

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL -
PPGEC

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO:
AVALIAÇÃO DO MÉTODO QUÍMICO DE ENSAIO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

PAULO HENRIQUE BORBA ROLIM

Florianópolis - SC
Julho/2010

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

R748r Rolim, Paulo Henrique Borba

Reação álcali-agregado [dissertação] : avaliação do método químico de ensaio / Paulo Henrique Borba Rolim; orientador, Philippe Jean Paul Gleize. - Florianópolis, SC, 2010.

97 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Reação álcali agregado. 3. Método químico. 4. Reatividade de rochas. I. Gleize, Philippe Jean Paul. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

AVALIAÇÃO DO MÉTODO QUÍMICO DE ENSAIO

PAULO HENRIQUE BORBA ROLIM

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

Especialidade **ENGENHARIA CIVIL** e aprovada em sua forma final
pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr. Ing.
(orientador)

Prof^a. Janaíde Cavalcante Rocha
(coordenadora do curso)

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr. (UFSC)
(membro)

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr. (UFSC)
(membro)

Prof. Vladimir Antonio Paulon, Dr. (UNICAMP)
(examinador externo)

Florianópolis - SC
Julho/2010

*“Tudo deveria se tornar o mais simples possível,
mas não simplificado”*
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Foram muitas as pessoas que compartilharam dos momentos em que estive envolvido com a elaboração deste trabalho. Num primeiro momento agradeço ao meu orientador de TCC, prof. Luís Alberto Gómez, que me incentivou a seguir a carreira acadêmica. Em seguida ao meu orientador do mestrado, prof. Philippe Gleize, que esteve ao meu lado durante toda a jornada do curso, estando disponível para conversas que colaboraram para este trabalho bem como para a edificação de ideais relacionados com a vida acadêmica.

Aos meus pais, irmã e cunhado, que sempre me apoiaram a seguir a carreira de estudos para me tornar professor, amo muito essas figuras singulares deste mundo.

À pessoa fenomenal que se demonstrou ser a Dr. Nicole Hasparyk, pesquisadora de Furnas S.A., esteve à frente desta pesquisa contribuindo com muito conhecimento na área da reação álcali-agregado.

Agradeço também a todos os pesquisadores que estava presentes nas reuniões que realizamos em Furnas: Paulo Monteiro, Helena Carasek, Cristiane Silva, Tiago Couto, Wilson, Luiz Eiger, Francieli Tiecher, Márcia Boscato, Vladimir Paulon, enfim, todos vocês colaboraram muito para meu aprendizado neste assunto tão vasto e impressionante.

Minha família também tem parte fundamental nisso tudo, pai, mãe e irmã, sempre incentivando a busca por esse sonho, que agora se torna realidade.

Amigos que fiz nesses anos todos que vivi na “ilha da magia”, amizades essas que sempre acrescentaram pontos positivos na minha vida e na maneira de encarar os fatos. Aos colegas e funcionários da UFSC também sou muito grato.

Duas pessoas muito importantes são os Srs. Ademir e Álvaro. Graças a eles tive a oportunidade de identificar pontos críticos que interferem no ensaio químico das rochas. Além disso, um enorme aprendizado de vários outros tipos de ensaios que são realizados na empresa de Furnas S.A., e as formas mais corretas de se administrar o uso de um laboratório de química.

Foram muito proveitosos todos esses anos de estudo, um período realmente marcante para todos os que participaram dessa etapa. Agradeço por tudo que vivenciei nesse período e tenho a certeza de que todas as pessoas a quem dedico este trabalho, as mesmas a quem agradeço, têm um lugar muito especial em minha vida. Valeu pessoal!!!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA).....	4
2.1.1. MECANISMO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA.....	5
2.1.2. A INFLUÊNCIA DO CIMENTO	9
2.2. MEDIDAS PREVENTIVAS PARA A NÃO OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	10
2.3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO AGREGADO.....	11
2.3.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA	12
2.3.2. MÉTODOS QUÍMICOS	14
2.3.2.1. MÉTODO QUÍMICO SIMPLES.....	14
2.3.2.2. MÉTODO DE CHATTERJI.....	20
2.3.3. EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA.....	21
2.3.4. EXPANSÃO EM PRISMAS DE CONCRETO	24
2.4. ROCHAS.....	25
2.4.1. FORMAÇÃO DAS ROCHAS.....	28
2.4.2. ROCHAS ÍGNEAS	30
2.4.3. ROCHAS SEDIMENTARES.....	32
2.4.4. ROCHAS METAMÓRFICAS	33
2.5. CONSIDERAÇÕES DA BIBLIOGRAFIA.....	36
CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	37
3.1. MATERIAIS	38
3.1.1. AGREGADOS	38
3.1.2. CIMENTO.....	39
3.2. MÉTODOS.....	39
3.2.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA	39
3.2.2. MÉTODO QUÍMICO SIMPLES.....	40
3.2.2.1. PREPARO DAS SOLUÇÕES	40
3.2.2.2. PREPARO DAS AMOSTRAS	42
3.2.2.3. ATAQUE DAS AMOSTRAS	43
3.2.2.4. DETERMINAÇÕES	43
3.2.3. VARIAÇÕES PROPOSTAS AO MÉTODO QUÍMICO	45
3.2.3.1. AUMENTO NO DIÂMETRO DOS AGREGADOS.....	45

3.2.3.2. TROCA DA SOLUÇÃO AGRESSIVA	46
3.2.3.3. AUMENTO NO TEMPO DE EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS	46
3.2.4. EXPANSÃO ACELERADA EM BARRAS DE ARGAMASSA	46
3.2.5. ANÁLISE QUÍMICA.....	47
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	48
4.1. ANÁLISE QUÍMICA.....	48
4.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA	49
4.3. EXPANSÃO ACELERADA EM BARRAS DE ARGAMASSA.....	63
4.4. MÉTODO QUÍMICO.....	64
CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	70
5.1. ANÁLISE QUÍMICA.....	71
5.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA	71
5.3. EXPANSÃO ACELERADA EM BARRAS DE ARGAMASSA.....	72
5.4. MÉTODO QUÍMICO.....	72
5.4.1. VARIAÇÕES APLICADAS AO MÉTODO.....	74
5.5. COMPORTAMENTO DAS ROCHAS	74
5.5.1. BASALTOS	75
5.5.2. GRANITOS	76
5.5.3. MICAXISTOS	79
5.5.4. QUARTZITOS.....	80
5.5.6. MILONITO	81
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO.....	82
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	83
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS.....	84
CAPÍTULO 8 – ANEXOS.....	91
8.1. ANEXO 1 – GRÁFICOS DE EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA.....	91
8.2. ANEXO 2 – VALORES OBTIDOS NOS ATAQUES QUÍMICOS	94
8.3. ANEXO 3 – ANÁLISE QUÍMICA DO CIMENTO	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fissuras em forma de mapas no piso da tomada d'água da UHE Paulo Afonso III	5
Figura 2 – Agregado contendo silicatos reativos.	6
Figura 3 – Mecanismo de dissolução da sílica (a) e (b)	7
Figura 4 – Formação das espécies $\equiv \text{Si}-\text{O}-$	7
Figura 5 – Formação do gel sílico-alcálico.....	8
Figura 6 – Micrografia do gel produto da reação álcali-sílica	8
Figura 7 – Curva de expansão/retração em concretos.....	9
Figura 8– Gráfico proposto para o método químico	15
Figura 9 – Gráfico de reatividade pelo método químico Francês	18
Figura 10 – Gráfico do método químico para rochas carbonáticas	19
Figura 11 – Medição das barras de argamassa.....	22
Figura 12 – Ciclo das rochas.....	26
Figura 13 – Tipos de ligações do grupo dos silicatos	29
Figura 14 – Diagrama (P x T) de formação das rochas.....	33
Figura 15 – Textura de um arenito a) antes metamorfismo e b) após metamorfisado, transformado em quartzito.	34
Figura 16 – Fluxograma de atividades do experimento.	37
Figura 17 – Reatores metálicos utilizados no ensaio.	43
Figura 18 – Lâmina petrográfica do BA.3	50
Figura 19 – Lâmina petrográfica do BA.4	50
Figura 20 – Lâmina petrográfica do BA.5	51
Figura 21 – Lâmina petrográfica do BA.7	51
Figura 22 – Lâmina petrográfica do GR.1	53
Figura 23 – Lâmina petrográfica do GR.2	54
Figura 24 – Lâmina petrográfica do GR.3	54
Figura 25 – Lâmina petrográfica do GR.4	55
Figura 26 – Lâmina petrográfica do GR.5	55
Figura 27 – Lâmina petrográfica do QX.2.....	58
Figura 28 – Lâmina petrográfica do QX.3.....	58
Figura 29 – Lâmina petrográfica do QX.5.....	59
Figura 30 – Lâmina petrográfica do QZ.1	61
Figura 31 – Lâmina petrográfica do QZ.2	61
Figura 32 – Lâmina petrográfica do ML.1	62
Figura 33 – Gráfico de expansão acelerada (%) em barras de argamassa (30 dias de ensaio).....	63
Figura 34 – Método químico simples.	65
Figura 35 – Método químico com fração diametral de 0,30-1,18 mm.....	66
Figura 36 – Método químico com fração diametral de 1,18-2,36 mm.....	67
Figura 37 – Método químico com tempo de exposição de 3 dias.	68
Figura 38 – Método químico com tempo de exposição de 7 dias.	69
Figura 39 – Expansão em barras de argamassa por idade em basaltos	91

Figura 40 – Expansão em barras de argamassa por idade em granitos	91
Figura 40 – Expansão em barras de argamassa por idade em micaxistos	92
Figura 40 – Expansão em barras de argamassa por idade em quartzitos	92
Figura 41 – Expansão em barras de argamassa por idade no milonito	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do método químico modificado	18
Tabela 2 – Frações granulométricas para o método das barras (ASTM C 227).	22
Tabela 3 – Classificação química das rochas	27
Tabela 4 – Principais grupos dos minerais.....	28
Tabela 5 – Minerais comuns formadores das rochas	29
Tabela 6 – Agregados selecionados para a pesquisa.....	38
Tabela 7 – Granulometria do material para ensaio	47
Tabela 8 – Análise química das rochas	48
Tabela 9 – Composição mineralógica dos basaltos.....	52
Tabela 10 – Composição mineralógica dos granitos.....	56
Tabela 11 – Composição mineralógica dos micaxistos	60
Tabela 12 – Composição mineralógica dos quartzitos.....	62
Tabela 13 – Composição mineralógica do milonito	63
Tabela 14 – Reatividade segundo os métodos aplicados nas rochas ígneas.....	70
Tabela 15 – Reatividade segundo os métodos aplicados nas rochas metamórficas.	70
Tabela 16 – Valores do método químico simples e variações (basaltos).....	94
Tabela 17 – Valores do método químico simples e variações (granitos).....	94
Tabela 18 – Valores do método químico simples e variações (micaxistos).....	95
Tabela 19 – Valores do método químico simples e variações (quartzitos).....	95
Tabela 20 – Valores do método químico simples e variações (milonito).....	95
Tabela 21 – Caracterização química do cimento	96
Tabela 22 – Caracterização físico-mecânica do cimento	97

RESUMO

A reação álcali-agregado é conhecida como um problema que vem causando grandes danos às estruturas de concreto no mundo todo. Por esse motivo, há um elevado volume de pesquisas e trabalhos direcionados para o estudo desse fenômeno. Entre as diferentes áreas de investigação, os ensaios para determinar a reatividade em rochas são bastante estudados. Em meio aos métodos existentes há o método químico simples, que tem a vantagem de fornecer resultados em até 3 dias, tornando-o interessante do ponto de vista econômico quando há urgência no diagnóstico dos agregados empregados no concreto. Porém, o ensaio está em desuso por não fornecer resultados confiáveis para agregados que participam da reação álcali-silicato. Com base no disposto este estudo propõe a análise da eficácia do método em rochas conhecidas por reagirem lentamente, denominadas lento-reativas. Para tal, foram selecionados 15 agregados divididos em 5 grupos de litologias diferentes, que são: cinco granitos, quatro basaltos, três micaxistos, dois quartzitos e um milonito. Sugerem-se variações em três parâmetros do ensaio, a saber: aumento no tempo de exposição dos agregados de 1 para 3 e 7 dias; aumento da fração granulométrica das amostras para 0,30 a 1,18 mm e 1,18 a 2,36 mm e a troca da solução de NaOH pela solução de Lawrence. A efeito de comparação foram aplicados os ensaios de análise petrográfica, expansão acelerada em barras de argamassa e análise química das rochas. O aumento para 7 dias no tempo de ataque das amostras mostrou resultados condizentes com o comportamento das rochas em campo e pelo ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa, tornando o ensaio mais representativo quando realizado dessa forma. Com 3 dias de exposição observou-se um possível fornecimento de álcalis pelo granito GR.1. As variações nos diâmetros das frações e uso da solução de Lawrence não forneceram resultados conclusivos.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction is a known problem that is causing great damage to concrete structures worldwide. Therefore, there is a high volume of research and work directed to study this phenomenon. Among the different areas of research, tests to determine the reactivity of rocks are extensively studied. In the middle of the existing methods is the simple chemical method, which has the advantage of providing results in up to three days, making it interesting from an economic perspective when there is urgency in the diagnosis of aggregates used in concrete. But the test is in disuse not providing reliable results for aggregates that participate in the alkali-silicate reaction. On the basis of this study it is proposed the revision of the effectiveness of the method in rocks known to react slowly, so-called slow reactive. To this end, were selected 15 aggregates divided into five groups of different lithologies, which are: five granites, four balasts, three micaschists, two quartzites and onde mylonite. Suggested variations in three parameters of test are: increase on the exposure time of aggregates of 1 to 3 and 7 days, an increase of particle size fraction of samples from 0,30 to 1,18 mm and 1,18 to 2,36 mm and, the exchange of NaOH solution by the Lawrence's solution. As effect of comparison tests were applied to petrographic analysis, accelerated expansion in mortar bars and chemical composition of the rocks. The increase for seven days in time of attack of samples showed consistent results with the behavior of rocks in field and the accelerated expansion of mortar bars, making the test more representative when done by this way. With three days of exposure there was a potential for an alkali release from granite GR.1. The diameter variations of fractions and using of Lawrence's solution did not provide conclusive results.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Desde que a reação álcali-agregado foi relatada pela primeira vez por Thomas E. Stanton, em 1940, o número de casos citados de deterioração precoce de estruturas tais como pontes, estradas, barragens de usinas hidrelétricas, fundações, entre outras, que tem contato com teor de umidade considerável, vem aumentando. No Brasil, por exemplo, pode-se citar casos como na Usina Hidrelétrica de Moxotó, Paulo Afonso, Jaguará, Pedro Beicht, entre outros casos que mobilizaram diversos estudos no sentido de recuperação dessas obras (SABBAG, 2003).

Uma vez que os custos na recuperação e interdição das obras afetadas podem chegar facilmente à casa dos milhões de reais, torna-se justificável o financiamento de pesquisas que visem o estudo de técnicas de recuperação, para obras já comprometidas, e de prevenção para as estruturas a serem construídas. Outro problema, é que não há uma maneira efetiva se interromper a RAA uma vez iniciada (PACELLI & FONTOURA *apud*. HASPARYK, 1999).

O uso de adições tais como pozolanas (naturais e artificiais) e soluções de lítio podem mitigar a reação (HASPARYK, 1999; SHONG, 2008; SWAMMY, 1992). Há, no entanto, estudos que mostram o efeito inverso que algumas dessas técnicas podem causar se utilizadas sem controle (HASPARYK, 1999). Assim, torna-se necessário a previsão do comportamento que os agregados podem apresentar em campo.

Os métodos mais utilizados na determinação do caráter reativo de agregados fornecem resultados em no mínimo 16 dias, como é o caso do método acelerado em barras de argamassa (ASTM C 1260 e ABNT NBR 15577-4) e, seis meses no ensaio de expansão em prismas de concreto (ASTM C 1293; ABNT NBR 15577-6 e CSA A23.2-14A). Há, no entanto, um teste que tem a vantagem de ser realizado em apenas 3 dias, o método químico simples (ASTM C 289). Esse método já foi bastante empregado, porém, por apresentar às vezes resultados não condizentes ao comportamento de rochas em campo e a outros métodos considerados confiáveis, seu uso é questionado (OWSIK, 2007; WIGUM *et al.* 1997).

Tendo em mente a complexidade da estrutura dos agregados, chega a ser de certa forma pretensiosa a busca por apenas um método para fornecer resultados confiáveis com todos os tipos existentes de rochas (SHONG, 2008).

O fato de o método químico simples não fornecer resultados satisfatórios para grande parte das rochas testadas pode estar relacionado aos tipos de agregados utilizados no seu desenvolvimento, resultando em uma curva de calibração que classifica agregados do tipo lento-reativos como inócuos (OWSIK, 2007; SWAMMY, 1992; WIGUM *et al.*, 1997).

Dependendo de como os minerais componentes das rochas foram formados estas irão apresentar diferentes comportamentos em meio alcalino. Como exemplo pode-se citar os basaltos, que apresentam uma quantidade de sílica não tão bem cristalizada que pode ser fornecida rapidamente à solução; ou os granitos, que pelo grau de cristalização dos minerais exibem um fornecimento de sílica mais lento, porém um possível fornecimento de íons alcalinos, mais notável do que nos basaltos (LU *et al.*, 2006).

Dessa forma, generalizar limites iguais para toda a gama de agregados disponíveis na crosta terrestre pode induzir em falhas na interpretação dos resultados obtidos. Isso coloca o método estudado em uma posição difícil, a de ser rotulado como não compatível com as necessidades do meio técnico, sinônimo de descarte da cartilha de práticas recomendadas.

Essa pesquisa faz parte do projeto de P&D de FURNAS Centrais Elétricas S/A., dentro do ciclo 2004/2005 da ANEEL designado: “Identificação de agregados reativos e combate da reação álcali-agregado em barragens”. Os objetivos são apresentados no item a seguir.

1.1. OBJETIVOS

Como objetivo principal desta pesquisa tem-se o intuito de propor modificações do método químico (ASTM C 289) a partir da avaliação do comportamento de 15 agregados pertencentes a 5 diferentes tipos de rochas, a saber: granitos, basaltos, mica-xistos, quartzitos e um milonito. Pretende-se, a partir desse objetivo geral, atender aos seguintes objetivos específicos no estudo das rochas:

- Mostrar as limitações do método químico simples quando comparado com o ensaio de expansão acelerada em barras de argamassa (NBR 15577-4);
- Escolher a variação dos parâmetros do método químico (tempo, temperatura, granulometria, solução agressiva) que dê resultados mais próximos do ensaio de expansão acelerada em barras de argamassa (NBR 15577-4);
- Baseando-se na caracterização química e petrográfica dos agregados em estudo e nos resultados obtidos, estabelecer tendências de comportamento das rochas frente à reação álcali-agregado;

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

Patologia que acomete estruturas de concreto expostas à ambientes de elevada umidade (POOLE, 1992; SHONG, 2008), a **RAA** é uma reação química que ocorre entre os álcalis presentes na solução dos poros do concreto com algumas fases constituintes dos agregados (DIAMOND, 1997). Dessa forma, ambientes tais como pontes, blocos de fundação, barragens, estruturas marinhas, pavimentos submetidos ao ciclo gelo e degelo são conhecidas por apresentar esse tipo de reação (METHA & MONTEIRO, 1994).

Dependendo da constituição química das fases envolvidas, a reação álcali-agregado se divide em três tipos. Considera-se a reação **álcali-sílica** quando os componentes envolvidos fazem parte do grupo dos silicatos nas formas amorfa, criptocristalina e metaestáveis da sílica. A reação **álcali-silicato**, uma particularização da reação álcali-sílica, está relacionada à presença de quartzo tensionado ou de minerais expansivos da classe dos filossilicatos; esse tipo de reação é conhecido por ser mais lenta que a reação do tipo álcali-sílica. Um terceiro tipo conhecido é a reação **álcali-carbonato**, que se dá entre agregados contendo o mineral **dolomita**, reagindo com uma solução alcalina. Pelo processo conhecido por **desdolomitização**, esse mineral se transforma em brucita ($Mg[OH]_2$), que apresenta caráter expansivo em presença de água (HOBBS, 1988; KIHARA, 1993; HASPARYK, 1999).

Como resultado das reações **álcali-sílica** e **álcali-silicato** há a formação de um gel sílico-calcáreo-alcalino (C-S-K-H ou C-S-Na-H)¹ que, em presença de água, absorve-a, aumentando em volume (DRON & BRIVOT, 1992). Este aumento é acompanhado por tensões no concreto que, ultrapassando a resistência à tração do material, levam-no à ruptura; caracterizada pelo aparecimento de fissuras (HOBBS, 1988; HASPARYK, 1999). No caso de a estrutura apresentar armadura, as fissuras aparecem paralelas a esta, caso contrário, se manifestam em forma de “**mapas**” (TAYLOR, 1992). Outro indício de que a reação está instalada na estrutura é a possível exsudação do gel formado. A figura 1 representa bem o fenômeno.

¹ C = $Ca(OH)_2$; S = SiO_2 ; H = H_2O ; K = potássio e Na = sódio.



Figura 1 – Fissuras em forma de mapas no piso da tomada d'água da UHE Paulo Afonso III (SILVA, 2007).

Mesmo depois de mais de seis décadas de estudos da reação, ainda não há um completo entendimento do mecanismo que a reação se processa. Considera-se que ela ocorre em duas etapas: a reação química e as expansões causadas pela reação química (SHON, 2008).

Inúmeros estudos são conduzidos com a finalidade de amenizar o problema com o controle das expansões que podem vir a ocorrer. Atualmente, as principais áreas de pesquisa estão voltadas ao desenvolvimento de métodos rápidos e confiáveis para avaliação do potencial reativo de agregados, bem como combinações de agregados com adições suplementares (SHON, 2008).

São mostrados neste capítulo os conceitos mais recentes, formulados e aceitos, no que diz respeito ao mecanismo da reação; passando por uma revisão dos principais métodos conhecidos, relacionados à avaliação do potencial de reatividade dos agregados, bem como na avaliação do desempenho de adições com a finalidade de controle das expansões.

2.1.1. MECANISMO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

O mecanismo da reação pode ser dividido em duas partes, a saber, a **reação** química e a **expansão** originada pela reação química.

A reação química pode ser descrita em três passos distintos, que são: i) a dissolução da sílica, presente na estrutura dos agregados, pelo ataque das hidroxilas (OH^-); ii) equilíbrio de cargas do sistema pelos

cátions alcalinos (K^+ e/ou Na^+) presentes na solução dos poros; iii) combinação dos produtos com o hidróxido de cálcio (SHON, 2008).

A expansão originada pela reação ainda se apresenta como um desafio no conhecimento completo de seu mecanismo de atuação. Desde que começou a ser discutida no meio científico, em 1940, algumas teorias tem surgido para tentar explicar o fenômeno. Entre elas podem-se citar a teoria da pressão osmótica de Hansen (1944), a teoria da absorção de Vivian (1950) e a mais recente delas, proposta por Prezzi, Monteiro & Sposito (1997), baseada na teoria da dupla camada difusa de elétrons para a explicação das expansões e variações volumétricas derivadas da reação álcali-agregado (HASPARYK, 1999; PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO (1997).

A bibliografia sobre o assunto é bastante ampla; logo a reação química é descrita por pesquisadores como Hobbs (1988), Chatterji (2005), Collins *et al.* (2007), entre outros; e é apresentada a seguir.

A estrutura dos agregados pode ser fraca ou fortemente cristalizada (figura 2), caso a primeira premissa ocorra, o íon **hidroxila** (OH^-), presente na solução dos poros do concreto, penetra na estrutura do agregado rompendo algumas das ligações **siloxano** ($\equiv Si-O-Si \equiv$) e formando algumas ligações **silanol** ($Si-OH$) (figura 3):

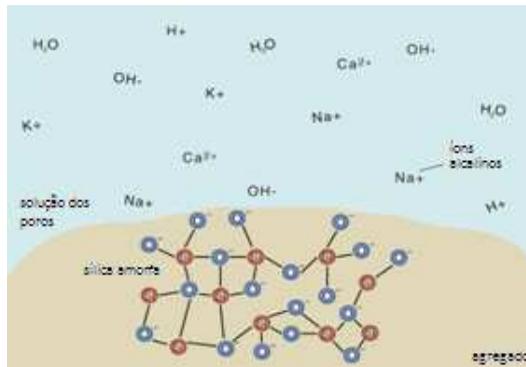


Figura 2 – Agregado contendo silicatos reativos. (COLLINS *et al.*, 2007).

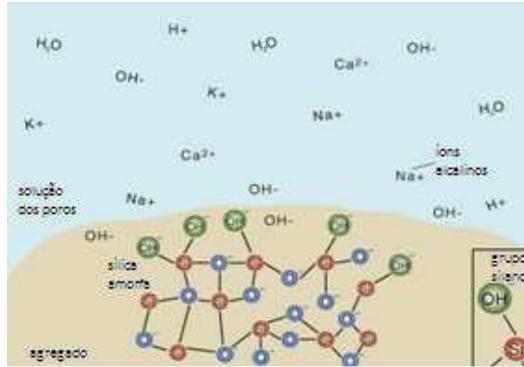
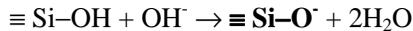


Figura 3 – Mecanismo de dissolução da sílica (a) e (b) (COLLINS *et al.*, 2007).

Com o contínuo ataque dos íons hidroxilas, os grupos silanól formados reagem produzindo espécies do tipo $\equiv Si-O^-$ (figura 4):



Cria-se então uma dupla camada elétrica (composta por cátions e ânions) aumentando a concentração dos cátions (Na^+ , K^+ e Ca^{++}) que irão reagir com as espécies $\equiv Si-O^-$ para formar um gel sílico-alcalino (figura 5):

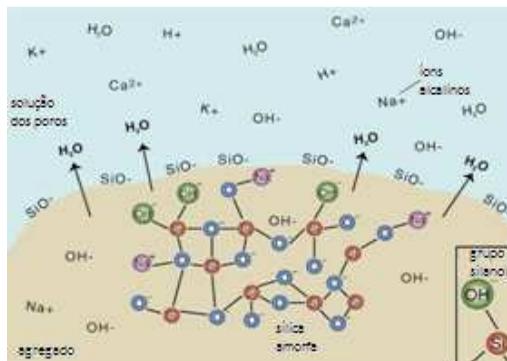
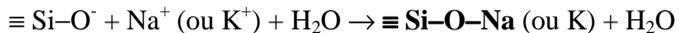


Figura 4 – Formação das espécies $\equiv Si-O^-$. (COLLINS *et al.*, 2007).

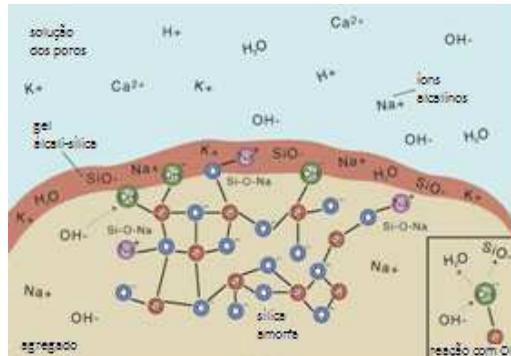


Figura 5 – Formação do gel sílico-alcalino (COLLINS *et al.*, 2007).

Considera-se que a o gel é composto por partículas muito próximas, sem atingir o tamanho de uma molécula (TIECHER, 2006). Essas, presentes dentro da dupla camada de elétrons, têm a dificuldade de se difundir na estrutura dos poros, pela presença do hidróxido de cálcio, que torna o gel mais viscoso (SHON, 2008). Dessa forma, o gel vai evoluindo de tamanho, modificando a estrutura dos poros; facilitando o acesso da água ao sítio da reação; o que acarreta no aumento nas expansões. A figura 6 apresenta uma micrografia do gel obtida através de um microscópio eletrônico de varredura.

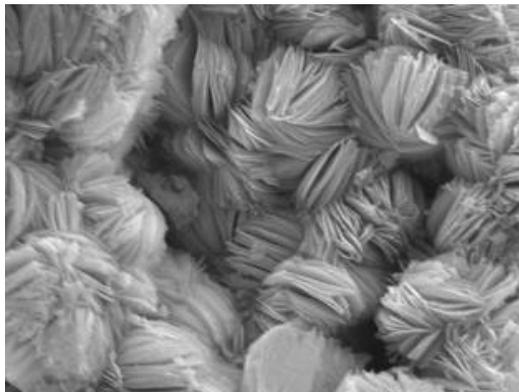


Figura 6 – Micrografia do gel produto da reação álcali-silica ampliada 4000 vezes (BEKTAS *et al.*, 2008).

2.1.2. A INFLUÊNCIA DO CIMENTO

O cimento age como principal ligante entre os agregados, e seu uso é indispensável para a fabricação do concreto. Existem diferentes tipos de cimentos normalizados, que variam desde o cimento puro (CP-I) e das modificações feitas através de adições (CP II, III e IV) ou maior finura como no caso do CP V.

Nas reações de hidratação há liberação de uma parcela de álcalis que fica disponível na solução dos poros do concreto. Todavia esses álcalis não são apenas provenientes da hidratação do cimento, como também da água utilizada, de minerais alcalinos presentes nos agregados e até mesmo das pozolanas que pode haver no material.

Nos primórdios do conhecimento da reação álcali-agregado acreditava-se que a limitação do teor de álcalis do cimento era suficiente para evitar o desenvolvimento da reação. Limitou-se dessa maneira o equivalente alcalino em 0,60 %. Posteriormente foi observado que apenas essa restrição não era suficiente, pois algumas obras executadas com cimento de equivalente alcalino inferior a 0,60 % apresentaram sinais da reação álcali-agregado.

Com o início da hidratação do cimento há a formação de etringita e de Ca(OH)_2 , que podem causar expansões no concreto até a idade de 7 dias. Na figura 7 há um exemplo da curva de expansão/retração de concretos formulados com aditivos compensadores de retração e do concreto normal.

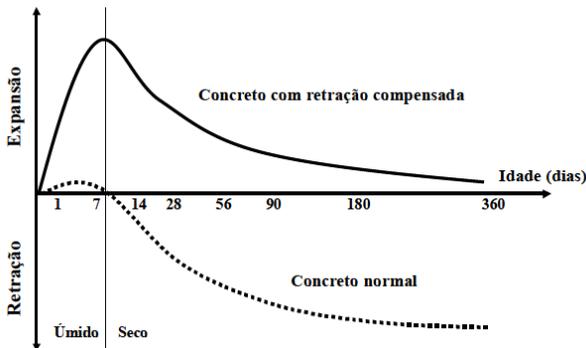


Figura 7 – Curva de expansão/retração em concretos (NETO *et al.*, 2007).

Outro fator a ser considerado é a retração que ocorre no cimento após a mistura com água, essa pode ser dos tipos: retração por secagem, retração autógena e retração química.

Em concretos com alta relação água/cimento (*i.e.* com alta porosidade), o gel pode se acomodar nos poros causando de certa forma uma compensação nas expansões.

Esses fatores citados, quando combinados podem ter influência nos resultados de métodos que tem como base a avaliação das expansões em corpos de prova.

2.2. MEDIDAS PREVENTIVAS PARA A NÃO OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Ainda não existe uma solução efetiva no combate à reação álcali-agregado, dessa forma, a solução para este problema torna-se um desafio para a comunidade científica.

Com o conhecimento obtido em décadas de estudo, torna-se possível uma aproximação que permite o uso de um agregado reativo de forma segura. Lee (SD) cita três pontos essenciais a serem considerados na prevenção da RAA, são eles:

- A diminuição do pH da solução para extinguir a solubilidade inicial da sílica;
- Redução na concentração de íons (Na^+ e K^+) de forma a restringir a formação do gel;
- Minimizar a permeabilidade do concreto de forma a impedir o acesso da água aos sítios da reação.

Nesse sentido encontram-se as adições minerais, conhecidas pelo nome de materiais cimentícios suplementares ('SCMs'). Esses conferem ao concreto beneficiamentos como a redução da permeabilidade, substituição de parte da massa de cimento quando reagem para formar o gel responsável pela resistência mecânica do cimento (LEE, SD). Conclui-se então que o uso de materiais pozolânicos no concreto pode contribuir no controle das variações volumétricas ocasionadas pela reação álcali-agregado.

Estudos direcionados com o uso de adições como metacaulim, sílica ativa, cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto forno tem demonstrado resultados positivos no controle das expansões causadas pela RAA. Pesquisadores como Diamond (1981) *apud*. Shong (2008) tem atribuído o efeito positivo causado pelo uso desses tipos de

adição, ao consumo de álcalis ocasionado pela reação instantânea entre a sílica das adições com as hidroxilas da solução dos poros.

No entanto, até mesmo o uso de adições pode ocasionar em um efeito contrário ao desejado pelo seu uso. Urhan *apud*. Hasparyk (1999) aponta a existência de um efeito péssimo no uso desses materiais, concluindo que dependendo da quantidade das fases reativas, do diâmetro dos grãos do agregado, bem como as características da adição (e.g. teor de álcalis e finura), o efeito pode ser oposto ao desejado.

O desenvolvimento de metodologias de ensaio para avaliação, tanto do potencial de reatividade que o agregado exibe quanto ao desempenho que as adições minerais apresentam no controle da RAA, mostram-se mais uma vez fortemente justificáveis. No entanto, os métodos desenvolvidos até o momento tem se demonstrado limitados para determinados tipos de agregados (SHONG, 2008).

De acordo com Grattan-Bellew (1997) o que se deseja de um teste de laboratório é que forneça uma previsão correta, de acordo com o comportamento em campo, de reatividade em 95% dos casos e, de preferência, apresente um coeficiente de variação interlaboratorial inferior a 12%. O autor ainda comenta que há a necessidade de que os métodos sejam rápidos, ou seja, forneçam resultados em poucos dias; no máximo algumas semanas.

Shong (2008) comenta que os testes se dividem em ensaios para avaliação de agregados, combinações entre cimento-agregado e identificação do gel da reação. Neste trabalho são abordados apenas os ensaios referentes aos dois primeiros casos. Citam-se ensaios como análise petrográfica, métodos químicos, expansão acelerada em barras de argamassa e expansão em prismas de concreto.

2.3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO AGREGADO

É extremamente desejável a existência de métodos com a capacidade de prever o potencial reativo dos agregados. Recentemente no IBRACON (2009) foi discutido a respeito da normatização existente para a RAA. Tratou-se da validade dos métodos propostos; empresas que realizam ensaios de reatividade expuseram suas inquietações quanto a confiabilidade dos métodos mais utilizados como o ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa (NBR 15577-4; ASTM C 1260) e o ensaio de expansão em prismas de concreto (NBR 15577-6; ASTM C 1293).

Shong (2008) faz uma ressalva em relação à utilização dos métodos disponíveis para avaliação da reatividade potencial em agregados. O autor comenta que devido à complexidade e variabilidade na composição e tamanho dos grãos dos agregados, é altamente improvável que apenas um método seja eficaz na avaliação de todas as rochas existentes.

Dessa forma é importante o conhecimento da gama de ensaios disponíveis, suas limitações e aplicações, antes de serem tiradas conclusões precipitadas com apenas resultados de um método em específico. Neste item são apresentados os métodos mais comuns na atualidade, que são: a análise petrográfica, alguns métodos químicos, métodos de expansão em barras de argamassa e, os de expansão em prismas de concreto.

2.3.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA

Considerado como a primeira etapa na identificação do potencial reativo em agregados (SWAMMY, 1992; WIGUM, 1995; MARFIL *et al.*, 1998), a análise petrográfica (ASTM C 295; NBR 15577-3) é conduzida de forma a apresentar as características que interferem no uso de agregados com misturas cimentícias. Os procedimentos seguidos na observação petrográfica dependem do propósito e da natureza do agregado, podendo variar da simples observação de uma amostra de mão até a necessidade de informações mais detalhadas; que aí envolvem técnicas tais como microscopia ótica e eletrônica (**MEV**), difração de raios-X (**DRX**), análises térmico diferencial (**ATD**) e espectrometria de energia dispersiva (**EDS**).

São dados importantes a serem levantados pela petrografia: formato e textura das partículas, tamanho dos grãos, estrutura interna (redes de poros, empacotamento dos grãos, tipo de cimentação entre os grãos), cor, composição mineralógica, a presença de heterogeneidades significativas, condição física geral, presença de coberturas (“coating”) ou encrustamentos, presença de constituintes conhecidos por causar reação química deletéria no concreto e as frações utilizadas nos estudos (ASTM C 295 - 07).

Para fins de classificação quanto à reatividade potencial dos agregados à reação álcali-agregado basicamente é levado em conta a presença de constituintes reativos, tais como, opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, quartzo tensionado, quartzo microcristalino e vidro vulcânico (ASTM C 295 - 07).

Dividem-se em grupos algumas partículas da amostra que estejam na fração entre 4 a 8 mm com a ajuda de um microscópio ótico. Depois de formados os grupos, as partículas representativas desses são preparadas em finas lâminas, moldadas em uma matriz de epóxi, para uma identificação mais detalhada. Wigum (1995) aponta que podem ocorrer diferenças entre partículas selecionadas no mesmo grupo, o que dificulta no critério de classificação dessas. Rochas que apresentam elevado grau de metamorfismo e deformação apresentam maior dificuldade em serem identificadas.

Esse ensaio pode ser utilizado tanto para a caracterização dos agregados quanto da investigação do concreto afetado pela reação. É muito importante na avaliação dos agregados, pois fornece informações que podem ajudar a se escolher o próximo método a ser conduzido com o agregado em estudo. O método é muito dependente da experiência do petrologista, sendo aconselhável além do exame da lâmina petrográfica um conhecimento da jazida qual a rocha foi extraída. Fato confirmado por Wigum *et al.* (1997) observando uma diferença de 6% na quantificação de rochas, quanto a sua reatividade, entre dois petrologistas diferentes.

Para a avaliação de rochas conhecidas por reagirem lentamente, ainda é necessário que sejam desenvolvidas metodologias mais precisas para a quantificação dos parâmetros microestruturais, tais como: tamanho dos grãos de quartzo, desenvolvimento de subgrãos no quartzo e graus de formação e recristalização do quartzo (WIGUM, 1995).

É importante ressaltar que apenas a realização da petrografia não atesta a reatividade de um agregado (GRATTAN-BELLEW, 1989; WIGUM, 1995); sendo necessários outros métodos para uma melhor avaliação.

Outro problema que existe quanto à definição da reatividade dos agregados é a questão do efeito péssimo. Agregados reativos causam uma expansão máxima em barras de argamassa quando presentes em quantidades baixas (e.g. 1 a 5%). Na petrografia é difícil a análise de baixas porcentagens, sendo facilmente negligenciadas; dificultando a identificação das fases reativas no estudo (BÉRUBÉ & FOURNIER, 1993).

2.3.2. MÉTODOS QUÍMICOS

Os métodos químicos têm como premissa a análise do comportamento que os agregados apresentam quando imergidos em uma solução de elevada alcalinidade. Esses têm a vantagem de rápido fornecimento dos resultados; fator importante na escolha de um ensaio quando se deseja o estudo de agregados para a concepção de um projeto (GRATTAN-BELLEW, 1997).

Como já citado anteriormente, é improvável a existência de apenas um método que forneça o caráter, reativo ou não, de toda a gama de agregados existentes. Assim, os métodos químicos não fogem dessa regra. Há casos em que foram empregados com êxito e, casos que os resultados não se mostraram confiáveis.

São apresentados neste item informações sobre os métodos químicos existentes, bem como variações aplicadas nesses, na tentativa de obtenção de resultados mais condizentes com o real comportamento apresentado em campo pelos agregados.

2.3.2.1. MÉTODO QUÍMICO SIMPLES

Constatado que os agregados reagiam em solução alcalina, liberando sílica, passou-se a aplicar testes químicos nas rochas no intuito de investigar como essas estariam desencadeando a RAA. Assim, foram introduzidas avaliações de perda/ganho de massa, quantidade de substâncias presentes na solução e a corrosão ('*etching*') que as amostras apresentavam frente ao ataque alcalino (MIELENZ *et al.*, 1947).

Com a análise do comportamento que os agregados estavam apresentando com os testes supracitados, observou-se que esses parâmetros não estavam ligados ao comportamento reativo das rochas; foi aí que Mielenz *et al.* (1947) desenvolveram uma metodologia baseada no ataque químico das rochas com a medição de dois parâmetros: redução da alcalinidade da solução agressiva (R_a) e a quantidade de sílica dissolvida na solução (S_d).

O método consiste na adição da quantidade de 25 g de agregado, moído na fração entre 0,30 e 0,15 mm, dentro de um recipiente metálico com posterior adição da solução de NaOH a 1 N e vedação do equipamento. Adiciona-se o reator em banho-maria a temperatura de 80°C durante 24h. São controlados dessa forma a quantidade de agregado/solução inseridas no reator, a fração diametral das amostras, o

tipo/concentração da solução agressiva, o tempo de permanência e a temperatura em banho-maria; além dos procedimentos analíticos.

Os autores consideravam que os “materiais deletérios são os que utilizam os álcalis da forma mais eficiente possível na liberação da sílica”; em outras palavras, quanto maior a relação S_d/R_a , maior o potencial para a reatividade. Com base no estudo de expansão em barras de argamassa de 71 tipos de agregados, os pesquisadores determinaram o traçado de uma curva limite, em um gráfico de escala logarítmica, que delimita duas regiões: a dos agregados inócuos ($S_d/R_a < 1$) e dos deletérios ($S_d/R_a > 1$), como pode ser visualizado na figura 8. Os agregados são na maioria do tipo vidro vulcânico (obsidiana, perlita), calcedônia, opala, sílica criptocristalina (chert); alguns granitos, basaltos e riólitos também foram testados.

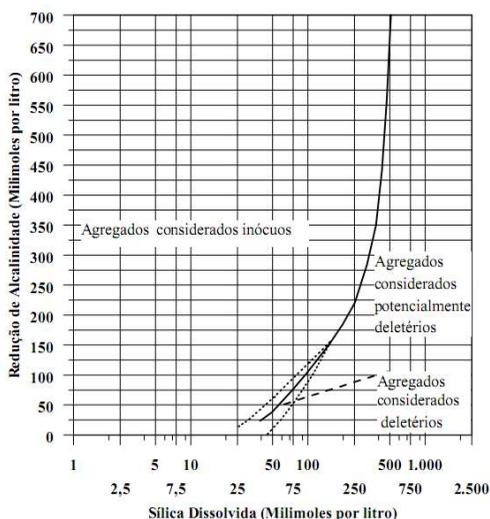


Figura 8– Gráfico proposto para o método químico ASTM C 289 (2007).

Posteriormente, em 1952, o ensaio foi normatizado como ASTM C 289, sendo bastante empregado em conjunto com o ensaio de expansão em barras de argamassa (ASTM C 227), normatizado dois anos antes (WIGUM *et al.*, 1997).

Com o passar do tempo foi observado que, para alguns tipos de agregados, o método não estaria indicando o potencial reativo. Wigum *et al.* (1997) apontam que nas 8ª e 9ª Conferências Internacionais em

Reação Álcali-Agregado (ICAAR) foram publicados 25 e 35 artigos, respectivamente, contendo relatos sobre a não efetividade dos métodos químico (ASTM C 289), expansão em barras de argamassa (ASTM C 227) e petrografia (ASTM C 295). Bérubé e Fournier (1993) tratam da existência de um número significativo de agregados, com potencial para a reação álcali-sílica, que passam no teste químico como inócuos; outros, com bom desempenho em campo falham. Sendo assim, os autores consideram o método severo demais para um número de agregados inócuos; não o recomendando para a avaliação da reatividade de agregados.

No trabalho de Mielenz *et al.* (1947) os autores comentam sobre a diversidade de comportamentos observados em diferentes tipos de rochas quando submetidas ao ataque químico. Dessa forma existem ressalvas na norma ASTM C 289 quanto à utilização do método; a não utilização dos resultados sem a combinação com outros métodos e que agregados contendo carbonatos de cálcio, magnésio, ferro, tais como calcita, dolomita, magnesita ou siderita, ou silicatos de magnésio como serpentina, podem mascarar os resultados.

Além dos resultados não serem condizentes com o real comportamento de algumas rochas, Dent Glasser e Kataoka (1981) mostraram outro problema em relação ao método. Em soluções com grande concentração de sílica, o uso de fenolftaleína como indicador torna o ponto de viragem indefinido e mais baixo do que deveria ser; resultando num menor consumo de ácido na titulação, resultando em valores baixos de R_d (MLADENOVIC, 2004; BERUBÉ & FOURNIER, 1993).

Ainda nesse sentido, Bérubé e Fournier (1993) apontam que a quantidade de sílica dissolvida (S_d) e a redução de alcalinidade (R_d) são afetadas por vários fatores mineralógicos: 1) O aumento da solubilidade do quartzo ao diminuir o tamanho do grão na moagem, aumentando a quantidade de sílica dissolvida; 2) a redução da S_d que pode ocorrer em presença de cálcio pela precipitação na forma C-S-H; 3) o consumo de íons hidroxila pelos íons de silício dissolvidos alterando a alcalinidade do meio, 4) a presença de gesso, zeolitas, argilominerais, silicatos hidratados de magnésio, óxidos de ferro e matéria orgânica. Todos fatores que afetam os resultados do método químico.

Wigum *et al.* (1997) resumem os principais problemas relacionados ao método químico em dois principais: o uso em rochas para as quais o método não foi projetado e, a influência de traços de rocha, que não estão presentes na fração especificada, tem na reação

(pela remoção da fração mais fina). Outro problema mencionado, mas que é comum aos outros métodos existentes, é a baixa precisão dos resultados; quando os valores estão abaixo de 100 mmoles/l considera-se um desvio padrão aceitável, entre os valores, de até 12 mmoles/l; caso o valor seja superior a 100 mmoles/l considera-se um coeficiente de variação de 12%, valores bem elevados quando comparados aos critérios de engenharia.

Wakizaka (2000) aponta que os fatores que controlam a sílica dissolvida são: as propriedades termodinâmicas, área específica, tamanho do grão e cristalinidade do material; já a R_a , segundo o autor, é influenciada pela quantidade de SiO_2 , grau de polimerização do SiO_4 nos minerais, área específica, tamanho dos grãos e, principalmente, a capacidade de troca catiônica; que, de acordo com Wakizaka, é derivada de argilominerais expansivos como a esmectita. Com esse critério, o autor observou que em rochas plutônicas, a R_a e a S_d são baixas por não conterem argilominerais; entretanto foi observado que a dolerita, que contém esmectita, apresentou alta R_a .

Dron e Brivot (1992) na tentativa de aprimorar o método químico propõem uma leve agitação nos reatores durante o ensaio na intenção de manter a homogeneidade da solução de NaOH; sem que haja atrito entre as partículas da amostra.

Xu (1987) comenta que o tamanho do grão do agregado submetido ao teste poderia ser mais bem estudado no método químico. Sorrentino (1992) testou agregados de diâmetros e tempo de exposição diferentes ao especificado pela norma americana. O autor propôs que as amostras compreendessem a fração entre 40 a 315 μm e a determinação das quantidades de SiO_2 e Na_2O fossem realizadas em 24, 48 e 72 horas. Os resultados são inseridos num diagrama de tempo de exposição *versus* $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$; conforme a figura 9. O método proposto foi submetido ao padrão Francês AFNOR P18-589 (RAMACHANDRAN & BEAUDOIN, 2001).

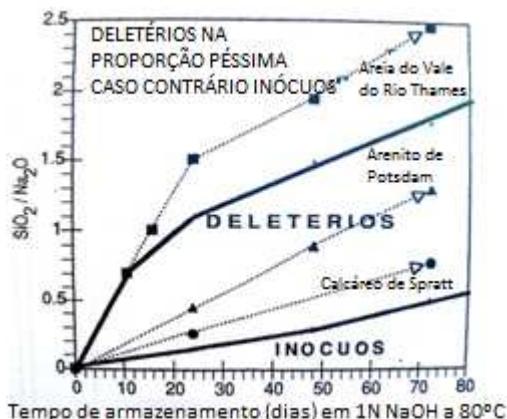


Figura 9 – Gráfico de reatividade pelo método químico Francês (RAMACHANDRAN & BEAUDOIN, 2001).

Suzuki *et al.* (2004) testando um agregado arenito-calcáreo pelo método químico japonês (JIS A1145:2001), na busca de correlações com o método acelerado de expansão em barras de argamassa, observaram que a medida em que se aumentou o tempo de exposição do agregado (de 1 para 4 e 7 dias) os valores de S_d e R_a aumentaram rapidamente, como pode ser visualizado na tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do método químico modificado

Tempo da Reação	S_d (mmol/l)	R_a (mmol/l)	S_d/R_a	Reatividade
24 horas	27	48	0,56	Inócuo
4 dias	80	91	0,88	Inócuo
7 dias	143	110	1,3	Deletério

Brand e Oberholster *apud*. Shong (2008) sugerem que um aumento no tempo de ensaio de 3 dias para 7 dias torna o ensaio mais representativo.

Em um estudo desenvolvido, com 140 variações no método químico em dois agregados reativos, Natesaiyer e Hover (1992) observaram que alguns compostos químicos como o sulfato de alumínio, sulfato de zinco e pirogalol (extraído do ácido gálico), foram efetivos em retardar a dissolução da sílica.

Com a intenção de criar um método químico para avaliar o potencial reativo de agregados contendo carbonatos siliciosos, Bérard e Roux, em 1966, fizeram uma modificação no método da ASTM C 289. Os autores estipularam o tratamento prévio do agregado, para a dissolução dos carbonatos, com ácido clorídrico a 12N e, a utilização de apenas 12,5 g do agregado; sendo finalmente o resultado multiplicado por dois. Fournier & Bérubé (2000) apresentam em seu trabalho o método químico canadense (CSA A23.2-26A) para avaliação de rochas carbonáticas. O método classifica os agregados tomando como base sua composição química, conforme ilustrado na figura 10. Os autores salientam que há a necessidade de confirmação da reatividade pelo método acelerado em barras de argamassa.

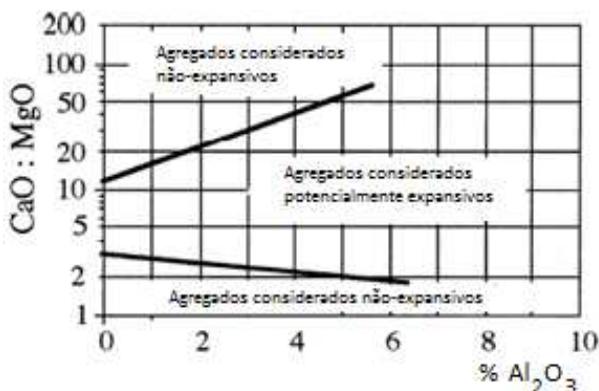


Figura 10 – Gráfico do método químico para rochas carbonáticas (FOURNIER & BÉRUBÉ, 2000).

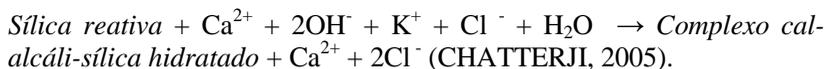
No Brasil, a CESP testou uma variedade de agregados pelo método químico, considerando o método insuficiente na determinação da reatividade para algumas rochas. O mesmo ocorreu quando Hasparyk (1999) testou um quartzito e um basalto reativos, classificados como inócuos pelo método químico. A reatividade dessas rochas foi acusada pelo método acelerado em barras de argamassa. Couto (2008) testou diversos agregados do estado de Goiás, encontrando comportamentos em não conformidade com o apresentado pelo ensaio acelerado em barras de argamassa. Entretanto, o autor menciona de uma correlação estatística entre a R_a e a S_d com as expansões ocorridas nas barras.

Holzer & Leeman (2005) testaram alguns agregados, com superfície polida, pelo procedimento químico de imersão em uma solução de 2M de NaOH a uma temperatura de 38°C, sem agitação, para

posterior análise da superfície dos agregados por microscopia eletrônica de varredura ambiental ('*ESEM*'). De acordo com os autores, o grau de dissolução dos minerais pareceu ser independente do tamanho do grão. Também observaram que a solução apresentou enriquecimento de Ca, Si, K, Li e Al, além de alguns minerais como micas e feldspatos se apresentarem como uma fonte de álcalis. Lu *et al.* (2006) realizando testes com um granito, um gnaisse e um K-feldspato, no intuito de analisar o fornecimento de álcalis de certos tipos de minerais à solução agressiva, o efeito do diâmetro dos agregados e aspectos microestruturais, aplicaram um método semelhante ao método químico. O procedimento consistia em adicionar os agregados em uma solução super-saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para posterior análise da solução. Os autores notaram um fornecimento de álcalis das rochas testadas. MIELENZ *et al.* (1947) já comentaram desse fornecimento de álcalis e completaram dizendo que “essa linha de estudos pode ser muito proveitosa”.

2.3.2.2. MÉTODO DE CHATTERJI

O método químico proposto por Chatterji, em 1989 se resume em digerir 100g de agregado, em seu estado natural, a 70 °C em uma solução de CaO em KCl saturado por 16h. Ocorre então a seguinte reação na mistura:



O CaCl_2 nascente diminui a solubilidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em solução. A diferença no conteúdo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da mistura e uma solução de controle, com uma areia de quartzo não-reativo, corresponde a quantia de K^+ que entrou no complexo hidratado cal-álcali-sílica. Os valores são determinados pela titulação duas soluções com HCl a 0,025 N (CHATTERJI, 2005).

Este método proposto tem várias vantagens, é simples e não precisa de instrumentos complicados. Pode ser conduzido em uma pedra e o resultado é obtido em 24 horas (CHATTERJI, 2005).

Considerando que a quantidade de OH^- é baixa, evita muitos dos problemas relacionados com a solução de 1 N de NaOH. O resultado não é afetado pela presença de cálcio, magnésio ou carbonatos ferrosos. O diâmetro da amostra pode ser ajustado de acordo ao tamanho do agregado (CHATTERJI, 2005).

O método foi testado em agregados da Dinamarca e um critério de aceitação foi sugerido. Experimentos preliminares detectaram a reatividade de agregados do Japão, Inglaterra, Suécia, Noruega, Bélgica, França e Itália (CHATTERJI, 2005).

Outra vantagem desse método é que, uma vez o agregado escolhido, sua qualidade pode ser controlada rápida, regularmente e com baixo custo. Este método não é afetado pela presença de carbonatos divalentes de metal. Porém pode dar resultados anômalos se o agregado for do tipo andesito (CHATTERJI, 2005).

2.3.3. EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA

Para medir as reações entre os álcalis e algumas fases reativas presentes nos agregados foi desenvolvido um método que avalia as expansões ocorridas em barras de argamassa. O ensaio veio a ser normatizado como ASTM C 227 e passou a ser amplamente utilizado na avaliação de agregados.

O método consiste na moldagem de quatro barras de argamassa com as dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm; a fração dos agregados é apresentada na tabela 2 e feita na proporção 1:2,25 (cimento:agregado). Até 24 horas após o desmolde é realizada a primeira leitura de comprimento, sendo as barras condicionadas em recipientes hermeticamente fechados, mantidos a temperatura de 38°C. Outras leituras são feitas aos 14 dias de idade e, aos 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 12 meses. Completadas as medições (figura 11) faz-se a média delas; considera-se o agregado reativo se as expansões excederem a 0,05% aos 3 meses ou 0,10% aos 6 meses.



Figura 11 – Medição das barras de argamassa (ABCP *apud*. JESUS, 2008).

Tabela 2 – Frações granulométricas para o método das barras (ASTM C 227).

ABNT	Material retido entre as peneiras de abertura normal	Porcentagem em massa
8	4,8 mm a 2,4 mm	10
16	2,4 mm a 1,2 mm	25
30	1,6 mm a 0,6 mm	25
50	0,6 mm a 0,3 mm	25
100	0,3 mm a 0,15 mm	15

Com o passar do tempo de utilização do ensaio foram surgindo algumas críticas referidas a este método. Kuperman *et al.* (2005) citam que além de muito demorado, o ensaio não detecta agregados do tipo lento-reativos e, apresenta excessiva lixiviação dos álcalis da argamassa. Bektas *et al.* (2008) observam que as expansões são medidas em apenas um sentido, enquanto que a reação álcali-agregado causa expansões multidirecionais.

Estudos foram conduzidos para análise da influência dos parâmetros envolvidos no ensaio, tais como: finura e teor de álcalis do cimento (STARK, 1979), normalidade da solução agressiva e diâmetro do agregado. Os resultados se mostraram interessantes e às vezes contraditórios; enquanto Davis e Oberholster observaram que em uma solução de 1N as expansões estavam sendo maiores do que para uma

solução de 1,5N, Bérubé e Fournier concluíram o oposto (BEKTAS, *et al.*, 2008). Lu *et al.* (2006) observaram uma maior reatividade para a fração de 1,25 a 2,50 mm. Em relação à finura do cimento, Bektas *et al.* (2008) observam que não há grande influência desse parâmetro nos resultados. Stark (1979) discute que o teor de álcalis, estabelecido em 0,60%, como limite para expansões tem que ser questionado, pois, segundo o autor, agregados testados com cimento de alto percentual alcalino, foram considerados inócuos; mesmo que reativos em campo.

Utilizando o ensaio de barras de argamassa, Constantiner e Diamond (2003) constataram o fornecimento de álcalis por agregados do grupo do feldspato. Na construção de uma ponte, com agregado inerte, os autores observaram que a adição do pó de um basalto, contendo feldspato alcalino, desencadeou a reação na estrutura; levando-os a crer que os álcalis fornecidos podem estar contribuindo para o desenvolvimento da reação.

Com a constante necessidade de resultados mais rápidos e confiáveis foi criado em 1986, por Davis e Oberholster, o método acelerado de expansão em barras de argamassa. O método se baseia nos princípios da ASTM C 227 com a aceleração do ensaio pela imersão das barras em na solução de NaOH (1N) a 80°C durante 14 dias². Para agregados que reagem lentamente é recomendável manter o ensaio até os 30 dias. São três barras de argamassa moldadas nos padrões da ASTM C 227 com o fator a/c fixado em 0,47.

Hasparyk (1999) menciona que no início o limite de expansão estabelecido foi de 0,11% aos 12 dias de ensaio. Valores superiores a esse caracterizavam o agregado como potencialmente reativo. Atualmente expansões abaixo de 0,10% aos 16 dias caracterizam o agregado inócuo; acima desse valor e até 0,20% o agregado é potencialmente reativo e, superior a 0,20% considerado deletério (ASTM C 1260 – 2007).

De acordo com Kuperman *et al.* (2005), o ensaio acelerado em barras de argamassa tem se mostrado adequado na avaliação de adições minerais para controle da RAA, porém, falhou ao caracterizar uma calcedônia reativa como inócuo, bem como um granito, da usina de Moxotó/BA. Fournier & Bérubé (2000) ainda comentam que o método da ASTM C 1260 não é apropriado para testar a reatividade de rochas carbonáticas.

² O tempo de duração do ensaio é de 16 dias; conta-se 2 dias para a moldagem e cura e 14 dias das barras em imersão na solução alcalina.

2.3.4. EXPANSÃO EM PRISMAS DE CONCRETO

O método de expansão em prismas de concreto é considerado o mais eficiente na previsão do comportamento de agregados em campo (KUPERMAN *et al.*, 2005; FOURNIER *et al.*, 2006). O ensaio tem duração de um ano, podendo ser estendido para 18 a 24 meses quando há intenção de verificar combinações entre agregados e adições (ASTM C 1293 – 2006).

O teste apresenta a vantagem da utilização do agregado em tamanho bem próximo ao que usualmente se faz nas obras.

São moldados três prismas de concreto, sendo sugerida a moldagem de um quarto prisma para posterior apreciação petrográfica. As dimensões dos corpos de prova são de 75 mm x 75 mm x 285 mm. Após a moldagem realizam-se os processos de cura, estocagem e remoção dos moldes com a primeira leitura um dia após a desmoldagem, em câmara úmida; transferindo em seguida os prismas para um recipiente de forma a garantir uma elevada umidade relativa, mantidos à temperatura de 38°C. As leituras do comprimento dos prismas são feitas aos 7, 28 e 56 dias; em seguida o período entre elas aumenta para 3, 6, 9 e 12 meses. Caso haja uma expansão superior a 0,04% do tamanho do prisma, o agregado é considerado reativo (ASTM C 1293 – 2006).

A norma ainda trata que, se o objetivo do ensaio é a verificação da fração fina (agregado miúdo), os prismas devem ser preparados com um agregado graúdo inócuo; o oposto também é válido. O agregado graúdo representa 70% do volume do concreto, sendo dividido igualmente nas frações de 19 a 12,5 mm, 12,5 a 9,5 mm e 9,5 a 4,75 mm (ASTM C 1293 – 2006).

Segundo Fournier *et al.* (2006), há uma boa reprodutibilidade entre laboratórios quando há um bom controle dos parâmetros envolvidos no ensaio, apesar de o ensaio ter longa duração. Já Wigum *et al.* (1997) comentam que pelo fato das expansões determinadas serem muito pequenas, pode haver certa dificuldade na interpretação dos dados.

Com o intuito de acelerar o método dos prismas de concreto, Ranc e Debray, no início da década de 1990, propuseram um aumento para 60°C na temperatura da câmara, mantendo-se constante as outras variáveis. O novo ensaio foi testado em 5 laboratórios diferentes comparado com a metodologia convencional. Boas correlações foram obtidas, sendo relatado que há a possibilidade de identificação da

reatividade de um agregado com 30 dias de ensaio, com a recomendação de se conduzir o ensaio até 120 dias (COUTO, 2008).

Slater (1961) já frisava que “as rochas mais duras e densas, embora resistam por muito tempo, são finalmente atacadas, porque sempre apresentam pequenas aberturas para a penetração de gases e líquidos pelos planos de clivagem e superfícies de contato dos minerais”.

Desse modo, são apresentadas no próximo item algumas características relacionadas aos processos de formação das rochas e seus constituintes, buscando compreender de que maneira as diversas peculiaridades dos agregados podem influir em seu comportamento dentro do concreto.

2.4. ROCHAS

Denomina-se rocha a associação de um ou mais minerais³, que constituem parte essencial da crosta terrestre. Quanto a sua origem existem três tipos fundamentais: as que se originaram diretamente da solidificação do magma, **magmáticas** ou **ígneas**; as derivadas da remoção e acúmulo de qualquer tipo de rocha, contando com a possível deposição de material de origem animal ou vegetal, **sedimentares**; e, aquelas que sofreram mudanças na sua composição mineralógica e textural devido à ação de altas temperaturas e pressão, conhecidas como **metamórficas**. Na figura 12, apresenta-se um esquema prático da origem e formação das rochas.

³ No caso inclui-se matéria orgânica e vidro vulcânico, que não são considerados minerais por via de regra.

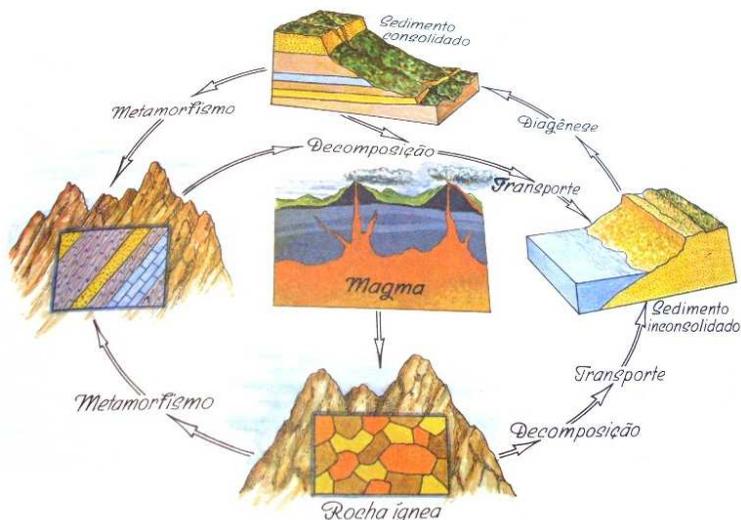


Figura 12 – Ciclo das rochas (BIGARELLA *et al.*, 1985).

A classificação de uma rocha é feita basicamente pela sua caracterização mineralógica e textural. A variedade de minerais existentes na terra é enorme, porém são poucos aqueles utilizados na caracterização de uma rocha; a esses se dá o nome de **minerais essenciais**. Outros presentes em menor quantidade, e não necessários na classificação, são conhecidos como **minerais acessórios**. A textura traz indícios das relações entre as fases minerais constituintes de uma determinada rocha, sendo definida pela forma, arranjo e distribuição desses, fornecendo dados importantes sobre o grau de cristalinidade⁴, o tamanho dos grãos e dos processos de formação pelos quais a rocha passou. Se uma rocha ígnea apresenta grãos visíveis a olho nu é dita **fanerítica**, do contrário é dita **afanítica**, podendo ser **microcristalina**, quando os cristais são visíveis apenas em microscópio, ou **criptocristalina**, quando muito pequenas para serem caracterizados pelo microscópio comum (BIGARELLA *et al.*, 1985; MADUREIRA *et al.*, 2001; ERNST, 1996).

⁴ São classificadas em holocristalinas (quando constituídas apenas por cristais), holohialinas (quando constituídas apenas por vidro) e hialocristalinas (quando existem tanto cristais como vidro) (BIGARELLA *et al.*, 1985).

Outras formas de se caracterizar uma rocha ígnea estão relacionadas com a cor e composição química. O grupo de minerais claros é representado pelos: quartzo, feldspato e feldspatóides; denominados minerais **félsicos**. Já os minerais escuros (**máficos**) são ricos em ferro e magnésio (biotita, piroxênio, anfibólio, etc.). Quanto à composição química, as rochas são classificadas de acordo com a quantidade de silício⁵ presente na sua estrutura. A tabela 3 apresenta a classificação química das rochas.

Tabela 3 – Classificação química das rochas (BIGARELLA, *et al.*, 1985; SLATER, 1961).

Classificação	Teor de sílica
Ácidas	65 a 80%
Sub-ácidas	60 a 65%
Sub-básicas	55 a 60%
Básicas	45 a 55%
Ultrabásicas	menos de 45%

A observação das rochas em lâmina petrográfica se dá pelo uso de um microscópio petrográfico, que se difere do comum por possuir uma mesa giratória graduada em graus, possibilitando ao observador fazer leituras rápidas por meio de um nônio⁶. Dependendo das características a serem levantadas, faz-se a necessidade do seu uso por luz transmitida (comum), luz refletida ou luz polarizada (SLATER, 1961). Neste capítulo são apresentados conceitos relacionados à origem e formação das rochas, bem como suas características mineralógicas, texturais e químicas.

⁵ A classificação química não está relacionada ao caráter ácido/básico, definido pela química, mas pelo caráter ácido apresentado pelo elemento silício.

⁶Par de escalas graduadas, em milímetros ou graus, que deslizam uma sobre a outra, possibilitando a leitura de uma fração da escala principal. Como exemplo prático de sua aplicação está o paquímetro.

2.4.1. FORMAÇÃO DAS ROCHAS

A formação das rochas está intimamente ligada à origem dos minerais. Denomina-se mineral um sólido inorgânico, homogêneo e que se forma naturalmente, apresentando composição química definida e arranjo atômico ordenado.

Existem diversas formas de origem dos minerais, que podem ser formados a partir da evaporação do solvente, resfriamento do magma, perda de gás agindo como solvente, diminuição da temperatura e/ou pressão, interação de soluções, entre outras. Com base na sua composição química, os minerais se classificam em oito grupos que, dentre eles, seis são os mais comuns (tabela 4).

Tabela 4 – Principais grupos dos minerais (PRESS *et al.*, 2006)

Classe	Ânions formadores	Exemplo
Elementos nativos	Nenhum (ausência de íons carregados)	Platina [Pt]
Óxidos e hidróxidos	Íon oxigênio [O ²⁻] e íon hidroxila [OH ⁻]	Brucita [Mg(OH) ₂]
Haletos	Cloreto [Cl ⁻]; Fluoreto [F ⁻]	Halita [NaCl]
Carbonatos	Íon carbonato [CO ₃ ²⁻]	Calcita [CaCO ₃]
Sulfatos	Íon sulfato [SO ₄ ²⁻]	Anidrita [CaSO ₄]
Silicatos	Íon silicato [SiO ₄ ⁴⁻]	Olivina [Mg ₂ SiO ₄]

O grupo dos silicatos é o maior representante do reino mineral, cerca de 97% dos minerais conhecidos pertencem a ele. Entre os minerais, mais da metade pertence à família dos feldspatos.

Dependendo da forma que os tetraedros de sílica estão ligados uns aos outros, o grupo dos silicatos é dividido nas subclasses: **Nesosilicatos** (tetraedros SiO₄ isolados), **Sorossilicatos** (tetraedros SiO₄ duplos isolados), **Ciclossilicatos** (tetraedros SiO₄ ligados em forma de anéis), **Inossilicatos** (tetraedros formando em cadeias simples ou duplas), **Filossilicatos** (estrutura em folhas) e os **Tectossilicatos** (estrutura tridimensional). A figura 13 ilustra as possibilidades de ligação dos silicatos (PRESS *et al.*, 2006).

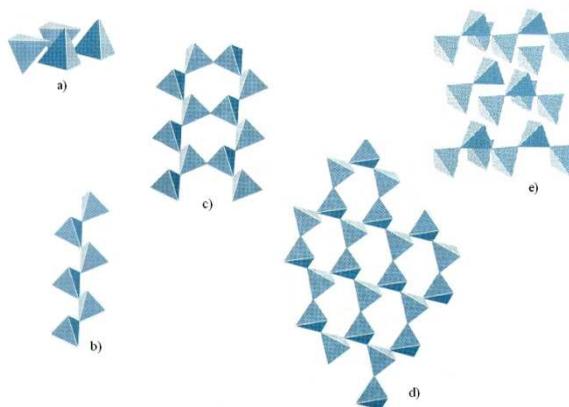


Figura 13 – Tipos de ligações do grupo dos silicatos
 a) tetraedros isolados; b) cadeias simples; c) cadeias duplas; d) folhas; e)
 arranjos tridimensionais
 (PRESS *et al.*, 2006).

Para que uma substância seja considerada um **mineral** é necessário que essa se encaixe dentro dos parâmetros: ser cristalino e formado naturalmente. No caso de não atender ao quesito cristalinidade a substância é denominada **mineralóide** (*e.g.* vidro vulcânico). Na tabela 5 encontram-se minerais comuns formadores das rochas.

Tabela 5 – Minerais comuns formadores das rochas
 (PRESS *et al.*, 2006; ERNST, 1996).

Rochas Ígneas	Rochas Sedimentares	Rochas Metamórficas
Quartzo	Quartzo	Quartzo
Feldspato	Argilominerais	Feldspato
Mica	Feldspato	Mica
Piroxênio	Calcita	Granada
Anfibólio	Dolomita	Piroxênio
Olivina	Gipsita	Estaurólita
	Halita	Cianita

A ordem de cristalização dos minerais formados pelo resfriamento do magma pode ser descrita pela série de Bowen. De acordo com esse sistema os primeiros minerais a serem cristalizados são os minerais mais básicos como o plagioclásio (rico em cálcio), seguido da olivina, biotita, feldspato potássico, muscovita e finalmente o quartzo, como o último mineral a se cristalizar (PRESS *et al.*, 2006; SZABÓ *et al.*, 2001; BIGARELLA *et al.*, 1985).

Bigarella *et al.* (1985) ainda mencionam que o quartzo, como o último mineral a se cristalizar, preenche os vazios entre os outros minerais. Dessa forma não exhibe desenvolvimento de faces cristalinas nem planos de clivagem.

2.4.2. ROCHAS ÍGNEAS

Resultado da solidificação de uma massa fundida rica em silicatos, denominada magma, as rochas ígneas são classificadas em **intrusivas** ou plutônicas (formação no interior da crosta terrestre) e **extrusivas** ou vulcânicas (origem no exterior da crosta). Essa designação se dá pela observação da textura, se a rocha apresenta grãos grandes é caracterizada como a primeira, senão, como a segunda classe (ERNST, 1996; PRESS *et al.*, 2006; SZABÓ *et al.*, 2001; LEINZ & AMARAL, 2003).

Os fatores que contribuem para a formação dos cristais são a temperatura, composição química do magma e a presença de elementos voláteis. Os voláteis aumentam a fluidez do magma facilitando o transporte dos elementos químicos, favorecendo a cristalização. Se há um resfriamento muito brusco, como é o caso das rochas vulcânicas, o desenvolvimento dos cristais não será tão visível, diminuindo o grau de cristalinidade da rocha; o que é evidenciado pela presença de vidro. Rochas com predominância de vidro na sua composição são designadas **vítreas** enquanto que as totalmente cristalinas recebem o nome de **holocristalinas**. Por terem espaço livre para crescer, os primeiros cristais são **idiomórficos** enquanto que os últimos são **anédricos**. É comum encontrar nas rochas extrusivas espaços vazios ou preenchidos por minerais tardios⁷. Quando vazios são designados **vesículas** e, preenchidos, **amígdalas** (PRESS *et al.*, 2006; SZABÓ *et al.*, 2001).

⁷ São minerais tardios as variedades cristalinas e criptocristalinas de sílica, carbonatos, zeólitas, etc. (SZABÓ *et al.*, 2001).

As relações mútuas e íntimas entre os componentes de uma rocha constituem sua textura. Se os cristais estão dispostos de forma que todos os minerais apresentem um tamanho aproximado entre eles diz-se que a rocha apresenta uma textura **equigranular**; quando ocorrem grandes cristais (**fenocristais**) em uma massa fina fala-se em textura **porfírica**. Um caso particular desta textura é a denominada **poiquilítica**, onde pequenos cristais ocorrem dentro de grãos maiores. Citam-se também como tipos de textura as: ofítica, intergranular, fluidal e de intercrescimento (BIGARELLA *et al.*, 1985).

A estrutura das rochas está relacionada à maneira que as porções da rocha se arranjaram sem entrar no mérito das relações entre os minerais. Geralmente nas rochas ígneas a estrutura é maciça, o que se dá pela consolidação do magma sem a presença de tensões. É comum também entre as rochas vulcânicas encontrar estruturas do tipo **vesiculares** e **amigdaloidais**, indicativos de escape de gases durante o processo de solidificação. Estruturas demonstrando o fluxo do magma também podem ser encontradas (SZABÓ *et al.*, 2001; LEINZ & AMARAL, 2003).

A nomenclatura das rochas magmáticas é definida com base nas suas composições mineralógicas e texturais. Pela proporção dos minerais constituintes encontra-se no diagrama QAPF, o nome correspondente para a rocha, acrescido, se necessário, de informações complementares julgadas relevantes. Como exemplo, um granito que apresenta quantidade considerável de biotita, apresentando uma textura porfírica, recebe o nome de biotita granito porfírico (SZABÓ *et al.*, 2001).

Entre as rochas ígneas existentes, destacam-se, para fim deste estudo, os granitos e basaltos. Os **granitos** representam as rochas ígneas ácidas, ricas em sílica livre (quartzo) e em feldspatos, com pequenas quantidades de mica (muscovita e/ou biotita); ainda com a presença de pequenos grãos de minerais acessórios tais como granada, apatita, topázio, etc. Ocorrem juntamente com gnaisse e em diversas cores (cinza claro a escuro, amarelo, rosado e vermelho); sua granulação varia de milimétrica a centimétrica (LEINZ & AMARAL, 2003).

Os **basaltos** representam os equivalentes efusivos (extrusivos) dos gabros e diabásios. Normalmente rochas escuras, densas e finamente granuladas. É comum se encontrar a estrutura vesicular ou amigdaloidal e quantidade de material vítreo devido ao resfriamento brusco que ocorre durante sua formação (BIGARELLA *et al.*, 1985). De textura microcristalina, vítrea ou porfírica, sua cor varia de preta a cinza

escuro e castanho. Apresentam fenocristais de plagioclásio cálcico e piroxênio numa matriz afanítica (LEINZ & AMARAL, 2001).

2.4.3. ROCHAS SEDIMENTARES

Originárias das deposições de materiais advindos da decomposição de rochas preexistentes, as rochas sedimentares são classificadas em **clásticas**, quando o produto é resultante de deposição mecânica, ou **químicas** (e bioquímicas) quando o material depositado é proveniente de precipitações de origem orgânica ou inorgânica (ERNST, 1996; PRESS *et al.*, 2006; LEINZ & AMARAL, 2001).

Quanto aos processos de formação, das rochas de origem clástica, tem-se primeiramente o **intemperismo** da rocha geradora, seguido pelo **transporte** dos sedimentos (comum em meio aquoso), passando pela **deposição** do material, sendo finalizado pela **litificação**, que é o conjunto de processos de compactação e cimentação pelo qual o sedimento é convertido em rocha (ERNST, 1996; PRESS *et al.*, 2006).

O processo de litificação envolve fenômenos variáveis em diferentes graus. Compactação por peso de sobrecarga diminui a porosidade, deforma os minerais maleáveis e entrelaça-os. Os grãos originais (quimicamente diferentes) tendem a reagir, produzindo novos minerais que se inter cruzam, aumentando a coesão da rocha. Ao processo de recristalização que ocorre após a sedimentação e no local original de deposição denomina-se **diagênese** (ERNST, 1996).

Rochas sedimentares são classificadas de acordo com o tamanho dos grãos, composição química e mineralógica e, pelo modo de deposição. A caracterização do tamanho dos grãos é aplicada para sedimentos clásticos; pois quando há deposição química não ocorre um aumento significativo dos grãos. Os tipos conhecidos são: **cascalhos** ($d > 2\text{mm}$), **arenitos** ($1/16 < d < 2\text{mm}$), **siltitos** ($1/256 < d < 2\text{mm}$) e **argilitos** ($d < 1/256\text{mm}$). Quando siltitos e argilitos apresentam superfícies nítidas e contínuas de acamamento (deposição em camadas) utiliza-se a denominação **folhelos**. A composição média das rochas sedimentares fica dividida em aproximadamente: 85% folhelos, 5 a 10% arenitos e 5 a 10% carbonatos. Sal, sílex, depósitos de ferro, camadas de carvão, entre outros tipos, perfazem apenas de 1 a 2% do volume total das rochas sedimentares (ERNST, 1996; LEINZ & AMARAL, 2003; PRESS *et al.*, 2006).

2.4.4. ROCHAS METAMÓRFICAS

Derivadas da transformação, por ação da temperatura e pressão, de outra rocha preexistente, denominada **protólito**, as rochas metamórficas se originam da recristalização dos minerais de modo que o ponto de fusão desses não seja atingido. Como resultado observa-se mudanças na estrutura, textura, composição química e mineralógica das rochas (PRESS *et al.*, 2006; RUBERTI *et al.*, 2001; LEINZ & AMARAL, 2003; BIGARELLA *et al.*, 1985).

Os principais fatores que controlam os processos do metamorfismo são: temperatura, pressão e presença de fluidos. Os processos se iniciam a temperaturas superiores a 200°C. Quando as temperaturas são muito elevadas o metamorfismo ocorre nos limites de transição para o campo de geração das rochas ígneas (figura 14), onde ocorrem processos de fusão parcial, que originam rochas mistas designadas **migmatitos** (RUBERTI *et al.*, 2001).

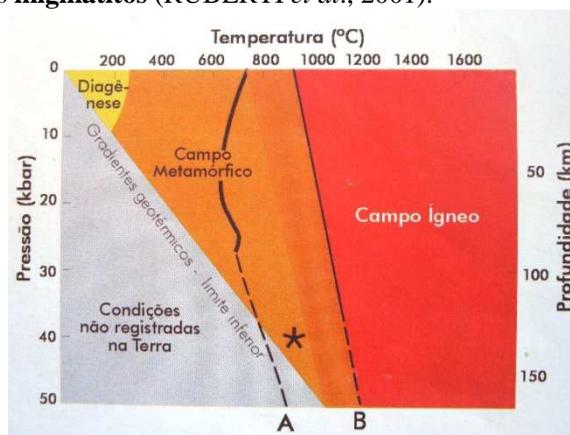


Figura 14 – Diagrama (P x T) de formação das rochas (RUBERTI *et al.*, 2001).

Fator de grande importância, a pressão pode ser **litostática** ou **dirigida**. No caso da primeira não há deformação mecânica acentuada, na estrutura, por ser uma pressão uniforme em todas as direções. Já a pressão dirigida, que é produzida pela movimentação de placas, atua de forma vetorial, produzindo deformações e tensões. Neste caso há grande influência na geração de texturas e estruturas orientadas como também na migração dos fluidos existentes (RUBERTI *et al.*, 2001).

Os fluidos, por sua vez, também exercem pressão sobre os minerais, que pode ser igual, inferior ou superior à pressão litostática; se a pressão superar a resistência mecânica da rocha, ocorrem fraturas e, por conseguinte, perda dos fluidos através delas. Formam-se assim os depósitos minerais, onde os minérios⁸ se concentram em veios. A presença desses ainda acelera os processos de metamorfismo, uma vez que agem como facilitadores da difusão dos elementos. Rochas pobres em fluidos terão reações mais lentas devido a difusão ter de ocorrer na fase sólida (através do retículo cristalino) (RUBERTI *et al.*, 2001).

Dependendo das condições, o metamorfismo se divide em 7 tipos, a saber: regional, termal, dinâmico, de soterramento, hidrotermal, de fundo oceânico e de impacto (RUBERTI *et al.*, 2001; LEINZ & AMARAL, 2001; PRESS *et al.*, 2006).

O crescimento dos minerais se dá no estado sólido pelo processo conhecido por **blastese**, dessa forma, as texturas são precedidas pelo radical “blasto”. São **granoblásticas** (figura 15b) quando não há predomínio de uma ou mais dimensões nos minerais, **lepidoblástica** se prevalecem minerais micáceos orientados e, quando os minerais orientados são prismáticos se designa a textura **nematoblástica**. Se há destaque de um ou mais minerais por uma ordem de grandeza a denominação corresponde à textura **porfiroblástica** (RUBERTI *et al.*, 2001).

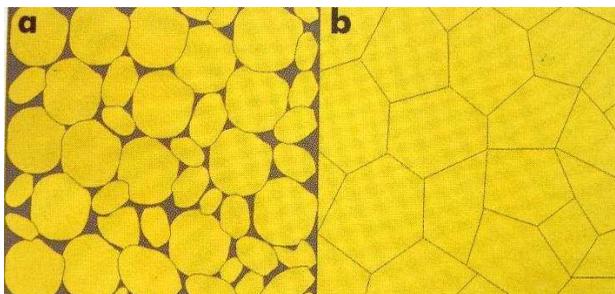


Figura 15 – Textura de um arenito a) antes metamorfismo e b) após metamorfoseado, transformado em quartzito. (RUBERTI *et al.*, 2001).

As condições a que os minerais foram submetidos determinam também o tipo de estrutura que a rocha apresenta. Em caso de atuação

⁸ Define-se minério, minerais dos quais se podem extrair metais de importância econômica (KIRSH, 1972).

de pressão dirigida, a estrutura correspondente é maciça, ou há preservação da estrutura dos protólitos; podem ocorrer foliações de diversos tipos. Quando as foliações são definidas pela orientação de minerais placóides⁹ ou prismáticos diz-se de uma estrutura xistosa. Do surgimento de minerais de feldspato e quartzo orientados designa-se uma estrutura gnáissica. Já as estruturas bandadas apresentam faixas de coloração alternadamente mais claras/mais escuras (RUBERTI *et al.*, 2001).

Devido à grande diversidade de estruturas, texturas e composições mineralógicas, que podem ocorrer nas rochas metamórficas, os critérios utilizados na nomenclatura variam dependendo do contexto que se pretende referir uma determinada rocha ou um conjunto de rochas. Se há o interesse em se realçar a natureza dos protólitos pode se utilizar o prefixo “meta” (*e.g.* metabasalto). O critério mais utilizado que está relacionado ao que combina estruturas com a composição mineralógica é o petrográfico, surgindo os termos ardósia, filito, xisto, gnaisse, mármore, anfíbolito e quartzo. Outra maneira de se nomear uma rocha metamórfica é através da quantidade de minerais representativos, sendo esses os últimos citados no nome. A exemplo cita-se um quartzo-mica-xisto indica que o mineral mica é o mais representativo, seguido pelo quartzo, apresentando uma estrutura xistosa (RUBERTI, *et al.*, 2001).

A partir dessas informações coletadas, na vasta bibliografia existente sobre o assunto, passa-se para o programa experimental deste trabalho. No próximo capítulo é tratada a forma com a qual foi conduzida a pesquisa.

⁹ Minerais em forma de placa tais como micas, clorita e talco (RUBERTI *et al.*, 2001).

2.5. CONSIDERAÇÕES DA BIBLIOGRAFIA

Com base no exposto verifica-se a grande variabilidade nos parâmetros que interferem na reação álcali-agregado, o que, por um lado, dificultam o completo entendimento do mecanismo que rege a reação e, por outro, incentiva mais pesquisas, angariando conhecimentos ao meio técnico.

Assim, a investigação dos parâmetros da reação, analisados por meio de modelos práticos tais como testes de laboratório, se torna interessante quando são procuradas correlações entre as informações adquiridas pela aplicação de métodos laboratoriais com aquelas obtidas em campo. Quão maior for o acervo técnico levantado maiores serão as probabilidades de se evitar um fenômeno capaz de causar tamanhos prejuízos.

Intenta-se, por intermédio deste trabalho, o estudo do comportamento que os grupos selecionados de rochas têm desencadeado quando utilizados como agregados em estruturas de concreto. Com experiências conduzidas pelo método químico são propostas variações no ensaio, buscando-se explicações para os desempenhos observados entre diferentes métodos de avaliação do potencial reativo de rochas. A metodologia dos ensaios bem como demais informações pertinentes à sua aplicabilidade são apresentadas no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de analisar o comportamento de rochas silicosas frente à reação álcali-agregado foram realizados alguns ensaios que ajudam na determinação do potencial álcali-reativo dos agregados.

Por haver uma carência de métodos rápidos e confiáveis para esse fim, torna-se interessante desenvolver alguns estudos relacionados aos ensaios já existentes. Dessa forma, por se tratar de um método bastante rápido e relativamente fácil de realizar, escolheu-se aplicar algumas variações nos parâmetros do método químico.

Além do conhecimento do comportamento de alguns dos agregados em campo, outros ensaios foram conduzidos para se levantar mais informações sobre as rochas testadas, tornando-se possível a correlação entre resultados obtidos por diferentes métodos. A figura 16 apresenta um fluxograma da metodologia empregada neste trabalho.

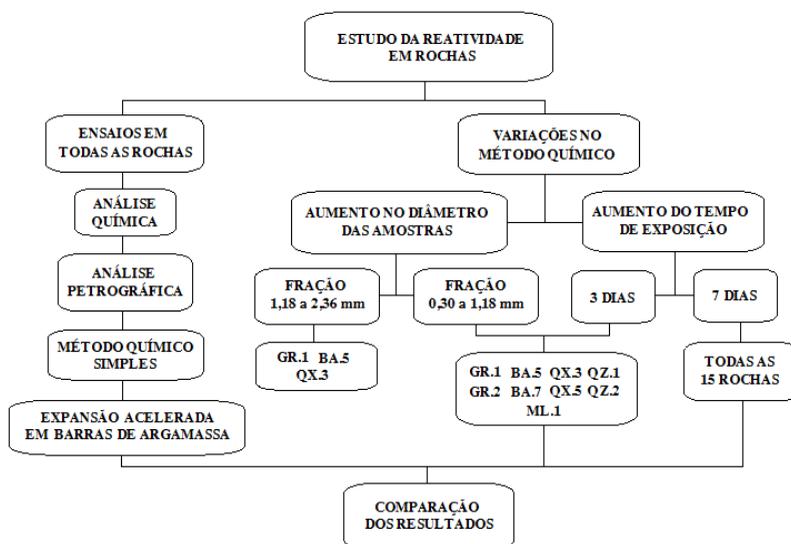


Figura 16 – Fluxograma de atividades do experimento.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. AGREGADOS

Os agregados foram selecionados com base no critério de reatividade das rochas obtido pelos ensaios químicos realizados no laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A. e apresentados por Couto (2008). O autor testou 22 agregados dos quais 15 foram selecionados para o presente estudo.

Optou-se por ensaiar as rochas classificadas como inócuas bem como algumas consideradas reativas pelo ensaio de expansão acelerada em barras de argamassa, avaliando, dessa forma, a eficácia do método em estudo. As rochas e suas origens são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 – Agregados selecionados para a pesquisa

Litologia	Sigla	Origem
Granitos	GR.1	Estado de Goiás
	GR.2	Estado de Goiás
	GR.3	Recife/PE (não-reativo)
	GR.4	UHE Moxotó - Paulo Afonso/BA (reativo)
	GR.5	Barragem Pedro Beicht - Cotia/SP (reativo)
Basaltos	BA.3	Estado de Goiás
	BA.4	Estado de Goiás
	BA.5	Estado de Goiás
	BA.7	Pedreira Antônio Moro - Ponta Grossa/PR
Micaxistos	QX.2	Estado de Goiás
	QX.3	Estado de Goiás
	QX.5	Estado de Goiás
Quartzitos	QZ.1	UHE Furnas - Alpinópolis/MG (reativo)
	QZ.2	UHE Jaguará - Rifaina/SP (reativo)
Milonito	ML.1	Recife/PE (reativo)

3.1.2. CIMENTO

O cimento utilizado no preparo das barras de argamassa é um cimento do tipo CP-V puro¹⁰, sem qualquer tipo de adição, preparado pela ABNT (cimento padrão), e mencionado na norma NBR 15577-4 como um dos cimentos a ser utilizado para os ensaios da norma citada. A caracterização química e físico-mecânica do material é apresentada nas tabelas 21 e 22 respectivamente, do anexo 8.3.

3.2. MÉTODOS

Com relação aos ensaios empregados na determinação da reatividade potencial dos agregados, citam-se neste item aqueles que foram empregados dentro desta pesquisa, que são: análise petrográfica (NBR 15577-3), método químico simples (ASTM C 289) e variações, expansão acelerada em barras de argamassa (NBR 15577-4) e a análise química, das rochas em estudo, pelo método de fluorescência de raios-X.

Os testes foram conduzidos no laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A., com exceção de algumas etapas do método químico, que foram realizadas no laboratório da Central de Análises da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.2.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA

Este método foi aplicado de acordo com o que é prescrito pela norma ABNT NBR 15577-3 (2008) - Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. A análise se procede nos seguintes passos:

- 1) Exame macroscópico da amostra para classificar se é: cascalho, pedrisco, fragmento, testemunho de sondagem ou pedra britada, bem como registrar a cor e a estrutura;
- 2) Avaliação das propriedades físico-mecânicas para classificar a amostra em: muito coerente, coerente, pouco coerente ou friável;
- 3) Exame da lâmina petrográfica para classificar a rocha quanto à textura, granulização, composição mineralógica, presença de fases

¹⁰ Cimento doado pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Comercialmente este cimento contém adição.

deletérias quanto à RAA, estimativa do teor e quantidade de quartzo microgranular, presença de texturas no feldspato (mirmequítica ou pertítica), grau de microfissuração, estado de alteração e natureza da rocha.

3.2.2. MÉTODO QUÍMICO SIMPLES

O método químico simples foi realizado de forma a seguir a norma ASTM C 289 - 07. Desenvolvido por Mielenz *et al.* (1947) e padronizado em 1952 como ASTM C 289, o método químico consiste em 4 etapas, a saber: preparo das soluções, preparo das amostras, ataque das amostras, determinações (sílica dissolvida [S_d] e redução da alcalinidade [R_a]).

Ressalta-se que todas as variações foram conduzidas de forma a se manter os parâmetros normatizados, com exceção das mudanças propostas, de modo a permitir a observação da influência de cada parâmetro testado em relação ao método simples; conforme discorrido a seguir.

3.2.2.1. PREPARO DAS SOLUÇÕES

Na aplicação do método químico é feito o uso de soluções tanto para o ataque das amostras quanto para as determinações dos parâmetros envolvidos. Para o ataque das amostras utiliza-se uma solução padronizada de hidróxido de sódio a 1 N. Nos procedimentos de tratamento do analito, utilizam-se soluções de ácido clorídrico p.a. (pureza analítica) e nas concentrações (em volume) de 1:1, 1:19; como também nitrato de prata a 1%. Soluções indicadoras de fenolftaleína e verde de bromocresol, como também de ácido clorídrico a 0,05 N são empregadas no procedimento de titulação. Na determinação da sílica dissolvida faz-se o uso de ácido fluorídrico p.a. e ácido sulfúrico p.a. O preparo dos reagentes é descrito neste item.

Água:

Toda a água utilizada nos procedimentos é deionizada. Para o preparo da solução de NaOH, e a água utilizada nos procedimentos de diluição do analito, utiliza-se água deionizada previamente fervida para garantir a ausência de CO_2 .

Fenolftaleína:

Dissolveu-se 1 g do reagente a 50 ml de álcool etílico e 50 ml de água.

Vermelho de metila:

Dissolveu-se 0,1 g do reagente a 50 ml de álcool etílico e 50 ml de água (MORITA, 1972).

Verde de bromocresol:

Dissolveu-se 0,1 g do reagente a 100 ml de água.

Nitrato de prata a 1%:

Dissolveu-se 1 g do reagente a 99 ml de água, armazenando o produto em um frasco escuro longe da luz (MORITA, 1972).

Solução de NaOH:

Pesou-se cerca de 42 g do hidróxido de sódio p.a., dissolvendo-o cuidadosamente em água de forma a completar-se 1 litro de solução; anotando a massa utilizada com precisão de 0,0001 g.

Pipetou-se 10 ml da solução preparada, dissolvendo-a a 100 ml de água; essa solução é então submetida ao processo de padronização por meio de titulação.

A padronização da solução envolve o uso do padrão primário biftalato de potássio, que é mantido em estufa, a 120°C, durante 2 horas. Após o resfriamento em dessecador pesou-se entre 0,6 a 0,7 g do reagente, com a anotação da massa na precisão de 0,0001 g. Dissolveu-se o material, em um erlenmeyer de 250 ml, em 75 ml de água para o início da titulação do biftalato com a solução de NaOH. Foi utilizado duas a três gotas de fenolftaleína com a anotação do volume gasto da solução de NaOH para a neutralização do biftalato de potássio. A normalidade foi calculada pela equação (1).

$$N = \frac{M \times 10}{0,2042 \times V} \quad (1)$$

Onde M é a massa de biftalato e V o volume gasto de NaOH na titulação.

O valor da normalidade deve ser de $(1,000 \pm 0,001)N$. Caso esteja fora desse valor, deve ser corrigido com adição ou de água (se superior à 1N) ou de NaOH (se inferior à 1N).

Soluções de HCl:

HCl 1:1 e 1:19:

Para o preparo de um litro das soluções procedeu-se de forma a dissolver 500 ml de HCl p.a. em 500 ml de água quando se deseja uma concentração de 1:1 e, 50 ml de HCl p.a. em 950 ml de água no caso da concentração ser 1:19.

HCl 0,05N:

O preparo dessa solução envolveu a utilização do tetraborato de sódio (bórax) como padrão primário na padronização. Para tal foi necessário o procedimento de purificação do reagente, como segue:

Dissolveu-se 15 g de bórax p.a. em 50 ml de água aquecendo a solução até 80°C. O fornecimento de calor foi interrompido de forma para o sal recristalizar a uma temperatura abaixo de 55°C. A solução saturada foi filtrada em funil de Büchner, com papel de filtração rápida, com o uso de sucção. Lavou-se duas vezes com álcool etílico e duas vezes com éter etílico. Feitos esses procedimentos, espalhou-se o bórax em uma fina camada sobre vidro de relógio, deixando-o secar, a temperatura ambiente, durante 12 a 18 horas.

Pesou-se de 0,2 a 0,3 g do bórax recristalizado (com precisão de 0,0001 g), anotando-se a massa, com posterior dissolução do sal em 50 ml de água, em um erlenmeyer de 250 ml. Adicionou-se de duas a três gotas de vermelho de metila a 0,1% e para dar início à titulação. Quando houve mudança de cor do amarelo para o vermelho, o volume de ácido consumido na neutralização do bórax foi anotado. A normalidade da solução foi calculada pela equação (2).

$$N = \frac{M}{0,1907 \times V} \quad (2)$$

Onde M é a massa de bórax diluída e V o volume de HCl gasto na titulação. Anormalidade da solução, que é utilizada no cálculo da redução da alcalinidade, foi anotada com precisão de 0,0001 N.

3.2.2.2. PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras foram preparadas moendo-se o agregado e separando a fração passante pela peneira nº 50 (0,30 mm) e retida na peneira nº 100 (0,15 mm) (série da ABNT). Com essa fração disponível foi feito o peneiramento de forma a garantir uma maior eliminação dos finos; o que

se buscou garantir com a lavagem do material com água. Findos esses procedimentos o agregado foi lavado com água deionizada e seco em estufa a 105°C por um período de 24h.

3.2.2.3. ATAQUE DAS AMOSTRAS

Retiradas da estufa, as amostras foram colocadas em um dessecador para serem resfriadas até a temperatura ambiente. Foram pesadas 3 frações de 25 g cada e armazenadas dentro dos reatores metálicos (ensaio em triplicata) (figura 17). Depois disso adicionou-se 25 ml de uma solução de NaOH a 1 N em cada um desses reatores contendo o agregado e no 4º reator sem amostra, que serve como prova em branco. Os recipientes foram fechados e colocados em banho-maria a 80°C pelo período de 24h.



Figura 17 – Reatores metálicos utilizados no ensaio.

3.2.2.4. DETERMINAÇÕES

Para dar início às determinações, os reatores foram retirados do banho-maria e resfriados em água corrente por 15 min. Iniciaram-se os processos de determinação da redução da alcalinidade da solução (R_a) e quantidade de sílica que foi dissolvida do agregado (S_d). Para tal, filtrou-se, com o auxílio de um cadinho de Gooch, papel de filtração média, um kitassato e uma bomba vácuo, a solução e a amostra de cada um dos 3 reatores mais a prova em branco. De cada filtrado foi transferida uma alíquota de 10 ml para um balão volumétrico de 200 ml, completando-se o seu volume com água. Parte da solução contida nesse balão (20 ml) é

para a análise da alcalinidade, através de titulometria, e outra parte (100 ml) para determinação da sílica presente na solução.

Redução de alcalinidade (R_a)

Foram transferidos 20 ml da solução contida no balão volumétrico de 200 ml para um frasco erlenmeyer de 250 ml, adicionando-se 200 ml de água (isenta de CO_2). Colocaram-se de duas a três gotas de fenolftaleína e deu-se início a titulação com HCl a 0,05N. Quando houve mudança da cor púrpura para o incolor, o volume de ácido gasto (V_1) foi anotado; foram adicionadas duas a três gotas de verde de bromocresol para continuação do processo até a mudança de cor do azul para o amarelo, anotou-se o volume gasto (V_2). A redução na alcalinidade foi determinada pela equação (3).

$$R_a = \frac{20 \times N}{V} \times (V_B - V_A) \times 1000 \quad (3)$$

Onde:

R_a = Redução de alcalinidade (mmoles/litro);

N = Normalidade do HCl;

V = Volume da alíquota da solução diluída (20 ml);

$V_A = 2V_1 - V_2$, da titulação da amostra (ml);

$V_B = 2V_1 - V_2$, na titulação do branco (ml);

V_1 = Volume gasto na titulação com fenolftaleína;

V_2 = Volume gasto na titulação com verde de bromocresol.

Sílica dissolvida (S_d)

Com a transferência de 100 ml da solução contida no balão volumétrico para uma cápsula de porcelana, tratou-se a solução com 10 ml de HCl p.a., deixando evaporar sobre banho-maria (até secura). O resíduo obtido foi tratado com 20 ml da solução de HCl (1:1), ainda sobre banho-maria, cobrindo-se com vidro de relógio e deixando digerir durante 10 min. O HCl, além de dissolver possíveis óxidos e carbonatos presentes na solução, contribui na precipitação da sílica na forma de ácido silícico.

Diluiu-se a solução com 20 ml de água quente, despejando-se o conteúdo da cápsula em um funil raiado contendo papel de filtração lenta. Lavou-se a cápsula com HCl (1:19) quente três vezes e, o papel filtro, com água quente até a completa eliminação dos cloretos. Secando-se o papel filtro foi feita a sua calcinação a temperatura de 1.100°C, em cadinho de platina, durante uma hora; pesando o cadinho

após o seu resfriamento em dessecador (m_1). O processo de calcinação envolve a transformação dos carbonatos em óxidos.

Tratou-se o resíduo contido no cadinho com 2 gotas de água adicionando, posteriormente, 20 ml de ácido fluorídrico e uma gota de ácido sulfúrico; deixando evaporar até completa *secura* sobre uma chapa aquecida. O ácido fluorídrico reage com a sílica presente na solução, formando o composto SiF_4 , que é altamente volátil. A adição do ácido sulfúrico potencializa essa reação além de evidenciar a completa evaporação da solução contida no cadinho.

Feita a fluorização do resíduo os cadinhos foram levados mais uma vez ao forno mufla, a temperatura de 1.100°C ; dessa vez por 5 minutos. Após o resfriamento, mediu-se a massa do cadinho (m_0); sendo a diferença ($m_1 - m_0$) a quantidade de sílica dissolvida, calculada pela equação (4).

$$S_d = \frac{(M_1 - M_0) \times 10^6}{V \times 60,06} \quad (4)$$

Onde:

S_d = Concentração de sílica em milimoles por litro no filtrado original;

M_1 = Gramas de sílica encontradas em 100 ml da solução diluída;

M_0 = Gramas de sílica encontradas na prova em branco;

V = Volume do filtrado original analisado (5 ml);

60,06 = Massa molecular da sílica.

3.2.3. VARIAÇÕES PROPOSTAS AO MÉTODO QUÍMICO

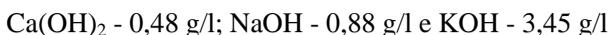
3.2.3.1. AUMENTO NO DIÂMETRO DOS AGREGADOS

Propõe-se um aumento na fração de diâmetro das amostras ensaiadas pelo método químico simples. A norma ASTM C 289 - 07 prescreve que o diâmetro das amostras ensaiadas deve estar compreendido entre a faixa de 0,15 a 0,30 mm. De forma similar àquela feita por LU *et al.* (2006), que testando diferentes frações granulométricas e observando maior reatividade para a fração entre 1,25 e 2,50 mm, o proposto é de aumentar-se o diâmetro para duas frações superiores àquela indicada pela norma (ASTM C 289), que são: frações entre 0,30 a 1,18 mm e 1,18 a 2,36 mm, respectivamente peneiras de número 30 e 16 da série da ABNT.

3.2.3.2. TROCA DA SOLUÇÃO AGRESSIVA

Um fator bastante discutido no que diz respeito ao método químico é se a solução de NaOH seria suficiente para desencadear o comportamento reativo de um agregado.

Jelidi (1991) estudou o efeito do ataque da solução dos poros do concreto em compostos de fibra de poliéster e, para isso buscou compreender quais são os principais constituintes da solução dos poros. Assim teve êxito em determinar a concentração de alguns compostos iônicos presentes no concreto, a chamada solução de Lawrence, constituída de:



Com o objetivo de analisar o comportamento que os agregados têm mediante o ataque de uma solução, mais parecida com a existente no concreto, foi feita a troca da solução de NaOH a 1N pela solução de Lawrence.

3.2.3.3. AUMENTO NO TEMPO DE EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS

Conforme observado nos estudos de Suzuki *et al.* (2004), Sorrentino (1992) e Brand e Oberholster *apud.* Shong (2008), um aumento no tempo de exposição do agregado à solução alcalina pode fornecer resultados mais representativos para o ensaio. Aumentou-se, dessa forma, o tempo em que o agregado é submetido ao ataque com a solução alcalina de 24 horas (ASTM C 289) para 3 dias (72h) e 7 dias (168h).

3.2.4. EXPANSÃO ACELERADA EM BARRAS DE ARGAMASSA

O ensaio de expansão acelerada em barras de argamassa foi dirigido de forma a atender a norma ABNT NBR 15577-4 (2008) - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

O agregado é peneirado e lavado para se retirar a fração mais fina, o material utilizado deve fazer parte das frações especificadas pela norma e, apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Granulometria do material para ensaio
(ABNT 15577-4/2008)

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	0,60 mm	25	247,5
0,60 mm	0,30 mm	25	247,5
0,30 mm	0,15 mm	15	148,5

São moldadas três barras (25 x 25 x 285 mm) com proporção cimento:agregado de 1:2,25 e, fator a/c de 0,47. Com 24 horas depois da adição da água é feito o desmolde das barras, com posterior colocação em um recipiente contendo água (para cura), que é aquecido gradativamente até a temperatura de 80°C; conservando-as durante 24 horas nessas condições.

Retiradas do recipiente aquecido é realizada a primeira medida do comprimento das barras, em sala climatizada a 23°C. As medidas devem ser feitas dentro de 15 segundos, para que não haja resfriamento significativo do material. Feito esse procedimento as barras são inseridas em um recipiente contendo uma solução de NaOH a 1N e 80°C, com a medição periódica até 28 dias após a imersão na solução de soda (30 dias de ensaio). O agregado é considerado inócuo se a média de suas expansões for inferior a 0,19%.

3.2.5. ANÁLISE QUÍMICA

Através do ensaio de fluorescência de raios-X foram obtidos os teores de óxidos presentes nas rochas do presente estudo. O equipamento utilizado no ensaio é da marca SHIMADZU modelo XRF 1500.

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISE QUÍMICA

A análise química das rochas estudadas foi realizada no laboratório de Furnas S/A e é apresentada na tabela 8.

Tabela 8 – Análise química das rochas

Agregado	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Eq. Alcalino	Perda ao fogo
GR.1	65,03	17,91	2,42	2,34	0,73	4,94	5,29	8,42	1,34
GR.2	65,92	15,08	5,59	2,56	0,85	3,09	5,52	6,73	1,36
GR.3	62,29	15,09	5,66	3,07	0,47	3,78	8,96	9,68	0,68
GR.4	64,10	14,48	4,94	0,76	0,74	4,99	8,50	10,59	1,48
GR.5	63,14	18,88	2,89	2,00	0,72	4,59	5,30	8,08	2,47
BA.3	47,19	13,53	19,71	10,00	1,40	2,84	1,31	3,69	4,06
BA.4	49,70	15,29	15,78	9,69	1,55	3,34	2,05	4,69	2,58
BA.5	49,99	14,39	16,94	7,60	1,25	4,38	3,33	6,57	2,12
BA.7	48,23	14,89	18,71	9,69	1,15	3,95	1,72	5,08	1,67
QX.2	60,55	17,55	8,07	2,83	1,60	3,71	3,37	5,92	2,34
QX.3	59,49	17,12	8,08	2,88	1,53	4,69	4,06	7,36	2,17
QX.5	59,56	17,19	7,62	3,42	1,27	3,83	5,89	7,70	1,23
QZ.1	96,79	0,69	0,76	0,31	0,36	0,27	0,54	0,62	0,29
QZ.2	93,65	2,65	1,35	0,17	0,22	0,21	1,38	1,12	0,34
ML.1	67,88	15,10	3,39	1,99	0,90	3,73	5,88	7,59	1,17

É importante ressaltar que o equivalente alcalino é calculado com base nos teores de soda (Na₂O) e potassa (K₂O) pela equação (5), a mesma utilizada para o cálculo do equivalente alcalino no cimento. Dessa forma a porcentagem total de óxidos encontrados não leva em conta os valores da coluna equivalente alcalino.

$$EA = 0,658 \times K_2O (\%) + Na_2O (\%) \quad (5)$$

O teor de óxidos medidos pode estar na estrutura de um mineral ou na forma livre. Os agregados que apresentam maior teor de sílica são os quartzitos, compostos por quartzo quase que na sua totalidade.

A coluna ‘perda ao fogo’ está relacionada à presença de material volátil como carbonatos e água combinada.

4.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA

As análises de petrografia foram realizadas no laboratório de Furnas S/A e são apresentadas neste item divididas pelos tipos de rocha estudadas.

BASALTOS

Basaltos são rochas provenientes da rápida cristalização do magma rico em minerais máficos, que dá origem aos minerais principais encontrados em sua estrutura; o plagioclásio e o piroxênio. Podem ocorrer alguns minerais incrustados, oriundos de vazios formados na estrutura dos basaltos (vesículas e/ou amígdalas), devido ao desprendimento de gases no interior dessas rochas. Esse tipo de formação recebe o nome de geodo.

Esse tipo de rocha exhibe texturas afaníticas, contendo pequenos cristais de plagioclásio e piroxênio, que são os primeiros minerais formados de acordo com a série de Bowen. Em seguida à formação desses e decorrente do consumo dos elementos ferro, magnésio, cálcio, sódio, potássio e alumínio, há um resquício de sílica que não reagiu para a formação dos minerais, dessa forma a sílica se cristaliza nos interstícios entre os cristais para formar um material vítreo (amorfo), denominado mesóstase.

Dependendo do lugar em que a rocha teve formação, e da composição do seu magma de origem, pode também ser observada a presença de argilominerais.

Quimicamente os basaltos são classificados como rochas básicas, por sua baixa quantidade de sílica, sendo notável a quantidade de óxido de ferro. As imagens obtidas pela petrografia são apresentadas nas figuras 18, 19, 20 e 21.

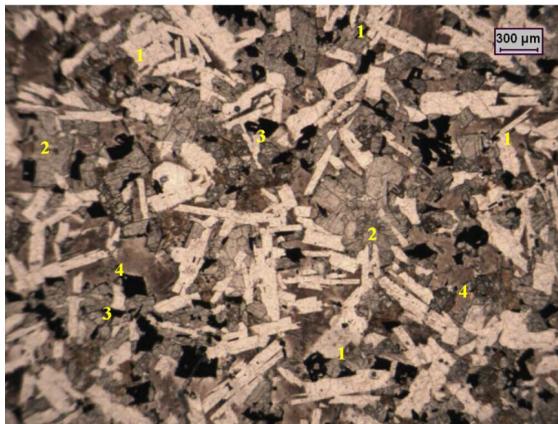


Figura 18 – Lâmina petrográfica do BA.3
(Ripas de plagioclásio (1); piroxênio (2); opacos (3); vidro vulcânico (4). Nicóis paralelos).

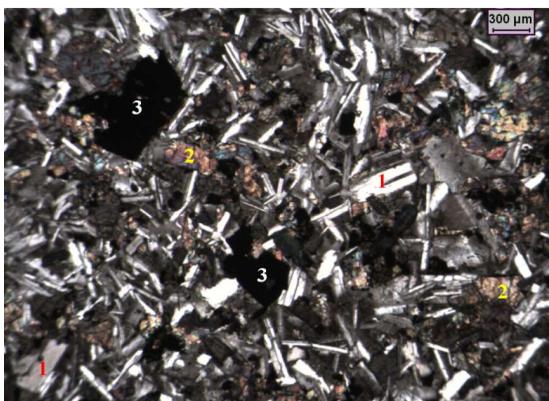


Figura 19 – Lâmina petrográfica do BA.4
(Ripas de plagioclásio (1); piroxênio (2); opacos (3). Nicóis cruzados).



Figura 20 – Lâmina petrográfica do BA.5
(Ripas de plagioclásio (claro); material intersticial formado por vidro vulcânico escuro rico em ferro. Nicóis cruzados).

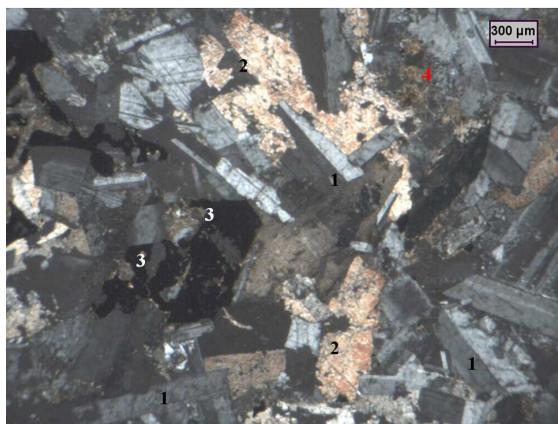


Figura 21 – Lâmina petrográfica do BA.7
(Ripas de plagioclásio (1); piroxênio (2); opacos (3); micropegmatito (4). Nicóis cruzados).

Todos os basaltos estudados têm estrutura maciça. São compostos por plagioclásio e piroxênio, também sendo encontrados opacos, vidro vulcânico e argilominerais, com exceção do BA.7, que não apresenta argilominerais mas tem intercrescimento de quartzo e K-feldspato, com quartzo microgranular na quantidade de 15 a 30%.

Quanto à alteração dessas rochas classificam-se em rochas sãs os basaltos BA.3, BA.4 e BA.5 e, pouco alterada o BA.7.

A micro-fissuração é ausente ou fraca e a textura dos BA.4 e BA.5 é porfírica, do BA.3 granular e o BA.7 exibe a textura equigranular.

Na tabela 9 apresenta-se quantidade aproximada dos minerais encontrados nos basaltos.

Tabela 9 – Composição mineralógica dos basaltos

Rocha	Mineral	Quantidade (%)	Diâmetro (mm)		
BA.3	plagioclásio	40	0,2	a	0,8
	piroxênio	35	0,1	a	0,4
	vidro vulcânico	15	-		
	clorofeita	7	-		
	opacos	3	0,2		
BA.4	plagioclásio	45	0,2	a	0,4
	piroxênio	40	0,4	a	0,8
	opacos	10	0,4	a	1
	vidro vulcânico e serpentina	5	-		
BA.5	plagioclásio	50	0,1	a	0,2
	piroxênio	40	0,3	a	0,6
	vidro vulcânico, clorofeita, opacos	10	-		
BA.7	plagioclásio	50			1
	piroxênio	45			4
	opacos	3			1
	quartzo e K-feldspato	2			-
	vidro vulcânico	traços			-

Todos os basaltos estudados são considerados potencialmente reativos devido à presença de vidro vulcânico. Os BA.3 e BA.5 ainda contêm clorofeita e o BA.7 devido quartzo microgranular e vidro vulcânico.

GRANITOS

Originários da solidificação de magmas félsicos, os granitos contêm na sua composição mineralógica minerais dos grupos dos feldspatos, micas e quartzo. Por serem formados à grande profundidade, sua cristalização se dá de forma mais lenta, favorecendo o desenvolvimento de grãos maiores, mais bem formados. A sua gênese se dá com os plagioclásios (sódicos ou potássicos), seguida por feldspatos, micas e, finalmente, o quartzo, que preenche os vazios entre os minerais previamente cristalizados. As figuras 22, 23, 24, 25 e 26 apresentam as imagens obtidas pela petrografia.

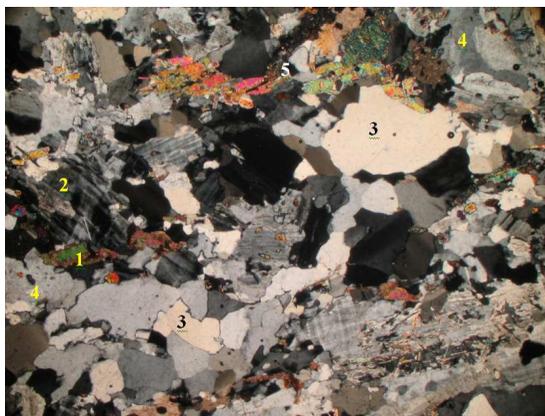


Figura 22 – Lâmina petrográfica do GR.1
(Biotita (1); K-feldspato (2); quartzo (3); plagioclásio (4); muscovita (5). Luz polarizada).

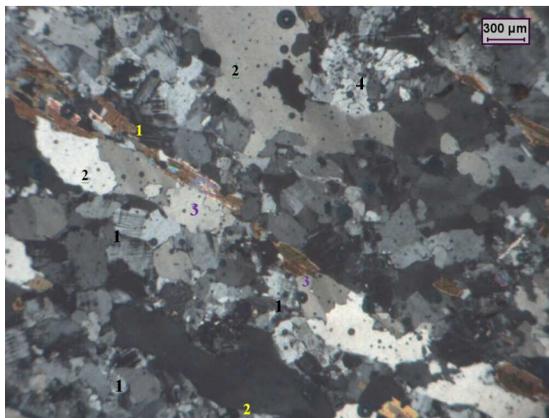


Figura 23 – Lâmina petrográfica do GR.2
(Feldspato (1); quartzo (2); micas (3); intercrescimento gráfico de quartzo e feldspato (4). Nicóis cruzados).

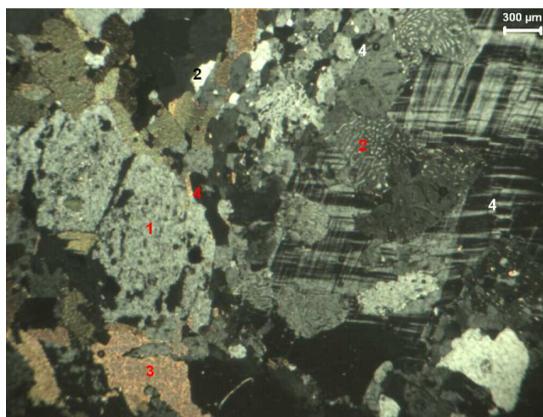


Figura 24 – Lâmina petrográfica do GR.3
(Plagioclásio (1); quartzo (2); biotita (3); K-Feldspato (microclína) (4). Nicóis cruzados).

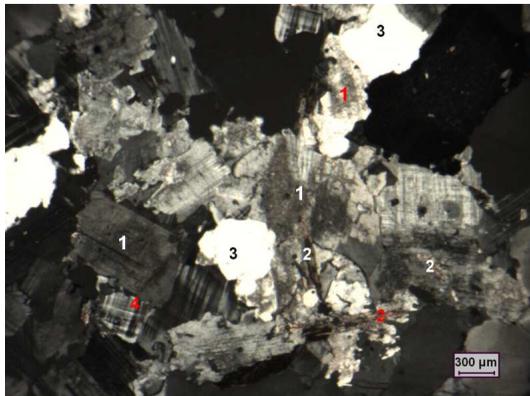


Figura 25 – Lâmina petrográfica do GR.4 (Plagioclásio saussuritizado (1); biotita (2); quartzo (3); microclina (4). Nicóis cruzados).

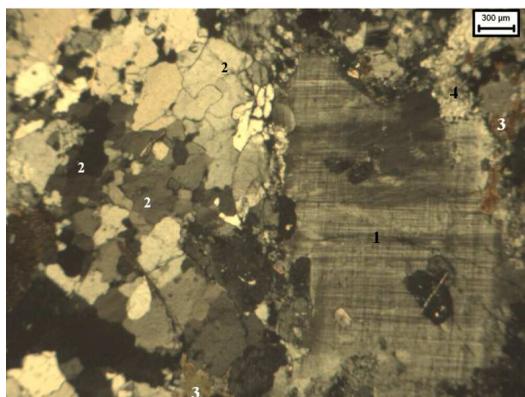


Figura 26 – Lâmina petrográfica do GR.5 (Microclínio (1); quartzo (2); biotita (3); intercrescimento mirmequítico (4). Nicóis cruzados).

Os granitos GR.1, GR.3 e GR.4 apresentam estrutura maciça, enquanto que os GR.2 e GR.5 são de estrutura foliada. A constituição mineralógica dessas rochas é composta por feldspatos (plagioclásio e K-feldspato), quartzo e micas (muscovita e biotita). A micro-fissuração nessas rochas é ausente ou fraca. Os GR.1 e GR.4 ainda apresentam uma pequena quantidade de opacos disseminados na sua estrutura. É comum em todas as rochas a deformação em grãos de quartzo, com o ângulo de extinção ondulante superior a 30° nos GR.1, GR.2 e GR.4, porém em poucos cristais no GR.1; entre 15° e 30° no GR.3 e inferior a 15° no

GR.5. Há presença de quantidade inferior a 5% de quartzo microgranular (grãos inferiores a 0,5 mm) no GR.2.

Observam-se as texturas gráficas de mirmequita e pertita em chamus nos GR.2, GR.3 e GR.5; o GR.1 exibe apenas pertita em chamus e o GR.4 nenhum dos tipos mencionados. São exibidos na tabela 10 a quantidade aproximada dos componentes encontrados nos granitos.

Tabela 10 – Composição mineralógica dos granitos

Rocha	Mineral	Quantidade (%)	Diâmetro (mm)		
GR.1	K-feldspato	40	1,2		
	plagioclásio	10	1		
	quartzo	30	0,3	a	1,2
	biotita	10	1,5		
	muscovita	7	1,5		
	opacos	1	-		
	epídoto e titanita	2	-		
GR.2	K-feldspato	55	2,5		
	plagioclásio	15	0,8		
	quartzo	25	0,2	a	2,5
	biotita	2	0,7		
	muscovita	1	0,5		
	granada, epídoto, apatita e zircão	2	-		
GR.3	K-feldspato	40	8	a	10
	plagioclásio	25	8	a	10
	quartzo	25	0,1	a	3
	biotita	8	1	a	1,5
	opacos, calcita e zircão	2	-		

Continuação tabela 10

Rocha	Mineral	Quantidade (%)	Diâmetro (mm)		
GR.4	K-feldspato	38	2		
	plagioclásio	24	0,8		
	quartzo	32	0,8	a	3
	biotita, muscovita e clorita	5	0,5		
	opacos	1	-		
GR.5	K-feldspato	43	6		
	plagioclásio	27	4		
	quartzo	20	0,1	a	0,8
	biotita	6	0,5		
	muscovita	1	-		
	turmalina, zircão, epídoto, apatita e opacos	3	-		

Seguindo as orientações da norma NBR 15577/3, os GR.2 e GR.4 são considerados potencialmente reativos devido à alta deformação nos grãos e subgrãos de quartzo. Os GR.1, GR.3 e GR.5 são considerados potencialmente inócuos.

MICAXISTOS

Produto do metamorfismo regional, os micaxistos são rochas formadas em depósitos contendo argilominerais que, pela ação da temperatura e pressão sofrem o processo metamórfico adquirindo a consistência de uma rocha.

São materiais bastante duros apresentando estrutura xistosa, com os minerais orientados perpendicularmente ao plano de tensões existente no processo de formação. São compostas basicamente por minerais de quartzo e micas (muscovita e biotita), podendo conter feldspato, devido à natureza química dos argilominerais favorecer a formação desses minerais. As figuras 27, 28 e 29 apresentam as imagens obtidas pela petrografia dos micaxistos.

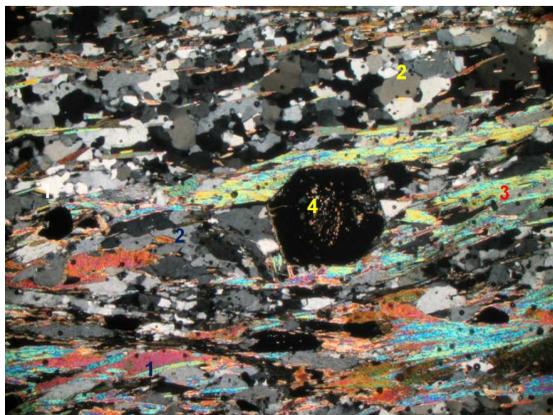


Figura 27 – Lâmina petrográfica do QX.2
(Biotita (1); quartzo (2); muscovita (3); granada (4). Nicóis cruzados).

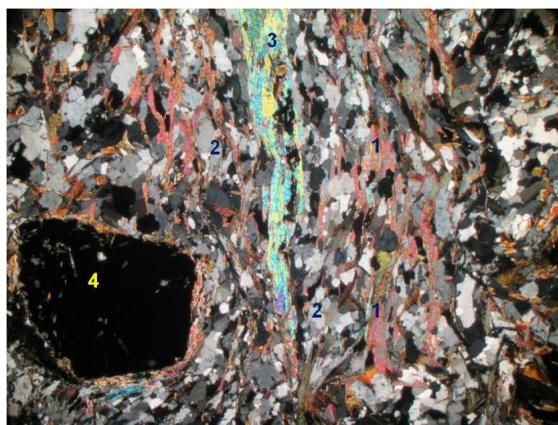


Figura 28 – Lâmina petrográfica do QX.3
(Biotita (1); quartzo (2); muscovita (3); granada (4). Nicóis cruzados).

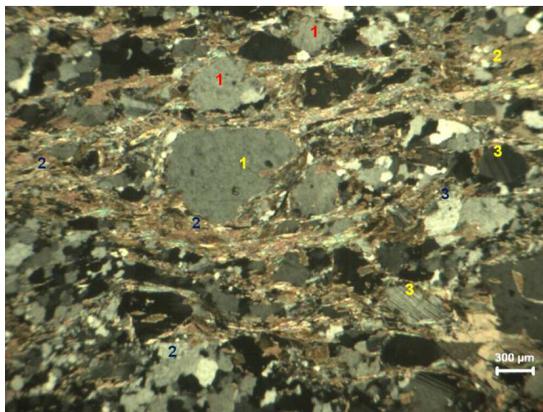


Figura 29 – Lâmina petrográfica do QX.5
(Quartzo (1) apresentando sombra de pressão; muscovita (2); plagioclásio (3)
Nícolis cruzados).

Os micaxistos estudados exibem estrutura xistosa (laminada) de composição mineralógica essencialmente formada por quartzo, feldspato (plagioclásio) e micas (biotita, muscovita, clorita) e granada; com exceção do QX.5 que tem quartzo, micas (biotita e muscovita) e pequena quantidade de piroxênio e opacos. As rochas apresentam quartzo deformado com o ângulo de extinção ondulante superior a 30° nos QX.2 e QX.3 e, inferior a 15° no QX.5. Os QX.2 e QX.5 ainda tem a presença de quartzo microgranular inferior a 5%. A textura encontrada nessas rochas é granolepidoblástica com micro-fissuração ausente ou fraca. Observa-se ainda a presença de carbonatos ao longo da xistosidade no QX.5. A composição mineralógica estimada pode ser visualizada na tabela 11. Os três micaxistos são classificados como sendo rochas sãs (pouco alteradas).

Tabela 11 – Composição mineralógica dos micaxistos

Rocha	Mineral	Quantidade (%)	Diâmetro (mm)
QX.2	quartzo	50	0,1 a 2
	biotita	25	0,7
	clorita	10	0,4
	granada	10	1
	muscovita	4	0,4
	opacos	1	-
	plagioclásio	traços	-
QX.3	quartzo	50	0,1 a 1,5
	biotita	25	0,4
	granada	15	0,4
	clorita	10	3,5
	plagioclásio e K-feldspato	traços	0,4
QX.5	quartzo	40	0,01 a 0,8
	muscovita	30	0,4
	biotita	15	0,7
	piroxênio	10	0,4
	opacos	5	0,4

As três rochas são consideradas potencialmente reativas devido à deformação encontrada nos grãos de quartzo e presença de quartzo microgranular.

QUARTZITOS

Similares aos micaxistos, os quartzitos também são resultado do metamorfismo regional em que o depósito de formação continha grande quantidade de sílica em alto teor de pureza (arenitos). Dessa forma essas rochas exibem quartzo quase que na sua totalidade, contendo também minerais de muscovita em menor quantidade. Observa-se nas figuras 30 e 31 as imagens obtidas pela petrografia.



Figura 30 – Lâmina petrográfica do QZ.1

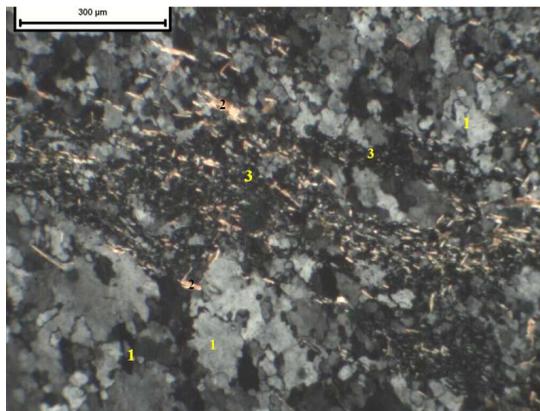


Figura 31 – Lâmina petrográfica do QZ.2
(Quartzo (1); sericita (2); turmalina (3). Nicóis cruzados).

O QZ.1 é uma rocha de estrutura foliada, diferente do QZ.2 que apresenta a estrutura xistosa. As duas se diferem pela orientação planar que é encontrada na segunda, sendo que a primeira exibe uma xistosidade mal definida devido aos minerais equidimensionais (feldspatos, quartzo e piroxênio) se sobressaírem em relação aos minerais prismáticos.

São compostas basicamente por quartzo (em maior quantidade), e muscovita em traços. As duas rochas apresentam quartzo deformado com ângulo de extinção ondulante superior a 30° , e, quartzo microgranular superior a 15%. A textura é granoblástica com micro-

fissuração ausente ou fraca. Na tabela 12 encontra-se a composição mineralógica dessas rochas. Também exibem pouca alteração, sendo classificadas por rochas sãs.

Tabela 12 – Composição mineralógica dos quartzitos

Rocha	Mineral	Quantidade (%)	Diâmetro (mm)
QZ.1	quartzo	90	0,01 a 0,2
	muscovita	10	0,1
	opacos	traços	
QZ.2	quartzo	90	0,01 a 0,2
	muscovita	10	0,1
	opacos	traços	

São consideradas potencialmente reativas por exibirem alto ângulo de extinção ondulante e quartzo microgranular.

MILONITO

Esse tipo de rocha é derivado do processo de metamorfismo dinâmico em rochas como granitos. Com o processo, a pressão aplicada direciona os minerais que irão se deformar para se moldarem às novas condições do meio. Com essas deformações, minerais dúcteis como o quartzo se deformam enquanto os mais frágeis como feldspatos podem apresentar rupturas em sua estrutura. A figura 32 exibe as imagens obtidas pela petrografia dessa rocha.

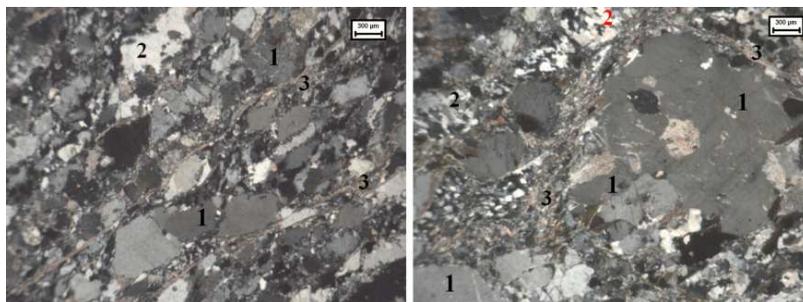


Figura 32 – Lâmina petrográfica do ML.1 (Feldspato (1); quartzo (2); micas (3). Nicóis cruzados).

Essa rocha são é cinza rosada, de estrutura levemente bandada apresentando textura porfiroclástica, resultante da intensa fragmentação dos principais componentes (feldspato e quartzo). A granulação é de média a fina e os minerais encontrados são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Composição mineralógica do milonito

Rocha	Mineral	Quantidade (%)	Diâmetro (mm)		
ML.1	K-feldspato	39	0,4	a	2
	plagioclásio	36	0,3	a	1,5
	quartzo	20	0,01	a	1
	biotita e muscovita opacos, epídoto, apatita, carbonato e zircão	3	0,6		
		2			

Devido ao alto grau de extinção ondulante e à existência de quartzo microcristalino esse milonito é caracterizado petrograficamente como potencialmente reativo.

4.3. EXPANSÃO ACELERADA EM BARRAS DE ARGAMASSA

Os resultados obtidos no ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa são exibidos separados por grupos de agregados, no anexo 1. A figura 33 apresenta um gráfico contendo os valores de expansão que os agregados obtiveram aos 30 dias de ensaio, com a linha em vermelho delimitando as zonas de reatividade.

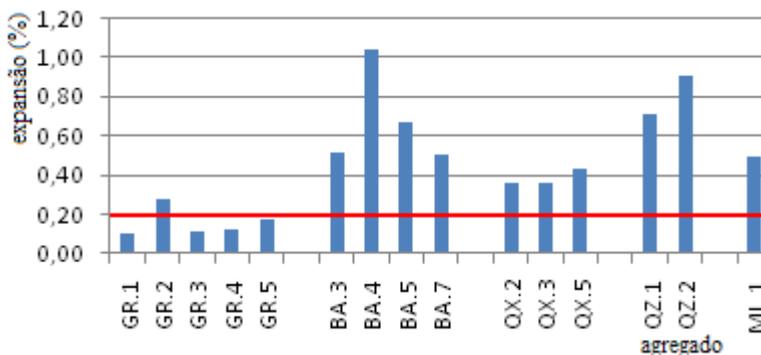


Figura 33 – Gráfico de expansão acelerada (%) em barras de argamassa (30 dias de ensaio).

Apenas 4 agregados são considerados potencialmente inócuos, os granitos GR.1, GR.3, GR.4 e GR.5. As demais rochas ultrapassaram o limite estabelecido pela NBR 15577-4 (2008), sendo classificadas como potencialmente reativas.

4.4. MÉTODO QUÍMICO

Primeiramente foi aplicado o método químico simples nas rochas, sendo em seguida feitas as variações no ensaio. O ataque com a solução de Lawrence não mostrou resultados conclusivos em relação aos agregados testados. A solução parece não ser suficientemente agressiva para que seus resultados sejam inseridos no gráfico proposto por Mielenz *et al.* (1947). Os resultados mostram uma redução na alcalinidade compatível com a obtida pelo método padronizado, porém não em termos de sílica dissolvida. Foram testados dois agregados apenas e, visto que o método não apresentou resultados satisfatórios, foi abandonado; os valores obtidos são apresentados nas tabelas do anexo 2.

As outras variáveis aplicadas contribuem de alguma forma para as análises do comportamento que as rochas apresentaram em solução alcalina.

Nas figuras a seguir podem-se observar os gráficos obtidos após a inserção dos resultados de cada etapa: método químico simples (figura 34); variações de aumento na fração granulométrica para 0,30-1,18 mm (figura 35) e 1,18-2,36 mm (figura 36); aumento no tempo de exposição para 3 dias (figura 37) e 7 dias (figura 38).

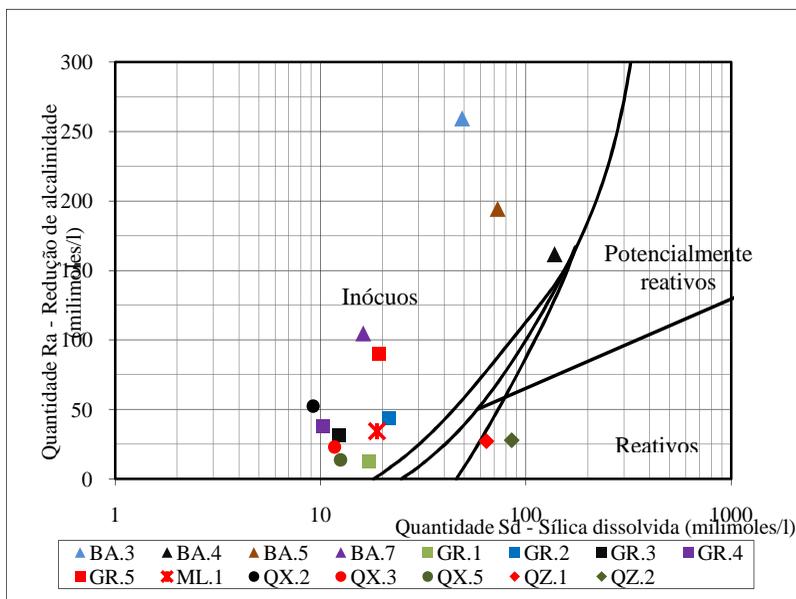


Figura 34 – Método químico simples.

Pela metodologia normatizada apenas os quartzitos foram classificados como reativos, as demais rochas são consideradas inócuas. Observa-se que as rochas se agrupam em relação às suas litologias.

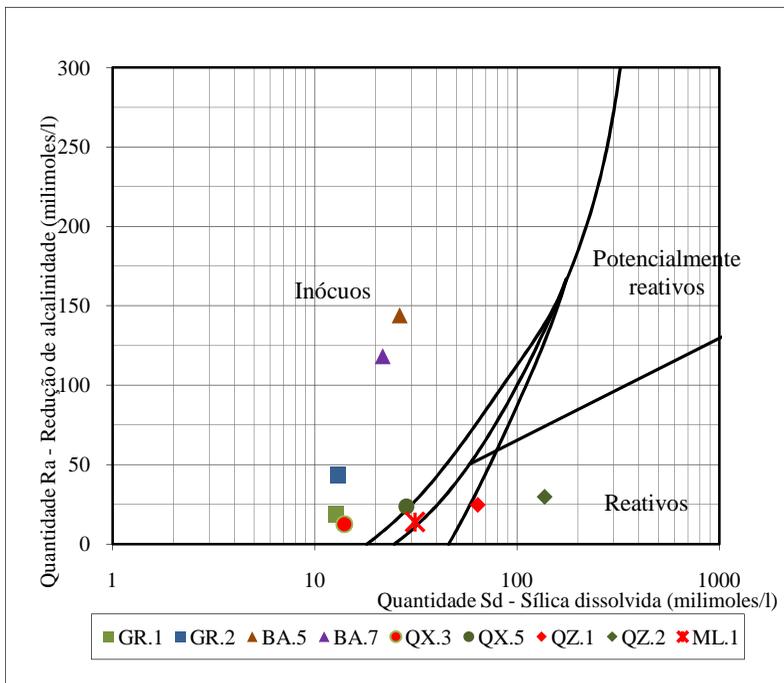


Figura 35 – Método químico com fração diametral de 0,30-1,18 mm

As rochas estudadas pela variação diametral na metodologia ainda exibem um agrupamento entre diferentes litologias. Aumentando-se a dimensão das amostras para a fração de 0,30 a 1,18 mm, o resultado foi próximo àquele obtido pela metodologia simples. Nota-se que o milonito e os micaxistos se aproximam da curva de reatividade. Os quartzitos se mantêm na região de reatividade, sendo que o QZ.2 apresenta um aumento na quantidade de sílica dissolvida quando comparado ao método simples.

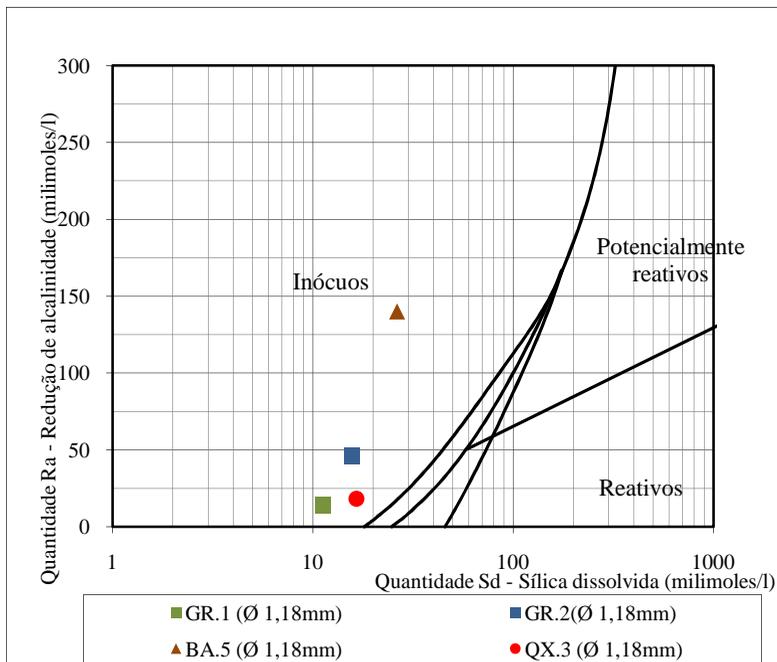


Figura 36 – Método químico com fração diametral de 1,18-2,36 mm.

As rochas ensaiadas na fração granulométrica entre 1,18 a 2,36 mm exibem comportamento parecido ao obtido com os ensaios nas frações inferiores. Foram classificadas por inócuas a partir dessa metodologia.

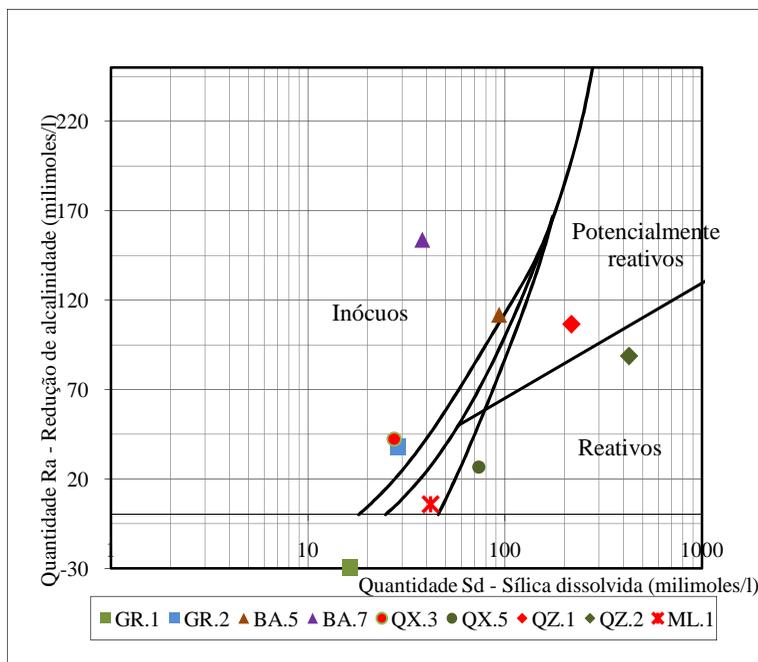


Figura 37 – Método químico com tempo de exposição de 3 dias.

Com o aumento no tempo de exposição para 3 dias as rochas se aproximam da curva de reatividade. Entre os quartzitos, observa-se que o QZ.1 teve um aumento na R_a e foi inserido na região de potencialmente reativos. O BA.5 exibe uma diminuição na R_a , acompanhado de um aumento na S_d . O milonito fica inserido na região 'reativos', juntamente com o QX.5, que pelo ensaio simples foi classificado como inócuo.

Entre os granitos nota-se um aumento na quantidade de sílica dissolvida. Em termos de redução na alcalinidade o GR.1 apresenta um comportamento curioso, exibindo resultados negativos para esse parâmetro, dessa forma foi feita uma modificação no gráfico que por ser em escala logarítmica não contempla valores negativos. Esse comportamento singular pode significar que algum constituinte dessa rocha esteja fornecendo álcalis para a solução.

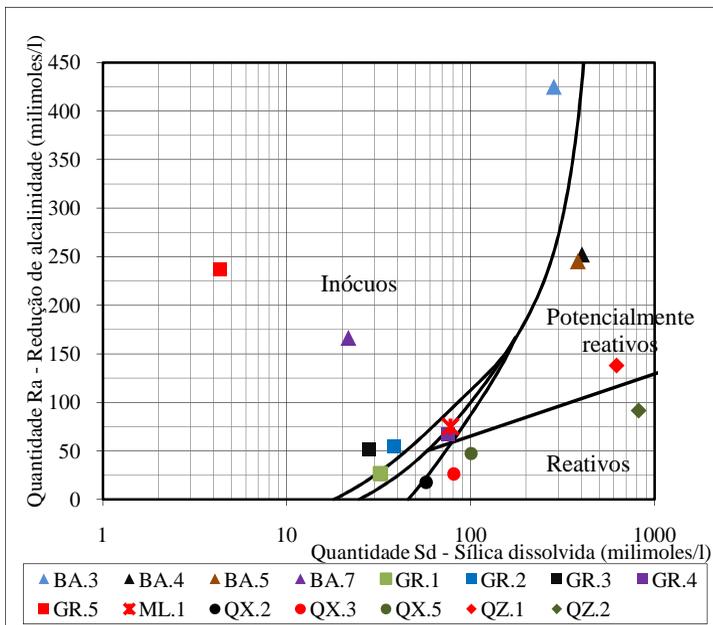


Figura 38 – Método químico com tempo de exposição de 7 dias.

Aos 7 dias de ensaio os três micaxistos passam para a zona de reatividade. Dois basaltos (BA.4 e BA.5) são classificados como potencialmente reativos e, os granitos (com exceção do GR.5) se aproximam da zona de reatividade, sendo que o GR.4 passa para a zona de potencialmente reativos. Entre os quartzitos o comportamento encontrado com 3 dias de ensaio se mantém, ficando o QZ.1 na zona dos potencialmente reativos.

CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As tabelas 14 e 15 resumem a classificação dos agregados do estudo quanto ao tipo de método empregado.

Tabela 14 – Reatividade segundo os métodos aplicados nas rochas ígneas.

Método	Classificação do agregado ¹¹								
	BA.3	BA.4	BA.5	BA.7	GR.1	GR.2	GR.3	GR.4	GR.5
Análise Petrográfica	PR	PR	PR	PR	PI	PR	PI	PR	PI
MABA	PR	PR	PR	PR	PI	PR	PI	PI	PI
Valores de MABA aos 30 dias (%)	0,51	1,04	0,67	0,50	0,10	0,27	0,11	0,13	0,17
Método químico simples	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Método químico Ø 0,30 mm	-	-	I	I	I	I	-	-	-
Método químico Ø 1,18 mm	-	-	I	-	I	I	-	-	-
Método químico 3 dias de ataque	-	-	I	I	I	I	-	-	-
Método químico 7 dias de ataque	I	PR	PR	I	I	I	I	PR	I

Tabela 15 – Reatividade segundo os métodos aplicados nas rochas metamórficas.

Método	Classificação do agregado ¹¹					
	QX.2	QX.3	QX.5	QZ.1	QZ.2	ML.1
Análise Petrográfica	PR	PR	PR	PR	PR	PR
MABA	PR	PR	PR	PR	PR	PR
Valores de MABA aos 30 dias (%)	0,36	0,36	0,43	0,71	0,91	0,49
Método químico simples	I	I	I	R	R	I
Método químico Ø 0,30 mm	-	I	I	R	R	I
Método químico Ø 1,18 mm	-	I	-	-	-	-
Método químico 3 dias ataque	-	I	R	PR	R	R
Método químico 7 dias de ataque	R	R	R	PR	R	PR

¹¹ PI – Potencialmente inócuo; PR – Potencialmente reativo; R – Reativo; I – Inócuo.

Os resultados da petrografia não condizem com o método acelerado de expansão em barras de argamassa (MABA) apenas nos granitos GR.1 e GR.4, já os resultados do método químico simples só condizem com os valores dos outros ensaios para os GR.3, GR.5, QZ.1 e QZ.2. Com as variações propostas é observado que houve uma aproximação de classificação entre os métodos. São discorridas neste item algumas constatações relacionadas aos resultados obtidos.

5.1. ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados fornecidos pela análise química nada revelam a respeito da reatividade as rochas, ajudando apenas na identificação dos principais óxidos constituintes e a possibilidade da presença de voláteis, tais como carbonatos, que de alguma forma podem interferir nos resultados quando realizado um ataque químico.

O ensaio seria bastante útil caso fosse feita a análise da química da solução e das amostras após o ataque químico. Isso poderia revelar quais as principais fases apresentaram maior grau de dissolução, possíveis trocas catiônicas que ocorrem entre a solução e as fases da rocha e até mesmo identificar a existência de compostos que contribuem para a redução da dissolução da sílica ou do fornecimento de álcalis.

5.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA

A análise petrográfica se torna muito útil para a identificação das fases presentes nos agregados, provendo dados que ajudam na avaliação do comportamento que os agregados podem apresentar frente ao ataque alcalino.

Os dados das tabelas 14 e 15 mostram que a análise petrográfica forneceu resultados que atestam a reatividade daqueles obtidos pelo ensaio nas barras de argamassa. A única rocha que escapa disso é o GR.4, identificado como reativo em campo, confirmado reativo pela petrografia, porém passou no teste de expansão acelerada, classificado como potencialmente inócuo.

5.3. EXPANSÃO ACELERADA EM BARRAS DE ARGAMASSA

Conforme já citado na revisão de literatura deste trabalho, esse método, como os demais, apresenta algumas limitações quanto ao seu uso. Tanto que a norma brasileira NBR 15577 recomenda que os resultados por ele fornecidos não sejam interpretados separadamente. A utilização de ensaios de expansão em prismas de concreto em conjunto com este ensaio angariaria maior confiabilidade.

Do ponto de vista dos procedimentos adotados no ensaio, observa-se que o traço das barras de argamassa é em massa e de 1:2,25. Esse traço foi definido devido à observação de um teor péssimo para essa composição. Porém, agregados com diferentes densidades estarão presentes em diferentes quantidades. O agregado de densidade mais alta estará em desvantagem em relação à massa, estando em menor quantidade que outro de menor densidade. Possivelmente pode ser que haja diferentes faixas para esse efeito péssimo, dependendo do tipo de agregado que está sendo testado.

Valduga (2007), estudando as influências das condições de ensaio da ASTM C 1260 (método acelerado em barras de argamassa) verificou a influência que o tipo de britador pode causar nos resultados desse ensaio. A autora encontrou diferenças de até 300% no índice de forma dos agregados após a moagem entre diferentes britadores. Tal fato pode causar interferências significativas nos resultados de reatividade.

Outro ponto a ser abordado é a diferença de consistência que as amostras podem apresentar dependendo da forma do grão do agregado. Isso pode interferir na microestrutura do material deixando-o mais ou menos poroso, interferindo no mecanismo das expansões e causando erros nas interpretações do ensaio.

Somados esses fatores observam-se possíveis diferenças que comprometem a confiabilidade do método.

5.4. MÉTODO QUÍMICO

O preparo das soluções envolve a utilização de instrumentos laboratoriais tais como pipetas e buretas. Essas ferramentas têm limitações de erro que variam de acordo com a capacidade de cada uma delas, sendo proporcional ao volume que elas medem.

A imposição de que a normalidade de solução de NaOH deve ser de $(1,000 \pm 0,001)$ N fica impraticável com o uso de instrumentos que inferem em erros superiores à ordem das três casas estipuladas pela

norma. Dessa forma a reprodutibilidade entre laboratórios pode ser afetada.

Aliado a isso se tem a diferença que pode ocorrer na determinação da alcalinidade de uma solução por titulação. Um pequeno desvio em torno do menisco de uma pipeta pode acarretar em valores na titulação que fogem do desvio padrão sugerido pela norma, de 12 mmoles/l para valores inferiores a 100 mmoles/l, ou de 12% quando superiores a este.

As amostras são trituradas para ficarem na faixa granulométrica entre 0,15 mm a 0,30 mm. Essa operação pode influenciar nas características texturais que as rochas têm e que as diferencia em função do comportamento álcali-reativo. Por exemplo, uma rocha com alguns grãos de quartzo deformado submetida ao fracionamento pode exibir uma parcela de grãos que não exibem deformação e que poderão apresentar comportamento semelhante ao que um grão de quartzo não deformado pode ter.

Os resultados obtidos com amostras de diâmetro superior ao especificado pela norma mostram que o comportamento exibido pelas rochas se assemelha com o resultado para a fração arbitrada, com a diferença de que o milonito e os micaxistos se aproximaram da curva de reatividade, enquanto os granitos denotam um afastamento. Resultados condizentes com o comportamento que essas rochas apresentam pelas outras metodologias (petrografia e expansão acelerada em barras de argamassa).

É sugerido pela norma que, após o peneiramento, seja realizada uma lavagem em água destilada, de forma a garantir a completa eliminação dos finos. A água destilada ainda contém uma série de carbonatos entre outros possíveis constituintes. Esses irão influenciar nos resultados tanto de redução na alcalinidade quanto de sílica dissolvida, interagindo com os íons fornecidos à solução. O recomendável é que a lavagem seja feita com água deionizada.

Outro problema encontrado na metodologia está relacionado aos procedimentos para a determinação da S_d . Conforme já mencionado, pipetas com volumes maiores inferem também em erros maiores. O uso de uma pipeta de 100 ml para a coleta da solução que esteve em contato com o agregado e depois foi diluída introduz erros que são incompatíveis com a precisão das fórmulas de determinação da sílica. Se isso ainda for somado aos erros dos balões volumétricos pode aumentar a distância em relação à confiabilidade de um método laboratorial.

No momento da filtração da solução previamente tratada com HCl, para solubilizar a sílica, o procedimento recomenda o uso de papel de filtração média. Em alguns ensaios realizados no laboratório de Furnas S.A. foi constatada a passagem de uma parcela da sílica contida na solução. Para evitar que isso ocorra é recomendável a utilização de papel de filtração lenta, onerando o processo, porém aumentando a confiabilidade.

Em termos da determinação da redução de alcalinidade que a solução sofre cabe citar que a soda (NaOH) é extremamente ávida por CO₂. Esse comportamento ocasiona na redução das hidroxilas disponíveis inicialmente, reduzindo a alcalinidade da solução antes mesmo do contato com o agregado. Tal comportamento da soda também acarreta na dificuldade de determinação do ponto de viragem que as soluções exibem no momento da titulação. Com a constante exposição e agitação das soluções decorrentes do processo, a carbonatação pode ocorrer em maior ou menor grau, resultando em dados questionáveis.

Nos torpedos de aço, o anel de vedação é feito de borracha e, quando estão submetidos às condições de ensaio (80°C), a solução de soda pode também agredir esse material e carregá-lo à solução em que o agregado está imerso. Um indício desse fenômeno foi que em alguns reatores ocasionalmente a coloração da solução apresentava-se amarelada, cor característica do enxofre, componente da borracha. Há dúvida em qual pode ser a influência de íons enxofre com os demais íons presentes na solução heterogênia (soda + agregado).

5.4.1. VARIAÇÕES APLICADAS AO MÉTODO

Entre as propostas deste trabalho a que mostrou resultados mais próximos aos dos outros métodos aplicados foi o aumento do tempo de exposição para 7 dias de ensaio. As demais variações contribuíram para a observação de possíveis interações iônicas que ocorrem entre minerais e uma solução básica.

5.5. COMPORTAMENTO DAS ROCHAS

Cada grupo de rochas apresentou algum comportamento específico que pode estar relacionado à composição mineralógica dessas. Neste item são levantadas algumas considerações que buscam explicar os comportamentos diferentes que as rochas exibiram mediante a aplicação dos testes.

5.5.1. BASALTOS

BA.3

Essa rocha foi a que apresentou a maior perda ao fogo entre os basaltos, fator que pode ter influenciado para que o valor da R_a encontrado no método químico simples e na variação de 7 dias de ensaio seja o mais alto entre as rochas deste grupo. Outro constituinte que pode ter interferência nesse parâmetro é a presença de argilominerais, que podem reduzir a alcalinidade de uma solução devido à interação com os íons hidroxila.

As expansões observadas nas barras de argamassa e a presença de vidro vulcânico na sua composição classificam esse agregado como potencialmente reativo; característica que não está de acordo com os resultados do método químico, que não foi efetivo na determinação desse caráter.

BA.4

O BA.4 possui a serpentina em sua composição, um silicato de magnésio que pode influenciar nos resultados do método químico. Porém ele apresenta maior expansão nas barras de argamassa e fica mais próximo, entre os basaltos, da curva de reatividade do gráfico do método químico. Além disso, a serpentina pode fornecer à solução o íon magnésio, podendo formar o mineral brucita, que sendo expansivo em meio aquoso pode ter alguma influência nos resultados do ensaio em barras de argamassa.

Com 7 dias de ensaio esse agregado é considerado reativo pelo gráfico do método químico. Essa variação pode ser útil na determinação da reatividade em basaltos.

BA.5

A reatividade dessa rocha foi identificada pelos métodos de expansão em barras de argamassa, análise petrográfica e método químico variado com 7 dias de ensaio.

O aumento do diâmetro da fração das amostras acarretou na diminuição da quantidade de sílica dissolvida e redução da alcalinidade. Tal comportamento pode estar relacionado à menor exposição de argilominerais e do vidro vulcânico, tanto que para as duas frações propostas o resultado foi parecido.

BA.7

Diferente dos outros representantes deste grupo, o BA.7 não apresenta argilominerais e vidro vulcânico na sua estrutura. Os minerais estão mais bem formados, exibindo maiores dimensões do que nos outros basaltos.

O método químico não foi efetivo em determinar o caráter reativo dessa rocha, característica que foi identificada pela expansão em barras de argamassa e petrografia. As variações propostas também classificam esse agregado por inócuo, porém ao se aumentar o tempo de exposição para 3 dias houve um acréscimo nos valores de R_a e S_d , valores que reduziram quando o tempo foi estendido para 7 dias. Esse comportamento indica que parte da sílica dissolvida reagiu com algum elemento em solução, mascarando os resultados finais.

5.5.2. GRANITOS

GR.1

Essa rocha exibe quantidade predominante de K-feldspato, mineral conhecido pelo fornecimento de álcalis, que pode ser favorecido pela presença da textura de pertita em chamas. Pelo método químico simples esse material apresentou a menor R_a quando comparado com os outros granitos. Esse comportamento se revela interessante ao ser observado o resultado negativo na R_a , obtido pelo ataque desse agregado com 3 dias de ensaio, remetendo à idéia de um possível fornecimento de álcalis. Os valores de R_a encontrados para essa rocha se mantiveram sempre abaixo dos obtidos para os outros granitos do estudo.

Quando as diferentes frações diametrais dessa rocha foram testadas, observa-se que a quantidade de sílica dissolvida diminui a medida que a granulometria das amostras aumenta. Os grãos de quartzo têm a dimensão média de 0,3-1,2 mm, ou seja, na fração normatizada, entre 0,15-0,30 mm, dificilmente encontrar-se-á um grão de quartzo inteiro; entre 0,30-1,18 mm já há essa possibilidade e, entre 1,18-2,36 mm já é bem mais possível o aparecimento de grãos completos, diminuindo a superfície específica que o quartzo terá para ser dissolvido. De acordo com o que foi encontrado nos ensaios.

A análise da petrografia classifica essa rocha como potencialmente reativa devido à presença de quartzo deformado com elevado ângulo de extinção ondulante. O oposto foi encontrado pelos métodos químico e expansão acelerada em barras de argamassa. Esses resultados revelam a necessidade de utilização de outros métodos, além

da petrografia, que melhor identifiquem o potencial de reação das rochas.

GR.2

Esse foi o único granito classificado como potencialmente reativo pelo ensaio acelerado em barras de argamassa, exibindo expansões superiores a 0,19% aos 30 dias de ensaio. Foi acusada, pela petrografia, a presença de quartzo deformado com ângulo de extinção ondulante superior a 30° e quartzo microgranular. A estrutura dessa rocha é foliada, dando a idéia de que deformações ocorreram, o que aumenta o número de possíveis discordâncias na estrutura dos minerais e, por consequência, a probabilidade de dissolução desses.

Ao observar as expansões que ocorreram nas barras de argamassa moldadas com os granitos, nota-se que as duas rochas que exibiram maiores resultados são os granitos GR.2 (0,27%) e GR.5 (0,17%), que tem em comum a estrutura foliada. Esse tipo de estrutura, além de facilitar o acesso de íons no seu interior, pode favorecer a formação do gel característico da reação em seus interstícios, acarretando em maiores expansões que, possivelmente foram superiores no GR.2 devido a uma maior dissolução de sílica devido à presença de quartzo microgranular e mostrado pelo método químico simples quando exibiu a maior quantidade de S_d entre os granitos avaliados.

GR.3

O granito GR.3 passa a idéia de que foi mais bem formado, em relação aos outros 4 granitos, devido ao tamanho dos grãos que formam sua estrutura. Essa melhor formação é sinônimo de maior estabilidade dos minerais.

Isso pode ser encontrado ao avaliar os resultados expostos. Pela análise química essa rocha apresenta a menor perda ao fogo, ou seja, elementos voláteis tiveram tempo para escapar, permitindo a formação de minerais mais estáveis. As expansões nas barras de argamassa foram baixas, como também a dissolução da sílica que houve quando aplicadas as metodologias simples e com 7 dias de exposição do ensaio químico.

Ainda mais o agregado é considerado potencialmente inócuo pelos critérios da petrografia e, conhecido por ser um granito não reativo da região de Recife-PE.

GR.4

Pelo método químico simples esse granito foi o que mais se afastou da curva de reatividade, sendo classificado como inócuo; comportamento contraditório ao que foi observado em campo. O mesmo foi obtido pelo ensaio de expansão em barras de argamassa, caracterizando uma falha de ensaios. A reatividade foi apontada pela análise petrográfica devido à deformação dos grãos de quartzo, que exibem um ângulo de extinção ondulante superior a 30°.

O comportamento reativo foi encontrado utilizando-se da variação proposta no método químico com 7 dias de exposição do agregado na solução de hidróxido de sódio. Mostrando que essa mudança pode ser útil na caracterização quanto à reatividade em granitos.

Essa rocha foi classificada como alterada pela petrografia, significando que alguns minerais originais encontram-se parcial ou totalmente transformados em outros minerais e as superfícies de descontinuidades (discordâncias) apresentam efeitos nítidos do intemperismo, características que podem propiciar a RAA.

GR.5

Observa-se pela tabela 10 que o GR.5 apresenta a maior perda ao fogo. Uma possível presença de carbonatos ou gás carbônico aprisionado que pode influenciar na redução da alcalinidade quando atacado por uma solução básica. Nota-se que essa rocha exibiu a maior R_a entre os granitos pelo método simples e quando submetida ao ensaio por 7 dias de exposição.

Nota-se na figura 24 que esse agregado teve uma considerável redução na quantidade de sílica dissolvida. Isso pode estar relacionado a um erro de ensaio ou a alguma interação que ocorreu entre algum constituinte da rocha e a sílica anteriormente disponível em solução.

Em campo foi constatado o aparecimento da reação 63 anos após a construção da barragem de Pedro Beicht - SP (COUTO, 2008). Esse comportamento pode indicar que todas as rochas podem reagir quimicamente com álcalis para formar o gel expansivo, dependendo apenas do tempo e das condições ambientes. Mesmo assim é tomada como não reativa pelos ensaios de petrografia e expansão acelerada em barras de argamassa.

5.5.3. MICAXISTOS

QX.2

Classificado como potencialmente reativo pela análise petrográfica pela presença de quartzo deformado e quartzo microgranular esse micaxisto exibiu expansões muito parecidas com as do QX.3, sendo iguais aos 30 dias de ensaio. No entanto, pelo método químico simples essa rocha é classificada como inócua, exibindo uma R_a superior à observada nos outros dois micaxistos, comportamento que pode estar relacionado à maior quantidade de elementos voláteis, acusados pela análise química.

Com 7 dias de ensaio químico essa rocha passa a ser classificada como reativa, resultado condizente com os fornecidos pela análise petrográfica e expansão acelerada em barras de argamassa, indicando que essa metodologia pode ser útil na avaliação de micaxistos, pois o mesmo ocorreu para os outros dois agregados do grupo.

QX.3

O método químico simples não foi efetivo em determinar a reatividade dessa rocha, esse comportamento foi observado pela expansão em barras de argamassa e mediante a análise dos constituintes, resultado da petrografia.

Quando a fração granulométrica compreendida entre 0,30-1,18 mm foi testada observou-se um aumento na quantidade de S_d e diminuição na R_a , resultado contraditório ao esperado quando se diminui a superfície disponível para reagir pelo aumento do diâmetro. Porém, se considerado que o plagioclásio, que contém cálcio, for mais reativo na fração de 0,15-0,30 (ensaio simples), tem maior capacidade de fornecimento desse metal alcalino e, esse pode se combinar com a sílica para a formação do C-S-H, que pode mascarar a quantidade de S_d mensurada, pode-se concluir que o resultado obtido na fração especificada pela norma pode ter sofrido a influência dessa reação fornecendo uma quantidade de sílica inferior àquela quantificada sem a possível influência dos íons Ca^{2+} . Tal comportamento pode ser verificado da mesma forma quando a fração estudada foi entre 1,18-2,36 mm.

QX.5

Entre essas rochas o QX.5 é a que apresenta o mineral de quartzo na menor fração, grãos entre 0,01 e 0,8 mm. Nota-se que essa rocha também apresentou as maiores expansões pelo MABA e ficou sempre à direita, das outras duas rochas desse grupo, no gráfico do método químico, exibindo a maior dissolução de sílica.

Um fato curioso foi observado com o aumento da granulometria das amostras submetidas ao ensaio químico. O ponto representado pelo agregado se aproximou à curva de reatividade. Neste caso não é possível concluir de forma análoga à do QX.3, porém a análise química aponta maior quantidade de CaO para essa rocha do que nas outras duas do grupo. Assim é possível que de alguma forma o aumento no diâmetro tenha suprimido o acesso de íons Ca^{2+} à solução, o que ocorre inversamente ao reduzir o tamanho das amostras, podendo ser mais um caso de resultados mascarados em função da ação de íons cálcio.

5.5.4. QUARTZITOS

QZ.1

Esse agregado foi classificado como reativo por todos os métodos de reatividade utilizados neste trabalho. A presença de quartzo quase que na totalidade da amostra resulta em elevadas concentrações de S_d , que é facilitada pela presença de quartzo microgranular e exibição de elevada deformação nos grãos de quartzo.

A alteração granulométrica da fração ensaiada não mostrou resultados diferentes dos levantados pelo método simples. Houve um aumento na R_a quando se estendeu o tempo de exposição para 3 e 7 dias, acompanhado de um acréscimo na S_d .

Uma observação na análise química revela que os teores de óxidos, com exceção do óxido de silício, são baixos, ainda quando comparados com o QZ.2. Por esse motivo a probabilidade de existência de diferentes íons com potencial de se combinarem com o silício é menor. Dessa forma o caráter ácido que o silício confere à solução pode estar relacionado ao aumento na R_a .

QZ.2

Esse agregado apresenta maiores expansões do que o QZ.1 pelo ensaio em barras de argamassa. No método químico a quantidade de sílica dissolvida também é a maior neste grupo. Esse resultado é condizente com os estudos de Marfil *et al.* (1998), os autores

observaram que as expansões são diretamente proporcionais à quantidade de sílica dissolvida na solução.

Variando-se o diâmetro da fração ensaiada, pelo método químico, observa-se um aumento na quantidade de S_d , quando o esperado seria o oposto. Possivelmente houve alguma influência da composição química dos minerais que, pela petrografia se assemelha muito ao QZ.1, porém a análise química mostra grande diferença nos teores de óxidos presentes entre as amostras.

Para estudar melhor esse e outros comportamentos observados é interessante uma análise química da solução e das amostras posteriormente ao ataque químico. Com esses dados haveria maiores possibilidades de avaliar como as interações químicas ocorrem entre diferentes tipos de minerais e a solução de NaOH.

5.5.6. MILONITO

O milonito tem a singularidade de apresentar deformação nos grãos de quartzo e feldspatos. Os primeiros são dúcteis, os feldspatos já sofrem fratura ao se deformarem, podendo torná-los mais reativos.

O potencial reativo dessa rocha foi caracterizado pela análise petrográfica e expansão acelerada em barras de argamassa. O método químico simples não foi suficiente para classificar essa rocha como reativa.

O aumento da fração dos grãos ensaiados para 0,30-1,18 mm aproximou o ponto representado por essa rocha no gráfico do ensaio químico. Nota-se na tabela 15 que os grãos de plagioclásio (cálcico) estão dentro da fração mencionada, sendo possível que alguns deles tenham se conservado inteiros, o que pode diminuir o potencial de dissolução desse mineral. Se isso ocorrer, pode ser correto afirmar que na fração normatizada (0,15-0,30 mm) os grãos de plagioclásio estejam mais suscetíveis a reagir, fornecendo cálcio à solução. O cálcio, quando combinado ao silício, pode formar o gel C-S-H, que irá mascarar a quantidade de sílica dissolvida determinada pelo método gravimétrico.

A exposição de 3 dias na solução de hidróxido de sódio foi suficiente para determinar o comportamento reativo dessa rocha. Com 7 dias de ensaio o mesmo desempenho foi obtido, porém devido ao aumento na R_a , o ponto representado pelo milonito aparece na região dos potencialmente reativos.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões obtidas pela avaliação dos resultados obtidos nos ensaios seguem ordenadas a seguir.

- Entre os ensaios de reatividade estudados o método químico simples não foi suficiente em classificar agregados lento-reativos como reativos (efetivo apenas no caso dos quartzitos);
- Para os granitos o ensaio se mostrou limitado;
- A metodologia do ensaio químico está sujeita a erros que acarretam na imprecisão dos resultados e dificuldade quanto à reprodutibilidade de ensaios entre diferentes laboratórios e operadores;
- Das variações propostas a que mostrou resultados mais condizentes com o ensaio de expansão em barras de argamassa foi o aumento no tempo de exposição para 7 dias de ensaio.
- Foi constatado um fornecimento de álcalis por parte do granito GR.1 que contém feldspato alcalino (K-feldspato);
- Observou-se que os agregados que exibiram maiores expansões no ensaio acelerado em barras de argamassa foram os que apresentaram maiores dissoluções de sílica pelo método químico;
- As divisões do gráfico do método químico poderiam ser de apenas duas, ao invés de três, contemplando uma região de agregados inócuos e outra para os reativos, substituindo a parte dos potencialmente reativos;
- As dificuldades de avaliação de granitos podem ser devido à complexidade estrutural apresentada por essas rochas;
- O método de expansão em barras de argamassa não foi suficiente em caracterizar a reatividade de um granito;
- Existem questões relacionadas à metodologia do ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa que podem colocar seus resultados em dúvida, descaracterizando-o como uma boa base de comparação entre métodos diferentes;

6.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Ficam como sugestões para pesquisas que podem ser desenvolvidas posteriormente:

- A execução do ensaio químico com determinações a cada dia de ensaio, estendendo esse até os 7 dias, com posterior análise química da solução e das amostras depois do ataque.
- O estudo do comportamento que os minerais de forma isolada apresentam frente ao ataque com solução de NaOH a 1N, em termos de sílica dissolvida e redução na alcalinidade.
- Aplicar o ensaio de Chatterji nas amostras para comparar com os valores de reatividade fornecidos pelos ensaios empregados neste trabalho.

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15577-3 **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.** Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15577-6 **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em primas de concreto.** Rio de Janeiro, 2008.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (simple chemical method), ASTM C-289.** Philadelphia, 2007.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete, ASTM C-295.** Philadelphia, 2007.

ASTM (The American Society for Testing Materials). **Standard method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (mortar bar method), ASTM C-1260.** Philadelphia, 2007.

ASTM (The American Society for Testing Materials). **Standard test method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, ASTM C 1293.** Philadelphia, 2006.

BEKTAS, F.; WANG, K.; CEYLAN, H., **Effect of Portland Cement Fineness on ASTM C 1260 Expansion**, SN2963, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2008, 30 pages.

BÉRUBE, Marc-André; FOURNIER, Benoit. **Canadian Experience with Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete**. Cement and Concrete Composites 15, p.27-47, (1993).

BIGARELLA, João Jose; LEPREVOST, Alsedo; BOLSANELLO, Aurélio. ASSOCIAÇÃO DE DEFESA E EDUCAÇÃO AMBIENTAL. **Rochas do Brasil**. Rio de Janeiro: ADEA: Livros Técnicos e Científicos, 1985. 310p.

CHATTERJI, S. **Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates**, Cement & Concrete Composites 27 (2005) 788-795.

COLLINS, C.L., *et al.* **Alkali-Silica Reaction: “The Cancer of Concrete”**. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology. Disponível em: <http://www.ce.gatech.edu/~kkurtis/gwillis/learn4.htm>. Acessado em 28/05/2010.

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

COUTO, T. A. **Reação Álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2008. 191p.

DIAMOND, S. **Alkali-Silica Reactions – Some Paradoxes**. Cement and Concrete Composites, v. 19, pp. 391-401, 1997.

DRON, R.; BRIVOT, F. **Thermodynamic and Kinetic Approach to the Alkali-Silica Reaction. Part 1: Concepts**. Cement and Concrete Research, v.23, pp. 93-103, 1992.

ERNST, W.G. **Minerais e Rochas**. Tradução de Evaristo Ribeiro Filho. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1996.

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.; LU, D.; FOLLIARD, K.J.; NKINAMUBANZI, P. C.; THOMAS, M.D.A.; IDEKER, J.H. **Evaluating Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates – How Reliable are the Current and New Test Methods?.** IBRACON Material Journal. Volume 2, Number 2 (December 2006) p. 67-81 ISSN 1809-5046.

GRATTAN-BELLEW, P.E. **Test methods and criteria for evaluating the potencial reactivity of aggregates.** In Okada K., Nishibayashi S. and Kawamura, M. (Editors): Proc. 8th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction. Elsevier Applied Science, London & New York. 279-294.

GRATTAN-BELLEW, P.E. **A critical Review of Ultra-accelerated Tests for Alkali-silica Reactivity.** Cement and Concrete Composites 19 (1997) 403-414.

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.

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

HOLZER, L.; LEEMAN, A., **Alkali-aggregate reaction – identifying reactive silicates in complex aggregates by ESEM observation of dissolution features.** Cement & Concrete Composites 27 (2005) 796-801.

JELIDI, A. **Conception d'un material composite a matrice cimentaire renforcee par des fibres de polyester.** 1991. 170f.. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Devant Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, França.

JESUS, Gisele I.M. de. **Identificação e análise da reação álcali-agregado segundo metodologia de ensaios laboratoriais.** Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

KIHARA, Y. **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.

KIRSH, Helmut. **Mineralogia aplicada: para engenheiros, tecnólogos e estudantes**, traduzido pelo Prof. Rui Ribeiro Franco. São Paulo, Polígono, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1972.

KUPERMAN, S.C.; SALLES, F.M.; PÍNFAARI, J.C.; CARNEIRO, E.F. **Deteção da reação álcali-agregado**. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XXVI, 2005, Goiânia, Anais em CD. Goiânia: CDDB, 2005.

LEE, Neil., BRANZ Ltd. **Alkali-Silica Reactivity in Concrete**. Disponível em http://www.branz.co.nz/cms_show_download.php?id=58. SD.

LEINZ, Viktor; AMARAL, Sérgio Estanislau do. **Geologia Geral**. 14 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2003.

LU, Du-you.; FOURNIER, B.; GRATTAN-BELLEW, P.E. **Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates**. Cement and Concrete Composites 28 (2006) 546-554.

LU, Du-you.; ZHOU, Xiaoling.; XU, Zhongzi.; LAN, Xianghui.; TANG, Mingshu.; FOURNIER, Benoit. **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 36 (2006) 1157-1165.

MARFIL, S.A.; MAIZA, P.J.; BENGOCHEA, A.L.; SOTA, J.D.; BATIC, O.R. **Relationships Between SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O, and Expansion in the Determination of the Alkali Reactivity of Basaltic Rocks**. Cement and Concrete Research, Vol.28. No. 2, pp. 189-196. 1998.

MADUREIRA FILHO, José B.; ATENCIO, Daniel; MCREATH, Ian. **Decifrando a Terra: capítulo 2**. Organizadores: Wilson Teixeira et al. São Paulo: Oficina de textos, 2001.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI. 1994.

MIELENZ, Richard C.; GREENE, Kenneth T.; BENTON, Elton J. **Chemical test for reactivity of aggregates with cement alkalis; Chemical processes in cement-aggregate reaction.** American Concrete Institute Vol. 19 No. 3, 1947.

MLANDENOVIC, A., SUPUT, J.S., DUCMAN, V., SKAPIN, A.S. **Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates.** Cement and Concrete Research 34 pp. 1809 – 1816 (2004).

MORITA, Tokio; ASSUMPÇÃO, Rosely M.V., **Manual de Soluções, Reagentes e Solventes.** Editora Edgard Blücher LTDA, 1972. Livro.

NATESAIYER, Kumar C.; HOVER, Kenneth C. - **Chemical Agents for Reducing Solubility of Silica in 1N Sodium Hydroxide.** Cement and Concrete Research. Vol. 22; pp. 653-662, 1992.

NETO, A.A.M., CINCOTTO, M.A., REPETTE, W.L. **Efeito do aditivo compensador de retração (SCA) no cimento portland de alta resistência inicial.** Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON (2007), Bento Gonçalves/RS.

OWSIAK, Zdzisława. **Testing alkali-reactivity of selected concrete aggregates.** Journal of Civil Engineering and Management, Vol XIII, No 3, 201-207, (2007).

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.

PRESS, Frank. **Para entender a Terra.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656p.

PREZZI, Mônica; MONTEIRO, Paulo José Melaragno; SPOSITO, Garrison. **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.

RUBERTI, Excelse; SZABÓ, Gergely A.J.; MACHADO, Rômulo. **Decifrando a Terra: capítulo 18**. Organizadores: Wilson Teixeira et al. São Paulo: Oficina de textos, 2001.

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

SHON, Chang-Seon. **Performance-based approach to evaluate alkali-silica reaction potential of aggregate and concrete using dilatometer method**. Portland Cement Association Research & Development Information, PCA R&D Serial No. 2820 (2008).

SILVA, P.N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso CHESF**. Influência da reação nas propriedades do concreto. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 220 p.

SLATER, A Cownley. **Geologia para engenheiros**. São Paulo (SP): LEP, 1961.

STARK, D.C. **Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsiderations**. Symposium on Nonstandard Test Methods Useful in Determine Physical-Chemical Characteristics of Cements, San Diego, California (1979).

SUZUKI, Hironobu; NAKAYAMA, Kimihiko; MIYANAGA, Ken-ichi; TAKAGI, Nobuaki; KIJIMA, Takayuki. **Study on Evaluation Method for Alkali-Silica Reactivity of Aggregates**. Proceeding of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2004.

SZABÓ, Gergely A. J.; BABINSKI, Marly; TEIXEIRA, Wilson. **Decifrando a Terra: capítulo 16**. Organizadores: Wilson Teixeira *et al*. São Paulo: Oficina de textos, 2001.

SWAMMY, R.N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Glasgow/London: Blackie/New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Copyright 1990, by ACADEMIC PRESS LIMITED Second printing 1992.

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. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RE-BR, 2006.

VALDUGA, Laila. 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.

XU, Huayong. “On the Alkali Content of Cement in AAR” - Concrete alkali-aggregate reactions. Edited by Patrick E. Grattan-Bellew. Noyes Publications, Mill Road at Grand Avenue, Park Ridge, NJ 07656, U.S.A. 1987. 509 p. pp. 453-455.

WAKIZAKA, Y. Alkali-silica reactivity of Japanese rocks. Engineering Geology 56 pp. 211 – 221 (2000).

WIGUM, B.J.. Alkali-aggregate reactions in concrete - Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks. Doktor Dissertation. University of Trondheim - Norwegian. December, 1995.

WIGUM, B.J.; FRENCH, W.J.; HOWARTH, R.J.; HILLS, C. Accelerated tests for assessing the potential exhibited by concrete aggregates for alkali-aggregate reaction. Cement and Concrete Composites 19 (1997) 451-476.

CAPÍTULO 8 – ANEXOS

8.1. ANEXO 1 – GRÁFICOS DE EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA

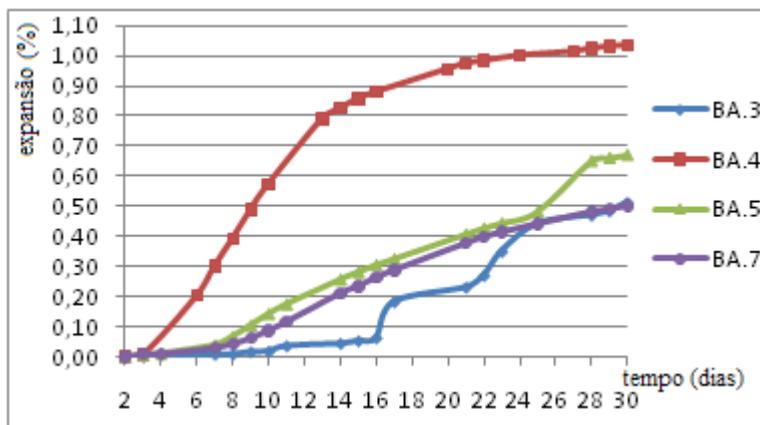


Figura 39 – Expansão em barras de argamassa por idade em basaltos

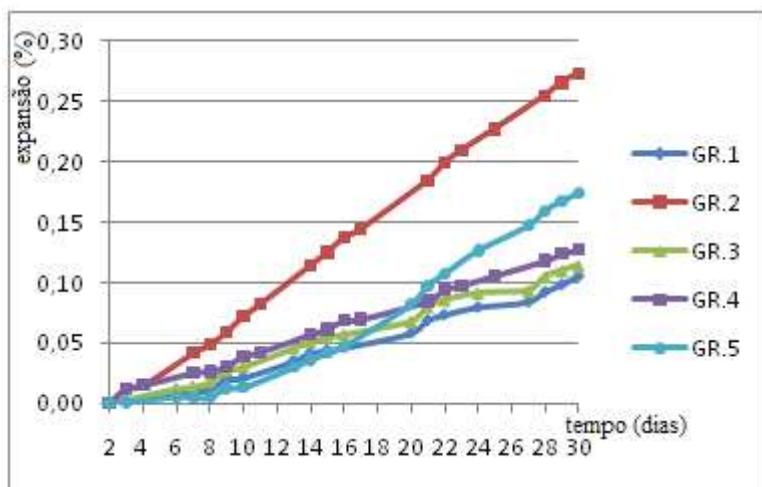


Figura 40 – Expansão em barras de argamassa por idade em granitos

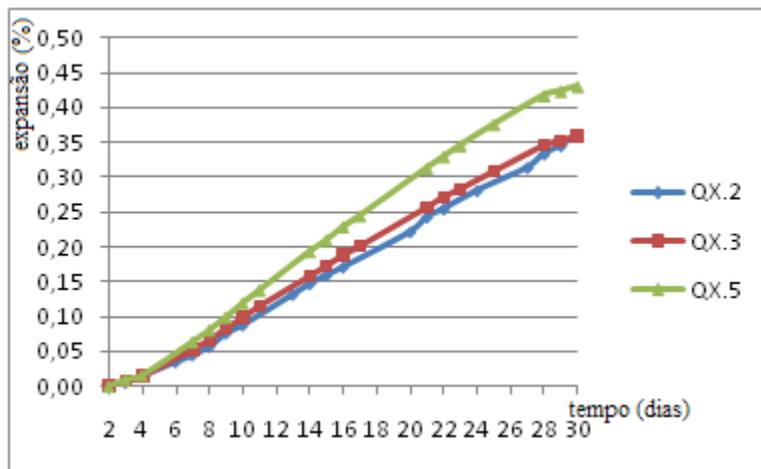


Figura 41 – Expansão em barras de argamassa por idade em micaxistos

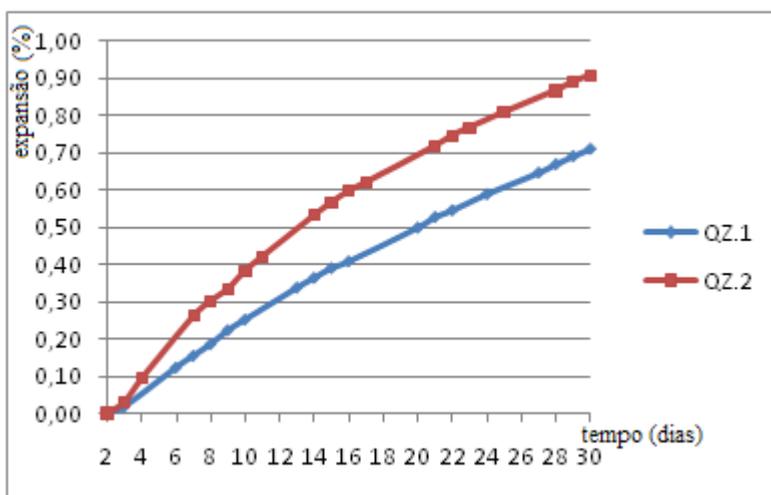


Figura 42 – Expansão em barras de argamassa por idade em quartzitos

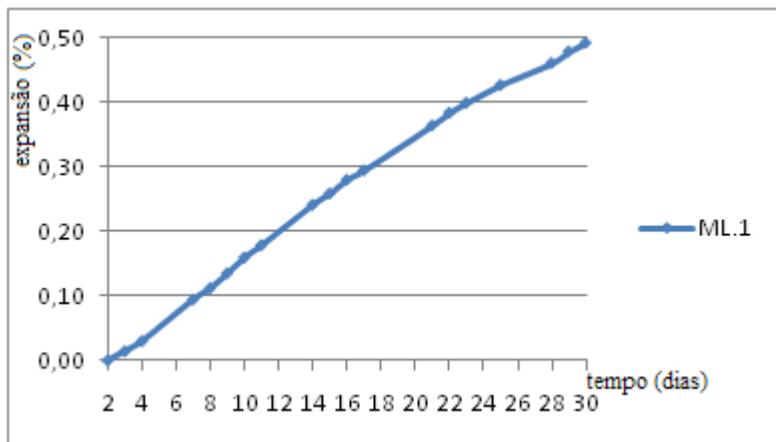


Figura 43 – Expansão em barras de argamassa por idade no milonito

Tabela 18 – Valores do método químico simples e variações (micaxistos)

método	QX.2		QX.3		QX.5	
	Ra (mmol/l)	Sd (mmol/l)	Ra (mmol/l)	Sd (mmol/l)	Ra (mmol/l)	Sd (mmol/l)
Simples	52,4	9,2	23,0	11,7	13,8	12,5
3 dias	-	-	42,3	27,4	26,6	73,6
7 dias	17,7	57,3	26,3	80,9	47,3	100,6
Ø 0,30mm	-	-	12,4	14,0	23,7	28,3
Ø 1,18mm	-	-	18,3	16,5	-	-
Lawrence	-	-	18,2	0,9	-	-

Tabela 19 – Valores do método químico simples e variações (quartzitos)

método	QZ.1		QZ.2	
	Ra (mmol/l)	Sd (mmol/l)	Ra (mmol/l)	Sd (mmol/l)
Simples	27,2	64,2	27,9	85,2
3 dias	106,5	217,1	88,7	425,9
7 dias	138,0	620,4	91,7	818,2
Ø 0,30mm	24,7	63,9	29,6	136,9

Tabela 20 – Valores do método químico simples e variações (milonito)

método	ML.1	
	Ra (mmol/l)	Sd (mmol/l)
Simples	34,4	18,8
3 dias	5,9	42,0
7 dias	74,9	77,6
Ø 0,30mm	13,8	31,3

8.3. ANEXO 3 – ANÁLISE QUÍMICA DO CIMENTO

Tabela 21 – Caracterização química do cimento

(Fonte: ABCP).

Ensaio	Métodos de ensaio	Resultados (%) em massa	Limites da NBR 5733/91
Perda ao fogo	NBR NM 18/04	2,86	≤ 4,5%
SiO ₂	NBR NM 11-2/04	19,58	***
Al ₂ O ₃	NBR NM 11-2/04	4,42	***
Fe ₂ O ₃	NBR NM 11-2/04	2,41	***
CaO	NBR NM 11-2/04	61,34	≤ 6,5%
MgO	NBR NM 11-2/04	1,78	≤ 4,5%
SO ₃	NBR NM 16/04	4,04	***
Na ₂ O (total)	NBR NM 17/04	0,21	***
K ₂ O (total)	NBR NM 17/04	1,01	***
Na ₂ O (solúvel)	ASTM C 114/06	0,25	***
K ₂ O (solúvel)	ASTM C 114/06	1,00	***
CO ₂	NBR NM 20/04	2,15	≤ 3,0%
Resíduo insolúvel	NBR NM 15/04	0,20	≤ 1,0%
Eq. Alcalino Na ₂ O (total) (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)		0,88	***
Eq. Alcalino Na ₂ O (solúvel) (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)		0,91	***

Tabela 22 – Caracterização físico-mecânica do cimento
(Fonte: ABCP).

Ensaio	Métodos de ensaio	Resultados (%) em massa	Limites da NBR 5733/91				
Finura - resíduo na peneira 75 um (%)	NBR 11579/91	0,20	≤ 6,0%				
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/01	3,09	***				
Área específica (cm ² /g)	NBR NM 76/98	4860	≥ 300 m ² /Kg				
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	30,20	***				
Início de pega (h:min)	NBR NM 65/03	0:10	≥ 1h				
Fim de pega (h:min)	NBR NM 65/03	0:18	≤ 10h				
Expansibilidade de Le Chatelier - a quente (mm)	NBR 11582/91	0,00	≤ 5 mm				
Expansibilidade em autoclave (%)	ASTM C 151/05	0,02	***				
Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215/96)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova n°				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 5733/91
	1	2	3	4			
1	26,4	27,9	26,3	26,2	26,7	4,5	≥ 14,0 MPa
3	38,6	39,3	36,6	38,8	38,3	4,4	≥ 24,0 MPa
7	42,7	40,8	43,5	43,2	42,6	4,2	≥ 34,0 MPa