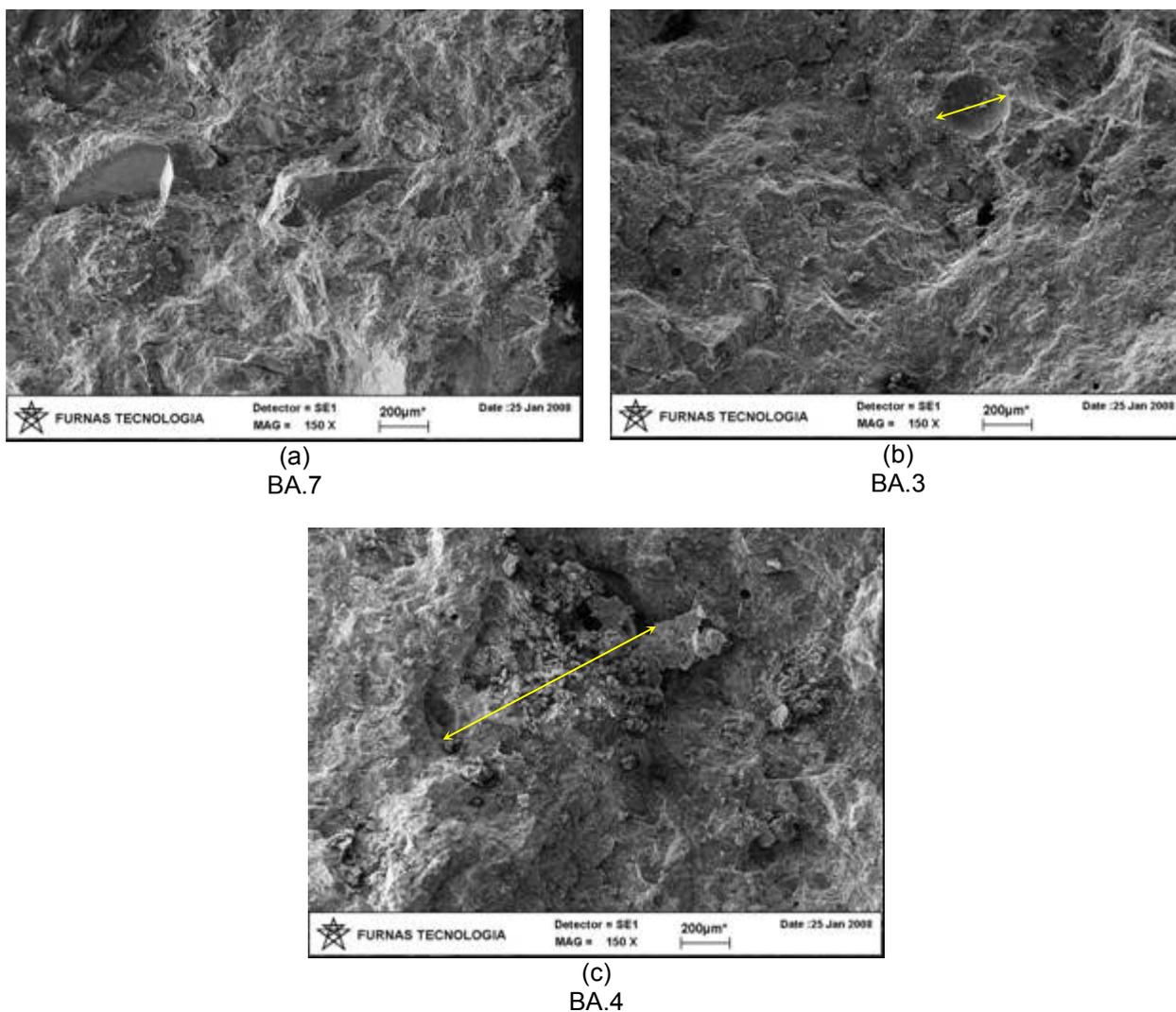
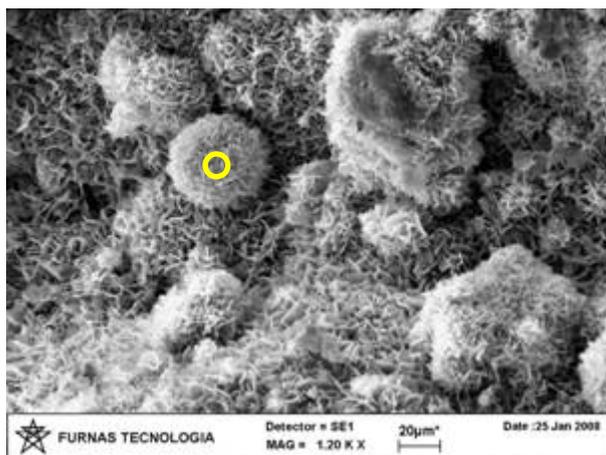
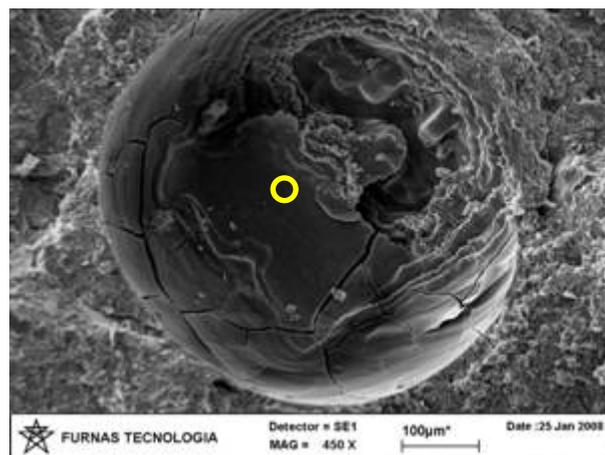


Figura 6.27 – Micrografias apresentando a vista geral das amostras.

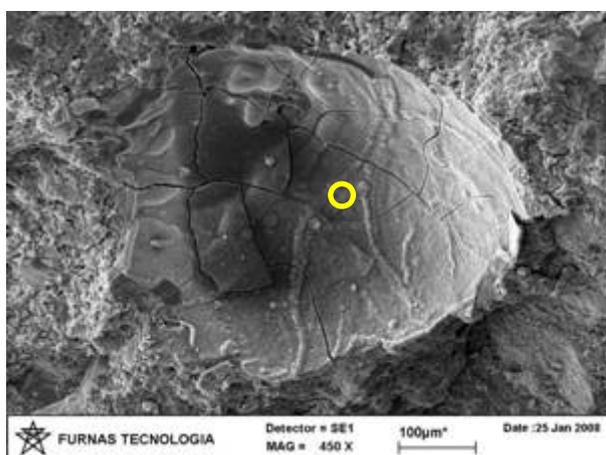
Em todas as amostras foram encontrados alguns poros contendo produtos da RAA depositados, como se observa na Figura 6.28, independente da taxa de expansão averiguada no MABA. As formas encontradas são as mais variadas como a rosácea (a) encontrada na amostra BA.7, gretada (b) na amostra BA.3 e as formas botrioidal (c) e rendada (d), observadas na amostra BA.4, sendo todas de composição sílico-cálcico-alcalina, conforme espectros apresentados na Figura 6.29, referentes às regiões centrais marcadas em amarelo nas micrografias expostas na Figura 6.28.



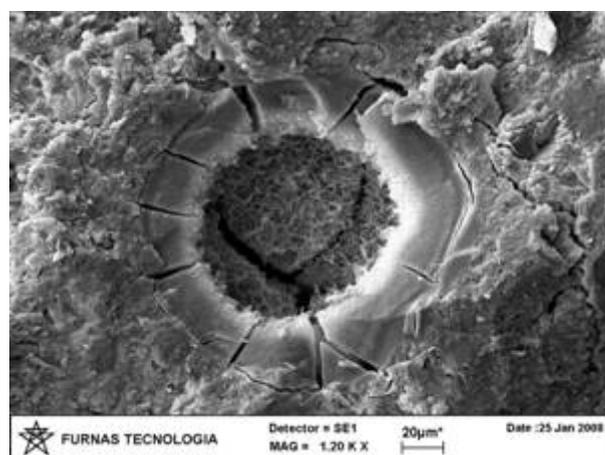
(a)
BA.7 – Rosáceas (1200x)



(b)
BA.3 – Gel gretado (450x)



(c)
BA.4 – Maciço, gretado e botrioidal (450x)



(d)
BA.4 – Produto rendado (1200x)

Figura 6.28 – Micrografias apresentando as morfologias dos géis encontrados nas amostras

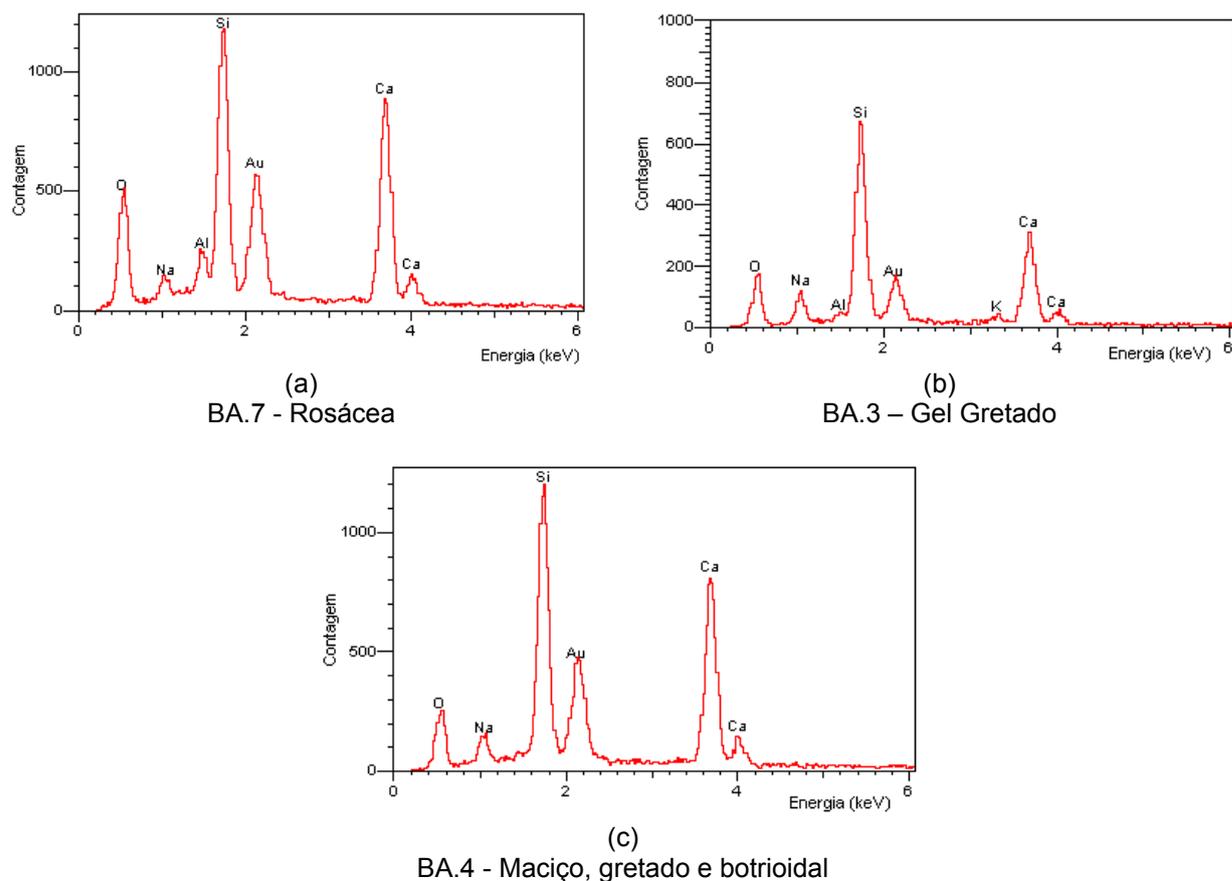


Figura 6.29 – Espectros apresentados na região central das microanálises da Figura 6.31

Cabe salientar que foi observado também, certo descolamento do agregado em algumas regiões, em todas as amostras analisadas, conforme exemplificado nas micrografias apresentadas na Figura 6.30 indicadas pelas setas em amarelo.

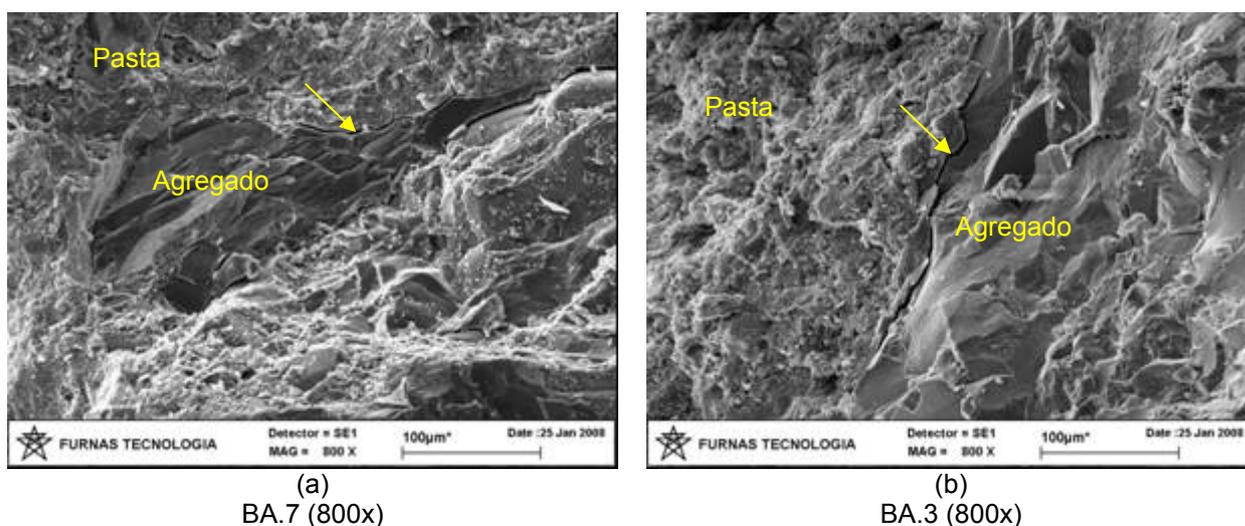


Figura 6.30 – Micrografias apresentando a perda de aderência entre a matriz e o agregado.

Por fim, com base nas observações comparativas das três amostras analisadas realizadas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, verificou-se que a amostra BA.4 foi a que sofreu os maiores danos por ação das reações envolvendo os álcalis com a sílica disponível do agregado por apresentar uma maior incidência dos produtos de reação e pulverulência, seguido das amostras BA.3 e BA.7.

6.8 ANÁLISE DE RISCO: CÁLCULO DO IRP

Conforme apresentado no Capítulo IV, o cálculo do IRP pode ser feito para agregados granitóides. Neste estudo, em função dos minerais presentes nos quartzitos e quartzo-xistos serem os mesmos encontrados nas rochas granitóides, a análise foi estendida a estes, totalizando a abordagem em 15 agregados, excluindo-se apenas os basaltos desta avaliação. Como já relatado, o IRP classifica os agregados da seguinte forma:

- IRP > 20: Agregado Reativo.
- IRP 12 a 20: Agregado Potencialmente Reativo.
- IRP ≤ 12: Agregado Inócuo.

A seguir, na Tabela 6.10 é apresentado o cálculo do IRP considerando para todos os casos a condição mais crítica para obras executadas com os agregados em questão, sendo consideradas obras hidráulicas em ambientes quentes e úmidos (portanto B e C igual a 2).

Tabela 6.10 – Análise de risco – Cálculo do IRP

Parâmetros (A)	GD	GR	GR	GR	GR	GR	ML	QX	QX	QX	QX	QX	QX	QZ	QZ	
	.1	.1	.2	.3	.4	.5	.1	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.1	.2	
ASTM C-1260 – 16 dias	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
ASTM C-1260 – 30 dias	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3
Ângulo de extinção ondulante	2	2	2	1	0	0	2	0	2	2	2	0	2	2	2	2
% de quartzo microgranular	1	2	2	2	2	2	3	2	1	2	1	2	3	3	3	3
Granulação da matriz	2	1	1	0	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2
Microfissuramento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Teor de álcalis solúveis	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Tipo de obra (B)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Condições ambientais (C)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
(IRP) = A.(B+C)	32	32	36	24	24	24	52	44	32	52	48	44	56	64	64	

Desta forma, pelo IRP considerando as condições impostas, todos os agregados foram considerados reativos. Por se tratar de uma reação complexa, envolvendo não apenas materiais básicos como cimento e agregado, as condições ambientais mostram-se como um dos fatores extremamente importantes para o desencadeamento da reação.

Observa-se que das rochas com casos já instalados de RAA em obras (GR.4, GR.5, ML.1, QZ.1 e QZ.2) apresentaram grande variação no valor do IRP, isso em função dos resultados de expansão que é relacionado com a grande complexidade mineralógica das rochas estudadas. Em especial, os granitos GR.4 e GR.5, correspondentes da UHE Moxotó e da Barragem de Pedro Beicht, respectivamente, foram os que apresentaram menores valores de IRP e expansão, indicando que são rochas de reatividade lenta, ao contrário dos quartzitos QZ.1 e QZ.2 que apresentaram maiores valores de IRP e expansão.

Com relação aos agregados granitóides do estado de Goiás, tomando como base os resultados expostos na Tabela 6.10, é preocupante a situação, pois apresentam valores de IRP iguais, e muita das vezes, maiores que os de obras já com a incidência da RAA. De uma forma geral, os quartzos-xistos foram os que apresentaram maiores valores de IRP e expansão média, e em muita das vezes maiores até que os das obras analisadas. Ressalta-se que, foram encontrados valores de IRP próximos aos de casos clássicos, como os de edifícios da RMR (ML.1), onde blocos de fundação sujeitos à alta umidade fornecida pelo solo em um ambiente quente como os encontrados no estado de Goiás foram suficientes para desencadear a RAA. Contudo, ainda não se têm indícios de casos em edifícios com RAA de caráter deletério no estado de Goiás, sendo necessários estudos de diagnóstico.

Muito embora os basaltos não possam fazer parte desta análise, é importante ressaltar que alguns destes agregados do estado de Goiás apresentaram valores de expansão em barras de argamassas superiores aos granitos e quartzitos das obras afetadas. Assim como para as rochas granitóides deste estado, a afirmativa de que não existem casos identificados com manifestações patológicas a respeito da reatividade potencial destes agregados, pode-se estender aos basaltos. Contudo, embora não se encontrem registros de RAA deletéria, até então em obras nacionais realizadas com rochas ígneas vulcânicas, estes agregados devem ser melhor estudados em função da facilidade “teórica” em se reagir em devido a sua mineralogia que consiste boa parte de sílica com estrutura cristalina precária.

6.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS EMPREGADAS

Na Tabela 6.11 é apresentado um resumo dos resultados encontrados a partir dos métodos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 6.11 – Resumo de todos os resultados obtidos a partir dos métodos empregados.

Amostra	Análise petrográfica		Método químico	MABA				MAPC	MEV
				ASTM C-1260 / 1567		ABNT NBR 15577			
	Class.	Mineralogia		Cim. A	Cim. B	Cim. A	Cim. B		
BA.1	PR	MV, CF/AM	I	I	I	PI	I	-	-
BA.2	PR	MV, CF/AM	I	I	I	PI	I	-	-
BA.3	PR	MV, CF/AM	I	I	I	PI	I	I	PI
BA.4	PR	MV, CF/AM	I	R	I	PR	I	I	PR
BA.5	PR	MV, CF/AM	I	PR	I	PR	I	-	-
BA.6	PR	MV	I	I	I	PI	I	-	-
BA.7	PR	QzMG	I	R	I	PR	I	I	PR
GD.1	PR	QzEO	I	I	I	PI	I	-	-
GR.1	PI	-	I	I	I	PI	I	-	-
GR.2	PR	QzEO	I	PR	I	PR	I	-	-
GR.3	PR	QzEO	I	I	I	PI	I	-	-
GR.4	PR	QzMG	I	I	I	PI	I	-	-
GR.5	PI	-	I	I	I	PI	I	-	-
ML.1	PR	QzMG, QzEO	I	R	I	PR	I	-	-
QX.1	PR	QzMG	I	R	I	PR	I	-	-
QX.2	PR	QzMG, QzEO	I	PR	I	PR	I	-	-
QX.3	PR	QzEO	I	R	I	PR	I	-	-
QX.4	PR	QzMG, QzEO	I	R	I	PR	I	-	-
QX.5	PR	QzMG	I	R	I	PR	I	-	-
QX.6	PR	QzMG, QzEO	I	R	I	PR	I	-	-
QZ.1	PR	QzMG, QzEO	R	R	I	PR	I	-	-
QZ.2	PR	QzMG, QzEO	R	R	I	PR	I	-	-

I – Inócua;
 PI – Potencialmente Inócua;
 PR – Potencialmente Reativo;
 R – Reativo.
 MV – Matriz Vítrea
 CF/AM – Clorofeita/Argilominerais
 QzMG – Quartzo Microgranular
 QzEO – Quartzo com Extinção Ondulantes

Existe uma grande variabilidade de comportamentos, em especial quanto à análise petrográfica, como já era esperado em função desta ser uma análise qualitativa assim como a microscopia eletrônica de varredura, porém com esta última se tem como identificar com exatidão os produtos característicos da RAA. Com relação aos resultados quantitativos, como o método químico, o método acelerado em barras de argamassa e o método acelerado em prismas de concreto, de uma forma geral, observa-se que muito ainda se tem a entender sobre os limites apresentados pelos métodos e a forma de emprego dos agregados, necessitando de maiores estudos a fim de melhorar a correlação entre os métodos para os agregados, haja vista que este é um problema mundial ainda com poucas respostas.

Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Existe uma variabilidade das expansões para agregados de mesma litologia, onde as análises petrográficas mostram-se úteis na identificação dos minerais potencialmente reativos da RAA. Nos basaltos, a reação é do tipo álcali-sílica em função da presença do vidro vulcânico, clorofeita e argilominerais expansivos na matriz intersticial do agregado; já para as rochas granitóides, quartzo-xistos e quartzitos, a reação é do tipo álcali-silicato (uma particularidade da reação álcali-sílica) relacionada à presença do quartzo com extinção ondulante e microgranular.

Considerando a ABNT NBR 15577-1 (2008), e estando a favor da segurança, dentre todas as amostras ensaiadas com o cimento A, foram identificados nove agregados potencialmente inócuos e treze potencialmente reativos. Com relação ao cimento B, em todas as amostras a reação foi mitigada, sendo a combinações cimento/agregado, consideradas potencialmente inócuas. O cimento pozolânico mostrou o melhor desempenho na mitigação das reações expansivas dos basaltos, seguido das rochas granitóides e quartzitos e por fim dos quartzo-xistos, em função da presença de silicatos (quartzo deformado) em suas constituições.

Os resultados obtidos pelo método químico não foram condizentes com os resultados encontrados pela petrografia e os realizados em barras de argamassa pelo método acelerado; portanto os resultados deste método devem ser considerados com cautela, tornando-se necessária uma reavaliação das suas condições de ensaio, de forma a torná-lo mais confiável e com uma maior aplicabilidade.

Foi encontrada correlação estatística entre os valores de sílica dissolvida e redução da alcalinidade do método químico com os valores de expansão do MABA, no entanto o modelo matemático não se pôde estender aos dados levantados de estudos anteriores muito em função dos tipos de cimentos distintos do utilizado na pesquisa.

Pelos resultados obtidos empregando o método acelerado em prismas de concreto, todos os agregados apresentaram expansões modestas, sendo classificados como potencialmente inócuos. As expansões são aumentadas em função do aumento da

quantidade de matriz vítrea. Os resultados de velocidades ultra-sônicas confirmaram a teoria de que os agregados não reagiram de maneira expressiva para apresentarem caráter deletério.

Observou-se de uma forma geral, que os agregados do estado de Goiás apresentaram potencialidades reativas algumas das vezes superiores aos agregados de obras nacionais com manifestações patológicas já instaladas envolvendo álcalis do cimento com a sílica disponível dos agregados, por meio dos métodos de avaliação empregados nesta pesquisa.

Sendo assim, de uma maneira geral, a fim de evitar reações expansivas com estes agregados, sugere-se que o cimento Portland pozolânico com as características do estudado seja utilizado para a confecção de argamassas e concretos na presença dos agregados testados. De qualquer forma, variações nas rochas podem ocorrer, além de haver possibilidade de variações nas características do cimento, podendo inclusive variar o teor de pozolana incorporado. Portanto, deve haver uma periodicidade de ensaios, conforme preconizado pela ABNT NBR15577-2 (2008), com os agregados propostos para uso em uma estrutura de concreto, de forma a garantir os comportamentos observados e a mitigação ou não das expansões.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Ao longo do trabalho, foi surgindo a necessidade de contornar situações não previstas, responder questionamentos, elucidar pontos que ficaram no decorrer das análises e, dessa forma, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que possam contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno da RAA:

- Correlacionar resultados do método químico com o método dos prismas de concreto tradicional e acelerado com outros tipos de agregado, haja vista que este último é a metodologia mais apropriada para diagnosticar a sua potencialidade reativa;
- Alterar o método químico, haja vista que vários autores já vêm comentando a forma inadequada de obtenção de alguns parâmetros do ensaio e resultados;
- Aumentar o leque de agregados brasileiros ensaiados pelo método acelerado dos prismas de concreto a fim de testar o comportamento para diversas fases minerais reativas e sua velocidade;
- Correlacionar agregados ensaiados pelos métodos de avaliação da reatividade potencial em concretos, tanto da forma convencional quanto acelerada;

- Estudar o comportamento reativo de diversos agregados usados por todo o país com os cimentos regionalmente disponíveis;
- Estudar por diversos métodos a variação de possíveis potencialidades reativas de um maciço rochoso fazendo extrações de rocha tanto nas direções longitudinais quanto latitudinais, em especial em zonas de falhas cisalhantes;
- Estudar blocos maiores com instrumentação por períodos mais longos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M.; RIBEIRO, A.C.O. A Terra em transformação. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. p.7-13.

ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana de Recife. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, p.1-16, 2006.

ANDRADE, T.; SILVA, J.J.R.; ALMEIDA, R.; PATROCÍNIO, J.; KIHARA, Y.; PECCHIO, M. Diagnóstico de reação álcali-agregado em blocos de fundação de um edifício público situado na cidade de Recife/PE. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, p.1-15, 2006b.

ANDRADE, T.; SILVA, J.J.R.; HASPARYK, N.P.; SILVA, C.M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na região metropolitana do Recife. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, p.1-16, 2006a.

ANDRIOLO, F.R. AAR dams affected in Brazil report on the current situation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Quebec. **Proceedings...** Quebec, 2000, p.1243-1252.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-114/07**. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement - Water-Soluble Alkalis. Philadelphia, 2007

_____. **ASTM C-150/07**. Standard Specification for Portland Cement. Philadelphia, 2007.

_____. **ASTM C-151/05**. Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement. Philadelphia, 2005

_____. **ASTM C-227/03**. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method). Philadelphia, 2003

_____. **ASTM C-289/07**. Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method). Philadelphia, 2007

_____. **ASTM C-597/02**. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Philadelphia, 2002

_____. **ASTM C-1260/07**. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2007.

_____. **ASTM C-1293/08**. Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. Philadelphia, 2008

_____. **ASTM C-1567/07**. Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). Philadelphia, 2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 774**: Agregados - Verificação da reatividade potencial pelo método químico. São Paulo, 1987.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. 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 14656**: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 15577-1**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. São Paulo, 2008.

_____. **NBR 15577-2**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. São Paulo, 2008.

_____. **NBR 15577-3**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. São Paulo, 2008.

_____. **NBR 15577-4**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. São Paulo, 2008.

_____. **NBR 15577-5**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. São Paulo, 2008.

_____. **NBR 15577-6**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. São Paulo, 2008.

_____. **NBR NM 11**: Cimento Portland – Análise química – Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria. Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 13:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 17:** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

BARISONE, G.; RESTIVO, G. Alkali-silica reactivity of some italian opal and flints tested using a modified mortar bar test. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec, Canadá. **Proceedings...** Québec, Canadá, 2000. p.239-245.

BÉRUBÉ, M.A.; FOURNIER, B. Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. **Cement and Concrete Composites**, n.15, p.27-47. 1993

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

BRAUN, P.V.C.B. Convivendo com reações expansivas em barragens – a experiência da EMAE. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, p.1-19, 2006.

BULLETIN 79 - ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE DAMS – REVIEW AND RECOMENDATIONS. Paris: CIGB/ICOLD, 1991.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA A23.2-14A:** Potential Expansivity of Aggregates (Procedure for Length Change due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Prisms at 38°C). Toronto, 2000.

_____. **CSA A23.2-27A:** Standard Practice to Identify Degree of Alkali-Reactivity of Aggregates and to Identify Measures to Avoid Deleterious Expansion in Concrete. Toronto, 2000.

CHATTERJI, S. Chemistry of alkali-silica reaction and testing and aggregates. **Cement; Concrete Composites**, n.27, p.788-795. 2005.

CONSTANTINER, D.; DIAMOND, S. Alkali release from feldspars into pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v.33, n.4, p.549–554. 2003

DANA, J.D.; HURLBUT C.S. **Manual de mineralogia**. Volume 2. Tradução de Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro: AO Livro Técnico S. A., Editora da USP, 1969. 642p.

DEER, W.; HOWIE, R.; ZUSSMAN, J. **Minerais Constituintes das Rochas**: uma introdução. Tradução de Carlos Antônio Regêncio Macedo. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000. 727p.

DENG, M.; TANG, M. Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks. **Cement and Concrete Research**, v.23, n.6, p.1397-1408, 1993.

DENT GLASSER, L. S. Osmotic pressure and the swelling of gels. **Cement and Concrete Research**, v.9, n.4, p.515-517. 1979.

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

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

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms: Reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 4, p. 549-560, 1976.

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, n.4, p.329-345. 1975.

DIAMOND, S.; THAULOW, N. A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. **Cement and Concrete Research**, v.4, p.591-607. 1974

DOLAR-MANTUANI, L.M.M. Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali-reactive rocks. In: International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 5., Cape Town. **Proceedings...** Cape Town. 1981. 6 pp.

EKOLU, S.O.; THOMAS, M.D.A; HOOTON, R.D. Dual effectiveness of lithium salt in controlling both delayed ettringite formation and ASR in concretes. **Cement and Concrete Research**, 37, p.942-947, 2007

ERNST, W.G. **Minerais e Rochas**. Tradução de Evaristo Ribeiro Filho. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1971. 162p.

EVERETT, D. H. **Basic principles of colloid science**. London: Royal Society of Chemistry, 1988.

FARAGE, M.C.R. **Modelagem e implementação numérica da expansão por reação álcali-agregado do concreto**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2000. 126p.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 27, p.167-191, 2000.

FOURNIER, B.; CHEVRIER, R.; GROSBOIS, M.; LISELLA, R.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATAD, M.; THOMAS, M.; BAXTER, S. The accelerated concrete prism test (60°C): variability of the method and proposed expansion limits. 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. 314-323.

FOURNIER, B.; NKINAMUBANZI, P. C.; LU, D.; THOMAS, M.D.A.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J. Evaluation potential alkali-reactivity of concrete aggregates, how reliable are the current and new test methods?. In: Marc-André Bérubé Symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete. 2006, Montreal, Canadá. **Proceedings...** Canadá: Edited by Benoit Fournier, 2006. p. 21-43.

FRASCÁ, M.H.B.O.; SARTORI, P.L.P. Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. p.15-38.

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.

GAMBALE, E.A.; VEIGA, F.N.; FONTOURA, J.T.F.; PACELLI, W.A. Estudo comparativo de resultados de ensaios de reatividade por diferentes métodos de ensaios. In: Simpósio sobre Reatividade Alkali-agregado em Estruturas de Concreto, 1, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia 1997, p.61-68.

GARCIA-DIAZ, E, RICHE, J.; BULTEEL, D.; VERNET, C. Mechanism of damage for the alkali-silica reaction, **Cement and Concrete Research**. v.36, p.395-400. 2006

GILLOTT, J. E. Alkali-aggregate reactions in concrete. **Engineering Geology**, v. 9, p.303-326, 1975.

GILLOTT, J. E.; ROGERS, C. A. The behavior of silicocarbonatite aggregates from the Montreal area. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 471-480, 2003.

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.

GOMIDE, M.; HASPARYK, N.P.; ANDRADE, M.; BITTENCOURT, R. Investigação da expansão em laboratório de concretos contendo agregados com sulfetos. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 4., 2007, Araxá. **Anais...** Araxá: 2007.

GRATTAN-BELLEW, P. E.; LU, D.Y.; FOURNIER, B.; MITCHELL, L. Comparison of expansion in the concrete prism and concrete microbar test of an assorted suite of aggregate from several countries. 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. 251-256.

GRATTAN-BELLEW, P.E. Petrographic and technological methods for evaluation of concrete aggregates. In. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology**. Ed. V.S. Ramachandran e J.J. Beaudoin. New York: William Andrew Publishing. 2001.

GROSBOIS, M.; FONTAINE, E. Evaluation of the potential alkali-reactivity of concrete aggregates: performance of testing methods and a producer's point a view. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Quebec. **Proceedings...** Quebec, 2000b, pp 267-276.

GROSBOIS, M.; FONTAINE, E. Performance of the 60°C – accelerate concrete prism test for the evaluation of potential alkali-reactivity of concrete aggregates. INTERNATIONAL

CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Quebec. **Proceedings...** Quebec, 2000a, pp 277-286.

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

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.; BATTAGIN, A.; CASTRO, A.P.; SALLES, F.M., MUNHOZ, F.; ANDRADE, T.; KUPERMAN, S.C.; FILHO, J.M. Comportamento reativo de agregados brasileiros do ponto de vista da reação álcali-agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50., 2008, Salvador. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2008.

HASPARYK, N.P.; MUNHOZ, F.; SANCHEZ, L.; SALLES, L.; HAMASSAKI, L. Efeito dos álcalis e da finura do cimento nas expansões geradas pela reação álcali-agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

HOBBS, D.W. **Alkali-silica reaction in concrete.** Londres: Thomas Telford. 1988. 183p.

HÜNGER, K.J. The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p.1193-1205, 2007

HUNTER, R. J. **Introduction to modern colloid science.** New York: Oxford Science Publication, 1993.

HUNTER, R. J. **Zeta potential in colloid science: principles and applications.** New York: Academic Press, 1981.

IDORN, G. M.; JOHANSEN, V.; THAULOW, N. Assessment of causes of cracking in concrete. In : SKALNY, J.; MINDESS, S. **Materials Science of Concrete III.** Estados Unidos: American Ceramic Society, 1992. p.71-107.

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.

KIHARA, Y.; NETO, C. S.; PECCHIO, M. Practical evaluation of IPR index forecasting ASR on "granitic" rocks. **IBRACON Materials Journal**, v.2, n.2, p.91-96. 2006

KIHARA, Y.; SBRIGHI, C.; PECCHIO, M. Avaliação prática da previsão da reação álcali-silicato de rochas granitóides. In: Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

KIHARA, Y; SCANDIUZZI, L. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1993, v.1, p.319-338.

KLEIN,C.; HURLBUT,C.S. **Manual of Mineralogy.** 21 ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. 596p.

KORKANÇ, M.; TUGRUL, A. Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 505-512, 2005.

KURODA, T.; INOUE, S.; YOSHINO, A.; NISHIBAYASHI, S. Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing, China, 2004. p.736-743.

KURTIS, K.E.; MONTEIRO, P.J.M.; BROWN, J.T.; MEYER-ILSE, W. High resolution transmission soft x-ray microscopy of deterioration products developed in large concrete dams. **Journal of Microscopy**, v. 196, p. 288-298, 1999.

LE ROUX, A. Reactions alcali-granulat. **Journées d'Ouvrages d'Art**, Section: Geologie et Materiaux. Paris, mai 1988. p.43-44.

LE ROUX, A. Reactions liants-granulats: choix des materiaux – Les reactions liants-ranulats dans les bétons. **Journées d'Étude**, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, juin 1989. p.15-17.

LEE, C.; LIU, C.C.; WANG, W.C. An accelerate concrete prism soaking test for evaluating the alkali-reactivity of aggregates. 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. 273-281.

LEEMANN, A.; HOLZER, L. Alkali-aggregate reaction—identifying reactive silicates in complex aggregates by ESEM observation of dissolution features. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 796-801, 2005.

LEINZ, V.; AMARAL, S.E. **Geologia Geral**. 14 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2003.

LEPS, T.M. Historical perspective: alkali-aggregate reaction (AAR) – a brief history of its basic chemistry. In: ALKALI-AGGREGATE REACTIONS IN HYDROELECTRIC PLANTS AND DAMS, 2., 1995, Chattanooga, Tennessee. **Proceedings...** Tennessee, E.U.A., 1995. p. 1-8.

LINDGÅRD, J.; HAUGEN, M. A review of the Norwegian experience with the correlation between results obtained by use of petrographic analysis and the accelerated mortar bar test. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Quebec. **Proceedings...** Quebec, 2000, pp 405-414

LOPES, L.E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragens de concreto**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004. 144p.

LU, D.; ZHOU, X.; XU, Z.; LAN, X.; TANG, M.; FOURNIER, B. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete. **Cement and Concrete Research**, v.36, p.1157-1165. 2006.

MADUREIRA FILHO, J.B.; ATENCIO, D.; MCREATH, I. Minerais e rochas: constituintes da terra sólida. In: TEIXEIRA, W. et al. (Ed.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. p.27-42

- 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
- MAZON, B.H. **Princípios de geoquímica**. Tradução de Rui Ribeiro Franco. São Paulo: Polígono, Editora da USP, 1971.
- METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3. ed. New York: McGraw Hill. 2006.
- METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI. 1994.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. Berkeley: University of California, 1992, Chapter 7, p.111-130.
- MONTEIRO, J.P.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
- MUNHOZ, F.A.C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2007. 166p.
- MYERS, D. **Surfaces, interfaces, and colloids: principles and applications**. 2. ed. New York: John Wiley; Sons, 1999.
- OBERHOLSTER, R. E.; VAN AARDT, J. H. P.; BRANDT, M. P. Durability of cementitious systems. In: BARNES, P (Ed.). **Structures and performance cement**. London: Applied Science Publishers Ltd, 1983. p.380-397
- 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.
- PACELLI, W.A. Tema II: Casos históricos – Barragens e outras estruturas. In: RELATÓRIO FINAL – SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 1999, Goiânia. **Anais...** Goiânia. 1999. p.81-90.
- 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.
- PECCHIO, M.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A.F.; ANDRADE, T. Produtos da reação álcali-silicato em concretos de edificações da região metropolitana de Recife. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, p.1-16, 2006.
- PETTIFER, K.; NIXON, P.J. Alkali-metal sulphate – a factor common to both alkali-aggregate reaction and sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**, v.10, n.2, p.173-181, 1980

PONCE, J.M.; BATIC, O.R. Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. **Cement and Concrete Research**, v.36, p.1148-1156, 2006

POOLE, A.B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p.1-29.

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

RAMACHANDRAN, V.S.; BEAUDOIN, J.J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology**. Principles, techniques and applications. Canadá: William Andrew Publishing/Noyes Publications, 2001.

REGOURD, M. Alteration interne des bétons - la reaction alcalis-granulats - **La durabilité des structures beton em béton**. Travaux., Paris, p.62-67. 1988.

RIBEIRO, E.M. **Caracterização de agregados graúdos do Rio de Janeiro para concreto estrutural**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006. 343p.

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., 2004, China. **Proceedings...** China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004. p. 973-982.

RODRIGUES, E.P.; KIHARA, Y.; SBRIGHI, C. 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, 1, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia 1997, p.151- 159.

RODRIGUES, F.A.; MONTEIRO, P.J.M.; SPOSITO, G. The alkali-silica reaction: The effect of monovalent and bivalent cations on the surface charge of opal. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1549-1552, 2001.

RODRIGUES, P.P.F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 2 ed. São Paulo: ABCP. 1990.

RUBERTI, E.; SZABÓ, G.A.J.; MACHADO, R. Rochas Metamórficas. In: TEIXEIRA, W. et al. (Ed.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. p.382-398.

SABBAG, A.F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2003. 113p.

SAINT-PIERRE, F.; RIVARD, P.; BALLIVY, G. Measurement of alkali-silica reaction progression by ultrasonic waves attenuation. **Cement and Concrete Research**, 37, pp.948-956. 2007

SALLES, F.M. **A reatividade potencial de agregados para concreto**. Ilha Solteira: CESP, 2000. CD-ROM. Windows

SALLES, F.M.; OLIVEIRA, P.J.R. Uma abordagem sobre a reatividade de basaltos com os álcalis do cimento. In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-agregado em Estruturas de Concreto, 1, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia 1997, p.111-122.

SANCHEZ, L.F.M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregados em concretos**. Dissertação (mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2008. 170p.

SANTOS, P.S. **Ciências e Tecnologia de Argilas**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1989. 408p.

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 / William Andrew Publishing, 2001, cap. 7, p. 231-274.

SHAYAN, A. Alkali-aggregate reaction and basalt aggregates. 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. 1130-1135.

SHAYAN, A.; IVANUSEC, I. An experimental clarification of the association of delayed ettringite formation with alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Composites**, v.18, p.161-170, 1996.

SHAYAN, A.; XU, A. Effects of cement composition and temperature of curing on AAR and DEF expansion in steam-cured concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing, China, 2004. p.773-788.

SILVA, I.O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali agregado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2007. 141p.

SILVA, P.N., **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo de Paulo Afonso/CHESF**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2007. 274p.

SILVEIRA, A.L.Z.P. **Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 2006. 202p.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**: Relatório A anual 2005. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 9 jun. 2007.

STANTON, T.E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **Proceeding of American Society of Civil Engineers**, v.66, n.10, p.1781-1811. 1940.

STARK, D. Alkali-silica reactivity: some reconsiderations. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 92-94, 1980.

STOKES, K.R. Further investigations into the nature of the materials chlorophaeite and palagonite. **Mineralogical Magazine**, v.38, p.205-214. 1971.

SZABÓ, G.A.J.; BABINSKI, M.; TEIXEIRA, W. Rochas Ígneas. In: TEIXEIRA, W. et al. (Ed.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. p.327-346.

TANG, M.; DENG, M.; LAN, X.; HAN, S. Studies on alkali-carbonate reaction. **ACI Materials Journal**, v.91, n.1, p.26-29. 1994

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. 2. ed London: Thomas Telford, 1997

TEIXEIRA, W. Vulcanismo: produtos e importância para a vida. In: TEIXEIRA, W. et al. (Ed.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. p.347-380.

THOMAS, M.D.A.; WIESE, D.; CARATIN, H.; STROCZKOWSKI, J. Ultrasound tomography applied to AAR-affected concrete structures. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALIAGGREGATE REACTIONS IN HYDROELECTRIC PLANTS AND DAMS, 1995, Chattanooga/Tennessee. **Proceedings...** Chattanooga/Tennessee: United States Committee On Large Dams (USCOLD), 1995. p.359-372.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2006. 178p.

TIECHER, F.; DAL MOLIN, D.C.C. Método de ensaio da ASTM C 1260: Avaliação das idades prescritas para o estabelecimento da potencialidade reativa dos agregados. In: 2º Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006. Rio de Janeiro, **Anais em CD...**São Paulo: IBRACON, Editores: Selmo Kuperman & Nicole Hasparyk, 2006.

TUNG, W.S.; KUPERMAN, S.C.; MELO, I.A.; DARDIS, C.R.; AUGUSTINIS, J.A.; OHARA, M.T. A SABESP e a reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, p.1-16, 2006.

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

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2007. 208p.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento dos agregados reativos do estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 2002. 213p.

VALDUGA, L.; SGARBOSSA, F.; DAL MOLIN, D.C.C.; PAULON, V.A. Influência da forma do agregado, da relação água/cimento e da consistência da argamassa na verificação da potencialidade reativa do agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: IBRACON, 2005.

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 AARDT, J.H.P.; VISSER, S. Formation of hydrogarnets: calcium hydroxide attack on clays and feldspars. **Cement and Concrete Research**, v.7, n.1, p.39-44, 1977b.

VAN VLACK, L.H. **Princípio de Ciências dos Materiais**. Tradução de Luiz Paulo Camargo Ferrão. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1970. 427p.

VEIGA, F.N.; GONÇALVES, I.N.; ARMELIN, J.L.; HASPARYK, N.P. Reação álcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos. In: 1º SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p.13-20.

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

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: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 39., 1997, São Paulo. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 1997. p.77-91.

WAKIZAKA, Y. Alkali-silica reactivity of Japanese rocks. **Engineering Geology**, v.56, p.211-221, 2000

WANG, H.; GILLOTT, J.E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. **Cement and Concrete Research**, v. 21, n. 4, p. 647-654, 1991.

WHITEHURST, E.A. Soniscope test concrete structures. **ACI Journal**, 47 (6). 1951, p.433-444

WYLLIE, P.J. **A Terra, nova geologia global**. Tradução de J. R. Araújo e M. C. Serrano Pinto. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 1976. 384p.

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; WU, B.; ZHANG, N. Influence of aggregate size grading on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1393-1396, 1999.

ANEXO A

Propriedades dos minerais

Na Tabela A.1 se resumem as principais propriedades físicas, ópticas, morfológicas e químicas dos minerais, que são função de sua estrutura cristalina e composição química, com base em: Dana e Hurlbut (1969), Ernst (1971), Madureira Filho, Atencio e McReath (2000), Frascá e Sartori (1998) e Leinz e Amaral (2003):

Tabela A.1 – Propriedades dos minerais

Propriedade	Característica
Hábito	É a forma geométrica externa, habitual, exibida pelos cristais dos minerais, que reflete a sua estrutura cristalina
Transparência	É quando um mineral não absorve ou absorve pouco a luz. Neste caso são ditos transparentes
Brilho	É a propriedade que os minerais possuem de refletir a luz. Entretanto, alguns minerais (pirita) podem sofrer leve oxidação superficial alterando esta característica
Cor	A cor de um mineral resulta da absorção seletiva da luz, e está diretamente ligada aos defeitos estruturais, composição química ou impurezas contidas no mineral
Traço	É a cor do pó do mineral, obtida quando riscado contra uma placa ou um fragmento de porcelana, em geral branca
Dureza	É a resistência que o mineral apresenta ao ser riscado
Tenacidade	É a resistência oferecida pelo mineral ao ser rasgado, moído, dobrado ou triturado
Fratura	É a superfície irregular e curva resultante da quebra de um mineral sob a ação de uma força diferente do plano de clivagem ou de partição
Clivagem	Propriedade de um mineral se fragmentar segundo direções determinadas
Densidade relativa	É o número que indica quantas vezes certo volume do mineral é mais pesado que o mesmo volume de água (a 4°C)
Germinação	É a propriedade de certos cristais aparecerem intercrescidos de maneira regular, ou seja, compostos que exibem partes simetricamente relacionadas com orientações estruturais divergentes
Magnetismo	Minerais com possuem o elemento ferro em sua constituição e são afetados pelo campo magnético

ANEXO B

Dosagens dos concretos

Nas Tabelas B.1 a B.3 são apresentadas as planilhas de dosagem utilizadas na confecção dos concretos. Todos os concretos foram confeccionados com areia padrão do IPT na granulometria:

- # 2,4 mm - # 1,2 mm: 35%
- # 1,2 mm - # 0,6 mm: 25%
- # 0,6 mm - # 0,3 mm: 25%
- # 0,3 mm - # 0,15 mm: 15%

Já os agregados graúdos das amostras BA.3, BA.4 e BA.7, foram preparados na granulometria:

- # 19,0 mm - # 12,5 mm: 33%
- # 12,5 mm - # 9,5 mm: 33%
- # 9,5 mm - # 4,75 mm: 33%

Tabela B.1 – Dosagem BA.3

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS				
Material	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária compactada (g/cm ³)	Umidade (%)	Absorção (%)
Cimento	3020	-	-	-
Areia	2650	-	1,54	0,20
Brita	2890	1610	1,60	1,50
Água	1000	-	-	-

PARÂMETROS DO TRAÇO – CONDIÇÃO SSS				
Consumo de cimento	420 kg/m ³	Traço unitário (c : a : b : a/c) 1,000 : 1,884 : 2,568 : 0,450	MF da areia	2,8
Consumo de areia	791 kg/m ³		Volume de areia	0,299
Consumo de brita	1079 kg/m ³		% em massa de areia	42,3%
Consumo de água	189 kg/m ³		Dmáx da brita	19,0 mm
Relação a/c	0,45		Volume compactado seco	67%
Teor de argamassa seca	52,9%		Volume por betonada	21,4 l

TRAÇO FINAL			
Cimento: 9,00 kg	Areia: 17,19 kg	Brita: 23,09 kg	Água: 3,80 kg

PARÂMETROS DO CONCRETO					
Ar incorporado	Massa específica		Temperatura		Abatimento
Teórico	1,6%	Teórica	2.479 kg/m ³	Concreto	24,7°C
Medido	2,2%	Medida	2.440 kg/m ³	Ambiente	23,5°C
					40 mm

Tabela B.2 – Dosagem BA.4

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS						
Materiais	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária compactada (g/cm³)	Umidade (%)	Absorção (%)		
Cimento	3020	-	-	-		
Areia	2650	-	1,54	0,20		
Brita	2890	1690	1,63	1,60		
Água	1000	-	-	-		
PARÂMETROS DO TRAÇO – CONDIÇÃO SSS						
Consumo de cimento	420 kg/m³	Traço unitário (c : a : b : a/c) 1,000 : 1,767 : 2,696 : 0,450	MF da areia	2,8		
Consumo de areia	742 kg/m³		Volume de areia	0,280		
Consumo de brita	1132 kg/m³		% em massa de areia	39,6%		
Consumo de água	189 kg/m³		Dmáx da brita	19,0 mm		
Relação a/c	0,45		Volume compactado seco	67%		
Teor de argamassa seca	50,7%		Volume por betonada	21,4 l		
TRAÇO FINAL						
Cimento: 9,00 kg		Areia: 16,12 kg	Brita: 24,26 kg	Água: 3,83 kg		
PARÂMETROS DO CONCRETO						
Ar incorporado	Massa específica		Temperatura		Abatimento	
Teórico	2,0%	Teórica	2.484 kg/m³	Concreto	24,7°C	40 mm
Medido	2,3%	Medida	2.433 kg/m³	Ambiente	23,5°C	

Tabela B.3 – Dosagem BA.7

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS						
Materiais	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária compactada (g/cm³)	Umidade (%)	Absorção (%)		
Cimento	3020	-	-	-		
Areia	2650	-	1,54	0,20		
Brita	2980	1620	0,59	0,90		
Água	1000	-	-	-		
PARÂMETROS DO TRAÇO – CONDIÇÃO SSS						
Consumo de cimento	420 kg/m³	Traço unitário (c : a : b : a/c) 1,000 : 1,941 : 2,584 : 0,450	MF da areia	2,8		
Consumo de areia	815 kg/m³		Volume de areia	0,308		
Consumo de brita	1085 kg/m³		% em massa de areia	42,9%		
Consumo de água	189 kg/m³		Dmáx da brita	19,0 mm		
Relação a/c	0,45		Volume compactado seco	67%		
Teor de argamassa seca	53,2%		Volume por betonada	21,4 l		
TRAÇO FINAL						
Cimento: 9,00 kg		Areia: 17,71 kg	Brita: 23,33 kg	Água: 3,89 kg		
PARÂMETROS DO CONCRETO						
Ar incorporado	Massa específica		Temperatura		Abatimento	
Teórico	2,5%	Teórica	2.510 kg/m³	Concreto	25,0°C	50 mm
Medido	2,4%	Medida	2.446 kg/m³	Ambiente	24,0°C	

A quantidade de NaOH a ser adicionada à água de amassamento para aumentar o teor de álcalis em todos os três concretos foi determinada da seguinte forma:

- Consumo de cimento por 1 m³ de concreto = 420 kg
- Quantidade de álcalis no concreto = 420 kg x 1,06% = 4,45 kg
- Quantidade de álcalis especificada para o concreto = 420 kg x 1,25% = 5,25 kg
- Quantidade de álcalis a ser adicionada ao concreto = 5,25 kg – 4,45 kg = 0,80 kg

A diferença (0,80 kg) é a quantidade de álcalis, expressa como Na₂O equivalente, a ser adicionada à água de amassamento. Para o cálculo do fator de conversão de Na₂O para NaOH foi seguido o raciocínio apresentado na Tabela B.4:

Tabela B.4 – Fator de conversão de Na₂O para NaOH

Na₂O + H₂O → 2 NaOH	
Composto	Peso molecular
Na ₂ O	61,98
NaOH	39,997
Fator de conversão = $2 \times 39,997 / 61,98 = 1,291$	
Quantidade de NaOH necessária no exemplo = $0,80 \times 1,291 = 1,030 \text{ kg/m}^3$	

Como foram confeccionados 21,4 litros de concreto por betonada, adicionou-se 22,07 g de NaOH na água de amassamento em todos os concretos.

ANEXO C

Micrografias e resultados de DRX

Nas Figura C.1 a C.22, são apresentadas as micrografias obtidas na análise petrográfica para todas as abordadas nesta pesquisa.

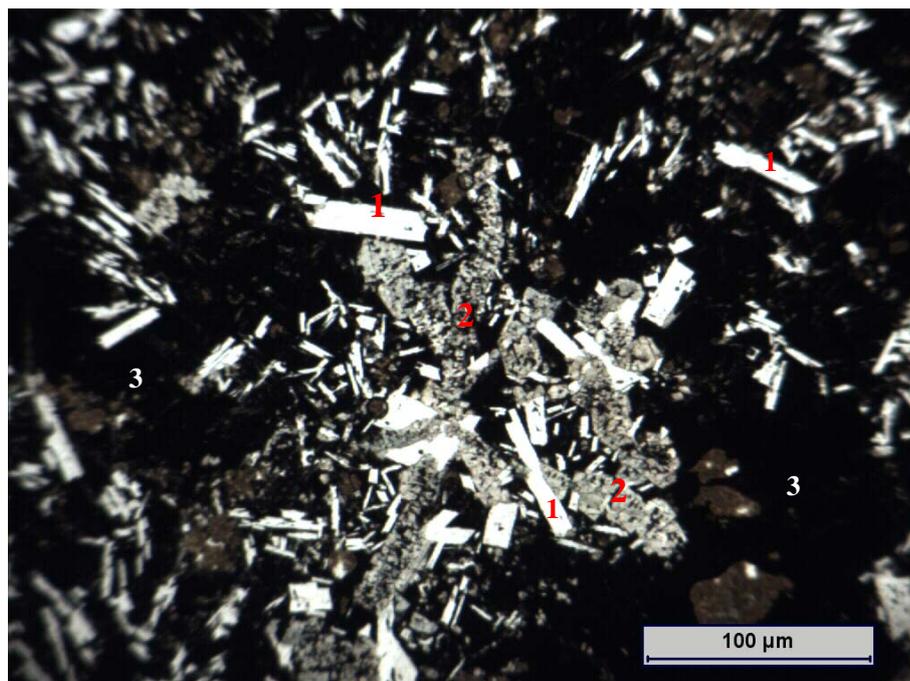


Figura C.1 – Micrografia da amostra BA.1

Vista geral da lâmina. Ripas de plagioclásio (1) associado a cristais de piroxênio (2), formando a textura subofítica; material intersticial formado por vidro vulcânico escuro rico em ferro (3). Imagem ao microscópio ótico com nicóis descruzados.

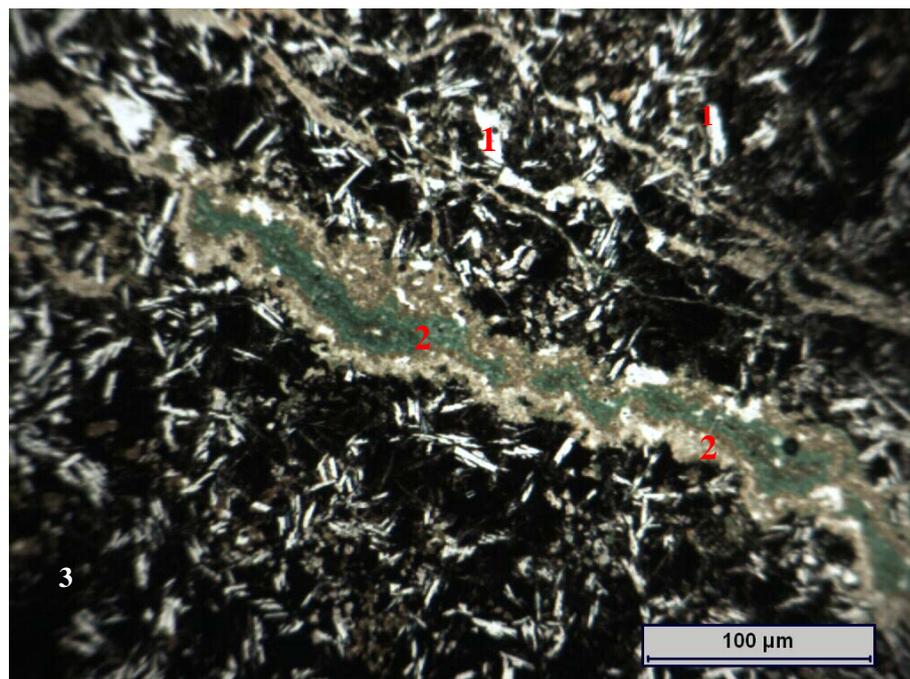


Figura C.2 – Micrografia da amostra BA.2

Vista geral da lâmina. Ripas de plagioclásio (1); veio preenchido por cloroféita (2); material intersticial formado por vidro vulcânico escuro rico em ferro (3). Imagem ao microscópio óptico com nicóis descruzados.

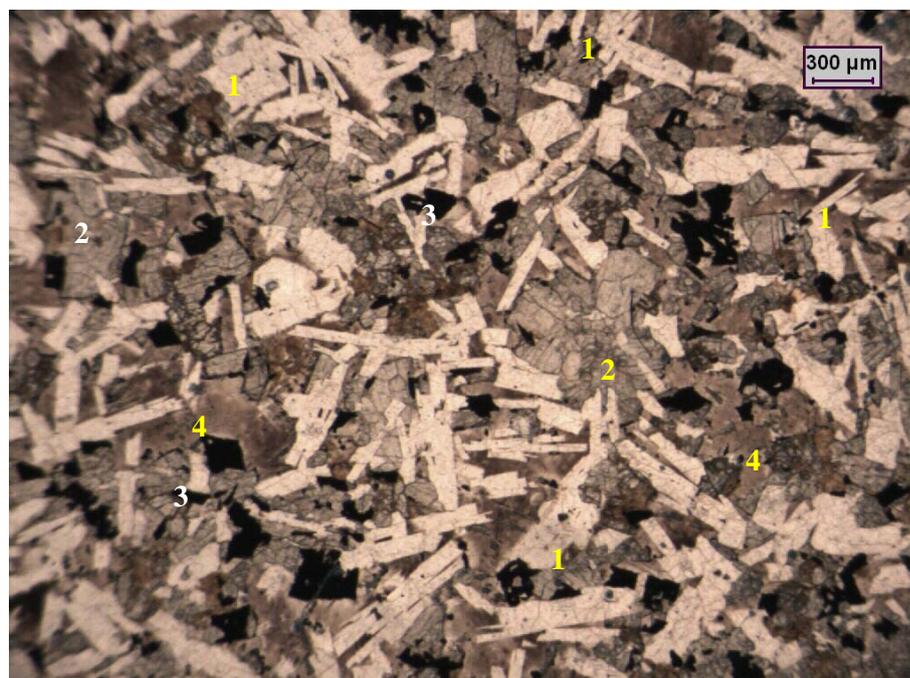


Figura C.3 – Micrografia da amostra BA.3

Vista geral da lâmina. Ripas de plagioclásio (1), piroxênio (2); opaco (3); vidro vulcânico (4). Nicóis paralelos.

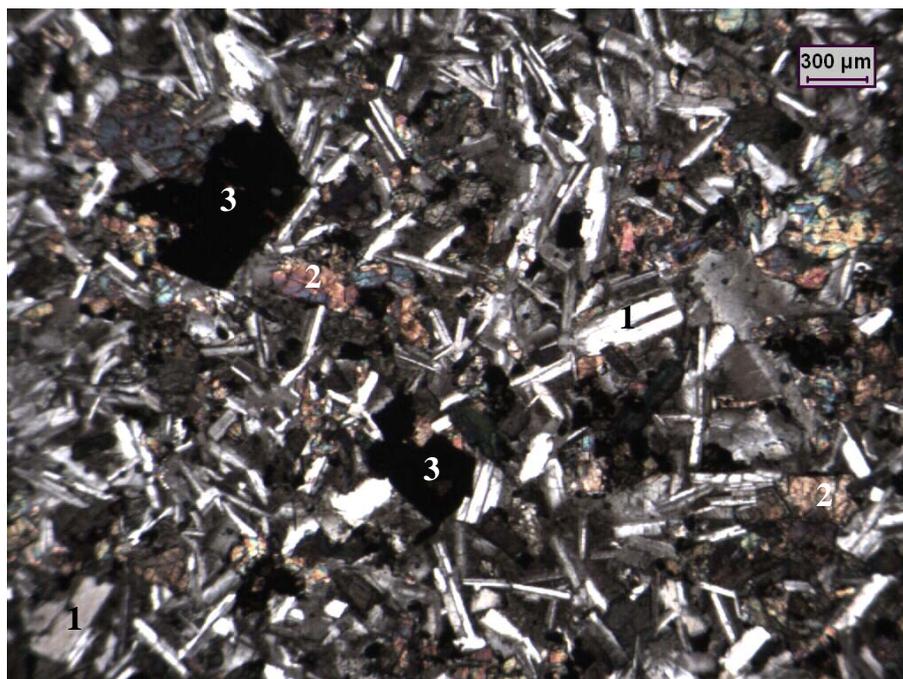


Figura C.4 – Micrografia da amostra BA.4

Vista geral da lâmina. Ripas de plagioclásio (1); piroxênio (2); opacos (3). Nicóis cruzados.

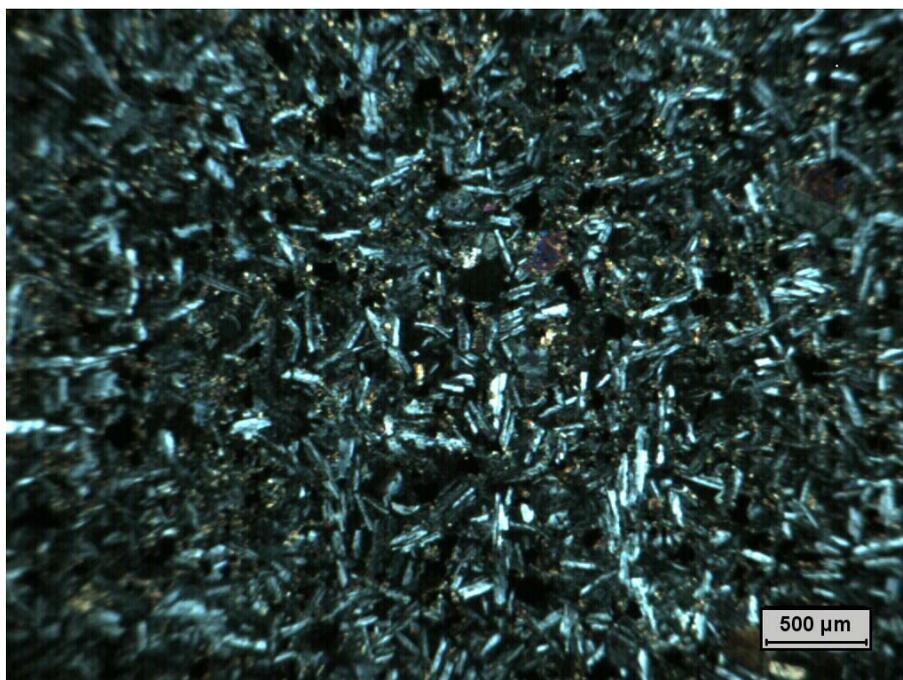


Figura C.5 – Micrografia da amostra BA.5

Vista geral da lâmina. Ripas de plagioclásio (claro); material intersticial formado por vidro vulcânico escuro rico em ferro. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados.

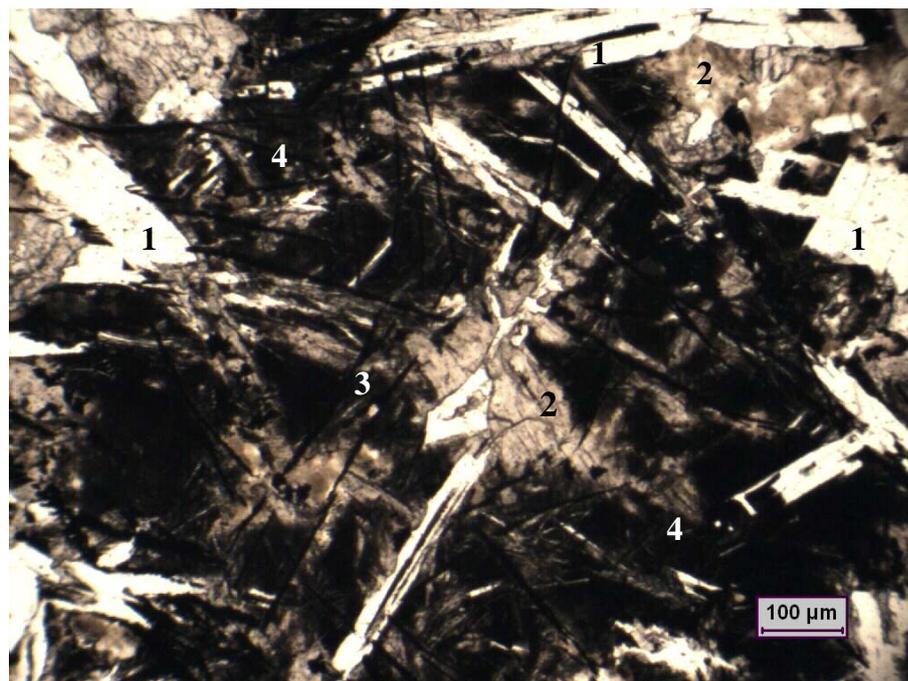


Figura C.6 – Micrografia da amostra BA.6

Vista geral da lâmina. Ripas de plagioclásio (1), piroxênio (2); opaco agregados e agulhas (3). nicóis paralelos.

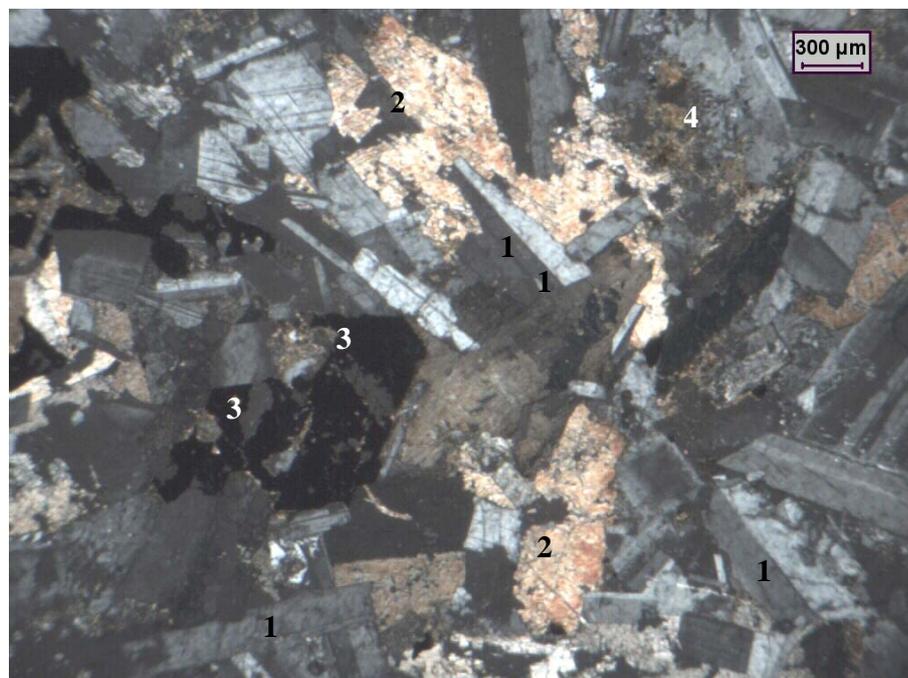


Figura C.7 – Micrografia da amostra BA.7

Vista geral da lâmina. Ripas de plagioclásio (1); piroxênio (2); opacos (3); micropegmatito (4). nicóis cruzados.

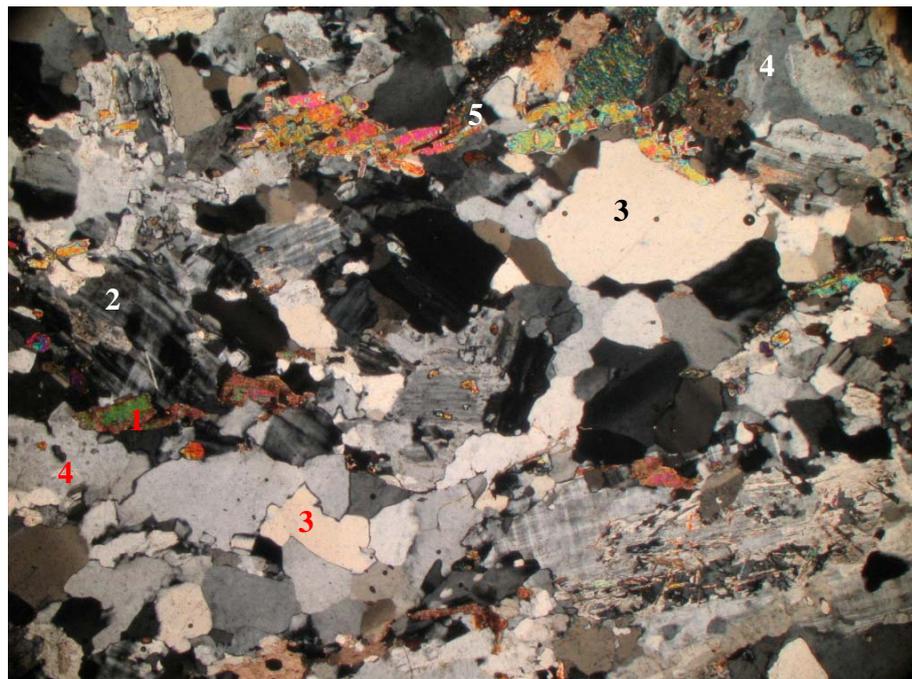


Figura C.8 – Micrografia da amostra GR.1

Vista geral da lâmina: Biotita (1); K-feldspato (2); quartzo (3); plagioclásio (4); muscovita (5). Imagem ao microscópio óptico com luz polarizada. Aumento de 10x

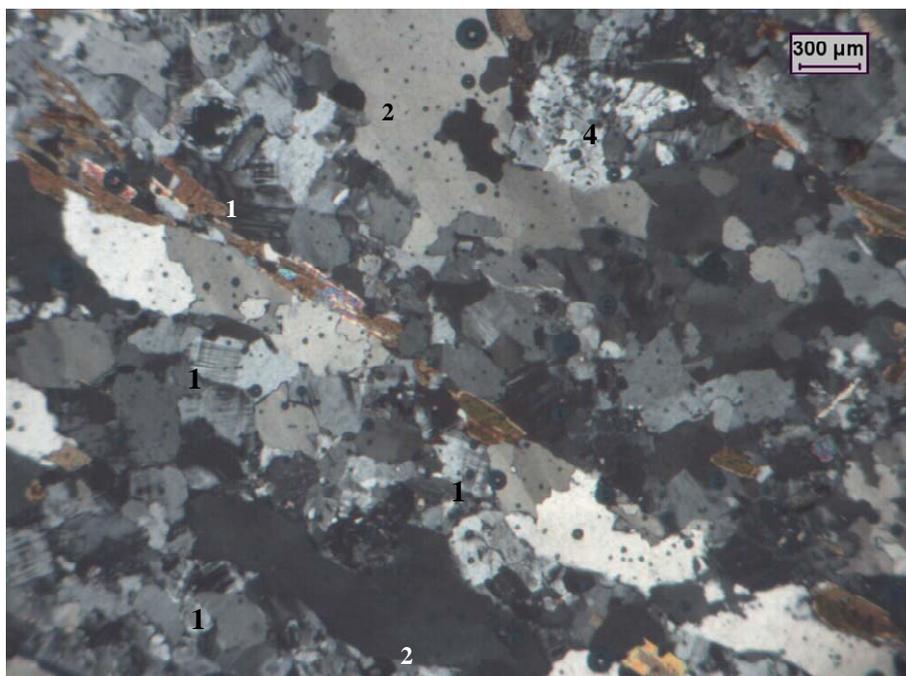


Figura C.9 – Micrografia da amostra GR.2

Vista geral da lâmina. Feldspato (1); Quartzo (2); micas (3); intercrescimento gráfico de quartzo e feldspato (4). Nicóis cruzados

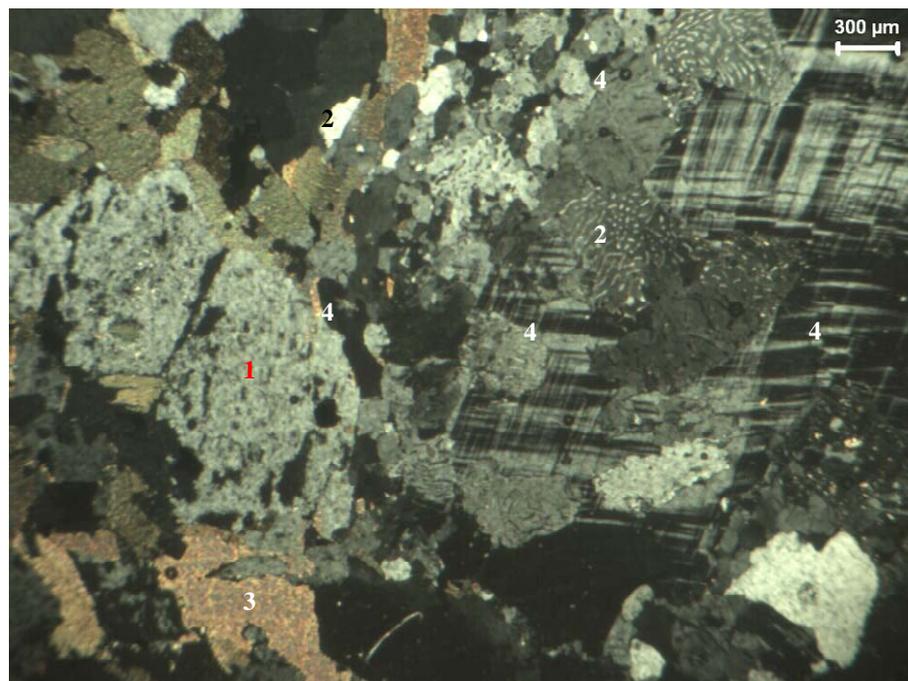


Figura C.10 – Micrografia da amostra GR.3

1.Plagioclásio; 2. Quartzo; 3. Biotita; 4. K-Feldspato (*microclina*). Nicóis cruzados.

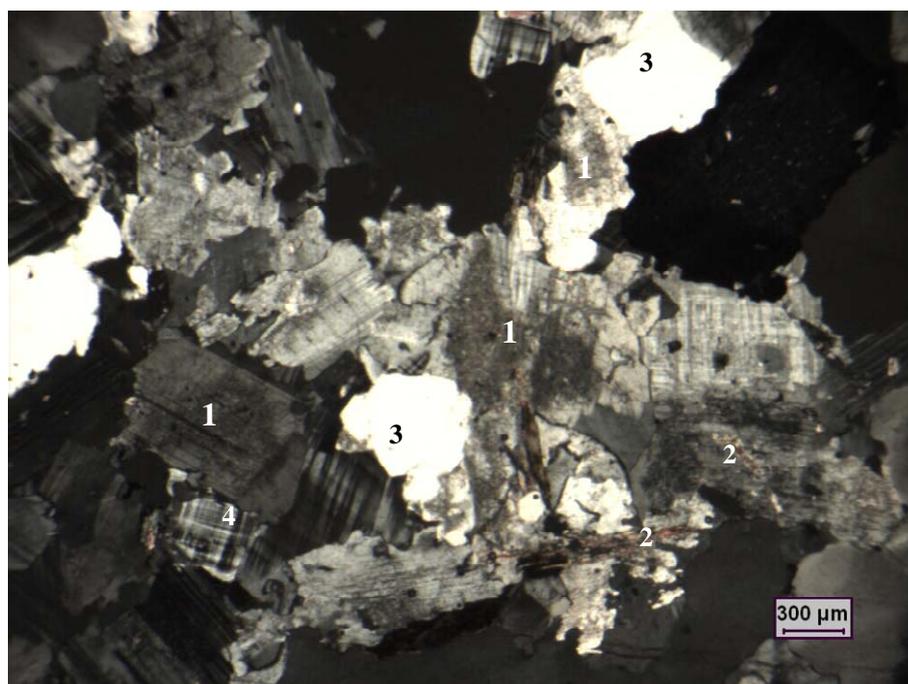


Figura C.11 – Micrografia da amostra GR.4

Vista geral da lâmina. Plagioclásio saussuritizado (1); biotita (2); Quartzo (3); Microclina (4)

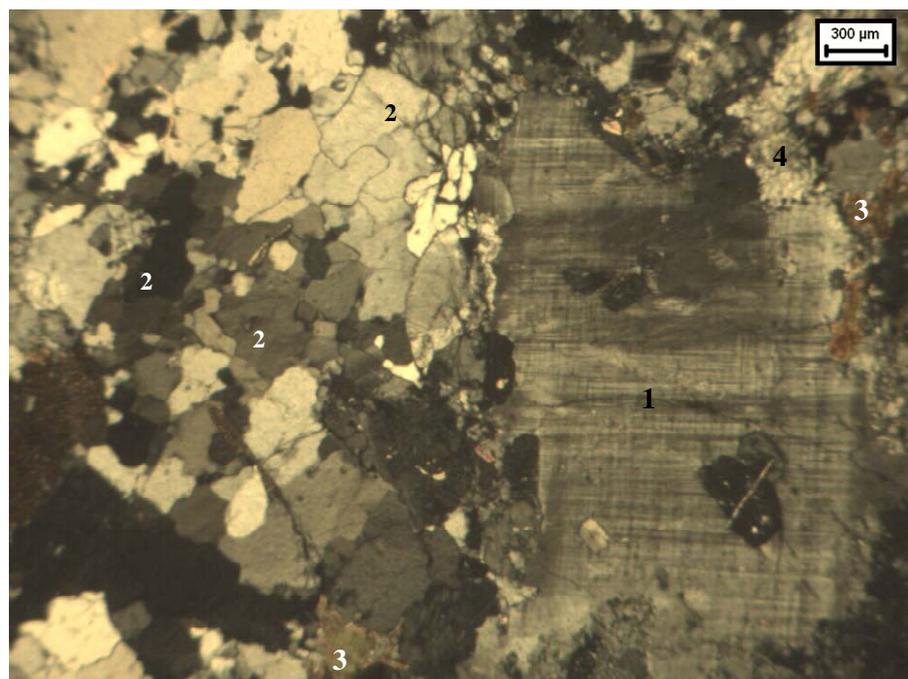


Figura C.12 – Micrografia da amostra GR.5

Vista geral da lâmina. Microclínio (1); quartzo (2); biotita (3); intercrescimento mirmequítico (4). Nicóis cruzados

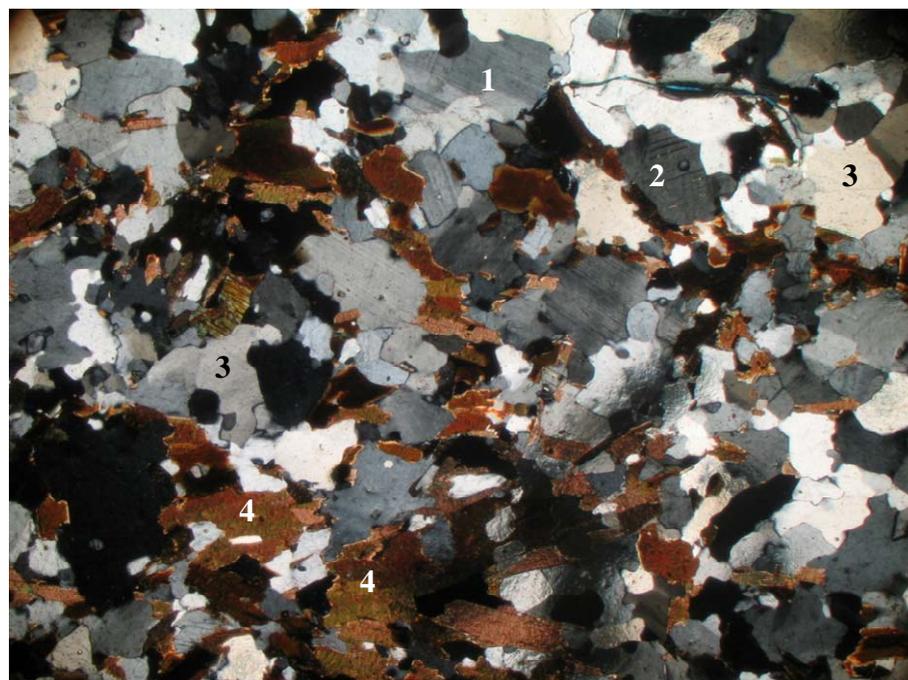


Figura C.13 – Micrografia da amostra GD.1

Vista geral da lâmina. 1. Plagioclásio; 2. K-feldspato; 3. Quartzo; 4. Biotita. Imagem ao microscópio ótico com luz polarizada. Aumento 10x

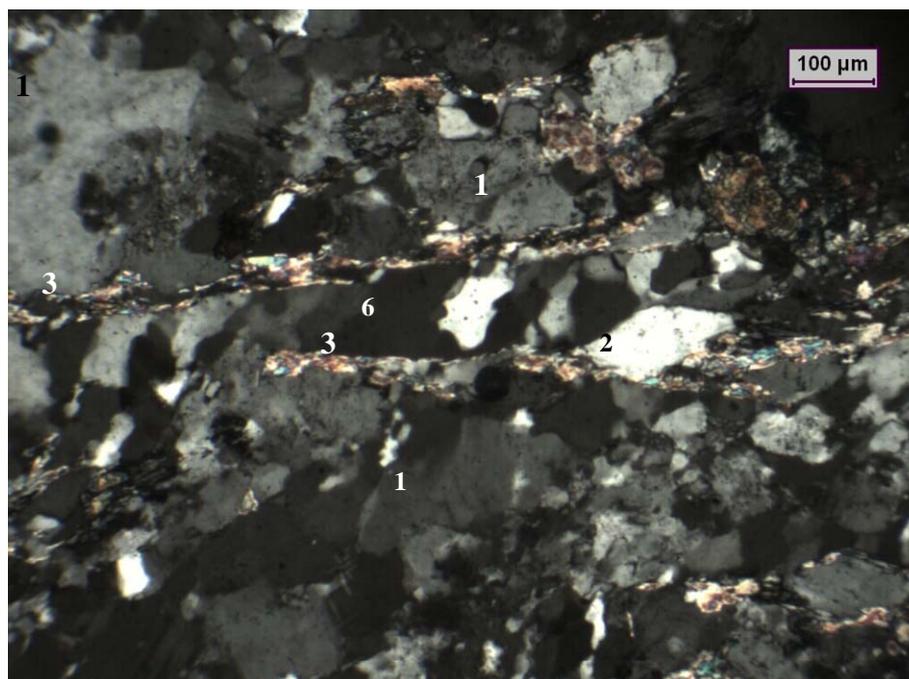


Figura C.14 – Micrografia da amostra ML.1
 Vista geral da lâmina. Feldspato (1); Quartzo (2); bandas micáceas (3)

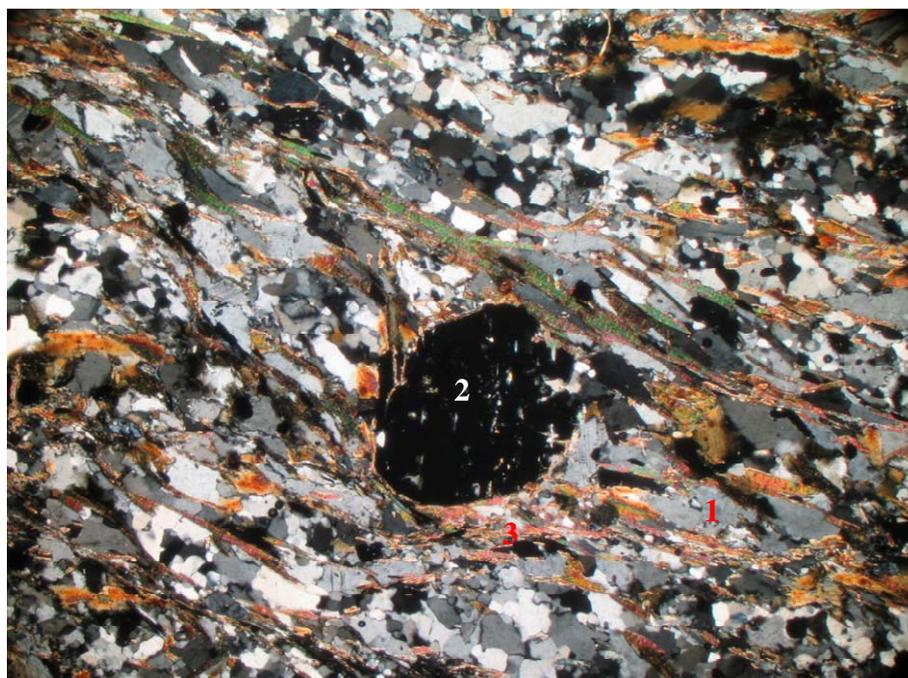


Figura C.15 – Micrografia da amostra QX.1
 Vista geral da lâmina. 1. Quartzo; 2. Granada; 3. Muscovita. 4. Biotita. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados. Aumento de 10x

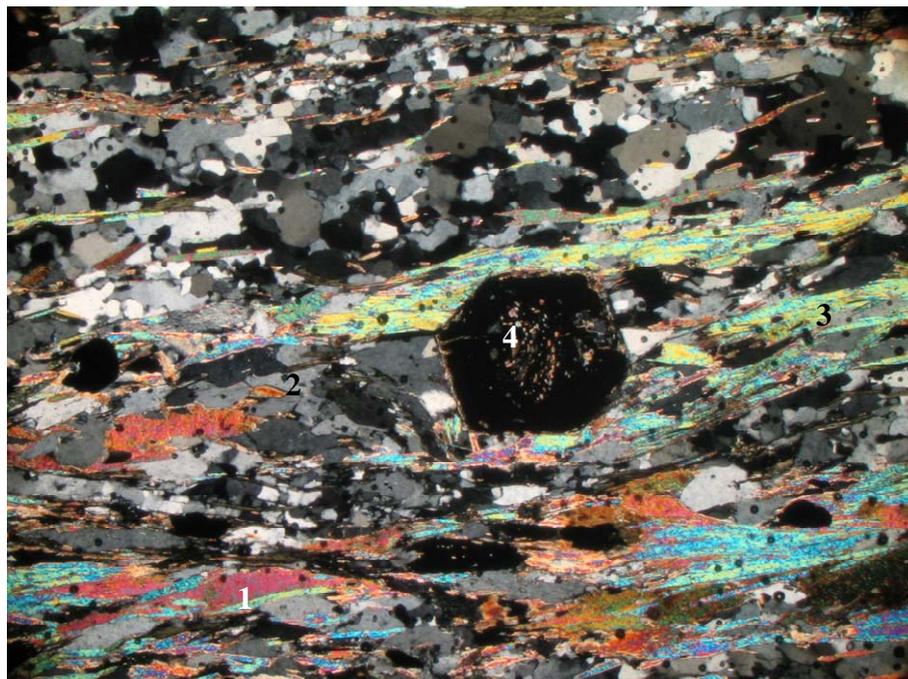


Figura C.16 – Micrografia da amostra QX.2

Vista geral da lâmina. 1. Biotita; 2. Quartzo; 3. Muscovita; 4. Granada. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados. Aumento de 10x.

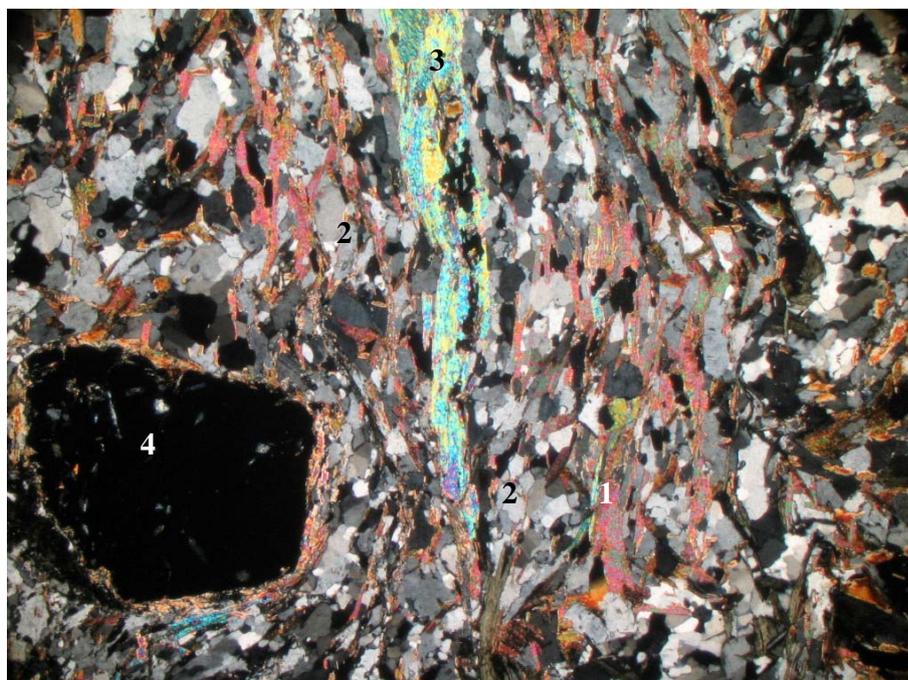


Figura C.17 – Micrografia da amostra QX.3

Vista geral da lâmina. Biotita (1); quartzo (2); muscovita (3); granada (4). Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados. Aumento de 10x.

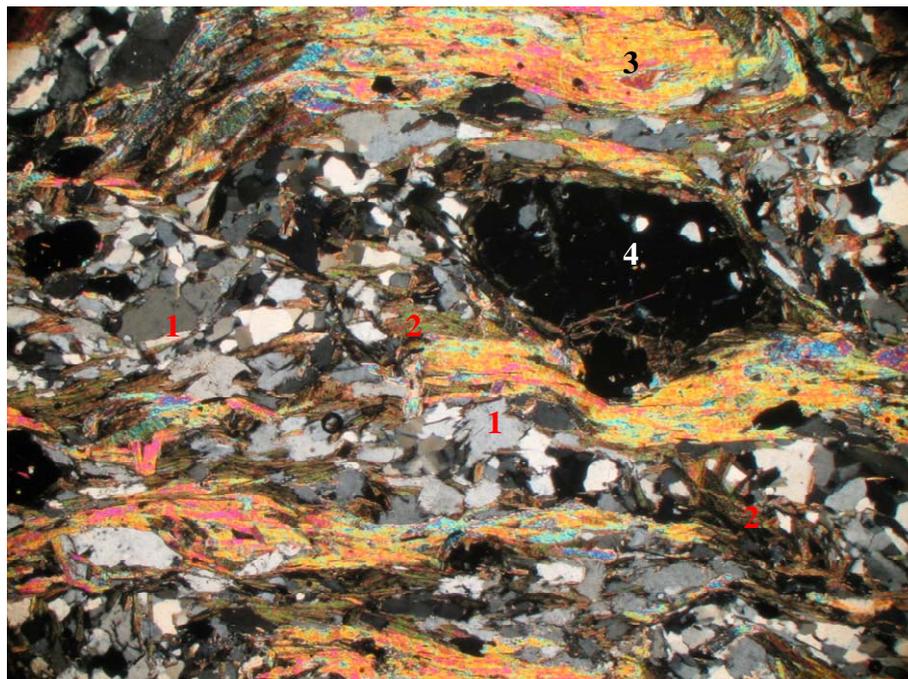


Figura C.18 – Micrografia da amostra QX.4

Vista geral da lâmina. 1. Quartzo; 2. Biotita; 3. Muscovita; 4. Granada. Imagem ao microscópio óptico com nicóis cruzados. Aumento 10x.

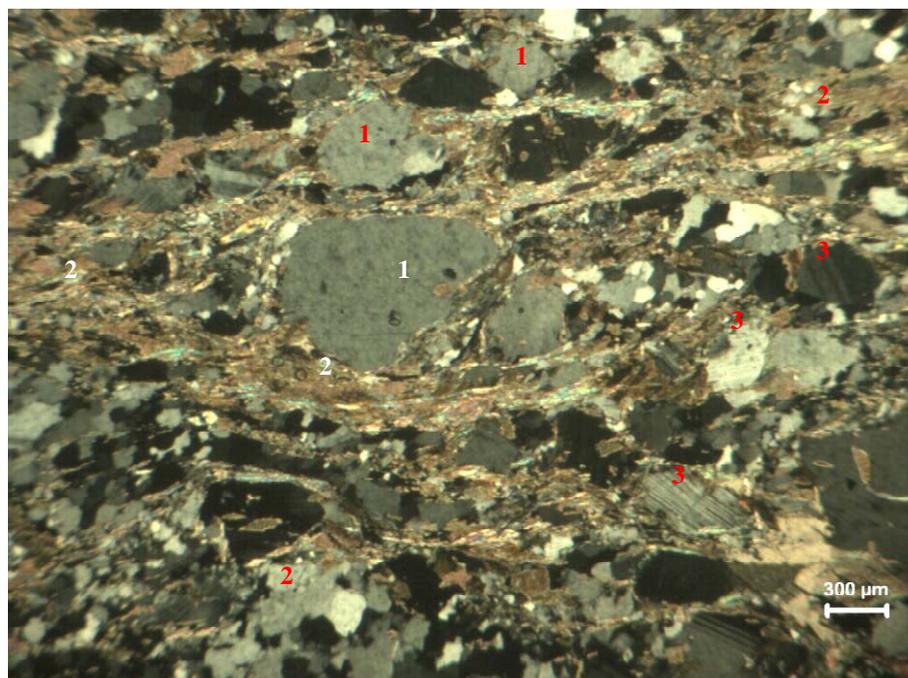


Figura C.19 – Micrografia da amostra QX.5

Vista geral da lâmina. Quartzo (1) apresentando sombra de pressão; muscovita (2); plagioclásio (3). Nicóis cruzados.

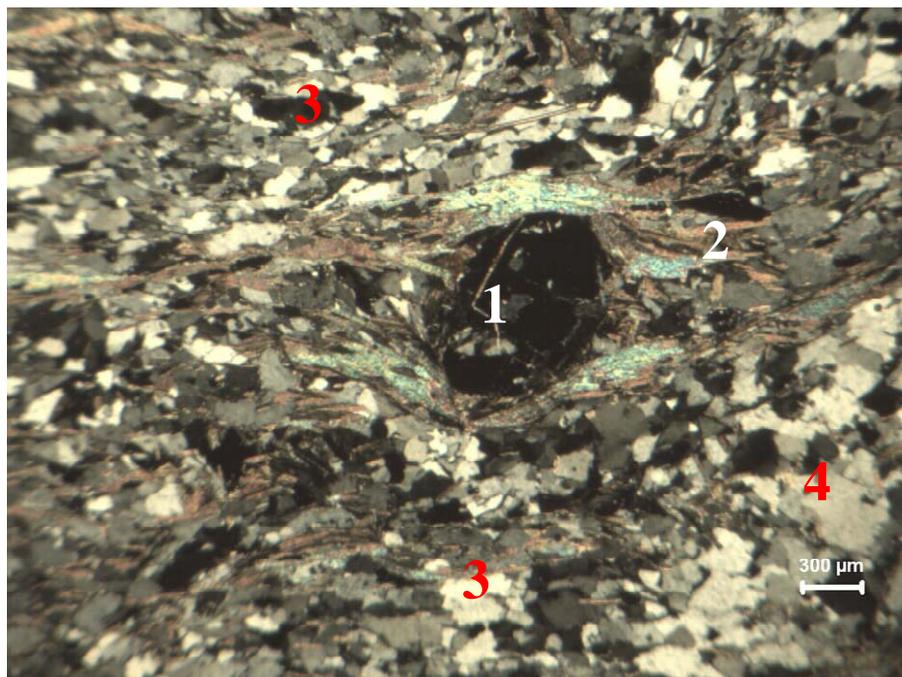


Figura C.20 – Micrografia da amostra QX.6

Fenocristal de granada (1) envolvido por nível deformado de micas (2), formando sombra de pressão em presença de quartzo (3) e feldspatos (4). Nicóis cruzados.



Figura C.21 – Micrografia da amostra QZ.1

Vista geral do Quartzito. Nota-se os quartzos estirados, suturados e com extinção ondulante; e finas palhetas (coloridas) de muscovita orientadas entre os grãos de quartzo. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados. Aumento 10x.

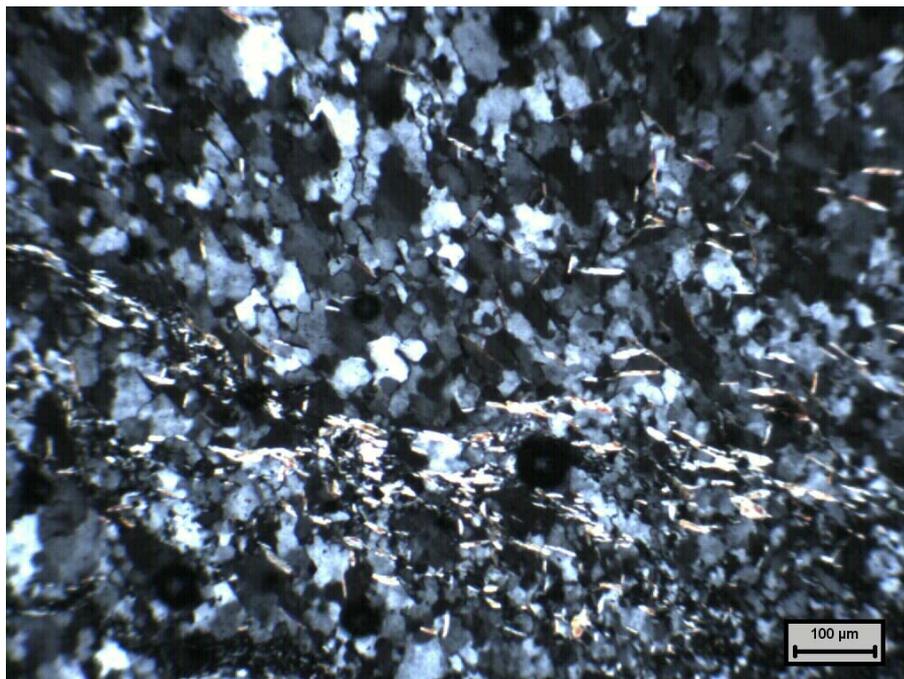


Figura C.22 – Micrografia da amostra QZ.2

Vista geral do Quartzito. Nota-se os quartzos estirados, suturados e com extinção ondulante; e finas palhetas (coloridas) de muscovita orientadas entre os grãos de quartzo. Imagem ao microscópio óptico com nicóis cruzados. Aumento 10x.

A técnica de difratometria de raios-X consiste em determinar as distâncias mantidas pelos íons ou átomos formadores dos cristais (distâncias interplanares), através do conhecimento do ângulo formado pelo feixe de raios-X incidente e o plano atômico que o difrata e, do comprimento de onda desses raios. Esta técnica tem sido muito utilizada na análise de inúmeros materiais como: materiais cimentícios, rochas, solos e concretos, a fim de qualificar os minerais constituintes de cada material. Deve-se ressaltar que o limite de detecção do método, nas condições usuais de trabalho, é de 5%, ou seja, constituintes que ocorram na amostra abaixo deste limite provavelmente não serão captados.

As amostras foram submetidas à desagregação com o uso de moinho orbital até obtenção de 100% do material passante na peneira de 325 mesh Tyler (0,043mm).

Concluída esta etapa, parte do material foi analisada no Difratômetro de Raios-X pelo Método do Pó Não-Orientado (Análise Integral).

Na seqüência, procedeu-se à separação, por sedimentação em coluna, da fração argila destas amostras seguida por montagem em vidro de 03 lâminas orientadas para cada registro, ou seja, apenas com deslizamento de uma lâmina sobre a que contém a “lama” para orientação.

Nestas lâminas fez-se uma Análise Natural (apenas com secagem ao ar), uma após saturação com etileno-glicol em dessecador, colocado sobre chapa aquecida a 50°C, por 12 horas, para garantir a completa saturação da atmosfera interna e assim, possibilitar a identificação dos argilominerais expansivos, caso existam. Após a retirada das amostras do dessecador, as mesmas foram levadas imediatamente ao difratômetro de raios-X para análise (Análise Glicolada). Outro

tratamento dado às amostras foi à calcinação da “fração argila” a 550°C, por 3 horas (Análise Calcínada). Esta análise serve para indicar a presença de minerais que passam por retração de sua estrutura nestas condições (caulinita, gibbsita, goethita etc.).

Nas Figuras C.23 a C.29 são apresentados os difratogramas dos basaltos, sendo a curva vermelha referente à análise calcínada, a verde à análise gicolada, a azul à análise natural e a em preto à análise integral.

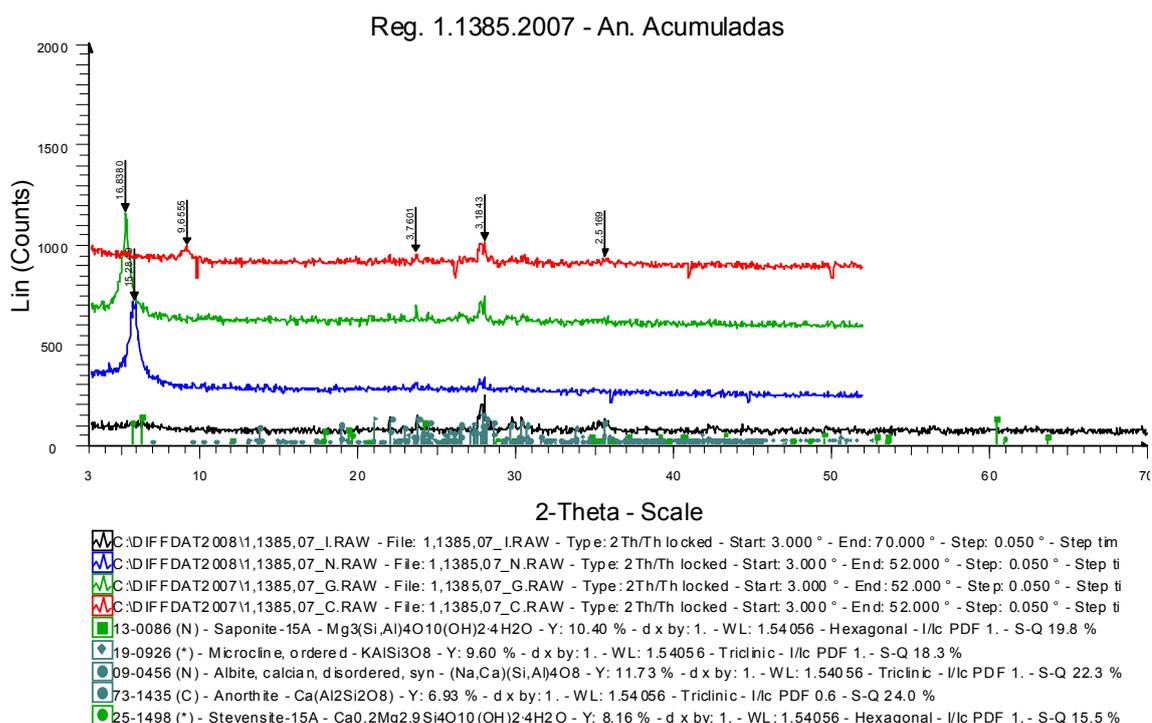


Figura C.23 – Difratograma da amostra BA.1 – Análise acumulada

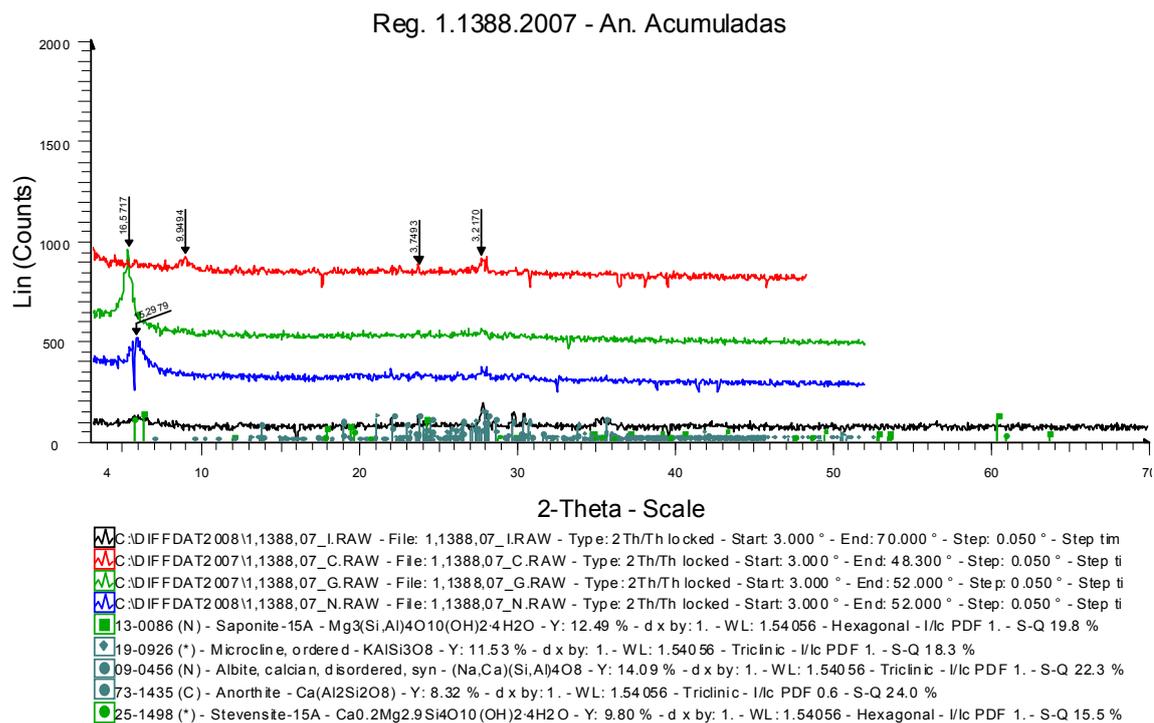


Figura C.24 – Difratoograma da amostra BA.2 – Análise acumulada

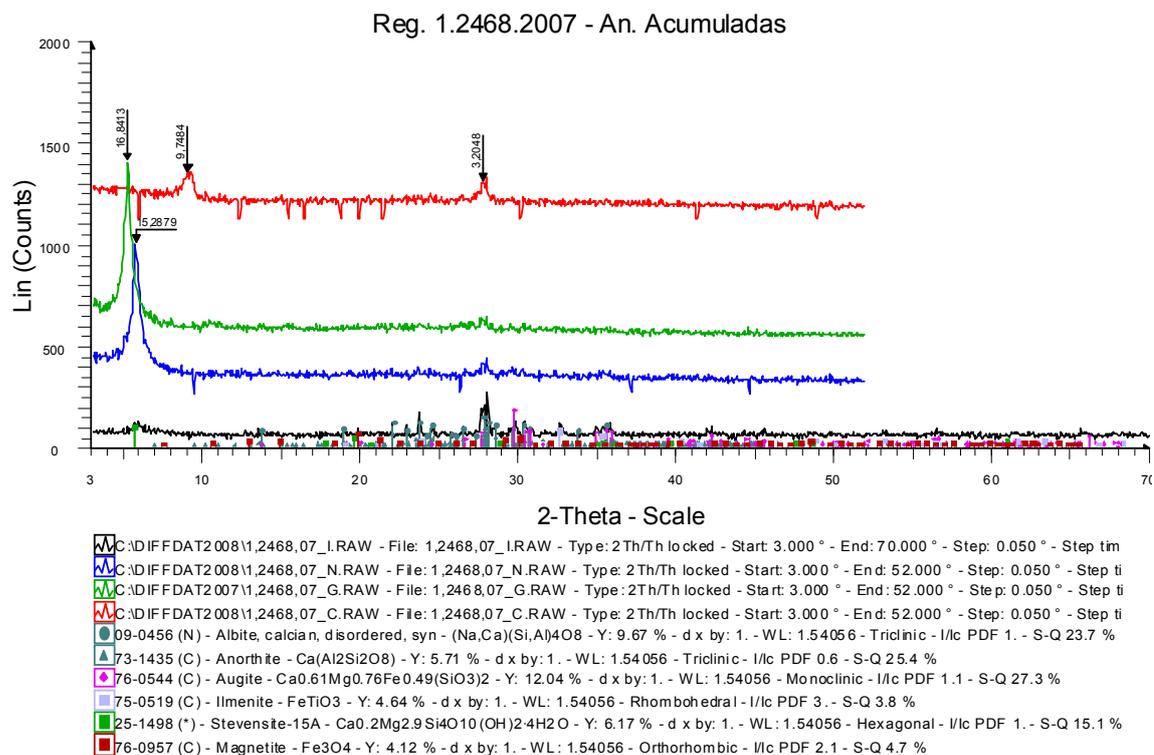


Figura C.25 – Difratoograma da amostra BA.3 – Análise acumulada

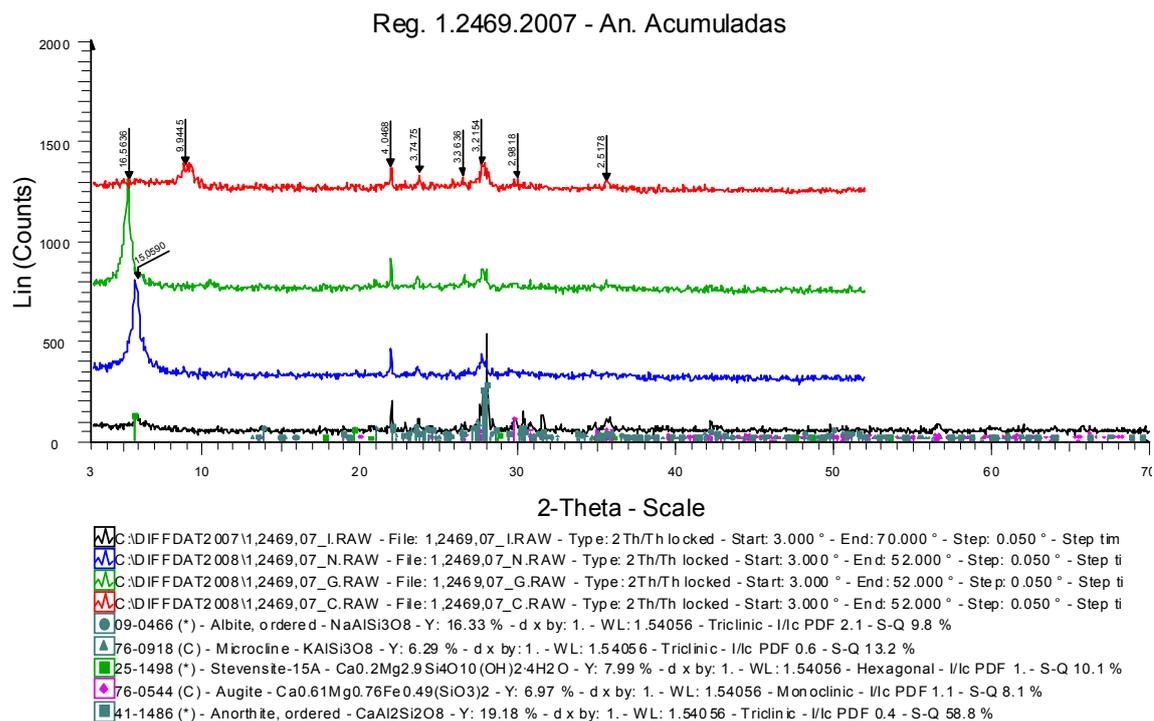


Figura C.26 – Difratoograma da amostra BA.4 – Análise acumulada

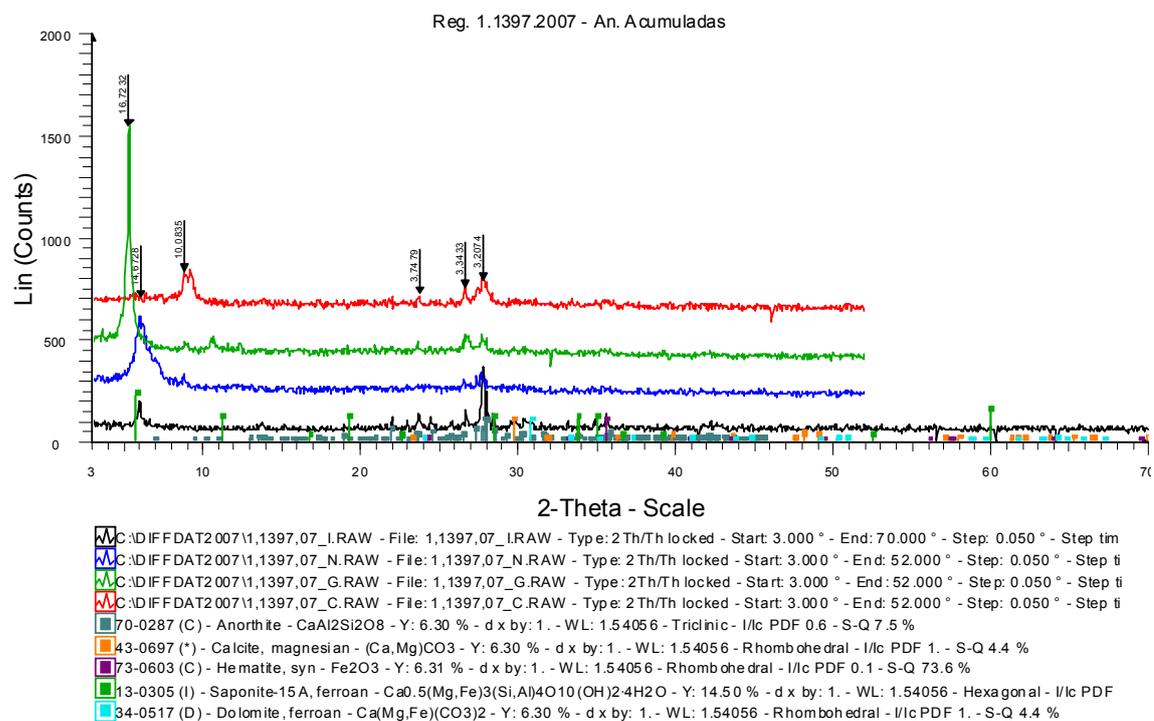


Figura C.27 – Difratoograma da amostra BA.5 – Análise acumulada

Reg. 1.1400.07 - An. Acumuladas

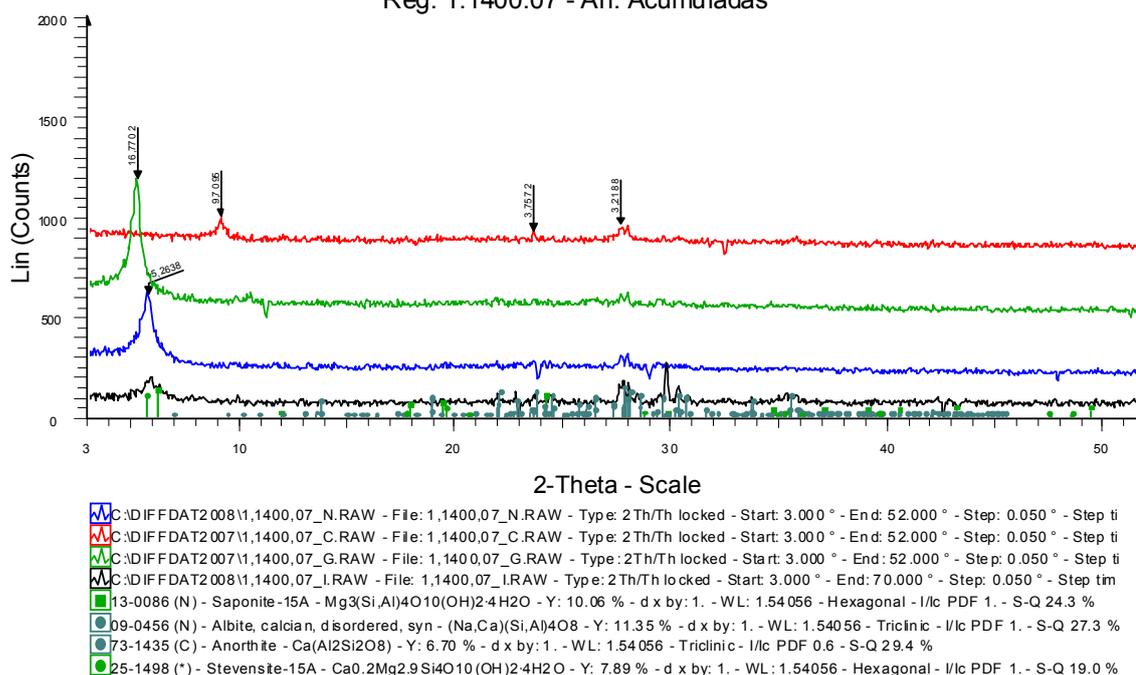


Figura C.28 – Difratograma da amostra BA.6 – Análise acumulada

Reg. 1.1402.2007 - An. Acumuladas

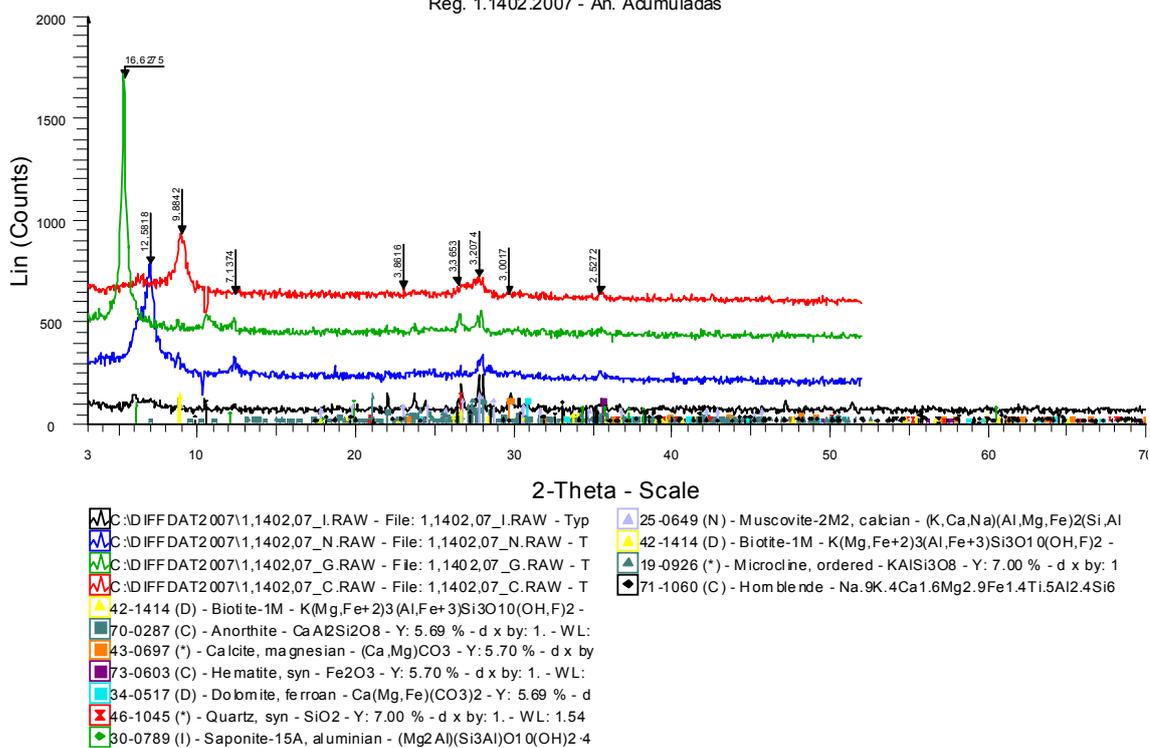


Figura C.29 - Difratograma da amostra BA.7 – Análise acumulada

ANEXO D

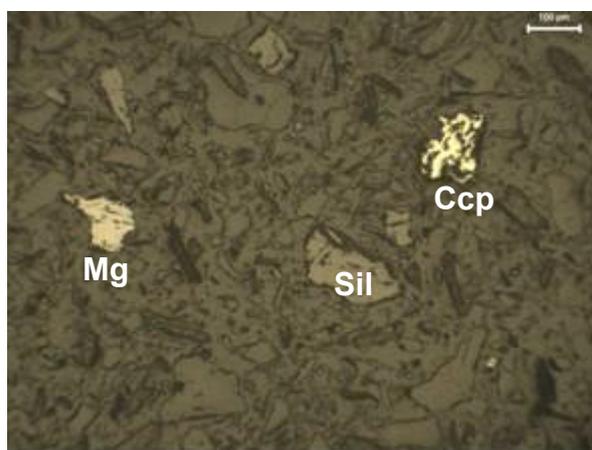
Seção Polida

A Tabela D.1 apresenta resumidamente as características de cada amostra.

Tabela D.1 – Características gerais das rochas – Análise de sulfetos

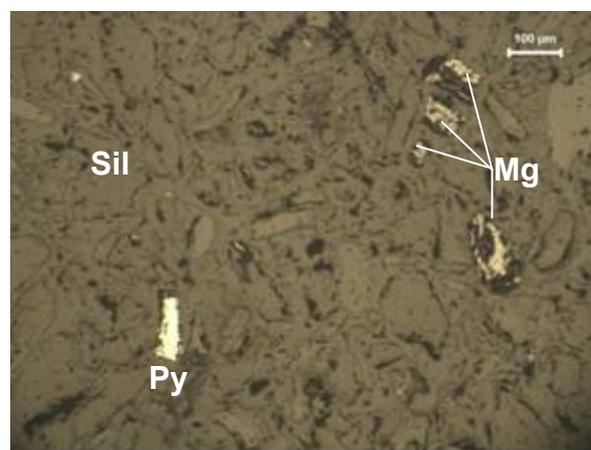
Amostra	Sulfetos		Óxidos de ferro	Óxidos de ferro e titânio	Hidróxido de ferro
	Quant. (%)	Tipo			
BA.1	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
BA.2	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
BA.3	0,0	-	Hematita e Magnetita	Ilmenita	-
BA.4	<< 0,5	Pirita	Hematita e Magnetita	Ilmenita	-
BA.5	<< 0,5	Pirita	Hematita e Magnetita	Ilmenita	-
BA.6	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
BA.7	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
GR.1	<< 0,5	Pirita	-	-	-
GR.2	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
GR.3	<< 0,5	Pirita e Pirrotita	Hematita e Magnetita	Ilmenita	-
GR.4	< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
GR.5	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
GD.1	<< 0,5	Pirita e Pirrotita	Hematita e Magnetita	Ilmenita	-
ML.1	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
QX.1	<< 0,5	Pirita e Calcopirita	Magnetita	-	-
QX.2	<< 0,5	Pirita e Calcopirita	Magnetita	-	-
QX.3	<< 0,5	Pirita e Calcopirita	Hematita e Magnetita	Ilmenita	Limonita
QX.4	< 0,5	Pirita	-	Ilmenita	-
QX.5	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
QX.6	<< 0,5	Pirita	-	Ilmenita	Limonita
QZ.1	<< 0,5	Pirita	Hematita e Magnetita	Ilmenita	-
QZ.2	<< 0,5	Pirita	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado

Na Figura D.1 é mostrada uma visão geral de campos de algumas seções polidas onde foram encontrados os sulfetos Pirita (FeS), Pirrotita ($\text{Fe}_7\text{S}_8\text{-FeS}$), Calcopirita (CuFeS_2); os óxidos de ferro Hematita (Fe_2O_3) e Magnetita (Fe_3O_4); o óxido de ferro e titânio Ilmenita (FeTiO_3) e o hidróxido de ferro Limonita ($\text{FeO(OH).nH}_2\text{O}$).



(a)

Visão geral de um campo da seção polida da amostra QX.3, onde se observam silicatos (Sil) e fragmentos de calcopirita (Ccp) e magnetita (Mg)



(b)

Visão geral de um campo da seção polida da amostra GD.1, onde se observam silicatos (Sil) e fragmentos de pirita (Py) e magnetita (Mg)

Figura D.1 – Seções polidas dos agregados analisados

ANEXO E

Resultados individuais – ASTM C-289

Na Tabela E.1 estão listados os resultados individuais dos ensaios realizados conforme a ASTM C-289.

Tabela E.1 – Resultados individuais do Método Químico – ASTM C-289

Amostra	Sílica dissolvida (mmoles/l)				Redução da alcalinidade (mmoles/l)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
BA.1	77,59	72,93	78,26	76,3	228,10	242,39	237,29	235,9
BA.2	109,22	111,22	111,89	110,8	270,46	268,93	268,93	269,4
BA.3	50,62	48,95	46,95	48,8	263,98	260,05	254,44	259,5
BA.4	143,52	136,53	134,20	138,1	159,51	161,76	164,01	161,8
BA.5	75,92	73,59	69,26	72,9	197,48	186,26	199,53	194,4
BA.6	108,56	102,90	102,90	104,8	335,77	337,31	328,12	333,7
BA.7	14,32	15,32	18,65	16,1	103,08	110,22	101,04	104,8
GD.1	9,66	10,32	10,32	10,1	8,27	16,00	14,89	13,1
GR.1	17,65	16,98	16,98	17,2	14,34	13,24	11,03	12,9
GR.2	22,64	19,98	21,65	21,4	33,17	52,56	45,42	43,7
GR.3	12,32	12,65	11,99	12,3	30,89	32,58	31,45	31,6
GR.4	10,32	10,66	9,99	10,3	34,26	38,76	41,00	38,0
GR.5	21,65	16,98	18,98	19,2	88,18	88,18	93,80	90,1
ML.1	19,65	17,65	18,98	18,8	37,63	34,82	30,89	34,4
QX.1	10,32	11,32	9,32	10,3	29,24	29,24	34,75	31,1
QX.2	10,32	7,66	9,66	9,2	48,54	52,96	55,71	52,4
QX.3	10,99	12,65	11,32	11,7	22,06	26,48	20,41	23,0
QX.4	12,99	14,32	12,99	13,4	25,93	27,58	20,96	24,8
QX.5	11,32	11,99	14,32	12,5	15,31	12,76	13,27	13,8
QX.6	21,65	21,31	20,65	21,2	52,96	55,16	50,75	53,0
QZ.1	68,60	61,94	61,94	64,2	28,68	25,93	27,03	27,2
QZ.2	85,25	82,58	87,91	85,2	22,96	39,29	21,43	27,9

ANEXO F

Resultados individuais – ASTM C-1260

Nas Tabelas F.1 a F.11 estão apresentadas as expansões individuais das amostras ensaiadas com o cimento A.

Tabela F.1 – Expansões individuais BA.1 e BA.2 – Cimento A

Idade (dias)	BA.1				Idade (dias)	BA.2			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,010	0,010	0,010	0,01	3	0,010	0,010	0,010	0,01
4	0,016	0,015	0,014	0,02	4	0,014	0,014	0,013	0,01
6	0,027	0,027	0,026	0,03	6	0,019	0,023	0,022	0,02
7	0,031	0,031	0,031	0,03	7	0,027	0,026	0,026	0,03
8	0,039	0,036	0,037	0,04	8	0,030	0,031	0,030	0,03
9	0,044	0,040	0,040	0,04	9	0,033	0,033	0,032	0,03
10	0,047	0,044	0,046	0,05	10	0,033	0,034	0,034	0,03
11	0,053	0,050	0,052	0,05	11	0,036	0,037	0,037	0,04
13	0,067	0,059	0,061	0,06	13	0,041	0,041	0,041	0,04
14	0,070	0,063	0,063	0,07	14	0,043	0,043	0,042	0,04
15	0,075	0,068	0,067	0,07	15	0,046	0,046	0,045	0,05
16	0,081	0,075	0,075	0,08	16	0,048	0,047	0,045	0,05
17	0,087	0,079	0,081	0,08	17	0,049	0,048	0,046	0,05
20	0,112	0,095	0,100	0,10	20	0,056	0,055	0,052	0,05
21	0,117	0,139	0,105	0,12	21	0,060	0,059	0,057	0,06
22	0,122	0,143	0,108	0,12	22	0,061	0,060	0,058	0,06
23	0,130	0,150	0,119	0,13	23	0,063	0,061	0,059	0,06
24	0,138	0,198	0,126	0,15	24	0,065	0,063	0,062	0,06
27	0,156	0,181	0,145	0,16	27	0,069	0,066	0,066	0,07
28	0,162	0,187	0,150	0,17	28	0,071	0,069	0,069	0,07
29	0,168	0,192	0,155	0,17	29	0,071	0,069	0,069	0,07
30	0,174	0,197	0,162	0,18	30	0,072	0,070	0,070	0,07

Tabela F.2 – Expansões individuais BA.3 e BA.4 – Cimento A

Idade (dias)	BA.3				Idade (dias)	BA.4			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,004	0,006	0,006	0,01	3	0,010	0,010	0,006	0,01
6	0,017	0,017	0,016	0,02	6	0,278	0,266	0,271	0,27
7	0,022	0,023	0,020	0,02	7	0,369	0,358	0,365	0,36
8	0,026	0,024	0,023	0,02	8	0,433	0,425	0,432	0,43
9	0,029	0,027	0,025	0,03	9	0,479	0,475	0,480	0,48
10	0,030	0,028	0,027	0,03	10	0,510	0,508	0,513	0,51
13	0,036	0,036	0,035	0,04	13	0,573	0,573	0,577	0,57
14	0,037	0,037	0,035	0,04	14	0,589	0,589	0,592	0,59
15	0,039	0,038	0,038	0,04	15	0,601	0,602	0,605	0,60
16	0,043	0,042	0,040	0,04	16	0,617	0,616	0,618	0,62
17	0,046	0,046	0,044	0,05	17	0,629	0,629	0,631	0,63
20	0,049	0,049	0,047	0,05	20	0,652	0,652	0,654	0,65
22	0,052	0,052	0,053	0,05	22	0,667	0,667	0,667	0,67
23	0,053	0,053	0,054	0,05	23	0,673	0,675	0,675	0,67
24	0,056	0,055	0,056	0,06	24	0,682	0,684	0,684	0,68
27	0,058	0,058	0,057	0,06	27	0,695	0,697	0,696	0,70
29	0,065	0,063	0,061	0,06	29	0,708	0,712	0,711	0,71
30	0,065	0,064	0,062	0,06	30	0,715	0,720	0,720	0,72

Tabela F.3 – Expansões individuais BA.5 e BA.6 – Cimento A

Idade (dias)	BA.5				Idade (dias)	BA.6			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média		CP 1	CP 2	CP 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,008	0,007	0,012	0,01	3	0,010	0,011	0,013	0,01
5	0,022	0,023	0,024	0,02	5	0,029	0,028	0,030	0,03
6	0,034	0,033	0,034	0,03	6	0,036	0,033	0,036	0,03
7	0,048	0,048	0,048	0,05	7	0,044	0,041	0,043	0,04
8	0,060	0,060	0,059	0,06	8	0,051	0,046	0,050	0,05
9	0,069	0,071	0,070	0,07	9	0,057	0,052	0,054	0,05
10	0,081	0,080	0,080	0,08	10	0,063	0,056	0,059	0,06
12	0,096	0,098	0,096	0,10	12	0,073	0,067	0,069	0,07
13	0,103	0,105	0,103	0,10	13	0,080	0,074	0,075	0,08
14	0,112	0,113	0,112	0,11	14	0,086	0,080	0,081	0,08
15	0,115	0,117	0,114	0,12	15	0,090	0,083	0,084	0,09
16	0,118	0,120	0,117	0,12	16	0,096	0,089	0,094	0,09
19	0,133	0,138	0,134	0,13	19	0,112	0,104	0,108	0,11
20	0,141	0,148	0,142	0,14	20	0,118	0,110	0,114	0,11
21	0,143	0,150	0,144	0,15	21	0,122	0,114	0,117	0,12
22	0,149	0,153	0,150	0,15	22	0,126	0,119	0,122	0,12
23	0,153	0,161	0,158	0,16	23	0,131	0,123	0,127	0,13
26	0,164	0,169	0,165	0,17	26	0,140	0,136	0,135	0,14
27	0,167	0,173	0,169	0,17	27	0,146	0,140	0,140	0,14
28	0,168	0,175	0,171	0,17	28	0,148	0,142	0,142	0,14
29	0,171	0,177	0,175	0,17	29	0,152	0,147	0,145	0,15
30	0,177	0,183	0,180	0,18	30	0,160	0,152	0,152	0,15

Tabela F.4 – Expansões individuais BA.7 e GD.1 – Cimento A

Idade (dias)	BA.7				Idade (dias)	GD.1			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média		CP 1	CP 2	CP 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,008	0,008	0,007	0,01	3	0,010	0,010	0,010	0,01
5	0,032	0,032	0,032	0,03	4	0,017	0,017	0,018	0,02
6	0,047	0,046	0,046	0,05	5	0,022	0,022	0,024	0,02
7	0,066	0,065	0,066	0,07	7	0,032	0,034	0,034	0,03
8	0,088	0,084	0,084	0,09	8	0,037	0,038	0,038	0,04
9	0,105	0,103	0,103	0,10	9	0,041	0,042	0,043	0,04
10	0,123	0,121	0,121	0,12	10	0,044	0,046	0,048	0,05
12	0,154	0,150	0,151	0,15	11	0,051	0,050	0,054	0,05
13	0,166	0,163	0,162	0,16	12	0,056	0,058	0,059	0,06
14	0,177	0,174	0,172	0,17	14	0,065	0,066	0,069	0,07
15	0,187	0,183	0,185	0,19	15	0,067	0,067	0,071	0,07
16	0,197	0,195	0,192	0,19	16	0,071	0,070	0,074	0,07
19	0,220	0,220	0,218	0,22	17	0,077	0,080	0,083	0,08
20	0,231	0,225	0,227	0,23	18	0,083	0,084	0,088	0,08
21	0,237	0,234	0,233	0,23	21	0,093	0,094	0,096	0,09
22	0,243	0,239	0,239	0,24	22	0,095	0,097	0,098	0,10
23	0,250	0,247	0,246	0,25	23	0,098	0,100	0,102	0,10
26	0,265	0,262	0,261	0,26	24	0,103	0,104	0,108	0,11
27	0,273	0,269	0,268	0,27	25	0,106	0,106	0,110	0,11
28	0,277	0,273	0,272	0,27	28	0,110	0,113	0,117	0,11
29	0,282	0,278	0,277	0,28	29	0,114	0,117	0,121	0,12
30	0,288	0,284	0,281	0,28	30	0,116	0,118	0,123	0,12

Tabela F.5 – Expansões individuais GR.1 e GR.2 – Cimento A

Idade (dias)	GR.1				Idade (dias)	GR.2			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média		CP 1	CP 2	CP 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,008	0,010	0,010	0,01	3	0,008	0,008	0,008	0,01
4	0,015	0,016	0,016	0,02	5	0,028	0,029	0,027	0,03
5	0,023	0,020	0,022	0,02	6	0,033	0,037	0,034	0,03
7	0,025	0,025	0,027	0,03	7	0,044	0,044	0,042	0,04
8	0,029	0,029	0,030	0,03	8	0,051	0,051	0,051	0,05
9	0,032	0,032	0,034	0,03	9	0,060	0,058	0,056	0,06
10	0,033	0,033	0,035	0,03	10	0,068	0,069	0,065	0,07
11	0,042	0,037	0,038	0,04	12	0,087	0,085	0,083	0,08
12	0,043	0,040	0,042	0,04	13	0,095	0,092	0,088	0,09
14	0,045	0,045	0,048	0,05	14	0,102	0,102	0,098	0,10
15	0,047	0,047	0,050	0,05	15	0,111	0,107	0,104	0,11
16	0,051	0,049	0,052	0,05	16	0,117	0,113	0,110	0,11
17	0,052	0,051	0,054	0,05	19	0,140	0,133	0,129	0,13
18	0,058	0,058	0,062	0,06	20	0,147	0,145	0,138	0,14
21	0,065	0,066	0,071	0,07	21	0,152	0,150	0,141	0,15
22	0,066	0,067	0,073	0,07	22	0,156	0,154	0,145	0,15
23	0,071	0,071	0,078	0,07	23	0,163	0,160	0,150	0,16
24	0,073	0,073	0,080	0,08	26	0,179	0,175	0,167	0,17
25	0,076	0,075	0,083	0,08	27	0,183	0,179	0,171	0,18
28	0,082	0,082	0,088	0,08	28	0,187	0,183	0,175	0,18
29	0,087	0,086	0,092	0,09	29	0,194	0,190	0,183	0,19
30	0,092	0,090	0,097	0,09	30	0,199	0,192	0,185	0,19

Tabela F.6 – Expansões individuais GR.3 e GR.4 – Cimento A

Idade (dias)	GR.3				Idade (dias)	GR.4			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média		CP 1	CP 2	CP 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,006	0,006	0,006	0,01	3	0,003	0,005	0,006	0,00
5	0,018	0,018	0,018	0,02	4	0,008	0,010	0,010	0,01
6	0,022	0,021	0,021	0,02	5	0,018	0,016	0,015	0,02
7	0,026	0,026	0,026	0,03	7	0,022	0,019	0,018	0,02
8	0,028	0,030	0,030	0,03	8	0,026	0,027	0,025	0,03
9	0,029	0,030	0,031	0,03	9	0,030	0,032	0,030	0,03
10	0,032	0,033	0,033	0,03	10	0,031	0,033	0,031	0,03
12	0,037	0,038	0,037	0,04	11	0,031	0,033	0,032	0,03
13	0,041	0,040	0,040	0,04	14	0,038	0,045	0,045	0,04
14	0,044	0,042	0,042	0,04	15	0,050	0,053	0,053	0,05
15	0,044	0,043	0,043	0,04	16	0,053	0,056	0,056	0,06
16	0,047	0,046	0,046	0,05	17	0,058	0,061	0,060	0,06
19	0,056	0,053	0,053	0,05	18	0,065	0,065	0,064	0,06
20	0,062	0,059	0,059	0,06	21	0,069	0,069	0,069	0,07
21	0,063	0,061	0,061	0,06	22	0,075	0,078	0,077	0,08
22	0,065	0,063	0,063	0,06	23	0,080	0,083	0,081	0,08
23	0,067	0,066	0,067	0,07	24	0,086	0,088	0,087	0,09
26	0,074	0,072	0,072	0,07	25	0,087	0,092	0,088	0,09
27	0,075	0,075	0,074	0,07	28	0,090	0,100	0,098	0,10
28	0,077	0,077	0,076	0,08	29	0,090	0,101	0,098	0,10
29	0,083	0,083	0,083	0,08	30	0,091	0,102	0,138	0,11
30	0,085	0,085	0,085	0,08					

Tabela F.7 – Expansões individuais GR.5 e ML.1 – Cimento A

GR.5					ML.1				
Idade (dias)	Expansão (%)			Média	Idade (dias)	Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,007	0,006	0,006	0,01	3	0,010	0,014	0,014	0,01
6	0,017	0,015	0,016	0,02	5	0,042	0,047	0,045	0,04
7	0,020	0,019	0,019	0,02	6	0,058	0,062	0,059	0,06
8	0,023	0,021	0,024	0,02	7	0,075	0,081	0,079	0,08
9	0,028	0,025	0,026	0,03	8	0,094	0,100	0,094	0,10
10	0,029	0,026	0,027	0,03	9	0,109	0,115	0,110	0,11
13	0,037	0,035	0,035	0,04	10	0,126	0,132	0,126	0,13
14	0,041	0,039	0,039	0,04	12	0,154	0,159	0,153	0,16
15	0,045	0,043	0,043	0,04	13	0,166	0,171	0,164	0,17
16	0,050	0,046	0,046	0,05	14	0,175	0,182	0,174	0,18
17	0,056	0,053	0,052	0,05	15	0,184	0,191	0,183	0,19
20	0,063	0,061	0,061	0,06	16	0,192	0,198	0,188	0,19
22	0,071	0,067	0,067	0,07	19	0,215	0,221	0,210	0,22
23	0,073	0,069	0,069	0,07	20	0,226	0,233	0,222	0,23
24	0,079	0,075	0,075	0,08	21	0,232	0,239	0,230	0,23
27	0,086	0,081	0,081	0,08	22	0,237	0,245	0,237	0,24
29	0,096	0,091	0,091	0,09	23	0,244	0,252	0,244	0,25
30	0,100	0,095	0,095	0,10	26	0,261	0,270	0,259	0,26
					27	0,266	0,275	0,268	0,27
					28	0,271	0,279	0,271	0,27
					29	0,275	0,284	0,276	0,28
					30	0,281	0,291	0,277	0,28

Tabela F.8 – Expansões individuais QX.1 e QX.2 – Cimento A

QX.1					QX.2				
Idade (dias)	Expansão (%)			Média	Idade (dias)	Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,014	0,015	0,015	0,01	3	0,013	0,015	0,015	0,01
4	0,025	0,026	0,025	0,03	4	0,024	0,025	0,025	0,02
5	0,033	0,036	0,034	0,03	5	0,033	0,032	0,032	0,03
7	0,054	0,058	0,056	0,06	7	0,048	0,050	0,048	0,05
8	0,064	0,065	0,064	0,06	8	0,055	0,056	0,053	0,05
9	0,074	0,077	0,076	0,08	9	0,064	0,066	0,063	0,06
10	0,084	0,087	0,087	0,09	10	0,071	0,074	0,069	0,07
11	0,095	0,096	0,097	0,10	11	0,078	0,081	0,075	0,08
12	0,102	0,107	0,106	0,11	12	0,086	0,090	0,083	0,09
14	0,122	0,123	0,123	0,12	14	0,101	0,103	0,096	0,10
15	0,125	0,127	0,126	0,13	15	0,101	0,105	0,098	0,10
16	0,135	0,139	0,138	0,14	16	0,108	0,113	0,104	0,11
17	0,141	0,146	0,143	0,14	17	0,117	0,121	0,113	0,12
18	0,148	0,152	0,149	0,15	18	0,122	0,126	0,117	0,12
21	0,165	0,171	0,167	0,17	21	0,138	0,142	0,132	0,14
22	0,168	0,177	0,171	0,17	22	0,144	0,146	0,136	0,14
23	0,173	0,181	0,177	0,18	23	0,148	0,150	0,140	0,15
24	0,179	0,187	0,183	0,18	24	0,152	0,155	0,145	0,15
25	0,185	0,192	0,188	0,19	25	0,155	0,158	0,148	0,15
28	0,197	0,208	0,200	0,20	28	0,165	0,166	0,159	0,16
29	0,200	0,208	0,204	0,20	29	0,169	0,166	0,163	0,17
30	0,202	0,210	0,206	0,21	30	0,171	0,169	0,165	0,17

Tabela F.9 – Expansões individuais QX.3 e QX.4 – Cimento A

Idade (dias)	QX.3				Idade (dias)	QX.4			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,010	0,009	0,010	0,01	3	0,010	0,012	0,008	0,01
4	0,017	0,018	0,017	0,02	4	0,020	0,021	0,021	0,02
6	0,039	0,038	0,038	0,04	6	0,043	0,046	0,044	0,04
7	0,048	0,048	0,047	0,05	7	0,054	0,054	0,053	0,05
8	0,060	0,058	0,058	0,06	8	0,067	0,067	0,067	0,07
9	0,070	0,069	0,067	0,07	9	0,079	0,087	0,078	0,08
10	0,079	0,077	0,075	0,08	10	0,090	0,088	0,089	0,09
11	0,090	0,088	0,087	0,09	11	0,102	0,099	0,101	0,10
13	0,107	0,104	0,103	0,10	13	0,121	0,117	0,119	0,12
14	0,115	0,111	0,111	0,11	14	0,130	0,125	0,128	0,13
15	0,123	0,123	0,119	0,12	15	0,140	0,135	0,137	0,14
16	0,130	0,127	0,125	0,13	16	0,148	0,142	0,144	0,14
17	0,135	0,133	0,130	0,13	17	0,152	0,147	0,149	0,15
20	0,156	0,151	0,149	0,15	20	0,177	0,168	0,170	0,17
21	0,161	0,153	0,153	0,16	21	0,184	0,175	0,178	0,18
22	0,166	0,161	0,161	0,16	22	0,188	0,180	0,183	0,18
23	0,171	0,169	0,167	0,17	23	0,196	0,186	0,188	0,19
24	0,178	0,174	0,174	0,18	24	0,202	0,191	0,193	0,20
27	0,191	0,189	0,190	0,19	27	0,215	0,208	0,206	0,21
28	0,195	0,193	0,194	0,19	28	0,222	0,212	0,215	0,22
29	0,198	0,196	0,197	0,20	29	0,227	0,216	0,218	0,22
30	0,203	0,200	0,202	0,20	30	0,231	0,221	0,223	0,22

Tabela F.10 – Expansões individuais QX.5 e QX.6 – Cimento A

Idade (dias)	QX.5				Idade (dias)	QX.6			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,010	0,011	0,010	0,01	3	0,017	0,016	0,016	0,02
4	0,023	0,024	0,022	0,02	4	0,030	0,029	0,029	0,03
6	0,051	0,052	0,049	0,05	5	0,040	0,040	0,038	0,04
7	0,063	0,064	0,061	0,06	7	0,065	0,065	0,063	0,06
8	0,079	0,080	0,076	0,08	8	0,075	0,077	0,075	0,08
9	0,091	0,092	0,088	0,09	9	0,092	0,091	0,090	0,09
10	0,104	0,104	0,097	0,10	10	0,104	0,105	0,102	0,10
11	0,113	0,117	0,111	0,11	11	0,109	0,115	0,112	0,11
13	0,135	0,137	0,130	0,13	12	0,128	0,131	0,126	0,13
14	0,146	0,151	0,138	0,14	14	0,146	0,150	0,145	0,15
15	0,156	0,157	0,148	0,15	15	0,154	0,157	0,154	0,15
16	0,163	0,163	0,153	0,16	16	0,163	0,167	0,162	0,16
17	0,167	0,170	0,160	0,17	17	0,171	0,174	0,170	0,17
20	0,191	0,191	0,181	0,19	18	0,176	0,181	0,176	0,18
21	0,199	0,198	0,188	0,20	21	0,197	0,204	0,200	0,20
22	0,203	0,203	0,192	0,20	22	0,204	0,210	0,204	0,21
23	0,211	0,212	0,199	0,21	23	0,208	0,215	0,210	0,21
24	0,217	0,215	0,202	0,21	24	0,214	0,221	0,215	0,22
27	0,235	0,233	0,220	0,23	25	0,217	0,224	0,219	0,22
28	0,237	0,237	0,224	0,23	28	0,232	0,244	0,237	0,24
29	0,242	0,241	0,228	0,24	29	0,237	0,248	0,240	0,24
30	0,248	0,247	0,235	0,24	30	0,240	0,252	0,240	0,24

Tabela F.11 – Expansões individuais QZ.1 e QZ.2 – Cimento A

Idade (dias)	QZ.1				Idade (dias)	QZ.2			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,019	0,018	0,021	0,02	3	0,034	0,035	0,033	0,03
5	0,062	0,064	0,065	0,06	5	0,152	0,155	0,149	0,15
6	0,083	0,087	0,090	0,09	6	0,193	0,195	0,190	0,19
7	0,107	0,115	0,112	0,11	7	0,226	0,228	0,226	0,23
8	0,132	0,140	0,139	0,14	8	0,252	0,253	0,252	0,25
9	0,150	0,162	0,159	0,16	9	0,270	0,271	0,271	0,27
10	0,169	0,182	0,180	0,18	10	0,288	0,289	0,291	0,29
12	0,200	0,215	0,217	0,21	12	0,318	0,319	0,320	0,32
13	0,212	0,228	0,228	0,22	13	0,330	0,330	0,334	0,33
14	0,223	0,243	0,242	0,24	14	0,341	0,342	0,346	0,34
15	0,234	0,253	0,253	0,25	15	0,349	0,349	0,353	0,35
16	0,243	0,263	0,267	0,26	16	0,358	0,356	0,362	0,36
19	0,270	0,289	0,295	0,28	19	0,377	0,378	0,384	0,38
20	0,280	0,305	0,308	0,30	20	0,387	0,387	0,402	0,39
21	0,285	0,309	0,311	0,30	21	0,390	0,391	0,404	0,40
22	0,294	0,319	0,322	0,31	22	0,395	0,396	0,409	0,40
23	0,302	0,326	0,325	0,32	23	0,400	0,402	0,415	0,41
26	0,319	0,347	0,344	0,34	26	0,410	0,412	0,425	0,42
27	0,323	0,353	0,349	0,34	27	0,413	0,413	0,427	0,42
28	0,326	0,357	0,353	0,35	28	0,417	0,417	0,431	0,42
29	0,337	0,366	0,362	0,35	29	0,420	0,420	0,433	0,42
30	0,337	0,370	0,366	0,36	30	0,425	0,421	0,433	0,43

Nas Tabelas F.12 a F.22 estão apresentados as expansões individuais das amostras ensaiadas com o cimento B.

Tabela F.12 – Expansões individuais BA.1 e BA.2 – Cimento B

Idade (dias)	BA.1				Idade (dias)	BA.2			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1*	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2		0,000	0,000	0,00
3	0,000	0,000	0,001	0,00	3		0,000	0,000	0,00
4	0,002	0,002	0,003	0,00	4		0,002	0,002	0,00
6	0,006	0,005	0,006	0,01	6		0,006	0,006	0,01
7	0,009	0,008	0,009	0,01	7		0,008	0,008	0,01
8	0,010	0,010	0,012	0,01	8		0,010	0,010	0,01
9	0,013	0,012	0,013	0,01	9		0,011	0,011	0,01
10	0,013	0,013	0,015	0,01	10		0,012	0,012	0,01
13	0,017	0,017	0,018	0,02	13		0,013	0,013	0,01
14	0,021	0,019	0,019	0,02	14		0,017	0,016	0,02
15	0,023	0,021	0,023	0,02	15		0,019	0,019	0,02
16	0,024	0,022	0,024	0,02	16		0,020	0,019	0,02
17	0,025	0,023	0,025	0,02	17		0,021	0,020	0,02
20	0,027	0,025	0,027	0,03	20		0,023	0,022	0,02
21	0,029	0,027	0,029	0,03	21		0,025	0,024	0,02
22	0,031	0,028	0,031	0,03	22		0,025	0,025	0,03
23	0,033	0,031	0,034	0,03	23		0,028	0,028	0,03
24	0,033	0,031	0,034	0,03	24		0,028	0,028	0,03
27	0,040	0,039	0,045	0,04	27		0,033	0,034	0,03
28	0,042	0,042	0,049	0,04	28		0,037	0,037	0,04
29	0,044	0,044	0,051	0,05	29		0,038	0,037	0,04
30	0,046	0,045	0,052	0,05	30		0,038	0,038	0,04

* A barra rompeu-se durante a desmoldagem

Tabela F.13 – Expansões individuais BA.3 e BA.4 – Cimento B

BA.3					BA.4				
Idade (dias)	Expansão (%)			Média	Idade (dias)	Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,005	0,001	0,003	0,00	3	0,005	0,004	0,004	0,00
4	0,009	0,005	0,007	0,01	4	0,008	0,008	0,010	0,01
7	0,012	0,009	0,011	0,01	7	0,015	0,015	0,015	0,02
8	0,015	0,012	0,014	0,01	8	0,019	0,017	0,019	0,02
9	0,015	0,013	0,014	0,01	9	0,020	0,017	0,020	0,02
10	0,018	0,014	0,016	0,02	10	0,025	0,024	0,025	0,02
11	0,019	0,015	0,017	0,02	11	0,025	0,024	0,025	0,02
14	0,022	0,019	0,021	0,02	14	0,030	0,030	0,031	0,03
15	0,022	0,020	0,021	0,02	15	0,032	0,031	0,031	0,03
16	0,024	0,021	0,023	0,02	16	0,034	0,033	0,033	0,03
17	0,027	0,024	0,025	0,03	17	0,038	0,037	0,039	0,04
18	0,027	0,025	0,026	0,03	18	0,041	0,040	0,041	0,04
21	0,029	0,027	0,028	0,03	21	0,045	0,044	0,044	0,04
23	0,031	0,029	0,030	0,03	23	0,049	0,049	0,050	0,05
24	0,031	0,029	0,030	0,03	24	0,049	0,050	0,051	0,05
25	0,031	0,029	0,031	0,03	25	0,050	0,050	0,051	0,05
28	0,027	0,025	0,031	0,03	28	0,053	0,056	0,057	0,06
30	0,035	0,032	0,036	0,03	30	0,060	0,062	0,063	0,06

Tabela F.14 – Expansões individuais BA.5 e BA.6 – Cimento B

BA.5					BA.6				
Idade (dias)	Expansão (%)			Média	Idade (dias)	Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,003	0,004	0,002	0,00	3	0,000	0,000	0,001	0,00
5	0,008	0,008	0,006	0,01	5	0,005	0,004	0,005	0,00
6	0,012	0,012	0,009	0,01	6	0,009	0,008	0,008	0,01
7	0,016	0,015	0,012	0,01	7	0,012	0,011	0,011	0,01
8	0,018	0,017	0,015	0,02	8	0,014	0,013	0,013	0,01
9	0,019	0,019	0,016	0,02	9	0,015	0,014	0,013	0,01
12	0,021	0,021	0,019	0,02	12	0,017	0,015	0,015	0,02
13	0,024	0,024	0,022	0,02	13	0,021	0,019	0,019	0,02
14	0,026	0,026	0,024	0,03	14	0,024	0,021	0,022	0,02
15	0,027	0,027	0,025	0,03	15	0,025	0,022	0,023	0,02
16	0,028	0,029	0,027	0,03	16	0,026	0,024	0,024	0,02
19	0,030	0,031	0,029	0,03	19	0,029	0,027	0,027	0,03
20	0,031	0,031	0,029	0,03	20	0,031	0,028	0,029	0,03
21	0,032	0,033	0,031	0,03	21	0,031	0,029	0,030	0,03
22	0,037	0,037	0,036	0,04	22	0,035	0,033	0,035	0,03
23	0,037	0,038	0,036	0,04	23	0,035	0,045	0,035	0,04
26	0,045	0,042	0,037	0,04	26	0,040	0,049	0,039	0,04
27	0,046	0,045	0,040	0,04	27	0,043	0,051	0,042	0,05
28	0,049	0,048	0,044	0,05	28	0,045	0,053	0,044	0,05
29	0,050	0,048	0,045	0,05	29	0,047	0,055	0,047	0,05
30	0,050	0,050	0,046	0,05	30	0,049	0,056	0,049	0,05

Tabela F.15 – Expansões individuais BA.7 e GD.1 – Cimento B

Idade (dias)	BA.7				Idade (dias)	GD.1			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,003	0,002	0,004	0,00	3	0,002	0,006	0,004	0,00
5	0,010	0,008	0,011	0,01	4	0,004	0,008	0,006	0,01
6	0,012	0,011	0,013	0,01	5	0,006	0,009	0,008	0,01
7	0,016	0,014	0,021	0,02	7	0,011	0,013	0,012	0,01
8	0,019	0,017	0,024	0,02	8	0,013	0,014	0,013	0,01
9	0,021	0,019	0,027	0,02	9	0,014	0,015	0,014	0,01
12	0,028	0,035	0,031	0,03	10	0,018	0,019	0,018	0,02
13	0,033	0,039	0,036	0,04	11	0,019	0,020	0,022	0,02
14	0,037	0,043	0,039	0,04	14	0,026	0,032	0,028	0,03
15	0,037	0,044	0,040	0,04	15	0,032	0,036	0,032	0,03
16	0,040	0,046	0,043	0,04	16	0,034	0,038	0,034	0,04
19	0,046	0,052	0,049	0,05	17	0,034	0,039	0,035	0,04
20	0,048	0,055	0,052	0,05	18	0,038	0,042	0,038	0,04
21	0,052	0,058	0,056	0,06	21	0,040	0,046	0,042	0,04
22	0,056	0,062	0,060	0,06	22	0,047	0,055	0,052	0,05
23	0,056	0,062	0,060	0,06	23	0,051	0,060	0,055	0,06
26	0,073	0,073	0,073	0,07	24	0,058	0,063	0,059	0,06
27	0,078	0,077	0,077	0,08	25	0,059	0,065	0,060	0,06
28	0,079	0,079	0,080	0,08	28	0,069	0,076	0,077	0,07
29	0,084	0,083	0,084	0,08	29	0,073	0,080	0,081	0,08
30	0,087	0,085	0,085	0,09	30	0,074	0,081	0,083	0,08

Tabela F.16 – Expansões individuais GR.1 e GR.2 – Cimento B

Idade (dias)	GR.1				Idade (dias)	GR.2			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,004	0,004	0,005	0,00	3	0,002	0,004	0,003	0,00
4	0,007	0,006	0,007	0,01	5	0,008	0,008	0,007	0,01
5	0,008	0,006	0,008	0,01	6	0,012	0,012	0,013	0,01
7	0,015	0,012	0,012	0,01	7	0,017	0,017	0,017	0,02
8	0,015	0,012	0,012	0,01	8	0,020	0,019	0,019	0,02
9	0,019	0,015	0,015	0,02	9	0,023	0,021	0,022	0,02
10	0,021	0,019	0,018	0,02	12	0,029	0,028	0,029	0,03
11	0,022	0,019	0,019	0,02	13	0,035	0,030	0,034	0,03
14	0,027	0,025	0,029	0,03	14	0,038	0,033	0,038	0,04
15	0,035	0,033	0,037	0,03	15	0,040	0,035	0,040	0,04
16	0,038	0,036	0,040	0,04	16	0,042	0,038	0,043	0,04
17	0,038	0,037	0,041	0,04	19	0,051	0,046	0,051	0,05
18	0,040	0,040	0,044	0,04	20	0,053	0,047	0,053	0,05
21	0,048	0,046	0,052	0,05	21	0,056	0,050	0,056	0,05
22	0,050	0,047	0,052	0,05	22	0,064	0,061	0,066	0,06
23	0,052	0,050	0,055	0,05	23	0,064	0,059	0,067	0,06
24	0,054	0,053	0,058	0,06	26	0,076	0,073	0,076	0,08
25	0,057	0,057	0,062	0,06	27	0,085	0,081	0,081	0,08
28	0,061	0,063	0,068	0,06	28	0,088	0,085	0,085	0,09
29	0,074	0,072	0,074	0,07	29	0,092	0,088	0,089	0,09
30	0,075	0,073	0,075	0,07	30	0,096	0,093	0,093	0,09

Tabela F.17 – Expansões individuais GR.3 e GR.4 – Cimento B

GR.3					GR.4				
Idade (dias)	Expansão (%)			Média	Idade (dias)	Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,004	0,003	0,003	0,00	3	0,009	0,006	0,006	0,01
5	0,007	0,007	0,006	0,01	5	0,012	0,011	0,012	0,01
6	0,012	0,011	0,010	0,01	6	0,017	0,014	0,015	0,02
7	0,016	0,015	0,014	0,02	7	0,021	0,017	0,019	0,02
8	0,017	0,016	0,015	0,02	8	0,021	0,018	0,022	0,02
9	0,020	0,019	0,018	0,02	9	0,022	0,018	0,023	0,02
12	0,023	0,021	0,021	0,02	12	0,028	0,027	0,027	0,03
13	0,030	0,027	0,025	0,03	13	0,029	0,031	0,030	0,03
14	0,035	0,031	0,029	0,03	14	0,031	0,033	0,031	0,03
15	0,035	0,031	0,030	0,03	15	0,033	0,035	0,033	0,03
16	0,038	0,035	0,029	0,03	16	0,034	0,035	0,034	0,03
19	0,038	0,035	0,030	0,03	19	0,040	0,038	0,037	0,04
20	0,044	0,039	0,037	0,04	20	0,044	0,042	0,041	0,04
21	0,046	0,040	0,038	0,04	21	0,044	0,044	0,042	0,04
22	0,051	0,046	0,044	0,05	22	0,046	0,046	0,044	0,05
23	0,052	0,046	0,044	0,05	23	0,047	0,046	0,044	0,05
26	0,056	0,050	0,048	0,05	26	0,054	0,051	0,053	0,05
27	0,064	0,059	0,058	0,06	27	0,060	0,058	0,060	0,06
28	0,068	0,063	0,063	0,06	28	0,063	0,061	0,063	0,06
29	0,069	0,064	0,063	0,07	29	0,068	0,065	0,068	0,07
30	0,073	0,068	0,065	0,07	30	0,071	0,068	0,070	0,07

Tabela F.18 – Expansões individuais GR.5 e ML.1 – Cimento B

GR.5					ML.1				
Idade (dias)	Expansão (%)			Média	Idade (dias)	Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3			CP 1	CP 2	CP 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,006	0,003	0,004	0,00	3	0,008	0,007	0,008	0,01
4	0,009	0,007	0,008	0,01	5	0,017	0,014	0,014	0,02
7	0,012	0,009	0,010	0,01	6	0,020	0,017	0,017	0,02
8	0,013	0,011	0,012	0,01	7	0,025	0,022	0,023	0,02
9	0,014	0,012	0,013	0,01	8	0,028	0,024	0,025	0,03
10	0,017	0,015	0,017	0,02	9	0,032	0,027	0,029	0,03
11	0,017	0,016	0,017	0,02	12	0,040	0,038	0,036	0,04
14	0,020	0,018	0,019	0,02	13	0,044	0,042	0,040	0,04
15	0,020	0,019	0,019	0,02	14	0,047	0,046	0,044	0,05
16	0,021	0,020	0,020	0,02	15	0,049	0,047	0,045	0,05
17	0,024	0,023	0,023	0,02	16	0,053	0,048	0,052	0,05
18	0,026	0,024	0,026	0,03	19	0,060	0,060	0,060	0,06
21	0,028	0,026	0,028	0,03	20	0,065	0,061	0,062	0,06
23	0,030	0,028	0,030	0,03	21	0,067	0,063	0,064	0,06
24	0,030	0,028	0,031	0,03	22	0,071	0,063	0,067	0,07
25	0,033	0,031	0,034	0,03	23	0,071	0,063	0,068	0,07
28	0,035	0,034	0,036	0,03	26	0,085	0,083	0,086	0,08
30	0,041	0,038	0,040	0,04	27	0,105	0,092	0,094	0,10
					28	0,108	0,096	0,096	0,10
					29	0,117	0,104	0,104	0,11
					30	0,123	0,110	0,109	0,11

Tabela F.19 – Expansões individuais QX.1 e QX.2 – Cimento B

Idade (dias)	QX.1				Idade (dias)	QX.2			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,006	0,006	0,006	0,01	3	0,005	0,004	0,005	0,00
4	0,008	0,008	0,007	0,01	4	0,010	0,006	0,008	0,01
5	0,012	0,010	0,010	0,01	5	0,010	0,009	0,010	0,01
7	0,017	0,017	0,016	0,02	7	0,015	0,015	0,014	0,01
8	0,021	0,021	0,019	0,02	8	0,019	0,018	0,016	0,02
9	0,025	0,025	0,023	0,02	9	0,023	0,022	0,020	0,02
10	0,027	0,027	0,025	0,03	10	0,025	0,024	0,023	0,02
11	0,031	0,029	0,027	0,03	11	0,027	0,027	0,025	0,03
14	0,039	0,037	0,037	0,04	14	0,037	0,035	0,035	0,04
15	0,047	0,046	0,045	0,05	15	0,043	0,041	0,039	0,04
16	0,051	0,050	0,048	0,05	16	0,046	0,044	0,042	0,04
17	0,053	0,052	0,050	0,05	17	0,050	0,048	0,046	0,05
18	0,057	0,056	0,054	0,06	18	0,052	0,050	0,048	0,05
21	0,067	0,067	0,064	0,07	21	0,061	0,058	0,058	0,06
22	0,068	0,069	0,065	0,07	22	0,064	0,062	0,062	0,06
23	0,072	0,073	0,069	0,07	23	0,068	0,065	0,065	0,07
24	0,079	0,081	0,076	0,08	24	0,074	0,071	0,071	0,07
25	0,081	0,083	0,077	0,08	25	0,075	0,073	0,072	0,07
28	0,096	0,096	0,090	0,09	28	0,090	0,083	0,084	0,09
29	0,102	0,100	0,092	0,10	29	0,094	0,087	0,088	0,09
30	0,104	0,102	0,094	0,10	30	0,094	0,088	0,088	0,09

Tabela F.20 – Expansões individuais QX.3 e QX.4 – Cimento B

Idade (dias)	QX.3				Idade (dias)	QX.4			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,003	0,003	0,004	0,00	3	0,004	0,004	0,004	0,00
4	0,007	0,005	0,007	0,01	4	0,006	0,007	0,008	0,01
6	0,012	0,011	0,012	0,01	6	0,013	0,016	0,014	0,01
7	0,016	0,014	0,015	0,02	7	0,017	0,021	0,019	0,02
8	0,024	0,017	0,023	0,02	8	0,021	0,025	0,019	0,02
9	0,025	0,019	0,024	0,02	9	0,033	0,027	0,022	0,03
10	0,026	0,020	0,027	0,02	10	0,027	0,031	0,025	0,03
13	0,037	0,025	0,035	0,03	13	0,039	0,040	0,037	0,04
14	0,040	0,029	0,038	0,04	14	0,044	0,042	0,042	0,04
15	0,047	0,041	0,044	0,04	15	0,048	0,047	0,047	0,05
16	0,049	0,044	0,047	0,05	16	0,052	0,051	0,051	0,05
17	0,050	0,045	0,048	0,05	17	0,053	0,052	0,052	0,05
20	0,061	0,050	0,054	0,06	20	0,065	0,067	0,062	0,06
21	0,065	0,053	0,058	0,06	21	0,067	0,069	0,064	0,07
22	0,070	0,056	0,061	0,06	22	0,072	0,070	0,069	0,07
23	0,077	0,071	0,067	0,07	23	0,079	0,080	0,076	0,08
24	0,078	0,072	0,069	0,07	24	0,081	0,081	0,078	0,08
27	0,089	0,083	0,079	0,08	27	0,098	0,097	0,090	0,10
28	0,096	0,088	0,086	0,09	28	0,105	0,109	0,097	0,10
29	0,097	0,090	0,088	0,09	29	0,107	0,106	0,099	0,10
30	0,099	0,092	0,090	0,09	30	0,109	0,107	0,102	0,11

Tabela F.21 – Expansões individuais QX.5 e QX.6 – Cimento B

Idade (dias)	QX.5				Idade (dias)	QX.6			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,002	0,003	0,003	0,00	3	0,002	0,001	0,004	0,00
4	0,005	0,005	0,005	0,01	4	0,009	0,005	0,008	0,01
6	0,011	0,010	0,010	0,01	6	0,012	0,008	0,011	0,01
7	0,016	0,015	0,014	0,01	7	0,015	0,010	0,013	0,01
8	0,021	0,019	0,017	0,02	8	0,021	0,019	0,019	0,02
9	0,021	0,020	0,019	0,02	9	0,025	0,023	0,023	0,02
10	0,024	0,025	0,023	0,02	10	0,028	0,026	0,025	0,03
13	0,032	0,033	0,031	0,03	13	0,035	0,034	0,032	0,03
14	0,038	0,037	0,035	0,04	14	0,041	0,040	0,043	0,04
15	0,042	0,040	0,039	0,04	15	0,043	0,043	0,046	0,04
16	0,044	0,042	0,040	0,04	16	0,048	0,048	0,049	0,05
17	0,048	0,047	0,044	0,05	17	0,049	0,049	0,051	0,05
20	0,056	0,053	0,050	0,05	20	0,060	0,060	0,061	0,06
21	0,062	0,058	0,054	0,06	21	0,062	0,061	0,062	0,06
22	0,065	0,061	0,057	0,06	22	0,066	0,066	0,067	0,07
23	0,069	0,064	0,062	0,07	23	0,068	0,069	0,070	0,07
24	0,070	0,064	0,064	0,07	24	0,070	0,070	0,073	0,07
27	0,085	0,081	0,079	0,08	27	0,092	0,093	0,093	0,09
28	0,093	0,088	0,085	0,09	28	0,096	0,096	0,098	0,10
29	0,096	0,092	0,087	0,09	29	0,098	0,098	0,099	0,10
30	0,099	0,092	0,088	0,09	30	0,099	0,099	0,100	0,10

Tabela F.22 – Expansões individuais QZ.1 e QZ.2 – Cimento B

Idade (dias)	QX.5				Idade (dias)	QX.6			
	Expansão (%)			Média		Expansão (%)			Média
	CP 1	CP 2	CP 3		CP 1	CP 2	CP 3		
2	0,000	0,000	0,000	0,00	2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,004	0,002	0,003	0,00	3	0,003	0,009	0,009	0,01
5	0,012	0,011	0,013	0,01	5	0,014	0,014	0,019	0,02
6	0,016	0,015	0,015	0,02	6	0,019	0,018	0,021	0,02
7	0,019	0,018	0,019	0,02	7	0,020	0,019	0,023	0,02
8	0,023	0,019	0,022	0,02	8	0,022	0,022	0,025	0,02
9	0,025	0,021	0,024	0,02	9	0,023	0,023	0,029	0,02
12	0,030	0,025	0,028	0,03	12	0,024	0,024	0,031	0,03
13	0,035	0,033	0,038	0,04	13	0,028	0,029	0,035	0,03
14	0,039	0,037	0,042	0,04	14	0,031	0,031	0,037	0,03
15	0,040	0,039	0,044	0,04	15	0,031	0,031	0,038	0,03
16	0,043	0,041	0,047	0,04	16	0,032	0,033	0,039	0,03
19	0,048	0,047	0,052	0,05	19	0,033	0,034	0,040	0,04
20	0,050	0,049	0,054	0,05	20	0,032	0,038	0,043	0,04
21	0,053	0,052	0,058	0,05	21	0,035	0,041	0,046	0,04
22	0,060	0,060	0,062	0,06	22	0,038	0,045	0,050	0,04
23	0,060	0,060	0,063	0,06	23	0,038	0,046	0,050	0,04
26	0,077	0,072	0,076	0,08	26	0,043	0,051	0,055	0,05
27	0,082	0,079	0,082	0,08	27	0,046	0,054	0,059	0,05
28	0,087	0,083	0,085	0,08	28	0,047	0,055	0,061	0,05
29	0,090	0,085	0,087	0,09	29	0,049	0,057	0,063	0,06
30	0,097	0,089	0,091	0,09	30	0,050	0,059	0,065	0,06

ANEXO G

Resultados individuais – ASTM C-1293 acelerado

Na Tabela G.1 estão apresentados as expansões individuais das amostras ensaiadas com o cimento A.

Tabela G.1 – Expansões individuais BA.3, BA.4 e BA.7

Idade (dias)	BA.3				BA.4				BA.7			
	Expansão (%)				Expansão (%)				Expansão (%)			
	CP 1	CP 2 ¹⁸	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
1	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00
7	0,007	0,012	0,011	0,01	0,008	0,009	0,009	0,01	-0,003	0,000	-0,004	0,00
15	0,009	0,008	0,007	0,01	0,011	0,008	0,009	0,01	-0,004	0,003	0,002	0,00
42	0,015	0,010	0,019	0,01	0,015	0,015	0,010	0,01	-0,002	0,008	0,007	0,00
57	0,021	0,013	0,022	0,02	0,020	0,017	0,017	0,02	0,007	0,012	0,009	0,01
70	0,026	0,016	0,024	0,02	0,021	0,021	0,021	0,02	0,010	0,013	0,012	0,01
84	0,025	0,017	0,025	0,02	0,020	0,021	0,019	0,02	0,012	0,016	0,012	0,01
98	0,026	0,017	0,027	0,02	0,023	0,023	0,021	0,02	0,013	0,017	0,013	0,01
112	0,027	0,017	0,028	0,02	0,023	0,024	0,021	0,02	0,012	0,014	0,012	0,01
126	0,033	0,019	0,032	0,03	0,026	0,027	0,020	0,02	0,012	0,016	0,013	0,01
140	0,028	0,017	0,028	0,02	0,024	0,023	0,022	0,02	0,007	0,015	0,009	0,01
154	0,031	0,016	0,030	0,03	0,026	0,025	0,021	0,02	0,004	0,015	0,010	0,01
168	0,030	0,015	0,029	0,02	0,025	0,025	0,021	0,02	0,006	0,013	0,011	0,01
182	0,031	0,015	0,030	0,03	0,025	0,026	0,024	0,02	0,008	0,015	0,013	0,01

Nas Tabelas G.2 a G.10 estão apresentados os tempos das ondas ultra-sônicas individuais bem como o comprimento longitudinal medido com paquímetro das amostras ensaiadas com o cimento A e ensaiadas pelo MAPC a 60°C. Para o cálculo da velocidade ultra-sônica, fez-se uso da Equação G.1

$$v = \frac{\text{comprimento}}{\text{tempo}} (m/s)$$

Equação G.1

Tabela G.2 – Comprimento e tempos individuais BA.3 – CP 1

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.3 – CP 1				
		Tempo (µs)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média
1	285,18	69,4	67,3	66,3	69,0	68,0
7	285,42	62,1	63,0	64,0	61,9	62,8
15	285,05	63,9	63,0	61,6	61,6	62,5
42	285,30	60,8	62,2	62,8	60,6	61,6
57	285,29	60,0	61,2	61,4	59,9	60,6
70	285,19	60,2	61,3	61,5	60,0	60,8
84	285,29	60,5	61,5	61,6	60,1	60,9
98	285,19	60,5	61,5	61,3	59,7	60,8
112	285,37	60,2	61,5	61,5	59,6	60,7
126	285,44	60,4	61,3	60,9	59,4	60,5
140	285,21	60,2	61,0	60,5	59,2	60,2
154	285,23	59,8	61,0	60,7	59,4	60,2
168	285,59	60,2	61,2	61,1	59,2	60,4
182	285,22	61,5	61,7	61,4	60,6	61,3

¹⁸ Corpo-de-prova com defeito no pino metálico – Tabela G.1 / BA.3 / CP 2

Tabela G.3 – Comprimento e tempos individuais BA.3 – CP 2

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.3 – CP 2				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	285,56	68,4	69,5	68,5	66,9	68,3
7	285,72	64,1	62,8	61,6	63,1	62,9
15	285,78	63,3	63,7	62,4	61,9	62,8
42	285,56	62,1	63,1	62,1	60,6	62,0
57	285,57	61,1	62,2	61,1	60,0	61,1
70	285,47	61,4	62,4	61,0	60,3	61,3
84	285,81	61,4	62,1	61,0	60,1	61,2
98	285,61	60,8	61,7	61,1	59,7	60,8
112	285,50	60,6	62,0	60,7	59,7	60,8
126	285,56	60,6	61,7	60,6	59,8	60,7
140	285,92	60,3	61,5	60,2	59,4	60,4
154	285,51	61,0	60,7	61,8	60,7	61,1
168	285,68	61,5	61,7	61,0	60,0	61,1
182	285,84	62,7	61,7	61,6	61,5	61,9

Tabela G.4 – Comprimento e tempos individuais BA.3 – CP 3

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.3 – CP 3				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	285,70	66,5	69,4	70,0	67,2	68,3
7	285,40	63,0	64,1	64,4	63,1	63,7
15	285,27	62,4	62,5	63,7	65,3	63,5
42	285,88	61,5	62,8	63,2	61,3	62,2
57	286,06	61,5	60,5	60,6	62,1	61,2
70	285,73	61,6	61,0	60,6	62,3	61,4
84	285,38	61,2	60,6	60,5	62,1	61,1
98	285,55	61,4	60,4	60,6	62,1	61,1
112	285,64	61,3	60,1	60,1	61,7	60,8
126	285,82	60,9	60,0	60,0	62,2	60,8
140	285,66	60,4	59,6	59,7	61,1	60,2
154	285,79	60,3	59,8	59,7	61,4	60,3
168	285,82	60,9	60,0	60,1	61,6	60,7
182	284,93	61,2	60,3	59,8	61,9	60,8

Tabela G.5 – Comprimento e tempos individuais BA.4 – CP 1

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.4 – CP 1				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	284,69	69,9	72,4	71,3	69,5	70,8
7	284,88	66,3	64,5	64,2	64,5	64,9
15	284,51	64,2	65,2	63,4	62,8	63,9
42	284,86	63,7	65,1	64,1	62,3	63,8
57	285,08	61,9	63,5	62,3	61,4	62,3
70	285,05	62,2	63,5	62,4	61,2	62,3
84	284,87	63,3	64,1	63,0	61,6	63,0
98	284,48	62,6	63,2	62,8	61,1	62,4
112	284,83	61,7	63,0	62,5	61,3	62,1
126	284,99	61,5	63,3	61,9	61,2	62,0
140	285,06	61,7	62,5	61,3	60,8	61,6
154	284,84	63,4	62,9	61,7	61,1	62,3
168	285,19	62,0	63,0	61,8	60,8	61,9
182	284,50	61,5	62,7	61,2	59,5	61,2

Tabela G.6 – Comprimento e tempos individuais BA.4 – CP 2

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.4 – CP 2				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	284,84	69,3	70,8	70,8	69,2	70,0
7	285,03	65,5	64,4	64,3	65,1	64,8
15	284,77	64,2	63,5	66,7	65,7	65,0
42	285,06	64,8	63,1	63,5	64,4	64,0
57	285,13	63,5	61,8	62,3	63,4	62,8
70	285,01	63,4	61,6	62,1	63,0	62,5
84	294,91	63,4	62,2	62,5	63,1	62,8
98	285,15	63,6	62,1	62,2	62,9	62,9
112	284,96	63,3	62,4	62,0	63,0	62,7
126	284,88	62,7	61,6	61,5	62,2	62,0
140	284,97	62,4	61,2	61,1	62,0	61,7
154	284,80	63,1	61,4	61,7	62,6	62,2
168	285,17	62,5	61,4	61,7	62,5	62,0
182	284,87	62,4	61,5	60,5	62,3	61,7

Tabela G.7 – Comprimento e tempos individuais BA.4 – CP 3

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.4 – CP 3				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	284,76	70,2	70,0	71,3	71,6	70,8
7	285,10	64,0	64,1	65,7	65,1	64,7
15	284,87	65,2	64,7	63,7	65,5	64,8
42	285,06	64,8	63,1	63,5	64,4	63,7
57	285,13	63,5	61,8	62,3	63,4	62,8
70	285,01	63,4	61,6	62,1	63,0	62,5
84	294,91	63,4	62,2	62,5	63,1	62,5
98	285,15	63,6	62,1	62,2	62,9	62,7
112	284,96	63,3	62,4	62,0	63,0	62,4
126	284,88	62,7	61,6	61,5	62,2	62,2
140	284,97	62,4	61,2	61,1	62,0	61,7
154	284,80	63,1	61,4	61,7	62,6	61,9
168	285,17	62,5	61,4	61,7	62,5	62,3
182	284,87	62,4	61,5	60,5	62,3	62,1

Tabela G.8 – Comprimento e tempos individuais BA.7 – CP 1

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.7 – CP 1				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	285,35	65,1	68,2	68,2	65,8	66,8
7	284,98	64,3	62,0	62,5	63,4	63,1
15	284,72	62,8	61,7	65,7	65,6	64,0
42	284,99	62,1	64,3	63,3	62,6	63,1
57	285,30	60,1	62,3	61,9	60,3	61,2
70	285,21	59,8	62,4	61,7	60,5	61,1
84	295,18	59,5	62,2	61,5	59,7	60,7
98	284,91	59,0	61,5	60,5	59,4	60,1
112	284,81	58,4	61,0	59,9	59,0	59,6
126	285,17	59,0	61,2	60,6	59,6	60,1
140	285,21	58,6	61,2	60,2	59,1	59,8
154	285,52	58,5	60,7	61,0	59,3	59,9
168	285,48	58,4	60,8	60,5	58,9	59,7
182	285,25	58,6	60,0	60,1	58,9	59,4

Tabela G.9 – Comprimento e tempos individuais BA.7 – CP 2

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.7 – CP 2				
		Tempo (μ s)				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	285,49	65,0	67,5	68,3	65,7	66,6
7	285,25	64,3	63,0	62,3	65,2	63,7
15	285,69	66,3	64,4	61,7	61,7	63,5
42	285,53	63,0	61,1	61,3	63,2	62,2
57	285,64	59,9	61,5	61,6	59,8	60,7
70	285,46	59,9	61,7	61,7	60,2	60,9
84	285,55	59,4	61,8	61,1	59,5	60,5
98	285,40	59,4	61,1	61,0	59,4	60,2
112	285,41	60,2	60,4	60,5	59,1	60,1
126	285,47	59,2	60,7	60,7	59,2	60,0
140	285,41	59,0	60,1	60,6	58,7	59,6
154	285,67	60,1	60,3	60,2	59,1	59,9
168	285,60	60,0	60,0	60,5	58,6	59,8
182	285,64	60,6	59,0	60,4	58,8	59,7

Tabela G.10 – Comprimento e tempos individuais BA.7 – CP 3

Idade (dias)	Comprim. (mm)	BA.7 – CP 3				
		Tempo (μ s)				Média
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	
1	285,51	65,2	68,5	68,6	65,3	66,9
7	285,66	61,9	63,5	63,5	61,7	62,7
15	285,46	65,7	64,0	61,4	61,8	63,2
42	285,23	62,1	61,5	61,4	62,7	61,9
57	285,30	59,4	60,7	61,2	59,7	60,3
70	285,28	61,5	61,4	61,3	60,2	61,1
84	295,21	60,6	61,5	61,5	60,3	61,0
98	285,57	59,7	60,7	60,6	60,1	60,3
112	285,24	59,6	60,6	60,9	60,0	60,3
126	285,22	59,7	61,5	60,6	59,6	60,4
140	285,55	59,1	60,4	60,5	60,1	60,0
154	285,62	59,5	60,3	60,4	59,1	59,8
168	285,58	59,0	60,1	60,1	58,9	59,5
182	285,57	60,2	59,4	59,7	60,5	60,0

Na Tabela G.11 estão apresentadas as massas individuais das amostras ensaiadas com o cimento A e ensaiadas pelo MAPC a 60°C.

Tabela G.11 – Massas individuais BA.3, BA.4 e BA.7

Idade (dias)	BA.3				BA.4				BA.7			
	Massa (g)				Massa (g)				Massa (g)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
1	4.015	4.021	4.010	4.015	3.956	3.943	4.012	3.970	4.075	4.045	4.024	4.048
7	3.984	3.996	3.984	3.988	3.923	3.906	3.971	3.933	4.038	4.005	3.997	4.013
15	3.996	3.995	3.967	3.986	3.940	3.897	3.958	3.932	4.023	4.013	3.999	4.012
42	3.979	3.972	3.966	3.972	3.908	3.892	3.931	3.910	4.000	4.002	3.998	4.000
57	3.999	3.985	3.992	3.992	3.938	3.910	3.966	3.938	4.042	4.020	4.005	4.022
70	3.996	3.980	3.972	3.982	3.925	3.913	3.975	3.938	4.041	4.011	4.000	4.017
84	3.997	3.984	3.988	3.990	3.922	3.912	3.956	3.930	4.049	4.017	4.000	4.022
98	3.996	3.981	3.988	3.989	3.929	3.912	3.963	3.935	4.050	4.015	4.002	4.022
112	3.994	3.974	3.989	3.986	3.931	3.914	3.961	3.935	4.048	4.015	4.000	4.021
126	3.998	3.975	3.991	3.988	3.934	3.914	3.961	3.936	4.040	4.023	4.005	4.023
140	3.995	3.975	3.990	3.987	3.928	3.915	3.961	3.935	4.033	4.017	4.004	4.018
154	4.001	3.978	3.990	3.990	3.932	3.917	3.958	3.936	4.032	4.022	4.006	4.020
168	3.994	3.974	3.990	3.986	3.929	3.918	3.961	3.936	4.033	4.016	4.007	4.018
182	3.991	3.978	3.976	3.982	3.922	3.912	3.975	3.936	4.043	4.010	4.003	4.019