

UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI
GISELE IVALDI MENEZES DE JESUS

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DA REAÇÃO
ÁLCALI-AGREGADO SEGUNDO
METODOLOGIA DE ENSAIOS LABORATORIAIS**

SÃO PAULO
2008

GISELE IVALDI MENEZES DE JESUS

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DA REAÇÃO
ÁLCALI-AGREGADO SEGUNDO
METODOLOGIA DE ENSAIOS LABORATORIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial
para a obtenção do título de Graduação
do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Anhembi Morumbi

Orientador: Prof. Dr. Wilson Shoji Iyomasa

SÃO PAULO
2008

GISELE IVALDI MENEZES DE JESUS

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DA REAÇÃO
ÁLCALI-AGREGADO SEGUNDO
METODOLOGIA DE ENSAIOS LABORATORIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial
para a obtenção do título de Graduação
do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Anhembi Morumbi

Trabalho _____ em: ____ de _____ de 2008.

Prof. Dr. Wilson Shoji Iyomasa

Prof. Thomas Carmona

Comentários:

“Tudo que sua mão achar para fazer, faze-o com o próprio poder que tens”

Eclesiastes 9:10

*“Todas as coisas que quereis que os homens vos façam,
vós também tendes de fazer do mesmo modo a eles”*

Mateus 7:12

(Regra de Ouro)

RESUMO

A reação álcali-agregado - RAA é um fenômeno deletério de origem química que ocorre entre os álcalis presentes no cimento Portland e alguns compostos reativos existentes nos agregados. Essa reação química conduz à formação de um gel expansivo que causa tensões internas na estrutura de concreto, o aparecimento de um padrão típico de fissuras e a perda da capacidade resistente da estrutura. Na conceituação teórica foram abordados os tipos de reações existentes, os principais sintomas que as estruturas afetadas apresentam, as medidas preventivas para se evitar a instauração do processo, os principais ensaios laboratoriais de uso corrente e os métodos de diagnósticos. Na parte prática foram avaliados os ensaios laboratoriais propostos na norma brasileira ABNT NBR 15577 parte 3 - Análise Petrográfica e ABNT NBR 15577 parte 4 - Ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa por meio da análise de dez amostras de agregados procurando-se avaliar sua reatividade frente à RAA.

Palavras Chave: Reação Álcali-Agregado (RAA), ABNT NBR 15577/2008, Agregado, Concreto.

ABSTRACT

The alkali aggregate reaction is deleterious phenom that occurs between the alkalis from Portland cement and some reactive materials present in the aggregates. This reaction produces an expansive gel that causes internal tension in the concrete structures, appearance of typical cracking pattern, and concrete resistance losses. The theoretical approach discuss the alkali aggregate reactions types, the main symptoms find in the structures affected, the procedures to avoid the reaction, the main reactive aggregate tests and the diagnoses methods. This monograph present the laboratorial tests from the Brazilian standards ABNT NBR 15577 - part 3 - Petrography analyses and ABNT NBR 15577- part 4 - Mortar bar expansion accelerate tests from ten different types of aggregate samples. This aggregates were analyzed and classified using the new parameters proposed by these standards.

Key Words: Alkali-Aggregate Reaction (AAR), ABNT NBR 15577/2008, Aggregate, Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1: Bloco de Fundação com padrão de fissuração típico de reação álcali-agregado (PECCHIO <i>apud</i> MUNHOZ, 2007).....	22
Figura 5.2: Fluxograma geral para uso do agregado em concreto (ABNT NBR 15577-1/2008).....	37
Figura 5.3: Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado.....	39
Figura 5.4: Microscópio Ótico e lâmina de Ensaio - FURNAS (1997).....	40
Figura 5.5: Procedimento de leitura da expansão da barra de argamassa (ABCP, 2008).....	45
Figura 6.1: Aspecto geral do quartzo (Q) mica (M) xisto, destacando sua granulação fina e estrutura fortemente orientada e dobrada. Microscópio óptico de luz transmitida. Aumento 50x (ABCP, 2007).....	53
Figura 6.2: Quartzo mica xisto fino, com carbonato de cálcio, ao microscópio óptico de luz transmitida. Estrutura orientada e a granulação fina. Aumento 50x (ABCP, 2007).....	54
Figura 6.3: Quartzo xisto fino, ao microscópio óptico de luz transmitida, exibindo forte orientação dos constituintes. Aumento 50x (ABCP, 2007).....	55
Figura 6.4: Quartzo xisto fino, ao microscópio óptico de luz transmitida, exibindo forte orientação dos constituintes. Aumento 50x (ABCP, 2007).....	56
Figura 6.5: Aspecto de detalhe da textura da rocha na qual se observam quartzo (Q), feldspato (F) e mica (M). Aumento 100x (ABCP, 2007).	57
Figura 6.6: Aspecto de detalhe da textura da rocha. Aumento 50x (ABCP, 2007)....	58
Figura 6.7: Granito gnáissico ao microscópio óptico de luz transmitida, onde se observam grãos de feldspato (F) e de quartzo (Q) com contornos tendendo a retilíneos. Aumento 50x (ABCP, 2007).....	59
Figura 6.8: Pedrisco ao microscópio óptico de luz transmitida, exibindo grãos de quartzo com extinção ondulante (Q), mica (M) e feldspato (F). Aumento 50x (ABCP, 2007).	60
Figura 6.9: Aspecto geral no qual se observa o bandamento formado pelas diferenças de granulometria dos cristais de calcita – Microscópio de Luz transmitida – Aumento 25x (ABCP, 2007).....	61

Figura 6.10: Aspecto de detalhe da textura da rocha na qual se observam cristais de feldspato (F) e mica (M) além de quartzo deformado com extinção ondulante (Q). Aumento 100x (ABCP, 2007).....	62
Figura 6.11: Expansão x Cura em solução alcalina	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Composição Química do Cimento Portland (PETRUCCI, 1993).....	12
Tabela 5.2: Notação Simplificada Utilizada na Química do Cimento.....	13
Tabela 5.3: Composição Química do Cimento Portland (Tartuce e Giovanetti,1990)	13
Tabela 5.4: Propriedades dos Compostos de Cimento (Tartuce e Giovanetti, 1990)	14
Tabela 5.5: Componentes Reativos dos Agregados (FURNAS, 1997)	18
Tabela 5.6: Estruturas Hidráulicas de Concreto no Brasil com Reação Álcali-Agregado (MUNHOZ, 2007).....	21
Tabela 5.7: Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado (ABNT NBR 15577/2008).....	43
Tabela 5.8: Granulometria requerida do material para ensaio (ABNT NBR 15577-4/2008).....	44
Tabela 5.9: Granulometria requerida do agregado graúdo	47
Tabela 6.1: Resumo das características dos agregados.....	52
Tabela 6.2: Características petrográficas da amostra 1 (ABCP, 2007)	53
Tabela 6.3: Características petrográficas da amostra 2 (ABCP, 2007)	54
Tabela 6.4: Características petrográficas da amostra 3 (ABCP, 2007).....	55
Tabela 6.5: Características petrográficas da amostra 4 (ABCP, 2007)	56
Tabela 6.6: Características petrográficas da amostra 5 (ABCP, 2007).....	57
Tabela 6.7: Características petrográficas da amostra 6 (ABCP, 2007)	58
Tabela 6.8: Características petrográficas da amostra 7 (ABCP, 2007).....	59
Tabela 6.9: Características petrográficas da amostra 8 (ABCP, 2007)	60
Tabela 6.10: Características petrográficas da amostra 9 (ABCP, 2007).....	61
Tabela 6.11: Características petrográficas da amostra 10 (ABCP, 2007).....	62
Tabela 6.12: Síntese dos resultados obtidos e classificação dos agregados.....	63
Tabela 6.13: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 1 (ABCP, 2007).....	64
Tabela 6.14: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 2 (ABCP, 2007).....	65
Tabela 6.15: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 3 (ABCP, 2007).....	66

Tabela 6.16: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 4 (ABCP, 2007).....	67
Tabela 6.17: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 5 (ABCP, 2007).....	68
Tabela 6.18: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 6 (ABCP, 2007).....	69
Tabela 6.19: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 7 (ABCP, 2007).....	70
Tabela 6.20: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 8 (ABCP, 2007).....	71
Tabela 6.21: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 9 (ABCP, 2007).....	72
Tabela 6.22: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 10 (ABCP, 2007).....	73
Tabela 6.23: Síntese dos resultados obtidos e classificação dos agregados.....	75
Tabela 7.1: Resumo dos resultados da análise petrográfica e da variação dimensional em barras de argamassa	76
Tabela 7.2: Variação dimensional em barras de argamassa: ASTM C1260 x ABNT NBR 15577.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira da ABNT
NM	Norma Mercosul
RAA	Reação Álcali-Agregado
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Alumina
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferro-aluminato tetracálcico
CaO	Óxido de cálcio
Fe_2O_3	Óxido de ferro
K_2O	Óxido de potássio
MgO	Óxido de magnésio
Na_2O	Óxido de sódio
SiO_2	Dióxido de silício
SO_4	Gesso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivo Específico	3
3. MÉTODO DE TRABALHO	4
4. JUSTIFICATIVA	5
5. CONCEITOS SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	7
5.1 Componentes do Concreto	7
5.1.1 Cimento	8
5.1.1.1 Matérias-Primas do Cimento Portland	9
5.1.1.1.1 Clínquer	9
5.1.1.1.2 Adições	10
5.1.1.2 Composição Química do Cimento Portland	12
5.1.2 Agregado	16
5.2 Reação Álcali-Agregado	20
5.2.1 Reação Álcali-Sílica	22
5.2.2 Reação Álcali-Silicato	24
5.2.3 Reação Álcali-Carbonato	25
5.2.4 Algumas Considerações sobre a Reação Álcali-Agregado	27
5.3 Principais Sintomas das Estruturas Afetadas	29
5.3.1 Aspectos de Pequena Escala	30
5.3.2 Aspectos de Grande Escala	30
5.4 Medidas Preventivas na Fabricação do Concreto	31
5.4.1 Pozolanas	32
5.4.2 Fly-Ash (Cinza Volante)	33

5.4.3	Cinza de Casca de Arroz.....	33
5.4.4	Escória de Alto Forno.....	33
5.4.5	Sílica Ativa.....	34
5.5	A Norma Técnica ABNT NBR 15577/2008.....	34
5.5.1	Análise de Risco da Possibilidade da Ocorrência da Reação Álcali-Agregado.....	35
5.5.2	Avaliação da Reatividade do Agregado.....	38
5.5.3	Análise Petrográfica – ABNT NBR 15577-3.....	39
5.5.3.1	Procedimento de Análise.....	41
5.5.3.2	Classificação do Agregado quanto a Reação Álcali-Agregado.....	42
5.5.4	Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado – ABNT NBR 15577-4.....	43
5.5.4.1	Classificação do Agregado quanto a Reação Álcali-Agregado.....	46
5.5.5	Prismas de concreto – ABNT NBR 15577-06.....	46
5.5.5.1	Classificação do Agregado quanto a Reação Álcali-Agregado.....	48
5.5.6	Interpretação dos Resultados.....	48
5.6	Métodos e Ações para Diagnóstico da RAA.....	49
6.	ESTUDO DE CASO.....	51
6.1	Materiais Utilizados.....	51
6.2	Análise Petrográfica.....	52
6.3	Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado.....	63
7.	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS.....	76
8.	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1. INTRODUÇÃO

Segundo Souza e Ripper (1998), o homem há tempos se preocupa com a construção de estruturas que se adaptem à suas necessidades. Porém, devido a inevitáveis falhas involuntárias e casos de imperícias, bem como de limitações científicas e tecnológicas, algumas estruturas acabam tendo seu desempenho comprometido ao longo do tempo.

Por desempenho, pode-se entender como o "*comportamento em serviço de cada produto, ao longo da vida útil*" (Souza e Ripper, 1998) e no caso do concreto, este deve ser durável, suportando as solicitações para as quais foi projetado de forma satisfatória.

Outro autor (Neville, 1997) cita que uma durabilidade inadequada se manifesta por uma deterioração que pode ser originada por fatores externos ou por fatores internos do próprio concreto, podendo ser esses fatores de causas físicas (mudanças bruscas de temperatura, altas temperaturas, diferenças de coeficientes de dilatação), químicas (ataques de cloretos, sulfatos, dióxidos de carbonos, reações álcali-agregado) ou mecânicas (impacto, abrasão, erosão, cavitação).

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação lenta, que ocorre entre os álcalis do cimento e alguns agregados reativos resultando um gel expansivo que, dispondo-se em vazios do concreto e na interface pasta-agregado, pode promover fissurações generalizadas, com conseqüente comprometimento da qualidade da estrutura. Tal reação ocorre quando o concreto é mantido em contato com a água, por exemplo, caixas d'água, barragens, canais revestidos entre outras obras civis.

Por ser uma reação lenta, a manifestação é observada, em alguns casos, após décadas de uso ou operação da estrutura. No Brasil, foram identificadas barragens de concreto com mais de 50 anos em operação que estão apresentando problemas

de fissuração em decorrência de reações álcali-agregado, como as barragens de Pedro Beicht e Rio das Pedras.

Outros barramentos, como a barragem de Sobradinho, apresentaram problemas de reações álcali-agregado logo após o início da operação.

Neste contexto, a presente pesquisa tecnológica procura contribuir na disseminação dos conhecimentos existentes, notadamente, nos ensaios laboratoriais para a identificação da potencialidade da ocorrência dessas reações conforme metodologias definidas na norma técnica ABNT NBR 15577/2008.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar, dentro do campo da durabilidade das estruturas de concreto, as reações álcali-agregado que podem comprometer a vida útil do concreto endurecido. Para avaliar a potencialidade dessas reações foram utilizados dois métodos para análise: a petrografia dos agregados e o ensaio de expansão em barras de argamassa.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar as reações álcali-agregado e as suas conseqüências na durabilidade de estruturas construídas em concreto.

2.2 Objetivo Específico

Como objetivo específico, o trabalho discute os ensaios laboratoriais, buscando-se estabelecer mecanismos para a avaliação preliminar da reação álcali-agregado. Adicionalmente, a pesquisa efetuada analisa as possíveis ocorrências de RAA com base em metodologias normatizadas, bem como fornece orientação de procedimento preventivo para avaliar a potencialidade do agregado quanto à RAA, contribuindo para o controle de qualidade das estruturas em concreto que estejam sob ações da umidade.

3. MÉTODO DE TRABALHO

A metodologia que foi utilizada na elaboração deste trabalho de conclusão de curso é, primeiramente, baseada na avaliação inicial das condições de exposição e da análise de risco das estruturas de concreto bem como do estudo, classificação e análise qualitativa dos resultados de ensaios laboratoriais executados.

Como conceituação teórica, procurou-se apresentar os principais componentes do cimento e as características mineralógicas dos agregados que causam as reações álcali-agregado conhecidas, considerando-se os sintomas das estruturas afetadas pela RAA, algumas medidas preventivas existentes durante a fabricação do cimento Portland e o acompanhamento da possibilidade de ocorrência da RAA segundo as diretrizes apresentadas pela norma ABNT NBR 15577/2008, envolvendo a realização da análise petrográfica dos agregados e ensaio de expansão acelerada em barras de argamassa para o estudo experimental.

Partindo-se da elaboração de argamassas com diferentes tipos de agregados descaracterizados regionalmente, procurou-se acompanhar e identificar a previsão do comportamento de fissuras devido à ocorrência da reação álcali-agregado nos agregados utilizados em várias obras do Brasil que atualmente vêm apresentando tal reação.

O método foi utilizado para avaliar a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, através da monitorização das expansões dimensionais de barras de argamassa. Essa aceleração na reação permitiu verificar a potencialidade reativa do agregado, levando-se em consideração as condições de maior agressividade nas amostras tornando-se possível observar e identificar, num reduzido espaço de tempo, a ocorrência de anomalias que num ambiente natural demandaria décadas para se verificar.

4. JUSTIFICATIVA

As estruturas de concreto, em geral, as construções de grande porte, como as barragens, são objetos de estudos que visam principalmente, as questões de segurança e durabilidade. A vida útil de qualquer empreendimento está intimamente ligada aos estudos tecnológicos nas fases de viabilidade, projeto básico e no acompanhamento da construção.

Identificada na década de 1940 nos Estados Unidos, a reação álcali-agregado foi alvo de muitas pesquisas nos anos 40 e 50, quando foram estabelecidos métodos de ensaios para a identificação dos agregados reativos. Registros históricos apontam que foi Stanton, em 1940, o autor dos estudos que demonstraram que a expansão e as fissurações observadas nos pavimentos de concreto estavam relacionadas à reação química entre alguns minerais constituintes dos agregados. A partir da década de 1970, foram identificados dezenas de casos de reação álcali-agregado em barragens em todos os continentes (MUNHOZ, 2007).

No Brasil, o primeiro caso de reação álcali-agregado em barragem, também, foi constatado, durante os anos 70 e a partir de então uma série de outras barragens que já possuía mais de duas dezenas de anos de idade, apresentaram o mesmo problema e continuam sendo assunto para discussões técnicas.

Em virtude dos danos causados às barragens de concreto que ficam expostas à umidade, tornam-se imprescindíveis estudos e pesquisas detalhadas buscando-se o entendimento dos mecanismos dessa reação deletéria e os fatores que a influenciam, bem como soluções seguras e viáveis de caráter preventivo em futuras edificações e uma ação corretiva de recuperação para as antigas estruturas que apresentam os seus sintomas.

Em resumo, a pesquisa visa à realização de uma verificação de risco da possibilidade da ocorrência da reação álcali-agregado identificadas inicialmente por

meio de ensaios laboratoriais de determinação da expansão de argamassas pelo método acelerado.

5. CONCEITOS SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Há certos tipos de reações químicas no concreto endurecido que envolvem a formação de produtos expansivos, que podem levar a certos efeitos deletérios na estrutura. Esses efeitos podem ser na forma de juntas de expansão, deformações e deslocamentos em diferentes partes da estrutura, fissuração, lascamentos e pipocamentos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A reação álcali-agregado (RAA) encontra-se nesse grupo de reações expansivas e se caracteriza, de forma bem simplificada, como a combinação química entre alguns compostos existente no cimento e agregados que conduz a formação de um gel expansivo, que causa tensões internas na estrutura de concreto e assim, o aparecimento de fissuras e a perda da capacidade resistente da estrutura.

O conhecimento dessa patologia não é tão atual assim, pois Biczok, Mehta e Tuthill *apud* FURNAS (1997) mencionam que os primeiros registros remontam a “... *data de 1940, quando Stanton deduziu que a reação entre determinados componentes do agregado e os hidróxidos alcalinos no cimento, liberados na hidratação, era a causa primária de fissuras e expansões em algumas estruturas de concreto na Califórnia.*”

5.1 Componentes do Concreto

O concreto é um material de construção civil largamente utilizado porém, se trata de uma mistura complexa. Assim, certas características e patologias do concreto se tornam de difícil compreensão se não estudarmos seus materiais constituintes.

No caso da reação álcali-agregado, vamos estudar os materiais que compõe o concreto convencional e verificar suas inter-relações com o aparecimento e desenvolvimento dessa patologia.

5.1.1 Cimento

A palavra cimento é originada do latim *caementu*, que na antiga Roma designava uma espécie de pedra natural de rochedos não esquadrejada (quebrada). O produto é o componente básico do concreto, que é hoje o segundo material mais utilizado pelo homem, ficando somente atrás do elemento água. A história da sua evolução começa antes do século XVIII, mas se concretiza em meados de 1780, quando cientistas e pesquisadores europeus se empenharam em descobrir a fórmula perfeita para se obter o ainda pouco desenvolvido cimento hidráulico. A necessidade de se encontrar ligantes que pudessem servir de matéria-prima para argamassas de revestimento externo fez com que, no período entre 1780 e 1829, o cimento obtivesse algumas fórmulas e denominações diferentes como, “cimento romano” e “cimento britânico”. Foi em meados de 1830 que o inglês Joseph Aspdin patenteou o processo de fabricação de um ligante que resultava da mistura, calcinada em proporções certas e definidas, de calcário e argila, conhecido mundialmente até hoje. O resultado foi um pó que, por apresentar cor e características semelhantes a uma pedra abundante na Ilha de Portland, foi denominado “cimento portland”. A partir daí, seu uso e sua comercialização cresceram de forma gradativa em todo o mundo (SNIC, sem data).

O Cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o Cimento Portland não se decompõe mais.

O Cimento Portland, misturado com água e outros materiais de construção, tais como a areia, a pedra britada, o pó-de-pedra, a cal e outros, resulta nos concretos e nas argamassas usadas na construção de casas, edifícios, pontes, barragens, etc (ABCP, 2003).

As características e propriedades desses concretos e argamassas vão depender da qualidade e proporções dos materiais com que são compostos. Dentre eles, entretanto, o cimento é o mais ativo, do ponto de vista químico. Pode-se dizer que o

cimento é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado.

5.1.1.1 Matérias-Primas do Cimento Portland

O Cimento Portland é composto de *clínquer* e de *adições*. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de Cimento Portland. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

5.1.1.1.1 Clínquer

O clínquer tem como matérias-primas o *calcário* e a *argila*, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado *clínquer*, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó (ABCP, 2003).

O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante.

5.1.1.1.2 Adições

As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de Cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas outras matérias-primas são o *gesso*, as *escórias de alto-forno*, os *materiais pozolânicos* e os *materiais carbonáticos* (ABCP, 2003).

O *gesso* tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o *gesso* à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o *gesso* é uma adição presente em todos os tipos de Cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% de *gesso* para 97% de clínquer, em massa.

As *escórias de alto-forno* são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Antigamente, as *escórias de alto-forno* eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas também tinham a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, que reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Essa descoberta tornou possível adicionar a *escória de alto-forno* à moagem do clínquer com *gesso*, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final (ABCP, 2003).

Os *materiais pozolânicos* são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Da mesma forma que no caso da *escória de alto-forno*,

pesquisas levaram à descoberta de que os materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico, se bem que de forma distinta. Isto porque não basta colocar os materiais pozolânicos, sob forma de pó muito fino, em presença de água, para que passem a desenvolver as reações químicas que os tornam primeiramente pastosos e depois endurecidos. A reação só vai acontecer se, além da água, os materiais pozolânicos moídos em grãos finíssimos também forem colocados em presença de mais um outro material. O clínquer é justamente um desses materiais, pois no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal) que reage com a pozolana. Esse é o motivo pelo qual a adição de materiais pozolânicos ao clínquer moído com gesso é perfeitamente viável, até um determinado limite. E, em alguns casos, é até recomendável, pois o tipo de cimento assim obtido ainda oferece a vantagem de conferir maior impermeabilidade, por exemplo, aos concretos e às argamassas.

Outros materiais pozolânicos têm sido estudados, tais como as cinzas resultantes da queima de cascas de arroz e a sílica ativa, um pó finíssimo que sai das chaminés das fundições de ferro-silício e que, embora em caráter regional, já têm seu uso consagrado no Brasil, a exemplo de outros países tecnologicamente mais avançados (ABCP, 2003).

Os *materiais carbonáticos* são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tais como o próprio calcário. Tal adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro *lubrificante*. Quando presentes no cimento são conhecidos como *fíler calcário*.

De todas as adições, o gesso não pode, em hipótese alguma, deixar de ser misturado ao cimento, e as demais matérias-primas adicionadas (escória de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) são totalmente compatíveis

com o principal componente do Cimento Portland, o clínquer, acabando por conferir ao cimento uma qualidade a mais (ABCP, 2003).

5.1.1.2 Composição Química do Cimento Portland

Nesse trabalho, foi abordado apenas os parâmetros do Cimento Portland, necessários à compreensão do processo da reação álcali-agregado. Na Tabela 5.1, são apresentados os principais óxidos e seus respectivos valores médios presentes nos cimentos nacionais, segundo dados de Petrucci (1993) e na Tabela 5.2 a notação particular e simplificada para a química do cimento.

Tabela 5.1: Composição Química do Cimento Portland (PETRUCCI, 1993)

Determinação Química	Variação em peso (%)	Função ou Interpretação
CaO (cal)	61 a 68	Provém da decomposição do carbonato de cálcio e, quando combinada, quanto maior seu teor, maior as propriedades mecânicas do cimento.
SiO ₂ (sílica)	20 a 23	A sílica se encontra combinada com outros componente e provém, sobretudo, da argila usada como matéria-prima. É da sua combinação com a cal que resulta os compostos mais importantes do cimentos.
Al ₂ O ₃ (alumina)	4,5 a 7	A alumina também provém da argila e, quando combinada com a cal, acelera a pega do aglomerante e reduz sua resistência a sulfatos, razão pela qual sua quantidade deve ser pequena. Sua existência é importante também pois age como fundente nas reações de formação do cimento.
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	2 a 3,5	Também provém da argila, sua principal função é agir como fundente, tendo uma função mais enérgica que a alumina.
SO ₄ (gesso)	1 a 2,3	Tem sua origem no sulfato de cálcio adicionado ao cimento correspondente para regularizar sua pega, retardando-a. Sua quantidade é especialmente controlada, pois em níveis muito elevados, pode ocorrer a formação de sulfu-aluminato, que não é benéfico.
CaO livre	0 a 2	A presença de cal livre em estado anidro, acima do limite prejudica a estabilidade volumétrica de argamassas e concretos.

Tabela 5.1 Composição Química do Cimento Portland (Petrucci, 1993) - Continuação

Determinação Química	Variação em peso (%)	Função ou Interpretação
MgO livre	0,8 a 6	A magnésia provém do carbonato de magnésio presente no calcário e admite-se que não se encontre combinado. Em quantidades superiores, este óxido atua como expansivo, agindo de forma nociva à estabilidade volumétrica de argamassas e concretos.
K ₂ O + Na ₂ O (álcalis)	0,3 a 1,5	Os álcalis atuam como fundentes na fabricação do cimento e como aceleradores de pega na hidratação. A certos tipos de agregados de composição determinada, atribui-se a propriedade de provocar expansões anormais nas argamassas e concretos, quando sua quantidade excede a 0,6% (em Na ₂ O equivalente).

Tabela 5.2: Notação Simplificada Utilizada na Química do Cimento

Fórmula	Notação Simplificada
CaO	C
SiO ₂	S
Fe ₂ O ₃	F
Al ₂ O ₃	A

Na Tabela 5.3 são apresentados os compostos químicos finais do Cimento Portland nacionais, segundo o método de Bogue, com dados de Tartuce e Giovanetti (1990).

Tabela 5.3: Composição Química do Cimento Portland (Tartuce e Giovanetti, 1990)

Composto Químico	Fórmula Química	Notação	Peso (%)
Silicato Tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	42 a 60
Silicato Dicálcico	2CaO	C ₂ S	14 a 35
Aluminato Tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	6 a 13
Ferro-aluminato Tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5 a 10

A seguir é apresentada a Tabela 5.4, divulgada por Tartuce e Giovanetti (1990), com as principais propriedades dos compostos finais do Cimento Portland.

Tabela 5.4: Propriedades dos Compostos de Cimento (Tartuce e Giovanetti, 1990)

Propriedades	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Resistência à compressão nas primeiras idades	Boa	Fraca	Boa	Fraca
Idades posteriores	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Velocidade de reação com a água (hidratação)	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Quantidade de calor gerado na hidratação	Média	Pequena	Grande	Média
Resistência às águas agressivas	Média	Boa	Fraca	Fraca

Rodrigues (1994) complementa as principais características dos compostos finais do Cimento Portland, conforme segue:

- **Silicato Tricálcico (C₃S)**

O C₃S é responsável pelo início da reação de hidratação em poucas horas, desenvolvendo assim elevadas resistências iniciais. Libera média quantidade de calor de hidratação e grande quantidade de cal hidratada, o que implica em elevada alcalinidade, favorecendo a proteção das armaduras contra corrosão, devido à formação de camada passivadora na superfície (pH entre 9 e 12).

Em contrapartida, essa cal liberada pode ser carregada para a superfície da peça, formando manchas esbranquiçadas, devido à reação de carbonatação.

- **Silicato Dicálcico (C₂S)**

O C₂S, diferentemente do C₃S, inicia a reação de hidratação lentamente, após semanas, desenvolvendo assim elevadas resistências a longo prazo, chegando inclusive a suplantá-las aquelas verificadas para o C₃S. Ele libera pouco calor de hidratação e pouca quantidade de cal hidratada, o que ocasiona pouca proteção das armaduras contra corrosão, mas um concreto mais impermeável, menos sujeito à ação agressiva das águas.

- **Aluminato Tricálcico (C₃A)**

O C₃A inicia imediatamente a reação de hidratação, por isso a necessidade de adição de gesso, que inibe o endurecimento imediato desse composto. Ele desenvolve pequena resistência mecânica, libera grandes quantidades de calor de hidratação, não sendo recomendado então para a confecção de concreto-massa. Não libera cal na hidratação e é muito reativo com sulfatos, produzindo-se compostos expansivos que podem destruir o concreto (etringita ou sal de Candiot).

- **Ferro-Aluminato Tetracálcico (C₄AF)**

O C₄AF inicia rapidamente a reação de hidratação, porém desenvolve pequena resistência mecânica. Libera pouco calor de hidratação e produz ótima resistência ao ataque de águas agressivas e sulfatos (RODRIGUES, 1994).

- **Álcalis**

Do ponto de vista químico, os álcalis são os compostos formados pelos elementos que ocupam a primeira coluna da Tabela periódica. Desses elementos, entre os

quais se encontram o sódio, o potássio, o rubídio e o lítio, apenas o sódio e o potássio estão presentes no cimento em quantidade significativa.

Segundo Neville (1997), além dos principais elementos produzidos na formação do cimento, há outros compostos secundários que, dentre eles, dois apresentam particular interesse: os óxidos de potássio e de sódio, K_2O e Na_2O , respectivamente.

Os álcalis, como são denominados, reagem com alguns agregados, de modo que os produtos dessa reação provocam a desintegração do concreto, e também se constatou que eles influenciam a velocidade de aumento de resistência.

Neville menciona ainda que “... a expressão ‘compostos secundários’ se refere basicamente ao seu teor e não necessariamente à sua importância”.

Mehta e Monteiro (1994) descrevem que os álcalis são, principalmente provenientes dos compostos da argila presente na mistura de matérias-primas ou no carvão. Sua quantidade total expressa em Na_2O equivalente ($Na_2O + 0,64 K_2O$) pode variar de 0,3 a 1,5%.

5.1.2 Agregado

Ao longo dos tempos, os agregados naturais foram largamente utilizados como inertes na confecção de concretos pois são materiais que não entram em reações complexas com a água, bem como podem ser adquiridos com custos relativamente mais baratos. Porém, estudos mostraram que essa visão de “inertes” já foi questionada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Frazão e Paraguassu *apud* Frazão (2002), as principais características dos agregados para que eles exerçam suas funções no concreto são:

- Distribuição granulométrica tal, que permita uma boa compactação do concreto, pela obtenção de uma massa com o menor índice de vazios possível, propiciando economia de cimento e água, sem prejudicar uma eficiente ligação entre as partículas;
- Forma das partículas mais equidimensional possível, para permitir boa trabalhabilidade, boa compactação e alta resistência do concreto a esforços solicitantes;
- Adequada resistência mecânica, para suportar as solicitações físicas durante a preparação do concreto e aos esforços solicitantes sobre o concreto endurecido, quando aplicado na obra;
- Adequada composição mineralógica, para satisfazer as condições químicas reinantes durante a cura do concreto e suportar as ações químicas externas;
- Ausência de impurezas que possam empobrecer a qualidade do concreto e interferir no seu desempenho posterior e;
- Propriedades térmicas dentro dos limites que não afetem o concreto durante seu endurecimento e não lhe causem anisotropias físicas nefastas.

A maioria dos agregados utilizados na confecção de concreto são provenientes de rochas naturais. Assim, conhecer as características básicas dos principais minerais¹

1 – Sob o ponto de vista geológico, um mineral é um sólido, homogêneo, natural, com uma composição química definida (mas geralmente não fixa) e um arranjo atômico altamente ordenado. É geralmente formado por processos inorgânicos (Leinz, 1989; Santos, 2005). No Brasil, sob o ponto de vista legal, são considerados minerais, as substâncias naturais, incluindo sólidos amorfos e cristalinos, líquidos e gases, originadas por processos inorgânicos ou orgânicos (DNPM, 1945; DNPM, 1967; Santos, 2005).

de formação dessas rochas² se torna imprescindível para se conhecer melhor a patologia da reação álcali-agregado.

Alguns agregados possuem minerais caracterizados como reativos. Dentre os principais, podemos destacar, segundo Frazão (2002), os minerais do grupo da sílica, como por exemplo, opala, calcedônia, cristobalita e tridimita; os do grupo dos silicatos, tais como os filossilicatos dos tipos vermiculita, illita, esmectita, etc.; e os do grupo dos carbonatos, tendo como principal mineral a dolomita.

Os álcalis do concreto podem provir de diversas fontes, como do cimento, do agregado, da água de amassamento e de aditivos. Os provenientes do agregado resultam da degradação de minerais, como micas e feldspato potássicos (FRAZÃO, 2002).

A literatura (FURNAS, 1997) apresenta a Tabela 5.5, a qual descreve os principais componentes reativos dos agregados.

Tabela 5.5: Componentes Reativos dos Agregados (FURNAS, 1997)

Tipo de Agregado	Fase Mineralógica Reativa	Natureza da Reação
GRUPO I – Rochas Metamórficas		
Granito Gnaisse Quartzito Xisto	Maior que 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$	Reação Álcali-Silicato
Filitos Hornfels Argilitos	Maior que 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$: quartzo microcristalino a criptocristalino	Reação Álcali-Silicato

2 - Rocha é todo corpo sólido constituído por um ou mais tipos de minerais, denominadas rochas monominerálicas ou poliminerálicas (Frazão, 2002).

Tabela 5.5: Componentes Reativos dos Agregados (FURNAS, 1997) - Continuação

GRUPO II – Rochas Sedimentares		
Arenito	Maior que 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$	Reação Álcali-Silicato
	Opala, calcedônia	Reação Álcali-Sílica
Gravaúca	Maior que 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$: quartzo microcristalino a criptocristalino	Reação Álcali-Silicato
Chert	Calcedônia, opala, quartzo criptocristalino e microcristalino	Reação Álcali-Sílica
Calcário	Calcita/dolomita, próxima a 1 e associado a argilominerais	Reação Álcali-Carbonato
	Opala, calcedônia	Reação Álcali-Sílica
GRUPO III – Rochas Magmáticas		
Granito Granodiorito	Maior que 30% de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$	Reação Álcali-Silicato
Basalto	Minerais de alteração: palagonita, opala, calcedônia, vidro vulcânico básico	Reação Álcali-Sílica
Pedras Pomes Riolito Andesito Dacito Latitos Perlitos Tufos vulcânicos Fonolitos	Vidros vulcânicos ácidos a intermediários e tridomita	Reação Álcali-Sílica
GRUPO IV – Minerais e Outros		
Areia	Opala (>0,25%), calcedônia (>3%)	Reação Álcali-Sílica
	Eventualmente quartzo deformado	Reação Álcali-Silicato

5.2 Reação Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado é um nome genérico dessa patologia que ocorre entre os álcalis do cimento e certos minerais presentes em alguns agregados. Baseado na composição mineralógica reativa desses agregados, esta reação classifica-se em reação álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato (FURNAS, 1997).

Kihara e Scandiuzzi mencionam que os primeiros trabalhos sobre RAA no Brasil são da década de 60, com a construção da Barragem de Jupιά, cujo cascalho do Rio Paraná tinha a fase reativa calcedônia. Para viabilizar a utilização desse agregado, construiu-se no canteiro de obras de Jupιά uma fábrica de pozolana a partir da argila caulínica disponível na região, que após calcinação era adicionada ao cimento Portland no teor de 35% (MUNHOZ, 2007).

Em 1985, foi divulgado o primeiro caso em barragem: Usina Hidroelétrica Apolônio Sales de Oliveira (Moxotó). Em 1988 foi confirmada a presença de reação na Barragem de Joanes II (BA). Na década de 90 constatou-se a ocorrência de RAA em várias barragens. Em todos os casos investigados a reação era do tipo álcali-silicato.

Kihara, Sbrighi Neto e Kuperman sintetizaram as principais estruturas hidráulicas com evidências de reação álcali-agregado no mundo. A Tabela 5.6 apresenta as estruturas com reação álcali-agregado no Brasil, complementada com informações de outros trabalhos (MUNHOZ, 2007).

Tabela 5.6: Estruturas Hidráulicas de Concreto no Brasil com Reação Álcali-Agregado (MUNHOZ, 2007)

Nome da estrutura	Tipo de estrutura	Fim da construção	RAA notada no ano	Tipo de agregado
Billings-Pedras	Barragem	1963	1992	Granito ¹
Furnas	Barragem	1963	1976	Quartzito ¹
Ilha dos Pombos	Barragem	1924	1991	Gnaisse ¹
Jaguara	Barragem	1971	1996	Quartzito ¹ Granito ²
Joanes II	Barragem	1971	1988	Gnaisse ¹
Jurupará	Barragem	1937	-	Gnaisse ¹ Biotita granito ²
Mascarenhas de Moraes	Barragem	1957	-	Granito-gnaisse ¹
Moxotó	Casa de Força	1974	1980	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso I	Barragem	1955	1978	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso II	Barragem	1962	1978	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso III	Barragem	1973	1978	Granito-gnaisse ¹
Paulo Afonso IV	Barragem	1979	1985	Granito-gnaisse ¹
Pedro-Beicht	Barragem	1932	1991	Granito-gnaisse ¹
Peti	Barragem	1945	1964	Gnaisse ¹
Porto Colômbia	Vertedouro e Casa de Força	1973	1985	Cascalho e basalto ³
Sá Carvalho	Barragem	1951	-	Gnaisse ¹
Tapacurá	Barragem	1975	1990	-
Traição	Usina Elevatória	1940	1980	Milonito ¹
Túnel 6	Tomada d'água	1974	1989	Granito-gnaisse ¹
1. Andriolo (2000) 2. Alves et al. (1997) 3. Veiga Gonçalves e Hasparyk (1997).				

No Brasil, a reação álcali-agregado estava restrita às obras hidráulicas. Em 2005, constatou-se a ocorrência em blocos de fundações em edifícios urbanos, principalmente residenciais, em Recife/PE, numa escala inédita para o meio técnico

de todo o mundo. Baixa profundidade do lençol freático, presença de fases reativas nos agregados (quartzo com extinção ondulante e quartzo microgranular) e disponibilidade de álcalis contribuíram para a ocorrência da reação. A Figura 5.1 ilustra o quadro fissuratório dos blocos de fundação (PECCHIO *apud* MUNHOZ, 2007).



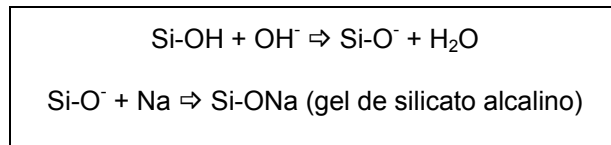
Figura 5.1: Bloco de Fundação com padrão de fissuração típico de reação álcali-agregado (PECCHIO *apud* MUNHOZ, 2007)

5.2.1 Reação Álcali-Sílica

A reação álcali-sílica é entendida como a reação química que envolve íons alcalinos e hidroxilas, originários na hidratação do cimento e o agregado, cuja fase mineralógica contenha sílica na forma amorfa, tais como opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais.

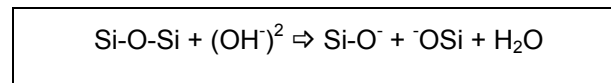
De acordo com Glasser e Kataoka *apud* FURNAS (1997), quando a sílica amorfa está presente em meio alcalino, ocorrem as seguintes reações:

- Inicialmente os íons hidroxilas (OH^-), dissociados na solução alcalina, atacam as ligações do grupo silanol (Si-OH), neutralizando-as. Concomitantemente, ocorre a associação do íon sódio (Na^+) à estrutura, formando o gel de silicato alcalino, conforme equação (1) apresentada por Glasser e Kataoka *apud* FURNAS, 1997.



Eq. (1)

- As ligações do grupo silanol são atacadas pelos íons hidroxilas (OH^-), que provocam a ruptura delas e propiciam a absorção de água e íon sódio (Na^+), ficando a solução H_2SiO_4 (ácido ortossilícico), conforme equação (2) apresentada por Glasser e Kataoka *apud* FURNAS, 1997.



Eq. (2)

Segundo Fava e Hobbs *apud* FURNAS (1997), uma das teorias mais aceitas para explicar o mecanismo de reação é a da pressão osmótica. Durante a fabricação do concreto, uma parte dos componentes alcalinos presentes no cimento se dissolve na água de amassamento. Posteriormente, no interior do concreto a concentração da solução aumenta com o progresso da hidratação do cimento, tornando a solução fortemente básica, a qual ataca as partículas suscetíveis do agregado reativo; produzindo uma substância viscosa denominada gel. Este, por ser higroscópico, atrai as moléculas aquosas, as quais migram através da pasta de cimento.

A pasta de cimento funciona como uma membrana osmótica, permitindo a migração das moléculas aquosas para o gel, mas não deste para a solução. Assim, o gel vai “inchando”. Envolto pela pasta de cimento, e sem poder migrar através dela, começa, então a exercer pressões hidráulicas, cuja intensidade poderá exceder a resistência de ruptura à tração da pasta e do concreto, tendo como consequência, fissuras internas e externas no concreto.

Biczok *apud* FURNAS (1997) explica que o gel formado pode ser ou não expansivo, dependendo da concentração de cal ou de álcalis. Desta forma, quando a concentração de cálcio sobrepõe à dos álcalis, ocorre a predominância do cálcio na migração através da membrana, para dar continuidade à formação do gel não expansivo de cal-álcali-sílica formado na fase inicial de reação, que não produz efeito prejudicial ao concreto. Por outro lado, quando a concentração de álcalis é maior, há um domínio destes íons sobre a reação, formando gel de álcali-sílica expansivo.

5.2.2 Reação Álcali-Silicato

Yoshiro *apud* FURNAS (1997) explica que esta é uma reação entre os álcalis do cimento e os silicatos existentes nos feldspatos, folhelhos argilosos e certas rochas sedimentares (argilitos, siltitos e gravaúcas), metamórficas (ardósias, filitos, quartzitos, xistos) e magmáticas (granitos).

Além dos minerais supracitados, considera-se que o quartzo, embora seja um dos minerais termodinamicamente mais estáveis, pode ser potencialmente reativo quando apresenta o retículo cristalino deformado, principalmente por tensões de origem geológicas. A deformação do quartzo reflete-se sob a forma de extinção ondulante dos cristais³ em lâmina delgada, quando analisados no microscópio de luz polarizada. A quantificação do grau de deformação tem sido utilizada como forma de avaliação da potencialidade reativa do quartzo com os álcalis presentes no concreto.

De acordo com Shayan *apud* FURNAS (1997), a presença de quartzo criptocristalino e microcristalino em rochas contendo quartzo deformado pode ser fator mais importante para a reatividade do que o quartzo deformado em si. Segundo Dolar-Mantuani *apud* FURNAS (1997), as rochas contendo não apenas quartzo

3 - Cristal é o termo usado para designar um mineral que apresente formas geométricas regulares. A rigor, o termo se aplica a todo sólido homogêneo que apresente arranjo interno tridimensionalmente ordenado, apresentando ou não forma externa regular (Frazão, 2002).

criptocristalino, mas aquelas com grãos médios e grandes de quartzo, são vulneráveis ao ataque químico de soluções alcalinas, podendo produzir gel expansivo.

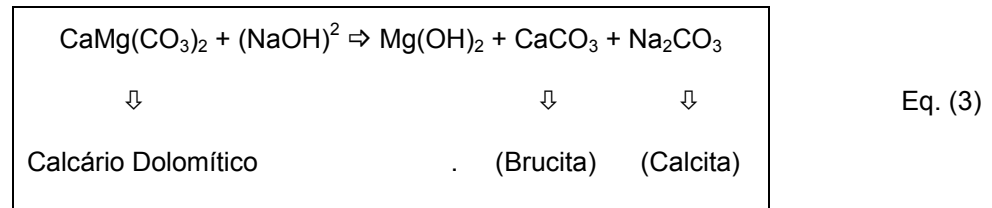
Os aspectos que tornam a rocha deformada suscetível às reações álcali-silicato, de acordo com os autores supracitados são: a presença de quartzo intensamente deformado (maior suscetibilidade ao ataque dos hidróxidos alcalinos devido ao deslocamento e imperfeições dos cristais), quartzo microcristalino (o qual possui maior superfície específica para a reação) e cristais de silicatos deformados (os quais podem estar propensos ao ataque alcalino).

Este tipo de reação é semelhante à reação álcali-silica, porém mais lenta, pois os minerais reativos estão mais disseminados no retículo cristalino. As informações fornecidas pelo “Bulletin79” – ICOLD *apud* FURNAS (1997), indicam que a reação com os silicatos se manifesta por uma zona sombria no contato do agregado com a pasta de cimento e por depósito branco sobre o agregado, nos planos de clivagem. A zona sombria é formada por um gel expansivo de silicato alcalino que, dependendo do excesso de álcalis ou hidróxido de cálcio, poderá ser mais ou menos expansivo.

5.2.3 Reação Álcali-Carbonato

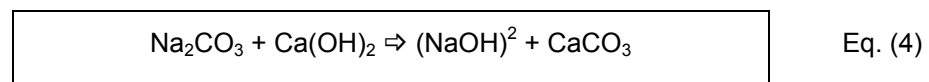
A reação álcali-carbonato ocorre entre os álcalis do cimento e o calcário dolomítico, havendo formação de brucita - $Mg(OH)_2$ através do processo de desdolomitização e regeneração de hidróxidos alcalinos, não havendo formação de gel expansivo como na reação álcali-silica, conforme equações (3) e (4) apresentadas por FURNAS (1997).

- Desdolomitização



- Regeneração de Hidróxido alcalino

O hidróxido de cálcio presente no concreto reagirá com o CO_3 produzido durante a desdolomitização, para formar calcita e regenerar íons hidroxilas, o que manterá o valor de pH elevado. Contudo, os álcalis não se incorporaram nos produtos formados, mas atuam como catalisadores da reação entre a portlandita e íons carbonatos. Como a solução nos poros do concreto é saturada de portlandita, deduz que a reação de desdolomitização ocorrerá até que se esgote a dolomita presente no agregado.



A intensidade de reação está intimamente relacionada à proporção de calcita e dolomita. Segundo Paulon *apud* FURNAS (1997), a reação ocorre com a máxima intensidade quando a calcita e dolomita estão presentes em quantidades equivalentes ou ambas estão finamente divididas.

De acordo com Deng e Tang *apud* FURNAS (1997), os produtos formados, calcita e brucita, são partículas finas, que ocupam um maior volume que aquele ocupado pela dolomita. Em face de a dolomita estar contida pela pasta de cimento ou matriz, os produtos formados no local encontram-se confinados, de maneira que o crescimento dos cristais eleva a pressão de cristalização, devido a redução da entalpia livre (energia de Gibbs) da reação. Como consequência, ocorre a expansão.

Os mecanismos que provocam a expansão ainda não são bem conhecidos, pois FURNAS (1997) menciona que há estudos que defendem a teoria que a expansão causada pela reação álcali-carbonato é devida a absorção de íons hidroxilas pelos argilominerais resultantes da reação de desdolitização.

No presente trabalho, a reação álcali-carbonato não será tratada em maiores detalhes por não ser escopo da norma ABNT NBR 15577/2008. O termo reação álcali-agregado (RAA) quando mencionado no texto refere-se às reações álcali-sílica e álcali-silicato indistintamente.

5.2.4 Algumas Considerações sobre a Reação Álcali-Agregado

Kuperman (2005) menciona que a reação álcali-sílica, é a que se desenvolve mais rapidamente e que possui mais casos no mundo. Porém, explica ainda que no Brasil, o tipo de reação mais encontrado é do tipo álcali-silicato que, atualmente está sendo englobado no mesmo grupo da reação álcali-sílica.

Ainda de acordo com Kuperman (2005), há um consenso geral de que três condições devem estar presentes para que ocorra este tipo de reação e que esta seja prejudicial ao concreto:

- **Sílica reativa, originária dos agregados**

Para que ocorra a reação álcali-sílica, é necessário que o agregado usado no concreto seja reativo. Além do grau de cristalização da sílica, a quantidade de energia estocada na estrutura do cristal também afeta a reatividade de um agregado.

A chamada reação álcali-silicato resulta do uso de rochas que contém esse tipo de sílica, porém a velocidade de reação é, geralmente, menor do que quando ocorre na presença de sílica amorfa.

- **Suficiente quantidade de álcalis, originária do cimento e de outras fontes**

A presença de álcalis solúveis em água ou ativos, em quantidade suficiente, é outro fator para que ocorra a reação álcali-sílica, sendo o cimento o maior contribuinte para a quantidade total de álcalis. Os álcalis solúveis representam de 10% a 60% dos álcalis totais (Kuperman, 2005).

Durante muitos anos supôs-se que a reação álcalis-sílica não ocorreria caso o teor de álcalis do cimento fosse inferior a 0,6%. Diversas especificações adotaram este critério, porém verificou-se que diversas obras onde o equivalente alcalino empregado foi muito inferior a 0,6% apresentaram sérios problemas causados pela reação. Atualmente, reconhece-se mundialmente que apenas a limitação do teor de álcalis do cimento não evita essa patologia.

- **Existência de umidade**

O potencial de danos que podem ser provocados pela reação álcali-sílica depende, principalmente, da disponibilidade de água. Concretos dosados com agregados reativos e cimentos com elevado teor de álcalis apresentaram pouca ou nenhuma expansão em ambientes muito secos. Há um consenso de que é necessário haver um mínimo de 80% de umidade relativa para que a expansão causada pela reação seja significativa. Portanto, uma das maneiras mais eficientes para reduzir os danos causados pela reação seria tentar impedir o contato do concreto com a água ou impedir o ingresso da umidade no mesmo. Entretanto, até o presente, ainda não existe uma maneira econômica e absolutamente segura de impedir o ingresso de umidade (Kuperman, 2005).

Hasparik (1999) complementa ainda, incluindo outros fatores, conforme segue:

- **Temperatura**

A maioria das reações químicas são ativadas por temperaturas elevadas e, a RAA não seria diferente. Nestas condições, o gel torna-se menos viscoso, percorrendo mais facilmente as fissuras e vazios do concreto (Bulletin 79 – ICOLD *apud* Hasparik, 1999).

Ainda segundo Hasparik (1999), ensaios realizados por Rigden, Majlesi & Burley demonstram que uma cura realizada acima de 20°C aumenta a taxa e a magnitude das expansões. Por esse motivo, existem ensaios laboratoriais acelerados para simular a RAA a curto prazo, simulando assim o comportamento expansivo na prática.

- **Tempo**

O surgimento de fissuras não ocorre em um determinado tempo específico. As expansões podem eventualmente parar quando todos os minerais reativos presentes no agregado tiverem sido consumidos. Em alguns casos de barragens dos Estados Unidos da América, este fenômeno foi observado somente após 30 anos, através de análises de microscopia eletrônica de varredura (Bulletin 79 – ICOLD *apud* Hasparik, 1999)

5.3 Principais Sintomas das Estruturas Afetadas

Os principais sintomas das estruturas afetadas por reação álcali-agregado podem ser distinguidos em: aspectos de pequena escala e aspectos de grande escala (CBDB, 1999).

5.3.1 Aspectos de Pequena Escala

Os sintomas das estruturas afetadas por reação álcali-agregado classificados como de pequena escala são microfissuras no concreto e na argamassa que preenche os vazios entre os agregados graúdos, fissuras nas proximidades da superfície dos agregados e na própria superfície, descolamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície do agregado, ocorrência de bordas de reação, ao redor dos agregados que reagiram com os álcalis e presença de gel exsudado ou preenchendo vazios no concreto.

5.3.2 Aspectos de Grande Escala

Os sintomas das estruturas afetadas por reação álcali-agregado classificados como de grande escala são presença de gel exsudando pelas fissuras do concreto, movimentação (abertura e/ou deslocamento relativo) de juntas de contração, algumas vezes sendo confundida com movimentos de recalques de fundação, travamento e/ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (comportas, turbinas, eixos, pistões, etc.), fissuração característica na superfície, com panorama poligonal, havendo predominância na direção de maior dimensão, fissuração nas extremidades, com características de esfoliamento, sendo que em algumas regiões (onde o clima é severo) se confunde com as fissuras do tipo gelo-degelo, abertura de juntas de construção, com fissuras horizontais (e/ou subhorizontais), algumas vezes induzindo a pensar em “junta-fria” ou junta tratada inadequadamente, fissuras de grande abertura, transversais à maior dimensão da estrutura, induzindo ao pensamento da ausência de junta de contração, fissuras de tipologia estrutural (assemelhado às de corte) em regiões de concentração de deformações e movimentação das superfícies livres (alteamento de cristas de barragens, e soleiras de vertedouros, deflexões para montante nas estruturas de barragens).

Algumas vezes essas medidas, quando observadas, criam certas desconfianças nos profissionais encarregados a interpretá-las, fazendo que essas medições sejam (infelizmente) descartadas.

A fissuração ocorrida pode levar à penetração de água e perda da estanqueidade. Por outro lado, também a microfissuração junto à superfície dos agregados e perda da aderência podem levar à perda da resistência e redução do módulo de elasticidade.

5.4 Medidas Preventivas na Fabricação do Concreto

As medidas preventivas são aquelas que procuram verificar a potencialidade de ocorrência da reação antes da execução da estrutura. Dentre os inúmeros pesquisadores, o uso de material cimentício⁴ tornou-se uma excelente opção, pois além de inibir a reação álcali-agregado, melhora as propriedades do concreto (FURNAS, 1997).

Segundo Duchesne e Bérube *apud* FURNAS (1997), vários mecanismos são propostos para explicar a eficácia do material cimentício em reduzir a expansão. Dentre eles, temos:

- Menor permeabilidade, como consequência menor mobilidade dos íons;
- Elevada resistência às tensões expansivas causadas pela reação;
- Diminuição dos álcalis em função da reposição parcial do cimento;

4 - O termo material cimentício é empregado para definir o material composto de cimento e material pozolânico ou com características pozolânicas mesmo que com baixo índice de pozolanidade, como agregado pulverizado na finura do cimento (FURNAS, 1997).

- Reação pozolânica produzindo hidratos secundários, os quais incorporam os íons alcalinos e consomem a portlandita, reduzindo desta forma a concentração de álcalis e o valor do pH da solução.

Por outro lado, FURNAS (1997) menciona que há pesquisadores que defendem a teoria de que o maior efeito do uso de material cimentício está na redução da alcalinidade nos poros do concreto.

Kuperman (2005) alerta que a simples adição destes produtos ao concreto, sem saber qual a porcentagem mínima necessária para o agregado em questão e sem nenhum controle de suas reais propriedades não significa que a RAA será neutralizada. Para tanto, o autor exemplifica que, segundo as normas brasileiras, os cimentos pozolânicos admitem variação do teor da adição de 15% a 50% e nos cimentos de alto forno de 35% a 70%, a sílica ativa deve obedecer a norma brasileira e, por enquanto não há normalização brasileira para o controle do metacaulim.

Os materiais cimentícios mais importantes são descritos a seguir.

5.4.1 Pozolanas

FURNAS (1997) caracteriza as pozolanas como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que possuem pequena ou nenhuma característica aglomerante, mas em forma finamente dividida e em presença de umidade reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, para formar compostos com propriedades aglomerantes.

5.4.2 Fly-Ash (Cinza Volante)

A bibliografia (FURNAS, 1997) caracteriza Fly-Ash como um tipo de pozolana artificial, obtido pela combustão do carvão em pedra. Sua substituição parcial do cimento influencia o conteúdo de hidroxilas disponíveis, o tempo de pega, o conteúdo de ar incorporado e o desenvolvimento da resistência. Há autores que indicam 3 fatores que influenciam a reatividade do fly-ash: a finura, o seu teor de álcalis e o conteúdo alcalino do cimento. Todavia, o teor alcalino do cimento é o fator decisivo.

As experiências realizadas por Nixon e Page *apud* FURNAS (1997) mostram que, no caso de cimento com baixo teor de álcalis ($\leq 0,6\%$), a adição de fly-ash foi ineficaz. Entretanto, em cimento com teor de álcalis elevado ($> 0,6\%$), a redução da expansão foi substancial.

5.4.3 Cinza de Casca de Arroz

O emprego de cinzas de cascas de arroz como aglomerante foi inicialmente pesquisado por Cook, Mehta e Kapur. Segundo James e Subba Rao *apud* FURNAS (1997), este estudo tem como objetivo a obtenção de sílica altamente reativa, como menor conteúdo de álcalis e outros elementos, a partir da queima controlada da casca de arroz.

5.4.4 Escória de Alto Forno

A atuação da escória na reação álcali-agregado é explicada por Scandiuzzi e Battagin *apud* FURNAS (1997). Segundo esses pesquisadores, os principais ativadores da escória são o Ca(OH)_2 liberado na hidratação dos silicatos do clínquer, os sulfatos presentes no gesso e o hidróxido de sódio. Assim, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formado na hidratação do cimento contendo escória, apresenta

relação C/S menor que aquela contida na pasta de Cimento Portland comum, propiciando maior incorporação dos álcalis; diminuindo desta forma a concentração dos íons alcalinos para reagir com o agregado.

Assim como no caso do uso de cinza volante, a escória também tem atuação satisfatória com cimentos de elevado teor de álcalis, não tendo eficácia para cimentos com teores baixos desse composto.

5.4.5 Sílica Ativa

A sílica ativa, também conhecida como fumo de sílica é um subproduto da indústria de ligas ferrosas e consiste em partículas extremamente pequenas de sílica amorfa (84% a 98%), mas também contém pequenas quantidades de ferro, alumina, cal e álcalis, com variações dependendo do tipo de liga produzida (FURNAS, 1997).

Enquanto a escória e a pozolana atuam de maneira a diminuir a concentração da alcalinidade, o fumo de sílica atua promovendo a reação álcali-sílica no concreto ainda no estado fresco. De acordo com Hobbs *apud* FURNAS (1997), esta rápida reação deve-se às partículas de sílica amorfa ultrafinas. Se for usada em quantidade suficiente, o conteúdo de álcalis poderá ser exaurido antes mesmo que o concreto desenvolva significativa resistência.

5.5 A Norma Técnica ABNT NBR 15577/2008

Tendo em vista as medidas necessárias para se evitar a ocorrência de reações expansivas deletérias devidas à reação álcali-agregado e a definição para o uso de agregados em concreto, são descritos a seguir análise de risco e métodos de ensaios tecnológicos laboratoriais necessários à verificação desses requisitos, conforme determinado pela norma ABNT NBR 15577/2008.

5.5.1 Análise de Risco da Possibilidade da Ocorrência da Reação Álcali-Agregado

A determinação do nível de precaução e mitigação do efeito da reação álcali-agregado em determinado elemento de concreto, estrutural ou não, depende da realização de uma análise de risco do comprometimento de seu desempenho durante a vida útil (ABNT NBR 15577-1/2008).

Os fatores que concorrem para estabelecer o risco de comprometimento de desempenho pela ocorrência da reação álcali-agregado vão além da composição do concreto, cumprindo analisar:

- a) As condições de exposição da estrutura ou do elemento de concreto ao ambiente: em contato com água, úmido ou seco;
- b) As dimensões da estrutura ou do elemento de concreto: maciço ou não maciço e;
- c) A responsabilidade estrutural.

A decisão de uso do agregado e, eventualmente, de medidas mitigatórias estabelecida na norma ABNT NBR 15577/2008, conforme apresentado no fluxograma da Figura 5.2, deve considerar a análise de risco.

A ação preventiva necessária para evitar danos decorrentes da reação álcali-agregado está intimamente ligada ao grau de risco de sua ocorrência em função das condições de exposição e do tipo de estrutura ou elemento de concreto no qual o agregado vai ser empregado.

Assim, para estruturas provisórias ou quando o risco de ocorrência da RAA for desprezível, é desnecessária qualquer ação preventiva. Quando as condições ambientais a que estará exposta a estrutura ou elemento de concreto bem como seu tipo indicar risco mínimo de ocorrência, as ações preventivas também serão mínimas até um caso extremo em que o risco é forte e as ações preventivas serão fortes. A

classificação da ação preventiva necessária para a mitigação da RAA deve ser indicada pelo responsável técnico pela obra (ABNT NBR 15577/2008).

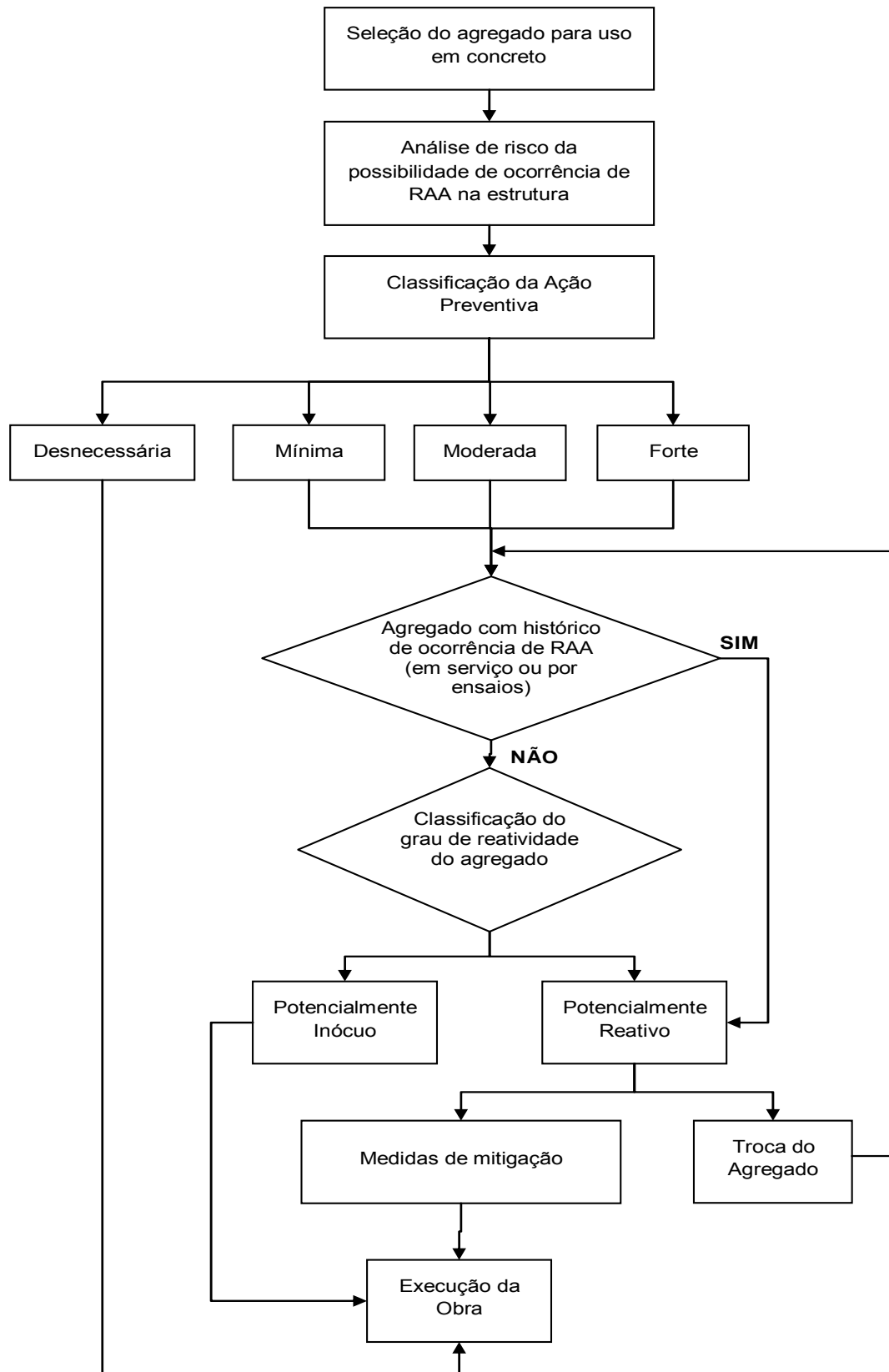


Figura 5.2: Fluxograma geral para uso do agregado em concreto (ABNT NBR 15577-1/2008)

Ação preventiva desnecessária significa que o agregado pode ser aceito para uso sem avaliação da sua potencialidade reativa. Os demais níveis de prevenção indicam que a avaliação da reatividade dos agregado é necessária, pois meios agressivos e manifestações patológicas podem contribuir para acelerar o processo deletério iniciado pela reação álcali-agregado (ABNT NBR 15577/2008).

5.5.2 Avaliação da Reatividade do Agregado

Sempre que for necessário conhecer o potencial reativo dos agregados a serem utilizados devem ser realizadas as avaliações previstas em 5.5.3 a 5.5.4 e, a partir dos resultados obtidos, aplicar os procedimentos apropriados.

Na ausência de ensaios comprobatórios da natureza potencialmente inócua do agregado, tratá-lo como potencialmente reativo.

O fluxograma apresentado na Figura 5.3 estabelece uma seqüência de procedimentos para a verificação do grau da reatividade potencial do agregado. A caracterização mineralógica e a análise petrográfica associadas aos ensaios de expansão em barras de argamassa e expansão em prismas de concreto fornecem informações importantes para a decisão de uso do agregado.

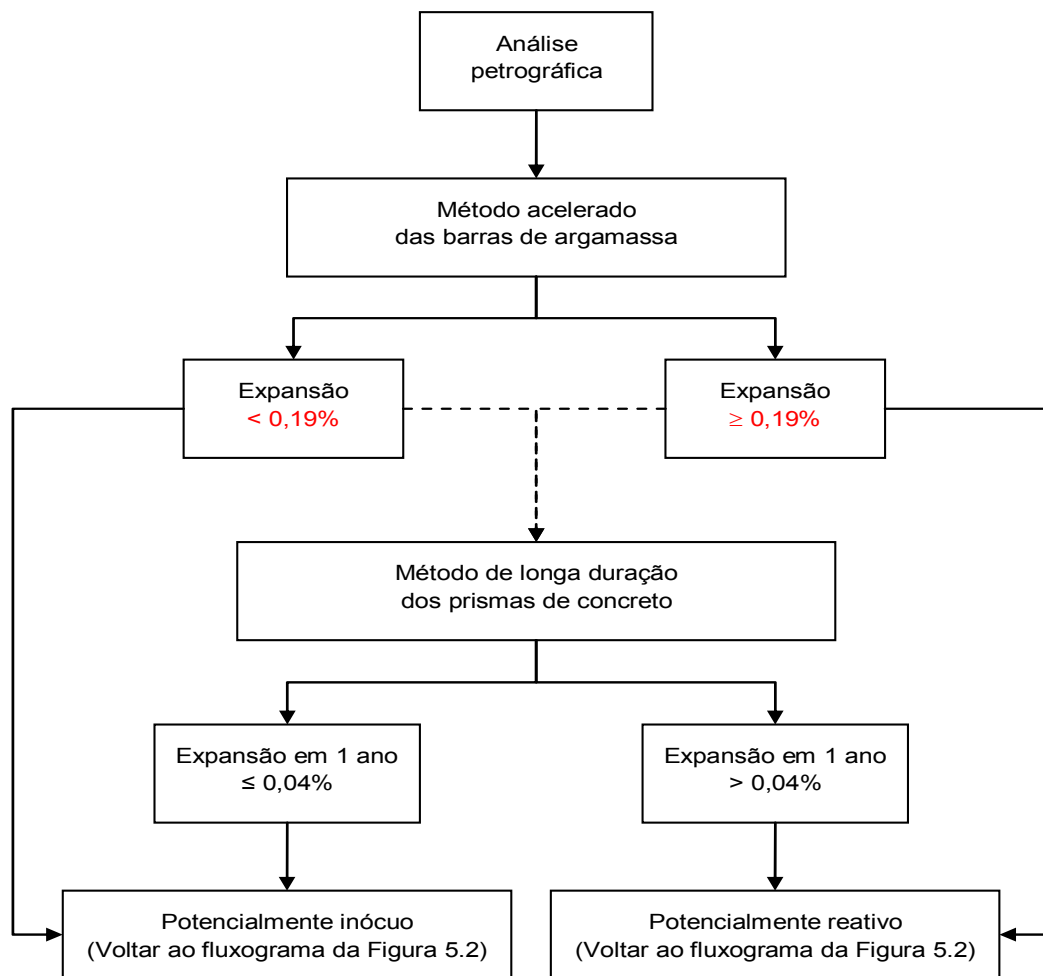


Figura 5.3: Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado

5.5.3 Análise Petrográfica – ABNT NBR 15577-3

A análise petrográfica é o primeiro passo na investigação das potencialidades reativas do agregado, pois fornece informações sobre a composição mineralógica, ou seja, a presença ou não de constituintes do agregado suscetíveis aos álcalis do cimento e seu percentual. O ensaio é realizado em lâminas preparadas com o agregado e observadas em microscópio ótico, de acordo com a norma ABNT NBR 15577-3/2008.

Na Figura 5.4 a seguir, pode-se ver o microscópio ótico que se utilizada no ensaio, bem como a lâmina da amostra do concreto a ser ensaiada.



Figura 5.4: Microscópio Ótico e lâmina de Ensaio - FURNAS (1997)

Geralmente, o laudo de uma análise petrográfica, além da natureza e classificação da rocha, consta de exame macroscópico, no qual se verifica a cor e o tipo de textura⁵

A validade da análise petrográfica depende em larga escala da representatividade das amostras examinadas, da abrangência e exatidão da informação fornecida ao petrógrafo com relação à fonte e ao uso pretendido do material. Depende principalmente da experiência e habilidade do petrógrafo em correlacionar esses dados com as informações da análise. Uma análise difere de um ensaio por seu caráter subjetivo e interpretativo.

Embora a ABNT NBR 15577/2008 não descreva as técnicas de análise petrográfica, a análise deve ser realizada por pessoas qualificadas, com formação e experiência para aplicar as técnicas de reconhecimento das propriedades características de rochas e minerais, bem como descrever e classificar os constituintes de uma amostra de agregado.

5 - Textura corresponde usualmente, às dimensões e ao arranjo dos minerais em uma rocha. Os principais tipos de texturas são: compacta (maciça), bandada (gnáissica), laminada (xistosa). Na compacta, os cristais têm distribuição caótica; na bandada, eles se distribuem em zonas alternadas, paralelas ou não entre si; na xistosa, minerais placóides se orientam segundo uma direção preferencial (Frazão, 2002).

5.5.3.1 Procedimento de Análise

A execução da análise deve seguir os métodos usuais de análise petrográfica, conforme os procedimentos indicados na norma ABNT NBR 15577/2008 e relacionados a seguir:

- Examinar macroscopicamente a amostra e classificá-la quanto ao tipo se cascalho, pedrisco, fragmento de rocha, testemunho de sondagem ou pedra britada;
- Avaliar as propriedades físico-mecânicas, classificando se a rocha constituinte é muito coerente, coerente, pouco coerente ou friável;
- Examinar macroscopicamente a rocha constituinte e registrar a cor e a estrutura (maciça, foliada, bandada ou outra);
- Examinar a seção delgada ao microscópio e registrar as seguintes características da rocha:
 - Textura;
 - Granulação (distinguir matriz e cimento se houver), classificando-a em grossa, média ou fina;
 - Composição mineralógica: minerais principais e subordinados. Caso ocorram minerais opacos, o petrógrafo deve indicar o seu percentual (estimado ou por contagem) de ocorrência. Entre os opacos, os sulfetos merecem atenção especial, pois podem levar a manifestações patológicas alheias a reação álcali-agregado;
 - Presença (ou ausência) de minerais e fases deletérias quanto à reação álcali-agregado;
 - Estimar o seu teor e, se pertinente seu modo de ocorrência, granulometria e relação com os outros minerais;
 - Estimativa da quantidade de quartzo microgranular (menor que 0,5mm), conforme os campos: menor que 5%, entre 5 e 15% e maior que 15%;

- Sempre que presente feldspato em rochas deformadas, indicar a sua textura se mirmequítica, pertítica ou não aplicada;
- Estado microfissural, indicando, onde aplicável, se a microfissuração é ausente, moderada ou forte;
- Estado de alteração de rocha, classificando-a como sã, pouco alterada ou alterada e descrevendo, se necessário o estado de minerais específicos e
- Natureza (ígneia, sedimentar ou metamórfica) e classificação petrográfica da rocha.

A caracterização mineralógica e a análise petrográfica isoladas não são suficientes para avaliar a potencialidade deletéria devida à reação álcali-agregado, mas fornecem informações importantes para essa avaliação.

5.5.3.2 Classificação do Agregado quanto a Reação Álcali-Agregado

Com base na análise petrográfica da rocha, deve-se classificar o agregado quanto à RAA em potencialmente inócuo , caso não apresente minerais ou fases reativas em quantidade expressiva ou potencialmente reativo, caso contrário. Os limites máximos de fases reativas geralmente adotados são: 5% (quarzo deletério), 3% (calcedônia), 1% (tridimita ou cristobalita), 3% (vidro vulcânico) e 0,5% (opala). Entretanto com base em experiência pessoal e nas feições presentes, o petrógrafo poderá admitir limites distintos.

A Tabela 5.7 apresenta uma relação de rochas e minerais suscetíveis ao desenvolvimento da reação com álcalis.

Tabela 5.7: Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado (ABNT NBR 15577/2008)⁶

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica meta-estável e vidros vulcânicos		
Material reativo	Rochas de ocorrência	
	Rochas sedimentares	Rochas vulcânicas
Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico	Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, alguns basaltos
Rochas reativas contendo quartzo		
Material reativo	Tipos de rocha	
Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino Quartzo macrogranular, com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato do grão	<p>Chert, flint, veio de quartzo, quartzito, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso</p> <p>Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino</p> <p>Rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou quantidade significativa de quartzo moderadamente ou intensamente tensionado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito - rochas sedimentares: arenito, grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso, arenito e arcóseo - rochas metamórficas: gnaiss, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, ardósia 	

5.5.4 Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado – ABNT NBR 15577-4

Após a caracterização petrográfica do agregado, realizar o ensaio acelerado em barras de argamassa na presença de um cimento-padrão, conforme prescreve a norma ABNT NBR 15577-4/2008.

6 - Elaborada com base na Tabela B. 1 da Canadian Standards Association A23.1-04 Concrete materials and methods of concrete construction.

O método da norma ABNT NBR 15577-4/2008 é utilizado para avaliar a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, por meio do monitoramento da expansão dimensional de barras de argamassa. Para o preparo da argamassa o agregado deve ser processado com um mínimo de britagem, quando necessário, de forma a produzir um produto classificado na Tabela 5.8 conforme prescrito na norma.

Após o agregado ter sido classificado, cada fração é lavada com água corrente para remover o pó aderido e partículas finas do agregado. As frações retidas nas várias peneiras são secadas e cada fração, armazenada individualmente em recipiente limpo e fechado.

Tabela 5.8: Granulometria requerida do material para ensaio (ABNT NBR 15577-4/2008)

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

Segundo esse método, as barras são moldadas com proporção cimento:agregado de 1:2,25 (440g:990g) com relação a/c fixa igual a 0,47 com um cimento comprovadamente não mitigador da reação álcali-agregado e com expansão em autoclave inferior a 0,2%. Após 24 horas da adição da água, as barras são desformadas e colocadas em recipiente para cura em água, o qual é gradualmente aquecido desde a temperatura ambiente até atingir $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. As barras são conservadas nessa condição por 24h. Após esse período de estabilização, as barras são removidas do recipiente de cura, uma de cada vez, e rapidamente medidos os seus comprimentos em sala climatizada a $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, de modo a registrar a leitura inicial a 80°C (ABNT NBR 15577-4/2008).

Cada medida, com precisão de 0,002 mm, deve ser feita dentro de 15 ± 5 segundos com o objetivo de não resfriar significativamente a argamassa, conforme preconiza o método. Após a leitura inicial, as barras são colocadas em cura em solução aquosa de NaOH 1N a $(80\pm 2)^\circ\text{C}$, sendo medidos seus comprimentos periodicamente por, no mínimo, 28 dias, contados a partir da data de imersão em solução alcalina, e calculada a expansão linear. A metodologia estabelece que a expansão média de três prismas deve ser calculada pelo menos por três idades intermediárias antes dos 28 dias de cura agressiva, sendo que a repetibilidade é considerada satisfatória quando dois resultados dentro do mesmo laboratório, com os mesmos operadores e agregados, não diferirem mais que 8,3% da expansão média para valores acima de 0,10% aos 14 dias de cura agressiva (ABNT NBR 15577-4/2008).

Segundo a norma, os resultados devem ser expressos pela média de leituras de três barras, sendo os valores individuais com aproximação de 0,001% e a média, com aproximação de 0,01%. Na Figura 5.5 pode-se verificar o procedimento de leitura das barras utilizadas no ensaio, bem como a presença de fissuras indicativas da expansão devidas à reação álcali-agregado.



Figura 5.5: Procedimento de leitura da expansão da barra de argamassa (ABCP, 2008)

5.5.4.1 Classificação do Agregado quanto a Reação Álcali-Agregado

Quando o resultado obtido nesse ensaio indicar expansão menor que 0,19 % aos 30 dias de idade, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo para uso em concreto. Caso se deseje a confirmação deste resultado, o método de longa duração dos prismas de concreto pode ser realizado prevalecendo o seu resultado.

Caso a expansão obtida no ensaio acelerado seja maior ou igual que 0,19 % aos 30 dias de idade, o agregado é considerado potencialmente reativo. Nesse caso, pode ser realizado o ensaio em prismas de concreto, conforme a parte 6 da norma ABNT NBR 15577/2008, para confirmação ou não da potencialidade reativa do agregado, prevalecendo o seu resultado. Opcionalmente, verificar a possibilidade de uso de outro agregado, reiniciando o processo de avaliação.

5.5.5 Prismas de concreto – ABNT NBR 15577-6

Quando necessário, realizar o ensaio para determinação da reatividade potencial do agregado através do método dos prismas de concreto na presença de um cimento-padrão durante um ano, conforme preconiza a parte 6 da norma ABNT NBR 15577/2008.

A norma estabelece o método de ensaio para avaliar, por meio da variação de comprimento de prismas de concreto, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis (sódio e potássio), fazendo-se uso de um cimento-padrão.

Também se aplica na avaliação do potencial deletério da reação álcali-sílica de combinações de materiais cimentícios/adições e um agregado potencialmente reativo.

Este método de ensaio visa avaliar o comportamento tanto de agregados graúdos como miúdos, a partir de ensaios executados sob condições de cura laboratorial. Para isso, os agregados são preparados para atender à granulometria da Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Granulometria requerida do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (NBR NM ISO 3310-1)		Porcentagem individual em massa
Passante	Retido	
19,0 mm	12,5 mm	33
12,5 mm	9,5 mm	33
9,5 mm	4,75mm	33

A mistura de concreto deve ser proporcionada segundo os seguintes requisitos:

- Dimensão máxima característica do agregado graúdo: 19 mm;
- Módulo de finura do agregado miúdo: $2,7 \pm 0,2$;
- Agregados saturados com superfície seca ou determinar a absorção;
- Consumo de material cimentício: 420 kg/m³;
- Relação água/material cimentício: 0,45;
- Teor de argamassa do traço: $55 \pm 2\%$.

Para o acompanhamento da variação do comprimento dos prismas, deve-se realizar leituras, contadas a partir da moldagem dos prismas de concreto, nas idades de: 7 dias, 28 dias, 56 dias, seguido de leituras mensais dos 3 meses até 12 meses de ensaio. Leituras adicionais, se necessárias, são sugeridas em intervalos de 2 meses a 6 meses.

A variação de comprimento ou expansão de cada prisma de concreto numa determinada idade representa a diferença entre seu comprimento na idade considerada e seu comprimento inicial (leitura inicial), expressa em porcentagem do comprimento efetivo de medida, com aproximação de 0,001%. A expansão média

dos prismas de concreto numa determinada idade deve ser expressa com aproximação de 0,01% (ABNT NBR 15577-6/2008).

Dados de pelo menos três prismas devem ser utilizados a qualquer idade de forma a constituir um ensaio válido para essa idade.

5.5.5.1 Classificação do Agregado quanto a Reação Álcali-Agregado

Se o resultado obtido no ensaio dos prismas de concreto indicar expansão menor que 0,04 % na idade de um ano, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo para uso em concreto. Entretanto, se o resultado obtido indicar expansão maior ou igual a 0,04 % na idade de um ano, o agregado é classificado como potencialmente reativo.

5.5.6 Interpretação dos Resultados

Os resultados dos ensaios realizados informam se o agregado em estudo é potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. Quando for constatado que o agregado é potencialmente inócuo, a partir da avaliação realizada, seu uso em concreto depende da aprovação do responsável técnico pela obra, desde que cumpridas as demais exigências consideradas por outras normas técnicas.

Caso a avaliação realizada indique potencial reativo na presença de álcalis e houver risco de manifestações patológicas na estrutura, o agregado pode ser utilizado, desde que seja possível comprovar a mitigação das reações expansivas através de ações preventivas, pois o seu uso sem aplicação de ações preventivas que comprovadamente garantam a mitigação das reações expansivas pode acarretar danos estruturais que inviabilizem o uso na construção.

5.6 Métodos e Ações para Diagnóstico da RAA

Segundo Kuperman (2005), a única evidência inquestionável de que uma estrutura está afetada pela reação álcali-agregado (com exceção da reação álcali-carbonato) é a presença do gel resultante, ou seja, a presença de uma “borda de reação”, que é constituída pelo gel em torno do agregado e que, na maioria das vezes, não é perfeitamente visível a olho nu. Desta forma, a ocorrência de reação pode passar despercebida durante anos, até que, o aparecimento de fissuras leve a um estudo mais aprofundado.

Após levantadas as suspeitas, ou mesmo diagnosticado a presença de RAA na estrutura de concreto, a principal ação a ser tomada é a de implantar um sistema de auscultação.

Segundo Hasparik (1999), normalmente a instrumentação envolve a instalação de marcos geodésicos para medição de deslocamentos das estruturas, medidores de distâncias relativas de alta precisão (pinos de convergência/divergência) para monitoramentos de deslocamentos com correções de temperatura, medidores triortogonais para medição de deslocamentos de juntas e extensômetros de hastes para medição de deformações no interior das estruturas.

O monitoramento também é de suma importância, visto que através dele pode-se prever a época em que seria necessária a adoção de alguma medida corretiva na estrutura.

As principais medidas corretivas mencionadas por CBDB (1999) são:

- alívio de tensões na peça através da liberação de deformações, que pode ser feito com a criação ou reposição de juntas e vazios;

- controle da presença da água, quer pela proteção mecânica (concreto, mantas geopoliméricas, argamassa), quer pela utilização de selantes ou impregnantes;
- execução de reparos estruturais;
- demolições.

Ainda segundo CBDB (1999), o monitoramento passa a ter especial importância para se enfrentar o problema e para obtenção de dados que um dia possibilitem a predição do comportamento de um possível reparo.

6. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consistiu no levantamento e classificação da possibilidade de ocorrência da reação álcali-agregado por ocasião da utilização de diferentes amostras de agregados. A metodologia apresentada foi baseada na norma ABNT NBR 15577/2008, conforme ensaios de análise petrográfica e verificação da expansão das barras de argamassa pelo método acelerado.

A avaliação foi realizada pelos itens 3 – Análise petrográfica e 4 – Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado da norma ABNT NBR 15577/2008. A partir dos resultados apresentados, foram fornecidas diretrizes para a utilização de cada agregado considerado.

6.1 Materiais Utilizados

Para a realização do programa experimental foram selecionados 10 agregados de classificação litológica e regiões do Brasil diversas, conforme apresentado na Tabela 6.1. O cimento padrão utilizado constitui-se essencialmente por clínquer e sulfato de cálcio, comprovadamente não-mitigador da reação álcali-agregado, apresentando expansão em autoclave inferior a 0,20%, conforme prescreve o método de ensaio da ABNT NBR 15577/2008.

Tabela 6.1: Resumo das características dos agregados

Identificação	Tipo	Classificação Mineralógica Principal
1	Metamórfica	Quartzo
2	Metamórfica	Quartzo
3	Metamórfica	Quartzo
4	Metamórfica	Quartzo
5	Ígnea	Quartzo, feldspato e mica
6	Metamórfica	Feldspato e piroxênio
7	Metamórfica	Quartzo e feldspato
8	Metamórfica	Quartzo e feldspato
9	Metamórfica	Calcita
10	Ígnea	Quartzo, feldspato e mica

6.2 Análise Petrográfica

De forma a ter a caracterização do agregado e indicações sobre seu potencial reativo, realizou-se a análise petrográfica do agregado graúdo, conforme a ABNT NBR 15577.

As tabelas a seguir apresentam um resumo dos resultados da caracterização petrográfica dos agregados empregados na pesquisa.

Tabela 6.2: Características petrográficas da amostra 1 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 1 - Metamórfica
Cor		Cinza
Tipo		Testemunho de sondagem
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Mica, carbonato de cálcio
	Reativa/Deletéria	Quartzo fino e deformado
Estrutura		Anisótropa, orientada
Textura		Dada por quartzo alongado e orientado e micas alinhadas, definindo uma foliação
Granulação		Fina
Alteração		Não alterada, coerente
Deformação do agregado		Não deformado
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Quartzo xisto
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento

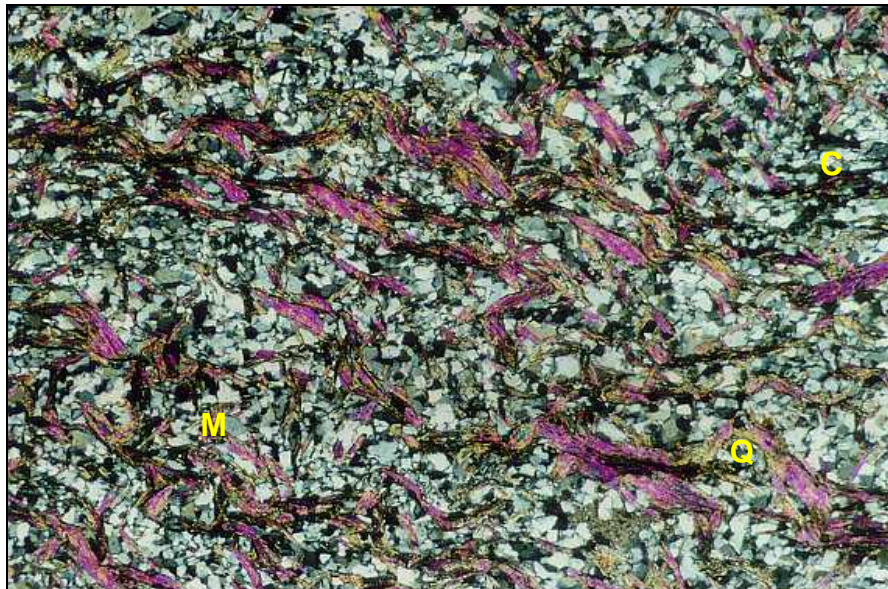


Figura 6.1: Aspecto geral do quartzo (Q) mica (M) xisto, destacando sua granulação fina e estrutura fortemente orientada e dobrada. Microscópio óptico de luz transmitida. Aumento 50x (ABCP, 2007).

Tabela 6.3: Características petrográficas da amostra 2 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 2 - Metamórfica
Cor		Cinza
Tipo		Testemunho de sondagem
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Mica, carbonato de cálcio
	Reativa/Deletéria	Quartzo fino e deformado
Estrutura		Anisótropa, orientada
Textura		Dada por quartzo alongado e orientado e micas alinhadas, definindo uma foliação
Granulação		Fina
Alteração		Não alterada, coerente
Deformação do agregado		Não deformado
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Quartzo xisto
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento

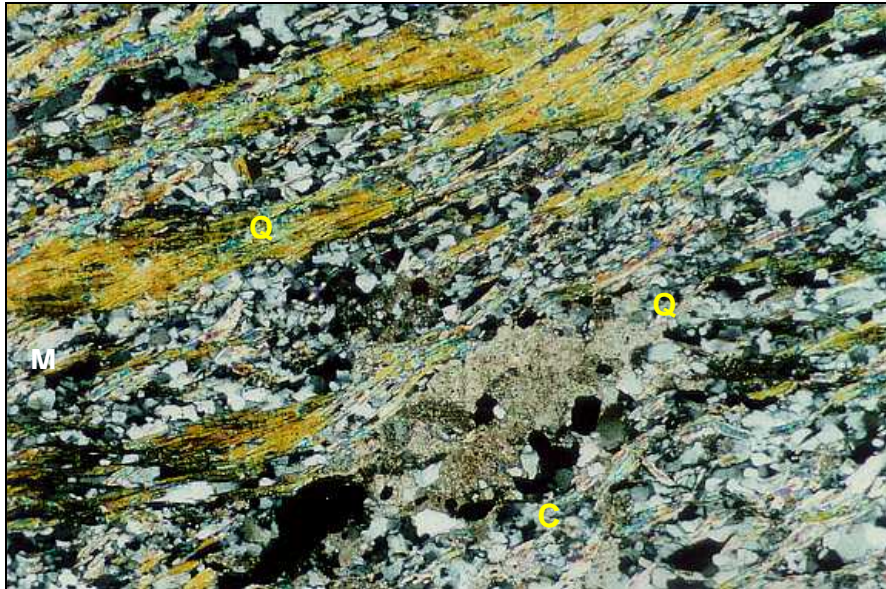


Figura 6.2: Quartzo mica xisto fino, com carbonato de cálcio, ao microscópio óptico de luz transmitida. Estrutura orientada e a granulação fina. Aumento 50x (ABCP, 2007).

Tabela 6.4: Características petrográficas da amostra 3 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 3 - Metamórfica
Cor		Cinza
Tipo		Testemunho de sondagem
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Mica, carbonato de cálcio
	Reativa/Deletéria	Quartzo fino e deformado
Estrutura		Anisótropa, orientada
Textura		Dada por quartzo alongado e orientado e micas alinhadas, definindo uma foliação
Granulação		Fina
Alteração		Não alterada
Deformação do agregado		Não deformado
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Quartzo xisto
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento

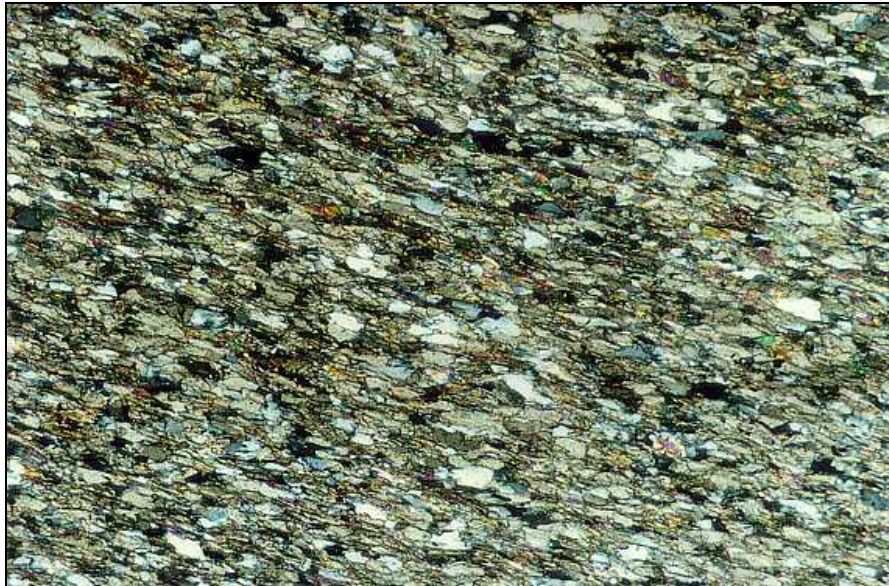


Figura 6.3: Quartzo xisto fino, ao microscópio óptico de luz transmitida, exibindo forte orientação dos constituintes. Aumento 50x (ABCP, 2007).

Tabela 6.5: Características petrográficas da amostra 4 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 4 - Metamórfica
Cor		Cinza
Tipo		Testemunho de sondagem
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Mica, carbonato de cálcio
	Reativa/Deletéria	Quartzo fino e deformado
Estrutura		Anisótropa, orientada
Textura		Dada por quartzo alongado e orientado e micas alinhadas, definindo uma foliação
Granulação		Fina
Alteração		Não alterada
Deformação do agregado		Não deformado
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Quartzo xisto
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento

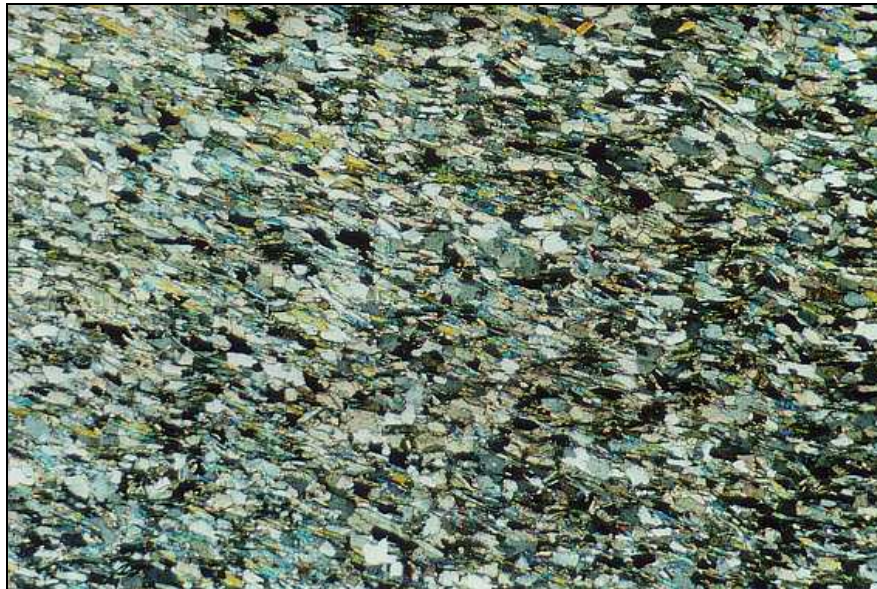


Figura 6.4: Quartzo xisto fino, ao microscópio óptico de luz transmitida, exibindo forte orientação dos constituintes. Aumento 50x (ABCP, 2007).

Tabela 6.6: Características petrográficas da amostra 5 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 5 - Ígnea
Cor		Cinza claro
Tipo		Pedra britada
Mineralogia	Principal	Quartzo, feldspato e mica
	Subordinada	Opacos
	Reativa/Deletéria	Quartzo deformado
Estrutura		Maciça
Textura		Fanerítica média
Granulação		Média
Alteração		Predominantemente sã
Deformação do agregado		Pouco deformado
Tipo de rocha		Ígnea
Classificação petrográfica		Granito
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento



Figura 6.5: Aspecto de detalhe da textura da rocha na qual se observam quartzo (Q), feldspato (F) e mica (M). Aumento 100x (ABCP, 2007).

Tabela 6.7: Características petrográficas da amostra 6 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 6 - Metamórfica
Cor		Cinza escuro esverdeado
Tipo		Pedra britada
Mineralogia	Principal	Feldspato (microclínio e plagioclásio) e piroxênio (clino e orto)
	Subordinada	Biotita, Quartzo e Opacos
	Reativa/Deletéria	Quartzo deformado
Estrutura		Maciça
Textura		Granoblástica
Granulação		Fina a média
Alteração		Sã
Deformação do agregado		Deformado
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Granulito
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento

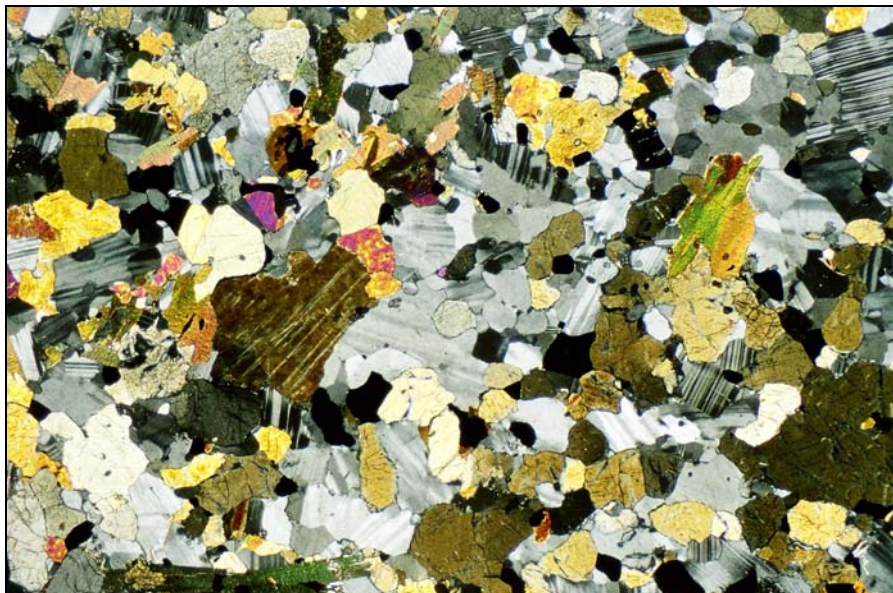
**Figura 6.6: Aspecto de detalhe da textura da rocha. Aumento 50x (ABCP, 2007).**

Tabela 6.8: Características petrográficas da amostra 7 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 7 - Metamórfica
Cor		-
Tipo		Pedra britada
Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspato
	Subordinada	Biotita, epídoto, opacos, titanita, zircão
	Reativa/Deletéria	Quartzo com extinção ondulante e material fino
Estrutura		Anisótropa, orientada
Textura		Definida por grãos com contornos tendendo a retilíneos e contatos imbricados
Granulação		Muito fina a média
Alteração		Com alteração incipiente
Deformação do agregado		Deformado
Tipo de rocha		Ígnea metamorfizada
Classificação petrográfica		Granito gnáissico
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento



Figura 6.7: Granito gnáissico ao microscópio óptico de luz transmitida, onde se observam grãos de feldspato (F) e de quartzo (Q) com contornos tendendo a retilíneos. Aumento 50x (ABCP, 2007).

Tabela 6.9: Características petrográficas da amostra 8 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 8 - Metamórfica
Cor		-
Tipo		Pedra britada
Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspato
	Subordinada	Biotita, epídoto, opacos, titanita, zircão
	Reativa/Deletéria	Quartzo com extinção ondulante e material fino
Estrutura		Anisótropa, orientada
Textura		Definida por grãos com contornos tendendo a retilíneos e contatos imbricados
Granulação		Muito fina a média
Alteração		Medianamente alterada
Deformação do agregado		Deformado
Tipo de rocha		Ígnea metamorfizada
Classificação petrográfica		Granito gnáissico
Reatividade potencial		Agregado potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento

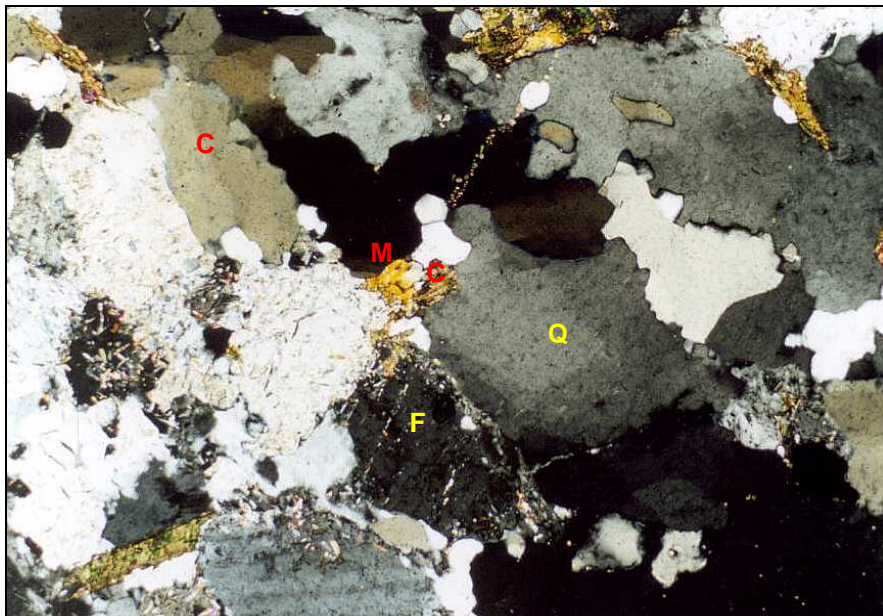


Figura 6.8: Pedrisco ao microscópio óptico de luz transmitida, exibindo grãos de quartzo com extinção ondulante (Q), mica (M) e feldspato (F). Aumento 50x (ABCP, 2007).

Tabela 6.10: Características petrográficas da amostra 9 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 9 - Metamórfica
Cor		Cinza esverdeada e avermelhada
Tipo		Pedra britada
Mineralogia	Principal	Calcita
	Subordinada	Quartzo e opacos
	Reativa/Deletéria	Não observado
Estrutura		Bandada
Textura		Indefinida
Granulação		Fina
Alteração		Predominantemente sã
Deformação do agregado		Pouco deformado
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Mármore
Reatividade potencial		Agregado potencialmente inócuo frente aos álcalis do cimento

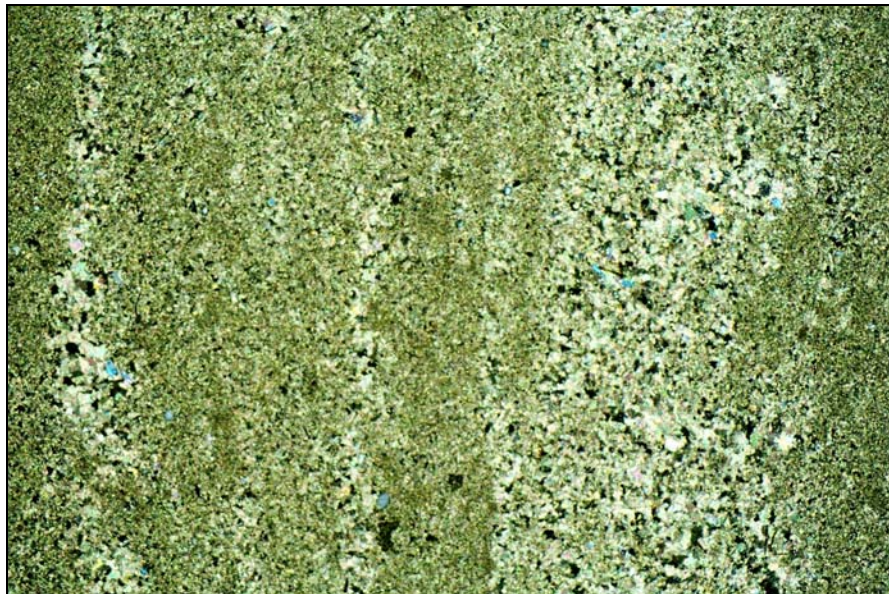


Figura 6.9: Aspecto geral no qual se observa o bandamento formado pelas diferenças de granulometria dos cristais de calcita – Microscópio de Luz transmitida – Aumento 25x (ABCP, 2007).

Tabela 6.11: Características petrográficas da amostra 10 (ABCP, 2007)

Características		Amostra 10 - Ígnea
Cor		Cinza claro
Tipo		Rocha britada
Mineralogia	Principal	Quartzo, feldspato e mica
	Subordinada	Não observado
	Reativa/Deletéria	Quartzo deformado
Estrutura		Maciça
Textura		Granítica
Granulação		Média
Alteração		Predominantemente sã
Deformação do agregado		Não deformado
Tipo de rocha		Ígnea
Classificação petrográfica		Granito
Reatividade potencial		Agregado potencialmente inócuo frente aos álcalis do cimento

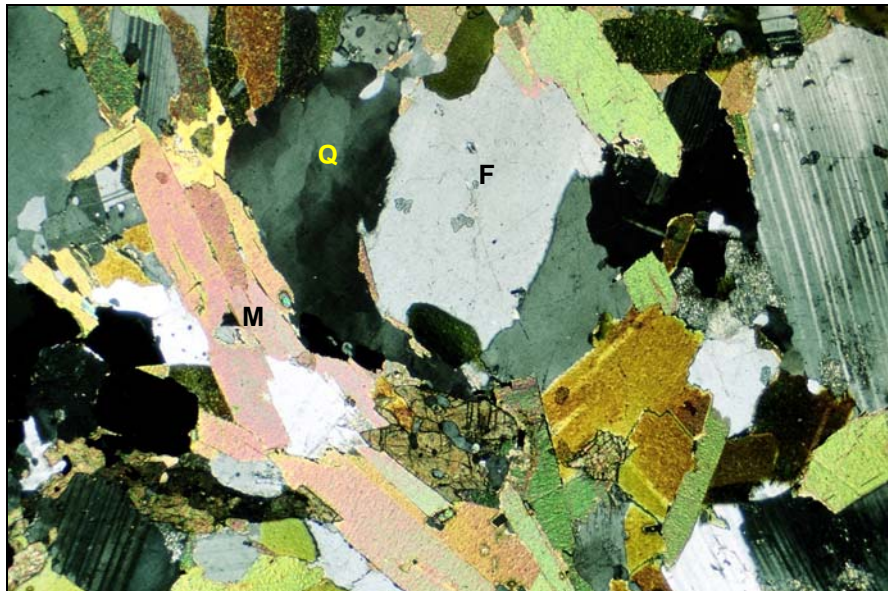


Figura 6.10: Aspecto de detalhe da textura da rocha na qual se observam cristais de feldspato (F) e mica (M) além de quartzo deformado com extinção ondulante (Q). Aumento 100x (ABCP, 2007).

A Tabela 6.12 apresenta uma síntese dos resultados obtidos e a classificação dos agregados analisados.

Tabela 6.12: Síntese dos resultados obtidos e classificação dos agregados

Identificação	Tipo	Classificação quanto à Reação Álcali-Agregado
1	Metamórfica	Potencialmente Reativo
2	Metamórfica	Potencialmente Reativo
3	Metamórfica	Potencialmente Reativo
4	Metamórfica	Potencialmente Reativo
5	Ígnea	Potencialmente Reativo
6	Metamórfica	Potencialmente Reativo
7	Metamórfica	Potencialmente Reativo
8	Metamórfica	Potencialmente Reativo
9	Metamórfica	Potencialmente Inócuo
10	Ígnea	Potencialmente Inócuo

6.3 Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado

Após a análise petrográfica, os agregados foram submetidos aos ensaios de expansão dimensional em barras de argamassa pelo método acelerado, conforme prescreve a norma ABNT NBR 15577/2008. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados nas Tabelas 6.13 a 6.21 a seguir:

Tabela 6.13: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 1 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,02
2	0,05
3	(1)
4	0,12
5	0,15
6	0,17
7	0,19
8	0,22
9	0,22
10	(1)
11	0,31
12	0,33
13	0,36
14	0,37
15	0,39
16	0,41
17	(1)
18	0,46
19	0,48
20	0,51
21	0,52
22	0,54
23	(1)
24	(1)
25	0,57
26	0,61
27	0,61
28	0,62

1. Leitura não realizada

Tabela 6.14: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 2 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,02
2	0,04
3	(1)
4	0,09
5	0,10
6	0,12
7	0,13
8	0,16
9	(1)
10	(1)
11	0,24
12	0,25
13	0,28
14	0,29
15	0,31
16	0,32
17	(1)
18	0,37
19	0,38
20	0,42
21	0,43
22	0,45
23	(1)
24	(1)
25	0,48
26	0,51
27	0,51
28	0,52

1. Leitura não realizada

Tabela 6.15: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 3 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,01
2	0,04
3	(1)
4	0,07
5	0,08
6	0,09
7	0,09
8	0,11
9	0,12
10	(1)
11	0,17
12	0,18
13	0,20
14	0,21
15	0,22
16	0,23
17	(1)
18	0,27
19	0,28
20	0,31
21	0,33
22	0,34
23	(1)
24	(1)
25	0,36
26	0,39
27	0,39
28	0,40

1. Leitura não realizada

Tabela 6.16: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 4 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,01
2	0,03
3	(1)
4	0,06
5	0,07
6	0,08
7	0,08
8	0,10
9	0,11
10	(1)
11	0,15
12	0,17
13	0,19
14	0,19
15	0,21
16	0,22
17	(1)
18	0,25
19	0,27
20	0,30
21	0,31
22	0,32
23	(1)
24	(1)
25	0,34
26	0,36
27	0,36
28	0,38

1. Leitura não realizada

Tabela 6.17: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 5 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,01
2	0,02
3	(1)
4	(1)
5	0,03
6	0,02
7	0,02
8	0,03
9	0,03
10	(1)
11	(1)
12	0,05
13	0,04
14	0,04
15	0,06
16	0,05
17	(1)
18	(1)
19	0,06
20	0,07
21	0,07
22	0,08
23	0,09
24	(1)
25	(1)
26	(1)
27	0,09
28	0,09

1. Leitura não realizada

Tabela 6.18: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 6 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,01
2	(1)
3	(1)
4	0,03
5	0,03
6	0,03
7	0,05
8	0,06
9	(1)
10	(1)
11	0,10
12	0,10
13	0,11
14	0,12
15	0,11
16	(1)
17	(1)
18	0,15
19	0,16
20	0,16
21	0,16
22	0,17
23	(1)
24	(1)
25	0,19
26	0,20
27	0,20
28	0,21

1. Leitura não realizada

Tabela 6.19: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 7 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,01
2	0,01
3	(1)
4	(1)
5	0,03
6	0,03
7	0,04
8	0,05
9	0,06
10	(1)
11	(1)
12	0,08
13	0,08
14	0,09
15	0,10
16	0,10
17	(1)
18	(1)
19	0,12
20	0,12
21	0,13
22	0,14
23	(1)
24	(1)
25	(1)
26	0,16
27	0,17
28	0,18

1. Leitura não realizada

Tabela 6.20: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 8 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,01
2	0,01
3	(1)
4	(1)
5	0,02
6	0,03
7	0,04
8	0,04
9	0,05
10	(1)
11	(1)
12	0,07
13	0,07
14	0,07
15	0,09
16	0,09
17	(1)
18	(1)
19	0,10
20	0,11
21	0,11
22	0,12
23	(1)
24	(1)
25	(1)
26	0,14
27	0,15
28	0,15

1. Leitura não realizada

Tabela 6.21: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 9 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,01
2	0,01
3	(1)
4	(1)
5	0,02
6	0,02
7	0,02
8	(1)
9	(1)
10	(1)
11	(1)
12	0,03
13	0,03
14	0,04
15	0,04
16	0,04
17	(1)
18	(1)
19	0,05
20	0,05
21	0,05
22	0,05
23	0,05
24	(1)
25	(1)
26	0,05
27	0,05
28	0,05

1. Leitura não realizada

Tabela 6.22: Variação dimensional das barras de argamassa da amostra 10 (ABCP, 2007)

Idade de cura em solução alcalina (dias)	Variações dimensionais médias (%) determinadas na barra de argamassa preparada com o agregado + cimento padrão fornecido pela ABCP
1	0,00
2	(1)
3	(1)
4	(1)
5	0,01
6	0,02
7	0,01
8	0,02
9	(1)
10	(1)
11	(1)
12	0,04
13	0,04
14	0,03
15	0,04
16	0,04
17	(1)
18	(1)
19	(1)
20	0,05
21	0,06
22	0,06
23	0,06
24	(1)
25	(1)
26	0,07
27	0,07
28	0,07

1. Leitura não realizada

Os gráficos da Figura 6.11 apresentam o comportamento expansivo dos agregados com referência à idade de 28 dias de cura em solução alcalina.

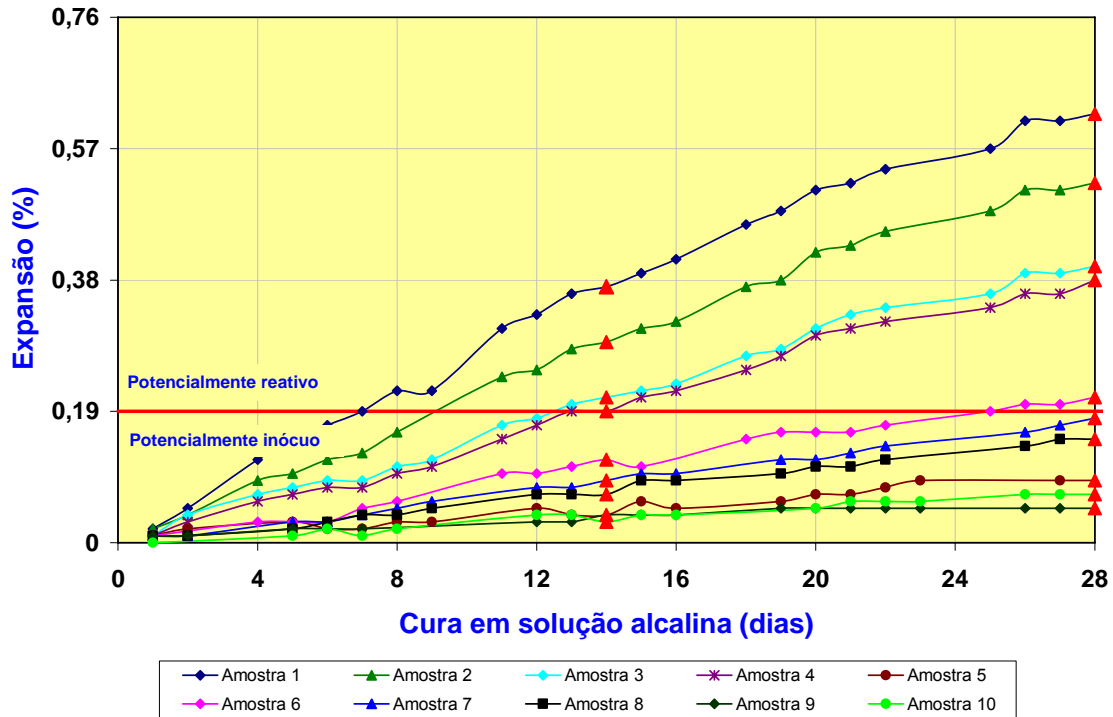


Figura 6.11: Expansão x Cura em solução alcalina

Nota-se na Figura 6.11 o limite de expansão de 0,19% para a classificação do agregado quanto à potencialidade à RAA.

A Tabela 6.23 apresenta uma síntese dos resultados obtidos e a classificação dos agregados analisados.

Tabela 6.23: Síntese dos resultados obtidos e classificação dos agregados

Amostra	Tipo	Expansão aos 28 dias de cura em solução alcalina (%)	Classificação quanto à Reação Álcali-Agregado
1	Metamórfica	0,62	Potencialmente Reativo
2	Metamórfica	0,52	Potencialmente Reativo
3	Metamórfica	0,40	Potencialmente Reativo
4	Metamórfica	0,38	Potencialmente Reativo
5	Ígnea	0,09	Potencialmente Inócuo
6	Metamórfica	0,21	Potencialmente Reativo
7	Metamórfica	0,18	Potencialmente Inócuo
8	Metamórfica	0,15	Potencialmente Inócuo
9	Metamórfica	0,05	Potencialmente Inócuo
10	Ígnea	0,07	Potencialmente Inócuo

A Figura 6.11 e as Tabelas 6.12 e 6.23 resumem os resultados das análises efetuadas (petrografia e expansão em barras) nas amostras (n^{os} 1 a 10) quanto à potencialidade do agregado à RAA. Tais análises permitiram classificar as amostras em potencialmente reativas e potencialmente inócuas.

7. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Com base dos estudos realizados observou-se que os agregados apresentaram características diferenciadas entre si, conforme a análise petrográfica e os ensaios de verificação da expansão dimensional em barras de argamassa pelo método acelerado, expressos resumidamente na Tabela 7.1 abaixo.

Tabela 7.1: Resumo dos resultados da análise petrográfica e da variação dimensional em barras de argamassa

Amostra	Tipo	Classificação quanto à Reação Álcali-Agregado	
		Análise Petrográfica	Varição Dimensional
1	Metamórfica	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
2	Metamórfica	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
3	Metamórfica	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
4	Metamórfica	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
5	Ígnea	Potencialmente Reativo	Potencialmente Inócuo
6	Metamórfica	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
7	Metamórfica	Potencialmente Reativo	Potencialmente Inócuo
8	Metamórfica	Potencialmente Reativo	Potencialmente Inócuo
9	Metamórfica	Potencialmente Inócuo	Potencialmente Inócuo
10	Ígnea	Potencialmente Inócuo	Potencialmente Inócuo

Observa-se que os agregados n^{os} 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 10 obtiveram a mesma classificação quanto a sua potencialidade frente à RAA para a análise petrográfica e o ensaio de variação dimensional em barras de argamassa. Já os agregados n^{os} 5, 7 e 8 foram classificados como potencialmente reativos na análise petrográfica e como potencialmente inócuos no ensaio de variação dimensional em barras de argamassa, pois obtiveram resultados de expansão aos 28 dias de imersão em cura alcalina inferior ao limite definido pela ABNT NBR 15577/2008 que é de 0,19 %. Entretanto, cabe lembrar que o limite apresentado pela norma foi determinado a partir de ensaios experimentais realizados em diversos agregados brasileiros e que o mesmo não deve ser tomado como regra determinística e exata para a classificação de um determinado agregado, sendo importante a consideração de

leituras anteriores para uma real avaliação da curva de expansão do material em estudo, o que pôde ser verificado na Figura 6.11.

Os agregados que se encontram acima do limite de expansão de 0,19% são considerados reativos e antes de determinar o uso ou não destes agregados deve-se voltar aos fluxogramas das Figuras 5.2 e 5.3 para tomar as medidas mitigadoras pertinentes.

Os agregados que margeiam o limite inferior do gráfico, embora classificados como inócuos, apresentaram uma curva de expansão alta, levando-se a acreditar em uma manifestação de RAA em um espaço de tempo maior do que os agregados já classificados propriamente como reativos. Já os agregados inócuos com comportamento linearmente constante, indicaram que em caso de ocorrência da RAA, a mesma se dará em um espaço de tempo demasiadamente longo, o que permite o seu uso com maior segurança no que se refere à durabilidade da estrutura.

Quando comparado o método brasileiro com o método de avaliação da norma americana para o ensaio de verificação da expansão das barras de argamassa, observou-se a mesma classificação para os agregados estudados. Segundo a norma ASTM C 1260-05a/2005, a expansão média aos 14 dias de cura em solução alcalina é tomada como valor de referência para a estimativa da reatividade potencial do agregado com os álcalis. Valores de expansão superior a 0,20% aos 14 dias de cura em solução alcalina indicam que o agregado é reativo e que entre 0,10% e 0,20%, o agregado é potencialmente reativo, necessitando de ensaios complementares para decisão quanto ao uso. Valores de expansão inferiores a 0,10% indicam que o agregado é inócuo. A Tabela 7.2 apresenta os resultados da expansão das barras de argamassa obtidos no ensaio da ABNT NBR 15577 em comparação a norma ASTM C 1260-05a.

**Tabela 7.2: Variação dimensional em barras de argamassa:
ASTM C1260 x ABNT NBR 15577**

Variação Dimensional em Barras de Argamassa				
Amostra	ASTM C 1260		ABNT NBR 15577	
	Expansão aos 14 dias de cura em solução alcalina (%)	Classificação quanto à Reação Álcali-Agregado	Expansão aos 28 dias de cura em solução alcalina (%)	Classificação quanto à Reação Álcali-Agregado
1	0,37	Reativo	0,62	Potencialmente Reativo
2	0,29	Reativo	0,52	Potencialmente Reativo
3	0,21	Reativo	0,40	Potencialmente Reativo
4	0,19	Potencialmente Reativo	0,38	Potencialmente Reativo
5	0,04	Inócuo	0,09	Potencialmente Inócuo
6	0,12	Potencialmente Reativo	0,21	Potencialmente Reativo
7	0,09	Inócuo	0,18	Potencialmente Inócuo
8	0,07	Inócuo	0,15	Potencialmente Inócuo
9	0,04	Inócuo	0,05	Potencialmente Inócuo
10	0,03	Inócuo	0,07	Potencialmente Inócuo

A norma americana apresenta três classificações quanto à RAA: Inócuo, potencialmente reativo e reativo. Já a norma brasileira ABNT NBR 15577 apresenta apenas duas classificações: Potencialmente inócuo e potencialmente reativo. Deste modo os resultados da ASTM se enquadram em potencialmente inócuos, os apresentados como inócuos, e potencialmente reativo, os agregados classificados como reativos, confirmando a confiabilidade do método brasileiro.

8. CONCLUSÕES

O estudo realizado permitiu atingir os objetivos propostos, ou seja, avaliar a potencialidade de ocorrência da RAA por meio da análise petrográfica associada aos resultados de ensaios de expansões de barras de argamassa pelo método acelerado.

Tratam-se de avaliações preventivas que podem anteceder problemas futuros em estruturas de concreto, que estão sob ações da umidade.

A reação álcali-agregado requer a atuação conjunta de água, agregado reativo e álcalis. Sua prevenção pode ser feita a partir da eliminação de um dos fatores, ou seja, a partir do emprego de agregados inertes ou de cimentos com baixos teores de álcalis ou isolamento da umidade. Com a eliminação de um desses fatores, pode-se fazer o emprego de agregados reativos em obras de construção civil.

A partir dos estudos realizados com as amostras de agregados, conclui-se que a análise petrográfica ou o ensaio de variação da expansão das barras de argamassa pelo método acelerado não são suficientes para se avaliar, isoladamente, a expansão potencial deletéria devida à reação álcali-agregado. Ambos, isoladamente, fornecem informações importantes para essa avaliação.

Quando o agregado é considerado potencialmente reativo, não havendo na região outro agregado disponível ou não sendo possível a sua substituição, deve-se realizar estudos profundos que busquem a utilização de materiais inibidores da RAA no concreto. Tais medidas podem ser estudadas com maiores detalhes nos itens 5 e 6 da ABNT NBR 15577/2008.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. Boletim Técnico: **Guia básico de utilização de Cimento Portland** - BT 106. São Paulo, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10520**: apresentação de citações em documentos: procedimento. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15577-1**: Reatividade álcali-agregado – Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15577-4**: Reatividade álcali-agregado – Determinação da expansão em barras pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15577-6**: Reatividade álcali-agregado – Determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2008.

ASTM C-1260/05a. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2005. section 4 (Construction), v.04.02 (Concrete and Aggregates).

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio. In: **Simpósio sobre Reatividade álcali-Agregado em Estruturas de Concreto**. Goiânia, 1999. 135p.

DNPM-MME-BRASIL. Decreto-Lei nº 7.841 de 8 de Agosto de 1945. **Código de Águas Minerais**. Diário Oficial da União, Rio de Janeiro, 20 Ago. 1945. Seção 1, pt. 1.

DNPM-MME-BRASIL. **Código de Mineração**. Diário Oficial da União, Brasília, 15 Março 1967.

FRAZÃO, E.E. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil**. São Paulo: ABGE, 2002.

- FURNAS (Laboratório de Concreto). **Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo: Ensaio e Propriedades**. Editor Walter Pacelli de Andrade. São Paulo: Pini, 1997.
- HASPARIK, N.P. **Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali-Agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil-UFG, 1999 – 256 p.
- KUPERMAN, S.C. (relator) **Tema 96 – Concreto nas Obras de Barragens XXVI** Seminário Nacional de Grandes Barragens. Goiânia: CBDB, 2005.
- LEINZ, VIKTOR; AMARAL, SÉRGIO ESTANISLAU. **Geologia Geral**. Cia. Editora Nacional, São Paulo, 1989.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Ed. São Paulo: Pini, 1994.
- MUNHOZ, F.A.C. **Efeitos de Adições Ativas na Mitigação da Reação Álcali-Sílica e Álcali-Silicato**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: 2007.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. 2ª ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.
- PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland**. 12ª ed. São Paulo: Globo, 1993.
- RODRIGUES, E.P. **Parâmetros Texturiais de Deformação em “Granitóides” e sua Relação com a Reação Álcali-Agregado: Aplicação ao Concreto da Barragem de Pedro Beicht**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências-USP, 1994. 215p.
- SANTOS, A.J.G. dos. Comunicação pessoal. **Universidade Anhembi Morumbi**, São Paulo, 2005.
- SOUZA, V.C.M. de; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998.
- SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **História do Cimento no Brasil**. (arquivo pdf – acesso em 17 de agosto de 2008).

TARTUCE, R.; GIOVANETTI, E. **Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland**. 1ª ed. São Paulo: Pini: IBRACON, 1990.