

**Ministério da Educação
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral
PPGEMinas - UFPE**

**AVALIAÇÃO PETROGRÁFICA E EXPERIMENTAL DE AGREGADOS GRAÚDOS
AFETADOS POR DEFORMAÇÃO TECTÔNICA, DESENVOLVIMENTO DE
MINERAIS DE ALTERAÇÃO E TEXTURAS DE EXSOLUÇÃO.**

por

**ADELSON GOMES DO PRADO
Engenheiro Químico**

Trabalho realizado no Laboratório de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEMinas, UFPE.

Recife, 2008

**AVALIAÇÃO PETROGRÁFICA E EXPERIMENTAL DE AGREGADOS GRAÚDOS
AFETADOS POR DEFORMAÇÃO TECTÔNICA, DESENVOLVIMENTO DE
MINERAIS DE ALTERAÇÃO E TEXTURAS DE EXSOLUÇÃO.**

DISSERTAÇÃO

**Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral –
PPGEMinas, como parte dos requisitos para obtenção de Título de**

MESTRE EM ENGENHARIA

Área de concentração: Minerais e Rochas Industriais

por

ADELSON GOMES DO PRADO

Engenheiro Químico

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo M. P. Carneiro

Co-Orientador: Prof. Dr. Gorki Mariano

Recife, 2008

P896a

Prado, Adelson Gomes do.

Avaliação petrográfica e experimental de agregados graúdos afetados por deformação tectônica, desenvolvimento de minerais de alteração e texturas de exsolução / Adelson Gomes do Prado. - Recife: O Autor, 2008.

101 folhas, il : grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2008.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mineral. 2. Reação Álcali-Agregado. 3. Zona de Falha. 4. Minerais de Alteração. I. Título.

UFPE

623.26

CDD (22. ed.)

BCTG/2009-007



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

ADELSON GOMES DO PRADO

**“AVALIAÇÃO PETROGRÁFICA E EXPERIMENTAL DE AGREGADOS
GRAÚDOS AFETADOS POR DEFORMAÇÃO TECTÔNICA,
DESENVOLVIMENTO DE MINERAIS DE ALTERAÇÃO E TEXTURAS DE
EXSOLUÇÃO”.**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Tecnologia Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do
Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, considera o candidato.

ADELSON GOMES DO PRADO, Aprovado.

Recife, 19 de agosto de 2008.

Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (UFPE) – Orientador

Drª. Felisbela Maria da Costa Oliveira, (Segundo Examinador - Interno) (UFPE)

Dr. Selmo Chapira Kuperman (Terceiro Examinador - Externo)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, devo agradecer a Deus por me permitir estar neste mundo na busca de crescimento.

Meus agradecimentos à CAPES/PROPESQ, por ter me concedido uma bolsa que me proporcionou dedicação nesta pesquisa.

Agradeço a toda minha família, pelo apoio e suporte nos momentos difíceis. Vocês são tudo para mim!!.

Quero agradecer a meu orientador (Prof. Arnaldo Carneiro) por ter confiado em mim e de ter me dado esta oportunidade.

Agradecer imensamente a meu co-orientador não apenas o auxílio técnico, o qual foi imprescindível para a realização deste trabalho, mas sobretudo por ser uma pessoa especial possuidor de uma autenticidade indescritível, não fazendo distinção entre as pessoas tratando da mesma forma o Reitor e o zelador!! – Prof. Gorki, foi uma lição de vida ter trabalhado com senhor.

Agradeço aos colegas de turma Alessandra Gorete, Suely Andrade, Ely Brasil, Carlos Torres, Farah Diba, Carem Vieira, José Carlos, Josivan, Vanildo, Tiago e Adriana Pinangé por terem me suportado todo esse tempo e também sofrido juntos os estresses, né. Especialmente, à colega Leila que foi muito mais que apenas uma colega e sim, posso dizer, uma verdadeira amiga. – Leila, grande, muitas pessoas podem ser, NOBRE é um atributo de poucas. Valeu gente...!

Ao coordenador da Pós-Graduação (Prof. Júlio César), bem como à secretária Voleide que sempre foram muito acessíveis e prestativos para comigo apresento meus agradecimentos. Aos técnicos do Laboratório de Materiais Cazuza e Seu Ezequiel pela ajuda nos experimentos. Às colegas de laboratório Carol e Simone pela disposição as minhas dúvidas, apoio e companheirismo.

Ao Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da UFPE na pessoa do Prof. Edval Santos. Ao Professor Leonardo Miranda por ser sempre tão solícito e atencioso as minhas indagações.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a finalização deste trabalho.

"Mas alguém dirá: Tu tens fé, e eu tenho obras; mostra-me essa tua fé sem as obras, e eu, com as obras, te mostrarei a minha fé."

Tiago 2:18

RESUMO

PRADO, A. G. AVALIAÇÃO PETROGRÁFICA E EXPERIMENTAL DE AGREGADOS GRAÚDOS AFETADOS POR DEFORMAÇÃO TECTÔNICA, DESENVOLVIMENTO DE MINERAIS DE ALTERAÇÃO E TEXTURAS DE EXSOLUÇÃO. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM ENGENHARIA) – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL, UFPE, RECIFE, 2008.

A deterioração do concreto devido à reação álcali-agregado (RAA) é um problema observado no mundo inteiro. Estruturas geológicas apresentando zonas de falhas são originadas devido a movimentos tectônicos em regimes deformacionais compressivos, distensivos e cisalhantes. Rochas próximas a zonas de falha geralmente exibem características mineralógicas inadequadas ao uso como agregado para concreto. Esta pesquisa avaliou as características microestruturais de seis amostras de rocha de pedreiras próximas a zonas de cisalhamento e falhas da região leste do estado de Pernambuco situada na Província da Borborema. O objetivo deste estudo é avaliar petrograficamente e experimentalmente agregados graúdos afetados por deformação tectônica, especialmente no que se referem aos diferentes padrões texturais e mineralógicos. A mineralogia principal, presença de minerais de alteração secundária e as texturas de exsolução foram observadas para tentar descobrir seu efeito na RAA. Os métodos aplicados foram análises petrográficas e ensaios laboratoriais de reatividade para medição da expansão linear de corpos-de-prova. As análises petrográficas foram realizadas usando microscópio ótico através de lâminas delgadas. Das seis amostras analisadas, as ocorrências que evidenciaram maior reatividade aos álcalis foram a presença de quartzo microcristalino proveniente da recristalização dinâmica. Essas amostras foram as que estavam situadas mais próximas a zonas de falhas. Também foi verificado o importante papel do quartzo com desenvolvimento de subgrão na reatividade, e em menor grau o quartzo com extinção ondulante. As texturas mirmequíticas e pertíticas não evidenciaram influência no aumento da reatividade das rochas analisadas neste estudo. Adicionalmente, os ensaios de expansão, de um modo geral, foram coerentes com as observações mineralógicas encontradas. Finalmente, foi observada, através de imagens microscópicas pela técnica de MEV acoplado a WDS, a presença do gel sílico-alcálico da reação recobrindo a superfície de poros e agregados.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; zona de falhas; minerais de alteração.

ABSTRACT

PRADO, A. G. ASSESSING PETROGRAPHIC AND EXPERIMENTAL OF COARSE AGGREGATES AFFECTS BY TECTONICS DEFORMATION, MINERALS OF ALTERATION DEVELOPMENT AND EXSOLUTION TEXTURES. DISSERTAÇÃO (MESTRADO EM ENGENHARIA) – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL, UFPE, RECIFE, 2008.

Concrete deterioration due to alkali-aggregate reaction (AAR) represents serious problem throughout the world. Geological structurals such as shear zones are formed from compressive, extentional and shearing tectonics movement. Rocks close to fault zones usually have mineralogical features unsuitable to be used as aggregate. This research reports on the microstructural features of six samples of rocks from quarries close to fault zones in eastern Pernambuco (Borborema Province). The aim of this study is to evaluate coarse aggregates affects by tectonics deformation through petrographical and experimental methods, especially with different deformation and textural patterns. Mean mineralogy, presence of minerals of alteration development and exsolution textures were analyzed in order to find their effect in the AAR. The methods applied were the petrographic analysis and the accelerated mortar-bar test to measured linear elongation of specimens. Petrographic analysis were conducted under an optical microscope by thin section studies. The results indicate that higher reactivity was strongly associated with the amount of microcrystalline quartz that has undergone intense dynamic recrystallisation. This samples were closer to fault zones. It was also observed the important role developed by subgrain boundary in the reactivity, and to a smaller degree undulatory extinction of quartz grains. Nevertheless, relationship between the amount of myrmekite or sericite with the degree of reactivity was not observed. Finally, microscopic image by SEM and WDS shown presence of silica-alkaline gel coating the surface of the mortar and aggregate.

Key-words: alkali-aggregate reaction, fault zone, alteration minerals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Largas fissuras em blocos de fundação em Recife.....	12
Figura 1.2 -	Fissuras e trincas em bloco de uma ponte em Recife.....	12
Figura 2.1 -	Fluxograma simplificado da RAA	19
Figura 2.2 -	Condições determinantes para a ocorrência da reação deletéria.....	22
Figura 2.3 -	Influência dos finos na expansão devido à Reação Álcali-Agregado	27
Figura 2.4 -	Ataque das hidroxilas à estrutura da sílica	30
Figura 3.1 -	Classificação das falhas de acordo com a direção do rejeito	36
Figura 3.2 -	Diversas formações geológicas brasileiras	38
Figura 3.3 -	Localização de zonas de falhas em Pernambuco.....	38
Figura 3.4 -	Mapa geológico generalizado da ZCPE	39
Figura 3.5 -	Mapa geológico da ZCPE mostrando o FMW	40
Figura 3.6 -	Mapa geológico da ZCPE mostrando o FME	40
Figura 3.7 -	Mapa geológico da ZCPE mostrando as faixas baixa-T	41
Figura 4.1 -	Fluxograma do procedimento experimental.....	42
Figura 4.2 -	Mapa geológico da região leste do estado de Pernambuco	46
Figura 4.3 -	Seqüência experimental	50
Figura 5.1 -	Croqui demonstrativo das distâncias do ponto de coleta a zona de falha.....	55
Figura 5.2 -	Correlação linear da distância entre o ponto de coleta e a ZCPE.....	55
Figura 5.3 -	Petrografia da amostra 1-Vitória.....	57
Figura 5.4 -	Gráfico de expansão da amostra 1 – Vitória.....	59
Figura 5.5 -	Petrografia da amostra 2-Caruaru	61
Figura 5.6 -	Gráfico de expansão da amostra 2-Caruaru	63
Figura 5.7 -	Petrografia da amostra 3-Gravatá	64
Figura 5.8 -	Gráfico de expansão da amostra 3-Gravatá.....	66
Figura 5.9 -	Petrografia da amostra 4-Ipojuca.....	68
Figura 5.10 -	Gráfico de expansão da amostra 4-Ipojuca.....	70
Figura 5.11 -	Petrografia da amostra 5-Jaboatão	71
Figura 5.12 -	Gráfico de expansão da amostra 5-Jaboatão.....	73
Figura 5.13 -	Petrografia da amostra 6-São Caetano	75
Figura 5.14 -	Gráfico de expansão da amostra 6-São Caetano.....	77
Figura 5.15 -	Expansão linear conjunta de todas as amostras.....	80
Figura 5.16 -	Correlação da sericita com as expansões.....	85
Figura 5.17 -	Correlação da pertita com as expansões de cada amostra.....	86
Figura 5.18 -	Observação por lupa binocular das barras de argamassa	89
Figura 5.19 -	Microimagens da amostra 1-Vitória	90
Figura 5.20 -	Microimagens da amostra 2-Caruaru	90
Figura 5.21 -	Microimagens da amostra 3-Gravatá	91
Figura 5.22 -	Microimagens da amostra 4-Ipojuca	91
Figura 5.23 -	Microimagens da amostra 5-Jaboatão	92
Figura 5.24 -	Microimagens da amostra 6-São Caetano	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Constituição mineralógica da crosta	32
Tabela 3.2 -	Características deformacionais do quartzo.....	34
Tabela 4.1 -	Características físicas e mecânicas do cimento utilizado.....	43
Tabela 4.2 -	Composição química do cimento.....	44
Tabela 4.3 -	Composição química de amostras dos agregados.....	45
Tabela 4.4 -	Caracterização física dos agregados.....	45
Tabela 4.5 -	Frações granulométricas para o ensaio de reatividade.....	49
Tabela 5.1 -	Leituras por coordenadas GPS.....	53
Tabela 5.2 -	Características da ZCPE no ponto de coleta.....	54
Tabela 5.3 -	Características petrográficas da amostra 1-Vitória.....	58
Tabela 5.4 -	Expansão linear: amostra 1 – Vitória.....	59
Tabela 5.5 -	Características petrográficas da amostra 2-Caruaru.....	62
Tabela 5.6 -	Expansão linear: amostra 2 – Caruaru.....	62
Tabela 5.7 -	Características petrográficas da amostra 3-Gravatá.....	65
Tabela 5.8 -	Expansão linear: amostra 3 – Gravatá.....	66
Tabela 5.9 -	Características petrográficas da amostra 4-Ipojuca.....	69
Tabela 5.10 -	Expansão linear: amostra 4 – Ipojuca.....	69
Tabela 5.11	Características petrográficas da amostra 5-Jaboatão.....	72
Tabela 5.12 -	Expansão linear: amostra 5 – Jaboatão.....	73
Tabela 5.13	Características petrográficas da amostra 6-São Caetano.....	76
Tabela 5.14	Expansão linear: amostra 6 – São Caetano.....	76
Tabela 5.15	Resumo da análise petrográfica (macro e microscópica).....	78
Tabela 5.16	Comportamento dos agregados – Norma ASTM C 1260.....	79
Tabela 5.17	Comportamento dos agregados – Norma NBR 15577.....	79
Tabela 5.18	Comparação entre os comportamentos da análise petrográfica e o ensaio de expansão.....	83
Tabela 5.19	Expansão linear extrapolando para 100 dias.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Alta-T: regime metamórfico sob alta temperatura
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM: American Society for Testing and Materials
Baixa-T: regime metamórfico sob baixa temperatura
Ca(OH)₂: hidróxido de cálcio
CPs: corpos-de-prova
CP V-ARI RS: cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos
DNIT: Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes
DRM: desvio relativo médio
FME: faixa milonítica leste
FMW: faixa milonítica oeste
GPS: Global Positioning System
K⁺: cátion potássio
K₂O: óxido de potássio
K-feldspato: feldspato potássico
ME: massa específica
MEV: microscopia eletrônica de varredura
NM: norma mecosul
MPa: mega Pascal
Na⁺: cátion sódio
Na₂O: óxido de sódio
Na₂Oeq= equivalente alcalino
NaOH: hidróxido de sódio
NBR: Norma Brasileira Regulamentada
NBRI: National Building Research Institute
OH⁻: íons hidroxilas
PF: perda ao fogo
pH: potencial de hidrogênio
RAA: reação álcali-agregado
RMIs: rochas e minerais industriais
SiO₂: sílica
Si-O-Si: ligações do grupo siloxano
ZCPE: zona de cisalhamento Pernambuco leste

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivo	18
CAPÍTULO II - A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)	19
2.1 Tipos de reação álcali-agregado	20
2.2 Principais fatores que influenciam na RAA	21
2.2.1 Agregados.....	22
2.2.1.1 Características microestruturais.....	23
2.2.1.2 Natureza dos agregados.....	24
2.2.1.3 Dimensão dos agregados.....	26
2.2.2 Álcalis	27
2.3 Aspectos químicos da reação álcali-agregado.....	29
CAPÍTULO III - ESTRUTURAS GEOLÓGICAS	32
3.1 Minerais e rochas.....	32
3.2 Deformação de corpos rochosos.....	35
3.3 Zonas de falhas.....	35
3.4 Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE).....	38
CAPÍTULO IV - PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
4.1 Materiais	43
4.2 Métodos	46
4.2.1 Análise petrográfica	47
4.2.2 Método acelerado de barras de argamassa	47
4.2.3 Observações microscópicas	51
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
5.1 Leituras de coordenadas GPS	53
5.2 Resultados por amostra	56
5.2.1 Amostra 1- Vitória	56
5.2.2 Amostra 2 - Caruaru	60
5.2.3 Amostra 3- Gravatá	63
5.2.4 Amostra 4 - Ipojuca.....	67
5.2.5 Amostra 5 – Jaboatão.....	70
5.2.6 Amostra 6 - São Caetano.....	74
5.3 Comparação conjunta entre as amostras	77
5.4 Observações da microestrutura após ensaio de expansão.....	88
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS	97

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

O concreto é um produto essencial na indústria da construção civil sendo constituído, em termos médios de metro cúbico, de 42% de agregado graúdo (brita), 40% de areia, 10% de cimentos, 7% de água e 1% de aditivos químicos. Assim, a maior parte do concreto é constituída de agregados evidenciando a importância de sua utilização de forma adequada. O uso de agregados inadequados para a construção civil traz como consequência uma rápida deterioração de concreto de cimento portland quando sujeito a condições ambientais adversas. Os agregados não devem reagir com o cimento originando produtos expansivos que possam criar tensões internas na massa de concreto, que alterem ou diminuam as resistências mecânicas ou durabilidade dos mesmos. Os agregados representam importância significativa como insumos para a indústria da construção civil, portanto torna-se primordial, do ponto de vista da durabilidade das estruturas de concreto, o conhecimento das suas características intrínsecas (VALVERDE, 2001; CÁNOVAS, 1988).

O Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes (DNIT 090/2006) lista as diversas patologias atuantes no concreto dentre elas está a reação álcali-agregado. A Reação Álcali-Agregado (RAA) é relatada como sendo uma reação química expansiva que ocorre no concreto entre componentes silicosos do agregado e hidróxidos alcalinos da pasta de cimento hidratado podendo resultar na perda de sua resistência, elasticidade e durabilidade.

Os sinais dessa reação podem ser identificados através do aparecimento de mancha do gel exsudado, pontos estourados e fissurações em forma de mapa na superfície do concreto. Essa reação foi detectada em diversos países incidindo em estruturas como barragens, pontes, pavimentos, quebra-mar, píer e fundações de concreto (FURNAS, 1997; NEVILLE, 1997). As figuras 1.1 e 1.2 ilustram os aspectos deletérios da reação álcali-agregado.



Figura 1.1 – Largas fissuras em blocos de fundação de um edifício residencial em Recife (ANDRADE, 2006).



Figura 1.2 - Fissuras e trincas em bloco da ponte Paulo Guerra em Recife (HELENE *et al.*, 2006).

Atualmente não existe um método definitivo de recuperação de grandes estruturas afetadas pela reação álcali-agregado. Isso evidencia a importância da seleção adequada dos materiais utilizados, agregado e cimento, na confecção do concreto. Medidas preventivas são mais desejáveis do que as medidas mitigadoras, visto que uma vez instalada a reação seu controle fica mais difícil de ser realizado com êxito.

Os materiais utilizados como agregados graúdos na construção civil são rochas que passaram por um processo simples de cominuição (britagem). Essas rochas são constituídas por vários minerais, tais como quartzo, feldspato etc.

Os minerais são substâncias inorgânicas que possuem estrutura cristalina tridimensional organizada, porém dependendo das modificações das condições geológicas, como por exemplo, tectonismo, as rochas e conseqüentemente seus minerais constituintes podem sofrer alterações em sua estrutura cristalina acarretando modificações de suas propriedades físicas e/ou químicas. As rochas são constituídas de minerais primários (quartzo, feldspato, biotita, etc) e dos minerais de alteração secundária. Os minerais de alteração secundária são aqueles formados a partir da alteração intempérica ou hidrotermal dos minerais primários, geralmente são argilominerais, silicatos, sais, sulfatos, etc. Exemplos de minerais de alteração secundária são a sericita e a clorita. Texturas de exsolução são feições formadas a partir de um processo de separação catiônica, geralmente entre o sódio e o potássio, devido a mudanças termodinâmicas ocorridas nas estruturas dos feldspatos. Exemplos dessas texturas são a mirmequita e a pertita. (DANA, 1969; DEER *et al.* 2000).

A norma brasileira sobre a reação álcali-agregado - NBR 15577/2008, em sua parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto faz uma observação com relação às texturas de exsolução pertíticas e mirmequíticas como fases passíveis de contribuir para o aumento da reatividade dos agregados.

Rao e Sinha (1989) *apud* Wigum (1995) avaliaram a taxa de expansão de diversos agregados indianos e verificaram que em um deles o aumento da expansão foi ocasionado pela ocorrência de mirmequita. Wigum (1995) estudou a reatividade de agregados e verificou que as texturas mirmequíticas teriam possíveis influências no aumento da reatividade álcali-agregado, uma vez que tais texturas evidenciam características de deformação. Ponce e Batic (2006) também relataram a presença de mirmequita, bem como alteração de feldspatos associados em desenvolver a reação álcali-agregado.

No Brasil, estudos de reatividade de agregados também têm sido conduzidos. Como exemplo tem-se o trabalho de Valduga (2002) no qual foram avaliados agregados do estado de São Paulo e verificou-se que muitas amostras coletadas foram classificadas petrograficamente como potencialmente reativas, estando associando tal reatividade, em grande parte, ao ângulo de extinção ondulante do quartzo.

No entanto, a associação da reatividade de um determinado agregado apenas com a medida do ângulo de extinção ondulante talvez não caracterize de forma adequada tais materiais, uma vez que a medida do ângulo de extinção ondulante do quartzo utilizado para avaliar grau de deformação das rochas é controversa não podendo ser considerado um método confiável para inferir a reatividade dos agregados. Nesse sentido, Hasparyk (1999) descreve trabalhos a respeito da importância e precisão da medida do ângulo de extinção ondulante do quartzo os quais não possuem homogeneidade nos resultados e aconselha que o método e seus limites devam ser reavaliados.

Thomson e Grattan-Bellew (1993) enfatizam que uma simples medição do ângulo de extinção ondulante não traz informação correta da deformação de rochas metamórficas e conseqüentemente infere incorretamente a sua reatividade. Rodrigues *et al.* (1997) também verificaram a falta de clareza na relação do ângulo de extinção ondulante com a reatividade.

De acordo com Wigum (1995) além da extinção ondulante, outras características microestruturais do quartzo devem ser consideradas para a avaliação da deformação e conseqüente reatividade das rochas utilizadas como agregado, tais como bandas de deformação, desenvolvimento de subgrão, recristalização etc.

Andrade *et al.* (2006) associaram a reatividade potencial de agregados com a presença de quartzo com extinção ondulante moderada a forte, quartzo microcristalino e feldspatos alcalinos. No entanto, o resultado do ensaio de expansão revelou comportamento inócuo para

as amostras que apresentavam apenas extinção ondulante, evidenciando que a ocorrência de extinção ondulante no quartzo mesmo que forte possui pouca representabilidade na reatividade do agregado.

Modificações mineralógicas e texturais são observadas, muitas vezes, em rochas próximas a zonas de falhas, que são deformações geológicas originadas por tectonismo. Na literatura há estudos de zonas de falhas, ou seja, maciços rochosos deformados por processos tectônicos, correlacionando a reatividade álcali-agregado de agregados oriundos das mesmas. Como exemplo se pode citar estudos desenvolvidos por Kerrick e Hooton (1992) que avaliaram rochas deformadas de pedreiras localizadas dentro de uma zona de cisalhamento no noroeste de Massachussets (EUA) fazendo uma correlação com a RAA, onde evidenciaram a deformação dos minerais; tais como cristais quebrados e encurvados, redução no tamanho dos grãos e desenvolvimento de foliação. Os autores ainda comentam que o progresso da reação álcali-agregado ocorreu devido à facilidade do ingresso da solução alcalina através de foliações, bem como nas fronteiras de subgrão do quartzo microcristalino formado a partir da recristalização dinâmica.

Nessa mesma linha pode-se citar outro trabalho realizado por Shayan (1993) no qual foram avaliados dois agregados de rochas graníticas do oeste da Austrália, um obtido próximo e outro retirado distante desta zona de cisalhamento. Suas análises evidenciaram grandes diferenças petrográficas: o agregado situado próximo à zona de cisalhamento apresentou um alto grau de quartzo recristalizado, bem como quartzo fortemente estirado; o agregado situado distante da zona de cisalhamento apresentou características deformacionais bastante inferiores.

Portanto, a partir das abordagens apresentadas, a presente pesquisa faz a avaliação de rochas, usadas como agregados graúdos, coletadas próximas a estruturas de falhas geológicas

originadas por deformação tectônica. A principal zona de falha descrita nesse estudo formou-se a partir de movimentos tectônicos de cisalhamento sendo denominada, por Neves e Mariano (1999) de Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE) estando situada na região leste do estado de Pernambuco, província da Borborema (Nordeste do Brasil).

Diante do exposto, este trabalho se preocupou em encontrar parâmetros passíveis de contribuir para a avaliação da reatividade de agregados graúdos através de observações de amostras de rochas localizadas nas proximidades de zonas de falha afetadas por deformação tectônica, com o propósito de analisar as características mineralógicas e intensidade de metamorfismo.

1.1 Justificativa

Conforme relatado anteriormente, os agregados são muito importantes do ponto de vista da durabilidade e que a gênese e mineralogia da rocha que originou o agregado são também importantes. Os agregados graúdos devem possuir boas características para que não venham a causar danos futuros às estruturas de concreto. A reação álcali-agregado é uma patologia do concreto muito grave na qual suas causas não são completamente compreendidas, a despeito de vários anos de pesquisas no mundo inteiro.

O tema em estudo neste trabalho, ou seja, a reação álcali-agregado, é bastante evidenciado com casos de ocorrência no estado de Pernambuco. Nesse sentido Andrade (2006) descreve várias evidências de reação álcali-agregado ocorridas em elementos de fundação de edifícios residenciais e comerciais da região metropolitana do Recife. O autor relata um caso interessante em que dois blocos de fundação adjacentes, porém feitos por

concreteiras diferentes e conseqüentemente agregados graúdos de litologias diferentes exibiam características totalmente distintas: um mostrando fissuras e comprovada RAA e o outro sem nenhuma fissuração, este último possuía apenas o quartzo deformado com extinção ondulante como fase reativa no agregado.

Adicionalmente, Pecchio *et al.* (2006) salientam que as inúmeras ocorrências de reações expansivas deletérias nas edificações urbanas na região da grande Recife, são muito expressivas e de não haver na literatura registro de reação álcali-agregado tão elevado (aproximadamente 20 casos). As principais evidências, segundo os autores, de RAA observadas nessas estruturas foram: padrão característico de fissuração; agregado granítico milonitizado; bordas escuras de reação nos agregados, o gel expansivo da reação. O autor conclui afirmando que a baixa profundidade do lençol freático, juntamente com a ocorrência de agregados graníticos milonitizados propiciaram condições favoráveis ao desenvolvimento da reação álcali-silicato nos concretos de fundações das edificações da região metropolitana do Recife.

A RAA é uma reação complexa, pois muitas variáveis atuam como influenciadores e pesquisas devem ser conduzidas na busca de seu melhor e contínuo entendimento. Os agregados graúdos utilizados em obras na construção civil do estado de Pernambuco são provenientes de jazidas de rochas explotadas por pedreiras locais. Algumas dessas pedreiras estão localizadas nas proximidades de grandes estruturas geológicas metamorfizadas por processos tectônicos. Essas estruturas constituem as zonas de falhas.

1.2 Objetivo

O objetivo foi fazer observações das características microestruturais do quartzo, presença de minerais de alteração secundária e texturas de exsolução buscando correlacionar o grau de deformação de tais feições com a reatividade álcali-agregado. Outrossim, medições da distância do ponto de coleta das amostras às referidas zonas de falhas foram feitas no intuito de tentar inferir a influência das mesmas na deformação das rochas coletadas.

Metas alcançadas a partir dos objetivos específicos:

- a) identificação dos minerais reativos presentes, bem como as características microestruturais que possam influenciar na reatividade dos agregados através da análise petrográfica de acordo com a norma ASTM C 295;
- b) mapeamento das amostras de rochas coletadas estabelecendo sua localização em relação a ZCPE, utilizando coordenadas GPS;
- c) caracterização das amostras de agregados graúdos, como sua composição química e/ou características físicas;
- d) avaliação do grau de reatividade das amostras de agregados com relação à RAA, valendo-se do método acelerado prescrito pela ASTM C 1260;
- e) avaliação comparativa com os limites estabelecidos pela norma brasileira NBR 15577.
- f) comparação das características microestruturais observadas na petrografia com o resultado das expansões tentando encontrar parâmetros que auxiliem a elucidar a questão da reatividade das rochas.
- g) realização de observações através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) juntamente com análises de espectrometria por comprimento de onda dispersivo (WDS) a fim de confirmar a presença do gel da reação, bem como a verificação da composição química do mesmo.

CAPÍTULO II - A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

A definição de Reação Álcali-Agregado (RAA) é relatada como sendo uma reação química patológica do concreto causada pelos álcalis do cimento e minerais silicosos do agregado. Segundo Mehta e Monteiro (1994), as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer a resistência e elasticidade do concreto, reduzindo sua vida útil. Tais autores ainda afirmam que o desenvolvimento desta manifestação patológica no concreto é uma das causas de deterioração de estruturas construídas em um ambiente contendo disponibilidade de umidade, tais como barragens, estacas de pontes e estruturas marinhas. Assim, qualquer estrutura de concreto que contenha agregado reativo e que esteja exposta à umidade pode sofrer essa reação e manifestar os problemas dela decorrentes. Um Fluxograma simplificado do processo de reação, desde a formação do gel até a fissuração, está representado na figura 2.1 mostrado por (FERRARIS, 2000, *apud* VALDUGA, 2002).

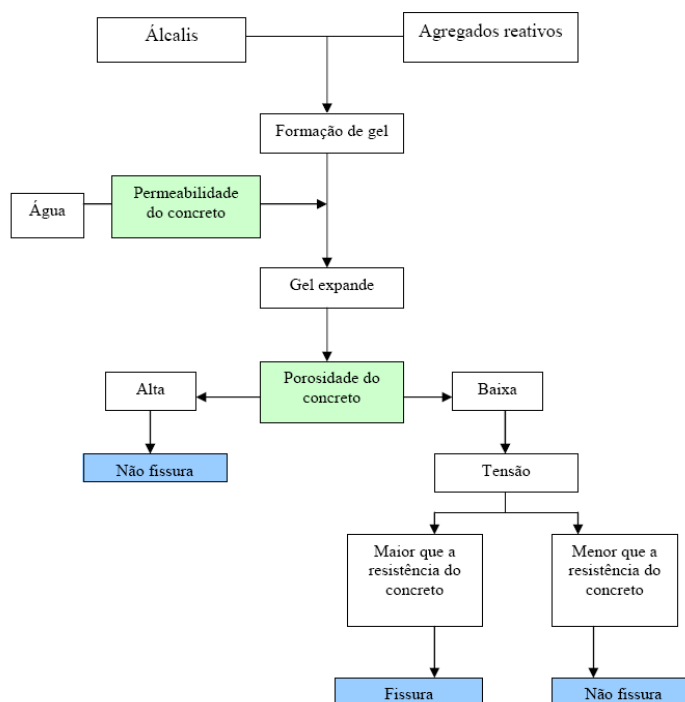


Figura 2.1 - Fluxograma simplificado da RAA (FERRARIS, 2000, *apud* VALDUGA, 2002).

2.1 Tipos de reação álcali-agregado

O termo reação álcali-agregado é o gênero das quais existem três espécies, que estão conceituadas na literatura diferenciando-se pela composição mineralógica reativa dos agregados classificando-se como: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato.

A Reação Álcali-Sílica é uma reação química envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes da hidratação do cimento e algumas formas de sílica de diferentes estados termodinâmicos. Segundo Diamond (1975) a reação álcali-sílica ocorre quando os cátions alcalinos e os íons hidroxilas das soluções dos poros do concreto reagem quimicamente com determinadas formas de sílica metaestáveis constituintes dos agregados. Kihara e Scandiuizzi (1993) descrevem as fases minerais reativas mais comuns deste tipo de reação como sendo as do grupo da sílica (opala, calcedônia, cristobalita e tridimita) e alguns tipos de vidros naturais ou artificiais. A reatividade dos vidros é caracterizada devido a sua estrutura cristalina desorganizada (amorfa).

A Reação Álcali-Silicato se manifesta mais lentamente que a reação álcali-sílica. De acordo com Kihara (1986), o fenômeno ocorre através da reação entre os álcalis do cimento e silicatos provenientes de rochas tais como argilitos, siltitos e grauvas (sedimentares); ardósias, filitos, xistos, gnaisses e quartzitos (metamórficas); com também em rochas ígneas graníticas. O autor supracitado explicita que nesse tipo de reação, a reatividade está relacionada à presença de quartzo deformado ou minerais filossilicáticos expansivos, tais como vemiculita, illita e montmorilonita.

A Reação Álcali-Carbonato ocorre entre rochas calcárias e dolomíticas. Kihara e Scandiuizzi (1993) definem a reação álcali-carbonato como sendo a que ocorre entre os álcalis

disponíveis do cimento e alguns agregados rochosos carbonáticos, tais com calcários dolomíticos argilosos e, segundo o autor, caracteriza-se por não apresentar a formação de um gel expansivo.

Assim, a partir das definições apresentadas fica clara a distinção entre os três tipos de reação álcali-agregado, onde se pode verificar que na reação álcali-sílica a fase reativa é a sílica amorfa ou metaestável, já na reação álcali-silicato ocorre em rochas que sofreram deformação devido a diversos processos tectônica, onde o principal mineral reativo é o quartzo deformado e por fim a reação álcali-carbonato possui fases minerais carbonáticas presentes no agregado utilizado para confecção de concreto. Neste estudo, as amostras de agregado são rochas que apresentam o mineral quartzo como principal componente reativo, sendo classificada, a partir das definições mostradas, como reação álcali-silicato.

2.2 Principais fatores que influenciam na RAA

De acordo com a Norma DNIT 090/2006 os principais fatores que influenciam as reações álcali-agregado são os seguintes:

- a) o conteúdo de álcalis do cimento e o consumo de cimento do concreto;
- b) a contribuição de íons alcalinos de outras fontes tais como aditivos, agregados contaminados com sais e penetração de água do mar ou de soluções salinas;
- c) a quantidade, o tamanho e a reatividade dos constituintes reativos presentes no agregado;
- d) a disponibilidade de umidade junto à estrutura de concreto;
- e) a temperatura ambiente.

A figura 2.2 mostra os principais fatores que condicionam a ocorrência e permanência da reação deletéria: a ocorrência de minerais de sílica, a disponibilidade de íons sódio e potássio dispersos em uma solução alcalina proporcionada pelo hidróxido de sódio e por último a presença de umidade. Na falta de um desses três parâmetros a RAA não ocorrerá de forma deletéria, ou seja, não será causadora de danos às estruturas.

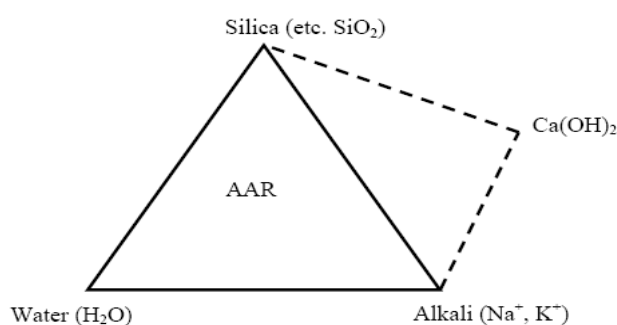


Figura 2.2 – Condições determinantes para a ocorrência da reação deletéria (WIGUM *et al.*, 2007).

A seguir serão abordados os fatores intervenientes diretamente relacionados com a ocorrência da reação álcali-silicato.

2.2.1 Agregados

Segundo Kihara e Scandiuzzi (1993), no Brasil, os agregados potencialmente reativos são compostos de cascalhos com calcedônia, granitos milonitizados, basaltos ricos em vidros, calcários silicosos, quartzitos, granulitos e gnaisses.

2.2.1.1 Características microestruturais

Fatores intrínsecos dos agregados influenciam nos efeitos da RAA. Um mesmo agregado utilizado em diferentes obras comporta-se distintamente, sendo vez inócuo em

determinada obra e vez reativo em outra, mostrando que a RAA é um processo complexo onde há interferências diversas (KIHARA, 1986). Nesse sentido, estudos são realizados com o objetivo de melhor entender as características dos agregados e seu efeito na expansão devido à RAA: Um deles é o estudo conduzido por Leemann e Holzer (2005) onde estudaram a reatividade de minerais em rochas ígneas e metamórficas e observaram que o quartzo deformado sob planos de clivagem de xisto, gnaisses e granitos apresentou maior reatividade que os demais minerais constituintes.

Owsiak (2003) avaliou amostra de agregado granítico e verificou que inicialmente o comportamento foi inócuo, no entanto com a continuidade da reação o agregado comportou-se como reativo, identificando o gel álcali-sílica. O autor supracitado ainda comenta que o processo de deterioração é lento, pois depende do grau de deformação das fases silicosas. Adicionalmente, Amo e Pérez (2001) comentam que o caráter lento da reação álcali-silicato está associado com o quartzo microcristalino e em particular ao desenvolvimento de subgrão.

Monteiro *et al.* (2001) realizaram análises da textura em rochas com estruturas química e mineralógica semelhantes e verificaram que as rochas com maiores deformações resultaram em maiores expansões, onde, nessas rochas, a orientação preferencial da biotita também influenciou a reatividade. Estudos conduzidos por Wigum (1995) verificaram correlação de sua reatividade com o grau de deformação do quartzo por suas características microestruturais tais como extinção ondulante, bandas de deformação, lamelas de deformação e recristalização. No entanto, o autor menciona que a medida do ângulo de extinção ondulante do quartzo é bastante questionada uma vez que possui limitações de método e com isso não é um parâmetro confiável para prever a RAA. A ocorrência de quartzo microcristalino no agregado representa uma maior indicação de reatividade do que apenas a sua extinção

ondulante. Outras características microestruturais muitas vezes recebem atenção insuficiente ou com quantificação muito limitada e que uma descrição completa da rocha é necessária.

O autor acima citado conclui que a presença de quartzo microcristalino, bem como o desenvolvimento de subgrão foram os principais parâmetros influenciadores do aumento da reatividade das rochas analisadas. No granito porfírico, a presença de lamelas de deformação, bem como a ocorrência de mirmequita nos feldspatos possivelmente seriam os fatores que contribuíram para o aumento da solubilidade e conseqüentemente para o aumento da expansão, todavia o autor deixa claro que estudos adicionais devem ser realizados para posterior confirmação de tais texturas de exsolução. O mecanismo mais provável de aumento de reatividade de tais rochas é devido à presença de quartzo microcristalino e em particular a alta energia de deslocamentos nos subgrão os quais fornecem sítios preferenciais de dissolução, onde o aumento do teor de subgrão facilitará fluidos alcalinos penetrarem nos sítios de reação.

Thomson e Grattan-Bellew (1993) afirmam que o principal componente reativo das rochas metamórficas (xistos ou gnaisses) é o quartzo microcristalino e apresentando desenvolvimento de subgrão, porém não completa recristalização. Os autores acima trazem a atenção para que as análises petrográficas devam incluir uma estimativa da quantidade do quartzo com desenvolvimento de subgrão.

2.2.1.2 Natureza dos agregados

De acordo com Gillott (1986) a geologia de um país fornece um guia geral não apenas da distribuição das principais rochas e minerais, mas também do seu potencial de reatividade, uma vez que a reatividade química é afetada pela natureza dos materiais bem como pela temperatura e outros fatores. O autor acima ainda comenta que as principais propriedades que influenciam a reatividade química dos materiais são composição e grau de ordem atômica.

A ordem atômica é reduzida com imperfeições e deformações internas nos cristais e que são mínimas nos materiais vítreos e amorfos. Assim, de modo geral a reatividade química aumenta com o aumento da desordem atômica, onde as propriedades das rochas e minerais dependem de suas histórias geológicas.

Determinadas estruturas de concreto apresentam uma reatividade rápida e outras exibem expansões mais lentas. A origem geológica das rochas utilizadas como agregado representam distinções com relação à reatividade. Nesse sentido, Ponce e Batic (2006) analisaram amostras de estruturas deterioradas com RAA e avaliaram as manifestações e o progresso da reação apresentado pelos agregados de diferentes origens geológicas. Os autores acima analisaram uma rocha sedimentar (agregados de reação rápida) clástica composta predominantemente de quartzito e arenito onde os grãos de quartzo maiores eram cimentados por material silicoso composto por quartzo microcristalino, opala e calcedônia no qual uma forte dissolução do material cimentício silicoso e seu conseqüente aumento de porosidade são causados devido ao ataque das soluções alcalinas caracterizando a rápida reatividade da rocha.

Com relação às rochas com velocidade de reação mais baixa, o quartzo deformado é o principal mineral reativo. Ponce e Batic (2006) analisaram um granitóide granítico-granodiorítico, um ortognaisse granodiorítico e um quartzo-mica xisto. O granitóide granítico-granodiorítico exibia sinais de deformação, tais como formação de subgrão e recrystalização do quartzo, bem como a presença de geminação em plagioclásio e mirmequita. O ortognaisse granodiorítico exibindo grande quantidade de quartzo recrystalizado, feldspatos alterando para sericita e illita, bem como planos de foliação. O quartzo-mica xisto composto principalmente de quartzo e muscovita exibindo uma marcada planaridade penetrativa formando xistosidade. O caminho natural de recrystalização do quartzo no agregado, seu nível de deformação e grau

de recristalização seriam os principais fatores, segundo os autores, de acessibilidade ao ataque das soluções alcalinas.

Segundo Ponce e Batic (2006) a reatividade lenta dos agregados está relacionada com a estabilidade termodinâmica do quartzo deformado, onde defeitos na estrutura cristalina aumentam a energia livre da rede cristalina tornando a sílica metaestável e mais susceptível aos ataques das soluções alcalinas.

2.2.1.3 *Dimensão dos agregados*

Com relação às características macroscópicas, diversos tipos, formas e tamanhos de agregado exibem comportamentos que afetam na magnitude da reação. Nesse sentido, Mehta e Monteiro (1994) afirmam que a quantidade, tamanho e tipo de agregado reativo influenciam no desenvolvimento de tensões e expansões. Quando a granulometria dos agregados reativos está abaixo de 75 μ m as expansões observadas não são significativas, entretanto na faixa granulométrica de agregado miúdo (1,0 - 4,8mm) são verificadas expansões e fissurações em inspeções de campo.

Andriolo (2006) comenta as pesquisas realizadas no Brasil no que concernem as suas soluções utilizadas como métodos adotados para evitar a reação expansiva como sendo compiladas nos seguintes itens: uso de agregado não reativo; limitação do teor de álcalis no cimento; uso de pozolanas ou outras adições. No entanto, o autor supracitado alerta a existência de outras maneiras de uso do agregado deletério. Com isso faz um incentivo pela busca da otimização dos materiais de granulometria inferior a 0,075mm (finos) produzidos a partir dos próprios agregados reativos, objetivando seu uso de modo seguro, para inibir as reações expansivas.

O autor acima afirma, fundamentado em ensaios confirmatórios citando diversas referências de pesquisa, a possibilidade do uso de agregados deletérios sob a forma de finos na supressão da RAA e especificamente ilustra uma delas mostrando o benefício do emprego de pó-de-pedra na mitigação das expansões conforme está apresentado na figura 2.3:

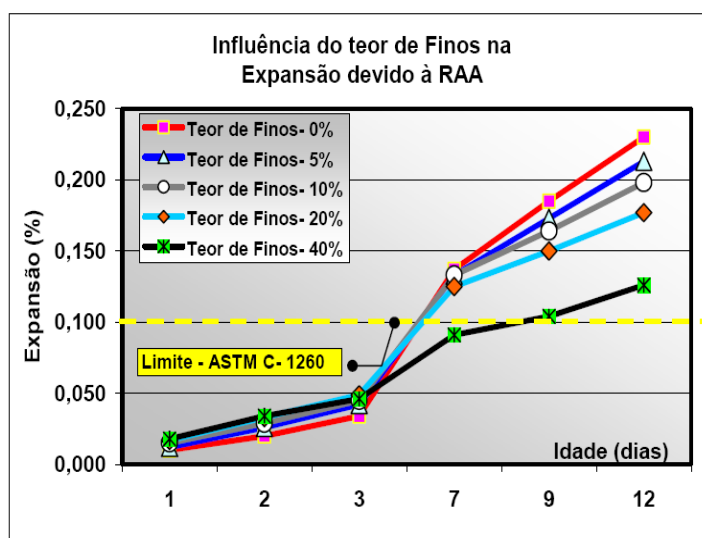


Figura 2.3 - Influência dos finos na expansão devido à Reação Álcali-Agregado (ANDRIOLO, 2006).

A partir das descrições feitas, observa-se a enorme importância da análise petrográfica da rocha ser realizada de forma completa e focada, que muitas vezes é negligenciada ou realizada superficialmente e muitas vezes de forma genérica. O conhecimento das características microestruturais intrínsecas dos minerais, especialmente o quartzo que é o principal constituinte reativo dos agregados, é primordial para a elucidação e caracterização do grau de reatividade das rochas no que diz respeito à reação álcali-silicato.

2.2.2 Álcalis

Os álcalis do cimento são provenientes das argilas ou outros componentes silicosos presentes na matéria prima. Quimicamente falando, álcalis são os elementos da primeira

coluna da tabela periódica, porém apenas o sódio (Na) e o potássio (K) são constituintes comuns no cimento Portland (expressos em óxidos) e os demais são freqüentemente ignorados. Tanto o óxido de sódio (Na_2O) quanto o óxido de potássio (K_2O) mostram-se efetivos em causar danos ao concreto devido a RAA, uma vez que são responsáveis pelo ataque às rochas e minerais expansivos. No entanto, estudos realizados evidenciaram que as expansões são mais correlacionadas com o teor de álcalis equivalente expresso por $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (GILLOTT, 1986; DIAMOND, 1975). O teor de álcalis presente no cimento representado através da porcentagem equivalente de óxido de sódio pode ser calculado de acordo com a equação a seguir:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}(\%) = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$$

O teor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ está entre 0,2 a 1,5 % onde o pH atingido nas soluções dos poros do concreto fica na faixa de 12,5 a 13,5 que caracteriza um pH elevado representando uma solução fortemente básica. Tais soluções básicas podem desestabilizar e provocar reações com agregados silicosos ácidos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os álcalis nas soluções dos poros do concreto são fornecidos pelo cimento, todavia adições químicas, adições minerais, agregados, água de mistura da argamassa e outras fontes externas também fornecem álcalis. Nesse sentido, Wang *et al.* (2007) estudaram minerais alcalinos com o objetivo de avaliar sua potencialidade em liberar álcalis e com isso prever sua contribuição no agravamento da reação álcali-agregado. Os autores verificaram que a quantidade de álcalis liberada depende do tipo de mineral alcalino e do tipo de íons álcalis presentes provenientes de outras fontes. Um estudo realizado por Constantiner e Diamond (2003) verificou que os feldspatos, minerais comumente constituintes dos agregados, liberam

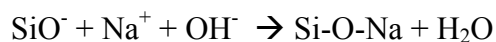
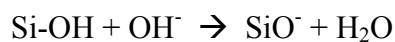
quantidades significativas de álcalis na solução dos poros do concreto, contribuindo dessa forma com o aumento da concentração de álcalis na solução dos poros. Outrossim, Leemann e Holzer (2005) realizaram a solubilização de minerais em solução alcalina e observaram que as micas e os feldspatos dissolvem menos que o quartzo; o feldspato dissolve mais que a mica e ambos são fontes comuns de íons álcalis podendo influenciar o progresso da RAA. Diante do exposto fica evidente a complexidade dos fatores que influenciam a reação forçando o contínuo estudo na área.

2.3 Aspectos químicos da reação álcali-agregado.

A reação da sílica com a solução alcalina e conseqüente formação do gel é representada quimicamente, de forma simplificada, pela seguinte mecanismo:



(silanóis)



(álcalis)

(gel)

Após o gel formado, havendo disponibilidade de água/umidade o mesmo irá expandir. Estas reações são favorecidas em meio de alto pH entre 12 -14, pois a solubilidade da sílica é maior em valores de pH elevados (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981; THOMSON; GRATTAN-BELLEW, 1993).

O grau de cristalinidade da sílica influencia o mecanismo da reação, ou seja, a sílica apresentando estrutura desorganizada facilita a migração dos íons álcalis para o interior da estrutura e conseqüentemente toda a reação. A figura 2.4 ilustra a química da RAA quando o ataque dos íons hidroxilas provenientes da reação de hidratação do cimento se dá na superfície bem cristalizada da sílica e quando a sílica é amorfa (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981).

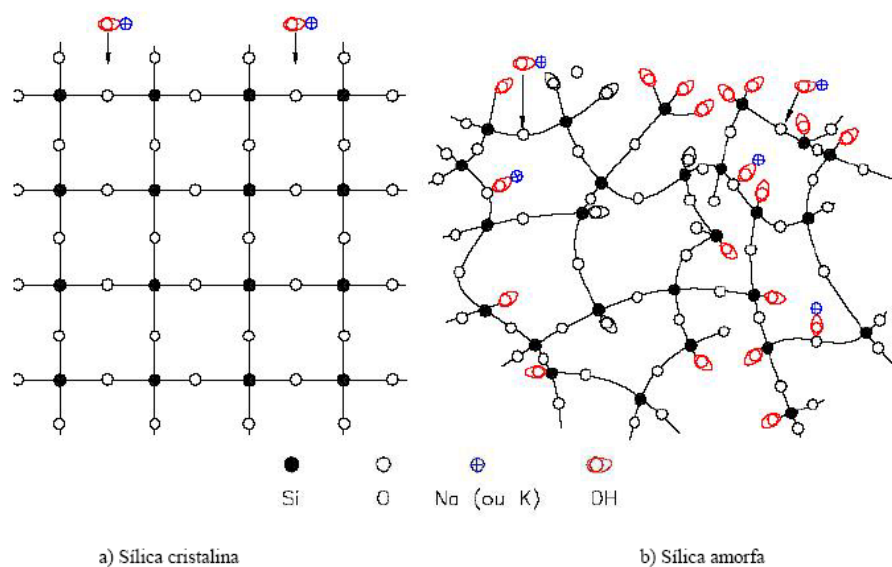


Figura 2.4 - Ataque das hidroxilas à estrutura da sílica (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981).

A Figura 2.4 (a) mostra a sílica com estrutura bem cristalizada, na qual o ataque dos íons hidroxilas ocorre apenas na superfície externa e em menor intensidade, constituindo uma etapa muito lenta com poucos íons de sílica penetrando na estrutura. Na figura 2.4 (b), a sílica

pouco cristalina permite a penetração dos íons hidroxila e dos íons alcalinos (Na^+ ou K^+) no seu interior. A ruptura das ligações do sistema Si-O-Si através do ataque das hidroxilas acarreta a perda de rede tridimensional e produz numa estrutura polieletrólítica contendo íons álcalis (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981).

Broekmans (2004) comenta que o mecanismo de dissolução da sílica é controlado preferencialmente pelas moléculas de água e íons hidroxilas dissolvidos que quebram as ligações de sílica que mais tarde se recombina com os álcalis (íons sódio (Na^+) e potássio (K^+)) sob alto pH (> 13). Wang e Gillot (1991) estudaram a reação álcali-sílica utilizando opala como agregado e concluíram que a presença de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ potencializa a reação, acarretando o aumento da expansão do gel. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ exerce duas funções básicas: primeiro ele atua como um “tampão”, ou seja, mantém o pH alto (concentração de íons OH^- alta) na solução dos poro; segundo ocorre a troca dos íons Ca^{++} pelos íons álcalis, que adicionalmente produzem o gel sílico-alcalino expansivo.

Tambelli *et al.* (2006) analisaram géis da reação álcali-agregado exsudados naturalmente de testemunhos de barragem através de espectroscopia de RMN no qual evidenciaram um composto amorfo, ou seja, uma estrutura silicática tridimensional desorientada, de composição predominantemente silicato-potássica com estrutura em camada, contendo microcristais de sódio. Os autores acima descrevem a composição do gel como sendo composto por SiO_2 , K_2O e pequena quantidade de Na_2O . Adicionalmente, quantidades menores de Ca^{++} , Al^{3+} e Fe^{++} também são detectadas.

Por fim, a reação álcali-agregado é uma reação química muito complexa onde seus mecanismos de atuação e expansão ainda não são claramente compreendidos, a despeito de vários anos de pesquisas desenvolvidas nessa área. Tal fato se deve talvez a multiplicidade de fatores que agem e interferem no seu mecanismo.

CAPÍTULO III - ESTRUTURAS GEOLÓGICAS

Neste capítulo serão apresentados, inicialmente, os conceitos de minerais e rochas, suas variedades, formações, ocorrências etc. Em seguida serão apresentados os tipos de deformação dos corpos rochosos como forma de solidificar o entendimento de alguns dos termos empregados nesse estudo. Posteriormente serão descritas as principais características da Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE).

3.1 Minerais e rochas

Minerais são substâncias sólidas e inorgânicas, que possuem composição química definida ou variável dentro de certos limites e uma sistemática ordem atômica tridimensional (cristalinidade). São homogêneos quanto as suas propriedades físicas e químicas. A tabela 3.1 apresenta a constituição mineralógica da crosta terrestre (ERNST, 1988; MADUREIRA *et al.*, 2000).

Tabela: 3.1 - Constituição mineralógica da crosta (MADUREIRA *et al.*, 2000).

Classe mineral	Grupo mineral	% em volume
Silicatos	Feldspatos	58
	Piroxênios e anfibólios	13
	Quartzo	11
	Micas, clorita, argilominerais	10
	Olivina	3
	Epidoto, cianita, andaluzita, silimanita, granadas, zeólitas etc.	2
Carbonatos, óxidos, sulfetos, halóides etc.		3
Total		100

Os principais minerais existentes formadores das rochas mais comuns da crosta são os feldspatos, anfíbios e piroxênios, quartzo e micas. Além dos minerais principais constituintes das rochas, há os minerais de alteração secundária, que são aqueles formados a partir da alteração intempérica ou hidrotermal dos minerais principais. Os minerais secundários geralmente são argilominerais, silicatos, sais, sulfatos etc, exemplos de minerais de alteração secundária são: sericita, clorita, etc. A sericita é um mineral de alteração secundária do feldspato (plagioclásio) com aspecto fibroso. A sericita é considerada como uma mica branca fina, tal como muscovita, todavia difere desta porque a sericita possui maior teor de sílica. A clorita é um mineral proveniente da alteração secundária de silicatos ferromagnesianos, tais como piroxênio, anfíblio, biotita etc. A clorita possui estruturas em camadas semelhantes às micas estando presente em rocha que sofreram metamorfismo e é abundante em muitos xistos. A cor verde das rochas metamórficas pode ser devida à presença da clorita. Com relação às texturas de exsolução é possível fazer algumas conceituações: a mirmequita é uma textura de exsolução formada através do intercrescimento de plagioclásio e quartzo vermicular. Tais texturas são freqüentes nos granitos. A pertita é uma textura de exsolução originada a partir do intercrescimento de plagioclásios sobre os grãos de K-feldspato (DANA, 1969; DEER *et al.* 2000).

Segundo Dorado (1989) *apud* Hasparyk (1999) quando a rocha contendo quartzo sofre esforços tectônicos, tais como de cisalhamento, o quartzo apresenta características de deformação que se evidenciam através de vários estágios sucessivos, tais como a extinção ondulante, bandas de deformação, desenvolvimento de subgrão e, por fim, chega a se recrystalizar.

Na estrutura interna dos minerais os cristais normalmente contêm defeitos na sua rede cristalina. Na ausência de defeitos intracristalinos, um cristal possui uma “energia interna” mínima. O aumento da quantidade de defeitos aumentará sua energia interna devido mudança de ordenamento dos átomos. Quando um cristal apresenta defeitos similares apresentando forma levemente encurvada, ele não extingue homogeneamente no polarizador cruzado no microscópio óptico e isso é conhecido como extinção ondulante. Durante uma deformação, mecanismos de ordem e desordem competem até atingirem um equilíbrio. Esse mecanismo é chamado de *recuperação*. Como resultado da *recuperação* formam-se planos reticulares chamados de fronteiras de subgrão. Essas fronteiras separam fragmentos de cristal conhecidos como subgrão. Lamelas de deformação é um estágio intermediário entre a extinção ondulante e a fronteira de subgrão. A tabela 3.2 mostra as evidências de deformação apresentadas pelo quartzo à medida que aumenta o grau de metamorfismo (PASSCHIER; TROUW, 1996).

Tabela 3.2 – Características deformacionais do quartzo (PASSCHIER; TROUW, 1996).

Grau metamórfico	Características
Muito baixo (<300 °C)	Faturas nos grãos; extinção ondulante.
Baixo (300-400 °C)	Extinção ondulante; lamelas de deformação.
Médio a alto (400-700 °C)	Cristais velhos fortemente achatados; abundante formação de subgrão e recristalização.
> (700-800 °C)	Rápida recristalização

Rochas são corpos sólidos naturais formados a partir de processos geológicos, constituídas por uma associação de minerais que foram unidos sob determinadas condições termodinâmicas. A estrutura de uma rocha é entendida como sendo o seu aspecto global externo apresentando, por exemplo, aspecto maciço, com cavidade ou não, orientado ou não etc. A textura de uma rocha é evidenciada pelo aspecto apresentado por seus cristais ou grãos, tais como tamanho, forma, direcionamento etc. De acordo com o seu modo de formação na

natureza, as rochas são classificadas em três grandes grupos: rochas ígneas, sedimentares e metamórficas (MADUREIRA *et al.*, 2000; FRASCÁ; SARTORI, 1998).

3.2 Deformação de corpos rochosos

A deformação de uma estrutura rochosa é ocasionada, geralmente, pela movimentação por meio de forças tectônicas, que são aquelas que agem na crosta provenientes do interior da Terra (endógenas). Essas deformações são representadas, principalmente, por dobras, zonas de cisalhamento, foliações, lineações, juntas e falhas (MAGALHÃES; CELLA, 1998).

Uma série de processos na magnitude dos grãos individuais é realizada acarretando a deformação das rochas. Esses processos intercrystalinos são dependentes tanto de fatores litológicos, tais como mineralogia, composição do fluido intergranular, tamanho dos grãos, permeabilidade; como de fatores externos tais como temperatura, pressão litostática etc (PASSCHIER; TROUW, 1996).

3.3 Zonas de falhas

Quando as rochas são submetidas à ação de esforços tectônicos são comumente deformadas exibindo aspecto de arco (dobras) ou ocorrendo a própria ruptura chamada de fratura. Quando a fratura é causada juntamente com movimento relativo entre os corpos rochosos essa fratura é conhecida como falha (CLARK JR, 1980). Assim, O termo falha, em geologia, refere-se a uma superfície de fratura, normalmente plana, na qual ocorreu um movimento relativo entre dois corpos rochosos. O deslocamento relativo entre dois pontos adjacentes antes da ocorrência da falha é chamando rejeito. A magnitude de uma falha pode variar de poucos centímetros até dimensões de vários quilômetros. As falhas estão associadas

a movimentos tectônicos deformacionais compressivos, distensivos e cisalhantes (MACHADO; SILVA, 1998).

As falhas correspondem a estruturas de um comportamento frágil, ou seja, os componentes mineralógicos dessas rochas são fragmentados e de tamanho muito variado. Os cataclasitos são um exemplo desse tipo de rocha. Loczy e Ladeira (1980) descrevem que as falhas são formadas a partir de fraturas e cisalhamentos que ocorrem entre os corpos rochosos acarretando deslocamentos entre si. Desta forma para acontecer a falha é necessário haver movimento diferencial entre os blocos de rochas paralelamente ao plano de falha.

A classificação das falhas segundo a orientação do movimento ao longo do plano de falha, ou seja, de acordo com a direção do rejeito pode ser de três tipos: rejeito perpendicular à falha (dip-slip fault); rejeito na direção da falha (strike-slip fault) e rejeito no sentido oblíquo (oblique-slip fault). A figura 3.1 ilustra as posições descritas.

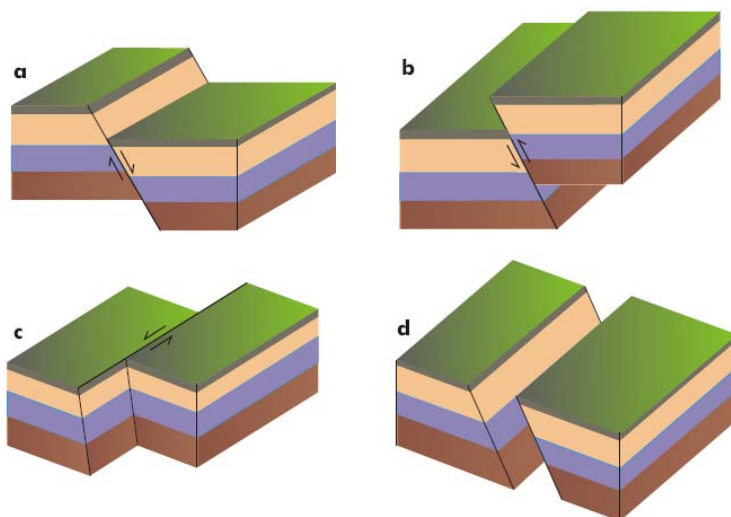


Figura 3.1 – Classificação das falhas de acordo com a direção do rejeito: a,b) perpendicular; c) direcional; d) oblíquo (MACHADO; SILVA, 1998).

As falhas baseadas no movimento relativo por meio de rejeito direcional (strike-slip fault) são descritas por Loczy e Ladeira (1980) como sendo falhas transcorrentes

apresentando movimento horizontal paralelo à direção do plano de falha resultantes de movimento de cisalhamento. Tais falhas transcorrentes podem ser sinistrais (de sentido esquerdo) ou dextrais (de sentido direito). Em uma estrutura apresentando grandes dimensões sob falhas, tem-se uma zona de falha.

As falhas são evidenciadas nos corpos rochosos através da observação de deslocamento de nível de referência estratigráfico ou por indicadores que infiram a ocorrência do atrito. A textura das rochas oriundas desse processo deformacional, geralmente apresenta minerais recristalizados e seus grãos exibem aspecto de cominuição natural (MACHADO; SILVA, 1998).

A principal estrutura rochosa em foco nesta dissertação envolve uma zona de falha caracterizada por cisalhamento transcorrente (strike-slip fault), denominada de Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE) onde os aspectos deformacionais e texturas serão apresentados no próximo item.

A geologia do estado de Pernambuco compreende maciços rochosos cristalinos do embasamento Pré-Cambriano, o qual é composto, predominantemente, por granitos, gnaisses sienitos, quartzitos, migmatitos, calcários cristalinos e filitos. Uma extensa área de rochas cristalinas predominantemente plutônicas corta vários estados nordestinos formando o Planalto da Borborema, o qual se apresenta sob falhas geológicas em alguns pontos devido a perturbações tectônicas (OLIVEIRA ANDRADE, 2003). Como comparação, os estados do Sul possuem grande parte de sua geologia caracterizada por rochas basálticas, que de acordo com Tiecher *et al.* (2006) apresentam expansões de RAA muito superiores que os agregados de rochas graníticas. As figuras 3.2 e 3.3 ilustram as diferentes litologias das regiões brasileiras e as principais zonas de falhas existentes no estado de Pernambuco, respectivamente.



Figura 3.2 – Diversas formações geológicas brasileiras (BRASIL, 2007)

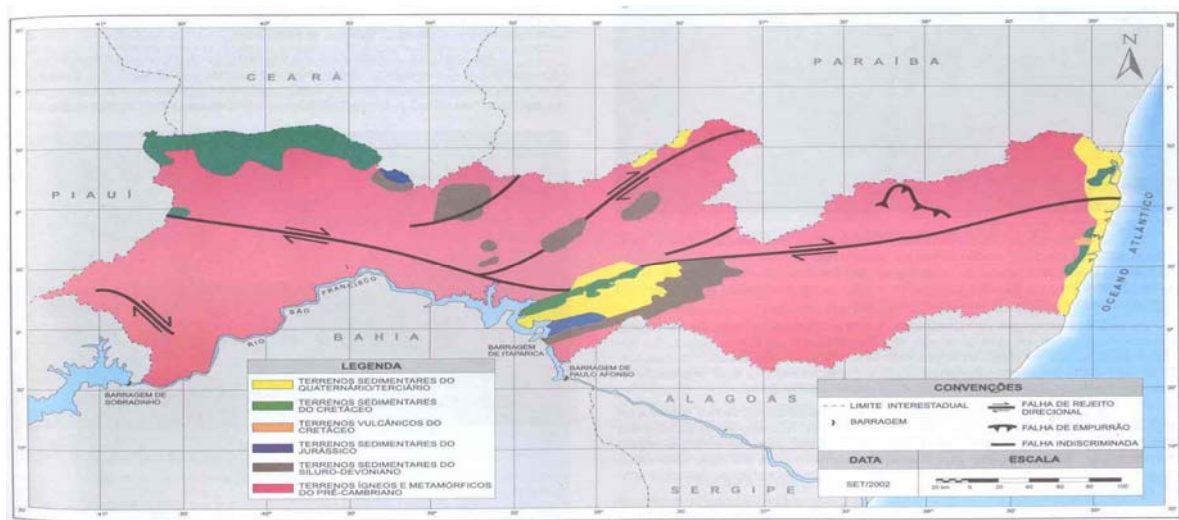


Figura 3.3 – Localização de zonas de falhas em Pernambuco (OLIVEIRA ANDRADE, 2003).

3.4 Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste - ZCPE

A Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE) é uma região de estruturas geológicas desenvolvidas por tectonismo gerando uma faixa de rochas caracterizada por deformação. Neste trabalho, das seis amostras coletadas, cinco estão localizadas nessa região.

A ZCPE tem sido estudada pelo grupo de Geociências da UFPE, que dentre os trabalhos realizados destaca-se o do professor Gorki Mariano que publicou Neves e Mariano (1999), o qual nos serviu de base para as descrições da ZCPE feitas neste item.

A geologia da área é composta, predominantemente, por granitóides de diversas composições ao longo do batólito Caruaru-Arcovede (BCA) e do batólito Jaboatão-Garanhuns (BJG), os quais ocupam a maior parte de sua porção noroeste e sudeste, respectivamente. A figura 3.4 mostra o mapa geral da referida área, onde os batólitos BCA e BJG estão em cor cinza claro e a ZCPE representa toda a extensão em cor preta entre eles.

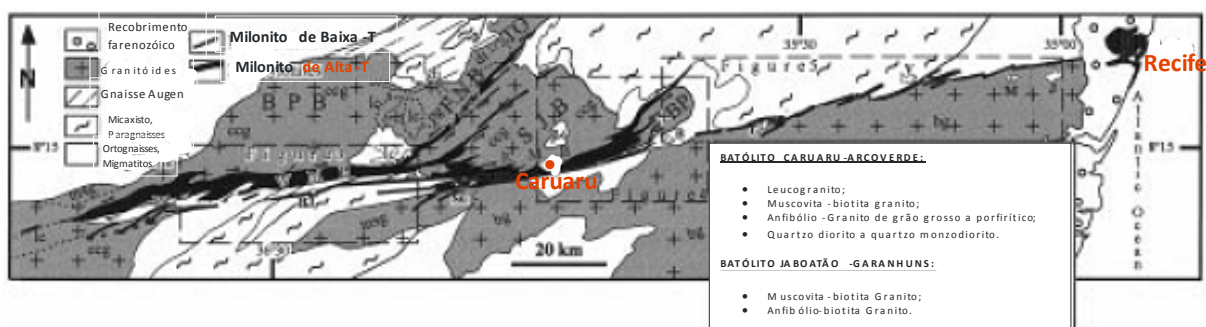


Figura 3.4 - Mapa geológico generalizado da ZCPE. (Adaptado de NEVES; MARIANO, 1999).

O batólito Caruaru-Arcoverde possui mais de 120 km de extensão. As litologias típicas presentes nesse batólito são anfibólio-biotita granitóides de granulação grossa a porfíritica, Plutons menores de leucogranito e muscovita-biotita granito intrudem as rochas. O batólito Jaboatão-Garanhuns tem mais de 130 km de extensão. Ele é composto predominantemente de plutons graníticos de grão médio a grosso.

A ZCPE é composta de duas faixas miloníticas de alta temperatura (Alta-T), uma a oeste e outra a leste, denominados de FMW e FME, respectivamente e várias faixas miloníticas de baixa temperatura (Baixa-T). Ambas as faixas (de Baixa-T e as de Alta-T) estão ilustradas na figura 3.4. Devido aos milonitos serem primariamente derivados de protólitos ígneos, a distinção entre Baixa-Temperatura e Alta-Temperatura é baseada na preservação (ou não) das fases minerais magmáticas e na microestrutura. A FMW atinge uma largura máxima de aproximadamente 5 km. A FME é mais estreita que a FMW, tendo um máximo de largura de aproximadamente 2 km. A FMW e a FME podem ser visualizadas separadamente nas figuras 3.5 e 3.6, respectivamente.

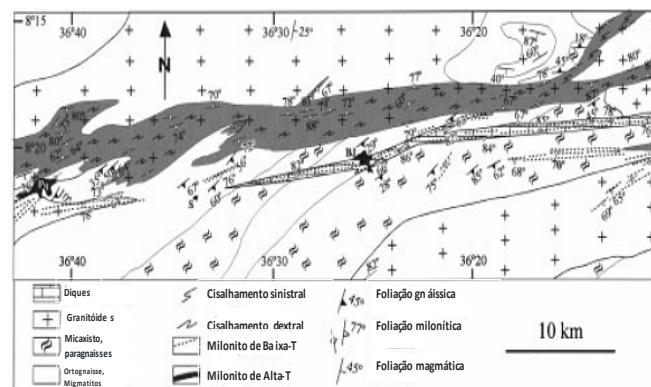


Figura 3.5 - Mapa geológico da ZCPE mostrando o FMW (Adaptado de NEVES; MARIANO, 1999).

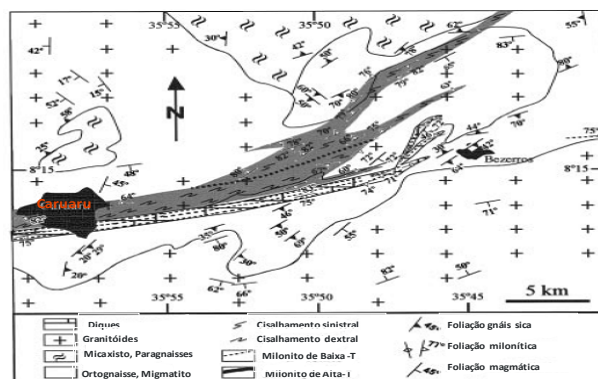


Figura 3.6 - Mapa geológico da ZCPE mostrando o FME (Adaptado de NEVES; MARIANO, 1999).

As faixas miloníticas de Baixa-T geralmente têm menos que 1 km largura com o lado mais oeste com poucas dezenas de metros de largura. A figura 3.7 mostra a geometria escalonada à direita das faixas miloníticas de Baixa-T.

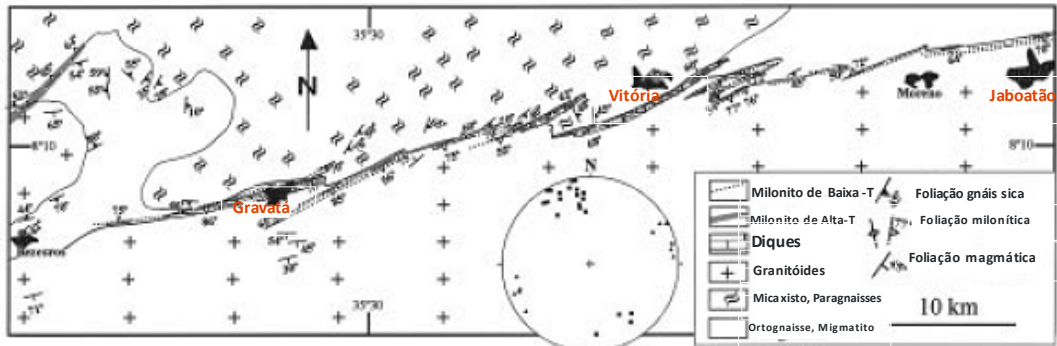


Figura 3.7 - Mapa geológico da ZCPE mostrando as faixas de Baixa-T (Adaptado de NEVES; MARIANO, 1999).

As amostras coletadas neste trabalho estão situadas na região próxima a faixa milonítica de Alta-T ao leste, ou seja, à FME, bem com na região das faixas miloníticas de Baixa-T, não sendo feita nenhuma coleta de amostra na região da FMW. A ZCPE é paralela à rodovia BR-232 em vários pontos, favorecendo, com isso, a localização de pedreiras nesta zona de cisalhamento tanto do ponto de vista econômico como também devido à abundância de corpos cristalinos.

CAPÍTULO IV - PROGRAMA EXPERIMENTAL

No programa experimental as amostras de rochas foram escolhidas de acordo com a localização das pedreiras próximas a zonas de falhas com o intuito de verificar a influência desta nas características deformacionais dos agregados das rochas e sua correlação com a reação álcali-agregado. Para isso, foram feitas coletas de rocha em 06 pedreiras situadas nessa região juntamente com as respectivas leituras de coordenadas GPS para posteriormente serem inseridos no mapa geológico de Pernambuco e com isso medir a distância do ponto de coleta até as zonas de falha. Adicionalmente, análises petrográficas e ensaio acelerado de expansão de barra de argamassa foram realizados com os agregados coletados. Observações microestruturais foram realizadas em superfície de fratura das barras de argamassas através de lupa binocular e de microscopia eletrônica de varredura (MEV) este acoplado a espectrometria de comprimento de onda dispersivo (WDS). A figura 4.1 mostra um fluxograma simplificado da seqüência realizada dos experimentos.

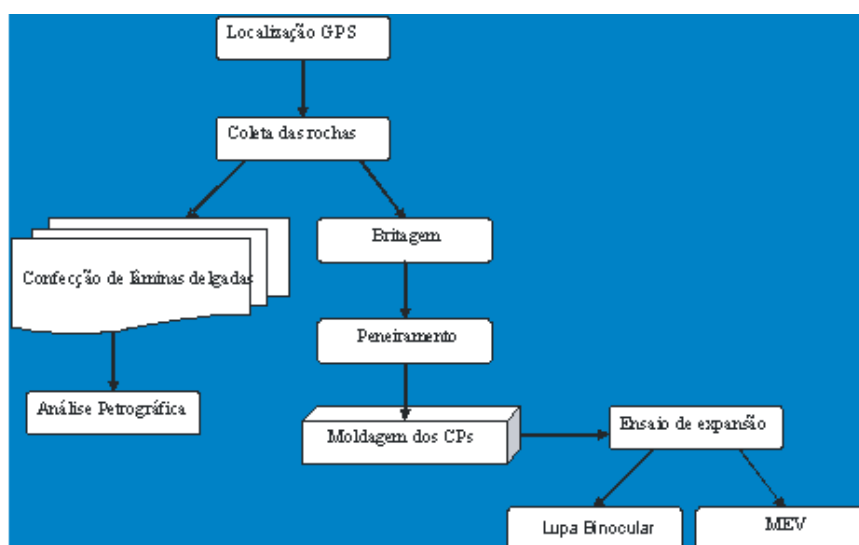


Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental.

4.1 Materiais

O cimento utilizado na pesquisa foi o Portland CP V-ARI RS, o qual de acordo com a empresa fabricante não possui material pozolânico em sua constituição. Esse tipo de cimento possui a característica de apresentar evolução mais rápida das reações de hidratação em comparação com os demais tipos de cimento disponíveis no mercado. A secagem rápida é bastante importante uma vez que o ensaio acelerado é facilitado pelo rápido endurecimento das barras de argamassa. A caracterização física/mecânica fornecida pela empresa fabricante está apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características físicas e mecânicas do cimento utilizado

Características	CPV ARI RS	Exigências NBR 5733/91
Massa específica (g/cm ³)	3,09	
Pega Início(min)	154	≥ 60
Pega Fim (min)	184	≤ 600
Consistência normal (%)	29,04	-
Finura Blaine (cm ² /g)	4.351	≥ 3000
Expansão à quente (mm)	0,66	≤ 5,00
Resistência a compressão 1dia (MPa)	19,40	≥14,00
Resistência a compressão 3dias (MPa)	29,04	≥24,00
Resistência a compressão 7dias (MPa)	34,82	≥34,00
Resíduo da peneira de #200 (%)	0,25	< 6,00
Resíduo da peneira de #325 (%)	1,51	

A composição química do cimento utilizado foi realizada no Laboratório de Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e está apresentada na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição química do cimento.

Constituinte (%)	CPV ARI RS
CaO	81,10
SiO ₂	8,74
Fe ₂ O ₃	5,72
Al ₂ O ₃	1,42
K ₂ O	1,14
MgO	0,47
TiO ₂	0,47
P ₂ O ₅	0,44
SrO	0,33
CuO	0,06
MnO	0,04
P.F	1,09
Na ₂ O _{eq.}	0,75

As amostras de rochas usadas como agregado graúdo utilizadas neste estudo foram extraídas de 06 pedreiras das seguintes localidades: município de Vitória (amostra 1), Caruaru (amostra 2), Gravatá (amostra 3), Ipojuca (amostra 4), Jaboatão (amostra 5) e São Caetano (amostra 6). Essas pedreiras situam-se nas proximidades de zonas de falhas, tais como na região da Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste. As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam a composição química e características físicas (massa específica e absorção), dos agregados estudados, respectivamente, onde a primeira foi determinada por espectrometria de fluorescência de Raios X, no Laboratório de Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Tabela 4.3: Composição química de amostras dos agregados.

Constituinte (%)	Amostra 1 Vitória	Amostra 2 Caruaru	Amostra 3 Gravatá	Amostra 4 Ipojuca	Amostra 5 Jaboatão	Amostra 6 São Caetano
SiO₂	52,80	45	52,85	62,44	62,89	65,82
Fe₂O₃	34,22	33,51	30,01	10,06	13,20	12,80
Al₂O₃	8,46	9,59	9,23	14,34	12,34	13,17
TiO₂	0,84	0,54	0,26	0,80	1,04	0,22
MnO	0,56	0,63	0,60	0,11	0,10	0,06
MgO	0,37	1,95	0,68	2,58	1,62	0,74
Na₂O	0,29	2,20	2,40	2,86	2,32	2,55
CaO	0,18	2,12	-	3,18	1,87	0,90
P₂O₅	0,13	0,22	0,12	0,17	0,15	0,08
K₂O	0,11	2,71	3,01	4,14	4,67	4,30
P.F.	1,49	0,73	0,52	0,79	0,51	0,44
Total	99,48	99,20	99,69	101,46	100,72	101,08
(Na₂O)_{eq}	0,36	3,98	4,38	5,58	5,39	5,38

Tabela 4.4: Caracterização física dos agregados.

NBR NM 53	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
M. E (g/cm ³)	2,71	2,65	2,65	2,73	2,75	2,65
Absorção (%)	0,60	1,00	0,70	0,80	0,88	0,70

A figura 4.2 mostra a localização dos pontos de coleta das amostras no mapa geológico do estado de Pernambuco (GOMES, 2001).

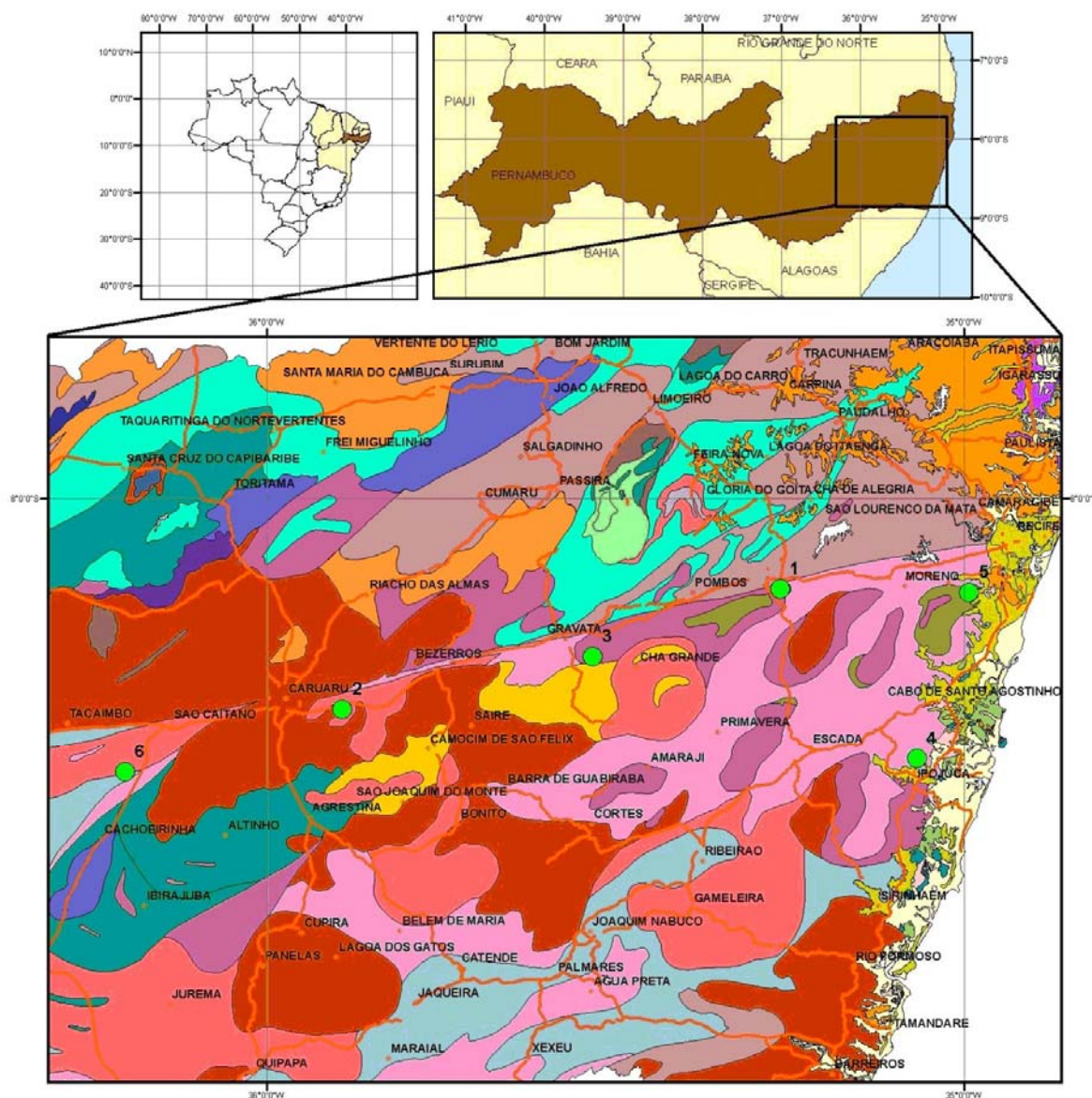


Figura 4.2 - Mapa geológico da região leste do estado de Pernambuco (GOMES, 2001). Mostrando a localização do ponto de coleta das amostras: amostra 1=município de Vitória; amostra 2=Caruaru; amostra 3=Gravatá; amostra 4=Ipojuca; amostra 5=Jaboatão e amostra 6=São Caetano.

4.2 Métodos

No momento da coleta foram realizadas as leituras das coordenadas GPS de cada amostra, para em seguida inseri-las no mapa e medir a distância entre o ponto de coleta da amostra e as zonas de falha imediatamente próxima.

4.2.1 Análise petrográfica

De acordo com a norma da ASTM C 295, as análises petrográficas das rochas avaliadas foram realizadas no Laboratório de Petrologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) utilizando microscópio óptico polarizador marca OLIMPUS BX 41. As análises foram conduzidas pelo geólogo Gorki Mariano e acompanhadas pelo autor deste trabalho. A análise petrográfica consiste em identificar, através de microscopia óptica em lâminas delgadas de aproximadamente 30 µm de espessura, a composição mineralógica e a textura da rocha em análise, bem como as características intrínsecas dos minerais constituintes.

4.2.2 Método acelerado de barras de argamassa

Este ensaio é descrito pela norma ASTM C 1260 sendo baseado em uma metodologia sul africana desenvolvida por Oberholster e Davies (1986). Tal ensaio permite avaliar, de forma rápida, a reatividade à reação álcali-agregado.

Não existe um único método eficaz de avaliação de reatividade de agregados, geralmente são realizadas várias técnicas em conjunto. Este método é um complemento da análise petrográfica, ou seja, além das observações mineralógicas que indiquem reatividade da rocha aos álcalis do cimento, deve ser realizado ensaio laboratorial para verificar a expansão causada e assim tentar diagnosticar a reatividade. De acordo com Fournier *et al.* (2006) o método acelerado ASTM C 1260 é reconhecido como um bom teste classificatório para se avaliar a reatividade potencial de agregados. Entretanto, o ensaio torna-se severo, induzindo excessiva expansão em determinados agregados e uma redução da expansão em agregados reconhecidamente reativos, não apresentando correlação com o método de prisma de concreto

que simula as melhores condições na natureza (estruturas de campo). Para os autores supracitados, pesquisas adicionais das características físicas e mineralógicas dos agregados devem ser realizadas para avaliar melhor as expansões excessivas do ensaio acelerado ASTM C 1260. Shon *et al.* (2002) comentam que esse ensaio é uma técnica freqüentemente adotada para avaliação da reatividade de agregados devido a sua rapidez nas respostas, que podem ser obtidas em 16 dias ou estendendo até 30 dias, todavia o teste recebe algumas críticas com relação a suas severas condições de cura, cujo resultado pode não ser coerente com as condições reais. Por fim, Tiecher e Dal Molin (2006) aconselham o prolongamento das medições das expansões das barras de argamassa do ensaio acelerado da ASTM C 1260 até pelo menos 28 dias, pois alguns agregados apresentam reação álcali-silicato que é mais lenta, como por exemplo os granitos. O ensaio acelerado das barras de argamassa foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). As barras de argamassa foram moldadas em fôrmas prismáticas de dimensões (25x25x285)mm. Confeccionaram-se três barras para cada uma das seis amostras de agregado analisadas. A variação do comprimento dos corpos-de-prova foi calculada de acordo com a equação abaixo:

$$E = \frac{L_1 - L_o}{L_n} \times 100$$

onde:

E = Expansão longitudinal, em mm/m;

L_n = Comprimento nominal da barra, m;

L_1 = Leitura da barra na idade do ensaio, em mm;

L_o = Leitura inicial da barra após 24 horas de imersão em água, em mm.

Com o resultado em mm/m, para obtê-lo em percentual (%), faz-se uma regra-de-três simples. De acordo com a norma, o traço das argamassas foi de 1:2,25 (cimento:agregado), em massa, e a relação água/cimento 0,47, bem como as frações granulométricas descritas na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Frações granulométricas para o ensaio de reatividade ASTM C 1260/01.

Abertura das peneiras (mm)	Material retido (%)	Massa do agregado (g)
4,8 – 2,4	10	90
2,4 – 1,2	25	225
1,2 – 0,6	25	225
0,6 – 0,3	25	225
0,3 – 0,15	15	135

Com a relação água/cimento igual para todas as amostras, a moldagem foi feita com as seguintes quantidades: 206,8 g de água destilada; 440 gramas de cimento e 900 gramas de agregado. Inicialmente, os agregados foram cominuídos de modo a atingirem a faixa granulométrica apresentada na tabela 4.5 durante o peneiramento.

Em seguida as frações foram lavadas e colocadas em estufa para secagem. Depois de secas foram guardadas em sacos plásticas devidamente identificadas. Os agregados foram pesados, de acordo com os percentuais estabelecidos na tabela 4.5, e misturados em argamassadeira para moldagem juntamente com os demais materiais (cimento e água). A moldagem foi realizada baseando-se no procedimento estabelecido pela norma NBR 13276. Após a moldagem, as barras foram acondicionadas em câmara úmida por um período de 24 horas. Depois desse período foram desmoldadas, identificadas e foi feita a primeira leitura em relógio comparador. Após a primeira leitura os corpos-de-prova foram acondicionados em um recipiente contendo água destilada e inseridos numa estufa a uma temperatura de 80 °C durante período de 24 horas. Após o período de 24 horas, os corpos-de-prova foram retirados

da estufa e foi realizada a leitura inicial (L_0). Finalmente, os corpos-de-prova foram imersos num recipiente contendo agora não mais água destilada e sim uma solução de NaOH 1N e inseridos novamente na estufa também a 80 °C.

As leituras das barras foram realizadas de forma mais rápida possível (aproximadamente 2 minutos para cada barra) para evitar resfriamento das mesmas devido diminuição da temperatura em contato com o ambiente, no entanto vale ressaltar que a norma ASTM C 1260 estabelece um período de tempo de leitura de 15 ± 5 segundos.

A figura 4.3 mostra a aparelhagem utilizada no ensaio iniciando com o preparo da argamassa, a moldagem, as barras desmoldadas, a imersão em solução alcalina, a estufa e finalmente o equipamento de leitura das expansões.

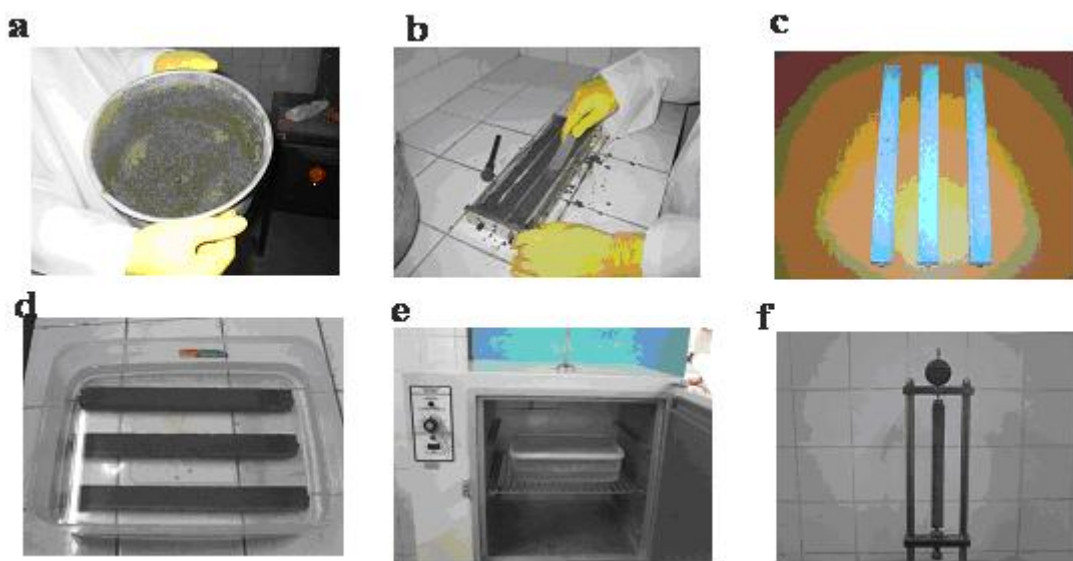


Figura 4.3 – Sequência experimental: a) argamassa; b) moldagem; c) barras de argamassa desmoldadas; d) imersão em solução de NaOH 1M; e) acondicionamento em estufa (80 °C) e f) leitura de expansão em relógio digital.

4.2.3 Observações microscópicas

As observações microscópicas realizadas neste estudo foram feitas através de microscopia eletrônica de varredura. Anteriormente às observações por MEV, análises visuais por lupa estereoscópica foram conduzidas para verificar o aspecto superficial dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de expansão. Segundo Pires Sobrinho *et al.* (2006) a microscopia eletrônica de varredura é uma ferramenta útil para análise da topografia de superfícies de amostras fraturadas, uma vez que possibilita observar a morfologia e a textura dos produtos formados no interior do concreto, interface pasta-agregado, presença de poros, etc.

Para a preparação das amostras foi fragmentado um corpo-de-prova de cada agregado em estudo submetido ao ensaio acelerado de expansão após os 30 dias de idade em regiões previamente escolhidas sob suspeita de maior probabilidade de ocorrência do gel. Em seguida, as amostras fraturadas foram acondicionadas em dessecador para não adquirirem umidade do ambiente. As observações microestruturais de MEV foram realizadas juntamente com análise química qualitativa através de espectrometria de comprimento de onda dispersivo (WDS). As análises foram realizadas no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco.

CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão explicitados os dados de GPS do ponto de coleta de cada amostra e a distância do ponto até a zona de falha com o intuito de correlacionar a distância com a reatividade do agregado. Para isso, também serão apresentados os resultados das análises petrográficas das rochas e os resultados dos ensaios de expansão linear das barras de argamassa confeccionadas com as referidas rochas. As discussões e observações pertinentes serão descritas sobre cada ensaio e análises realizados. Tentando-se inferir a reatividade das rochas, associando suas características de deformação, mineralogia e feições texturais com as respectivas expansões lineares das barras.

O estudo da rocha realizado através da análise petrográfica macro e microscopicamente faz uma descrição de suas características, tais como tipo de rocha, textura, granulação, composição mineralógica, etc. O ensaio acelerado de barras de argamassa classifica o agregado de acordo com sua expansão linear. Uma vez verificada, através da análise petrográfica, a presença de minerais e/ou fases potencialmente reativos à reação álcali-agregado, e esta reatividade for comprovada através dos ensaios de expansão, dentro dos limites estabelecidos pela norma ASTM C-1260, o agregado em questão é classificado como reativo, caso contrário pode ser considerado inócuo ou potencialmente reativo. Os limites de expansão segundo a norma supracitada são os seguintes:

- expansões menores que 0,1% aos 16 dias indicam um comportamento **inócuo**.
- expansões superiores a 0,2% aos 16 dias indicam comportamento **potencialmente reativo**.
- expansões situadas entre 0,1 e 0,2% aos 16 dias indicam possibilidade do agregado possuir comportamento **tanto inócuo como reativo**.

Conforme comentado anteriormente, as leituras do ensaio acelerado foram realizadas no período de 2 minutos para cada barra ao invés de 15 segundos. Posteriormente, ensaio realizado em uma amostra (amostra 4-Ipojuca) comparando os dois tempos de expansão (2 minutos e 15 segundos) mostrou que em 15 segundos a expansão é maior em 0,02%, ou seja, teoricamente os valores de expansão das amostras apresentados neste trabalho possuem uma defasagem de 0,02% devido as leituras terem sido feitas em 2 minutos. Apesar deste fato, decidiu-se fazer as análises dos resultados normalmente com os resultados do tempo de 2 minutos acrescidas de comentários que possam ser pertinentes em valores intermediários caso venham mudar as referidas análises considerando um fator de correção de 0,02%.

Para efeito de comparação, a Norma Brasileira NBR 15577 apresenta os seguintes valores para classificação da reatividade de agregados:

- expansões menores que 0,19% aos 30 dias indicam um comportamento **potencialmente inócuo**.
- expansões iguais ou superiores a 0,19% aos 30 dias indicam um comportamento **potencialmente reativo**.

5.1 Leituras de coordenadas GPS

Tabela 5.1 - Leituras por coordenadas GPS

Amostra	Localidade	Leitura GPS	
01	Vitória	25 L : 0250582	UTM: 9100726
02	Caruaru	25 L : 0181480	UTM: 9081230
03	Gravatá	25 L : 0220977	UTM: 9089818
04	Ipojuca	25 L : 0272334	UTM: 9073844
05	Jaboatão	25 L : 0280482	UTM: 9100378
06	São Caetano	24 L : 0808052	UTM: 9071198

De posse das coordenadas GPS realizou-se a localização dos pontos no mapa geológico de Pernambuco e mediu-se a menor distância do ponto de coleta até as zonas de falhas. Das seis amostras, cinco amostras situam-se próximas à zona de cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE), a qual é paralela, em vários pontos à rodovia BR 232. A outra, que é a amostra 4-Ipojuca, situa-se entre duas zonas de falhas, das quais ainda não se dispõe de informações detalhadas. Portanto, os dados obtidos foram os seguintes: o local de coleta do município de Vitória situa-se a uma distância de 750 m ao sul do ponto-médio da ZCPE onde a referida zona possui largura de 1 km; o local de coleta do município de Caruaru situa-se a uma distância de 3 km ao sul do ponto-médio da ZCPE; o local de coleta do município de Gravatá situa-se a uma distância de 5km ao sul do ponto-médio da ZCPE; o local de coleta do município de São Caetano situa-se a uma distância de 4 km ao sul do ponto médio da ZCPE. O local de coleta do município de Jaboatão situa-se a uma distância de 5 km ao sul da ZCPE. Conforme comentado, a única que não se situa próxima a ZCPE é a amostra 4-Ipojuca, mas está localizada a 500 metros ao sul de uma zona de falha e 1,5 km ao oeste de outra zona de falha. Tais zonas de falhas não foram ainda caracterizadas geologicamente. Essas características estão apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características da ZCPE no ponto de coleta.

Localidade	Distância (km)	Característica da ZCPE no ponto
Vitória	0,75	Possui faixa milonítica de alta-T de um máximo de 2 km de largura e algumas faixas miloníticas de baixa-T de aprox. 1km de largura.
Caruaru	3	Possui uma faixa milonítica de alta-T de um máximo de 5 km, bem como faixas miloníticas de baixa-T de aproximadamente 1 km de largura.
Gravatá	5	Possui faixa milonítica de alta-T de um máximo de 2 km de largura e algumas faixas miloníticas de baixa-T de aprox. 1km de largura.
Jaboatão	5	Possui faixa milonítica de alta-T de um máximo de 2 km de largura e algumas faixas miloníticas de baixa-T de aprox. 1km de largura.
São Caetano	4	Possui uma faixa milonítica de alta-T de um máximo de 5 km, bem como faixas miloníticas de baixa-T de aproximadamente 1 km de largura.

A figura 5.1 apresenta um croqui indicando as distâncias dos pontos de obtenção das amostras à referida zona de falha.

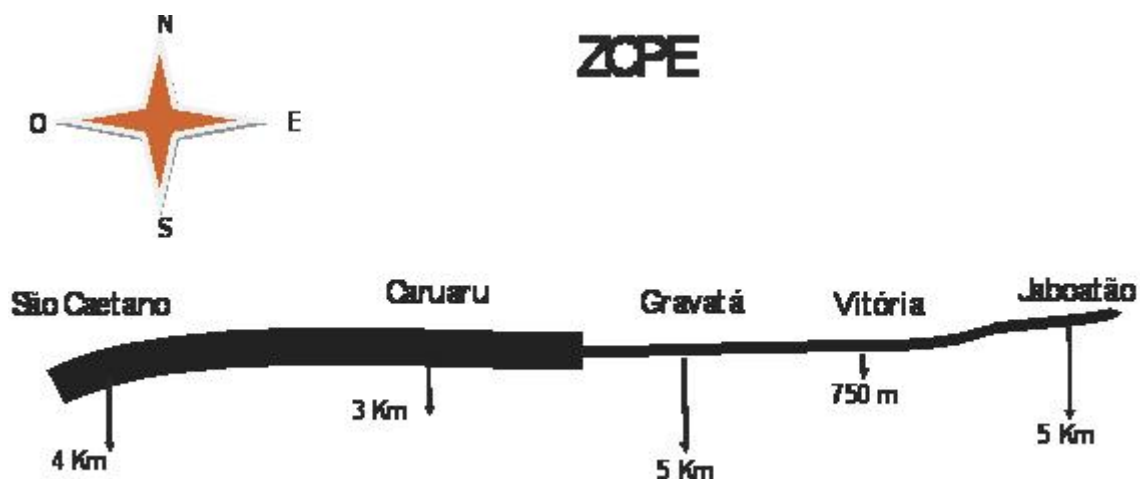


Figura 5.1 – Croqui demonstrativo das distâncias do ponto de coleta a zona de falha.

A figura 5.2 mostra uma boa correlação entre a distância entre o ponto de coleta e a Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste. Esse fato evidencia que rochas coletadas mais próximas de zonas de falhas, no caso, da ZCPE, são mais passíveis de desenvolverem maiores expansões. A amostra 4-Ipojuca não foi adicionada no gráfico, uma vez que não pertence a região da ZCPE.

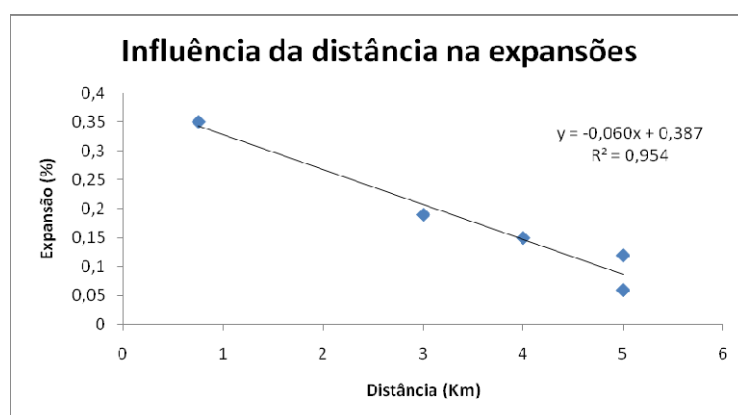


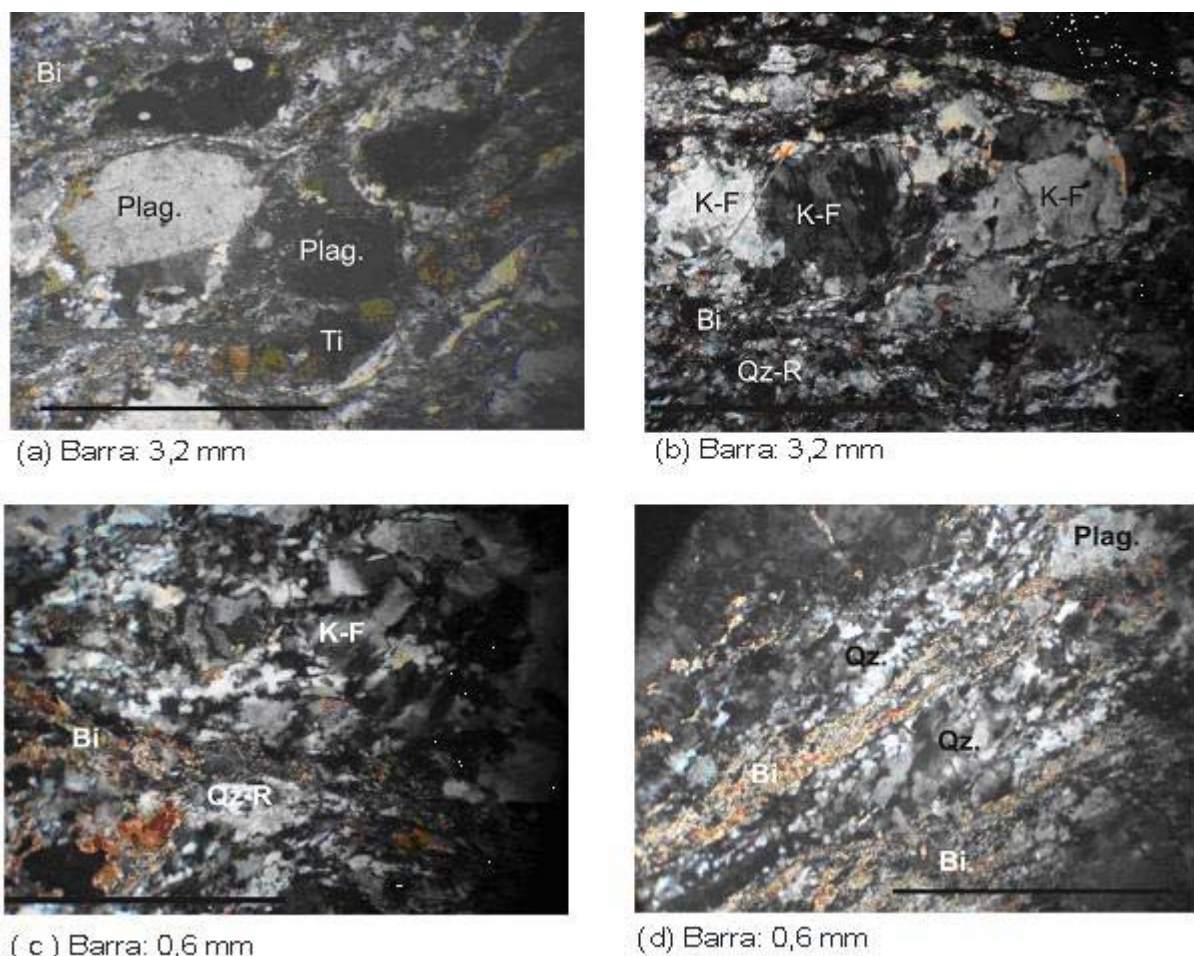
Figura 5.2 - Correlação linear da distância entre o ponto de coleta e a ZCPE.

5.2 Resultados por amostra

5.2.1 Amostra 1- Vitória

Análise petrográfica:

A amostra em questão é uma rocha metamórfica denominada gnaiss-diorítico, apresentando coloração cinza, granulação fina e estrutura milonítica. A amostra é rica em minerais máficos (biotita e anfibólio). As análises microscópicas da rocha evidenciaram composição mineralógica constituída da seguinte forma: 20% de quartzo dos quais 85% estão recrystalizados (sob a forma de quartzo microcristalino) e o restante apresentando quartzo fitado e com desenvolvimento de subgrão; 25% de plagioclásio; 20% de K-feldspato; 20% de biotita; 11% de anfibólio e 3% de titanita. Os cristais de plagioclásio exibem-se como porfiroclastos subedrais circundados por biotita e titanita (figura 5.3a) exibindo pouca sericitização. A ocorrência de K-feldspato (microclina) se mostra como porfiroclastos anedrais circundados por quartzo e biotita (Figura 5.3b), epidoto e anfibólio. Pertitas em filme são observadas apresentando intensidade de aproximadamente 30% dos cristais de K-feldspato. A presença de quartzo estirado e recrystalizado juntamente com biotita esgarçada pode ser observada na figura 5.3c. O tamanho médio dos grãos de quartzo está abaixo de 0,1 mm. A matriz da rocha apresenta-se bandada com alternância de bandas compostas essencialmente por biotita, biotita cloritizada e anfibólio (hornblenda), com bandas ricas em quartzo e feldspato (plagioclásio) conforme está ilustrada na figura 5.3d



Amostra 1- Vitória

Figura 5.3 – Petrografia da amostra 1-Vitória: (a) Plagioclásios subedrais circundados por biotita, quartzo, e titanita; (b) Megacrystal de K-feldspato circundado por quartzo recristalizado e biotita. K-F=K-feldspato; Bi=biotita; (c) Quartzo recristalizado e biotita esgarçada; (d) Matriz da rocha: alternância de bandas com biotita e quartzo estirado (fitado). Plag=plagioclásio; Ti=titanita; Qz=quartzo; K-F=K-feldspato; Bi=biotita; Qz-R=quartzo recristalizado

A norma brasileira NBR 15577 que versa sobre a reação álcali-agregado descreve em sua parte 3, referente à análise petrográfica de agregados, o critério de classificação de agregados como sendo associado com a presença de quartzo deformado de forma genérica, isto é, não especificando o estado de deformação do quartzo.

Na tabela 5.3 estão apresentadas as observações petrográficas realizadas na amostra 1-Vitória.

Tabela 5.3 – Características petrográficas da amostra 1-Vitória.

Amostra 1-Vitória:	
Minerais principais	Quartzo (20%); K-feldspato (20%); Plagioclásio (25%);
Minerais subordinados	Biotita(20%); Anfibólio(11%); Titanita (3%); epidoto(1%)
Mineral deletério	Quartzo deformado: fitado, recristalizado (ou microcristalino); formação de subgrão e extinção ondulante.
Tipo de agregado	Pedra britada
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente
Cor	Cinza
Estrutura	Foliação milonítica
Granulação	Fina
Estado de alteração	Sã
Porcentagem de quartzo microcristalino	17%
Textura mirmequítica	Ausente
Textura perítica	Presente em 30% do K-feldspato
Tipo de rocha	Metamórfica
Classificação	Gnaiss diorítico
Reatividade potencial (*)	Potencialmente reativa
Reatividade potencial (NBR 15577)	Potencialmente reativa

(*) critério: percentual de quartzo recristalizado acima de 5%, a amostra é classificada como potencialmente reativa. Do contrário é potencialmente inócua.

A partir das características observadas e resumidas na tabela 5.3, a amostra apresenta feições de deformação tectônica caracterizadas pela presença de quartzo fitado, quartzo com intensa recristalização (quartzo microcristalino), bem como quartzo com desenvolvimento de subgrão. Esses aspectos microestruturais do quartzo são responsáveis, de acordo com a literatura, pelo desencadeamento da reação álcali-silicato. Dessa forma, pode-se concluir que tal amostra é classificada, petrograficamente, como potencialmente reativa.

Ensaio de expansão:

Tabela 5.4 – Expansão linear: amostra 1 – Vitória.

VARIAÇÃO DIMENSIONAL						Resultados individuais de expansão (mm/m)			DRM da expansão	
Idade (dias)	leituras			Média					Máximo	Mínimo
	1	2	3	%	mm/m	1	2	3		
2	-0,537	0,773	-0,636	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-0,501	0,816	-0,599	0,02	0,15	0,14	0,17	0,15	0,02	0,01
5	-0,378	0,933	-0,491	0,06	0,61	0,63	0,63	0,57	0,02	0,04
7	-0,301	1,000	-0,42	0,09	0,89	0,93	0,90	0,85	0,04	0,04
9	-0,239	1,081	-0,347	0,12	1,18	1,18	1,22	1,14	0,04	0,04
12	-0,019	1,310	-0,15	0,20	2,03	2,05	2,12	1,92	0,09	0,11
14	0,055	1,370	-0,102	0,23	2,27	2,34	2,36	2,11	0,09	0,16
16	0,100	1,43	-0,06	0,25	2,46	2,52	2,60	2,28	0,13	0,19
19	0,177	1,498	0,031	0,28	2,77	2,82	2,87	2,64	0,09	0,14
21	0,234	1,554	0,085	0,30	2,99	3,05	3,09	2,85	0,09	0,14
23	0,254	1,561	0,115	0,31	3,07	3,13	3,11	2,97	0,06	0,10
26	0,303	1,566	0,164	0,32	3,21	3,32	3,13	3,16	0,11	0,07
28	0,351	1,603	0,194	0,34	3,36	3,51	3,28	3,28	0,15	0,08
30	0,388	1,611	0,228	0,35	3,46	3,66	3,31	3,42	0,19	0,15

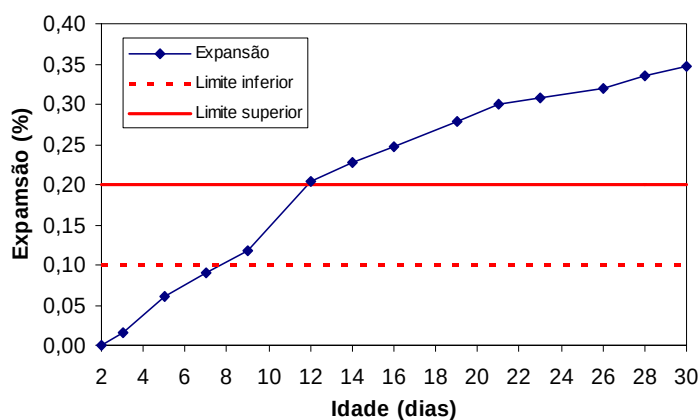


Figura 5.4 – Gráfico de expansão da amostra 01 - Vitória.

A partir da tabela 5.4 juntamente com a figura 5.4 pode-se observar que o agregado apresentou expansão linear de 0,25% já aos 16 dias, superior ao limite estabelecido pela norma ASTM C 1260. Com a continuidade das leituras para 30 dias o valor da expansão aumentou para 0,35% o que representa uma taxa de aumento de 40% entre as idades 16 e 30 dias. Conforme descrito anteriormente, o ensaio laboratorial de expansão linear serve para

confirmar ou não os resultados observados na análise petrográfica. Assim, esta amostra mostrou na petrografia a evidência de potencialidade de reatividade a reação álcali-agregado e que estão sendo confirmadas aqui no resultado de expansão.

5.2.2 Amostra 2 - Caruaru

Análise petrográfica:

As observações evidenciaram uma rocha metamórfica denominada de ortogneisse, de orientação bem definida com granulação fina. A rocha apresenta-se muito coerente e de coloração creme. Sua estrutura foliada marcada devido ao metamorfismo dinâmico de cisalhamento. A análise microscópica forneceu sua composição mineralógica como sendo de 25% de quartzo deformado, recristalizado e apresentando desenvolvimento de subgrão; 50% de K-feldspato; 10% de plagioclásio; 13% de biotita e pouca muscovita. Do percentual de quartzo total, 30% estão recristalizados, 30% exibem extinção ondulante e 40% apresentam formação de subgrão. Os grãos de quartzo exibem tamanhos variando de 0,5-1,0 mm. A rocha apresenta-se com textura milonítica definida por megacristais (porfiroclastos) de K-feldspato com inclusões de plagioclásio e circundados por cristais de quartzo estirado associados a biotita e muscovita (figuras 5.5a e 5.5b). Todos os porfiroclastos de plagioclásio exibem bordas corroídas e sericitização cuja intensidade por área dos grãos é de aproximadamente 70% (figura 5.5b). A figura 5.5c ilustra o quartzo com formação de subgrão. Também foi observada a presença de mirmequita (intercrescimento de quartzo e plagioclásio).

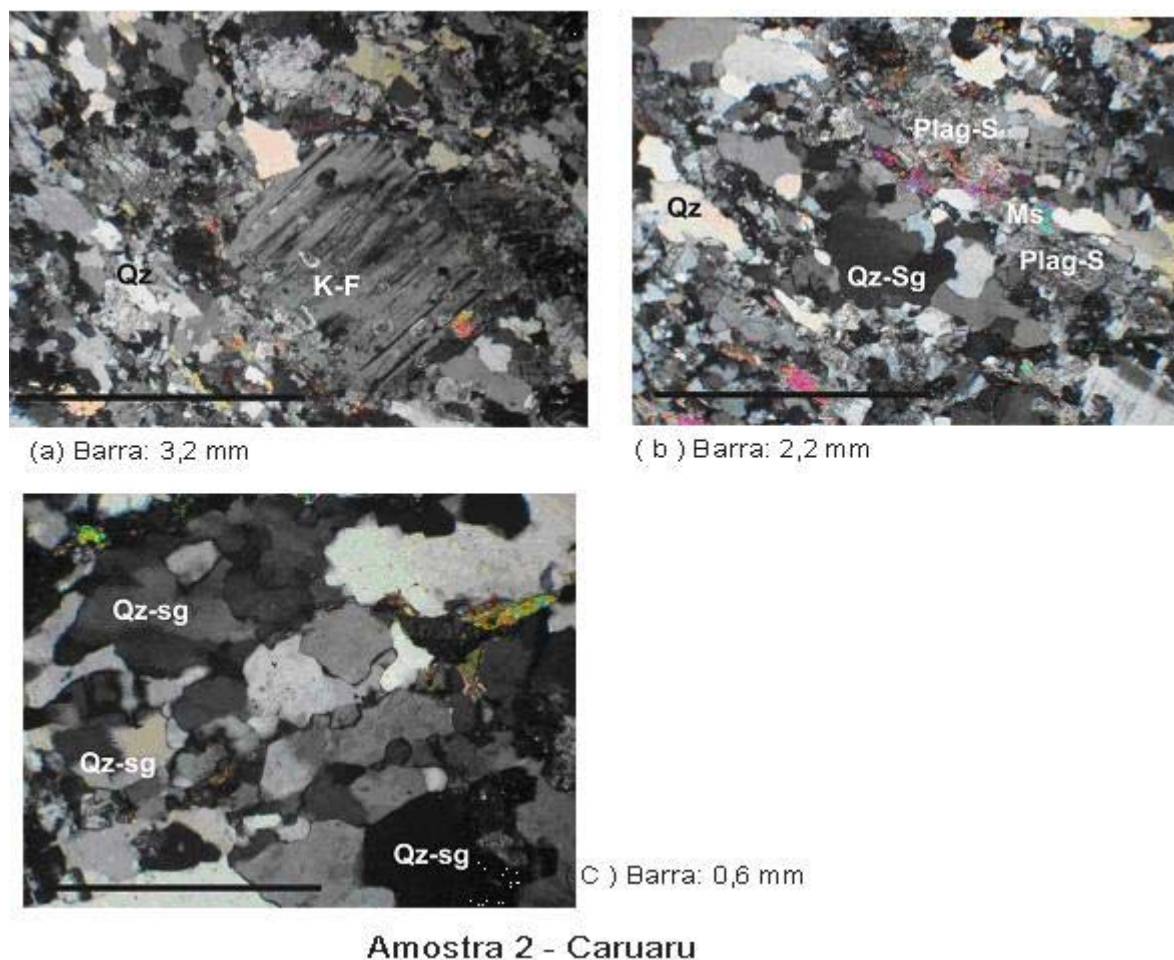


Figura 5.5 – Petrografia da amostra 2-Caruaru: (a) Porfiroclastos de K-feldspato com inclusões de plagioclásios circundados por quartzo estirado; (b) Aspecto geral da rocha com quartzo formando subgrão e plagioclásio sericitizado; (c) Detalhe de cristais de quartzo com formação de subgrão. K-F=K-feldspato; Qz= quartzo; Qz-Sg=quartzo formando subgrão; Plag-S=plagioclásio sericitizado; Ms=muscovita

Esta amostra apresentou como principais fases minerais reativas o quartzo recrystalizado, bem como a presença de quartzo com desenvolvimento de subgrão que são responsáveis pelo aumento da reatividade aos álcalis. A amostra apresenta feições característica de deformação exibindo foliação milonítica. Vale salientar que esta amostra possui menor quantidade de quartzo recrystalizado que a amostra 1 – Vitória. Assim, de acordo com os minerais e feições de deformação observadas, esta amostra pode ser

classificada, petrograficamente, como potencialmente reativa a reação álcali-silicato. Na tabela 5.5 estão apresentadas as observações petrográficas realizadas na amostra 2-Caruaru.

Tabela 5.5 – Características petrográficas da amostra 2-Caruaru.

Amostra 2 – Caruaru:	
Minerais principais	Quartzo (25%); K-feldspato (50%); Plagioclásio (10%);
Minerais subordinados	Biotita(13%); Muscovita(2%)
Mineral deletério	Quartzo deformado: recristalizado, com formação de subgrão e extinção ondulante.
Tipo de agregado	Pedra britada
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente
Cor	Creme
Estrutura	Foliação milonítica
Granulação	Mediã a grossa
Estado de alteração	Sã
Porcentagem de quartzo microcristalino	7.5%
Textura mirmequítica	Presente em 2,5% do total da rocha
Textura pertítica	Ausente
Tipo de rocha	Metamórfica
Classificação	Ortognaisse
Reatividade potencial	Potencialmente reativa
Reatividade potencial (NBR 15577)	Potencialmente reativa

Ensaio de expansão:

Tabela 5.6 – Expansão linear: amostra 2 – Caruaru

VARIAÇÃO DIMENSIONAL						Resultados individuais de expansão (mm/m)			DRM da expansão	
Idade (dias)	Leituras			Média					Máximo	Mínimo
	1	2	3	%	Mm/m	1	2	3		
2	0,227	0,115	0,188	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,234	0,121	0,201	0,00	0,03	0,03	0,02	0,05	0,02	0,01
5	0,239	0,123	0,195	0,00	0,04	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01
7	0,24	0,123	0,195	0,00	0,04	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01
11	0,344	0,225	0,294	0,04	0,44	0,46	0,43	0,42	0,02	0,02
13	0,419	0,295	0,349	0,07	0,70	0,76	0,71	0,63	0,06	0,07
16	0,504	0,385	0,454	0,11	1,07	1,09	1,06	1,05	0,02	0,02
21	0,608	0,49	0,565	0,15	1,49	1,50	1,48	1,48	0,01	0,01
24	0,637	0,524	0,592	0,16	1,60	1,61	1,61	1,59	0,01	0,01
27	0,685	0,574	0,645	0,18	1,80	1,80	1,81	1,80	0,00	0,00
30	0,704	0,586	0,659	0,19	1,86	1,88	1,85	1,85	0,02	0,01

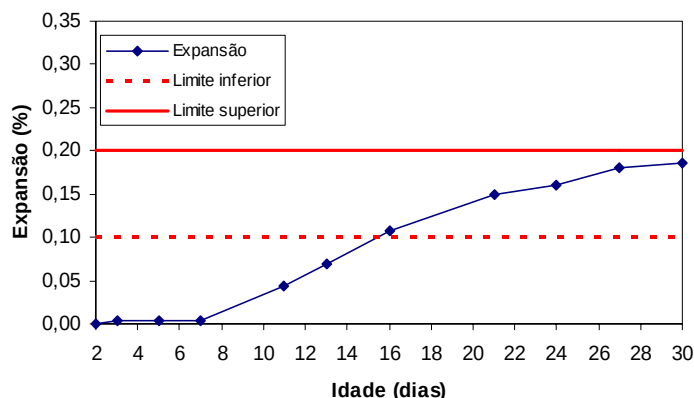


Figura 5.6 – Gráfico de expansão da amostra 02-Caruaru.

A tabela 5.6 apresenta resultados de expansão linear de 0,11% aos 16 dias. Esse valor está na faixa de comportamento potencialmente reativo. Como a continuidade das leituras para 30 dias o valor da expansão aumentou para 0,19%, o qual ainda permaneceu no patamar de potencialmente reativo, todavia 0,19% está no limite da fronteira para comportamento reativo que é de 0,20%. Adicionalmente, pode-se observar que a taxa de aumento foi de 72% entre as idades 16 a 30, mostrando um rápido progresso de expansão. Finalmente, esta amostra mostrou na petrografia evidência de potencialidade de reatividade que também foi comprovada pelo resultado de expansão. O gráfico da figura 5.6 ilustra a expansão aos 30 dias.

5.2.3 Amostra 3- Gravatá

Análise petrográfica:

A amostra classifica-se como uma rocha ígnea denominada de sienogranito. Apresenta-se como rocha muito coerente de coloração creme, textura de granulação grossa e estrutura maciça com leve orientação das micas (biotitas). Sua composição mineralógica encerra aproximadamente 25% de quartzo em cristais anedrais, 45% de K-feldspato em

cristais subedrais a anedrais, 25% de plagioclásio subedrais e 5 % de biotita que ocorre como palhetas subédricas a anédricas localmente cloritizadas. O quartzo exibe a forma de cristais anedrais de tamanho médio igual a 1,5 mm e apresentando apenas extinção ondulante, ou seja, não foi observado quartzo recristalizado nem com formação de subgrão (Figura 5.7a). Observam-se também plagioclásios sob a forma de cristais subedrais a anedrais com geminação carlsbad e albita com alguns cristais apresentando bordas corroídas totalmente sericitizadas (figura 5.7b). A observação da lâmina petrográfica também mostrou o desenvolvimento de mirmequita na borda do plagioclásio (figuras 5.7c e 5.7d). Finalmente, foi observado que metade dos cristais de K-feldspato apresenta pertitas em filme.

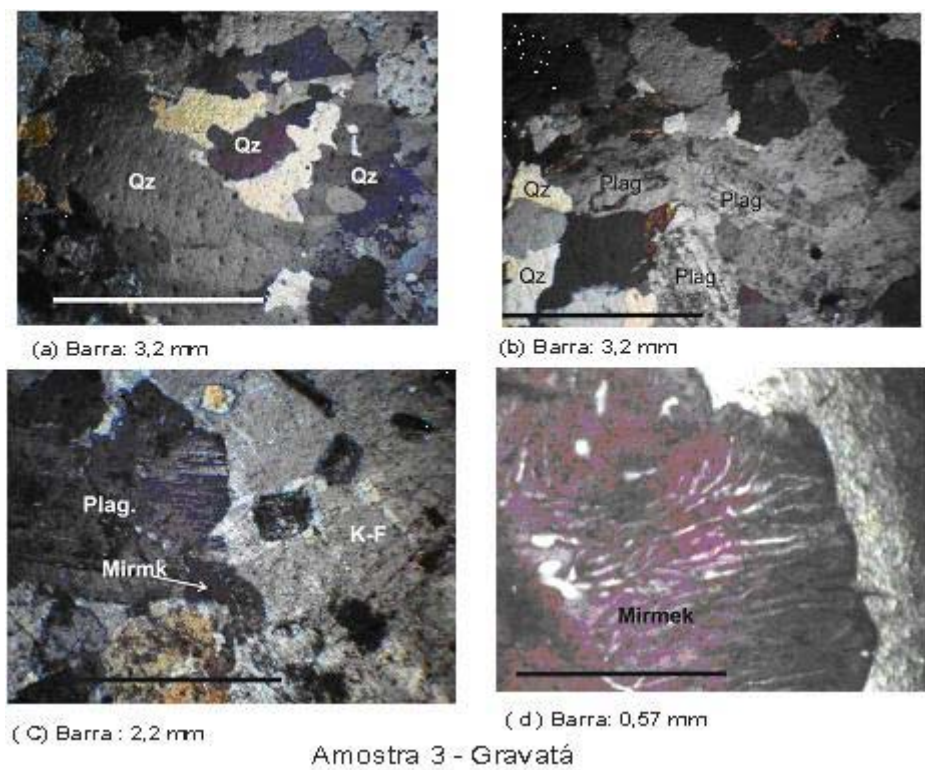


Figura 5.7 – Petrografia da amostra 3-Gravatá: (a) Cristais anedrais de quartzo com extinção ondulante; (b) Plagioclásio com geminação carlsbad e bordas corroídas; (c) Plagioclásios em contato com K-feldspato e desenvolvimento de mirmequita; (d) Detalhe da mirmequita na borda do plagioclásio. Qz=quartzo; Plag=plagioclásio; Mirmk=mirmequita; K-F=K-feldspato.

Na tabela 5.7 estão apresentadas as observações petrográficas realizadas na amostra 3-Gravatá.

Tabela 5.7 – Características petrográficas da amostra 3-Gravatá.

Amostra 3 – Gravatá:	
Minerais principais	Quartzo (25%); K-feldspato (45%); Plagioclásio (25%);
Minerais subordinados	Biotita(5%)
Mineral deletério	Quartzo deformado: extinção ondulante .
Tipo de agregado	Pedra britada
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente
Cor	Creme
Estrutura	Maciça com leve orientação das biotitas
Granulação	Grossa
Estado de alteração	Sã
Porcentagem de quartzo microcristalino	Ausente
Textura mirmekítica	Presente em 3% do total da rocha
Textura pertítica	Presente em 50% do K-feldspato
Tipo de rocha	Ígnea
Classificação	Sienogranito
Reatividade potencial	Potencialmente inócua
Reatividade potencial (NBR 15577)	Potencialmente reativa

Esta amostra apresentou características diferentes das anteriores uma vez que não foi observada a presença de quartzo recrystalizado nem desenvolvimento de subgrão, ou seja, a amostra não apresenta feições de deformação tectônica por cisalhamento, pois o quartzo nela presente exibe apenas extinção ondulante. Diante disto, tal amostra é classificada como inócua aos álcalis do cimento, no entanto de acordo com o critério estabelecido pela NBR 15577, tal amostra é classificada como potencialmente reativa por apresentar deformação do quartzo representada pela sua extinção ondulante.

Ensaio de expansão:

Tabela 5.8 – Expansão linear: amostra 3 – Gravatá.

VARIAÇÃO DIMENSIONAL						Resultados individuais de expansão (mm/m)			DRM da expansão	
Idade (dias)	Leituras			Média					Máximo	Mínimo
	1	2	3	%	mm/m	1	2	3		
2	0,968	1,057	1,07	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,968	1,077	1,087	0,00	0,05	0,00	0,08	0,07	0,03	0,05
6	1,007	1,114	1,127	0,02	0,20	0,15	0,22	0,22	0,02	0,05
8	1,046	1,152	1,162	0,03	0,35	0,31	0,37	0,36	0,03	0,04
13	1,124	1,224	1,235	0,06	0,64	0,61	0,65	0,65	0,02	0,03
15	1,151	1,25	1,258	0,07	0,74	0,72	0,76	0,74	0,02	0,02
16	1,153	1,252	1,26	0,07	0,75	0,73	0,76	0,75	0,02	0,02
17	1,167	1,262	1,27	0,08	0,79	0,78	0,80	0,78	0,01	0,01
20	1,187	1,281	1,288	0,09	0,86	0,86	0,88	0,85	0,01	0,01
22	1,215	1,315	1,319	0,10	0,99	0,97	1,01	0,98	0,03	0,02
24	1,229	1,333	1,338	0,11	1,05	1,02	1,08	1,05	0,03	0,03
27	1,254	1,359	1,363	0,12	1,15	1,12	1,18	1,15	0,03	0,03
30	1,278	1,384	1,388	0,12	1,25	1,22	1,28	1,25	0,03	0,03

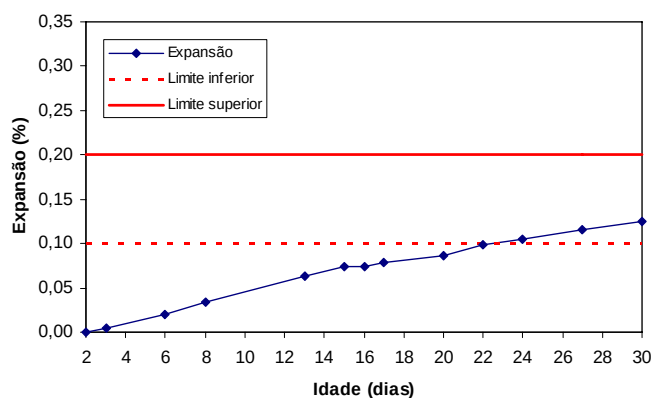


Figura 5.8 – Gráfico de expansão da amostra 03-Gravatá.

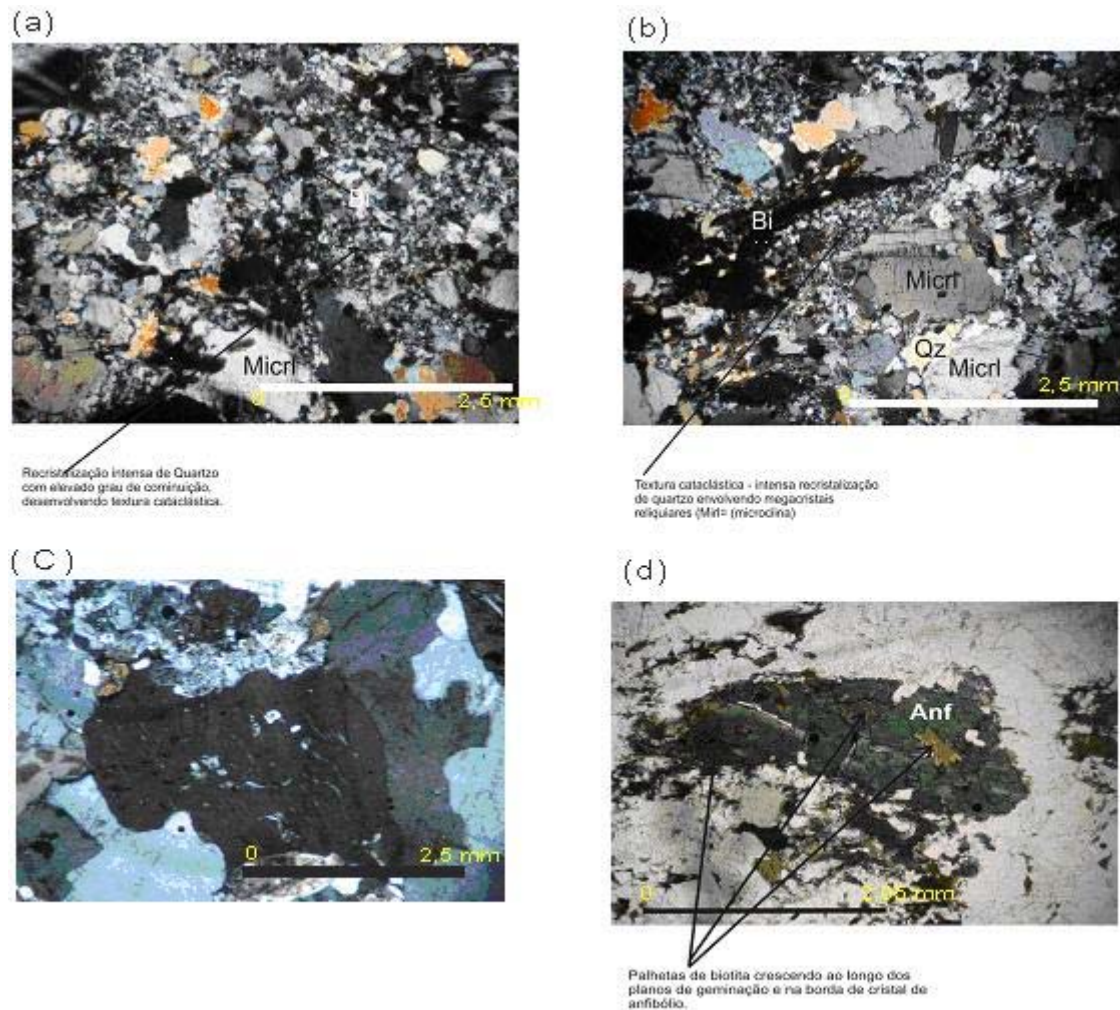
Pode-se observar através da tabela 5.8 e do gráfico da figura 5.8 os valores da expansão linear das barras da amostra. Aos 16 dias de idade a expansão atingiu 0,07% evidenciando comportamento inócuo. Na idade de 30 dias o valor da expansão aumentou para 0,12%, passando para a faixa de comportamento potencialmente reativo. Sua taxa de aumento de expansão foi de 71%, no entanto mesmo aos trinta dias seu valor ficou pequeno, ou seja,

próximo ao limite inferior entre inócuo e potencialmente reativo (0,10%). De acordo com os limites da ASTM C 1260 esse resultado deixa a indicação de que tal amostra pode se comportar tanto inócua como reativa.

5.2.4 Amostra 4 - Ipojuca

Análise petrográfica:

A amostra foi classificada como uma rocha metamórfica denominada de gnaiss monzonítico apresentando coloração cinza, granulação média e com estrutura foliada cataclástica bem definida. A análise microscópica apresentou composição mineralógica com 25% de quartzo; 10% de plagioclásio; 35% de K-feldspato; 10% de biotita e 20% de anfibólio. Os grãos de quartzo apresentam tamanhos variando de 0,2 até 1,25 mm. A amostra exibe intensa recristalização do quartzo (figura 5.9a), visto que do total de quartzo da amostra, 50% está recristalizado e os outros 50% apresentam desenvolvimento de subgrão. A textura da rocha exibe cristais reliquias de K-feldspato (microclina), envoltos por agregados finos de minerais recristalizados (figura 5.9b). Todos os cristais de K-feldspato apresentam pertitas em filme (figura 5.9c). Os plagioclásios exibem pouca intensidade de sericitização. Também foi observada a mirmequita encerrando cerca de 2% da amostra. Na figura 5.9d a amostra exibe a biotita associada com cristais de anfibólio.



Amostra 4 - Ipojuca

Figura 5.9 – Petrografia da amostra 4-Ipojuca: (a) Intensa recristalização do quartzo; (b) Megacristais reliquias de microclina envoltos por quartzo recristalizado; (c) Detalhes de peritita sobre o K-feldspato; (d) Plalhetas de biotita na borda de anfibólio. Micrl=microclina; Bi=biotita; Qz=quartzo; Anf=anfibólio.

Esta amostra constitui grande quantidade de quartzo recristalizado e quartzo com extinção ondulante, bem como formação de subgrão. A textura cataclástica evidencia deformação tectônica da rocha em regime rúptil (baixa-T). Pela análise petrográfica a amostra em questão foi considerada como potencialmente reativa a reação álcali-agregado.

Na tabela 5.9 estão apresentadas as observações petrográficas realizadas na amostra 4-Ipojuca.

Tabela 5.9 – Características petrográficas da amostra 4-Ipojuca.

Amostra 4 – Ipojuca:	
Minerais principais	Quartzo (25%); K-feldspato (35%); Plagioclásio (10%);
Minerais subordinados	Biotita(10%); Anfibólio(20%)
Mineral deletério	Quartzo deformado: recristalizado e formação de subgrão.
Tipo de agregado	Pedra britada
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente
Cor	Cinza
Estrutura	Cataclástica
Granulação	Média
Estado de alteração	Sã
Porcentagem de quartzo microcristalino	12,5%
Textura mirmequítica	Presente em 2% do total da rocha
Textura pertítica	Presente em 100% do K-feldspato
Tipo de rocha	Metamórfica
Classificação	Gnaiss-monzonítico
Reatividade potencial	Potencialmente reativa
Reatividade potencial (NBR 15577)	Potencialmente reativa

Ensaio de expansão:

Tabela 5.10 – Expansão linear: amostra 4 – Ipojuca.

VARIAÇÃO DIMENSIONAL						Resultados individuais de expansão (mm/m)			DRM da expansão	
Idade (dias)	Leituras			Média					Máximo	Mínimo
	1	2	3	%	mm/m	1	2	3		
2	0,187	-0,24	-0,017	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,184	-0,234	-0,013	0,00	0,01	-0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
7	0,213	-0,184	0,016	0,02	0,15	0,10	0,22	0,13	0,07	0,05
10	0,308	-0,106	0,097	0,05	0,48	0,48	0,53	0,45	0,04	0,04
14	0,395	-0,021	0,182	0,08	0,82	0,82	0,86	0,78	0,04	0,04
16	0,413	-0,003	0,208	0,09	0,90	0,89	0,93	0,89	0,03	0,02
18	0,466	0,048	0,252	0,11	1,10	1,10	1,13	1,06	0,04	0,04
21	0,533	0,097	0,311	0,13	1,33	1,36	1,33	1,29	0,04	0,04
23	0,58	0,159	0,353	0,15	1,52	1,55	1,57	1,46	0,05	0,07
25	0,603	0,182	0,374	0,16	1,61	1,64	1,66	1,54	0,05	0,07
28	0,683	0,234	0,447	0,19	1,88	1,95	1,87	1,83	0,07	0,06
30	0,712	0,293	0,489	0,21	2,05	2,07	2,10	1,99	0,05	0,06

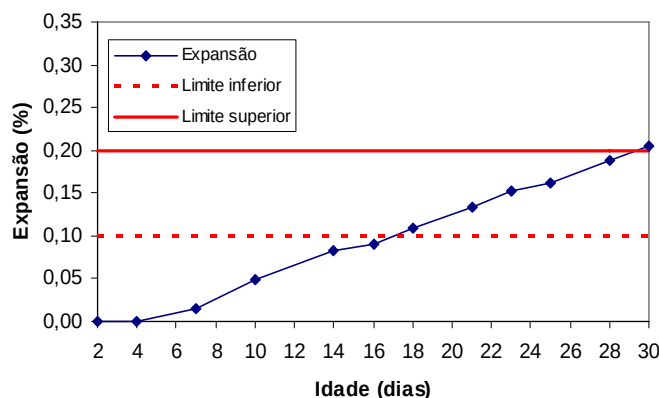


Figura 5.10 – Gráfico de expansão da amostra 04-Ipojuca.

A tabela 5.10 apresenta resultados de expansão linear de 0,09% aos 16 dias. Esse valor está na faixa de comportamento inócuo, no entanto continuando as leituras até 30 dias o valor da expansão sobe para 0,21%, atingindo o patamar de comportamento reativo. Essa amostra apresentou uma taxa de expansão muito alta, precisamente de 122%, que podemos avaliar que tal agregado exibe lenta reação inicial. Para essa amostra, os resultados da análise petrográfica não foram coerentes com o resultado de expansão aos 16 dias, todavia aos 30 dias houve total coerência das análises. A expansão no tempo pode ser visualizada pela figura 5.10.

5.2.5 Amostra 5 – Jaboatão

Análise petrográfica:

A amostra classifica-se como uma rocha ígnea denominada de biotita-granito apresentando granulação média à grossa, de coloração cinza. Sua estrutura linear e sua foliação sendo definida pela orientação das biotitas. A análise microscópica mostra composição mineralógica possuindo 25% de quartzo; 10% de plagioclásio; 40% de K-feldspato; 22% de biotita dos quais aproximadamente 3% está cloritizada e 3% de titanita bastante fraturada com forma angular anedral. As figuras 5.11a e 5.11b apresentam a biotita

alterando-se para clorita. Os cristais anedrais de quartzo exibem apenas extinção ondulante e apresentam tamanho médio de 0,5mm. Com relação ao K-feldspato, a rocha apresenta cristais de até 2 mm de tamanho com geminação cruzada e bastante fraturado, onde cerca de 90% do K-feldspato na amostra apresenta pertitas as quais podem ser visualizadas na figura 5.11c. Também foi verificada a presença de mirmequita cujo percentual é de aproximadamente 2% da amostra (Figura 5.11d). Os grãos de plagioclásios exibiam sob a forma anedral, fraturado e com aproximadamente 80% de intensidade de sericitização na área do grão.

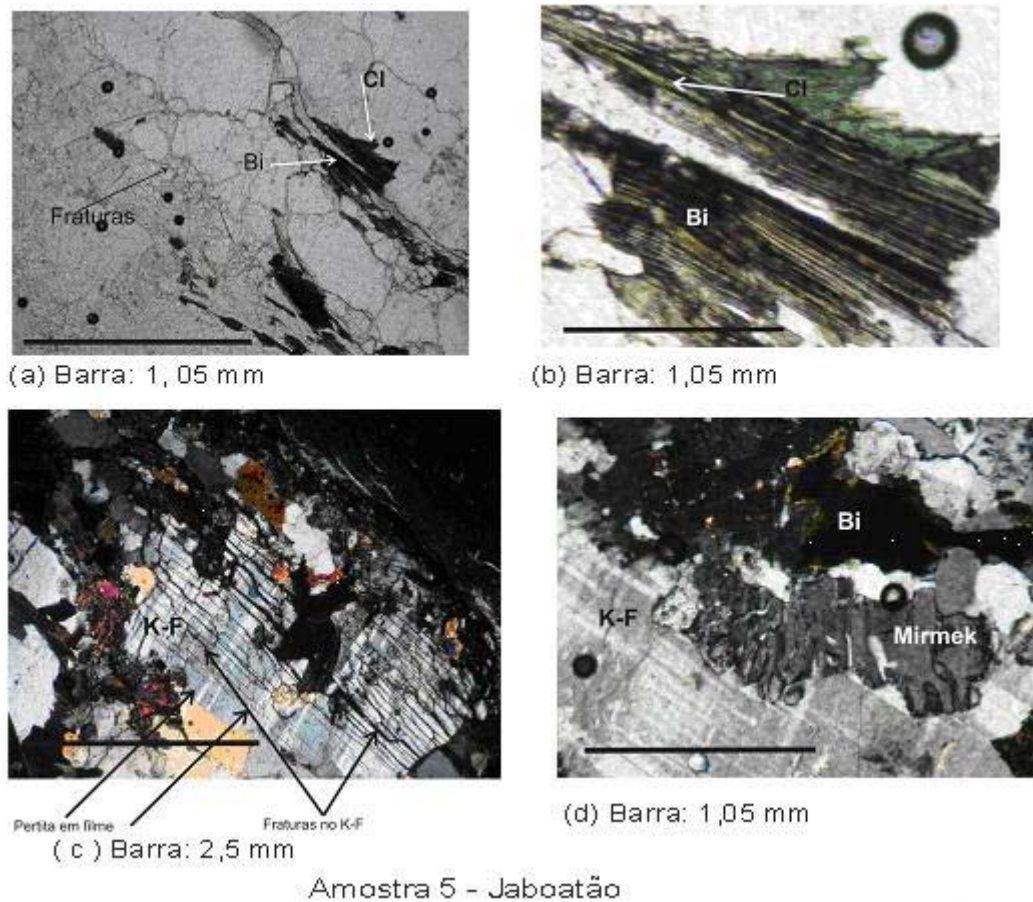


Figura 5.11 – Petrografia da amostra 5-Jaboatão: (a) Clorita formada a partir da biotita; (b) Detalhe da foto em (a); (c) K-feldspato fraturado com pertita em filme; (d) Mirmequita na borda do K-feldspato. Cl=clorita; Bi=biotita; K-F= K-feldspato; Mirmek=mirmequita.

Nesta amostra foi observada a presença de fase mineral com potencialidade de reatividade apenas pela presença de extinção ondulante do quartzo. A amostra é classificada, petrograficamente, como potencialmente inócua. No entanto, de acordo com o critério da NBR 15577, é classificada como potencialmente reativa por caracterizar deformação do quartzo representada pela sua extinção ondulante. Na tabela 5.11 estão apresentadas as observações petrográficas realizadas na amostra 5- Jaboaão.

Tabela 5.11 – Características petrográficas da amostra 5-Jaboaão.

Amostra 5- Jaboaão:	
Minerais principais	Quartzo (25%); K-feldspato (40%); Plagioclásio (10%);
Minerais subordinados	Biotita(22%)
Mineral deletério	Quartzo deformado: extinção ondulante .
Tipo de agregado	Pedra britada
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente
Cor	Cinza
Estrutura	Linear definida pelas biotitas
Granulação	Média a grossa
Estado de alteração	Sã
Percentagem de quartzo microcristalino	Ausente
Textura mirmequítica	Presente em 2% do total da rocha
Textura pertítica	Presente em 90% do K-feldspato
Microfissuração	Intensa no K-feldspato
Tipo de rocha	Ígnea
Classificação	Biotita granito
Reatividade potencial	Potencialmente inócua
Reatividade potencial (NBR 15577)	Potencialmente reativa

Ensaio de expansão:

Tabela 5.12 – Expansão linear: amostra 5 – Jaboatão.

VARIAÇÃO DIMENSIONAL						Resultados individuais de expansão (mm/m)			DRM da Expansão	
Idade (dias)	Leituras			Média					Máximo	Mínimo
	1	2	3	%	mm/m	1	2	3		
2	-0,908	0,575	0,809	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	-0,907	0,578	0,801	0,00	-0,01	0,00	0,01	-0,03	0,02	0,03
8	-0,862	0,605	0,827	0,01	0,12	0,18	0,12	0,07	0,06	0,05
12	-0,874	0,616	0,836	0,01	0,13	0,13	0,16	0,11	0,03	0,03
14	-0,867	0,628	0,841	0,02	0,17	0,16	0,21	0,13	0,04	0,04
16	-0,843	0,652	0,867	0,03	0,26	0,26	0,30	0,23	0,04	0,03
19	-0,82	0,672	0,886	0,03	0,35	0,35	0,38	0,30	0,04	0,04
21	-0,806	0,69	0,905	0,04	0,41	0,40	0,45	0,38	0,04	0,03
23	-0,805	0,681	0,895	0,04	0,39	0,41	0,42	0,34	0,03	0,05
26	-0,79	0,714	0,93	0,05	0,50	0,47	0,55	0,48	0,05	0,03
28	-0,782	0,713	0,924	0,05	0,50	0,50	0,55	0,45	0,05	0,04
30	-0,742	0,749	0,953	0,06	0,64	0,66	0,69	0,57	0,05	0,07

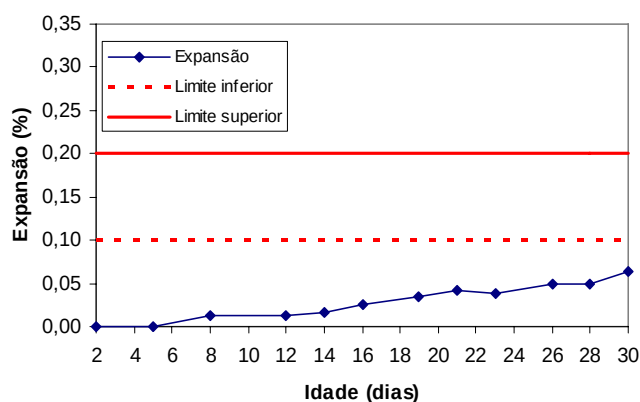


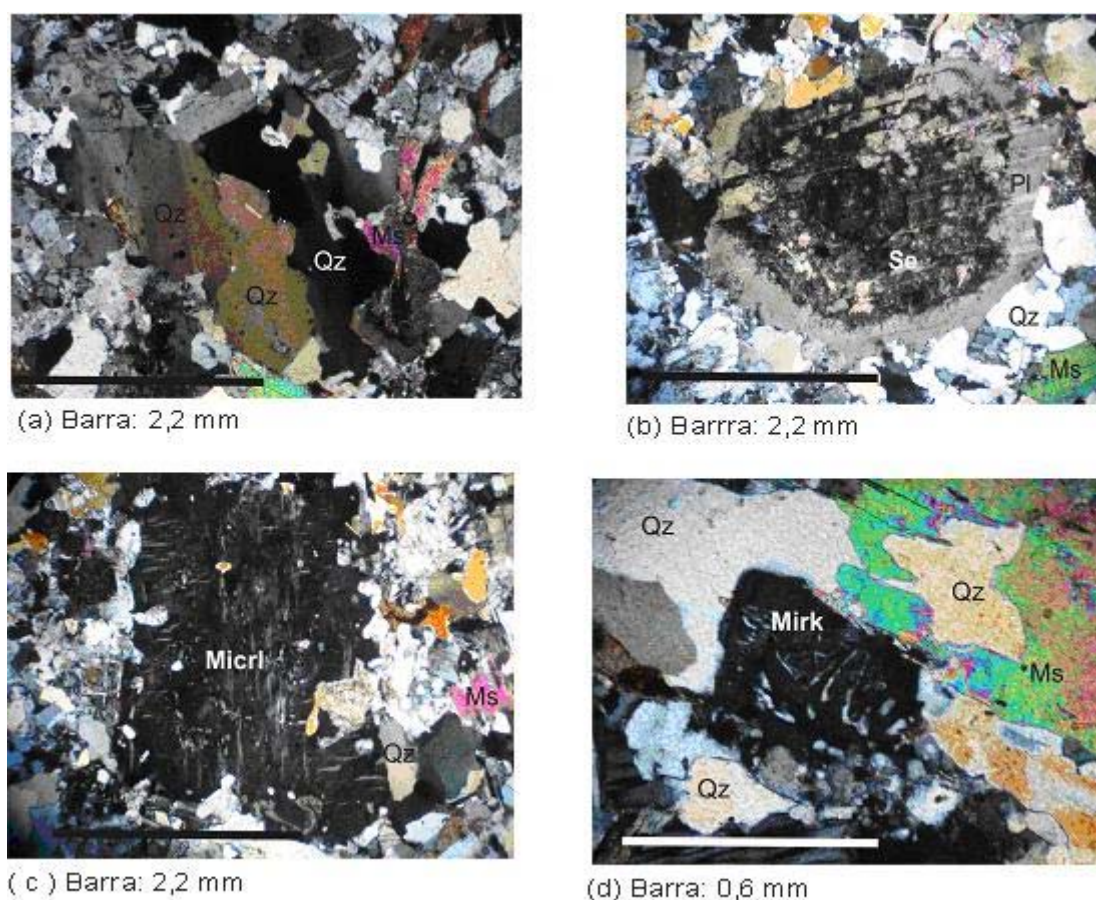
Figura 5.12 – Gráfico de expansão da amostra 05-Jaboatão.

A tabela 5.12 apresenta resultados de expansão com valores de 0,03% aos 16 dias e de 0,06% aos 30 dias. Esses valores mostram o comportamento inócuo da rocha confirmando a classificação descrita pela análise petrográfica. Essa amostra possuiu uma das maiores taxas de expansão linear com valor de 100%, ou seja, entre as idades de 16 e 30 dias a expansão foi duplicada. Essa amostra mesmo possuindo quartzo com extinção ondulante não apresentou expansão significativa.

5.2.6 Amostra 6 - São Caetano

Análise petrográfica:

A amostra classifica-se como uma rocha ígnea denominada de granito. A rocha apresenta coloração cinza, estrutura maciça e granulação média. A análise microscópica encerra composição mineralógica contendo 30% de quartzo; 20% de plagioclásio; 40% de K-feldspato; 5% de muscovita (sob abundantes palhetas) e 5% de biotita (sob palhetas menores que as da muscovita). O tamanho dos grãos de quartzo varia de 0,12 até 1,2 mm. Não há quartzo recristalizado, sendo que todos os cristais de quartzo apresentam extinção ondulante e formando subgrão (Figura 5.13a). Com relação aos plagioclásios, ocorre uma intensa sericitização exibindo em cerca de 60% da área dos grãos a qual pode ser visualizado na figura 5.13b. Também são observadas pertitas em aproximadamente 50% dos K-feldspatos (microclina) (Figura 5.13c). A mirmequita encerra 3% do total da rocha (figura 5.13d).



Amostra 6 - São Caetano

Figura 5.13 – Petrografia da amostra 6-São Caetano: (a) Quartzo com extinção ondulante e formação de subgrão; (b) Plagioclásio sericitizado; (c) Microclina com pertitas em filme circundado por quartzo; (d) Quartzo com extinção ondulante e formação de mirmequita. Qz=quartzo; Se=sericita; Pl=plagioclásio; Ms=moscovita; Micrl=microclina; Mirk=mirmequita.

Nesta amostra as fases minerais potencialmente reativas poderiam ser representadas pelo avançado desenvolvimento de subgrão no quartzo e possivelmente pelo elevado grau de sericitização do plagioclásio. No entanto, a sericitização é apenas uma suspeita sem comprovação de seu caráter reativo. Essa amostra não possui quartzo recristalizado. Esse agregado poderia ser classificado, petrograficamente, como potencialmente reativo devido a fortes evidências de formação de subgrão e sericitização ou potencialmente inócuo devido não possuir quartzo recristalizado. Pelo critério da NBR 15577 tal amostra é classificada como

potencialmente reativa. Na tabela 5.13 estão apresentadas as observações petrográficas realizadas na amostra 6-São Caetano.

Tabela 5.13 – Características petrográficas da amostra 6-São Caetano.

Amostra 6 - São Caetano:	
Minerais principais	Quartzo (30%); K-feldspato (40%); Plagioclásio (20%);
Minerais subordinados	Biotita(5%); Muscovita(5%)
Mineral deletério	Quartzo deformado: formação de subgrão
Tipo de agregado	Pedra britada
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente
Cor	Cinza
Estrutura	Maciça
Granulação	Média
Estado de alteração	Sã
Percentagem de quartzo microcristalino	Ausente
Textura mirmequítica	Presente em 3% do total da rocha
Textura pertítica	Presente em 50% do K-feldspato
Tipo de rocha	Ígnea
Classificação	Granito
Reatividade potencial	Potencialmente reativa ou inócua
Reatividade potencial (NBR 15577)	Potencialmente reativa

Ensaio de expansão:

Tabela 5.14 – Expansão linear: amostra 6 - São Caetano.

VARIAÇÃO DIMENSIONAL						Resultados individuais de Expansão (mm/m)			DRM da expansão	
Idade (dias)	Leituras			Média						
	1	2	3	%	mm/m	1	2	3	Máximo	Mínimo
2	-0,729	-0,1	-0,738	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	-0,728	-0,091	-0,724	0,00	0,03	0,00	0,04	0,06	0,02	0,03
7	-0,725	-0,07	-0,708	0,01	0,08	0,02	0,12	0,12	0,03	0,07
10	-0,709	-0,065	-0,703	0,01	0,12	0,08	0,14	0,14	0,02	0,04
14	-0,653	-0,014	-0,656	0,03	0,32	0,30	0,34	0,32	0,02	0,02
16	-0,651	-0,001	-0,643	0,04	0,36	0,31	0,39	0,38	0,03	0,05
20	-0,601	-0,013	-0,607	0,05	0,46	0,51	0,34	0,52	0,06	0,11
23	-0,564	0,076	-0,56	0,07	0,68	0,65	0,70	0,70	0,02	0,03
26	-0,465	0,111	-0,495	0,09	0,95	1,04	0,83	0,96	0,10	0,11
30	-0,355	0,28	-0,356	0,15	1,50	1,48	1,50	1,51	0,01	0,02

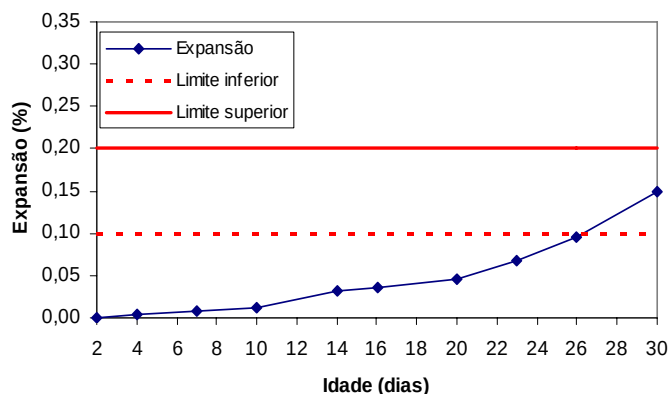


Figura 5.14 – Gráfico de expansão da amostra 06-São Caetano.

O resultado de ensaio de expansão das barras com esse agregado está mostrado na tabela 5.14 e na figura 5.14. Pode-se verificar que na idade de 16 dias a expansão foi de 0,04% e de 0,15% para a idade de aos 30 dias. Esses valores revelam uma baixa expansão inicial refletindo comportamento inócuo. Posteriormente avançou o passo para o valor médio do patamar de comportamento potencialmente reativo. Isso traz como conclusão a importância de quartzo com desenvolvimento de subgrão. A sericita será comentada posteriormente em comparação com as demais amostras para uma melhor avaliação. Para finalizar, essa amostra apresentou a maior taxa de expansão de todas as amostras analisadas com valor de 275% entre as idades de 16 e 30 dias.

5.3 Comparação conjunta entre as amostras

Nesse item serão feitas discussões dos resultados através de análises comparativas conjuntas das seis amostras. Com tal procedimento busca-se encontrar parâmetros petrográficos diferenciadores que influenciaram os resultados obtidos nas expansões.

Inicialmente, será apresentado um resumo das principais características petrográficas observadas nas amostras o qual está mostrado na tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Resumo da análise petrográfica (macro e microscópica).

	Amostra 1 (Vitória)	Amostra 2 (Caruaru)	Amostra 3 (Gravatá)	Amostra 4 (Ipojuca)	Amostra 5 (Jaboatão)	Amostra 6 (São Caetano)
Quartzo Total%	20	25	25	25	25	30
Quartzo – R %	17	7,5	ausente	12,5	ausente	ausente
Quartzo – SG %	(15)	(40)	ausente	(50)	ausente	(100)
Plagioclásio %	25	10	25	10	10	20
K-feldspato %	20	50	45	35	40	40
Biotita %	20	13	5	10	22	5
Muscovita %	-	2	-	-	-	5
Anfibólio %	11	-	-	20	-	-
Titanita %	3	-	-	-	3	-
Estrutura	Foliação milonítica	Foliação milonítica	Maciça	Foliação cataclástica	Linear definida pelas biotitas	Maciça
Granulação	Fina	Média a grossa	Grossa	Media	Media a grossa	Media
Tipo	Metamórfica	Metamórfica	Ígnea	Metamórfica	Ígnea	Ígnea
Nome	Gnaiss- diorítico	ortognaiss	Sienogranito	Gnaiss- monzonítico	Biotita-granito	Granito
Sericita (%)	30 (15)	100 (70)	100 (80)	100 (30)	100 (80)	100 (60)
Clorita (%)	ausente	ausente	ausente	Ausente	3	ausente
Mirmequita (%)	ausente	2,5	3	2%	2	3
Pertita (%)	30	ausente	50	100	90	50
Tamanho do QZ (mm)	< 0,1	0,5-1,0	0,5 - 2,5	0,2-1,25	0,5	0,12 - 1,2

Quartzo – R % = quartzo recristalizado; Quartzo – SG % = quartzo com formação de subgrão.

Comentários acerca dos dados apresentados entre parênteses na tabela 5.15: os percentuais mostrados entre parênteses não fazem parte diretamente da composição numérica, isto é, não entram no cálculo centesimal. Por exemplo, na amostra 2-Caruaru, no quartzo com formação de subgrão (Quartzo –SG) o valor 40 diz que dos 25% de quartzo na amostra 40% apresenta formação de subgrão.

Com relação ao percentual de sericita os números são analisados da seguinte forma: a sericita, conforme foi descrita anteriormente, está relacionada com a alteração do plagioclásio.

Assim, como por exemplo, na amostra 2 – Caruaru, o valor 100(70) diz que 100% do

plagioclásio estão sericitizados com 70% de intensidade de sericitização em cada grão de plagioclásio. Com relação ao percentual de pertita que é associada com a alteração do K-feldspato, por exemplo, na amostra 3-Gravatá, 50% diz que metade do percentual de K-feldspato apresenta textura pertítica. As tabelas 5.16 e 5.17 mostram os resultados das expansões para todas as amostras.

Tabela 5.16 – Comportamento dos agregados – Norma ASTM C 1260.

Amostra	Município	Expansões (%)		Comportamento (16 dias)	Comportamento (30 dias)
		16 dias	30 dias		
1	Vitória	0,25	0,35	Potencialmente reativo	Potencialmente reativo
2	Caruaru	0,11	0,19	Inócuo ou reativo	Inócuo ou reativo
3	Gravatá	0,07	0,12	Inócuo	Inócuo ou reativo
4	Ipojuca	0,09	0,21	Inócuo	Potencialmente reativo
5	Jaboatão	0,03	0,06	Inócuo	Inócuo
6	São Caetano	0,04	0,15	Inócuo	Inócuo ou reativo

Tabela 5.17 – Comportamento dos agregados – Norma NBR 15577

Amostra	Município	Expansões (%)	Comportamento (30 dias)
1	Vitória	0,35	Potencialmente Reativo
2	Caruaru	0,19	Potencialmente Reativo
3	Gravatá	0,12	Potencialmente Inócuo
4	Ipojuca	0,21	Potencialmente Reativo
5	Jaboatão	0,06	Potencialmente Inócuo
6	São Caetano	0,15	Potencialmente Inócuo

A partir da tabela 5.16 verificamos que a amostra que mais reagiu, ou seja, a que apresentou maior expansão linear foi a amostra 1 - Vitória, seguida da amostra 4 – Ipojuca; amostra 2 – Caruaru; amostra 6 - São Caetano; amostra 3 - Gravatá e a última, ou seja, a que

teve menor expansão foi a amostra 5-Jaboatão. Na tabela 5.17 está apresentado o comportamento de acordo com os limites estabelecidos pela norma NBR 15577, onde se verificou concordância com os limites da ASTM C1260 nas amostras 1, 4 e 5. Entretanto, as amostras 2, 3 e 6 se situam no meio termo deixando dúvidas sobre o seu real comportamento e dificultando a comparação. A figura 5.15 apresenta graficamente a expansão linear do ensaio acelerado para todas as amostras.

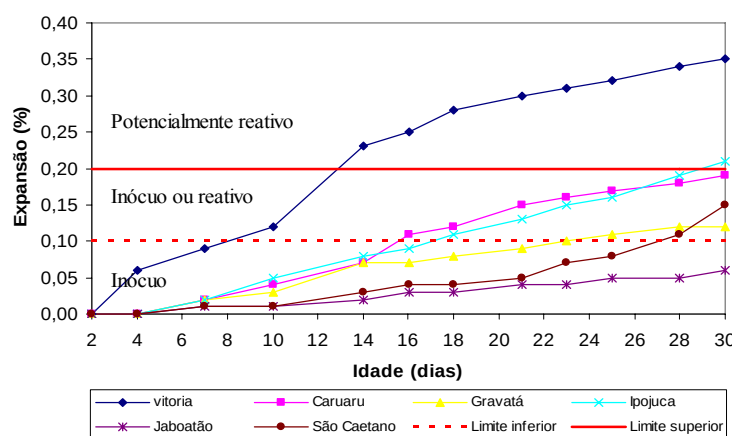


Figura 5.15 – Expansão linear conjunta de todas as amostras.

De acordo com a quantidade de quartzo recristalizado (ou microcristalino), foi verificado que o percentual é maior para amostra 1-Vitória, com 17%, seguida da amostra 4-Ipojuca, com 12,5% e da amostra 2-Caruaru com 7,5%. Essas três amostras foram as que apresentaram as maiores expansões no ensaio acelerado, onde o aumento das expansões aconteceu de acordo com o aumento da quantidade de quartzo recristalizado. A presença de quartzo recristalizado é uma forte característica de que a rocha sofreu deformação tectônica, tal como de cisalhamento. As amostras 3, 5 e 6 não apresentaram quartzo recristalizado. Essa característica também foi observada por Andrade *et al.*, (2006).

Importante ressaltar a correlação com a distância do ponto de coleta à ZCPE. As amostras situadas mais próximas de zonas de falhas apresentaram características mineralógicas deformacionais mais intensas. As amostras 1-Vitória, e 2-Caruaru estavam mais próximas da ZCPE que as demais, distando 750m e 3 Km, respectivamente, já as amostras 3-Gravatá, 5-Jaboatão e 6-São Caetano distavam acima de 4 Km. Isso possivelmente evidencia que a influência da ZCPE com relação à deformação por recristalização não atinge rochas localizadas a uma distância superior a 3Km. Rochas extraídas próximos a zonas de falhas apresentam maiores chances de apresentarem características deformacionais dos seus minerais constituintes, bem como recristalização, e conseqüentemente mais susceptíveis da desenvolverem a reação álcali-agregado. Essas observações corroboram os trabalhos desenvolvidos por Shayan (1993); Kerrick e Hooton (1992). Portanto, a busca por materiais de melhor qualidade, supostamente, se iniciaria no conhecimento da geologia da área com relação especificamente à ocorrência ou não de estruturas falhadas e posteriormente mapear as regiões livres dessas ocorrências para serem, assim, explotadas.

Com relação à quantidade de quartzo com desenvolvimento de subgrão verifica-se que a amostra 6 possui o maior percentual (100%) seguida da amostra 4, 2 e 1. No entanto, as expansões do ensaio acelerado mostraram que a amostra 6 expandiu menos que a amostra 4, 2 e 1. Vale ressaltar que a amostra 6 não exibiu quartzo recristalizado. Isso conclui que possivelmente o quartzo recristalizado é mais importante, para o desenvolvimento das expansões do que o desenvolvimento de subgrão. As amostras 3 e 5 não apresentaram quartzo com desenvolvimento de subgrão. A importância do quartzo com desenvolvimento de subgrão é citada por Thomson e Grattan-Bellew (1993); Wigum (1995); Amo e Pérez (2001).

A amostra 3-Gravatá e a amostra 5-Jaboatão não apresentaram quartzo recristalizado ou desenvolvimento de subgrão apresentando em ambas as menores expansões. Essas

amostras foram as que apresentaram as menores deformações onde suas expansões estão relacionadas com o quartzo exibindo apenas extinção ondulante. Tal fato esclarece a velocidade de reatividade das fases do quartzo, onde agregados exibindo quartzo apenas com extinção ondulante apresentam uma velocidade mais lenta. Assim, fica claro que, a partir dos resultados obtidos nas rochas analisadas neste trabalho, a reatividade álcali-silicato é mais pronunciada pelo quartzo recristalizado, em seguida pelo quartzo com desenvolvimento de subgrão e por último pelo quartzo apenas com extinção ondulante. A reatividade do quartzo deformado é relatada por Gogte (1973) *apud* Kerrick e Hooton (1992) como sendo um resultado da fraqueza das ligações silício-oxigênio devido ocorrência de defeitos cristalográficos, bem como pelo aumento da superfície específica através da redução do tamanho dos grãos. A maior importância do quartzo recristalizado em relação ao quartzo com extinção ondulante mostrada neste estudo corrobora pesquisas apresentadas por Shayan (1993); Wigum (1995). A tabela 5.18 mostra a comparação dos comportamentos a partir da análise petrográfica e dos limites do ensaio de expansão empregado e de acordo com a classificação nas duas metodologias. No comportamento 1, o critério para classificação na análise petrográfica está baseado na presença do quartzo recristalizado, isto é, a presença de percentual acima de 5% classifica a amostra como potencialmente reativa. Salienta-se que tal critério é apenas para comparação, ou seja, não é estabelecido por norma.

Tabela 5.18 – Comparação entre os comportamentos da análise petrográfica e o ensaio de expansão.

Amostra	Comparação 1		Comparação 2 (NBR 15577)	
	Análise petrográfica (QZ-R)	Ensaio de expansão (ASTM C 1260)	Análise petrográfica	Ensaio de expansão
1	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
2	Potencialmente Reativo	Inócuo ou reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
3	Potencialmente Inócuo	Inócuo ou reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Inócuo
4	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
5	Potencialmente Inócuo	Inócuo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Inócuo
6	Potencialmente Inócuo	Inócuo ou reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Inócuo

A partir da tabela 5.18 verifica-se que a comparação 2 evidencia uma incoerência do resultado da análise petrográfica com o do ensaio de expansão, isto é, na análise petrográfica todas as amostras apresentaram comportamento potencialmente reativo o que não ocorre no ensaio de expansão. Na comparação 1, os resultados da análise petrográfica foram mais coerentes com o ensaio de expansão, porém o comportamento de meio-termo (i.e, inócuo ou reativo) é um tanto quanto ilógico e confuso, pois não esclarece muito permanecendo a mesma dúvida sobre a reatividade do agregado. Considerando a defasagem da amostra 2 – Caruaru (0,02%), na classificação da comparação 1, o ensaio acelerado seria coerente com a classificação petrográfica.

Os resultados dos limites de expansão estabelecidos pela norma NBR 15577, ou seja, na comparação 2 são absolutamente concordantes com o critério da análise petrográfica da comparação 1. Isso mostra a importância do quartzo recristalizado na classificação dos agregados quanto à avaliação da reação álcali-silicato.

Essas observações confirmam a importância de se realizar as análises petrográficas de rochas utilizadas como agregado graúdo de forma detalhada, porém focada nas características deformacionais de seus constituintes, especialmente o quartzo, uma vez que é o principal

mineral reativo responsável por desenvolver o tipo de reação álcali-silicato. Ficou notório o papel coadjuvante da extinção ondulante do quartzo a qual foi sobreposta pelo desenvolvimento de subgrão e principalmente pelo quartzo microcristalino devido à recristalização dinâmica.

A partir de agora serão feitas as discussões da presença dos minerais de alteração secundária (sericita e clorita) e das texturas de exsolução (mirmequita e pertita) com relação as suas influências na reatividade das rochas analisadas.

A clorita ocorre apenas na amostra 5-Jaboatão, onde a mesma apresentou a menor expansão, assim conclui-se que a clorita também não é uma fase mineral potencialmente reativa, ou seja, aparentemente não tem influência na reatividade do agregado.

A sericita está relacionada com a alteração do plagioclásio. A partir da tabela 5.15 verificamos que a amostra 1-Vitória, que foi a que apresentou maior expansão linear, possui sericitização em 30% do plagioclásio existente e intensidade de sericitização de 15% em cada grão. As demais amostras apresentaram sericitização em todo o plagioclásio existente com intensidade de sericitização no grão variando de 70% para a amostra 2-Caruaru; 80% para a amostra 3-Gravatá; 30% para a amostra 4-Ipojuca; 80% para a amostra 5-Jaboatão e por fim 60% para a amostra 6-São Caetano. Assim, a sericitização, nessas rochas analisadas, possivelmente não teve influência para o aumento da reatividade da mesma (Figura 5.16), uma vez que a amostra que mostrou maior expansão possui a menor quantidade de sericita, bem como as amostras que obtiveram as menores expansões (amostras 3 e 6) foram as que apresentaram teores mais altos de sericitização sinalizando uma tendência de relação inversa, ou seja, algumas amostras que apresentaram as menores expansões possuíam os maiores percentuais de sericitização, a exceção da amostra 2 – Caruaru.

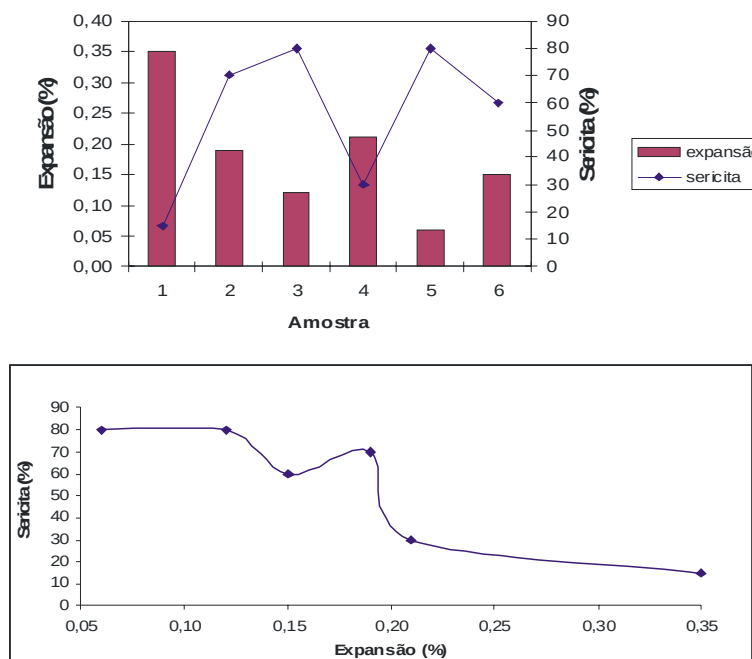


Figura 5.16 – Correlação da sericita com as expansões.

A mirmequita ocorre através do intercrescimento entre quartzo e plagioclásio. Com relação à mirmequita, pelo fato dos teores encontrados (tabela 5.15) serem muito baixos e muito próximos um do outro (variando de 2 a 3%) fica-se impossibilitado fazer diferenciações de reatividade.

Por fim a pertita, que se forma a partir do intercrescimento entre K-feldspato e plagioclásio, apresentou teores bastante variados (de 30 a 100%) onde seus valores correspondem a resultados de expansão totalmente aleatórios, ou seja, amostras que apresentaram baixos teores de pertita apresentaram tanto expansões altas com baixas, como por exemplo, a amostra 1-Vitória e a amostra 4-Ipojuca com as maiores expansões e possuindo teores de pertita bastante diferentes com 30% e 100% respectivamente. O contrário também é verdadeiro, amostras com baixas expansões possuem diferentes teores de pertita, como por exemplo, as amostras 3-Gravatá e a amostra 5-Jaboatão que apresentaram as

menores expansões, mas que apresentam teores de pertita muito diferentes com 50% e 90%, respectivamente. A figura 5.17 ilustra a relação da quantidade de pertita na amostra com as suas respectivas expansões.

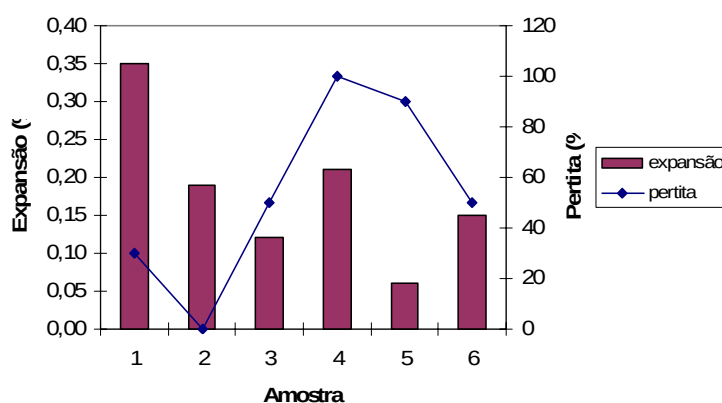


Figura 5.17 – Correlação da pertita com as expansões de cada amostra.

Conforme descritos na revisão da literatura, estudos relacionados com mirmequita e sericita foram realizados, todavia o presente estudo não corrobora tais observações. Também, considerando as amostras analisadas no presente trabalho, as observações feitas na norma brasileira NBR 15577 em sua parte 3 com relação às texturas pertíticas e mirmequíticas não se aplicam, por alegar que tais texturas são passíveis de contribuírem para o aumento da reatividade aos álcalis. Vale salientar a dimensão amostral, ou seja, o pequeno universo de amostras (seis) avaliadas neste estudo não permite fazer conclusões definitivas e afirmatórias a respeito da influência de tais feições pertíticas e mirmequíticas na reatividade álcali-agregado.

Conforme descrito no procedimento experimental, a idade do ensaio acelerado é realizada até a idade de 30 dias. No entanto, decidiu-se continuar as leituras para observar o

comportamento das expansões. A tabela 5.19 mostra o comportamento das leituras até a idade de 100 dias.

Tabela 5.19 – Expansão linear extrapolando para 100 dias.

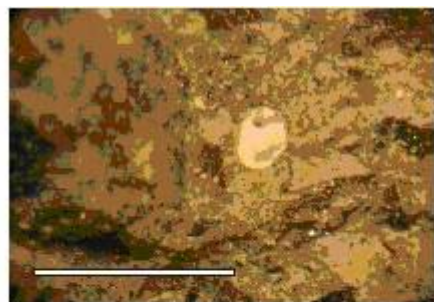
Amostra	1	2	3	4	5	6
Expansão (%)	0,62	0,36	0,30	0,47	0,26	0,46

A partir da tabela 5.19 verifica-se que as expansões continuaram. Esses resultados corroboram os estudos desenvolvidos por Owsiak (2003), onde o agregado inicialmente se comportando como inócuo sem evidência de reatividade, posteriormente causa efeitos deletérios. Dessa forma, o tempo se torna um parâmetro importante, uma vez que rochas aparentemente inócuas possuindo apenas extinção ondulante do quartzo só vêm a apresentar expansões maiores após muito tempo, ou seja, defeitos cristalográficos associados com a extinção ondulante seriam defeitos tênues comparados com as demais características microestruturais do quartzo, tais como lamelas de deformação, desenvolvimento de subgrão, etc. O problema deve ser encarado de forma holística, onde vários fatores contribuem para desencadear a complexa reação álcali-silicato, como por exemplo, as condições nas quais os barras são submetidas no ensaio de expansão são bastante severas (temperatura alta e concentração fortemente alcalina) e diferentes das condições reais na natureza, o que possivelmente essa evolução da taxa de expansão não seja reprodutível nas condições reais. A alta e constante alcalinidade da solução do ensaio acelerado com certeza não se compara com as condições reais, ou seja, não existe fornecimento contínuo de tais condições. Por fim, o agregado inócuo estudado neste trabalho (amostra 5-Jaboatão), deve ser considerado inócuo, pois a despeito de continuar em expansão ao longo do tempo, esse comportamento remotamente se reproduzirá na natureza. Essas discussões são confirmadas, através de

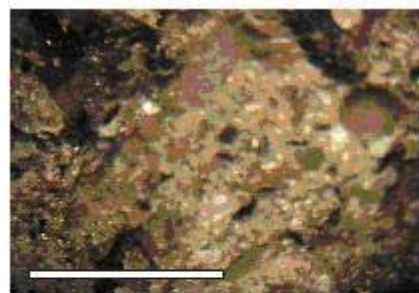
consulta verbal, pela Doutora Nicole Hasparyk, especialista na área. Adicionalmente, os limites estabelecidos pela norma devem ser encarados como pertinentes como parte de um conjunto de observações. Vale ressaltar que os limites para a idade de 100 dias não são conhecidos, isto é, não é possível fazer uma classificação do comportamento do agregado por não conhecer o limite numérico de expansão nessa idade.

5.4 Observações da microestrutura após ensaio de expansão.

As observações microestruturais permitem uma visualização dos produtos da reação formados. A morfologia dos produtos da reação auxilia na confirmação da ocorrência da reação álcali-agregado. Os corpos-de-prova foram seccionados após o ensaio de expansão na idade de 30 dias e em seguida foram analisados por lupa binocular, bem como pela técnica de microscopia eletrônica de varredura com a finalidade de observar a presença do gel formado. Vale salientar que esta parte do trabalho tem caráter apenas complementar. Na figura 5.18 são mostradas as micrografias obtidas por lupa binocular.



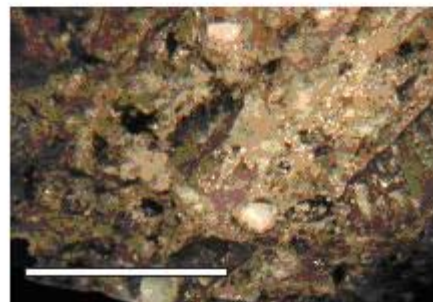
Amostra 1 - Barra: 4,5 mm



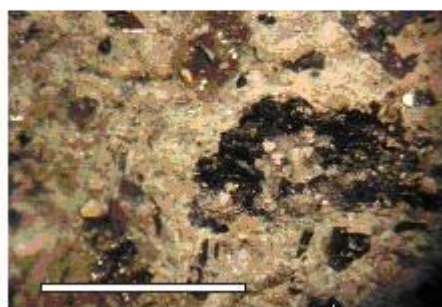
Amostra 2 - Barra: 0,7 cm



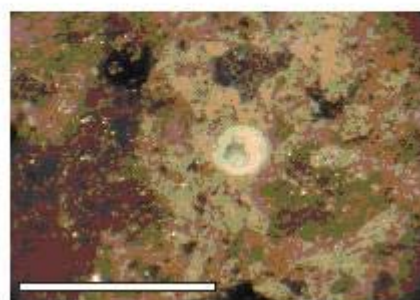
Amostra 3 - Barra: 0,7 cm



Amostra 4 - Barra: 5 mm



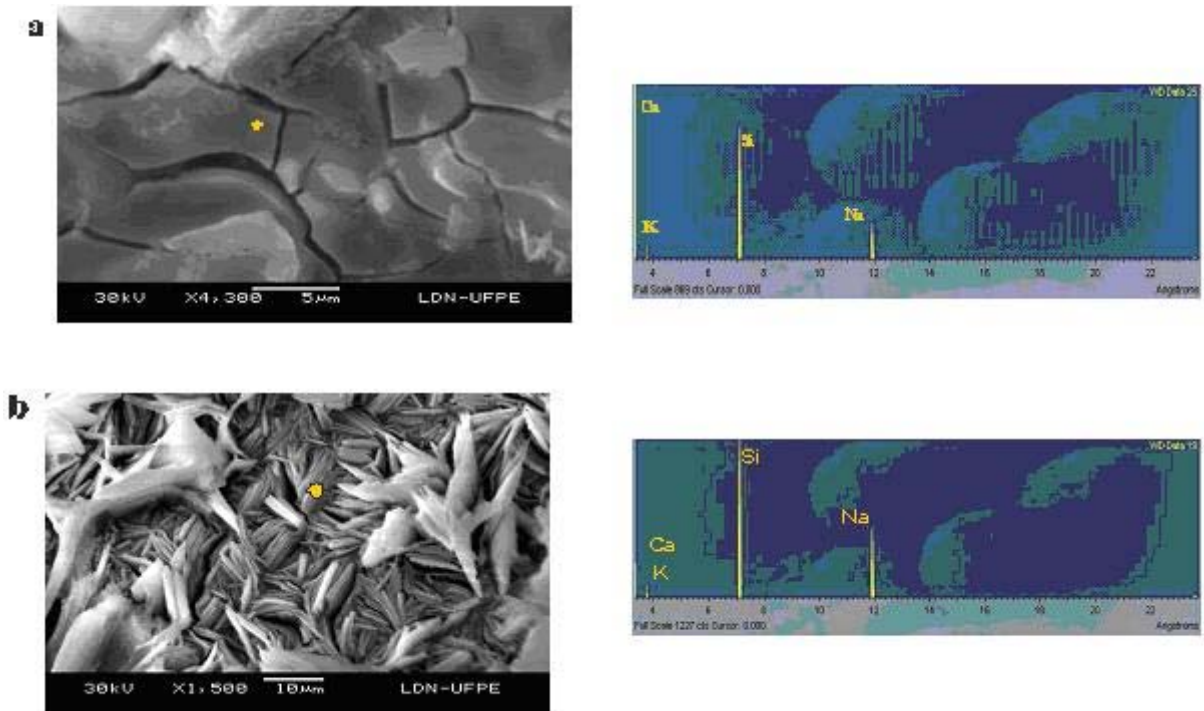
Amostra 5 - Barra: 4,5 mm



Amostra 6 - Barra: 4,5 mm

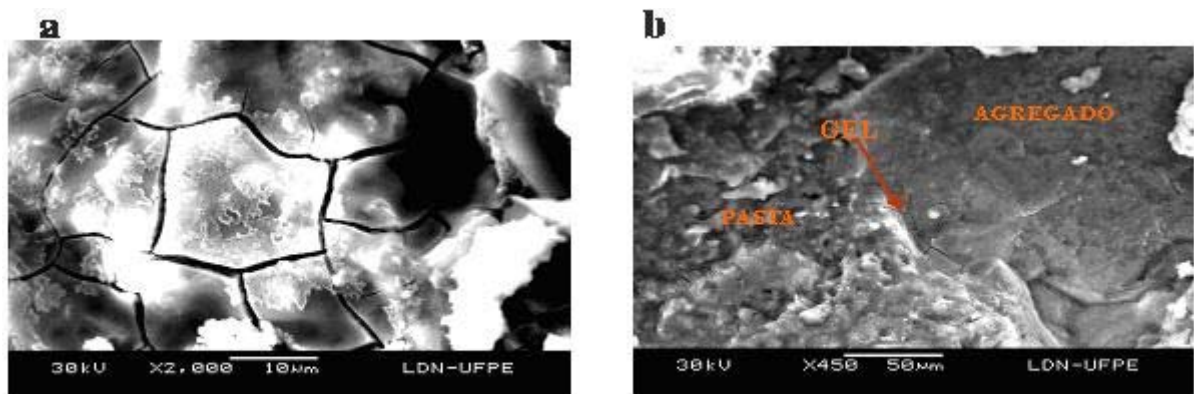
Figura 5.18 – Observação por lupa binocular das barras de argamassa após o ensaio de expansão.

A partir da figura 5.18, verifica-se a presença predominante de material branco preenchendo os poros da argamassa, sendo que em algumas amostras também foi observado um material escuro no poro ou poro vazio. As amostras, de um modo geral, exibem pequena quantidade de poros dispersos na matriz, especialmente na amostra 5-Jaboatão onde não foram observados poros com tamanhos similares as demais amostra, mas apenas microporos.



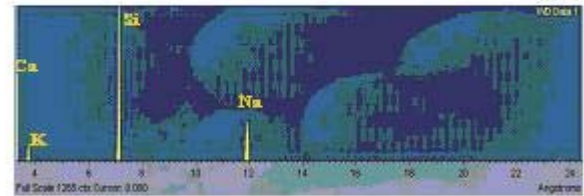
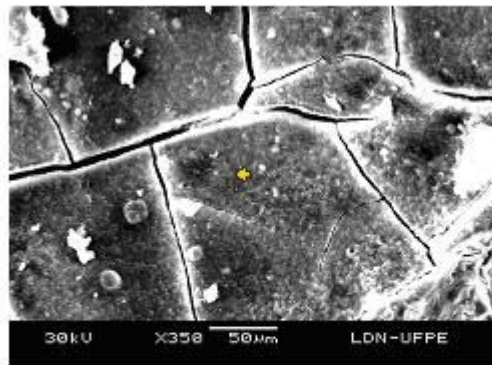
Amostra 1 - Vitória

Figura 5.19 – Microimagens da amostra 1-Vitória: a) gel gretado ao lado seu espectro (no ponto amarelo); b) morfologia de rosáceas com respectivo espectro.



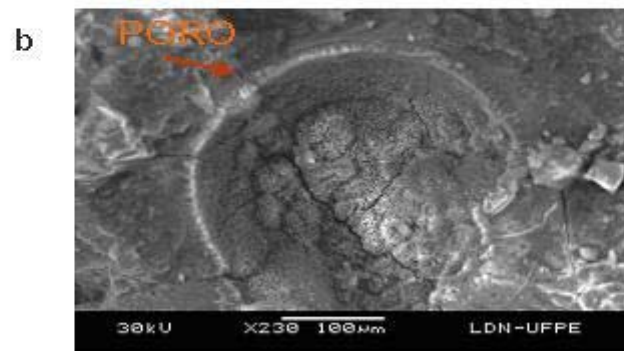
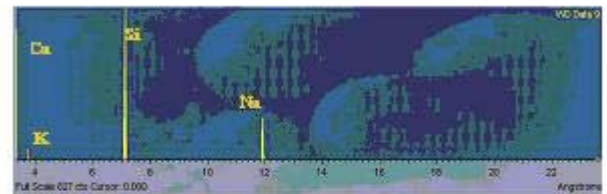
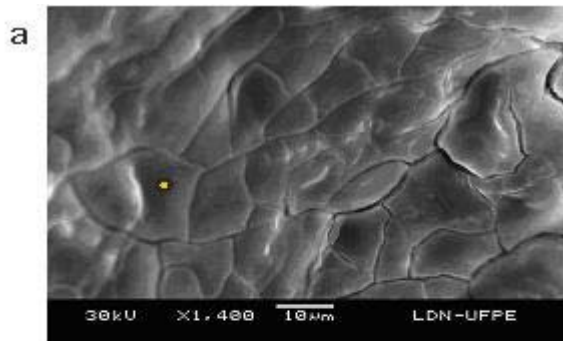
Amostra 2 - Caruaru

Figura 5.20 – Microimagens da amostra 2 – Caruaru: a) gel gretado; b) gel na interface pasta/agregado.



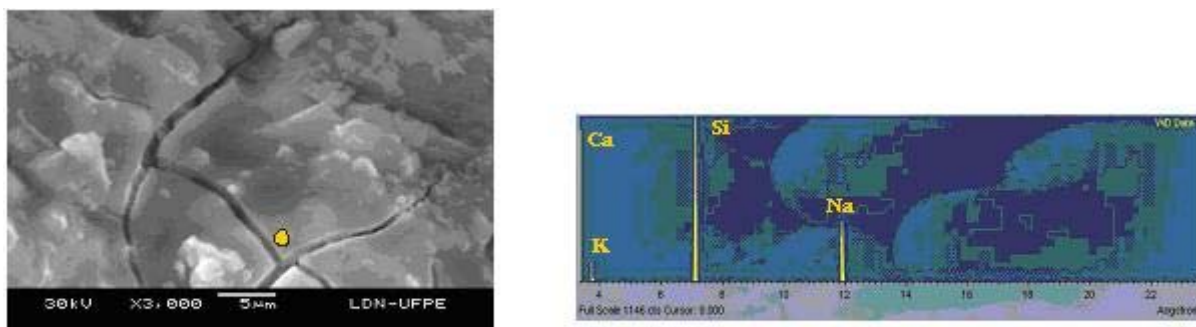
Amostra 3 - Gravatá

Figura 5.21 – Microimagens da amostra 3-Gravatá: gel fino gretado com respectivo espectro (ponto amarelo).



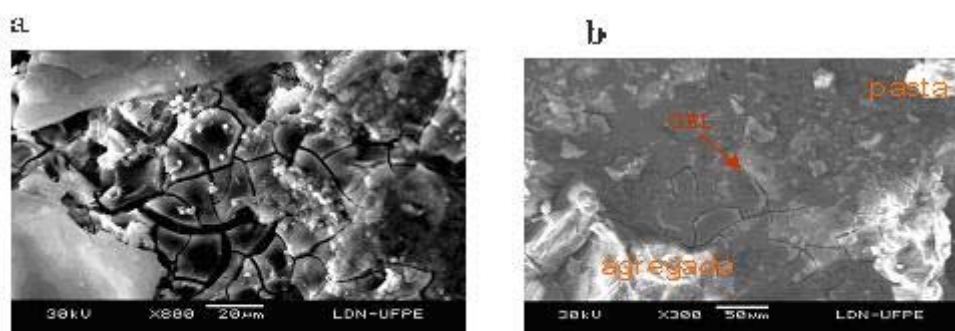
Amostra 4 - Ipojuca

Figura 5.22 – Microimagens da amostra 4-Ipojuca: a) gel botroidal com respectivo espectro (ponto amarelo); b) produto preenchendo poro.



Amostra 5 - Jaboatão

Figura 5.23 – Microimagens da amostra 5-Jaboatão: gel gretado sobre a pasta com respectivo espectro (ponto amarelo).



Amostra 6 - São Caetano

Figura 5.24 – Microimagens da amostra 6-São Caetano: a) gel maciço totalmente gretado; b) gel formado na interface pasta/agregado.

A partir das figuras 5.19 até 5.24, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode-se constatar a presença do gel da reação álcali-agregado onde os espectros mostram os elementos químicos componentes predominantes do gel: silício, cálcio sódio e potássio. Os espectros mostram o pico do sódio um pouco maior que o do potássio. Foi possível observar alguns tipos de morfologias, tais como de rosáceas, gel gretado, formação de produto cristalizado e de bastonetes, bem como borda de reação entre o agregado e a pasta. As imagens foram satisfatórias, pois em todas as amostras foi observado o gel gretado, o qual indica que houve a ocorrência da RAA. Essas observações também são verificadas por outros pesquisadores, tais como Tiecher *et al.* (2006); Pecchio *et al.* (2006); Andrade *et al.* (2006); Korkanç e Tugrul (2004); Hasparyk (1999).

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

O presente trabalho preocupou-se em avaliar as características mineralógicas e microestruturais de rochas usadas como agregado para concreto com ênfase em suas feições deformacionais. As amostras foram coletadas próximas a zonas de falha no leste do estado de Pernambuco. Para o estudo foram utilizadas técnicas de análise petrográfica e laboratorial para verificar a expansão de barras de argamassa. Adicionalmente, foram realizadas observações do produto da reação formado utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados e discussões foram apresentados e as conclusões pertinentes são agora descritas:

Das seis amostras de rocha analisadas três são ígneas e três são metamórficas, dentre as metamórficas duas apresentam deformação por milonitização em alta T e uma em baixa T (cataclástica). Na análise petrográfica as rochas metamórficas evidenciaram características de deformação, tais como intensa recristalização do quartzo, bem como o desenvolvimento de subgrão, bandas de deformação e extinção ondulante. Essas rochas metamórficas estão situadas à distância máxima de até 3km de zonas de falha. As distâncias em relação a zonas de falha das rochas menos deformadas (ígneas) são maiores, entre 4 a 5 km. Também foi verificado que as amostras que apresentaram as maiores quantidades de quartzo recristalizado obtiveram as maiores expansões no ensaio laboratorial, seguidas das amostras que apresentaram desenvolvimento de subgrão.

Este estudo fez também uma avaliação dos minerais de alteração secundária e das texturas de exsolução a fim de verificar sua influência na reatividade das rochas. Com esses agregados estudados, os resultados não mostraram correlação com o aumento das expansões das barras. A sericita mostrou uma tendência a diminuição das expansões para algumas

amostras, no entanto não é possível concluir definitivamente, uma vez que tal constatação não pode ser precisa em vista do reduzido universo amostral.

Com relação à influência da distância das amostras à ZCPE, pode-se verificar que as estruturas rochosas são responsáveis pelas deformações das amostras analisadas, pois as que estavam mais próximas da zona de cisalhamento ou falha apresentaram maiores características deformacionais na análise petrográfica e maiores expansões no ensaio acelerado.

O ensaio acelerado prescrito pela norma ASTM C1260 estabelece os limites de expansão em 16 dias podendo ser estendidos para 30 dias. Das seis amostras analisadas neste estudo, duas foram classificadas como potencialmente reativas, três foram classificadas como inócuas ou reativas sendo que uma ficou muito próximo do limite (0,19%) e apenas uma como inócua. Entretanto, decidiu-se continuar medindo as expansões durante um período maior e verificou-se que as expansões prosseguiram. Vale lembrar que as leituras do ensaio de expansão foram realizadas no período de tempo de 2 minutos ao invés de 15 segundos como descreve a ASTM C 1260, ou seja, os valores das expansões possivelmente seriam um pouco superiores ao obtidos, portanto estariam defasados, teoricamente, de aproximadamente 0,02%.

Observações da microestrutura das barras de argamassa foram realizadas, de forma complementar, com o intuito de observar a presença do gel formado. A partir destas análises foi possível verificar os principais elementos químicos (sódio potássio, silício e cálcio) presentes no gel da reação. O aspecto do produto da reação exibiu a forma de gel gretado maciço, rosáceas, fios entrelaçados etc.

Adicionalmente, o fator mais importante para o desencadeamento da reação álcali-silicato foi a presença do quartzo microcristalino oriundo da recristalização dinâmica de rochas afetadas por deformação tectônica. O quartzo com desenvolvimento de subgrão

também é um fator influenciador do aumento das expansões, porém menos que o quartzo recristalizado. Verificou-se que rochas contendo apenas quartzo com extinção ondulante são muito menos susceptíveis de desenvolverem a reação álcali-silicato, pois agem de forma mais lenta, possivelmente por possuírem defeitos cristalográficos mais distribuídos do que as feições do quartzo com desenvolvimento de subgrão, por exemplo. O efeito reativo do quartzo microcristalino é freqüentemente associado com a sua maior superfície específica, uma vez que com a recristalização o tamanho dos grãos de quartzo são bastante diminuídos.

Diferentemente de alguns estados brasileiros, o estado de Pernambuco possui, na maioria de sua extensão territorial, uma geologia de embasamento cristalino predominantemente composto de granito e gnaisses. Dentre as rochas utilizadas como agregado graúdo para concreto, o granito é o que apresenta as melhores qualidades do ponto de vista da reatividade álcali-agregado, conforme verificado na amostra 5-Jaboatão. Assim, materiais de boa qualidade existem, sendo necessário apenas um estudo da região onde se situam essas rochas que estejam distantes de deformações geológicas, como as falhas, para confirmação de sua qualidade. Vale salientar que algumas pedreiras se situam próximas a zonas de falhas porque muitas vezes há a proximidade de rodovias que facilitam o transporte dos seus materiais e conseqüentemente o frete e a competitividade.

Por fim este estudo teve a intenção de contribuir para esclarecer algo a respeito do problema de reação álcali-agregado, pois se vê a necessidade de políticas de esclarecimento do problema dessa reação no meio técnico local com o intuito de envolver todos a auxiliar ou minimizar as ocorrências de tal patologia na região do estado de Pernambuco. Abaixo serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Verificar o que ocorre com estruturas executadas com estes agregados ensaiados, na realidade do campo;
- O estudo e mapeamento direcionado e quantificado de área composta por granitóides não deformados são necessários para que atendam aos requisitos de inocuidade à reação álcali-agregado;
- Realização de ensaios de expansão utilizando-se apenas pegmatitos de feldspatos (plagioclásio ou K-feldspato) como agregado para avaliar sua efetiva contribuição na RAA;
- Utilização do agregado reativo com alto teor de quartzo recristalizado (amostra 1-Vitória) como *finos* para tentar atenuar seus efeitos deletérios conforme aconselha Andriolo (2006).

REFERÊNCIAS

1. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society For Testing and Materials. ASTM C-1260/01: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method), 2001.
2. _____. ASTM C295/03: Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, ASTM International, 2003.
3. AMO, D. G.; PÉREZ, C. B. *Diagnosis of the alkali-silica reactivity potential by means of digital image analysis of aggregate thin sections*. Cement and Concrete Research, v. 31, p. 1449-1454, 2001.
4. ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana do Recife. In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro: IBRACON/CBGB*, 2006.
5. ANDRADE, T.; REGO SILVA, J. J.; HASPARYK, N. P.; SILVA, C. M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializado na Região Metropolitana do Recife. In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro: IBRACON/CBGB*, 2006.
6. ANDRIOLO, F. R. Agregado deletério - possibilidade(s) segura(s) de uso. II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro: IBRACON/CBGB*, 2006.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.
8. _____. NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 1-7. Rio de Janeiro, 2008.
9. _____. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
10. **BRASIL**. Disponível em <http://pwww.portalbrasil.net/brasil_geologia.htm>. Acesso em 16/04/2007.
11. BROEKMANS, M. A. T. M. *Structural properties of quartz and their potential role for ASR*. Materials Characterization, v. 53, p. 129-140, 2004.
12. CÁNOVAS, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. Coordenação técnica: L. A Falcão Bauer. Ed. PINI, São Paulo, 1988.

13. CLARK JR, S. P. Estrutura da Terra. Serie de textos básicos de geociências, Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 1973. 121p.
14. CONSTANTINER, D.; DIAMOND, S. *Alkali release from feldspars into pore solutions*. Cement and Concrete Research, v. 33, p. 549-554, 2003.
15. DANA, J. D. Manual de mineralogia. Vol. 2. Tradução de Rui Ribeiro Franco. Ao Livro Técnico S.A e Editora da Universidade de São Paulo. p. 355-642, Rio de Janeiro, 1969.
16. DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. Minerais constituintes das rochas. Tradução de Carlos A. R. Macedo. Edição da Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2000. 727p.
17. DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. *The chemistry of alkali-aggregate reaction*. Cement and Concrete Research, v. 11, n. 3, p. 1-9, 1981.
18. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. NORMA DNIT 090/2006 – ES. Patologias do concreto – Especificação de serviço. Autor: Diretoria de Planejamento e Pesquisa / IPR. Rio de Janeiro, 2006.
19. DIAMOND, S. *A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions*. Cement and Concrete Research, v.5, p. 329-346, 1975.
20. ERNST, W. G. Minerais e Rochas. Editora Edgard Blucher. Tradução de Evaristo Ribeiro Filho. São Paulo, 1988. 162p.
21. FOURNIER, B.; NKINAMUBANZI, P.; LU, D.; THOMAS, M.D.A.; FOLLIARD, K.J.; IDEKER, J.H. Evaluating Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates – How Reliable are the Current and New Test Methods ? In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro: IBRACON/CBGB*, 2006.
22. FRASCÁ, M.H.B.O.; SARTORI, P.L.P. Minerais e rochas. In: Geologia de Engenharia, 1998, São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 15-38, CNPQ, FAPESP, 1998.
23. FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaio e propriedades. Editor: Walton Pacelli de Andrade/PINI, Cap. 17, São Paulo, 1997.
24. GILLOTT, J. E. *Alkali-reactivity problems with emphasis on Canadian aggregates*. Engineering Geology, v. 23, p. 29-43, 1986.
25. GOMES, H. A. Mapa Geológico do estado de Pernambuco. Companhia de pesquisa de recursos minerais. Serviço Geológico do Brasil. 2001.

26. HASPARYK, N. P. Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado: efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa. 1999. 281p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
27. HELENE, P.; PEREIRA, F.; CASTRO, P. AAR in Brazilian Bridge Foundations Tests and Rehabilitation Procedures. In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro: IBRACON/CBGB*, 2006.
28. KERRICK, D. M.; HOOTON, R. D. *ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: Results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar tests*. Cement and Concrete Research, v. 22, n. 5, p. 949-960, 1992.
29. KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: 1º SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Escola Politécnica da USP, p.127-138, 1986.
30. KIHARA, Y.; SCANDIUZZI, L. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, v. 1, p. 319-337, 1993.
31. KORKANÇ, M; TUGRUL, A. *Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity*. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 505-512, 2004.
32. LEEMANN, A.; HOLZER, L. *Alkali-aggregate reaction – identifying reactive silicates in complex aggregaa by ESEM obsevation of dissolution features*. Cement and Concrete Composites, v. 27, p. 796-801, 2005.
33. LOCZY, L.; LADEIRA, E. A. Geologia Estrutural e introdução a geotectônica. Ed. Edgard Blucher, São Paulo. CNPq, Rio de Janeiro, 1980. 528p.
34. MACHADO, R.; SILVA, M. E. Estruturas em rochas. In: Geologia de Engenharia, 1998, São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, CNPQ, FAPESP, 1998.
35. MADUREIRA F, J. B.; ATENCIO, D.; McREATH, I. Minerais e rochas: constituintes da Terra sólida. In: Decifrando a Terra. Organizadores: Wilson Teixeira et at. Oficina de textos, p. 27-42, São Paulo, 2000.
36. MAGALHAES, F. S.; CELLA. P. R. Estruturas dos maciços rochosos. In: Geologia de engenharia, 1998, São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 39-56, CNPQ, FAPESP, 1998.
37. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
38. MONTEIRO, J. P. M.; SHOMGLIN, K.; WENK, H. R.; HASPARYK, N. P. *Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction*. ACI Materials Journal, v. 98, n. 2, 2001.

39. NEVES, S.P.; MARIANO, G. *Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: the pernambuco lineament, northeastern brazil*. Journal of Structural Geology, v. 21, p. 1369-1383, 1999.
40. NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª edição, PINI, São Paulo, 1997. 828p.
41. OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G. *An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates*. Cement and Concrete Research, v. 16, p. 181-189, 1986.
42. OLIVEIRA ANDRADE, M. C. Atlas escolar de Pernambuco. Editora GRAFSET, João Pessoa, 2003.
43. OWSIAK, Z. *Alkali-aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate*. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 7-11, 2003.
44. PASSCHIER, C. W; TROUW, R. A. J. Micro-tectonics. Springer, 1996.
45. PECCHIO, M.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F.; ANDRADE, T. Produtos da Reação Álcali-Silicato em Concretos de Edificações da Região do Grande Recife – PE. In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro: IBRACON/CBGB*, 2006.
46. PIRES SOBRINHO, C. W. A.; GALVÃO, S. P.; SILVA, J. M. R. Microscopia Eletrônica como ferramenta para identificação de reações deletérias nos concretos – Estudo de casos nos blocos de fundações de edifícios no Recife. In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro: IBRACON/CBGB*, 2006.
47. PONCE, J. M.; BATIC, O. R. *Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate*. Cement and Concrete Research, v. 36, p. 1148-1156, 2006.
48. RODRIGUES, E. P.; KIHARA, Y.; SBRIGHI, C. N. A reatividade álcali-agregado de rochas “granitóides” e “quartzíticas”: proposta de índice de reatividade potencial. In: Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1997, Goiânia. Goiás. CBGB/FURNAS, p.151-159, 1997.
49. SHAYAN, A. *Alkali-reactivity of deformed granitic rocks: a case study*. Cement and Concrete Research, v. 23, n. 5, p. 1229-1236, 1993.
50. SHON, C. S.; ZOLLINGER, D. G.; SARKAR, S. L. *Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity*. Cement and Concrete Research, v. 32, p. 1981-1987, 2002.

51. TAMBELLI, C. E.; SCHNEIDER, J. F.; HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M. *Study of the structure of alkali-silica reaction gel by high-resolution NMR spectroscopy*. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 352, p. 3429-3436, 2006.
52. THOMSON, M. L.; GRATAN-BELLEW, P. E. *Anatomy of a porphyroblastic schist: Alkali-silica reactivity*. Engineering Geology, v. 35, p. 81-91, 1993.
53. TIECHER, F.; VENQUIARUTO, S.; SILVA, L. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da Utilização do Cimento de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos no Combate à Reação Álcali-Agregado. In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro*: IBRACON/CBGB, 2006.
54. TIECHER, F.; DAL MOLIN, D. C. C. Método de Ensaio da ASTM C 1260: Avaliação das Idades Prescritas para o Estabelecimento da Potencialidade Reativa dos Agregados. In: II Simpósio Sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 2006, Rio de Janeiro. *Anais ...Rio de Janeiro*: IBRACON/CBGB, 2006.
55. VALDUGA, L. Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativo do estado de São Paulo. São Paulo, 2002. 213p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.
56. VALVERDE, F., M. Agregados para a construção civil. Balanço mineral brasileiro, 2001. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em 12-11-2007.
57. WANG, H.; GILLOTT, J. E. *Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide*. Cement and Concrete Research, v. 21, n. 4, p. 647-654, 1991.
58. WANG, Y.; YU, G.; DENG, M.; TANG, M.; LU, D. *The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete*. Cement and Concrete Composites, v. 30, p. 353-359, 2007.
59. WIGUM, B. J. *Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks their use for predicting alkali-reactivity in concrete*. Engineering Geology, v. 40, p. 195-214, 1995.
60. WIGUM, B.J.; PEDERSEN, L. T.; GRELK, B.; LINDGARD, J. State-of-art report: Key parameters influencing the alkali aggregate reaction. SINTEF Building and infrastructure. Report 2.1, 2006. Disponível em <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Partner/Report%202.1%20-%20Final%20-%20A06018.pdf>. Acesso em 04-08-2007.