



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Gabriela Barbosa Bruno

**CONTRIBUIÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS
COMERCIALIZADOS NA GRANDE NATAL COM ÊNFASE NA
REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

**Natal
2014**

Gabriela Barbosa Bruno

**CONTRIBUIÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS
COMERCIALIZADOS NO RIO GRANDE DO NORTE COM
ÊNFASE NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil, da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Maria das Vitórias Vieira de Almeida de Sá

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Natal
2014

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Bruno, Gabriela Barbosa.

Contribuição na caracterização de agregados comercializados no Rio Grande do Norte com ênfase na reação álcali-agregado / Gabriela Barbosa Bruno. – Natal, RN, 2014.

116 f. : il.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira de Almeida de Sá.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Argamassa - Dissertação. 2. Agregados - Dissertação. 3. Patologia das construções - Dissertação. 4. Reação álcali-agregado - Dissertação. I. Sá, Maria das Vitórias Vieira de Almeida de. II. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 666.971.4

GABRIELA BARBOSA BRUNO

**CONTRIBUIÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS
COMERCIALIZADOS NO RIO GRANDE DO NORTE COM ÊNFASE
NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira de Almeida de Sá – Orientadora (UFRN)

Prof^a. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Co-orientador (IFRN)

Prof. Dr. José Neres da Silva Filho – Examinador Externo ao Programa (UFRN)

Prof. Dr^a. Ana Cecília Vieira da Nóbrega – Examinadora Externa à Instituição (UFPE)

Natal, 04 de agosto de 2014.

CONTRIBUIÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS COMERCIALIZADOS NO RIO GRANDE DO NORTE COM ÊNFASE NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Gabriela Barbosa Bruno

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira de Almeida de Sá

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

RESUMO

Existem várias formas de deterioração do concreto, dentre elas, a reação álcali-agregado (RAA) está inserida na categoria de degradação através de processo químico. Como resultado ocorre uma interação entre os componentes do concreto que o fragilizam, podendo causar fissuração, perda de resistência, aumento da deformação, redução da durabilidade, além de outros prejuízos. Diante do exposto, faz-se necessário conhecer os agregados comercializados na região quanto à possibilidade de reação com os álcalis do cimento, de forma a contribuir com a comunidade técnica quanto a prevenção da reação. O presente trabalho tem por objetivo analisar as características de alguns agregados comercializados no Rio Grande do Norte (RN), enfatizando o seu comportamento com relação à reação álcali agregado através do ensaio de reatividade recomendado por norma, além de análises das propriedades da argamassa, produzida para a análise da reação álcali-agregado, após exposição às condições do ensaio de reatividade, avaliando a resistência à compressão, tração na flexão, propriedades elásticas e análises microestruturais, empregando dois tipos de cimento (CPV ARI-RS e Cimento Padrão). Os resultados encontrados nesta pesquisa não indicaram presenças de formas reativas nos agregados do RN, houveram apenas pequenos pontos onde a reação se desenvolveu, mas no geral não foram encontradas expansões acima das especificadas pela norma. Com relação à comparação do comportamento dos dois tipos de cimento estudados, não foram encontradas diferenças significativas nas propriedades da argamassa. As mesmas apresentaram comportamentos semelhantes para os dois tipos de cimentos.

Palavras-chave: argamassa, agregados, patologia das construções, reação álcali-agregado.

CONTRIBUTION ON AGGREGATE CHARACTERISTICS SOLD IN RIO GRANDE DO NORTE WITH EMPHASIS ON ALKALI-AGGREGATE REACTION

Gabriela Barbosa Bruno

Adviser: Prof^ª. Dr^ª. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Co-adviser: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

ABSTRACT

There are various forms of concrete deterioration, among them, the alkali-aggregate reaction (AAR) is included in category of degradation through chemical process. As a result of an interaction between the components of concrete occurring its weaken, it may cause cracking, loss of strength, increased deformation, reduced durability, and other losses. Given the above, it is necessary to know the aggregate marketed in this region about the possibility of reaction with alkalis of cement, in order to contribute to the technical community and the prevention of reaction. This study aims to analyze the characteristics of some aggregates commercialized in Rio Grande do Norte (RN), emphasizing their behavior related to alkali-aggregate reaction by testing its reactivity normally recommended, and the analysis of the mortar properties after exposure to reactivity conditions, evaluating the compressive strength, the bending strength, elastic properties and microstructural analysis using two types of cement. The findings of this study indicated no presence of reactive forms on aggregates, there was just small points where the reaction developed but overall no expansions above specified by the standard. The comparison of the behavior of the two types of cement, no major differences were found in the mortar properties. The behaviors of mortars were similar for both types of cements.

Keywords: mortar, aggregate, pathologies in construction, alkali-aggregate reaction.

A Deus,

A João, Maria, João

Maria sempre presentes

Agradecimentos

A Deus, sem Ele nada disso seria possível.

Ao meu avô, apesar de nunca ter estudado, aprendeu na escola da vida e foi a pessoa mais inteligente de quem ouvi falar. Me orgulho muito dos ensinamentos que ele deixou a minha mãe e que chegaram até mim.

Aos meus pais, pela dedicação e cuidado, apoio incondicional aos meus estudos, agradeço por terem sempre me ensinado o valor do conhecimento.

A João Maria, não somente pelo carinho e paciência, mas também por estar sempre disponível a me ajudar, me acalmar, me ouvir, trabalhar junto comigo nos ensaios, enfim, infindáveis ajudas, não existem palavras para expressar minha gratidão.

À professora Maria das Vitórias, pela confiança e orientação, pelos conselhos, por entender minhas angústias, pelos “puxões de orelha”, tudo foi válido para eu chegar aqui hoje.

Ao professor Marcos pela orientação e ajuda, pelo apoio de diversas formas à parte experimental e pelas contribuições significativas ao trabalho.

Aos professores da UFRN que de alguma forma me ajudaram na conclusão deste trabalho.

Aos professores do IFRN, em especial Valtencir, Edilberto e Márcio que sempre estavam dispostos a me ajudar e abertos a discussões.

Aos técnicos e bolsistas dos laboratórios do IFRN, especialmente Aline, Thiago, Klécio, Thomaz e Evilane que pelos auxílios e ideias durante a pesquisa, além dos técnicos Leonardo e Bruna que também me ajudaram durante os ensaios, deixo ainda aqui um agradecimento especial a minha bolsista Amanda, que muito se dedicou a minha pesquisa.

A empresa TECOMAT, pela disponibilidade na realização do ensaio de reatividade.

A Prof. Ana Cecília pelo empréstimo dos equipamentos e formas utilizadas nos ensaios.

Ao IFRN por abrir as portas dos seus laboratórios para que fosse possível a conclusão desta dissertação.

A todos os meus amigos que aguentaram minha ausência, que me ajudaram de inúmeras formas. Aos amigos que fiz ao longo dessa jornada. Todos contribuíram com o meu sucesso.

A secretaria do PEC, que sempre se mostraram prestativos e dispostos a ajudar.

A CAPES, pelo suporte financeiro através da bolsa de mestrado.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre ...	8
Figura 2.2 - Rocha formada a partir da união de minerais.....	12
Figura 2.3 - O ciclo das rochas.....	13
Figura 2.4 - Exemplo de formação de rocha ígnea intrusiva e extrusiva	14
Figura 2.5 - Composição química dos magmas formadores de rochas ígneas.....	15
Figura 2.6 - Relações entre características de rochas ígneas e sua classificação	16
Figura 2.7 - Processo de formação de rochas sedimentares.....	17
Figura 3.1 - Bloco de fundação de edifícios residenciais da cidade de Recife com RAA	22
Figura 3.2 - Detalhe da amostra retirada do bloco de fundação	22
Figura 3.3 - Fluxograma de desenvolvimento da reação	24
Figura 3.4 - Expansão devida à RAS em amostras de argamassa submetidas a diferentes umidades relativas.....	27
Figura 3.5 - Cristais de quartzo microcristalino (QM) que, associado a quartzo recristalizado (QR), conferem ao agregado caráter reativo (F=feldspato)	28
Figura 3.6 - Expansão pela reação álcali-álica de acordo com a natureza do agregado (agregado reativo 315-1.250 μm , tamanho do prisma: 20x20x160 mm)	30
Figura 3.7 - Influência do teor de agregado reativo, em relação a quantidade total de agregado na expansão	31
Figura 3.8 - Relação entre a porcentagem de expansão e o tamanho das partículas.....	31

Figura 3.9 - Efeito do tipo e quantidade de adições cimentícias presentes na solução dos poros	33
Figura 3.10 - Agregados utilizados com diferentes teores de álcalis e diferentes graus de reatividade	34
Figura 3.11 - Ruptura das ligações do grupo siloxano pelo pH elevado	35
Figura 3.12 - Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas	36
Figura 3.13 - Esquema de progressão e consequência da expansão da RAA.....	37
Figura 3.14 - Fragmento de agregado com borda no seu entorno.	40
Figura 3.15 - Produtos cristalizados da RAA no poro	41
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no procedimento experimental.....	47
Figura 4.2 - Agregados separados na granulometria exigida	50
Figura 4.3 - Agregados graníticos utilizados.....	53
Figura 4.4 - Fluxograma de exposição às condições de RAA	56
Figura 4.5 – Corpos de prova de argamassa durante o ensaio	57
Figura 4.6 - Corpos de Prova J1.....	58
Figura 4.7 - Corpos de Prova J2.....	58
Figura 4.8 - Corpos de Prova J3.....	58
Figura 4.9 - Corpos de Prova J4.....	58
Figura 4.10 - Dimensões do corpo de prova sendo conferidas.....	59
Figura 4.11 - Ensaio de ultrassom sendo realizado em corpo de prova de argamassa.....	59
Figura 4.12 - Ensaio de tração na flexão dos CP's submetidos à 28 dias de solução de NaOH	60
Figura 4.13 - Rompimento de CP de argamassa submetido à compressão.....	61

Figura 4.14 - Moldagem dos corpos de prova de argamassa.....	62
Figura 4.15 - Leitura das barras no relógio comparador	62
Figura 4.16 - Recipiente utilizado para acondicionar as barras em solução de NaOH	63
Figura 5.1 - Agregado da jazida J1.....	66
Figura 5.2 - Agregado da jazida J2.....	66
Figura 5.3 - Agregado da jazida J3.....	66
Figura 5.4 - Agregado da jazida J4.....	66
Figura 5.5 – Mapa geológico do Rio Grande do Norte.....	51
Figura 5.6 - Indicação da Jazida J1 em mapa geológico	52
Figura 5.7 - Indicação da Jazida J2 no mapa geológico	52
Figura 5.8 – Indicação da Jazida J3 e J4.....	53
Figura 5.9 - DRX dos agregados utilizados nos ensaios	69
Figura 5.12 - Poro de CP moldado com CPV ARI-RS	71
Figura 5.13 - Zona de transição do CP moldado com Cimento-Padrão.	71
Figura 5.14 - Poro de argamassa moldada com CPV ARI-RS e agregado J2	73
Figura 5.15 - Poro com deposições dentro (cimento padrão e agregado J2)	73
Figura 5.16 - Ampliação do poro com formação de gel na amostra J2..	75
Figura 5.17 - Poro do CP moldado com CPV ARI-RS e agregado J3 ...	76
Figura 5.18 - Poro e zona de transição de CP moldado com cimento padrão e agregado J3	76
Figura 5.19 - Zona de transição entre pasta e agregado moldado com cimento CPV ARI-RS (agregado J4)	78
Figura 5.20 - Poro com deposições no seu interior (ponto 2) – corpo de prova moldado com cimento padrão (agregado J4)	78

Figura 5.21 - Detalhe de um CP moldado com cimento padrão que apresentava fissuras aparentes (foram destacadas as fissuras para melhor visualização).....	80
Figura 5.22 - Corpos de prova de argamassa com CPV ARI-RS após 28 dias em solução de NaOH.....	81
Figura 5.23 - Gráfico comparando as resistências à tração na flexão dos CP's estudados	82
Figura 5.24 - Gráfico comparando as resistências à compressão dos CP's estudados	84
Figura 5.25 - Gráfico indicando e comparando os módulos de elasticidade dinâmico encontrado nos corpos de prova.....	87
Figura 5.26 – Gráfico da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Geometria das células unitárias para sistemas cristalinos ..	7
Tabela 2.2 - Classes químicas de minerais	9
Tabela 2.3 - Classificação sistemática dos minerais da classe dos silicatos.....	10
Tabela 2.4 - Minerais mais comuns formadores de rochas	11
Tabela 3.1 - Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado ...	29
Tabela 3.2 - Medidas de mitigação	38
Tabela 3.3 - Estruturas de concreto com evidências de RAA.....	43
Tabela 4.1 - Ficha técnica do cimento padrão (informações cedidas pela Tecomat)	48
Tabela 4.2 - Ficha técnica do cimento CPV ARI-RS.....	49
Tabela 4.3 - Quantitativos de cimento e água utilizados na moldagem dos corpos de prova (25x25x285) mm, juntamente com a granulometria do agregado miúdo	55
Tabela 5.1 - Massas específicas dos agregados utilizados	65
Tabela 5.2 - FRX dos agregados utilizados nos ensaios	67
Tabela 5.3 - Fluorescência de raios-X em argamassa utilizando CPV ARI-RS	70
Tabela 5.4 - Fluorescência de raios-X em argamassa utilizando cimento padrão	70
Tabela 5.5 - EDS da amostra J1 com CPV ARI-RS.....	72
Tabela 5.6 - EDS da amostra J1 com cimento padrão	72
Tabela 5.7 - EDS da amostra J2 com CPV ARI-RS.....	74
Tabela 5.8 - EDS da amostra J2 com cimento padrão	74
Tabela 5.9 - EDS da amostra J3 com CPV ARI-RS.....	76

Tabela 5.10 - EDS da amostra J3 com cimento padrão	77
Tabela 5.11 - EDS da amostra J4 com CPV ARI-RS.....	78
Tabela 5.12 - EDS da amostra J4 com cimento padrão	78
Tabela 5.13 - Redução da resistência à tração na flexão entre os corpos de prova expostos ou não a reação	83
Tabela 5.14 - Redução da resistência entre os corpos de prova expostos ou não a reação	84
Tabela 5.16 - Valores da velocidade do pulso ultrassônico em CP's prismáticos	86
Tabela 5.17 - Valores do módulo de elasticidade dinâmico encontrados para cada jazida com os diferentes tipos de cimento e o comparativo com os CP's não expostos a RAA	88

Sumário

CAPÍTULO 1.....	1
Introdução e Relevância da Pesquisa	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivo Geral	3
1.3 Objetivos específicos.....	3
1.4 Estrutura da pesquisa.....	3
CAPÍTULO 2.....	5
Minerais e Rochas	5
2.1 Minerais:.....	5
2.1.1 Minerais formadores de rocha:.....	8
2.2 Rochas	11
2.2.1 Classificação das rochas.....	14
2.2.1.1 Rochas Ígneas (magmáticas).....	14
2.2.1.2 Rochas sedimentares.....	16
2.2.1.3 Rochas metamórficas.....	18
CAPÍTULO 3.....	20
A Reação Álcali-Agregado	20
3.1 Tipos de reação álcali-agregado	22
3.1.1 Reação álcali-sílica.....	22
3.1.2 Reação álcali-silicato:.....	23
3.1.3 Reação álcali-carbonato.....	24
3.2 O papel de cada agente na RAA.....	25
3.2.1 Umidade:	25

3.2.2	Agregado reativo:	27
3.2.3	Concentração de álcalis:	32
3.3	Como ocorre a reação álcali-sílica	34
3.4	Medidas de mitigação.....	37
3.5	Métodos de investigação da RAA.....	39
3.5.1	Análise petrográfica.....	39
3.5.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	40
3.5.3	Método acelerado em barras de argamassa	41
3.5.4	Método para avaliar a combinação cimento/agregado	42
3.5.5	Método dos prismas de concreto.....	42
3.6	Casos de RAA no Brasil	43
CAPÍTULO 4.....		45
Metodologia Experimental		45
4.1	Materiais.....	48
4.1.1	Cimento	48
4.1.2	Água e Solução de NaOH	49
4.1.3	Agregado.....	49
4.2	Dosagem moldagem e cura dos CPs	54
4.2.1	Caracterização granulométrica.....	54
4.3	Ensaio realizados	55
4.3.1	Massa específica.....	55
4.3.2	Exposição às condições de RAA.....	55
4.3.3	Velocidade do pulso ultrassônico	58
4.3.4	Cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.....	59
4.3.5	Ensaio de tração na flexão e compressão.....	60

4.3.6	Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.....	61
4.3.7	Caracterização química, cristalográfica e microestrutural	64
4.3.7.1	Microscopia eletrônica de varredura	64
4.3.7.2	Fluorescência de raios-X.....	64
CAPÍTULO 5.....		65
Resultados e Discussões		65
5.1	Caracterização dos agregados.....	65
5.1.1	Caracterização da microestrutura.....	67
5.1.1.1	Argamassas	69
5.2	Propriedades mecânicas e elásticas das argamassas	81
5.2.1	Resistência à tração na flexão	81
5.2.2	Resistência à compressão	83
5.2.3	Velocidade do pulso ultrassônico	85
5.2.4	Módulo de elasticidade dinâmico.....	87
5.3	Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.....	89
CAPÍTULO 6.....		91
Conclusões		91
Referências.....		93

CAPÍTULO 1

Introdução e Relevância da Pesquisa

O concreto, caso tenha sido bem projetado, deve atender as necessidades de resistência, e durabilidade, esta, implica em resistências as ações no meio ambiente e as ações internas. Dentro das ações externas ao concreto estão os ataques químicos, que podem ser do tipo: ataque por íons cloreto, ataque por sulfato, ataques ácidos, dióxido de carbono e a reação álcali-agregado (RAA) (MUNHOZ, 2007).

Dentro deste tema, a questão da durabilidade dos materiais é um ponto determinante para solução para que se evite ao máximo a necessidade de alguma intervenção para fins de reparo.

Uma forma de se evitar “surpresas” com relação à durabilidade das edificações e o conhecimento das propriedades dos materiais que serão utilizados. Seguindo este raciocínio, cabe citar o caso do concreto, onde os materiais constituintes (cimentos, agregados, água e aditivos), é que conferem a ele, suas características de durabilidade, desta maneira, deve ser verificado o emprego correto desses materiais.

O escopo deste trabalho tratará a reação álcali-agregado, sendo o efeito originado da reação entre os hidróxidos alcalinos dissolvidos na fase líquida dos poros e algumas fases reativas dos agregados. Resultando numa fragilização do concreto podendo ocasionar problemas estruturais. Mesmo tendo sido descoberta por Stanton em 1940, ainda existem muitos mistérios acerca dos mecanismos envolvidos na reação e principalmente as formas de tratamento após o seu desenvolvimento.

Como visto anteriormente, para que ocorra a RAA é necessária a coexistência dos seguintes fatores: água, álcalis no cimento e agregado reativo, portanto, para que se evite a reação, é indispensável que se elimine um dos fatores que causa a reação, ou seja: reduzir a quantidade de álcalis do

cimento, abolir a água do concreto, ou trocar o agregado. Quando nenhuma das alternativas citadas é possível, existem medidas mitigadoras que podem ser tomadas, sendo algumas descritas na própria norma que rege a reação. (BATTAGIN *et al.*, 2010)

Este é um tema que vem sendo cada vez mais discutido em congressos como IBRACON e tem sido preocupação de construtores do país. Existem inúmeros casos identificados no Brasil, inclusive relatos extraoficiais de casos confirmados de RAA no estado do Rio Grande do Norte, os mesmos nunca foram divulgados e também não existe a comprovação da presença de fases reativas nos agregados da região.

Nesse cenário, pode-se conhecer os agregados comercializados na região de posse a verificar suas reatividades em relação a reação álcali-agregado.

1.1 Justificativa

Esse tipo de reação vem sendo cada vez mais estudada no universo acadêmico brasileiro nos últimos anos, principalmente após 2008 com o advento da norma NBR 15577 (ABNT, 2008a), que rege o assunto e pelo fato de ser uma reação muitas vezes lenta. No Brasil, as edificações são relativamente jovens, apenas nas últimas décadas detectaram-se vários casos, em especial, na cidade de Recife-PE onde existem vários casos de RAA em edifícios, que são mais difíceis de serem identificados (ANDRADE *et al.*, 2006).

Os custos para reparar os efeitos da reação álcali-agregado são muito elevados, necessitando em alguns casos de um monitoramento contínuo da estrutura, ou construção de novas fundações no caso de edifícios, portanto, nesse caso é pertinente prevenir o surgimento desta patologia (HASPARYK, 2005).

Tendo em vista a grande quantidade de barragens de terra dentro do Rio Grande do Norte e que estas algumas vezes possuem estruturas de concreto, surge a necessidade de conhecer as características de comportamento dos agregados presentes na região com relação a essa patologia.

Sabendo da inexistência de um mapeamento dos agregados comercializados em Natal e regiões metropolitanas com relação à reação álcali-agregado, e que já existe a suspeita de aparecimento desta patologia em alguns edifícios da capital, é de grande importância, o estudo do tema, de forma a contribuir com a durabilidade das obras do Rio Grande do Norte.

1.2 Objetivo Geral

Identificar o potencial reativo de uma amostragem de agregados comercializados no Rio Grande do Norte através dos ensaios acelerados com barras de argamassa e verificar algumas propriedades da argamassa quando expostas aos ensaios de reatividade.

1.3 Objetivos específicos

- Contribuir com o conhecimento dos agregados graúdos produzidos na Grande Natal-RN: análise química, massa específica e caracterização mineralógica.
- Avaliar o potencial reativo dos agregados através de ensaios de expansão acelerada com barras de argamassa.
- Identificar as propriedades químicas, cristalográficas e microestruturais em argamassas após ensaios de reatividade RAA e mecânicas através de ensaios de resistência, ultrassom e análises microscópicas.
- Avaliar a influência do cimento CPV ARI-RS no comportamento das argamassas.

1.4 Estrutura da pesquisa

O trabalho está dividido em cinco capítulos organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO – Apresenta uma introdução, contendo a importância, justificativa e relevância do tema em estudo, além dos objetivos, hipótese estudada e a estrutura da pesquisa.

Capítulo 2 – MINERAIS E ROCHAS – Consiste numa revisão da literatura apresentando os principais aspectos das rochas. É apresentada uma introdução teórica sobre rochas e minerais dando destaque aos conceitos relativos as rochas ígneas e metamórficas;

Capítulo 3 – A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO – Apresenta uma revisão da literatura enfatizando aspectos gerais sobre a RAA, mecanismos de expansão e fatores intervenientes.

Capítulo 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – São detalhadas as características dos materiais, o planejamento dos experimentos, como também os métodos de ensaios aplicados.

Capítulo 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES – Expõem-se os resultados obtidos e as discussões sobre os mesmos.

Capítulo 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS – São apresentadas as considerações finais sobre o assunto e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Minerais e Rochas

Para entender o que é uma rocha é necessário entender inicialmente sobre os minerais que são os constituintes básicos das rochas, em virtude do tipo de agregado utilizado no procedimento experimental será dada uma maior ênfase as rochas ígneas neste capítulo.

2.1 Minerais:

Os minerais são definidos pelos geólogos como uma substância de ocorrência natural, sólida, cristalina, geralmente inorgânica, com uma composição química específica, sendo ainda componentes homogêneos, não podendo ser dividido por meios mecânicos (PRESS *et al.*, 2006). Considerando a visão da Ciência dos Materiais, Van Vlack (1984) define os minerais como fases cerâmicas ou fases de uma rocha.

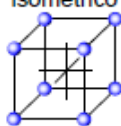
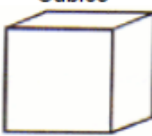
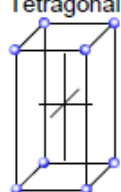
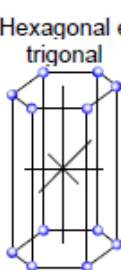
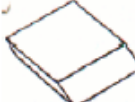
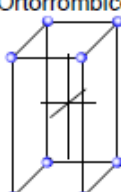
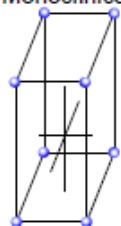
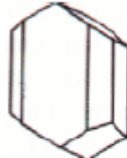
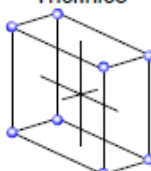
Para o melhor entendimento dos minerais, faz-se necessário o esclarecimento de alguns conceitos referentes aos mesmos, Dana e Hurlbut (1969), Ernst (1971) e Santos (1989) *apud* Couto (2008), esclarecem alguns desses conceitos:

- Mineral: qualquer partícula mineral limitada por faces planas – faces de cristal – que possui uma relação geométrica definida quanto ao arranjo atômico;
- Mineralóide: ocorre naturalmente na natureza na forma sólida, e não possui um arranjo sistemático (cristalino) dos átomos constituintes;
- Argilomineral: possui granulação fina e são minerais constituídos de silicatos de alumínio hidratado ou filossilicatos;

Os minerais são formados através do processo de cristalização, tratando-se de um processo de crescimento de um sólido a partir de um gás ou líquido, cujos átomos constituintes agrupam-se seguindo proporções químicas

e arranjos cristalinos tridimensionais adequados. A Tabela 2.1 demonstra os tipos de sistemas cristalinos que podem ser encontrados:

Tabela 2.1 - Geometria das células unitárias para sistemas cristalinos

Sistema cristalino	Eixos e ângulos cristalográficos	Formas		Minerais	
Cúbico ou isométrico	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				Halita Magnetita Granada Pirita
Tetragonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				Zircão
Hexagonal e trigonal	$a_1 = a_2 = a_3 \neq e$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				Quartzo Grafita
					Calcita Dolomita
					Nefelina
Ortorrômico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				Olivina Barita
Monoclínico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$				Ortoclásio Augita Hornblenda Biotita Muscovita Gipso
Triclínico	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$				Plagioclásio Microclínio

Fonte: Frascá; Sartori (1998) *apud* Couto (2008)

2.1.1 Minerais formadores de rocha:

Mais de 70% da crosta é formada por oxigênio e silício (Figura 2.1), devido a este fato a classe dos silicatos é a mais abundante classe de minerais, constituindo mais de 90% de seu volume (PRESS *et al.*, 2006).

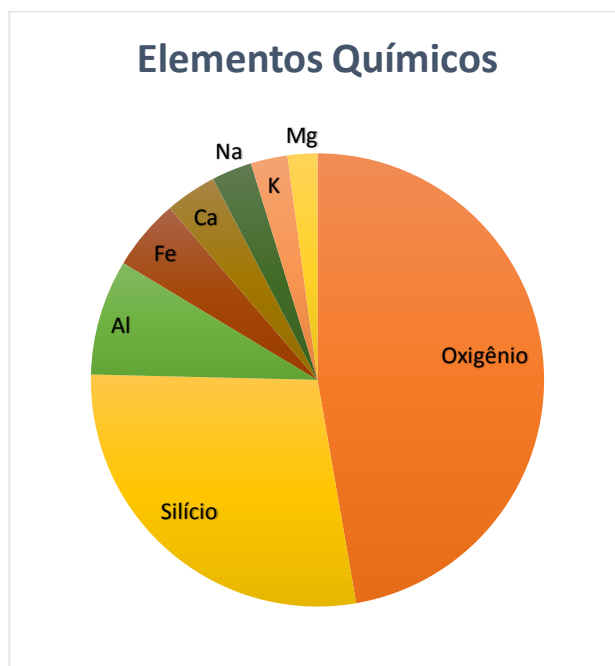


Figura 2.1 - Elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre
Fonte: Vlach (2002)

As formas de origem dos minerais são diversas, como por exemplo através da evaporação do solvente, resfriamento do magma, perda de gás atuando como solvente, redução da temperatura e/ou pressão, interação de soluções, entre outras. Baseando-se na composição química os minerais dividem-se em oito grupos, listando os seis mais comuns na Tabela 2.2 (PRESS *et al.*, 2006; ANDRADE *et al.*, 2009).

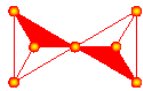
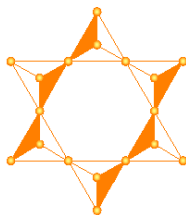
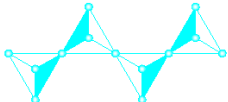
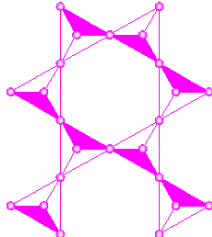
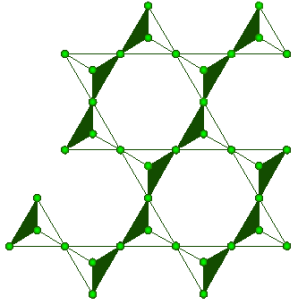
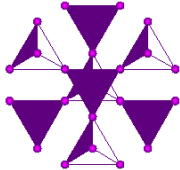
Tabela 2.2 - Classes químicas de minerais

Classe	Ânions definidores	Exemplo
Elementos nativos	<i>Nenhum (ausência de íons carregados)</i>	<i>Cobre metálico (Cu)</i>
Óxidos e hidróxidos	<i>Íon oxigênio (O^{2-})</i>	<i>Hematita (Fe_2O_3)</i>
	<i>Íon hidroxila (OH^-)</i>	<i>Brucita ($Mg[OH]_2$)</i>
Haletos	<i>Cloreto (Cl^-), Fluoreto (F^-), Brometo (Br^-), Iodeto (I^-)</i>	<i>Halita ($NaCl$)</i>
Carbonatos	<i>Íon carbonato (CO_3^{2-})</i>	<i>Calcita ($CaCO_3$)</i>
Sulfatos	<i>Íon sulfato (SO_4^{2-})</i>	<i>Anidrita ($CaSO_4$)</i>
Silicatos	<i>Íon silicato (SiO_4^{4-})</i>	<i>Olivina (Mg_2SiO_4)</i>

Fonte: Press et al. (2006)

Os silicatos são os mais abundantes minerais da crosta e do manto terrestre, cerca de 97% dos minerais conhecidos pertencem a este grupo, como por exemplo os feldspatos, quartzo, olivinas, piroxênios, anfibólicos, granadas e micas. São organizados estruturalmente pelo radical aniônico conhecido como sílica $[SiO_2]^{-4}$ que constituem tetraedros que se unem entre si ou com cátions para compartilhar os átomos de oxigênio. Dependendo da forma como estes tetraedros são ligados uns aos outros são divididas subclasses desses silicatos. A Tabela 2.3 mostra os principais minerais formadores das rochas silicosas do grupo dos silicatos (SZABÓ et al., 2009)

Tabela 2.3 - Classificação sistemática dos minerais da classe dos silicatos

Sub-grupo	Arranjo dos tetraedros	Exemplo	Arranjo das moléculas
Nesos-silicatos	<i>Isolados</i>	<i>Olivina, Mg_2SiO_4</i>	
Solos-silicatos	<i>Duplos</i>	<i>Hemimorfita, $Zn_4(Si_2O_7)(OH).H_2O$</i>	
Ciclossilicatos	<i>Aneis</i>	<i>Berilo, $Be_3Al_2(Si_6O_{18})$</i>	
Inossilicatos	<i>Cadeia simples (Piroxênios)</i>	<i>Enstatita, $Mg_2(Si_2O_6)$</i>	
	<i>Cadeia dupla (Anfibólicos)</i>	<i>Tremolita, $Ca_2Mg_5(Si_8O_{22})(OH)_2$</i>	
Filossilicatos	<i>Folheados</i>	<i>Talco, $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$</i>	
Tectos-silicatos	<i>Tridimensionais</i>	<i>Quartzo, SiO_2</i>	

Fonte: Deer et al. (2000) apud Couto (2008)

Para que uma substância seja considerada um mineral é necessário que a mesma preencha os requisitos de ser cristalina e ter sido formada naturalmente, na condição da substância não ser cristalina ela é intitulada mineralóide como no caso do vidro vulcânico. Entre os minerais mais comuns formadores de rocha pode-se destacar os representados na Tabela 2.4 (PRESS *et al.*, 2006).

Tabela 2.4 - Minerais mais comuns formadores de rochas

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

Fonte: Press *et al.* (2006)

2.2 Rochas

A rocha pode ser definida como sendo um agregado sólido de minerais que ocorre naturalmente, podendo ser compostas por apenas um mineral (mármore branco), ou podem possuir diferentes composições, tais como material não mineral (carvão, rocha vulcânica vítrea). Em um agregado os minerais são unidos de maneira a manter suas características individuais, a Figura 2.2 demonstra essa característica (LEINZ e AMARAL, 1998; OLIVEIRA e BRITO, 1998; PRESS *et al.*, 2006).

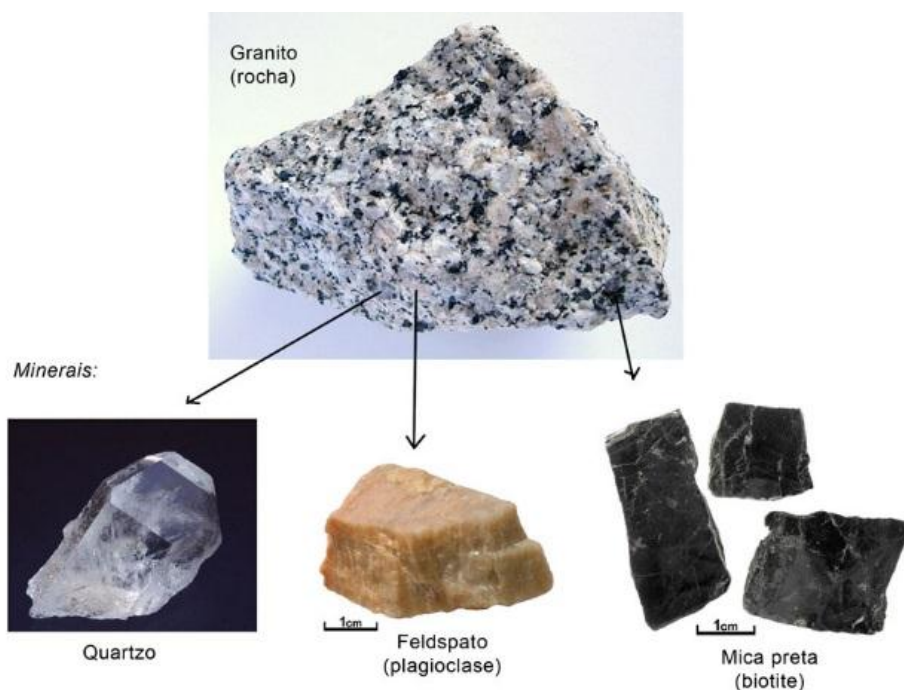


Figura 2.2 - Rocha formada a partir da união de minerais
Fonte: Rainho (

As rochas fazem parte de um planeta cheio de energia que promove, com sua alta temperatura e pressão interna todos os processos de abalos sísmicos, movimentos tectônicos de placas e atividades vulcânicas em uma dinâmica muito intensa. Da mesma forma, a atividade intempérica e erosiva externa, envolvendo agentes atmosféricos como o calor, chuvas, ventos geleiras, também atuam sobre essas rochas, causando constantes alterações. Esse processo é conhecido como o ciclo das rochas, resultado das interações de dois dos sistemas fundamentais da Terra: o sistema da tectônica de placas e o sistema do clima. Essas interações estão exemplificadas na Figura 2.3 (LEINZ e AMARAL, 1998; PRESS *et al.*, 2006; ANDRADE *et al.*, 2009).



a - Formação de rocha ígnea por vulcanismo; b – manto de intemperismo constituído de material frível; c – decomposição de sedimentos (litificação); d – dobras em uma rocha metamórfica; e – fusão parcial de uma rocha

Figura 2.3 - O ciclo das rochas

Fonte: Andrade *et al.* (2009)

Uma característica importante a se observar nas rochas é a textura, que indica as relações entre as fases minerais constituintes da rocha, esta característica é definida pela forma, arranjo e distribuição dos minerais, sendo importante na determinação do tamanho dos grãos, processos de formação sofridos pela rocha e o grau de cristalinidade da rocha. Acerca do grau de cristalinidade as rochas dividem-se em: holocristalinas (constituída apenas por cristais), holohialinas (constituídas apenas por vidro) e hialocristalinas (existência simultânea de cristais e vidro) (ERNST, 1971; BIGARELLA *et al.*, 1985). Quando se trata do tamanho dos grãos, caso sejam visíveis a olho nu a rocha é dita fanerítica, quando não, é denominada afanítica, podendo ser microcristalina, devido a possibilidade de observar os cristais apenas com microscópio, ou criptocristalina, quando não o tamanho é demasiado reduzido para se caracterizar em microscópio comum (ERNST, 1971; BIGARELLA *et al.*, 1985; ANDRADE *et al.*, 2009).

2.2.1 Classificação das rochas

De acordo com a formação geológica na natureza, as rochas são separadas em três grandes grupos: rochas ígneas (magmáticas), rochas metamórficas e rochas sedimentares.

2.2.1.1 Rochas Ígneas (magmáticas)

As rochas ígneas são formadas pela cristalização do magma, sendo este uma massa de rocha fundida presente no centro da terra. Através do tempo de resfriamento do magma na superfície terrestre é que se faz a divisão das rochas em intrusivas, que resfriam dentro do globo terrestre, (resfriamento lento) e extrusivas, que resfriam na superfície terrestre, (resfriamento rápido) através desse resfriamento das rochas adquirem diferentes texturas (DANA e HURLBUT, 1969; LEINZ e AMARAL, 1998; OLIVEIRA e BRITO, 1998; PRESS *et al.*, 2006; ANDRADE *et al.*, 2009). A Figura 2.4 exemplifica uma rocha extrusiva (Basalto) e uma rocha intrusiva (Granito).

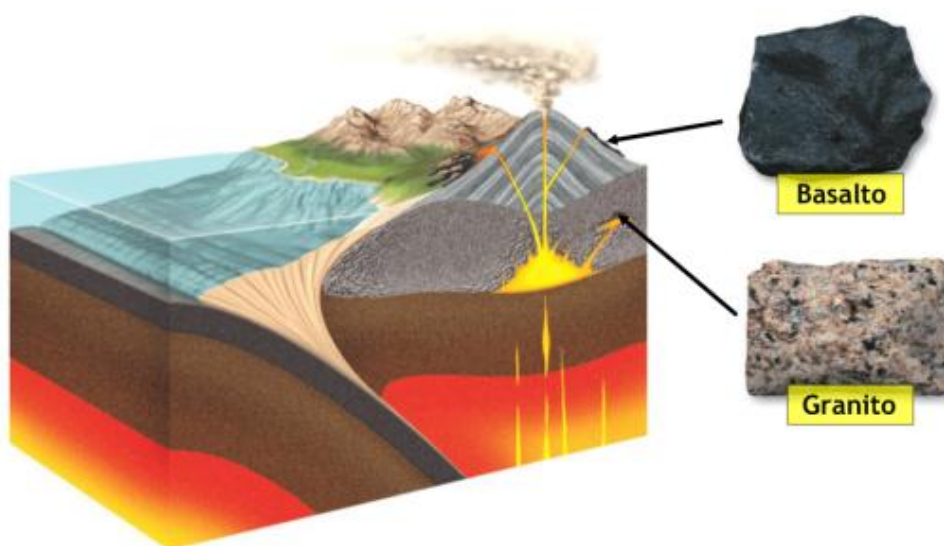


Figura 2.4 - Exemplo de formação de rocha ígnea intrusiva e extrusiva
Fonte: Press *et al.* (2006)

Segundo Press *et al.* (2006) e Szabó *et al.* (2009), a constituição dos magmas geradores das rochas depende de vários fatores, dentre eles estão: a constituição da rocha geradora do magma no local de origem; a composição da rocha geradora no local de origem; as condições em que ocorreu a fusão desta rocha e a taxa de fusão; os processos que atuam sobre este magma do seu local de origem até o seu sítio de consolidação. Diante

deste fato, os magmas são classificados de acordo com sua quantidade de sílica, diferenciando-se em magmas: basáltico, andesítico e riolítico (granítico), como expresso na Figura 2.5.

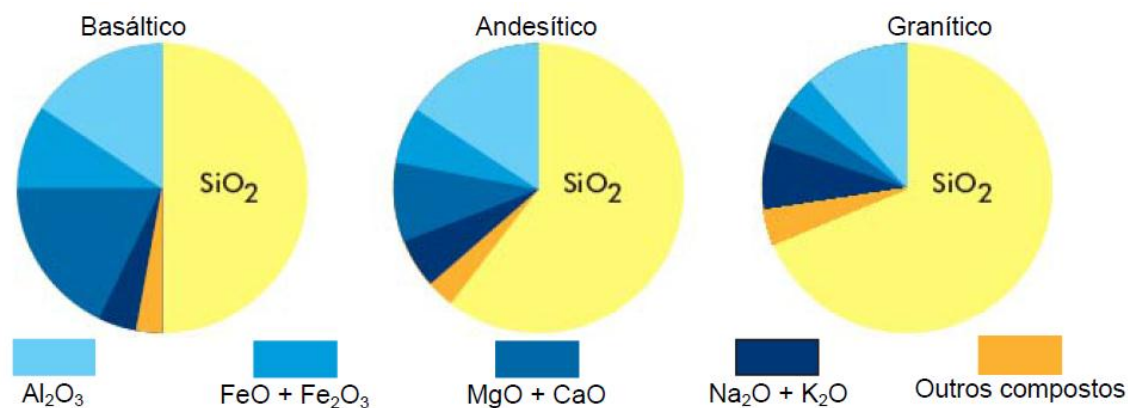


Figura 2.5 - Composição química dos magmas formadores de rochas ígneas

Fonte: Szabó et al. (2009)

2.2.1.1.1 Composição das rochas ígneas

Os minerais constituintes de rochas ígneas são formados a partir do momento em que a rocha atinge a chamada temperatura de cristalização, dividindo as rochas ígneas em dois grupos (DANA e HURLBUT, 1969; OLIVEIRA e BRITO, 1998):

Minerais máficos: contém o grupo da olivina, piroxênios, anfibólicos (hornblenda) e micas, apresentam coloração mais escura em virtude da presença do magnésio e ferro. Por se cristalizarem em maiores temperaturas e pressão são instáveis.

Minerais félsicos: grupo dos plagioclásios cálcicos, seguidos por plagioclásios sódicos, feldspatos alcalinos, quartzo e mica (muscovita), são os aluminossilicatos e sódio e potássio.

A composição química de uma rocha é influenciada pela composição do magma que a originou, sendo inúmeras as formas de classificar uma rocha ígnea, podendo ser através da sua composição química, da textura, índice de cor, ambiente de cristalização. Existem uma infinidade de minerais na terra, porém nem todos são utilizados na classificação das rochas; estes são os denominados minerais essenciais. Outros minerais aparecem em menores quantidades na rocha, sendo assim chamados de minerais acessórios

(BIGARELLA *et al.*, 1985; ANDRADE *et al.*, 2009; SZABÓ *et al.*, 2009). Levando em consideração a composição química e mineralógica da rocha, a Figura 2.6 classifica-se a rocha quanto ao tipo rocha e suas características (DANA e HURLBUT, 1969; PRESS *et al.*, 2006; SZABÓ *et al.*, 2009).

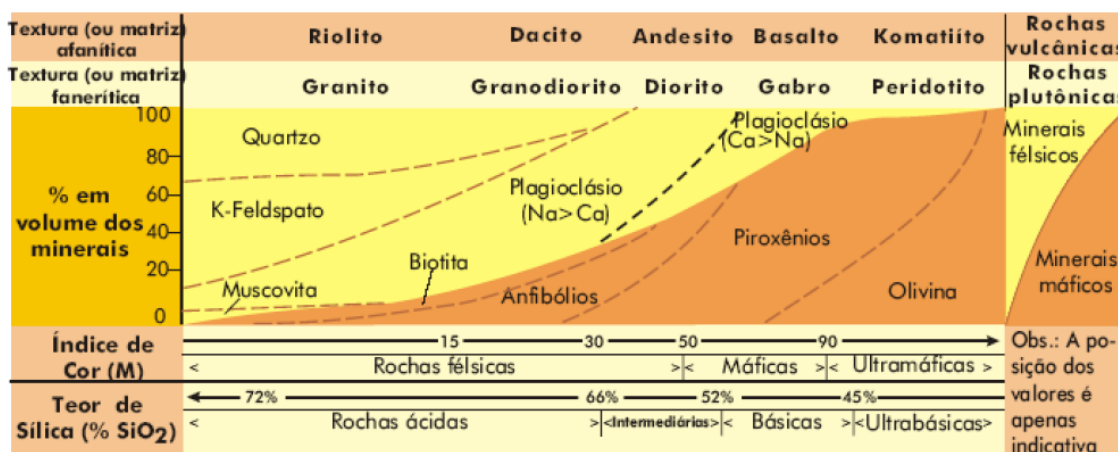


Figura 2.6 - Relações entre características de rochas ígneas e sua classificação

Fonte: Szabó *et al.* (2009)

Quanto à composição química, as rochas podem ser classificadas de acordo com a quantidade de silício presente na sua estrutura, sendo divididas em (LEINZ e AMARAL, 1998; SZABÓ *et al.*, 2009).

- **Ácidas:** quando apresenta teores de SiO₂ superiores a 66% (granito);
- **Intermediárias:** quando possuem SiO₂ entre 66% e 52% (andesito);
- **Básicas:** teores de SiO₂ entre 52% e 45% (basalto);
- **Ultrabásicas:** apresentam teores de SiO₂ inferiores a 45% (peridotito).

Para fins deste estudo serão destacados os granitos, sendo o tipo de rocha mais comum de todas, ocorrendo em diversas cores, cinza-clara a cinza bem escura, amarelada rósea ou vermelha. São classificadas como rochas ácidas plutônicas (intrusiva), compostas principalmente por quartzo (20-30%), feldspatos (50-70%); feldspato potássico e plagioclásio e minerais ferro-magnesianos (5-25%) sua granulação varia de milimétrica a centimétrica, detendo densidades em torno de 2,60g/cm³ (LEINZ e AMARAL, 1998; OLIVEIRA e BRITO, 1998; POPP, 1998).

2.2.1.2 Rochas sedimentares

Este tipo de rocha é originária da consolidação de sedimentos provenientes de outras rochas preexistentes, podendo esses sedimentos serem de três tipos: os sedimentos clásticos são fragmentos de rocha fisicamente transportados, já os sedimentos químicos e bioquímicos tratam-se de produtos dissolvidos pelo intemperismo. A Figura 2.7 demonstra o processo de formação de rochas sedimentares que tem seu início com o intemperismo da rocha existente, posteriormente ocorre o transporte de sedimentos, passando pela deposição do material e por fim tem-se a litificação, que consolida a formação da rocha. (ERNST, 1971; PRESS *et al.*, 2006).

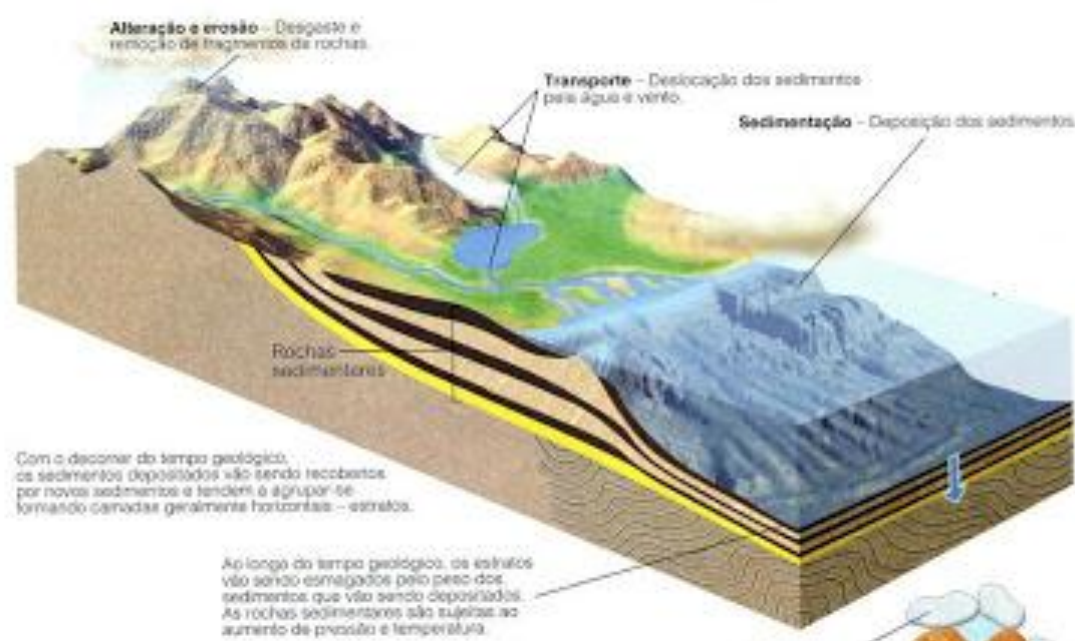


Figura 2.7 - Processo de formação de rochas sedimentares
Fonte: Press *et al.* (2006)

As rochas sedimentares são classificadas de acordo com sua origem, dividindo-se em: detríticas, como os arenitos, os siltitos e os argilitos; químicas ou bioquímicas, como calcário e carvões (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

Os minerais mais significativos que compõem as rochas sedimentares, são segundo Dana e Hurlbut (1969) e Leinz e Amaral (1998): quartzo, feldspato, mica, calcita, dolomita, algumas variedades criptocristalinas de quartzo (calcedônia e sílica hidratada amorfa, ou opala).

2.2.1.3 Rochas metamórficas

Devido as altas temperaturas e pressão e mudanças no ambiente químico que podem acontecer no interior da Terra, são suficientes para modificar a composição mineral, textura cristalina e composição química de rochas preexistentes (protolito), independentemente de sua natureza, sem que esta deixe de ser sólida, formando assim a classe das rochas metamórficas (DANA e HURLBUT, 1969; BIGARELLA *et al.*, 1985; LEINZ e AMARAL, 1998; RUBERTI *et al.*, 2009).

De acordo com os autores: Oliveira e Brito (1998), Press *et al.* (2006) e Ruberti *et al.* (2009) existem três fatores que controlam as ações do metamorfismo, os quais seriam: pressão, temperatura e presença de fluidos. A pressão pode variar de 200 a 1.000Mpa, já quando se trata da temperatura, necessita ser superior a 200°C para que se inicie o processo, caso a temperatura seja muito elevada o metamorfismo evolui para o limite de geração das rochas ígneas, ocorrendo sua fusão parcial e formando rochas mistas denominadas migmatitos. A presença dos fluidos é fundamental para que ocorra as reações metamórficas, que são basicamente de desidratação e/ou decarbonatação.

Existem três tipos principais de metamorfismo que podem ocorrer em uma rocha: regional ou dinamometral, de contato ou termal e cataclástico ou dinâmico (OLIVEIRA e BRITO, 1998; PRESS *et al.*, 2006; RUBERTI *et al.*, 2009), existem autores como Ruberti *et al.* (2009) e Press *et al.* (2006) que ainda destacam o metamorfismo de soterramento, o hidrotermal, de fundo oceânico e o de impacto.

Sobre a textura deste tipo de rocha pode-se dizer que devido ao crescimento dos minerais no estado sólido ocorre por um processo denominado blastese, consequentemente o radical blasto sucede a nomenclatura das texturas, são portanto: granoblástica, encontrada em rochas não-foliadas, maciças e não há predominância de uma das dimensões dos minerais; lepidoblástica, ocorre uma maior quantidade de minerais micáceos, foliáceos orientados; nematoblástica, predomínio de minerais prismáticos e

orientados; porfiroblástica, contém cristais de diferentes dimensões com destaque para os de maior dimensão (LEINZ e AMARAL, 1998).

Neste tipo de rocha a constituição mineralógica é dependente do grau de metamorfismo sofrido, podem ocorrer tanto a recristalização dos minerais preexistentes como também novos minerais podem se formar no processo devido a mudança da estrutura cristalina sob as novas condições de pressão, temperatura, também em razão da combinação entre dois ou mais minerais, formar um novo mineral estável. As principais rochas metamórficas são: quartzito, mármore, filito, micaxisto, cloritaxisto, anfibólio-xisto e gnaisse (LEINZ e AMARAL, 1998).

CAPÍTULO 3

A Reação Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado (RAA) pode ser considerada como sendo um termo geral para descrever a interação química ocorrida dentro dos poros do concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e os minerais provenientes de estruturas amorfas dos agregados utilizados, podendo formar um gel, o qual em presença de água se expande gerando fissuras que comprometem as estruturas (SIMS e POOLE, 1992; HASPARYK, 2005; MUNHOZ, 2007). Outro tipo de interação pode ocorrer enfraquecendo a ligação pasta e agregado (ABNT, 2008a).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as consequências da RAA (fissurações) podem levar a uma diminuição da resistência e elasticidade do concreto que foi afetado, e conseqüentemente, sua durabilidade fica comprometida.

O primeiro a discutir a existência da RAA, foi Stanton em 1940, identificando-a como uma sendo um processo deletério que ocorria entre os próprios componentes do concreto. De acordo com seus experimentos, ele comprovou que a reação tinha como resultado eflorescências brancas, e estas causavam fissurações semelhantes às que eram observadas na Califórnia, durante os anos 1920 a 1930 (STANTON, 1940). Após Stanton, vários outros passaram a estudar a reação, principalmente nos Estados Unidos.

A principal preocupação com relação à RAA é que ela atinge principalmente estruturas de concreto que tem contato com a água, como por exemplo: obras hidráulicas, barragens, pontes, pavimentos, fundações, etc. E essas estruturas apresentam grandes volumes de concreto, podendo causar grandes prejuízos.

O diagnóstico e os danos causados pela reação álcali-agregado dependem de vários fatores e às vezes é bastante demorada sua percepção.

Para realização do diagnóstico visual, é importante atentar para as seguintes características (VALDUGA, 2002; HASPARYK *et al.*, 2012):

- Microfissuras no concreto, em especial na argamassa;
- Fissuras na zona de transição do concreto;
- Presença de contorno nos agregados graúdos;
- Fissuração em forma de mapa (em concretos sem armadura);
- Fissuração orientada (em concreto armado);
- Problemas em usinas como deslocamento de equipamentos ou seu travamento na estrutura;
- Preenchimento dos poros ou exsudação do gel na superfície do concreto;
- Manchas superficiais;
- Macrofissuras com descoloração visível ao longo de suas bordas;
- Desplacamentos com descolamentos entre a pasta e o agregado (perda de aderência);
- Movimentação de superfícies livres;
- Expansão visível do concreto.

Os sinais de manifestação da reação álcali-agregado podem ser identificados externamente, através de inspeção visual conforme nas Figura 3.1 e Figura 3.2 ou com ajuda de ensaios como, por exemplo, através de microscopia eletrônica de varredura, além microscopia ótica.



Figura 3.1 - Bloco de fundação de edifícios residenciais da cidade de Recife com RAA



Figura 3.2 - Detalhe da amostra retirada do bloco de fundação

Fonte: Munhoz (2007)

3.1 Tipos de reação álcali-agregado

Os tipos de reação álcali-agregado conhecidos atualmente dependem do tipo de agregado que reage com os álcalis presentes nos poros do concreto:

- Reação álcali-sílica;
- Reação álcali-carbonato.

3.1.1 Reação álcali-sílica

Conhecida como a forma mais rápida de desenvolvimento da manifestação do tipo reação álcali-agregado, a reação álcali-sílica (RAS) é o tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo (ABNT, 2008a).

Muitos tipos de agregados comumente usados, possuem sílica em sua composição, estes podem ser atacados pela solução alcalina dos poros do concreto. Este ataque, essencialmente uma reação de dissolução, exige a presença de um certo nível de umidade e álcalis (levando ao aumento do pH) para acontecer. Durante a reação, ocorre a formação de um gel higroscópico, que absorve água, aumentando de volume causando fissuração e em casos extremos a ruptura do concreto (LINDGÅRD *et al.*, 2012).

Paulon (1981) *apud* Silva (2009a) afirma que as rochas que desencadeiam a reação álcali-sílica apresentam formas bem definidas de sílica metaestável (tridimita e cristobalita), sílica microcristalina amorfa (opala), certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais, e sílica sob a forma de quartzo criptocristalino, que é a forma mais desordenada e reativa (chert, flint e calcedônia).

3.1.2 Reação álcali-silicato:

A reação álcali-silicato é um tipo específico da reação álcali-sílica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas, tais como ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros (ABNT, 2008a).

Forma de RAA mais comum no Brasil, apresentando-se de forma mais lenta e complexa que os outros tipos de reação, devido ao fato dos minerais reativos encontrarem-se mais disseminados na matriz. De acordo com Khiara *et al.* (2006), existem estudos apontando o quartzo tensionado, deformado e cisalhado, como um dos principais responsáveis por esse tipo de reação, além do feldspato afetado pelos mesmos processos.

Glasser e Swamy (1992) *apud* Munhoz (2007) afirmam que a reação álcali-agregado não ocorre em minerais com fases silicosas bem cristalizadas, apenas em fases criptocristalinas e amorfas devido a sua estrutura desordenada e área de contato. A Figura 3.3 apresenta um fluxograma que descreve as etapas de desenvolvimento tanto para a reação álcali-sílica como para álcali-silicato.

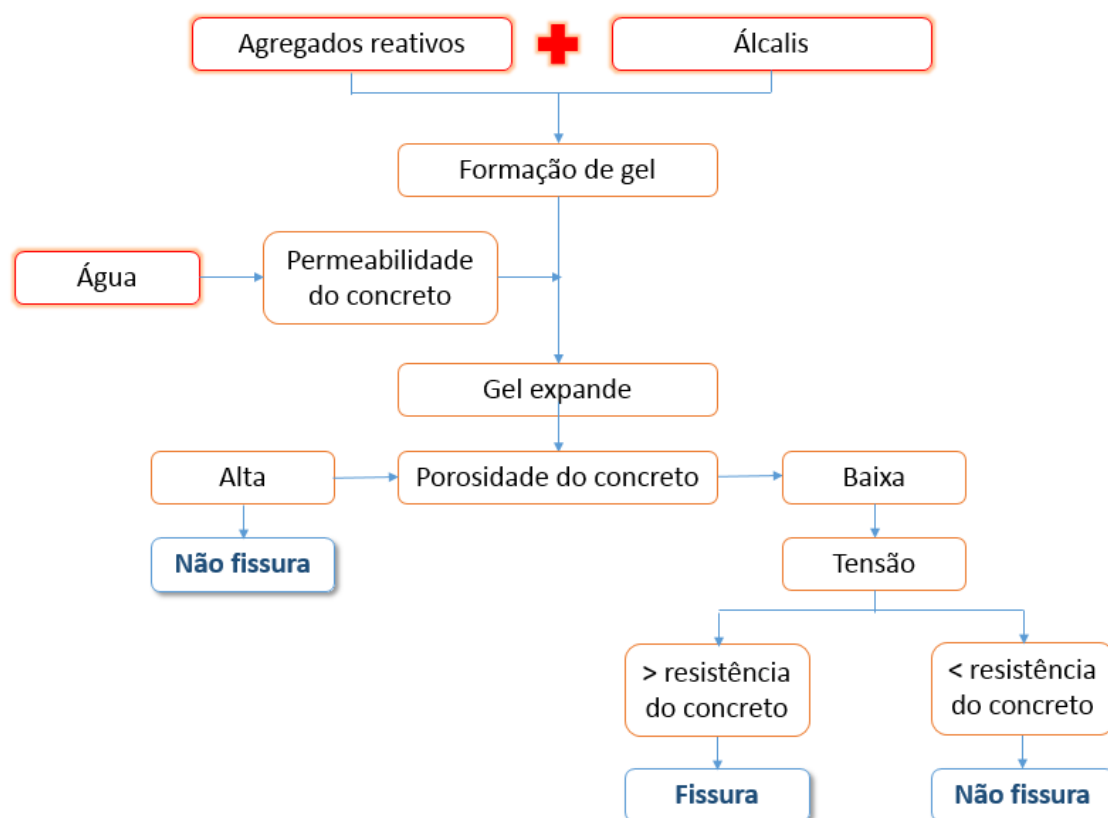


Figura 3.3 - Fluxograma de desenvolvimento da reação
 Fonte: Ferraris (2000) *apud* Valduga (2002) Adaptado

3.1.3 Reação álcali-carbonato

Reação álcali-carbonato: tipo de reação álcali-agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração do concreto é devida à desdolomitização da rocha e consequente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Não há a formação do gel expansivo, mas de compostos cristalizados como brucíta, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnesiano. Como a reação regenera os hidróxidos alcalinos a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote (ABNT, 2008a).

Este tipo de reação é muito raro de acontecer e ainda não há relatos de sua ocorrência e algumas vezes ocorre juntamente com as outras formas de reação álcali-agregado, como no caso estudado por Silveira (2006) que avaliou vários agregados de origem carbonática e contendo pequenas quantidades de silicatos observada durante a avaliação mineralógica.

Este tipo de reação não será tratada de forma mais significativa no presente trabalho, pois não se trata do escopo do mesmo. O termo reação álcali-agregado (RAA) será utilizado quando tratar-se tanto do tipo álcali-sílica, quanto álcali-silicato, indistintamente.

3.2 O papel de cada agente na RAA

O que é comum a muitos autores citados na bibliografia que se conhece hoje sobre a reação álcali-agregado é que são necessários três fatores para que seja garantida a ocorrência da RAA: a existência de umidade, quantidade, tamanho e distribuição de fases reativas no agregado e concentração de hidróxidos alcalinos disponíveis nos poros do concreto. É imprescindível a ocorrência dos três fatores em conjunto. (SIMS e POOLE, 1992; MUNHOZ, 2007; SILVA, 2007; MEHTA e MONTEIRO, 2008; DE CARVALHO *et al.*, 2010; HASPARYK, 2011; LINDGÅRD *et al.*, 2012).

3.2.1 Umidade:

A água é o principal agente de degradação do concreto, pois possui grande facilidade de transitar entre os poros do concreto e é conhecida como o solvente universal, possuindo capacidade de dissolver muitas espécies químicas, tornando-a rica em íons e gases capazes de causar a deterioração. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Antes da reação, a água tem o papel de transportar os íons, após a ocorrência da reação, a água é absorvida pelo gel formado na reação, causando sua expansão e fissuração do concreto. A relação água/cimento influencia nas propriedades do concreto e conseqüentemente no desenvolvimento da reação, uma baixa relação água/cimento pode causar um aumento nas expansões (devido ao aumento da concentração dos íons OH^- na solução dos poros), mas, por outro lado pode reduzir a expansão (por causa da menor porosidade da pasta e conseqüentemente um menor e mais lento transporte de íons pelos poros, além de menos entrada de água e portanto uma redução na umidade relativa interna) (LINDGÅRD *et al.*, 2012).

Sendo a água reconhecidamente um dos fatores primordiais para ocorrência da reação, a norma NBR 15577 (ABNT, 2008a) aponta medidas preventivas levando em conta a umidade interna do elemento (devido às suas dimensões) e as condições em que o elemento está inserido, estabelecendo quatro condicionantes:

- Elemento maciço: aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1m;
- Ambiente seco: ambientes com ausência permanente de umidade em contato direto com a estrutura;
- Ambiente exposto a umidade: engloba os componentes enterrados;
- Em contato com água ou umidade proveniente do solo ou de rochas.

Quanto maior o contato com a água, o nível de umidade ou o porte da estrutura maior é a ação preventiva recomendada pela norma.

Estudo desenvolvido por Foray *et al.* (2004) *apud* (Silva (2007)), demonstra bem o efeito da umidade relativa na expansão devido à RAA em argamassa. A Figura 3.4 demonstrando que quando elevada a umidade relativa a expansão aumentou, destacando-se as curvas de 96% e 100% que devido a lixiviação dos álcalis ocasionada pela condensação do vapor d'água aos 100% de umidade acarretando uma certa redução na expansão

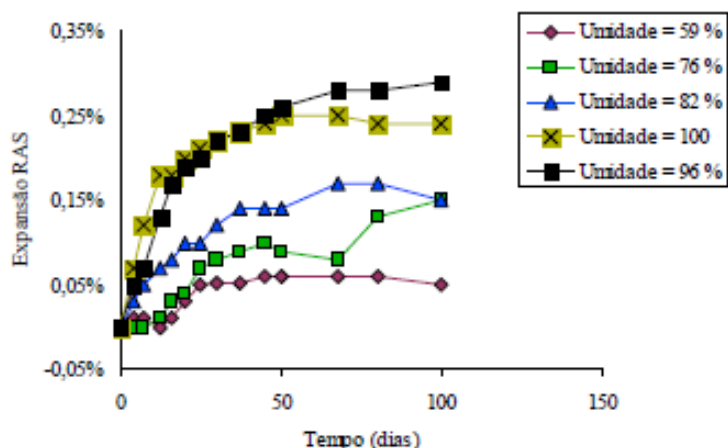


Figura 3.4 - Expansão devida à RAS em amostras de argamassa submetidas a diferentes umidades relativas
 Fonte: Foray *et al.* (2004) *apud* Silva (2007)

Portanto o que se sabe é que quanto maior a quantidade de poros no concreto, maior a possibilidade de ocorrência de RAA. Além do fato de que a reação é mais comum em áreas onde existe movimentação de água. Para diminuição da porosidade do concreto e diminuir a probabilidade da ocorrência de RAA são adições ativas no concreto que vem sendo largamente pesquisadas nos dias atuais, porém não são alvos desta pesquisa, pois ainda não se tem notícia da existência de agregados reativos no estado.

3.2.2 Agregado reativo:

Vários fatores interferem na reatividade dos agregados, tais como forma, textura, mineralogia, entre outros. Quanto maior o nível de instabilidade e desordem dos agregados, mais susceptíveis a reação eles são (HASPARYK, 2011).

A determinação de ocorrência ou não de RAA depende da quantidade de fases cristalizadas e mal cristalizadas, pois esse tipo de reação ocorre somente com fases microcristalinas, criptocristalinas e amorfas, devido ao aumento da área de contato entre as estruturas abertas e a solução dos poros (MUNHOZ, 2007). A Figura 3.5 demonstra algumas fases reativas que podem ser encontradas nos agregados.

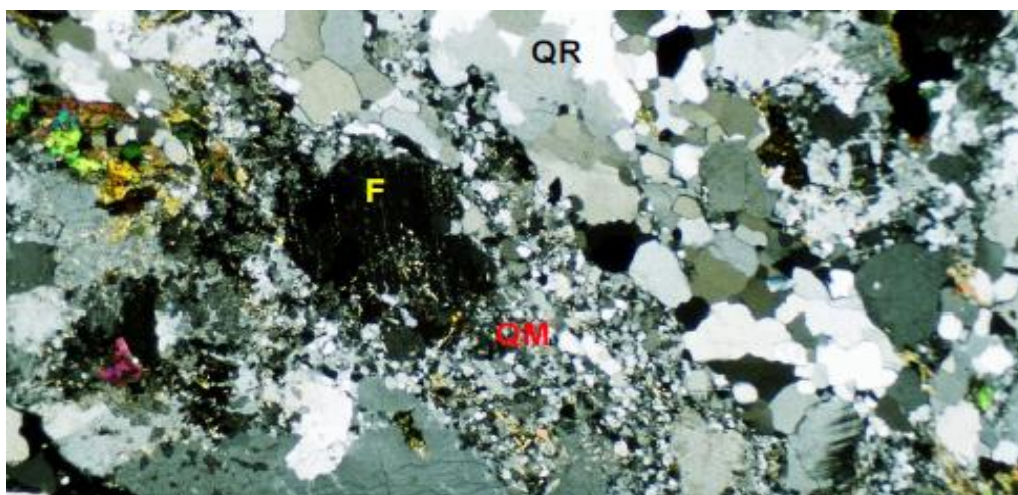


Figura 3.5 - Cristais de quartzo microcristalino (QM) que, associado a quartzo recristalizado (QR), conferem ao agregado caráter reativo (F=feldspato)

Fonte: Munhoz (2007)

Segundo Marinoni *et al.* (2011) a diferente composição mineralógica do agregado (em termos de sílica livre) conduz a uma velocidade de reação diferente dentro das rochas sedimentares, além de produzir diferentes produtos atmosféricos, tais como a agregação, dissolução e/ou microfissuras. Estudos experimentais realizados por Multon *et al.* (2010) demonstram que quando são empregadas partículas finas (menores que 160 μ m) não é identificada expansão significativa, ao passo que partículas mais grossas (0,63 – 1,25mm) apresentam menor expansão, ou seja, para um dado período de teste e um dado teor alcalino, a expansão é maximizada quando utilizada uma determinada gama de tamanho de agregados.

A NBR15577-3 (ABNT, 2008a) apresenta as informações referentes a minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado, apresentada na Tabela 3.1, e sugere que em jazidas produtoras de agregado, devem ser feitos ensaios de verificação de potencialidade reativa a cada 150.000m³ de agregado produzido ou seis meses o que ocorrer primeiro, e que, uma análise petrográfica pode ser feita a cada 75.000m³ ou três meses das mesmas condições anteriores.

Tabela 3.1 - Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado

<i>Mineral reativo</i>	<i>Rochas de ocorrência</i>	
	<i>Rochas sedimentares</i>	<i>Rochas vulcânicas</i>
<i>Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico</i>	<i>Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e filints e diatomito</i>	<i>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</i>
<i>Rochas reativas contendo quartzo</i>		
<i>Material reativo</i>	<i>Tipos de rocha</i>	
<i>Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino.</i>	<i>Chert, flint, veio de quartzo, quartzito, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso</i>	
<i>Quartzo macrogranular, com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato com o grão</i>	<i>Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino</i> <i>Rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou quantidade significativa de quartzo moderadamente ou intensamente tensionado:</i> - <i>rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito</i> - <i>rochas sedimentares: arenito, grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso, arenito e arcóseo</i> - <i>rochas metamórficas: gnaiss, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, ardósia</i>	

Fonte: NBR 15577 (ABNT, 2008a)

Diferentes tipos de agregados possuem diferentes potenciais reativos, Gao *et al.* (2013) utilizou quatro tipos de agregados diferentes (calcário silicoso, quartzito, opala e quartzo) em uma mesma proporção (30% de 315-1,250µm e 70% de mármore não reativo), obtendo os resultados apresentados na Figura 3.6.

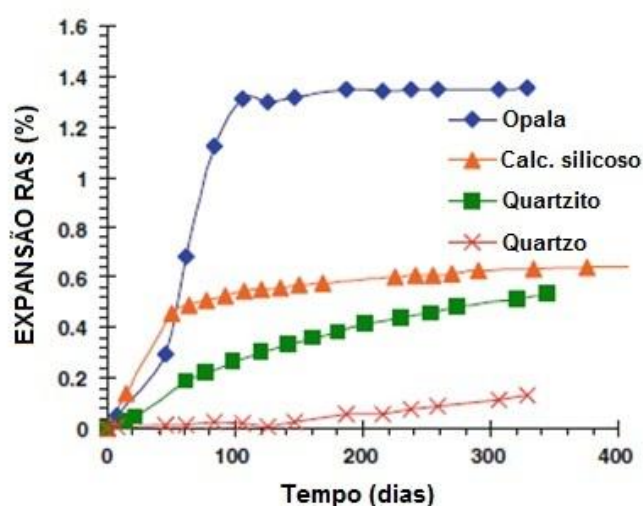


Figura 3.6 - Expansão pela reação álcali-álica de acordo com a natureza do agregado (agregado reativo 315-1.250 μm , tamanho do prisma: 20x20x160 mm)

Fonte: Gao *et al.* (2013)

Existe um limite para o aumento da taxa de expansão de acordo com o teor de agregado reativo, o qual é chamado de “teor péssimo” indicado por Hobbs (1980) representado pela Figura 3.7, porém não existe uma explicação clara a respeito desse comportamento, este teor varia de acordo com o grau de reatividade do agregado e às condições de exposição.

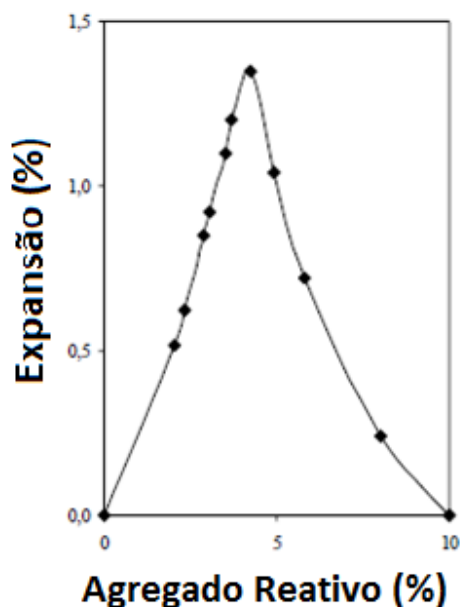


Figura 3.7 - Influência do teor de agregado reativo, em relação a quantidade total de agregado na expansão
Fonte: Hobbs (1980)

Ainda sobre o “teor péssimo” Gao *et al.* (2011), também o observou quando utilizou tamanhos diferentes de agregados em corpos de prova de diferentes dimensões, expondo-os a 150 dias de ensaio, tendo como resultado a Figura 3.8.

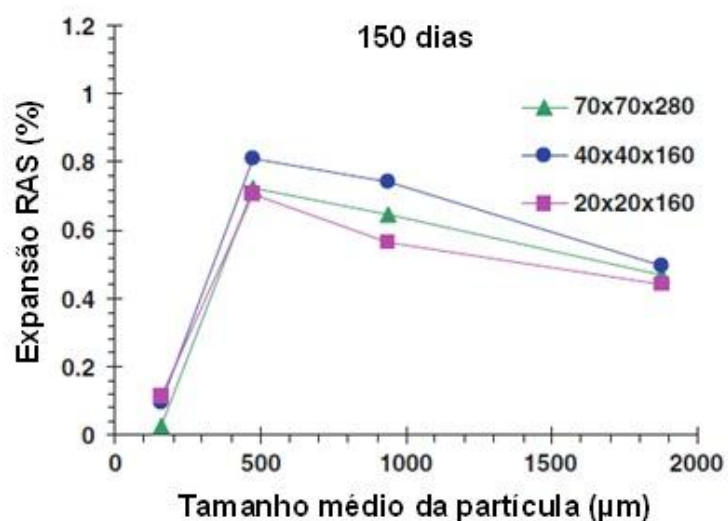


Figura 3.8 - Relação entre a porcentagem de expansão e o tamanho das partículas
Fonte: Gao *et al.* (2011)

3.2.3 Concentração de álcalis:

Os álcalis são elementos que ocupam a primeira coluna da tabela periódica, por exemplo: lítio, sódio, potássio, rubídio, cério, etc. dentre esses, apenas o sódio e o potássio estão presentes no cimento (DIAMOND, 1975). O cimento é a principal fonte de álcalis que são transportados para dentro dos poros do concreto e reagem com os outros componentes formando o gel. O teor de álcalis do cimento tem importância significativa na intensidade da RAA (LINDGÅRD *et al.*, 2012).

Os álcalis do cimento provêm dos materiais com os quais se fabrica o clínquer e normalmente é indicado pelo equivalente alcalino que é expresso em relação ao teor de óxido de sódio e expresso pela Equação 3.1 presente na norma NBR 15577 (ABNT, 2008a):

$$\%equiv. Na_2O = \%Na_2O + 0,658(\%K_2O) \quad \text{Equação 3.1}$$

O teor de álcalis disponíveis na solução dos poros é influenciada não só pela concentração de álcalis no cimento, como também pelo consumo do mesmo no concreto (SILVA, 2007). Segundo Diamond (1975) os álcalis do cimento se dividem em solúveis e insolúveis, porém a parte insolúvel estará disponível após a hidratação do clínquer, portanto, tratando-se a RAA de uma reação de desenvolvimento lento, é provável que todos os álcalis sejam disponibilizados.

Como medida mínima de mitigação a manifestação da RAA é indicado limitar o teor de álcalis equivalente do concreto a valores menores que 3,0 kg/m³ (ABNT NBR 15577-4:2008). Thomas (2011) indicou através da compilação de vários trabalhos que, o uso de adições cimentícias, tais como: sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, metacaulin, contém componentes que se ligam aos álcalis do cimento, diminuindo sua disponibilidade na solução dos poros, conforme observado na Figura 3.9. Wang *et al.* aponta que fatores como tipos de minerais alcalinos, a relação solução

porosa/agregado, o pH e a quantidade de íons alcalinos provenientes de outras fontes influenciam na liberação de álcalis na solução dos poros.

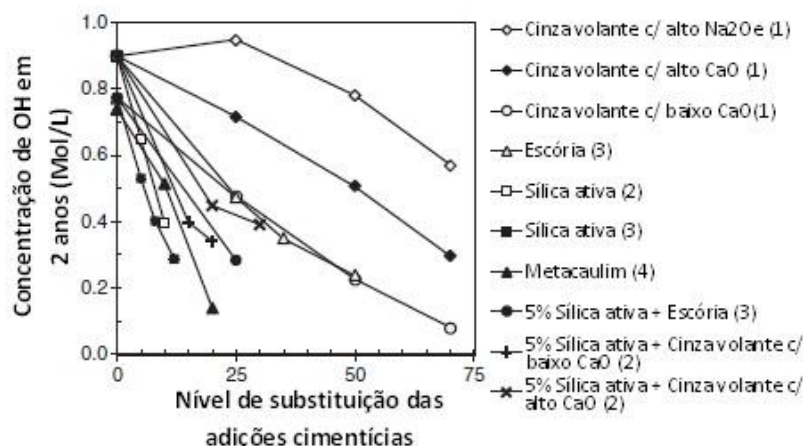


Figura 3.9 - Efeito do tipo e quantidade de adições cimentícias presentes na solução dos poros
Fonte: Thomas (2011)

Lu *et al.* (2006) afirma que as fases dos minerais mais susceptíveis a contribuir na solução dos poros, compreende o vidro vulcânico, nefelina, feldspatos, micas e minerais de argila, além de confirmar experimentalmente que partículas mais finas liberam álcalis mais rapidamente. Bérubé *et al.* (2002) encontrou que a quantidade de álcalis que pode ser fornecida para a solução pode variar de <0,1 até 12,7kg/m³ Na₂O_{eq}, dependendo do tipo de rocha.

Investigando a capacidade de liberação de álcalis na solução dos poros Bérubé *et al.* (2002) investigou dezessete tipos de agregados com diferentes teores de álcalis e diferentes graus de reatividade. E comprovou que a maioria dos agregados continuam liberando álcalis mesmo após 578 dias de ensaio, conforme pode ser observado na Figura 3.10.

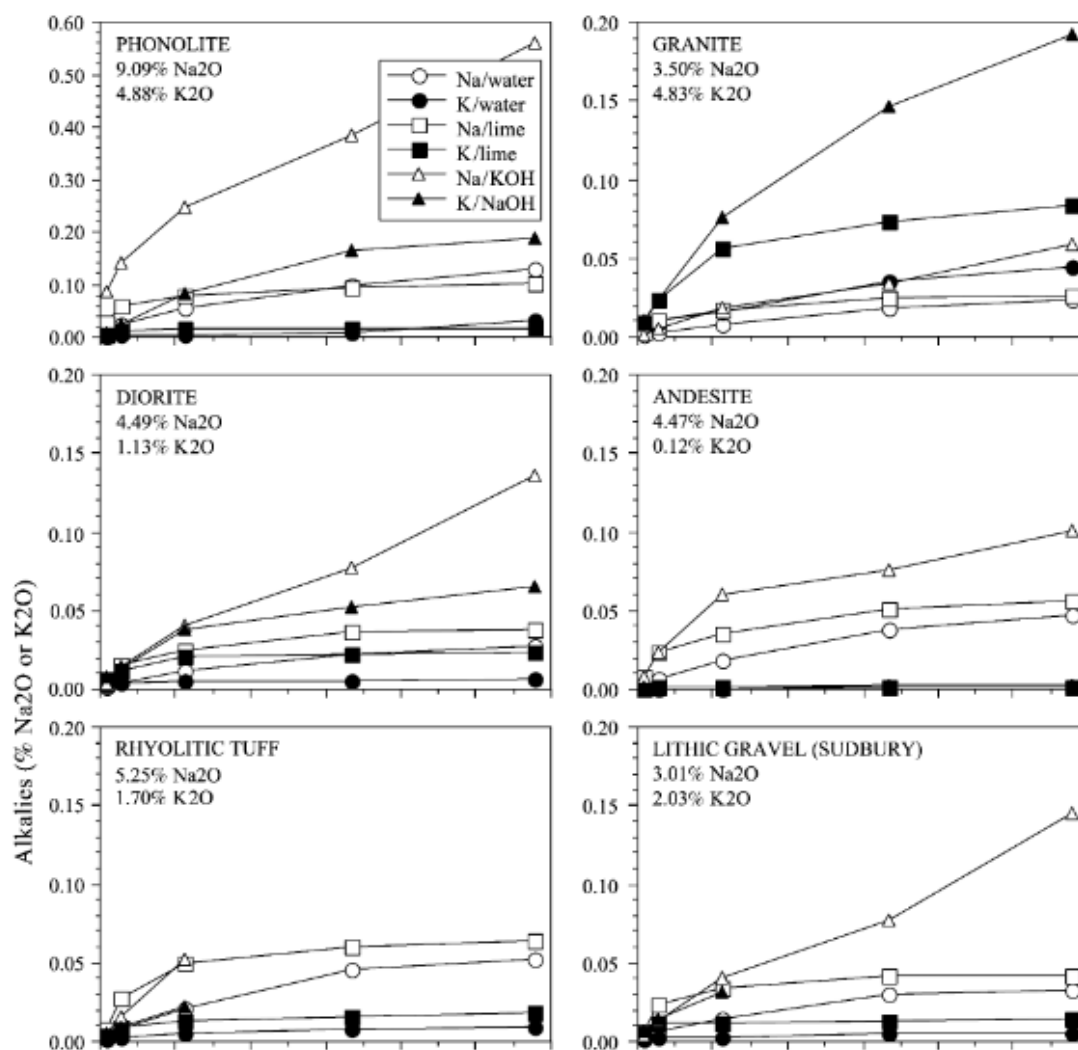


Figura 3.10 - Agregados utilizados com diferentes teores de álcalis e diferentes graus de reatividade

Fonte: Bérubé *et al.* (2002)

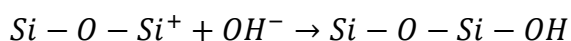
3.3 Como ocorre a reação álcali-sílica

De forma geral, a reação álcali-agregado ocorre de forma lenta, com a reação acontecendo entre as fases da rocha microcristalinas, criptocristalinas e amorfas, pois esse tipo de estrutura é desordenado e reage mais facilmente com os álcalis presentes na solução dos poros do concreto (DENT GLASSER e KATAOKA, 1981; MUNHOZ, 2007).

Autores como Diamond (1975), Dent Glasser e Kataoka (1981), Paulon (1981), Turriziani (1986) apud Couto (2008), Hobbs (1980) e Sims e Poole (1992), concordam com a forma como se desenvolve a química da reação.

No momento da hidratação do cimento ocorre a produção de silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio. Neste momento, íons de cálcio passam a ser incorporados nos produtos de hidratação, mas sódio e potássio permanecem na solução e apenas uma pequena parte pode ser incorporada aos silicatos de cálcio hidratados e monossulfatos (FERRARIS, 1995).

A solução vai se tornando alcalina a medida que a hidratação do cimento prossegue e ocorre dissolução dos componentes alcalinos do cimento, sendo os íons hidroxilas (OH^-), que elevam o pH da solução dos poros. Neste meio, algumas rochas (agregados compostos de sílica e minerais silicosos) não permanecem estáveis por longos períodos, pois o aumento do pH contribui para um significativo aumento da dissolução da sílica, quanto mais desordenada a estrutura da sílica, maior é a quantidade de íons de sílica passam para a fluida. Os íons hidroxila reagem com a sílica presente na superfície do agregado formando ligações do tipo silanol (Si-OH), para posteriormente iniciar os dois estágios da reação conforme Equação 3.2 e Figura 3.11.



Equação 3.2

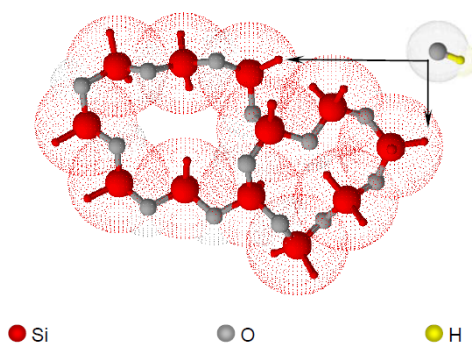
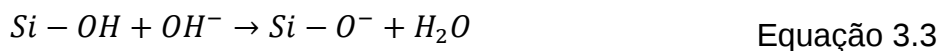


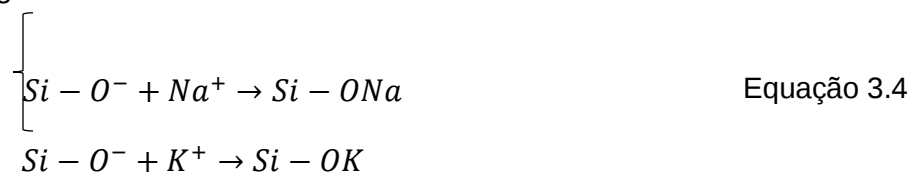
Figura 3.11 - Ruptura das ligações do grupo siloxano pelo pH elevado
Fonte: Couto (2008)

Os íons hidroxila (OH^-) ao penetrarem no agregado com fases reativas atacam as ligações Si-O-Si rompendo a sua estrutura. Das quatro ligações que o silício faz normalmente com oxigênio, uma será ocupada pelo íon OH^- . Com o prosseguimento da reação, grupos de silanol (Si-OH) são rompidos pelos íons

OH^- em íons SiO^- , sobre a superfície do agregado. Esse processo é representado pela Equação 3.3:



. As cargas negativas criadas pelo rompimento das ligações são balanceadas pelos íons alcalinos com cargas positivas (Na^+ , K^+). Os íons SiO^- liberados são atraídos pelos cátions alcalinos da solução dos poros, formando um gel de silicato alcalino em torno do agregado. Conforme demonstra a Equação 3.4 e a Figura 3.12.



Após esta etapa ocorre a formação do gel que pode ter composição variável e indefinida, pois é influenciada por vários fatores como afirmou Poole (1992) depende da temperatura da reação, concentração dos reagentes, composição da solução dos poros, fase reativa presente no agregado. Uma representação aproximada do gel é dada pela Equação 3.5, a Figura 3.12 representa o processo (DENT GLASSER e KATAOKA, 1981).

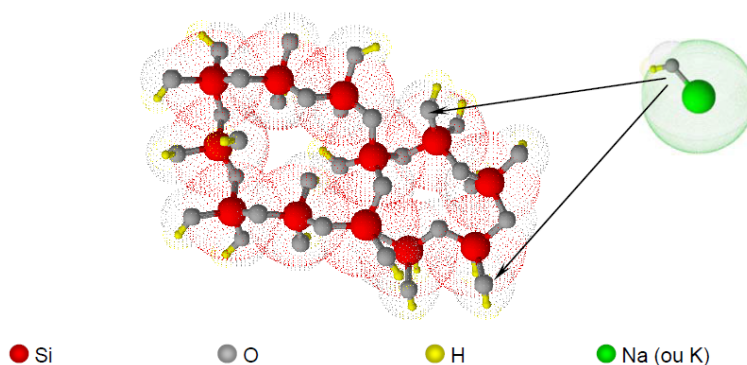
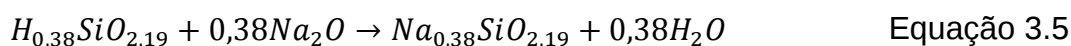


Figura 3.12 - Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas
Fonte: Couto (2008)

Hobbs (1980) indicou um modelo que explica como a expansão ocorre, conforme Figura, dividindo o processo em quatro estágios: sendo o estágio 1 onde ocorre a expansão do gel (tensão na argamassa) mas que não é suficiente para causar microfissuras, no estágio 2 ocorre um aumento das tensões e está é suficiente para que ocorra microfissuras ao redor das partículas reativas, o estágio 3 se inicia com a migração do gel para as microfissuras e um alívio de tensões, no estágio 4 o gel das microfissuras também começa a se expandir causando um aumento das fissuras podendo causar grandes expansões.

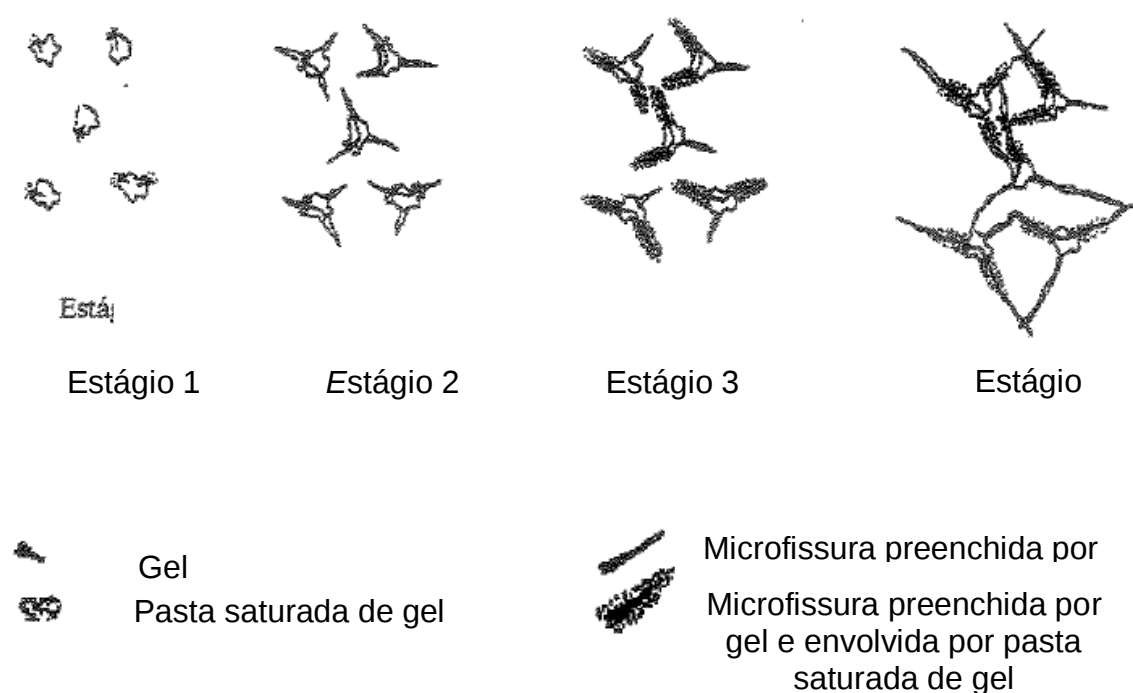


Figura 3.13 - Esquema de progressão e consequência da expansão da RAA
Fonte: Hobbs (1988)

3.4 Medidas de mitigação

Diante dos efeitos tão prejudiciais ao concreto que a reação álcali-agregado pode causar, as pesquisas atuais têm se voltado para evitar que a reação álcali-agregado possa ocorrer. Cada estrutura necessita de uma análise de qual o método mais eficaz de prevenção da reação, pois depende do grau de umidade a que a peça está submetida, a importância da estrutura e o

volume de concreto (HASPARYK, 2005; MUNHOZ, 2007; DE CARVALHO *et al.*, 2010; SHEHATA e THOMAS, 2010).

Para tanto, a norma NBR 15577 (ABNT, 2008a) é inovadora e dedica uma parte a verificação da eficácia da medida de mitigação adotada e quais as medidas preventivas que deverão ser adotadas. Além disso, traz a Tabela 3.2 representada abaixo indicando limites máximos de álcalis de acordo com as medidas preventivas necessárias para a estrutura.

Tabela 3.2 - Medidas de mitigação

Intensidade da ação preventiva	Medidas de mitigação
Mínima	1) limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 3,0kg/m ³ de Na ₂ O equivalente 2) utilizar cimentos CP II-E ou CP II-Z, conforme ABNT NBR 11578, ou CP III, conforme ABNT NBR 5735, ou CP IV, conforme ABNT NBR 5736 3) usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade moderada
Moderada	1) limitar o teor álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m ³ Na ₂ O equivalente 2) utilizar cimento CP III, com no mínimo 60% de escória conforme ABNT NBR 5735 3) utilizar cimento CP IV, com no mínimo 30% de pozolana conforme ABNT NBR 5736 4) usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade forte
Forte	1) utilizar materiais inibidores da reação, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio previsto pela norma 2) substituir o agregado em estudo

Fonte: NBR 15577 (ABNT, 2008a)

Como observado, a norma, na maioria dos itens se limita a indicar o uso de cimento com baixos teores de álcalis, porém, como citado no item X.XX, que descreve os principais componentes envolvidos na reação, outra forma de se

diminuir os efeitos expansivos da RAA é por meio das chamadas adições ativas (cinzas, ecórias), pois estas diminuem os efeitos da RAA, reduzindo a quantidade de álcalis presentes na solução dos poros, (THOMAS, 2011) consequentemente diminuindo a disponibilidade de um dos agentes desencadeadores da reação.

Devido à falta de pesquisas no RN sobre os agregados da região com relação a sua reatividade, este trabalho se voltará ao diagnóstico da reação, não cabendo a discussão mais aprofundada sobre as medidas de mitigação.

3.5 Métodos de investigação da RAA

As pesquisas desenvolvidas já avançaram muito nos dias atuais no que diz respeito ao diagnóstico e prevenção da RAA. Existem várias normas que apresentam métodos que avaliam o comportamento dos agregados, dentre elas, as mais utilizadas são: análise petrográfica, microscopia eletrônica de varredura, método de acelerado em barras de argamassa e método em prismas de concreto.

3.5.1 Análise petrográfica

Esse método fornece informações importantes podendo ser utilizado tanto no diagnóstico da reação quando realizado em concretos afetados pela reação (Figura), quando no entendimento das fases cristalinas e amorfas dos agregados que se pretende estudar, atualmente, a ABNT NBR 15577-3:2008 traz informações sobre o procedimento da análise em agregados.

Hasparyk (1999) descreve a o método, em que se deve utilizar um microscópio polarizador de luz transmitida para que seja possível fazer a descrição mineralógica dos agregados através de lâminas delgadas dos agregados (ou concretos) que se deseja estudar.

O estudo dos agregados através da análise petrográfica visa uma maior compreensão sobre sua composição mineralógica, buscando informações acerca de possíveis minerais reativos presentes nos agregados conforme

observado no item 3.2.2 desta dissertação a norma já prescreve alguns agregados susceptíveis a reação.

Caso a lâmina analisada seja de um concreto possivelmente afetado pela RAA a busca passa a ser por indícios que comprovem a manifestação patológica, como a presença de bordas escuras nos agregados (Figura 3.14), microfissuras invisíveis a olho nu, além da presença de poros preenchidos com produto da reação (SANCHEZ, 2008).

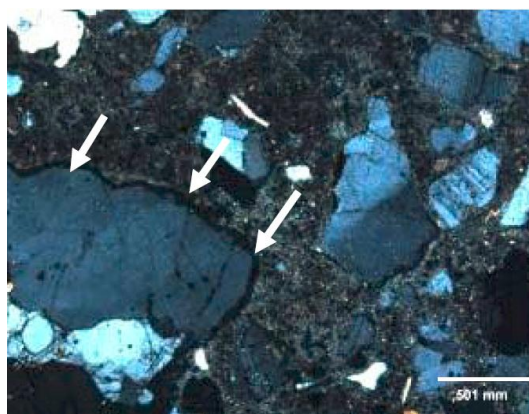


Figura 3.14 - Fragmento de agregado com borda no seu entorno.

Fonte: Hasparyk *et al.* (2012)

Paulon (1981) apud Silva (2009a), Kuperman *et al.* (2005) e posteriormente a própria norma ABNT NBR 15577-3:2008 indicam que este tipo de análise deve ser feita por um profissional experiente no fenômeno, pois a análise a depender do conhecimento do petrógrafo referente a quantidade de fases reativas que deve existir em um agregado e o potencial reativo desta fase, portanto trata-se de um método que não deve ser utilizado de forma isolada.

3.5.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Este tipo de método vem sendo bastante utilizado para fazer diagnósticos de RAA, especialmente quando são feitos ensaios de laboratório, com este método, amostras de concreto ou argamassa são analisadas.

Através desse microscópio é possível identificar tanto a presença do gel presente principalmente nas bordas das interfaces pasta/agregado, podendo

também estar presente nas microfissuras e preenchendo poros da amostra como mostra a figura (HASPARYK, 1999).

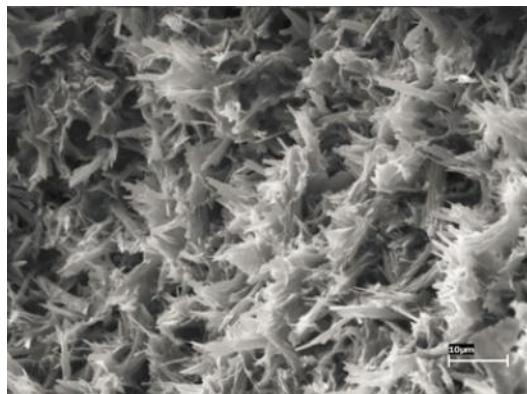


Figura 3.15 - Produtos cristalizados da RAA no poro
Fonte: Hasparyk (2005)

3.5.3 Método acelerado em barras de argamassa

Este método aplica-se a identificação de potencial reativo referente a reação álcali-sílica ou álcali-silicato e é descrito pela ABNT NBR 15577 parte 4 (2008), baseado na norma americana ASTM C 1260 (2005) e canadense CSA A23.2-25^a (1994), vem sendo amplamente utilizado no Brasil para a identificação de agregados reativos.

A análise da reação álcali-agregado é feita através na variação de comprimento de barras de argamassa lidas com auxílio de relógio comparador, os agregados devem preencher uma faixa de frações pré-estabelecidas. Ao contrário da norma americana a brasileira estabelece ainda o teor de álcalis do cimento, porém assim como a brasileira fixa a expansibilidade em autoclave para que não se confunda expansões geradas pelo óxido de magnésio e/ou óxido de cálcio com expansões devido a reação.

Ao final dos 28 dias de ensaio, caso o agregado apresente expansão inferior a 0,19% ele é considerado potencialmente inócuo, do contrário, potencialmente reativo, no caso do agregado ser potencialmente reativo, pode ser utilizado o método que avalia a combinação material cimentício/agregado.

3.5.4 Método para avaliar a combinação cimento/agregado

Quando se pretende utilizar um agregado reativo, a norma ainda estabelece uma alternativa, pois existem adições cimentícias que podem inibir o aparecimento da reação. Dessa forma o ensaio procede da mesma forma descrita no item 3.5.3, sendo a única diferença a possibilidade de utilizar qualquer tipo de cimento ou adição.

Neste caso, após 14 dias de ensaio, se as amostras obtiverem expansões inferiores a 0,10% a ABNT NBR 15577 parte 5 (2008) afirma que o potencial mitigador da adição (cimento) foi comprovado, não ocorrendo, são necessários novos testes.

3.5.5 Método dos prismas de concreto

Método aconselhado pela ASTM C 1293 (1995), CSA A23.2-14A (1994) e ABNT NBR 15577 parte 6 (2008). Que tem por objetivo, assim como o método das barras de argamassa, avaliar o potencial reativo de agregados (gráudo ou miúdo) utilizados nos prismas de concreto através da variação do comprimento dos mesmos.

No caso de análise do agregado gráudo, este deve ser separado em frações determinadas pela norma e moldados três corpos de prova com dimensões de (75x75x285) mm e relação a/c entre 0,42 e 0,45 em massa, com consumo de cimento de 420 kg/m³ e equivalente alcalino de 1,25% na massa de concreto.

Os corpos de prova devem ser mantidos em solução alcalina para que se acelere o desenvolvimento da reação. No caso das análises deve ser lembrado que um dos dois tipos de agregado sempre deve ser inócuo para que se analise o potencial reativo do outro.

O tempo total de ensaio é de 1 ano, com leituras aos 7, 28, 56 dias, 3, 6, 9 e 12 meses. As leituras são feitas com auxílio de relógio comparador.

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os métodos do ensaio acelerado em barras de argamassa, método para avaliar a combinação material cimentício/agregado e ao final a microscopia eletrônica de varredura.

3.6 Casos de RAA no Brasil

Ainda que não tenham sido oficializados casos de RAA localizados no Rio Grande do Norte, existem inúmeros outros identificados no Brasil, como demonstra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Estruturas de concreto com evidências de RAA

Estrutura de Concreto	Estado	Ano de Construção	Natureza do Agregado	Natureza da Reação
Barragem de Tapacurá/DNOS	PE	1975	Granito e gnaiss cataclasados	Álcali-silicato
Base de concreto de instalação industrial da White-Martins	PE	1982	Granito e gnaiss cataclasados	Álcali-silicato
Base de concreto/Angelin	PE	-	Rocha granitoide deformada e milonito	Álcali-silicato
Base de concreto Mirueira	PE	-	Biotita, hornblenda e gnaiss	Álcali-silicato
Base de concreto Benji	PE	-	Biotita, gnaiss	Álcali-silicato
Base de concreto Pirapama	PE	-	Hornblenda, biotita, gnaiss	Álcali-silicato
Barragem de Paulo Afonso I a IV	BA/AL	1955-1979	Granito, gnaiss e migmatito	Álcali-silicato
Barragem de Pedras	BA	1970	Granito	Álcali-silicato
Barragem Joanes II	BA	1969-1971	Gnaiss, migmatito e granulito	Álcali-silicato
Barragem Moxotó	BA/AL	1972-1977	Granito, gnaiss e migmatito	Álcali-silicato
Barragem Sobradinho	BA	1979	Quartzito	Álcali-silicato
Barragem de Ilha de Pombos	RJ/MG	1920	Gnaiss milonítico, biotita e gnaiss	Álcali-silicato
Barragem de Peti	MG	1946	Gnaiss	Álcali-silicato
Barragem de Furnas	MG	1958-1963	Quartzito	Álcali-

Barragem de Biliings/Pedras	SP	1926	Granito	silicato Álcali-silicato
Barragem de Pedro Beicht	SP	1932	Granito-gnaiss	Álcali-silicato
Barragem Santa Branca	SP	1960	Biotita, gnaiss cataclástico	Álcali-silicato
Barra Bonita	SP	1963	Basalto	Álcali-silicato
Usina Taiçã	SP	>50 anos	Milonito	Álcali-silicato
Barragem de Rio das Pedras	SP	-	Mica-xisto e gnaiss	Álcali-silicato
Tomada d'Água/Sistema Cantareira	SP	-	Gnaiss cataclástico	Álcali-silicato
UHE Salto do Meio	PR	-	Basalto	Álcali-silicato
UHE Guaricana	PR	-	Milonito, basalto e granito	Álcali-silicato
Usina Elevatória de Pedreira	SP	-	Granito gnássico	Álcali-silicato
Barragem Paiva de Castro	SP	-	Granito gnássico	Álcali-silicato
Barragem Ribeirão do Campo	SP	-	Milonito	Álcali-silicato
Barragem de Cascata	SP	-	Granito/gnaiss	Álcali-silicato
Barragem de Atibainha	SP	-	Milonito	Álcali-silicato
Reservatório de Paraibuna	SP	-	Milonito	Álcali-silicato
Barragem de Jaguari	SP	-	Gnaiss	Álcali-silicato
Barragem de Vossoroca	PR	-	Gnaiss	Álcali-silicato
Ponte Paulo Guerra	PE	1977	Gnaisses e milonitos	Álcali-silicato
Fundações de cerca de 30 prédios residenciais	PE	A maior parte na década de 80	Gnaisses e milonitos	Álcali-silicato

Fonte: Hasparyk (1999); Andrade *et al.* (2006); Battagin *et al.* (2009)

CAPÍTULO 4

Metodologia Experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e o procedimento experimental adotado, com a finalidade de alcançar os objetivos definidos para a pesquisa.

A dosagem dos corpos de prova de argamassa utilizados em todos os ensaios foi feita respeitando o que prescreve a norma NBR 15577 (ABNT, 2008a), a moldagem, assim como toda a caracterização física das amostras, foram feitas no Laboratório de materiais de construção da Diretoria Acadêmica de construção civil - DIACON no IFRN. A determinação da expansão pelo método acelerado em barras de argamassa foi realizada no laboratório da empresa TECOMAT em Recife.

Visando um maior entendimento dos materiais bem como mudanças na composição química, mineralógica e/ou microestrutural das argamassas, os materiais de partida (pó de pedra) e as argamassas endurecidas foram caracterizados química, mineralógica e microestruturalmente nos laboratórios da Diretoria Acadêmica de Recursos Naturais - DIAREN IFRN.

O trabalho avaliou o potencial reativo dos agregados utilizados na Grande Natal e posteriormente caracterização da argamassa exposta ao banho térmico em solução de NaOH durante 28 dias, objetivando fazer uma comparação entre o cimento-padrão descrito pela norma e o cimento CPV ARI-RS, devido ao elevado uso deste tipo de cimento nas obras da região.

Na primeira fase do trabalho, coletaram-se amostras de pó de pedra de quatro jazidas distintas (que serão denominadas neste trabalho como J1, J2, J3 e J4) provenientes da Grande Natal, escolhidas de acordo com a importância para a região. Considerando a essencialidade da caracterização dos materiais quanto as suas propriedades químicas e mineralógicas foram priorizados os ensaios DRX e FRX.

A segunda fase do trabalho constituiu-se na caracterização da argamassa segundo sua resistência à compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico. Por fim, a terceira fase, que foi, por questões complementares, avaliar as condições finais de argamassas submetidas às condições de RAA. Analisou-se também o potencial reativo dos agregados segundo a norma NBR 15577 parte 4 (ABNT, 2008a).

Os ensaios procederam conforme fluxograma apresentado na

Figura 4.1:

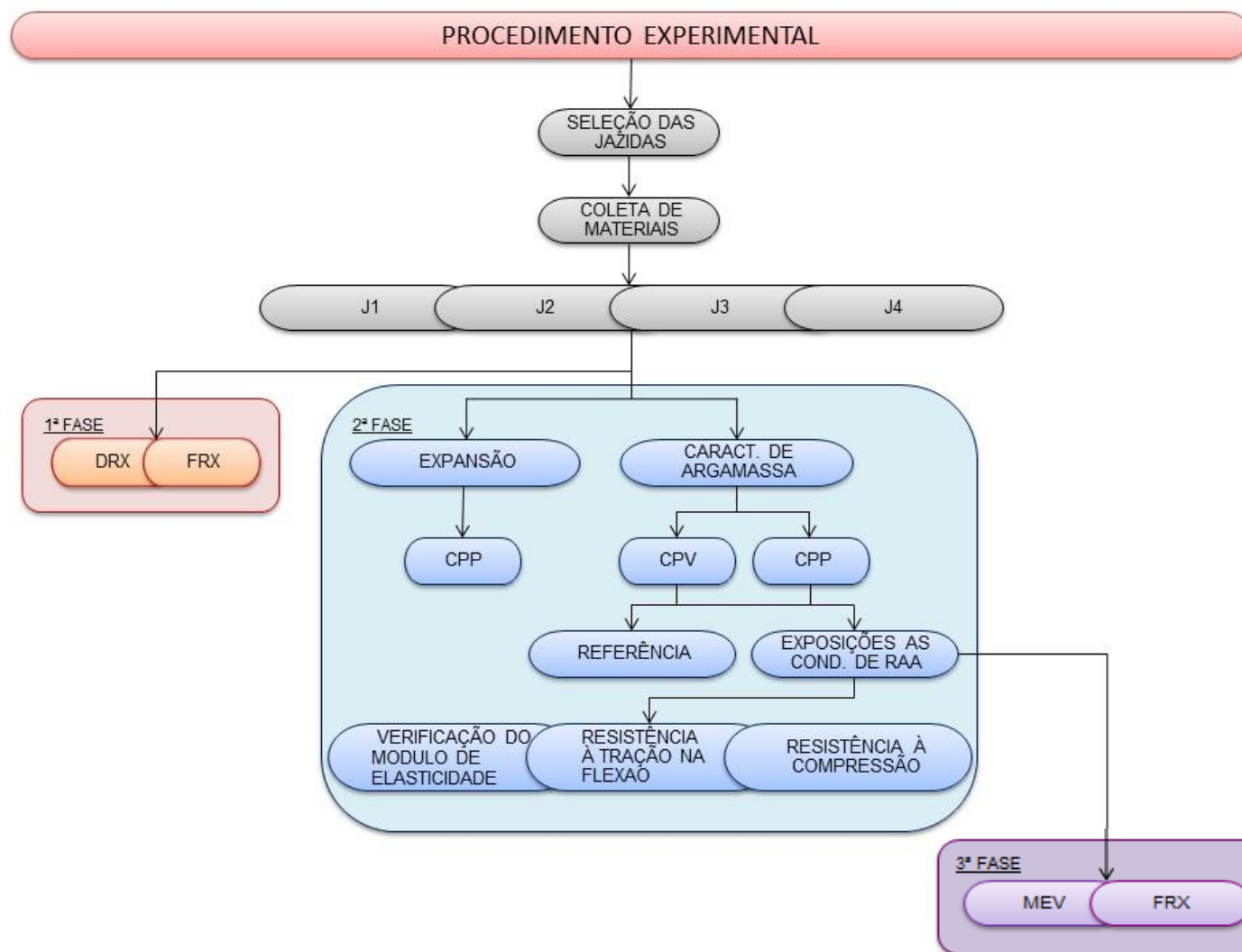


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no procedimento experimental

4.1 Materiais

4.1.1 Cimento

Conforme justificativa acima, foram empregadas duas variedades de cimento, o primeiro deles é denominado cimento padrão, fornecido pela empresa Tecomat, e possui as seguintes especificações (Tabela 4.1):

Tabela 4.1 – Características do cimento padrão (informações cedidas pela Tecomat)

		Valores	Unidade
Composição química	Óxido de sódio (Na_2O)	0,30	%
	Óxido de potássio (K_2O)	0,82	%
	Equivalente alcalino em Na_2O	0,84	%
Finura	Blaine	4870	cm^2/g
	Expansibilidade em autoclave	0,08	%

O segundo foi o cimento CP V ARI-RS, fornecido pelo Laboratório de Materiais de Construção da DIACON de acordo com a Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Características do cimento CPV ARI-RS			
		Valores	Unidade
Composição química	Óxido de sódio (Na_2O)	0,20	%
	Óxido de potássio (K_2O)	1,03	%
	Equivalente alcalino em Na_2O	0,45	%
Finura	Blaine	4520	cm^2/g

Para a eliminação de gomos do cimento as duas variedades foram passadas pela peneira 850 μm .

4.1.2 Água e Solução de NaOH

A solução de NaOH foi utilizada no procedimento de cura térmica, os corpos de prova permaneciam mergulhados na mesma durante 28 dias, quando então eram realizadas medições de expansão periódicas e no ensaio de propriedades das argamassas após passado os 28 dias em solução os corpos de prova eram submetidos aos testes de resistência.

De acordo com recomendação da norma, a água utilizada tanto no preparo das amostras quanto na solução foi destilada e mantida na temperatura de 21 à 25°C.

Para o preparo das soluções foi utilizado NaOH p.a. com a concentração final de 1 N.

4.1.3 Agregado

Foram recolhidos aproximadamente 20 kg de pó de pedra em quatro jazidas sendo cada uma delas numeradas (J1, J2, J3, J4), posteriormente este

foi peneirado e separado segundo a granulometria exigida pela norma NBR 15577 (ABNT, 2008a), conforme demonstrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Agregados separados na granulometria exigida

Levando em conta o local da coleta da amostra, analisando o mapa geológico feito pela CPRM/FAPERN (2006) (Figura 4.3), foi possível determinar as características das rochas utilizadas. A área do retângulo vermelho representa a área de onde foram retiradas as amostras.

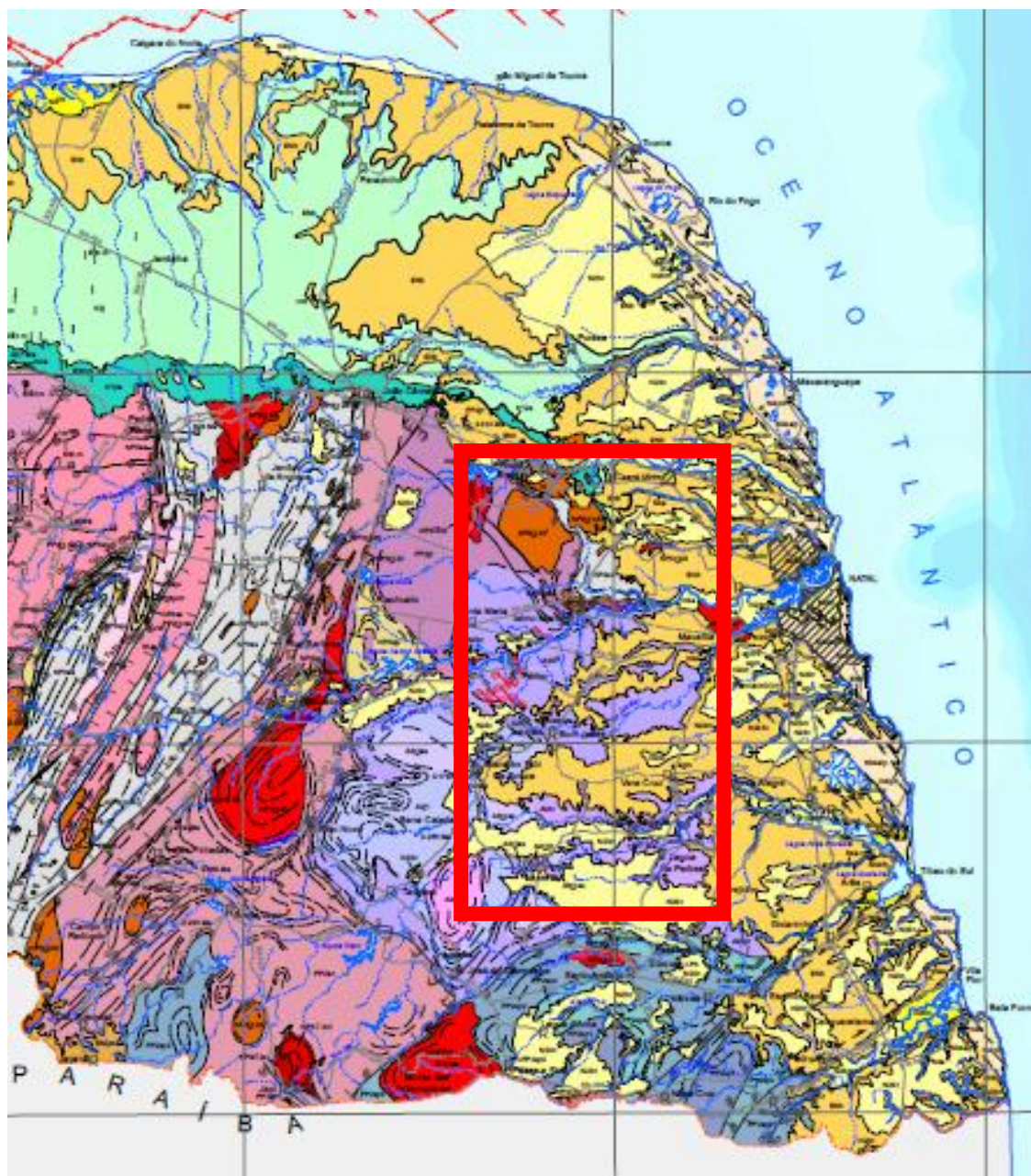


Figura 4.3 – Mapa geológico do Rio Grande do Norte

As áreas das jazidas podem ser vistas em detalhe nas Figura 4.4 a Figura 4.6.

A Jazida J1, mostrada na Figura 4.4 encontra-se numa área definida no mapa como sendo pertencente ao complexo Presidente Juscelino, o qual apresenta características de rochas graníticas.

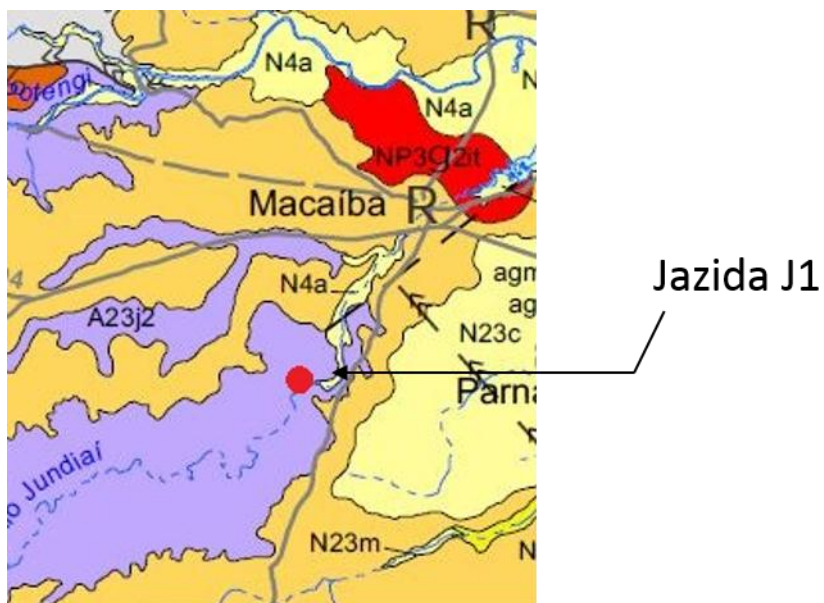


Figura 4.4 - Indicação da Jazida J1 em mapa geológico

A Jazida J2, ilustrada na Figura 4.5 está localizada na área denominada complexo Brejinho, entre os municípios de Monte Alegre e Lagoa de Pedras, que também apresenta predominância de aspectos condizentes com rochas graníticas.

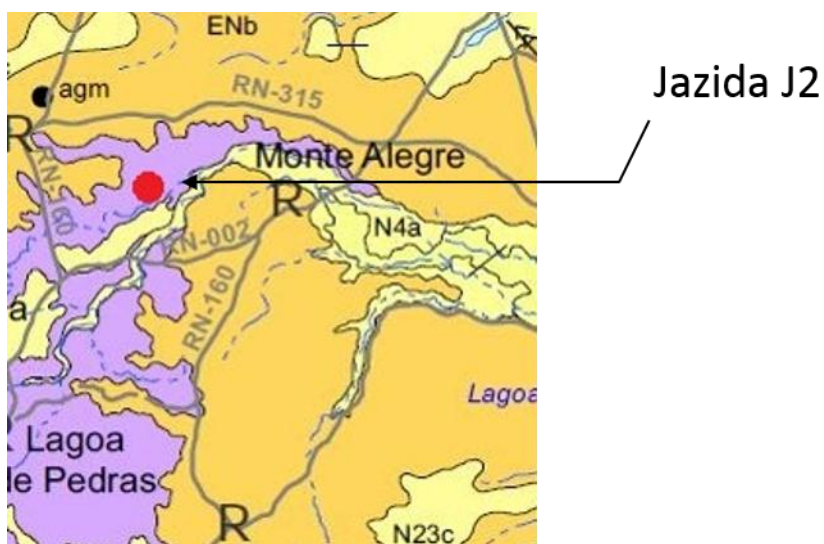


Figura 4.5 - Indicação da Jazida J2 no mapa geológico

A Figura 4.6 apresenta as Jazidas J3 e J4 que estão situadas na mesma matriz rochosa (representada pela mesma cor no mapa), e assim como as outras duas jazidas apresenta características de rocha granítica.

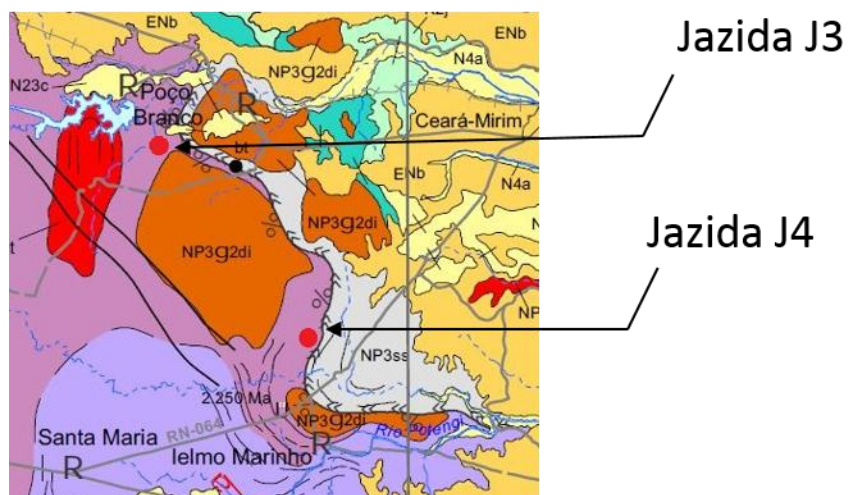


Figura 4.6 – Indicação da Jazida J3 e J4

Os agregados coletados de cada jazida estão demonstrados na Figura 4.7.



Figura 4.7 - Agregados graníticos utilizados

4.2 Dosagem moldagem e cura dos CPs

Para realizar os ensaios citados abaixo os agregados foram peneirados, lavados, secados na estufa e classificados conforme as frações indicadas a seguir na Tabela 4.3, assim como as quantidades de cimento e água, respeitando sempre a proporcionalidade dos materiais apontada pela norma NBR 15577 (ABNT, 2008a) que determina, uma relação água cimento de 0,47 e o traço de 1:2,25.

A mistura foi realizada em argamassadeira de eixo vertical com cuba de aço inoxidável com capacidade de 5 L, o tempo de mistura foi de 4 minutos, sendo nos primeiros 30 s a mistura do cimento e água em velocidade baixa, passado esse tempo, foi colocado o agregado durante 30 s sem paralisar a operação, e a velocidade aumentada para velocidade alta por mais 30 s, desligando a argamassadeira por 1 min e 30 s e religando na velocidade alta por 1 min.

4.2.1 Caracterização granulométrica

A Tabela 4.3 refere-se as quantidades de material utilizadas para a realização do ensaio, os valores correspondem a confecção de três corpos de prova medindo e foram determinadas pela norma NBR 15577 (ABNT, 2008a).

Tabela 4.3 - Quantitativos de cimento e água utilizados na moldagem dos corpos de prova, juntamente com a granulometria do agregado miúdo

Relação água/cimento			0,47	
Agregado - Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)			Quantidade de material em massa	
			CP (25X25X285) mm	CP (40X40X160) mm
Passante	Retido	%	g	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0	118,8
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5	297
1,18 mm	600 µm	25	247,5	297
600 µm	300 µm	25	247,5	297
300 µm	150 µm	15	148,5	178,2
TOTAL			990	1188

No caso do ensaio de exposição às condições de RAA, devido a necessidade de testar dois tipos de cimento, necessitou-se de duas vezes essa quantidade por jazida.

4.3 Ensaios realizados

4.3.1 Massa específica

Foi realizado o cálculo da massa específica dos agregados utilizados na confecção dos corpos de prova, utilizando o método do frasco de Chapman descrito na norma NBR NM 52 (ABNT, 2009).

4.3.2 Exposição às condições de RAA

Devido ao propósito da dissertação de analisar as propriedades da argamassa submetida às condições do ensaio acelerado em barras de argamassa, o processo foi conduzido da seguinte forma: moldaram-se seis corpos de prova de cada jazida, sendo três utilizando CPV ARI-RS e três utilizando o cimento padrão. Cada CP medindo 4x4x16cm, após a moldagem

os corpos de prova foram posicionados em câmara úmida à $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e 95% de umidade durante 24 horas, após esse período, as amostras foram retiradas dos moldes e imersas em água e inseridas em estufa aquecendo gradualmente da temperatura ambiente até 80°C por mais 24 horas para só então serem transferidas para uma solução de NaOH (1N e 80°C) e lá permanecerem no decorrer de 28 dias. A Figura 4.8 apresenta um fluxograma do processo realizado, enquanto que a Figura 4.9 apresenta os corpos de prova, de argamassa sendo submetidos ao ensaio de RAA.

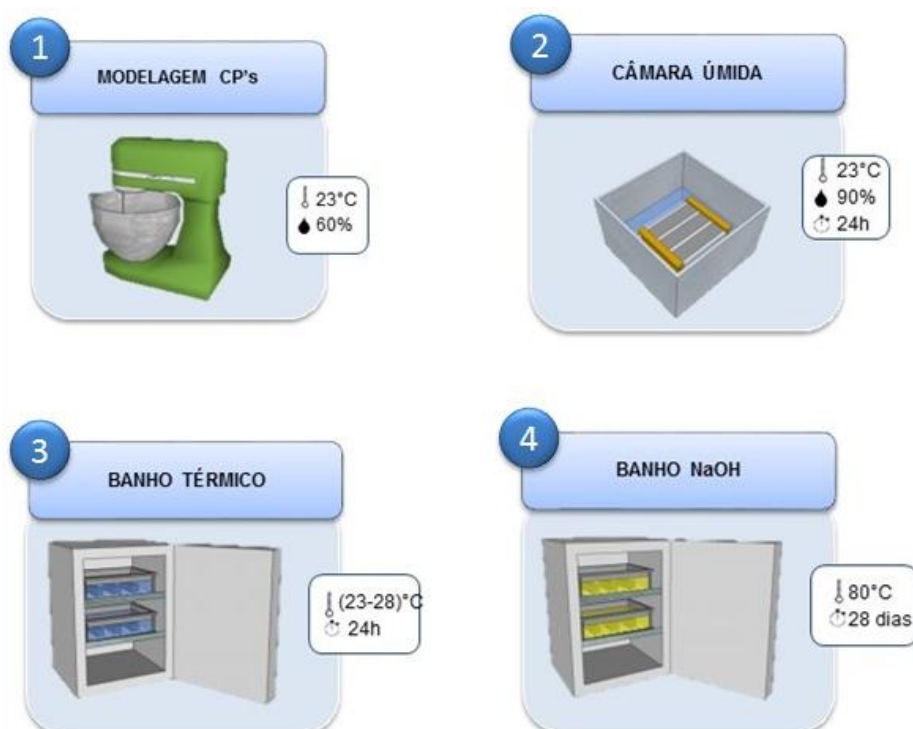


Figura 4.8 - Fluxograma de exposição às condições de RAA



Figura 4.9 – Corpos de prova de argamassa durante o ensaio

Existia uma preocupação em manter as amostras sempre cobertas pela solução de NaOH, para manter o maior contato possível entre os corpos de prova e a solução, para tanto, foi colocada uma grade no fundo do recipiente e um plástico na parte superior para evitar que houvesse uma evaporação excessiva da solução.

Para garantir que a solução mantivesse um nível constante, pelo menos uma vez por semana era colocada mais solução no recipiente para completar o que evapora de solução.

Cuidados também foram tomados com relação ao tipo de material tanto do recipiente quanto da grade inferior, foi utilizado o aço inox por acreditar que os mesmos não iriam interferir com a solução utilizada e suportassem a temperatura de 80°C.

A Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 mostram os corpos de prova após os 28 dias de ensaio.



Figura 4.10 - Corpos de Prova J1



Figura 4.11 - Corpos de Prova J2



Figura 4.12 - Corpos de Prova J3



Figura 4.13 - Corpos de Prova J4

4.3.3 Velocidade do pulso ultrassônico

O ensaio de ultrassom foi realizado posteriormente a etapa citada no Item 3.2.3, após a retirada dos corpos de prova da solução de NaOH, os mesmos foram expostos às condições de 23°C e 60% de umidade por 2 horas antes da realização do ensaio, conforme recomendação da norma NBR 8802 (ABNT, 2013), com a preocupação de que após este período os mesmos estivessem em equilíbrio térmico com a sala, caso isso não ocorresse, esse tempo era aumentado até que o corpo de prova estivesse na temperatura desejada. Utilizou-se o equipamento Pundit Lab+ modelo 32610001 da marca Proceq.

Após as leituras realizadas pelo equipamento, juntamente com os valores das densidades dos CP's foram obtidos os módulos de elasticidade. A

Figura 4.14 e Figura 4.15 apresentam partes do processo de realização do ensaio de ultrassom em corpos de prova de argamassa.



Figura 4.14 - Dimensões do corpo de prova sendo conferidas



Figura 4.15 - Ensaio de ultrassom sendo realizado em corpo de prova de argamassa

4.3.4 Cálculo do módulo de elasticidade dinâmico

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico leva em conta a velocidade do pulso ultrassônico e é dado pela Equação 4.1 retirada da norma NBR 15630 (ABNT, 2008):

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico em megapascal (MPa);

v – velocidade de propagação da onda ultra-sônica (mm/ μ s);

ρ – densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m³);

μ – coeficiente de Poisson. Adotou-se o valor 0,2.

4.3.5 Ensaio de tração na flexão e compressão

Após o período de 28 dias de exposição dos corpos de prova de argamassa à solução descrita no item 4.3.2, e realização do ensaio de ultrassom em cada barra, foi determinada a resistência à tração na flexão e à compressão axial.

Os rompimentos dos corpos de prova foram realizados na prensa CONTENCO modelo I-3025-B, seguindo as recomendações de incremento de carga indicadas na norma NBR 13279 (ABNT, 2005):

Tração na flexão: aplicou-se carga de (50 $\pm$ 10) N/s

Compressão: aplicou-se carga de (500 $\pm$ 50) N/s

A Figura 4.16 e a Figura 4.17 apresentam a realização dos ensaios de tração na flexão e compressão axial respectivamente.



Figura 4.16 - Ensaio de tração na flexão dos CP's submetidos à 28 dias de solução de NaOH

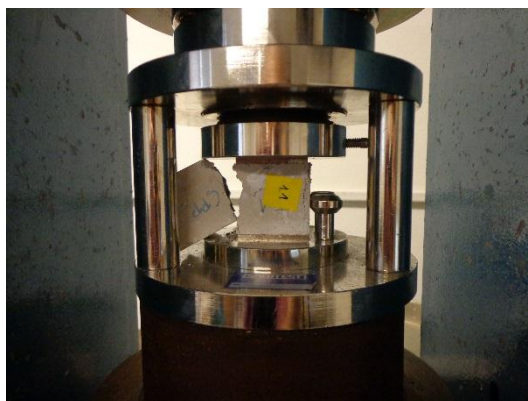


Figura 4.17 - Rompimento de CP de argamassa submetido à compressão

Primeiramente era realizado o rompimento à tração na flexão de todos os corpos de prova, para em um segundo momento realizar o ensaio de compressão nas duas metades restantes dos corpos de prova após o ensaio de tração na flexão assim como recomenda a NBR 13279 (ABNT, 2005).

4.3.6 Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

O ensaio descrito a seguir foi realizado no laboratório TECOMAT na cidade de Recife/PE.

Foram moldados três corpos de prova para cada jazida escolhida. O traço a ser utilizado para a moldagem dos corpos de prova foi de 1:2,25 com relação água/cimento de 0,47. O cimento utilizado seguiu as recomendações do cimento padrão descrito na parte quatro da norma NBR 15577 (ABNT, 2008a).

A argamassa foi preparada da acordo com o que está prescrito na parte quatro da NBR 15577 (ABNT, 2008a). Primeiramente as frações foram homogeneizadas e reservadas para a posterior mistura com a pasta, após esse processo, foram moldados corpos de prova prismáticos de 25x25x285mm, conforme ilustrado na Figura 4.18.

Após a moldagem das barras, estas permaneceram durante 24h em câmara úmida com umidade de 95% e temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ para o endurecimento e depois serem desformadas, após a desforma foi realizada a

leitura inicial das barras com auxílio de o relógio comparador (Figura 4.19) e as mesmas colocadas em recipiente para cura em água, o recipiente foi gradualmente aquecido desde a temperatura ambiente até $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e lá permaneceram durante mais 24h.

Após a primeira fase de cura, foi realizada a chamada leitura zero das barras e a transferência para recipiente em solução aquosa de NaOH 1N a $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ onde permaneceram durante 28 dias (Figura 4.20).

Existiu uma preocupação quanto ao controle de temperatura e umidade dos locais onde eram feitas as leituras, tentando manter uma constância, para que estes não se tornassem mais uma variável no estudo, a temperatura da sala de moldagem e leituras era sempre mantida em $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade de 60%.



Figura 4.18 - Moldagem dos corpos de prova de argamassa



Figura 4.19 - Leitura das barras no relógio comparador



Figura 4.20 - Recipiente utilizado para acondicionar as barras em solução de NaOH

Durante o processo de cura em solução, foram feitas leituras com o uso de relógio comparador, as medidas foram feitas comparando a expansão com o tamanho original com precisão de 0,001% e o tempo para a medição não ultrapassou (15 ± 5) s, contados a partir da remoção da barra da água, com o objetivo de não resfriar a barra de forma significativa. A expansão das barras foi acompanhada através da realização de medições nas idades de 2, 5, 7, 9, 14, 16, 20, 21, 26, 28 e 30 dias, contados a partir da moldagem.

Determinou-se como sendo a média das expansões das três barras, com aproximação de 0,01%. Para o cálculo da expansão será utilizada a Equação 4.2:

$$Expansão = \frac{L_i - L_0}{Comp. Efetivo} \cdot 100\% \quad \text{Equação 4.2}$$

Sendo:

L_i – Leitura do dia

L_0 – Leitura zero

Comp. Efetivo – Distância entre pinos das formas

Os mesmos cuidados tomados no Item 4.3.2 foram tomados nesse Item, tanto com relação aos materiais utilizados serem inertes a solução e o preparo da solução para complementar a solução evaporada.

4.3.7 Caracterização química, cristalográfica e microestrutural

A caracterização da microestrutura foi realizada em dois momentos. Objetivando a caracterização dos agregados utilizados foram retiradas amostras dos mesmos, pulverizadas e passadas na peneira 150 μm . Na segunda etapa da pesquisa as argamassas no estado endurecido foram caracterizadas.

4.3.7.1 Microscopia eletrônica de varredura

A análise da microestrutura dos materiais foi determinada através da microscopia eletrônica de varredura, a amostra foi preparada através da metalização da mesma e posicionamento com fita adesiva sobre o porta-amostra, no equipamento da TESCAN modelo VEGA LMU. Após a preparação, a amostra foi analisada quanto a sua microestrutura.

4.3.7.2 Fluorescência de raios-X

Visando a determinação dos compostos químicos dos materiais foi empregada a fluorescência de raios-X. Utilizou-se cerca de 300 mg de amostra em pó no equipamento Espectrômetro por fluorescência de raios X EDX-720 da marca Shimadzu.

CAPÍTULO 5

Resultados e Discussões

O desenvolvimento do capítulo se baseia na apresentação dos resultados dos ensaios e análise dos agregados estudados e as propriedades mecânicas e elásticas da argamassa: resistência à tração na flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade e o ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa.

5.1 Caracterização dos agregados

Na Tabela 5.1, estão os valores obtidos nos ensaios de massa específica dos agregados utilizados.

Tabela 5.1 - Massas específicas dos agregados utilizados

	J1	J2	J3	J4
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,60	2,64	2,58

De acordo com Popp (1998), a densidade das rochas graníticas estão em torno de 2,60 g/cm³, os resultados obtidos pelos ensaios de massa específica estão em torno da mesma faixa de valores, conforme demonstra a referida Tabela, indicando assim que o agregado estudado trata-se de um granito.

Em virtude da utilização do pó de pedra para os ensaios e, portanto, a impossibilidade de se realizar a petrografia nos mesmos, a caracterização foi feita baseada na observação dos agregados com lupa e na busca de dados acerca das características das matrizes rochosas aos quais pertenciam.

Os agregados apresentavam características semelhantes aos agregados granodioríticos, segundo, Leinz e Amaral (1998), Popp (1998), Press *et al.*

(2006) e Szabó *et al.* (2009), conforme demonstram a Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 os granitos representam o grupo das rochas ácidas, composto essencialmente por quartzo, feldspato (mineral que promove as diferentes cores do granito), e mica.

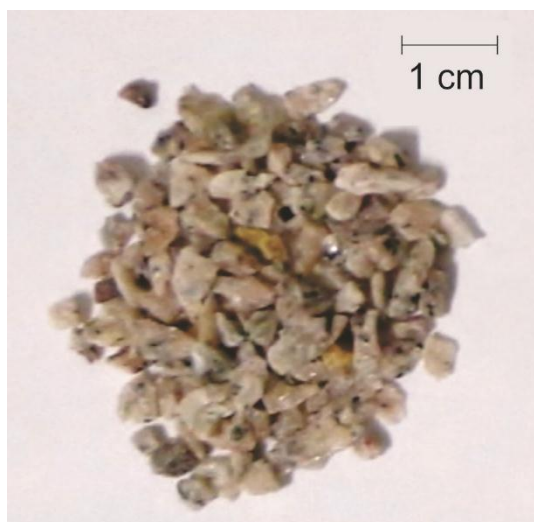


Figura 5.1 - Agregado da jazida J1



Figura 5.2 - Agregado da jazida J2



Figura 5.3 - Agregado da jazida J3



Figura 5.4 - Agregado da jazida J4

O granito é classificado como sendo uma rocha magmática (ígnea) que apresenta uma lenta cristalização. É possível encontrar neste tipo de rocha, fases reativas como o quartzo tensionado nos granitos como afirmado por Hasparyk (2005), concordando com o que foi dito, tem-se o trabalho de Silva

(2009a), Silva (2009b) que utilizou agregado granítico e denominou-o como sendo potencialmente reativo através da análise petrográfica.

5.1.1 Caracterização da microestrutura

Os resultados dos ensaios realizados nos agregados estão apresentados na Tabela 5.2 para os resultados de FRX e a Figura 5.5 para os resultados de DRX.

Tabela 5.2 - FRX dos agregados utilizados nos ensaios

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	Outros
J1	76,16	11,51		5,73		4,73	1,87
J2	64,44	7,83	8,9	10,94		5,48	2,41
J3	76,41	11,85		1,94	4,46	3,68	1,66
J4	68,72	11,41		11,69		5,92	2,25

Analisando os resultados apresentados pelo FRX, pode-se observar que os agregados das diferentes jazidas não apresentam diferenças significativas em suas composições químicas, apresentando teores elevados de sílica (Si₂O) e alumina (Al₂O₃), e menores teores de Óxido de Cálcio e Hematita, corroborando com os resultados encontrados por Fernandes (2005) e Marinoni *et al.* (2011).

Leinz e Amaral (1998), classificam as rochas de acordo com a sua composição química conforme a porcentagem de SiO₂. Segundo o mesmo, fala-se em rochas ácidas quando o teor de SiO₂ forem superiores a 65% (fato que se aplica a todas as amostras analisadas), estando dentro destas o grupo dos granitos, confirmando os resultados das análises visuais de caracterização da amostra, que tem sua variação de cor de acordo com o feldspato, que é o mineral mais frequente neste tipo de rocha. Devido ao sistema de cristalização e sua clivagem, os feldspatos se dividem em: ortoclásio (K₂O . Al₂O₃ . 6SiO₂) e plagioclásio que possui composição química variável: albita (Na₂O . Al₂O₃ .

6SiO₂) e anortita (CaO . Al₂O₃ . 2SiO₂), essas diferenças entre os teores e formas do feldspato presentes, explicam o aparecimento de K₂O e Na₂O nas jazidas J2 e J3.

Vale ressaltar que nas jazidas J2 e J4, foram encontrados teores considerados elevados de hematita (Fe₂O₃) para agregados, o que pode ser explicado pela presença de biotita nos agregados destas jazidas, cuja formula química (K(Mg,Fe)₃(OH,F)₂(Al,Fe)Si₃O₁₀) possui ferro em sua composição.

Os gráficos do DRX não apresentam grandes quantidades de material amorfo, o que indica a não reatividade da amostra como pode ser visto na Figura 5.5, diferente de Marinoni *et al.* (2011) que encontraram através do DRX a presença de sílica amorfa, indicando reatividade no agregado, que contradizia o que foi indicado pelo ensaio de análise petrográfica. Através do gráfico pode-se dizer, assim como nos resultados de FRX, que tratam-se de amostras semelhantes, visto que vários picos se sobrepõem, podendo ser encontrada a presença de Sílica, Alumina, Hematita e Calcita, destacando o elevado pico de sílica em todas as amostras.

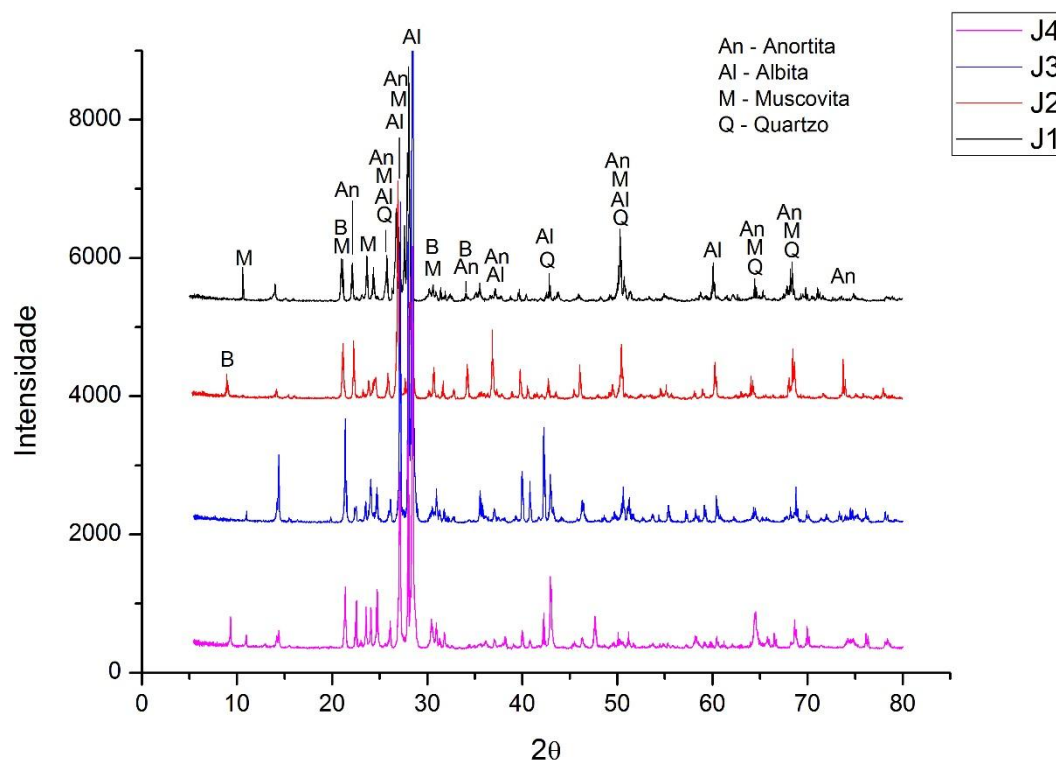


Figura 5.5 - DRX dos agregados utilizados nos ensaios

Visto que as análises feitas determinam apenas a composição química da rocha, além do exposto na literatura por Leinz e Amaral (1998), Popp (1998) e Press *et al.* (2006), sabe-se que o processo de cristalização das rochas graníticas é um processo lento, porém para analisar de forma mais aprofundada a existência de formas reativas na amostra (tais como o quartzo tensionado já mencionado neste mesmo item), seriam necessárias análises petrográficas nas amostras, ainda que em alguns casos, como em Silva (2009b), as análises petrográficas tenham demonstrado que os agregados apresentavam formas reativas e o ensaio acelerado em barras de argamassa tenha classificado os agregados como inócuos.

5.1.1.1 Argamassas

A Tabela 5.3 e Tabela 5.4 apresentam os resultados obtidos no ensaio de FRX. A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos quando utilizado o CPV ARI-RS. e a Tabela 5.4 os resultados de quando utilizado o cimento padrão.

Fluorescência de raios-X

A Tabela 5.3 e Tabela 5.4 indicam os resultados dos ensaios de FRX realizados nas amostras retiradas dos CP's moldados com o cimento CPV ARI-RS e o cimento padrão respectivamente.

Tabela 5.3 - Fluorescência de raios-X em argamassa utilizando CPV ARI-RS

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Outros
J1	40,55	36,01	10,25	6,32		3,32	3,55
J2	42,41	33,80	9,85	6,27	3,38	2,43	1,86
J3	40,97	31,96	10,20	4,14	6,30	2,41	4,02
J4	38,85	32,83	10,02	6,75	4,90	3,07	3,58

Tabela 5.4 - Fluorescência de raios-X em argamassa utilizando cimento padrão

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Outros
J1	44,22	32,71	8,20	4,64	3,34	2,54	4,35
J2	41,47	34,13	8,16	5,35	3,78	2,32	4,79
J3	45,19	31,85	8,26	4,19	3,68	2,14	4,69
J4	38,19	36,02	9,55	5,22	3,35	2,97	4,70

Os resultados das análises de fluorescência de raios X indicam os principais compostos presentes em argamassas, sendo os principais a sílica e o óxido de cálcio. Na primeira análise, a argamassa apresentou teores de cerca de 40% de sílica e 33% de óxido de cálcio, bem próximo aos teores apresentados pelas argamassas produzidas com o cimento padrão, que foram teores de 42% e 33% para sílica e óxido de cálcio respectivamente, o que pode

ser explicado pela grande semelhança química entre os dois cimentos e os tipos de agregados utilizados no processo, além da igual condição de armazenamento das amostras.

Mais uma vez, as jazidas J1 e J4 apresentam comportamentos semelhantes durante o processo, provavelmente devido à natureza semelhante dos dois agregados.

5.1.1.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com o objetivo de complementar as análises microestruturais, foram realizadas análises com auxílio do microscópio eletrônico de varredura cujas imagens estão apresentadas abaixo. Foram realizadas ampliações próximas as utilizadas nos trabalhos de Couto (2008), Hasparyk (2005), Silva (2009b) e Yurtdas *et al.* (2013), as quais foram: 200x, 500x, 600x, 1000x e 3000x para um comparativo melhor entre as imagens coletadas, além da busca pela zona de transição entre pasta e agregado e poros da argamassa, pois são nesses pontos que é possível ver os sinais de manifestação da RAA.

Na Figura 5.6 e Figura 5.7, são apresentadas as microscopias realizadas na amostra estudada da Jazida J1.

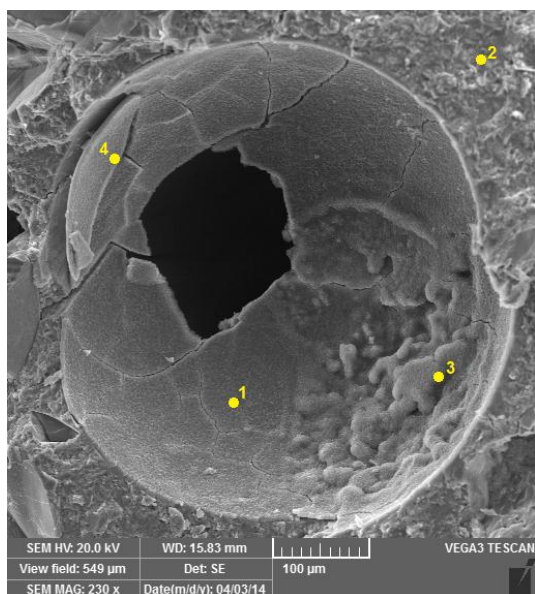


Figura 5.6 - Poro de CP moldado com CPV ARI-RS

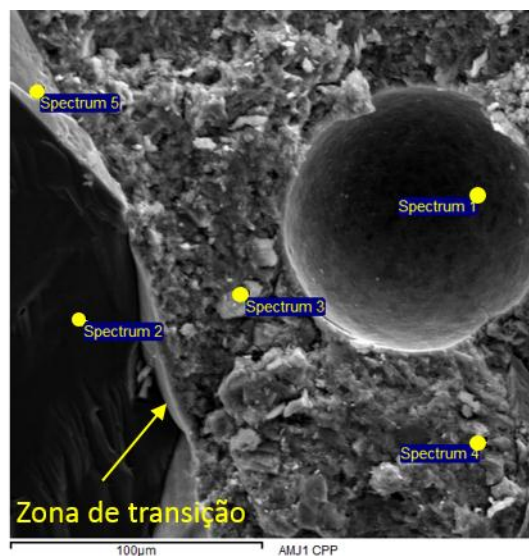


Figura 5.7 - Zona de transição do CP moldado com Cimento-Padrão

Na Figura 5.6 observa-se um poro encontrado na amostra de J1, que quando visto à olho nu apresentava compostos esbranquiçados em sua superfície. Ao se analisar com auxílio de microscópio eletrônico de varredura foi percebido que existe a formação de compostos dentro do poro, porém estes não apresentam a mesma formação encontrada por Hasparyk (2005), Couto (2008), Silva (2009b) e Yurtdas *et al.* (2013) que ao utilizarem a mesma ampliação, foram observados grande formação de gel característico da reação. Na Figura 5.7, refere-se a um poro próximo a um agregado onde não se observa presença de gel em seu contorno, também é possível perceber que os agregados estão envoltos na pasta de cimento.

Os resultados do EDS obtidos nos pontos indicados estão apresentados nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6.

Tabela 5.5 - EDS da amostra J1 com CPV ARI-RS

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	5,56	1,35	25,26	0,43	25,20	0,11	42,09
2	4,87	1,82	14,18	0,31	41,19	1,29	36,34
3	5,21	1,33	26,11	0,48	24,34	0,00	42,55
4	7,71	1,51	22,18	0,49	26,64	1,12	40,35

Tabela 5.6 - EDS da amostra J1 com cimento padrão

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	0,99	0,30	4,10	0,25	63,17	0,51	30,69
2	0,14	0,00	46,16	0,03	0,66	0,08	52,93
3	4,57	5,41	12,48	0,24	34,42	6,60	36,29
4	1,86	1,48	12,82	0,70	45,96	1,67	35,53
5	2,17	0,79	35,66	0,15	13,22	0,47	47,53

Os resultados apresentados nas Tabela 5.5 e Tabela 5.6, estão de acordo com o observado nas imagens do MEV, os resultados indicam a presença predominante de Si, Ca e O, que são elementos comuns em argamassas, concordando com os resultados encontrados no DRX. Apesar da Figura 5.6, apresentar rugosidades no interior do poro, ao comparar os pontos ensaiados pelo EDS é possível observar que não existe grandes diferenças entre os pontos dentro do poro e o ponto que representa a composição da pasta de cimento (ponto 2, destacado de vermelho na Tabela 5.5). Outra informação que pode ser retirada, desta vez da Tabela 5.6, diz respeito ao ponto 2 que é muito discrepante dos demais pontos com elevados teores de Si, porém ao observar conjuntamente à Figura 5.7 percebe-se que trata-se de um agregado, justificando assim tal composição química.

Na Figura 5.8 e Figura 5.9, são apresentadas as microscopias realizadas na amostra estudada da Jazida J2.

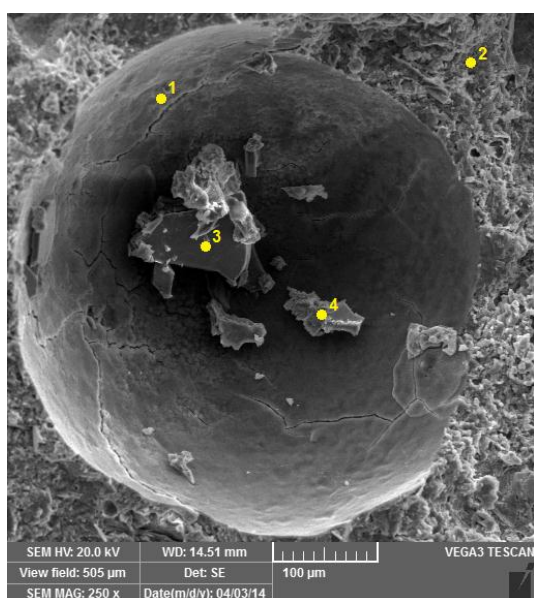


Figura 5.8 - Poro de argamassa moldada com CPV ARI-RS e agregado J2

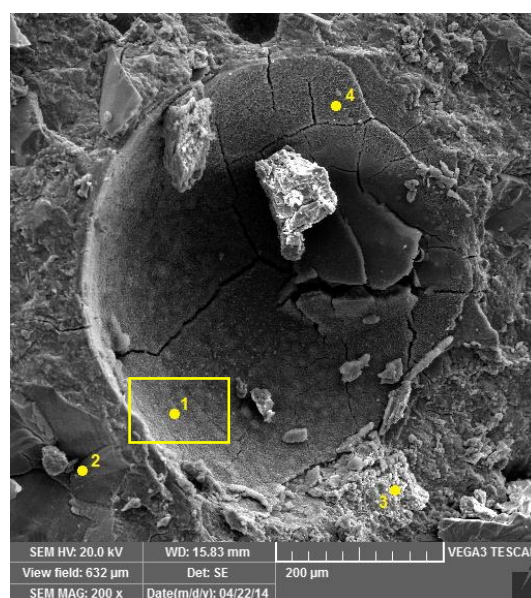


Figura 5.9 - Poro com deposições dentro (cimento padrão e agregado J2)

As Figura 5.8 e Figura 5.9 exibem poros encontrados nas amostras analisadas, assim como na amostra J1. Os poros apresentam deposições em seu interior mas sem as características comuns as estruturas que apresentam manifestação da RAA, indicando assim o não aparecimento da reação, ou sua

manifestação de forma muito pontual, já que durante a análise também não foi observada a formação de gel característico da presença de RAA, em torno dos agregados. O ponto 2 da Figura 5.9 apresenta um agregado bem próximo ao poro.

Os resultados do EDS obtidos nos pontos indicados estão apresentados na Tabela 5.7 e Tabela 5.8.

Tabela 5.7 - EDS da amostra J2 com CPV ARI-RS

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	7,17	3,24	20,70	1,22	26,27	1,33	40,08
2	5,77	2,47	15,17	2,84	33,17	4,10	38,56
3	8,66	2,15	18,94	0,67	26,89	4,15	38,56
4	6,87	1,93	14,47	0,68	37,46	2,26	36,33

Tabela 5.8 - EDS da amostra J2 com cimento padrão

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	9,39	2,19	16,78	1,08	31,64	1,35	37,57
2	6,64	2,85	20,20	0,51	28,57	1,45	39,79
3	3,03	0,78	9,53	0,51	51,81	0,74	33,60
4	7,03	0,52	22,41	0,76	28,92	0,17	40,19

O retângulo amarelo destacado na Figura 5.9, merece uma observação mais cuidadosa, pois aumentando a ampliação é possível visualizar a formação do gel característico de RAA na amostra em estudo (Figura 5.10):

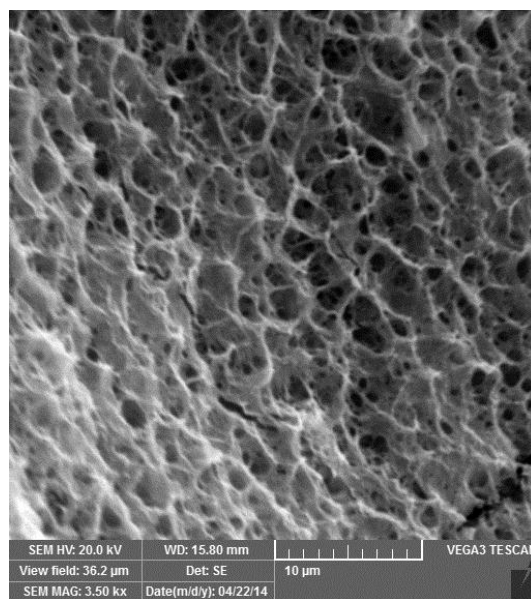


Figura 5.10 - Ampliação do poro com formação de gel na amostra J2

Foi identificada a presença de gel no poro, semelhante aos observados por Hasparyk (2005), Couto (2008), Arrais e Melo (2012), Hasparyk *et al.* (2012) e Bruno *et al.* (2013), além dos compostos indicados pelo EDS, mostra a presença dos principais constituintes do gel com composição sílico-cálcio alcalina, ou seja, Si, Ca e Na indicando que possivelmente alguma parte do agregado utilizado reagiu, porém não foi de forma significativa, visto que, o aumento utilizado foi muito elevado, confirmando que a formação não era de grandes proporções, e nos ensaios de expansão das barras de argamassa todos os agregados utilizados não ultrapassaram os limites indicados na parte 4 da NBR 15577 (ABNT, 2008a). É possível que esse fenômeno apresentado tenha se desenvolvido também quando utilizado o CPV ARI-RS, mas não foi possível encontrar comprovações durante as análises, visto que, conforme estudado por Tiecher (2006) o cimento CPV ARI-RS apesar de conter adições, estas não são significativas para conter o desenvolvimento da reação.

A Figura 5.11 e Figura 5.12 apresentam as imagens feitas no microscópio eletrônico de varredura das amostras moldadas com o cimento CPV ARI-RS e Cimento-Padrão utilizando os agregados provenientes da Jazida J3.

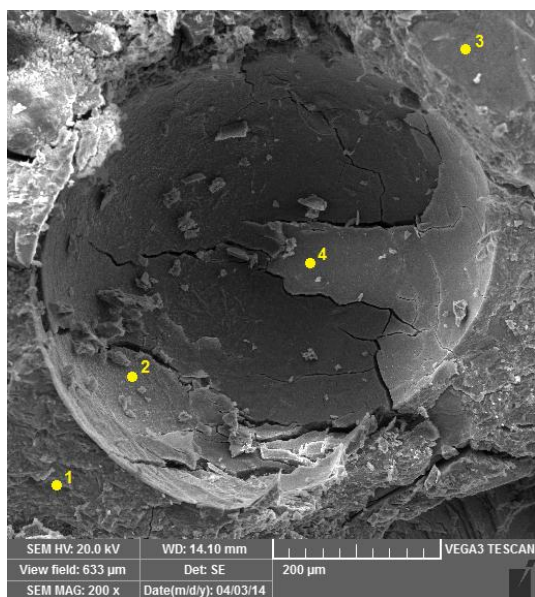


Figura 5.11 - Poro do CP moldado com CPV ARI-RS e agregado J3

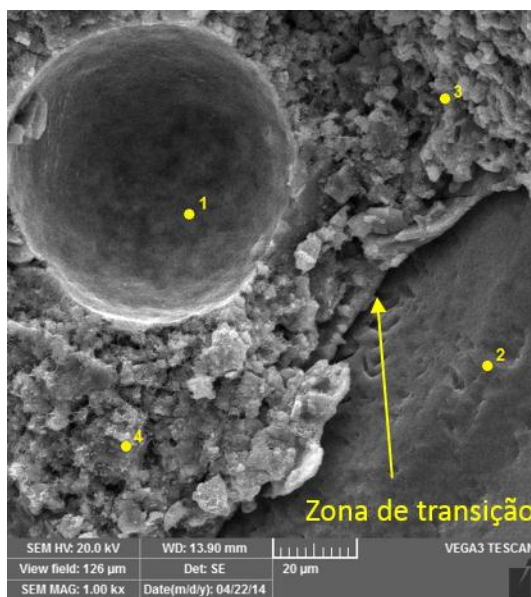


Figura 5.12 - Poro e zona de transição de CP moldado com cimento padrão e agregado J3

O comportamento da jazida J3 apresentou-se de forma semelhante as amostras utilizando os agregados J1 e J2, com deposições dentro dos poros porém sem indicar presença de formação de gel característico da RAA.

A Tabela 5.9 e Tabela 5.10 apresentam os resultados do EDS realizado nas imagens, onde é possível confirmar a presença de elementos comuns em argamassas e agregados, como sílica e cálcio, além da presença do oxigênio.

Tabela 5.9 - EDS da amostra J3 com CPV ARI-RS

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	0,82	0,43	1,93	0,10	63,50	3,87	29,35
2	11,62	1,91	20,47	0,85	24,18	1,17	39,53
3	4,30	1,72	21,30	0,35	31,74	0,42	40,16
4	10,31	1,90	18,47	0,79	27,85	2,39	38,29

Tabela 5.10 - EDS da amostra J3 com cimento padrão

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	1,29	0,77	9,34	0,54	53,95	0,53	33,58
2	0,10	0,02	46,21	0,00	0,75	0,02	52,98
3	2,41	1,47	13,01	0,52	46,13	0,76	35,70
4	1,41	1,02	16,88	0,71	41,87	0,47	37,63

Conforme apresentado nas análises da microscopia eletrônica dos agregados J1 e J2, as análises não apresentaram resultados muito discrepantes dos observados. Na Tabela 5.9, todos os pontos apresentam características semelhantes entre si pois todos estão localizados em região de pasta de cimento, mesmo os pontos 2 e 4 que estão localizados dentro do poro, na Tabela 5.10, os pontos 1, 3 e 4 apresentam zona de pasta e interior a um poro, já o ponto 2 está localizado em um agregado.

A Figura 5.13 e Figura 5.14 apresentam imagens obtidas no MEV quando utilizado o cimento CPV ARI-RS e Cimento-Padrão nos agregados da Jazida J4.

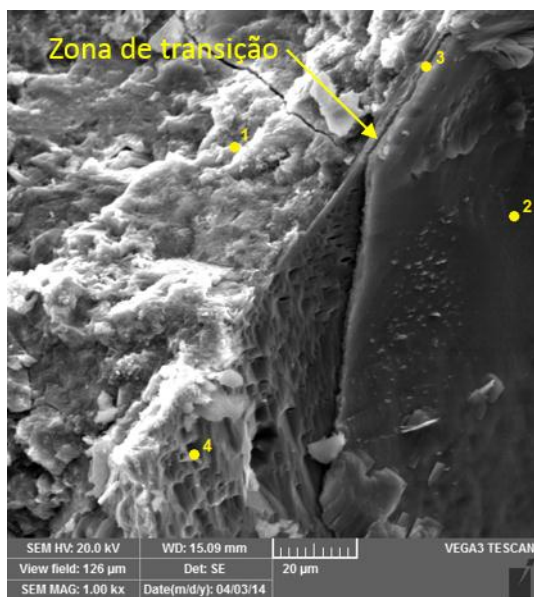


Figura 5.13 - Zona de transição entre pasta e agregado moldado com cimento CPV ARI-RS (agregado J4)

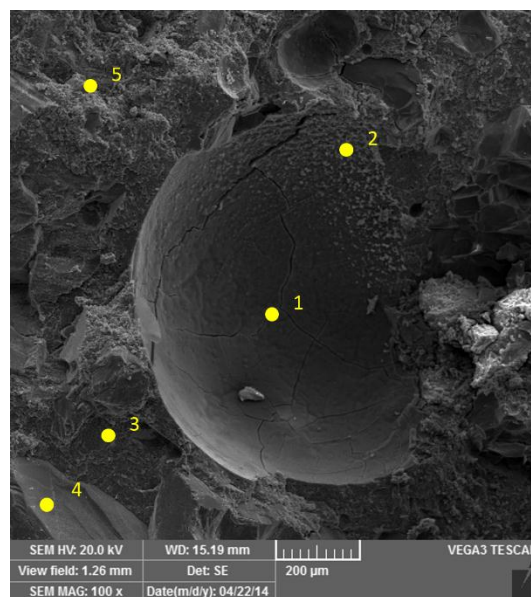


Figura 5.14 - Poro com deposições no seu interior (ponto 2) – corpo de prova moldado com cimento padrão (agregado J4)

Na Tabela 5.11 e Tabela 5.12 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de EDS aos quais as amostras foram submetidas durante os ensaios de MEV.

Tabela 5.11 - EDS da amostra J4 com CPV ARI-RS

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	7,75	2,46	18,41	0,53	30,83	1,36	38,66
2	5,52	2,79	16,13	3,70	32,33	2,39	37,13
3	7,07	1,13	29,81	1,19	16,43	0,11	44,26
4	1,71	0,82	39,96	0,32	7,07	0,30	49,82

Tabela 5.12 - EDS da amostra J4 com cimento padrão

Ponto	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	9,36	1,29	19,10	1,48	28,05	2,38	38,34
2	6,40	3,70	22,32	1,25	23,96	1,26	41,12
3	1,12	0,96	7,65	1,25	53,45	3,14	32,44

4	0,18	0,04	45,70	0,10	1,21	0,07	52,69
5	3,01	0,47	8,84	0,79	53,23	0,55	33,10

Analisando os elementos apresentados, assim como na análise da Jazida J3 não são observadas grandes diferenças quando utilizado o cimento CPV ARI-RS e o cimento padrão, prevalecendo também os elementos sílica, cálcio e oxigênio.

Quanto a microestrutura, foi possível observar que todas as amostras apresentaram comportamentos bastante semelhantes com relação ao ensaio de exposição às condições de RAA, após serem retiradas do banho mostraram-se com pontos esbranquiçados na superfície e após rompidos os corpos de prova apresentavam poros visíveis à olho nu, porém apenas os poros externos eram de grandes proporções, e todos com presença de formações esbranquiçadas na superfície, conforme demonstra a Figura 5.15 além da presença de algumas pequenas fissuras, porém, em J2 estas eram mais evidentes.

Quando observadas ao microscópio eletrônico foi possível perceber que a maioria dos poros presentes nas amostras observadas, variavam de 100-400µm, e continham deposições, porém estas não eram de grandes proporções, ao contrário do observado por Hasparyk (2005), Tiecher (2006), Couto (2008) e Silva (2009b) que ao utilizarem a mesma ampliação, foram observadas grande formação de gel nos poros encontrados, além da representação bem característica de formação de gel em torno dos agregados utilizados como foi observado também pelos mesmos pesquisadores. A Figura 5.7, Figura 5.12 e Figura 5.13 é possível observar a zona de transição entre pasta e agregado, onde é possível dizer que não houve formação de gel contornando os agregados. Durante a realização do MEV foram observadas fissuras semelhantes às que Couto (2008) atribuiu como sendo efeitos da reação, porém, no caso desta pesquisa acredita-se que as fissuras são provenientes da realização do ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, já que não foram encontrados mais indícios que sustentassem a teoria de manifestação da reação.

Vale destacar que ao serem submetidas ao EDS verifica-se a presença de valores de sódio (Na) consideráveis o que pode indicar que as deposições sejam os sais provenientes da solução de NaOH na qual os corpos de prova permaneceram imersos.

A teoria defendida de que não houve manifestação da reação álcali-agregado se apoia ainda nos argumentos apresentados no item que trata da caracterização dos agregados utilizados nos ensaios, a qual demonstrou a probabilidade de não haver fases reativas nos agregados utilizados no ensaio.

Conforme discutido neste item, não foi portanto, durante as análises microestruturais da argamassa, encontrado indícios de que houvesse manifestação da RAA, como por exemplo: não houve formação significativa de gel característico da reação, não houve formação de gel na interface pasta e agregado, não foi identificado a formação de nenhum composto que sugerisse a manifestação da reação, além de visualmente não ter sido constatada a presença de grandes fissuras do tipo “mapeadas” que caracterizam a reação.

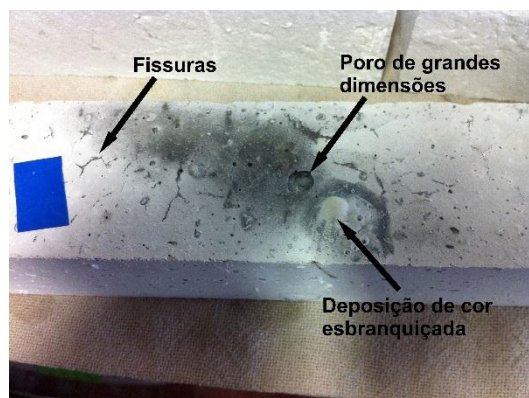


Figura 5.15 - Detalhe de um CP moldado com cimento padrão que apresentava fissuras aparentes (foram destacadas as fissuras para melhor visualização)

Quando utilizou-se o cimento CPV ARI-RS na dosagem do concreto, observou-se um comportamento inesperado nos corpos de prova das jazidas J3 e J4 durante o ensaio de exposição às condições de RAA, ao secarem, os mesmos apresentavam uma coloração esbranquiçada, diferente das jazidas J1 e J2 (Figura 5.16), o procedimento experimental foi o mesmo para todas as jazidas, porém J3 e J4 estavam no mesmo recipiente e acredita-se que houve alguma reação desconhecida dentro da solução. Por motivo de tempo para a

realização da pesquisa, não foi possível investigar o motivo da mudança de coloração.

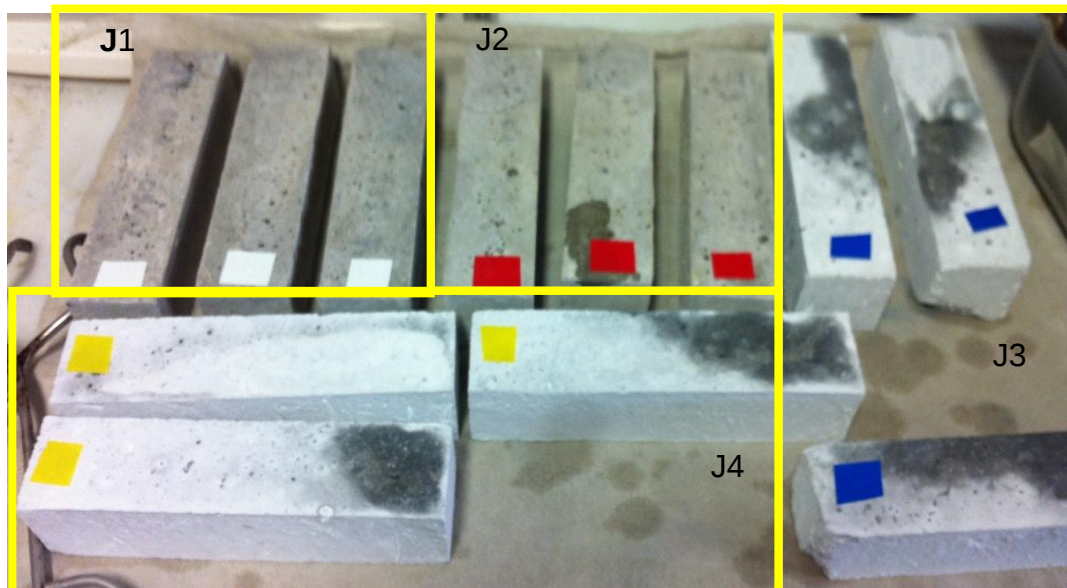


Figura 5.16 - Corpos de prova de argamassa com CPV ARI-RS após 28 dias em solução de NaOH

5.2 Propriedades mecânicas e elásticas das argamassas

Neste item são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas da argamassa: resistência à tração na flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

5.2.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados médios e o desvio padrão dos ensaios de resistência à tração na flexão, realizados nas barras de argamassa utilizando o cimento CP V ARI-RS e cimento padrão realizados após 28 dias de exposição à solução de NaOH podem ser observados na Figura 5.17. A barra cinza do gráfico indica qual a resistência média dos CP's que não foram expostos à RAA, esses corpos de prova são chamados de referência pois apresentam o mesmo traço dos corpos de prova que foram utilizados na realização dos ensaios mecânicos.

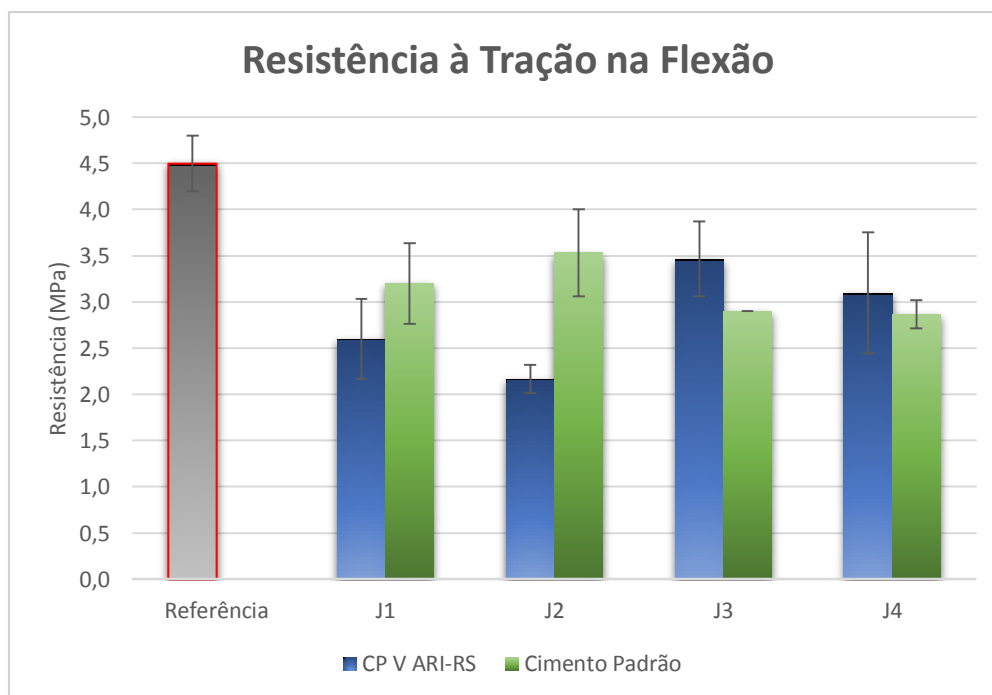


Figura 5.17 - Gráfico comparando as resistências à tração na flexão dos CP's estudados

Foi observada uma diminuição em torno de 34% nas resistências à tração na flexão dos corpos de prova em comparação aos CP's que não foram expostos à solução de NaOH (referência - representados pela barra cinza), porém os resultados não deixam claro qual o efeito dessa exposição quando variamos o cimento, visto que, para o cimento CP V ARI-RS as jazidas J1 e J2 apresentaram as menores resistências à tração na flexão, enquanto que quando foi utilizado o cimento padrão as resistências encontradas foram as maiores, o que não se justifica, visto que, caso o agregado fosse reativo haveria um comportamento uniforme das resistências à tração na flexão (aumento ou redução) para os dois tipos de cimento.

Os resultados encontrados, estão de acordo com os resultados apresentados por Hu *et al.* (2013) que encontrou resistências à flexão em CP's de argamassa em torno de 3,3 MPa para agregados reativos e não reativos expostos à solução de NaOH, resultados compatíveis com os encontrados nos ensaios realizados nesta pesquisa.

Tomando como base as resistências à tração na flexão médias atingidas, é possível obter a Tabela 5.13 que indica a porcentagem de redução das resistências em relação aos corpos de prova de referência.

Tabela 5.13 - Redução da resistência à tração média na flexão entre os corpos de prova expostos ou não a reação

	Redução da Resistência	
	CP V	Cimento-Padrão
J1	42%	29%
J2	52%	22%
J3	23%	36%
J4	31%	37%

Analisando os valores encontrados na Tabela 5.13, observa-se que a jazida que mais sofreu com os efeitos da mudança de cimento foi a J2, quando foi utilizado o cimento CPV ARI-RS, que teve redução de mais de 50% da resistência à tração na flexão comparada ao CP de referência e ao se utilizar o cimento padrão teve a menor redução, de apenas 22%.

5.2.2 Resistência à compressão

A Figura 5.18 apresenta um gráfico demonstrando os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão e logo abaixo, a Tabela 5.14, está apresentada a redução das resistências à compressão encontradas.

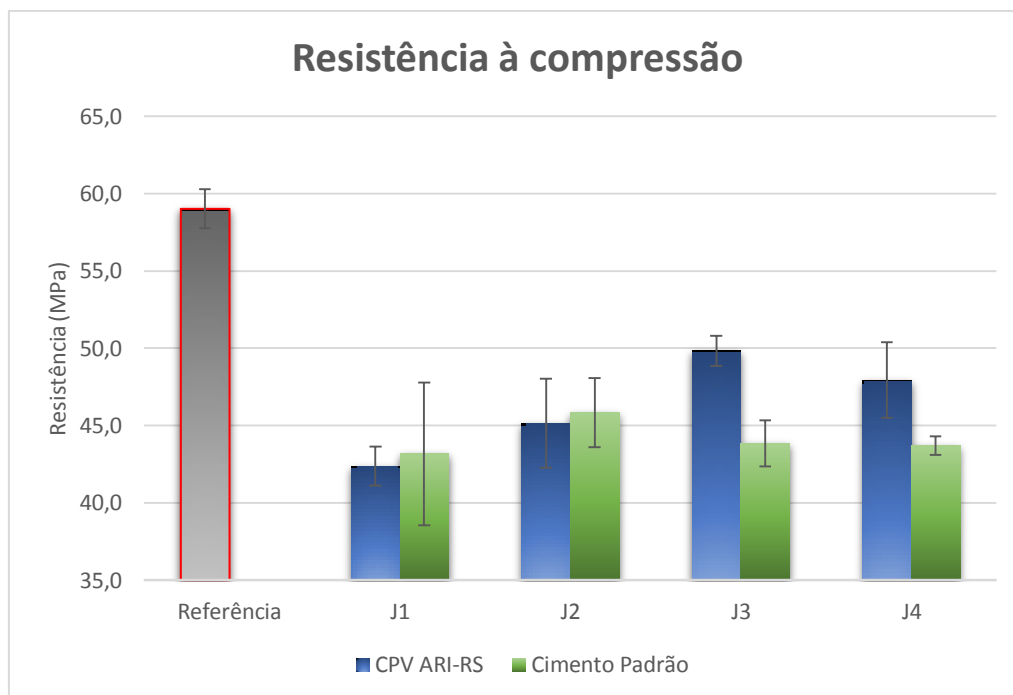


Figura 5.18 - Gráfico comparando as resistências à compressão dos CP's estudados

Assim como foi observado para as resistências à tração na flexão, houve uma diminuição na resistência à compressão de todos os corpos de prova moldados em relação aos não expostos às condições do ensaio de RAA (referência - representada pela barra cinza), Marzouk e Langdon (2003) e Ahmed et al (2003), encontraram diminuições nas resistências de argamassas após submetidas aos ensaios de RAA, porém de forma menos significativa.

Tabela 5.14 - Redução da resistência entre os corpos de prova expostos ou não a reação

Redução da Resistência		
	CP V ARI-RS	Cimento-Padrão
J1	30%	29%
J2	26%	25%
J3	18%	28%
J4	21%	28%

É possível perceber que não existem um padrão quanto a resistência à compressão seguido pelos corpos de prova moldados com os dois tipos de cimento, tanto no comportamento em relação a resistência à tração na flexão quanto na resistência à compressão, não deixando claro assim qual a influência do tipo de cimento nas possíveis resistências atingidas.

Resultados obtidos por Hasparyk (2005) e Yurtdas *et al.* (2013), indicaram que a RAA afeta a resistência à compressão em dois momentos, primeiramente ocorre um aumento da mesma devido a formação de produtos da reação que preenchem os vazios, porém quando o processo de fissuração é intenso ocorre uma diminuição da mesma devido a fragilização do concreto.

Como no caso da argamassa produzida no ensaio de exposição às condições de RAA ao final dos 30 dias de ensaio não apresentavam fissuras de grandes dimensões, as quais seriam suficientes para haver uma fragilização do concreto e uma então diminuição da resistência à compressão, caso houvesse manifestação da reação o esperado seria que ocorresse aumento da resistência, pois haveria o preenchimento dos vazios, fato que não ocorreu, visto que independentemente do tipo de cimento utilizado, as resistências foram inferiores a resistência de referência, fortalecendo a teoria de que não houve manifestação da reação nas amostras.

5.2.3 Velocidade do pulso ultrassônico

Para um entendimento das propriedades elásticas da argamassa, além de entender se houve formação de compostos que pudessem preencher os poros da argamassa sugerindo um possível desenvolvimento de gel característico de RAA foi realizado o ensaio de velocidade do pulso ultrassônico nas argamassas produzidas nesta pesquisa. A Tabela 5.15 apresenta os valores obtidos pelo ensaio de velocidade do pulso ultrassônico.

Tabela 5.15 - Valores da velocidade do pulso ultrassônico em CP's prismáticos

	CPV ARI-RS				Média	Diferença para a referência	Cimento-Padrão				Média	Diferença para a referência
	CP1	CP2	CP3				CP1	CP2	CP3			
Ref.	4,3	4,28	4,28	4,29			4,52	4,49	4,52	4,51		
J1	4,4	4,27	4,22	4,30		0%	4,16	4,226	4,226	4,20		7%
J2	4,4	4,37	4,41	4,39		-2%	4,259	4,259	4,204	4,24		6%
J3	4,48	4,45	4,45	4,46		-4%	4,375	4,34	4,226	4,31		4%
J4	4,45	4,47	4,35	4,42		-3%	4,226	4,328	4,226	4,26		6%

Considerando que a velocidade do pulso ultrassônico diminui com o aumento da porosidade do corpo de prova, encontra-se uma pequena diferença entre os corpos de prova curados na solução de NaOH e os corpos de prova curados em água, percebe-se que a porosidade praticamente se manteve constante, inferindo assim de acordo com as análises que possivelmente não houve formação de novos compostos que preenchessem os poros dos corpos de prova, o que reforça a teoria de que não ocorreu a RAA nos corpos de prova em análise.

Os corpos de prova moldados com o cimento CPV ARI RS, apresentaram aumentos de velocidade de até 4% em relação aos não expostos à solução, diferindo das argamassas moldadas com o Cimento Padrão que se comportou de forma contrária, havendo uma diminuição de até 7% com relação aos CP's utilizados como referência, indicando assim que não ocorreu uma tendência semelhante entre os dois cimentos utilizados, porém deve ser levado em conta que os valores foram muito próximos, portanto, reafirmando o dito no parágrafo anterior de que não houve formação de compostos.

5.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Para um melhor entendimento das propriedades elásticas das argamassas produzidas foi realizado o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico que é feito através das medições de velocidade feita pelo equipamento de ultrassom e determinação da densidade dos corpos de prova, reunindo os valores apresentados na Figura 5.19 e Tabela 5.16.

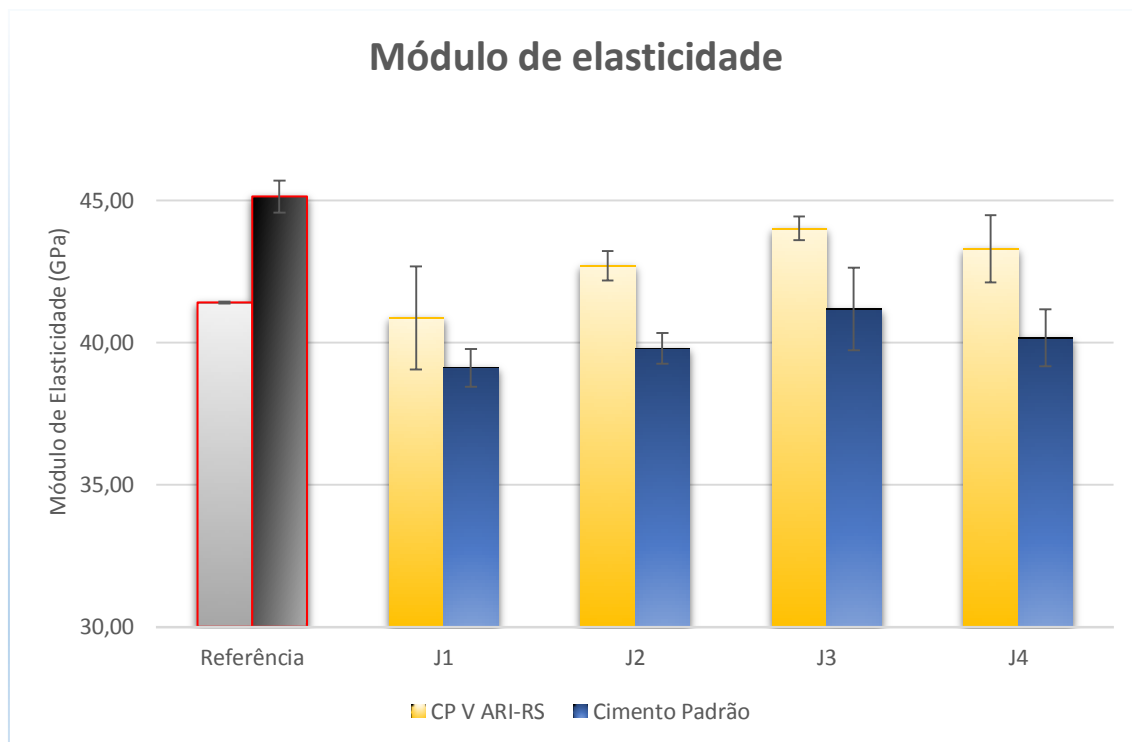


Figura 5.19 - Gráfico indicando e comparando os módulos de elasticidade dinâmico encontrado nos corpos de prova

Tabela 5.16 - Valores do módulo de elasticidade dinâmico encontrados para cada jazida com os diferentes tipos de cimento e o comparativo com os CP's não expostos a RAA

CP V ARI-RS						
	CP1	CP2	CP3	Média	Desv. Pad.	Redução no M
Referência	37,29	37,29	37,24	37,27	0,028	
J1	38,62	36,20	35,53	36,79	1,624	1,31%
J2	38,62	37,92	38,80	38,45	0,467	-3,16%
J3	40,04	39,32	39,51	39,62	0,372	-6,31%
J4	39,50	39,67	37,76	38,98	1,062	-4,58%

Cimento Padrão						
	CP1	CP2	CP3	Média	Desv. Pad.	Redução no M
Referência	40,43	40,25	41,21	40,63	0,515	
J1	34,52	35,46	35,63	35,21	0,598	13,35%
J2	36,19	36,02	35,26	35,82	0,491	11,83%
J3	38,18	37,40	35,63	37,07	1,306	8,75%
J4	35,63	37,19	35,63	36,15	0,903	11,02%

Analisando conjuntamente a Figura 5.19, Tabela 5.15 e Tabela 5.16, a mudança no cimento conduziu a comportamentos opostos entre as amostras, quando foi utilizado o CPV ARI-RS as amostras apresentaram um crescimento nos módulos de elasticidade, o oposto do ocorrido ao utilizar o Cimento-Padrão, assim como foi observado para as velocidades do pulso ultrassônico, pois os valores são derivados do mesmo.

Segundo Yurtdas *et al.* (2013), o módulo de elasticidade é mais influenciado pela RAA do que a resistência à compressão, portanto, os

resultados obtidos através da pouca variação do módulo de elasticidade em relação aos resultados encontrados por Ahmed et al (2003), Marzouk e Langdon (2003), Giaccio et al (2008) que encontraram diminuições bem maiores. Diante do exposto pode ser concluído que não houve manifestação da RAA, visto que os módulos de elasticidade não foram afetados.

5.3 Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

Neste item são apresentados os resultados obtidos no ensaio de expansão para as quatro jazidas estudadas utilizando o cimento padrão, determinando através do prescrito na norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008a) a reatividade ou não dos agregados.

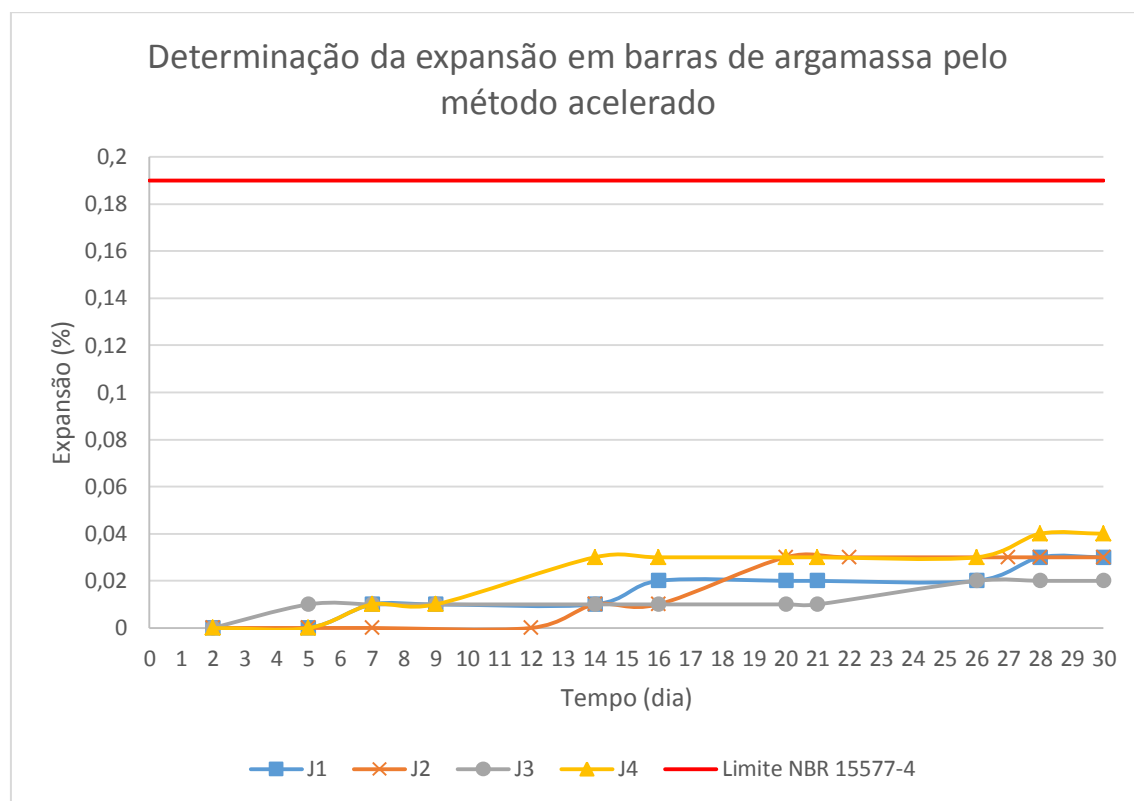


Figura 5.20 – Gráfico da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

A linha vermelha no gráfico apresenta o limite estabelecido pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008a) para determinar se o agregado utilizado apresenta um potencial reativo ou não, caso a expansão do agregado seja maior que 0,19% ao final dos 30 dias de ensaio o agregado é determinado como sendo potencialmente reativo, caso contrário, se ele se apresentar com expansão inferior a 0,19% este será considerado potencialmente inócuo.

Sanchez (2008) e Rolin (2010) ao analisarem agregados graníticos provenientes do estado de Goiás encontraram tanto variedades reativas quanto inócuas quando aplicou o ensaio acelerado, porém mesmo os agregados inócuos apresentaram expansões maiores do que as encontradas neste trabalho, além de trabalhos desenvolvidos por Munhoz (2007), Silva (2007), Couto (2008), que encontraram agregados basálticos como exemplo de apresentar reatividade bem maiores do que os graníticos.

Pode ser observado que no caso das jazidas analisadas as expansões permaneceram muito abaixo do estipulado pela norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008a) para que se considere o agregado como reativo, corroborando assim com o exposto no desenvolvimento do trabalho de que os agregados estudados não apresentam comportamentos reativos, ao final dos 30 dias de duração do ensaio, as jazidas permaneceram com expansões entre 0,02% e 0,04%, neste resultado está incluída a jazida J2 que foi a única onde se observou a formação de gel, concordando assim com a teoria de que ocorreu um fato isolado quando o material foi analisado no MEV.

CAPÍTULO 6

Conclusões

Visando conhecer os aspectos dos agregados utilizados na Grande Natal com a intenção de verificar o comportamento dos mesmos com relação a reação álcali-agregado, a partir da análise dos resultados dos ensaios foram obtidas algumas conclusões apresentadas a seguir.

Propriedades dos agregados:

As jazidas J1, J2, J3 e J4 apresentaram características visuais de rocha granodiorítica com colorações devido a presença do feldspato, o diagrama de DRX indicou composições cristalinas e com alto grau de Sílica e Óxido de Alumínio apresentados nos ensaios de FRX, nas análises de massa específica obteve-se valores compatíveis com rochas graníticas, não sendo percebidas alterações nas rochas que pudessem sugerir a presença de fases reativas nas mesmas.

Análises químicas, mineralógicas e microestruturais das argamassas

Nas análises da microestrutura com o microscópio eletrônico, foram observadas algumas fissuras provavelmente provenientes do ensaio de resistência realizado, porém com relação a reação álcali-agregado não houve evidências da manifestação da reação nas amostras, apenas na argamassa onde se utilizou agregado proveniente da Jazida J2 e o Cimento Padrão é que se observou uma pequena formação de produtos reativos porém sem muita expressividade no comportamento da amostra, pois nos demais ensaios ela permaneceu com o mesmo comportamento das outras amostras.

Não houve influência dos cimentos utilizados em função da cura em imersão em solução de NaOH.

Análise das propriedades mecânicas:

Todos apresentaram uma diminuição tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração na flexão, mesmo utilizando tipos de cimento diferentes, percentualmente. Os corpos de prova moldados com o cimento CPV ARI RS apresentaram uma maior diminuição de resistência, vale ressaltar que mesmo a Jazida J2, que na análise da microestrutura apresentou uma pequena formação de gel, isso não foi suficiente para alterar seu comportamento em relação às demais, solidarizando com a conclusão obtida no parágrafo anterior de não manifestação da RAA em escala suficiente para alterar o comportamento das argamassas.

Ensaio de reatividade:

Os agregados ensaiados com base na norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008a), não apresentaram características reativas, pois as expansões foram inferiores ao estabelecido pela norma para que fosse considerado reativo.

Todas as análises realizadas nesta dissertação indicam que não houve a manifestação da RAA nas amostras.

Recomendações para trabalhos futuros

Realizar os ensaios relativos a RAA, utilizando diferentes tipos de cimentos, comparando os resultados obtidos ao cimento-padrão.

Analisar outras jazidas existentes no RN.

Analisar formas de mitigação da RAA em agregados conhecidamente reativos com a utilização de adições minerais;

Analisar os agregados utilizados nessa pesquisa através do método de prismas de concreto.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577**: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, 2008a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ANDRADE, F. R. D. et al. A Terra sólida: minerais e rochas. In: (Ed.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

ANDRADE, T. et al. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na região metropolitana do Recife. In: IBRACON, II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto, 2006, Rio de Janeiro - RJ. IBRACON. p.1-16.

ARRAIS, M. S. M. C.; MELO, E. B. Avaliação do comportamento de agregados graúdos de pedreiras da região metropolitana do Recife, com relação à RAS, frente a diferentes tipos de cimentos portland. **Estudos Geológicos**, v. 22, n. 1, p. 77-98, 2012.

BATTAGIN, A. F.; MUNHOZ, F. A. C.; BATTAGIN, I. L. S. A experiência da aplicação da norma técnica brasileira de reação álcali-agregado. In: IBRACON, 52 Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza-CE. São Paulo IBRACON. p.1-16.

BATTAGIN, I. L. S.; BATTAGIN, A. F.; NETO, C. S. **A norma técnica brasileira de reação álcali-agregado faz seu primeiro aniversário.** Concreto e Construções. São Paulo: IBRACON 2009.

BÉRUBÉ, M. et al. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1215-1227, 2002.

BIGARELLA, J. J.; LEPREVOST, A.; BOLSANELLO, A. **Rochas do Brasil**. Rio de Janeiro: ADEA: Livros Técnicos e Científicos, 1985. 310.

BRUNO, G. B. et al. Estudo de caso de Reação Álcali-Agregado em bloco de fundação em edificação na região de Natal-RN. 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado-RS. IBRACON.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: Estudo do fenomeno em rochas silicosas 2008**. 2008. 191 (Mestrado). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

CPRM/FAPERN. **Mapa geológico do Rio Grande do Norte**. Rio Grande do Norte: Ministério de Minas e Energia e Governo do Estado do Rio Grande do Norte, 1:500.000

DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. **Manual de Mineralogia**. Rio de Janeiro: AO Livros Técnicos e Científicos S. A., Editora da USP, 1969. 642.

DE CARVALHO, M. R. P. et al. Influence of steel fibers on the development of alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 598-604, 2010. ISSN 00088846.

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

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms

Part 1. Alkalies in cements and concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 5, p. 329-346, 1975.

ERNST, W. G. **Minerais e Rochas**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1971. 162.

FERNANDES, I. **Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões. Estudo de casos em obra**. 2005. 491 (Doutorado). Faculdade de Ciências. Departamento de Geologia, Universidade do Porto, Porto.

FERRARIS, C. F. **Alkali-silica reaction and high performance concrete**, 1995. Disponível em: <
<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build95/art004.html>>. Acesso em: 30/06/2014.

GAO, X. X. et al. Optimising an expansion test for the assessment of alkali-silica reaction in concrete structures. **Materials and Structures**, v. 44, n. 9, p. 1641-1653, 2011. ISSN 1359-5997
1871-6873.

GAO, X. X. et al. Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect. **Cement and Concrete Research**, v. 44, p. 25-33, 2013. ISSN 00088846.

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

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

HASPARYK, N. P. Reação Álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v.2, 2011. cap. 27, p.933-1001.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. Estudo de caso envolvendo ataque combinado da RAA e DEF em concreto de fundação de

edificação. In: IBRACON, 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió. IBRACON. p.1-16.

HOBBS, D. W. **Alkali-silica reaction in concrete**. . 1980. 183, London.

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

HU, D. et al. Evaluation of alkali silica reaction effects on mechanical behavior of mortar. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2013, Toledo - Espanha.

KHIARA, Y.; SBRIGHI, C.; PECCHIO, M. Avaliação prática da previsão da reação álcali-silicato de rochas granitóides. In: IBRACON, II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto, 2006, Rio de Janeiro. IBRACON.

KUPERMAN, S. C. et al. A CESP e a detecção da reação álcali-agregado. In: CDDB, XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2005, Goiânia.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia Geral**. 13. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1998. 399.

LINDGÅRD, J. et al. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 2, p. 223-243, 2012. ISSN 00088846.

LU, D. et al. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 6, p. 1157-1165, 2006. ISSN 00088846.

MARINONI, N. et al. Influence of aggregate mineralogy on alkali-silica reaction studied by X-ray powder diffraction and imaging techniques. **Journal of Materials Science**, v. 47, n. 6, p. 2845-2855, 2011. ISSN 0022-2461
1573-4803.

MARZOUK, H.; LANGDON, S. The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4-5, p. 549-556, 2003. ISSN 09589465.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 674.

MULTON, S. et al. Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 508-516, 2010. ISSN 00088846.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. 2007. 189 (Mestrado). Escola Politécnica de São Paulo Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

POPP, J. H. **Geologia Geral**. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 376.

PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656.

RAINHO, A. R. Rochas e Minerais. Disponível em: < <http://espacociencias.com/site/ciencias-7o-ano/rochas-e-minerais/> >. Acesso em: 23/06/14.

ROLIN, P. H. B. **Reação álcali-agregado: Avaliação do método químico de ensaio**. 2010. 109 (Mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RUBERTI, E.; SZABÓ, G. A. J.; MACHADO, R. Metamorfismo: processos e produtos. In: (Ed.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos**. 2008. 170 (Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. The role of alkali content of Portland cement on the expansion of concrete prisms containing reactive

aggregates and supplementary cementing materials. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 569-574, 2010. ISSN 00088846.

SILVA, C. F. C. **Análise de métodos de prevenção da reação álcali-agregado: Análise petrográfica e método acelerado de barras de argamassa**. 2009a. 109 (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco - Escola Politécnica de Pernambuco, Recife-PE.

SILVA, C. M. **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado**. 2009b. 178 (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia, Porto Alegre.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso/CESF**. 2007. 241 (Mestrado). Escola Politécnica Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVEIRA, A. L. Z. P. **Estudo da Reação Álcali-Agregado em Rochas Carbonáticas**. 2006. 194 (Mestrado). Instituto de Geociencias, Universidade de Brasília, Brasília.

SIMS, I.; POOLE, A., Eds. **Alkali-aggregate reactivity**. 1992.

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

SZABÓ, G. A. J.; TEIXEIRA, W.; BABINSKI, M. Magma e seus produtos. In: (Ed.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1224-1231, 2011. ISSN 00088846.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. 182 (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado - mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. 2002. 225 (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984. 567.

VLACH, S. R. F. A classe dos tectossilicatos: guia geral da teoria e exercício. **Geologia USP. Série Didática**, v. 1, p. 1-49, 2002. ISSN 1677-7549. Disponível em: <
http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-75492002000100001&nrm=iso>.

YURTDAS, I. et al. Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 165-174, 2013. ISSN 09500618.