

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado

Francieli Tiecher

Porto Alegre
2010

FRANCIELI TIECHER

**INFLUÊNCIA DO GRAU DE CRISTALINIDADE E
DEFORMAÇÃO DO QUARTZO NO DESENCADEAMENTO
DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientação: Prof.^a Dr.^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

Co-orientação: Prof.^a Dr.^a. Márcia Elisa Boscato Gomes

Porto Alegre
2010

T559i Tiecher, Francieli

Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado / Francieli Tiecher. – 2010.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2010.

Orientador: Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Coorientação: Profa. Dra. Márcia Elisa Boscato Gomes

1. Concreto – Reação álcali-agregado. 2. Rochas vulcânicas. 3. Rochas graníticas. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Gomes, Márcia Elisa Boscato, coorient. III. Título.

CDU-691.32(043)

Francieli Tiecher

**INFLUÊNCIA DO GRAU DE CRISTALINIDADE E
DEFORMAÇÃO DO QUARTZO NO DESENCADEAMENTO
DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de abril de 2010

Prof^ª. Denise C. C. Dal Molin
Dra. pela USP
orientadora

Prof^ª. Márcia E. B. Gomes
Dra. pela UFRGS
co-orientadora

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Angela Borges Masuero (PPGEC-UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Milton Luiz Laquintinie Formoso (PPGEO-UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Nicole Pagan Hasparyk (FURNAS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Vladimir Paulon (UNICAMP)
Ph.D. pela University of California at Berkeley

Ao meu pai, José Valdemar, meu exemplo de força, de amor incondicional... meu porto seguro.

À minha mãe, Inês, energia divina em minha vida.

Ao meu marido, Vinícius, companheiro desde o princípio.

AGRADECIMENTOS

Com toda certeza eu não teria chegado até aqui sem o apoio de muitas pessoas. Por isso, preciso agradecer a todos os que fizeram o meu sonho se tornar realidade. Tive muita sorte porque encontrei pessoas incríveis, exemplos de competência em suas áreas de atuação dentro do meio acadêmico. Além, é claro, dos amores e dos amigos, que estiveram ao meu lado em todos os momentos nestes quatro anos.

Primeiramente agradeço ao CNPQ pelo auxílio financeiro. Obrigada também ao PPGEC e ao NORIE por terem me propiciado a oportunidade de fazer o doutorado.

Denise e Márcia, preciso agradecer à sua orientação, firmeza e competência. Admiro sua postura, não somente profissional e ética, mas também diante da vida. Tive muita sorte de ter estado com vocês neste trabalho. Espero que continuemos juntas em outros, que certamente virão. Muito obrigada pela **amizade**, por terem ouvido minhas lamentações, por terem confiado em mim.

Obrigada Nicole, pela ajuda dada, de forma irrestrita, a esta pesquisa, com seu modo eficiente e competente, que é reconhecido por todos os que contigo convivem. Além disso, preciso agradecer por teres me convidado para participar do projeto FURNAS/ANEEL.

Gostaria de agradecer ao professor Paulo Monteiro, por estar sempre disposto a contribuir para este trabalho. Agradeço também ao Luis Eiger, José Schneider, Vladimir Paulon, Helena Carasek, Tiago e Wilson, que fizeram parte da equipe do projeto FURNAS/ANEEL. Já tenho saudades das nossas reuniões, das risadas e do enorme aprendizado que o seu convívio proporcionou. À Cristiane e ao Danilo, exemplos de pessoas que não medem esforços para facilitar a conclusão de uma tarefa de maneira competente. Agradeço sua disponibilidade, foi muito bom ter conhecido vocês.

Ao Rogério pela ajuda nas análises de XANES e EXAFS. Passamos momentos ‘inesquecíveis’ juntos, madrugadas e madrugadas em claro no LNLS.

Quero fazer um agradecimento **especial** à Renata Florindo. Rê, você não existe! As análises através de RNM não seriam possíveis sem o seu trabalho. Obrigada por tudo que me ensinaste. Nunca vou esquecer os nossos ‘papos’ pelo *msn*. Espero que possamos continuar nosso trabalho em conjunto.

Agradeço ao Paulo Rolin, uma pessoa divertida, que é de Curitiba, mas tem a cara de Floripa... Obrigada por ter se disposto a me ajudar com as análises pelo método químico.

Agradeço ao Gilberto, do CECO, pelo auxílio na separação dos minerais. Por ser uma pessoa divertida, que tornou um trabalho super cansativo muito mais leve. Ao pessoal do Laboratório de Geoquímica: prof. Norberto Dani, Luiz e, em especial, ao Ronaldo. Muito obrigada pela ajuda com o espectrofotômetro visível. Obrigada à equipe do Laboratório de Difração de Raios X: prof. André Mexias, Renato, Jorge e Elissa.

Agradeço o auxílio da Juce (Laboratório de Microsonda Eletrônica), da Aline (Centro de Microscopia Eletrônica (MET)) e do Gerson (Laboratório de Processamento Mineral).

Preciso agradecer do fundo do meu coração à Dulce. Além de professora de inglês, você se tornou uma amiga, com quem pude contar num dos momentos mais especiais da minha vida. Você é uma daquelas pessoas especiais que não encontramos por acaso.

Agradeço à Lenise, pela amizade de sempre. Sou feliz por tê-la 'por perto', mesmo que seja via e-mail.

À minha amiga Lucília, sempre ajudando todo mundo, tanto para coisas pessoais, quanto da pesquisa. Obrigada pelos ensinamentos que só a sua experiência e **sensibilidade** poderiam trazer.

Agradeço à Cris Pauletti, uma amiga com quem pude contar mesmo quando um oceano nos separava, você mora no meu coração! Geilma, obrigada pela amizade e toda ajuda competente com os modelos. Ana Paula, suas palavras de incentivo e carinho fizeram eu me sentir mais segura, muito obrigada. Simone Venquiaruto, tenho muita saudade de ti e das nossas conversas, muito obrigada pela torcida e pelo pensamento positivo!

Lu Cordeiro, eu gosto MUITO de você! Sua amizade é muito importante pra mim! Obrigada pela ajuda com os refinamentos (mesmo os que não deram muito certo), por ter ouvido minhas lamentações, por ter me feito rir e me divertir.

Amigos do NORIE, preciso agradecer a vocês por terem estado comigo nesta caminhada. Prof. Angela, sempre tão solícita e querida com todos. Anderson e Mauro, que se tornaram amigos, não medem esforços para ajudar, são alunos brilhantes, tenho certeza que serão

ótimos engenheiros. Agradeço aos laboratoristas Éder, Alexandre, seu Gilmar e, em especial, ao Airton. Colegas norianos mais próximos, que almoçaram comigo no RU, repartiram seu tempo na sala de convivência ou seu espaço na sala de materiais: Angela Piovesan, Alexandre Vargas, Azambuja, Carina, Cristiano, Daniel, Eugênia, Ju Senisse, Laís, Letícia, Lu Pandolfo, Márcia Pretto, Salvador, Paulo Jorge, Raquel e Simone.

Agradeço ao Ricardo e à Zuza, pelo pensamento positivo, preocupação... visitas a Porto Alegre. Sinto-me parte da sua família... Obrigada!!! Cunhados: Guga, Felipe e Rê, obrigada pela torcida.

Muito obrigada ao Édio e ao Ernesto, pela convivência ao longo de todos esses anos, sempre dispostos a ajudar e dar uma palavra de incentivo. À Cris, pelo seu jeito alegre e comunicativo. Vocês são especiais porque cuidaram de pessoas que são MUITO especiais para mim.

Bruno, Milena e Martina, meus sobrinhos amados, agradeço por terem trazido momentos alegres à minha vida, especialmente nesse período da tese.

Liege, Andréia e Gustavo, meus queridos irmãos, preciso agradecer por vocês existirem na minha vida. Sou privilegiada por tê-los ao meu lado e pelo amor que dedicam a mim. Cada telefonema, cada encontro, cada palavra foi fundamental para que minhas forças se renovassem e eu conseguisse dar mais um passo. Sei que nada é por acaso e vocês certamente são espíritos de luz que Deus colocou para caminhar junto comigo. Amo muito vocês!

Pai, muito obrigada pela sua presença, mesmo distante. Considero esse título um pouco seu, que não teve oportunidade de estudar, mas que sempre incentivou os filhos a fazê-lo. Muito obrigada por ter me apoiado, por ter cuidado da nossa família de uma forma especial, conseguindo transmitir carinho, mesmo com seu jeito fechado. Te amo!

Ao Vini, amor de todas as horas, você me ouviu, me incentivou, me ajudou em tudo, inclusive com coisas da própria pesquisa (muitas vezes sem entender nada). Obrigada, meu amor, por ter formado comigo uma família. Admiro sua coragem, inteligência, sua forma de encarar a vida e seu jeito de superar os problemas... Sem você eu não teria chegado até aqui, você sabe que “se eu vivesse para sempre e todos os meus sonhos se realizassem as minhas lembranças de amor seriam de você”.

Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço.
Dave Weibaum

Há, verdadeiramente, duas coisas diferentes: saber e crer
que se sabe. A ciência consiste em saber; em crer que se
sabe está a ignorância.
Hipócrates

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
LISTA DE FIGURAS	16
LISTA DE TABELAS	26
RESUMO	27
ABSTRACT	28
1 INTRODUÇÃO	29
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	31
1.2 OBJETIVOS	34
1.3 ORIGINALIDADE	34
1.4 ESTRUTURA DA TESE	35
1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	36
2 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	37
2.1 A SÍLICA CONSTITUINTE DOS AGREGADOS	38
2.2 RELAÇÃO ENTRE AS ROCHAS UTILIZADAS COMO AGREGADOS E A RAA	41
2.3 MECANISMOS DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA	53
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	60
3.1 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS	62
3.1.1 Rochas para avaliação da influência do grau de cristalinidade do quartzo na RAA	62
3.1.2 Rochas para avaliação da influência da deformação do quartzo na RAA	65
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	68

3.2.1 Separação dos minerais	68
3.2.2 Ataque alcalino	71
3.3 ENSAIOS EMPREGADOS	71
3.3.1 Análise petrográfica por microscopia ótica	72
3.3.2 Difratomia de raios X (DRX)	72
3.3.2.1 Preparação das amostras para realização de DRX	74
3.3.2.2 Refinamento Rietveld	76
3.3.3 Análise química através de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX)	78
3.3.4 Ensaio de dissolução: método espectrofotométrico visível (NBR 9848/2004)	79
3.3.5 Método químico da ASTM C 289/1994	81
3.3.6 Ensaio acelerado das barras de argamassa (NBR 15577-4/2008) .	83
3.3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria por dispersão de energia (EDS)	87
3.3.8 Microscopia eletrônica de transmissão (MET)	90
3.3.9 Absorção de raios X de estruturas finas (XAFS)	92
3.3.10 Ressonância Nuclear Magnética (RNM)	99
4 INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE DO QUARTZO NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	101
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS VULCÂNICAS	101
4.1.1 Basalto BEV	102
4.1.1.1 Considerações sobre as características gerais do basalto BEV e sua relação com a RAA	107
4.1.2 Riolito RPF	108

4.1.2.1 Considerações sobre as características gerais do riolito RPF e sua relação com a RAA	113
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MESÓSTASE	114
4.2.1 Mesóstase com grãos microcristalinos (Mm)	118
4.2.2 Mesóstase constituída predominantemente por argilominerais (Ma)	122
4.2.3 Mesóstase com grãos visualizáveis (Mq)	125
4.3 AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA	128
4.3.1 Avaliação do potencial de expansão	128
4.3.2 Avaliação do potencial de dissolução de sílica	130
4.3.2.1 Avaliação da dissolução na argamassa	134
4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	139
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
5 INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO DO QUARTZO NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	150
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS GRANÍTIICAS	150
5.1.1 Granito M1	152
5.1.2 Milonito M2	156
5.1.3 Milonito M3	158
5.1.4 Considerações sobre as características gerais das rochas M1, M2 e M3 e sua relação com a RAA	161
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS GRAUS DE DEFORMAÇÃO DO QUARTZO	163
5.2.1 Avaliação dos graus de deformação do quartzo nas rochas M1, M2 e M3	167
5.3 AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA	176
5.3.1 Avaliação do potencial de expansão	177

5.3.2 Avaliação do potencial de dissolução de sílica	182
5.3.2.1 Avaliação da dissolução na argamassa	190
5.3.3 Avaliação das mudanças em escala atômica dos grãos de quartzo, de acordo com os diferentes graus de deformação, em função da RAA	195
5.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	200
5.4.1 Caracterização das rochas reativas e inócua em campo	200
5.4.1.1 Quartzito reativo da UHE de Furnas (QZITO)	201
5.4.1.2 Milonito reativo da UHE Apolônio Sales – Moxotó (MXT)	201
5.4.1.3 Milonito (reativo) de Recife (MRR)	202
5.4.1.4 Granito inócua de Recife (GNRR)	204
5.4.2 Comparação entre os graus de deformação do quartzo das rochas reativas e inócua em campo com as rochas M1, M2 e M3	204
5.4.3 Comparação entre o potencial de expansão das rochas reativas e inócua em campo com as rochas M1, M2 e M3	206
5.4.4 Comparação entre o potencial de dissolução das rochas reativas em campo e as rochas M1, M2 e M3	209
5.4.4.1 Avaliação da quantidade de sílica dissolvida	209
5.4.4.2 Avaliação das mudanças em escala atômica das amostras em função do ataque alcalino, através de RNM	211
5.4.4.3 Avaliação das mudanças em escala atômica das amostras em função do ataque alcalino, através de XANES e EXAFS	214
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	220
6 COMPARATIVO ENTRE A POTENCIALIDADE REATIVA DAS ROCHAS E AS CARACTERÍSTICAS DO QUARTZO CONSTITUINTE	222
6.1 DISSOLUÇÃO DE SÍLICA DO QUARTZO	222
6.2 POTENCIALIDADE DE EXPANSÃO DAS ROCHAS	225

6.3 PRODUTOS ORIUNDOS DA RAA	228
6.4 CONSIDERAÇÕES RELATIVAS À MINERALOGIA E À TEXTURA DAS ROCHAS	230
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	233
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	234
7.1 CONCLUSÕES	234
7.1.1 Influência da cristalinidade do quartzo na reação álcali- agregado	234
7.1.2 Influência da deformação do quartzo na reação álcali-agregado .	236
7.1.3 Conclusões gerais	238
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	239
REFERÊNCIAS	241
APÊNDICE A – Composição química dos minerais	255
APÊNDICE B – Análise modal das dos minerais constituintes das rochas estudadas	257
APÊNDICE C – Análise da reatividade potencial aos álcalis segundo a NBR 15577-3/2008	264
APÊNDICE D – Expansões do ensaio acelerado das barras de argamassa segundo a (NBR 15577-4/2008)	276
ANEXO A - Expansões do ensaio acelerado das barras de argamassa (NBR 15577-4/2008) das rochas reativas e inócuas em campo	282

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A= apatita

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL-BIG: Agência Nacional de Energia Elétrica – Banco de Informações de Geração

ANOVA: análise da variância

ASTM: American Society for Testing and Materials

B= biotita

Bb= banda de biotita

BEV: basalto oriundo da cidade de Estância Velha

BNRG: basalto não reativo de Goiás

BSE: *backscattered electrons*

C= celadonita

CECO: Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica

CME: Centro de Microscopia Eletrônica

CP I: Cimento Portland comum

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

DRX: difratometria de raios X

E= esmectita

EDS: *energy dispersive x-ray detector*

Ep= epidoto

EXAFS: *extended x-ray absorption fine structure*

FM1: feldspatos da rocha M1

FM2: feldspatos da rocha M2

FM3: feldspatos da rocha M3

FRX: fluorescência de raios X

GNRR: granito não reativo utilizado em fundações na cidade de Recife

GOF: *goodness-of-fit*

H= hematita

Kf= K-feldspato

LAPROM: Laboratório de Processamento Mineral

LNLS: Laboratório Nacional de Luz Síncrotron

M: molar

M1: granito (rocha menos deformada)

M2: protomilonito (rocha intermediariamente deformada)
M3: ortomilonito (rocha mais deformada)
Ma: mesóstase com predominância de argilominerais
MANOVA= análise múltipla de variância
MET: microscopia eletrônica de transmissão
MEV: microscopia eletrônica de varredura
Mm: mesóstase com predominância de grão micro a criptocristalinos não visualizáveis em microscopia ótica
Mq: mesóstase com a presença de grãos visualizáveis em microscopia ótica
MRR: milonito reativo utilizado em fundações na cidade de Recife
MXT: milonito utilizado no concreto da UHE Apolônio Sales (Moxotó)
NaOH: hidróxido de sódio
Na₂O_{eq}: equivalente alcalino (Na₂O+(0,658*K₂O))
NBR: Norma Brasileira
NORIE: Núcleo Orientado para Inovação da Edificação
Op: minerais opacos
P= paredes de deformação
pH: potencial hidrogeniônico
Pl= plagioclásio
PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Px= piroxênio
Q= quartzo
Qb= banda de quartzo
QGNRR: quartzo da rocha GNRR
QM1: quartzo da rocha M1
QM2: quartzo da rocha M2
QM3: quartzo da rocha M2
Qⁿ: parâmetro indicativo do grau de conectividade do silicato
QQZITO: quartzo da rocha QZITO
QRI: índice de reatividade para o quartzo
QZITO: quartzito utilizado no concreto da UHE Furnas
R= grãos recristalizados
R²= coeficiente de determinação
Ra: redução da alcalinidade
RAA: reação álcali-agregado

Rexp: índice esperado na avaliação da qualidade no refinamento Rietveld
RNM: ressonância nuclear magnética
RPF: riolito oriundo da cidade de Passo Fundo
Rwp: valor residual ponderado para avaliação da qualidade do refinamento Rietveld
Sd: sílica dissolvida
SG= subgrão
SXS: espectroscopia de absorção de raios X moles
Ti-M= Ti-magnetita
UC-Berkeley: University of California - Berkeley
UFG: Universidade Federal de Goiás
UFMT: Universidade Federal do Mato Grosso
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina
UHE: usina hidroelétrica
USP: Universidade de São Paulo
XAFS: *x-ray absorption fine structure*
XANES: *x-ray near-edge structure*

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: ataque das hidroxilas à sílica. (a) sílica cristalina; (b) sílica amorfa (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981)	37
Figura 02: relação entre a quantidade de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade do agregado (WAKIZAKA, 2000)	45
Figura 03: estágios do processo de deformação do quartzo (adaptado de PASSHIER; TROW, 1998)	47
Figura 04: imagens obtidas através de MET mostrando as paredes de deslocação de um grão de quartzo (WENK <i>et al.</i> , 2008)	47
Figura 05: figuras de pólo. (a) quartzo; (b) biotita (WENK <i>et al.</i> , 2008)	51
Figura 02: modelo proposto por Ichikawa e Miura (2007)	56
Figura 07: organização do programa experimental	61
Figura 08: localização da região de coleta das amostras de origem vulcânica (adaptado de Frank, 2008)	63
Figura 09: coleta das amostras de origem vulcânica. (a) e (b) basalto; (c) e (d) riolito	64
Figura 10: localização da região de coleta das amostras de origem granítica (PHILLIP; MACHADO, 2005)	65
Figura 11: coleta das amostras de origem granítica. (a) e (b) vista geral do local de coleta; (c) posicionamento das amostras no maciço rochoso; (d) detalhe dos níveis de deformação ..	66
Figura 12: separação dos minerais. (a) separador eletromagnético – retirada das micas; (b) colocação da amostra no bromofórmio puro; (c) quebra inicial da densidade do bromofórmio com a acetona – minerais misturados; (d) acerto da densidade adequada para separação dos minerais; (e) minerais sobrenadantes – feldspatos; (f) minerais afundados – quartzo	70
Figura 13: Lei de Bragg	73
Figura 14: separação dos minerais. (a) dispersão mineralógica em água; (b) desintegração em ultra-som; (c) processo de sedimentação das partículas; (d) coleta das partículas menores do que 1µm; (e) material obtido (argilas e/ou micas)	76
Figura 15: ensaio NBR 9848/2004. (a) espectrofotômetro visível; (c) amostras preparadas para curva de calibração do ensaio	80
Figura 16: classificação da potencialidade reativa dos agregados pela ASTM C 289/1994	82

Figura 17: etapas do ensaio da NBR 15577-4. (a) britadores: martelos (esquerda), mandíbulas (direita); (b) granulometrias obtidas após peneiramento; (c) mistura da argamassa; (d) fôrmas para moldagem; (e) moldagem; (f) banho para realização do ataque alcalino; (g) medição do comprimento; (h) corpos de prova após o ataque alcalino	86
Figura 18: representação esquemática da região de ionização gerada na interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra em MEV (adaptado de MALISKA, 2009)	87
Figura 19: micrografias da mesóstase (a) micrografia da mesóstase obtida em microscopia ótica de luz transmitida, luz natural, ampliação 40x (b) micrografia obtida por MEV com elétrons retroespalhados, ampliação 2000x (GOMES, 1996)	89
Figura 20: procedimentos para preparação das amostras para realização de MET, onde: (a) retirada da região de análise (~3mm de diâmetro); (b) eletropolimento; (c) posicionamento da amostra no anel de cobre; (d) amostra sobre o porta-amostra (adaptado de SILVEIRA, 2007)	91
Figura 21: esquema do experimento de XAFS (BUNKER, 1997)	92
Figura 22: representação esquemática das principais características dos espectros de XANES e EXAFS (MAZALI, 1998)	94
Figura 23: Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. (a) esquema de distribuição das linhas de luz em atividade; (b) acelerador de partículas; (c) imagem panorâmica do laboratório (LNLS, 2008)	97
Figura 24: porta amostra utilizado para realização de XAFS, onde: (a), (b), (c) linha de luz SXS; (d) porta-amostra utilizado; (e) disposição das amostras sobre o porta-amostra	98
Figura 25: micrografia das rochas vulcânicas, onde: Pl= plagioclásio; Px= piroxênio; Op= opaco (óxido de ferro); Q= quartzo; K-f= K-feldspato; M= mesóstase. (a) amostra basáltica (BEV); (b) amostra riolítica (RPF). Polarizador cruzado, ampliação 2,5x	102
Figura 26: micrografias do basalto BEV, onde: Pl= plagioclásio; Px= piroxênio; Op= opaco (Ti-magnetita); M= mesóstase. (a) imagem sob luz natural, ampliação 2,5x; (b) imagem sob polarizador cruzado, ampliação 1,6x	103
Figura 27: difratograma da amostra BEV	103
Figura 28: difratograma da porção orientada da rocha BEV	104
Figura 29: micrografias dos minerais do basalto BEV, onde: Pl= plagioclásio; Px= piroxênio; Op= opaco (Ti-magnetita). (a) imagem mostrando piroxênios aglomerados, polarizador cruzado; (b) imagem mostrando plagioclásios zonados e opacos de dimensões variadas, polarizador cruzado. Ampliação 5x	105
Figura 30: micrografias da mesóstase do basalto BEV, onde: Mm= mesóstase microcristalina; Ma= mesóstase com argilominerais; (a) contexto da mesóstase na rocha, polarizador cruzado, ampliação 5x; (b) detalhe da região da mesóstase, polarizador cruzado, ampliação 20x; (c) e (d) mesóstase com argilominerais, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x	106

Figura 31: micrografias do riolito RPF, onde: Q= quartzo; Px= piroxênio; Pl= plagioclásio; K-f= K-feldspato; Mm= mesóstase microcristalina. (a) imagem da rocha sob luz natural; (b) imagem da amostra sob luz polarizada. Ampliação 2,5x	108
Figura 32: difratograma da rocha RPF	109
Figura 33: micrografias da mesóstase do riolito RPF, onde: Mq= mesóstase com grãos automorfos de quartzo; Ma= mesóstase com argilominerais; (a) contexto da mesóstase na rocha, polarizador cruzado, ampliação 2,5x; (b) detalhe da região da mesóstase, polarizador cruzado, ampliação 10x; (c) mesóstase com argilominerais, luz natural, ampliação 10x; (d) detalhe da mesóstase com argilominerais, luz natural, ampliação 20x	110
Figura 34: difratograma da porção orientada da rocha RPF	111
Figura 35: micrografias dos minerais constituintes da rocha RPF, onde: Pl= plagioclásio; Q= quartzo; K-F= K-feldspato; Px= piroxênio. (a) contexto dos fenocristais na matriz, polarizador cruzado, ampliação 2,5x; (b) detalhe dos fenocristais, polarizador cruzado, ampliação 5x; (c) detalhe do piroxênio, polarizador cruzado, ampliação 10x	112
Figura 36: micrografia mostrando a distribuição da mesóstase intersticial na rocha BEV, onde Mq= mesóstase com grãos visualizáveis, Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, Mm= mesóstase com grãos microcristalinos. Micrografia obtida através de microscopia ótica, sob luz natural, ampliação 1,6x	114
Figura 37: micrografia mostrando a distribuição da mesóstase intersticial na rocha RPF, onde Mq= mesóstase com grãos visualizáveis, Mm= mesóstase com grãos microcristalinos. Micrografia obtida através de microscopia ótica, sob luz natural, ampliação 1,6x	115
Figura 38: micrografias em microscopia ótica da mesóstase Mm, onde: Mm= mesóstase com grãos microcristalinos, Pl= plagioclásio. (a) região contendo mesóstase Mm selecionada para análise, luz natural, ampliação 5x; (b) e (c) detalhe da mesóstase Mm, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x	118
Figura 39: análises da mesóstase Mm, onde: Mm= mesóstase com grãos microcristalinos, Pl= plagioclásio; Px= piroxênio. (a) micrografia da região contendo mesóstase Mm em microscopia ótica, luz natural, ampliação 10x; (b) micrografia da região contendo mesóstase Mm em MEV, ampliação 220x; (c) (d) espectros obtidos por EDS identificando quartzo e K-feldspato na mesóstase; (e) (f) espectros obtidos por EDS piroxênio e plagioclásio na matriz	119
Figura 40: presença de microgrãos na mesóstase Mm, onde Q= quartzo, K-f= K-feldspato. (a) micrografia obtida através de MEV por elétrons secundários, ampliação 5000x; (b) (c) espectros obtidos por EDS dos grãos de quartzo e K-feldspato	120
Figura 41: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Mm. (a) micrografia obtida em MEV da região da mesóstase Mm, ampliação 500x; (b) mapa identificando a localização do Si (quartzo); (c) mapa identificando a localização do K (K-feldspato); (d) mapa identificando a localização do Ca (plagioclásio e piroxênio); (e) mapa identificando a localização do Fe (piroxênio)	121

Figura 42: micrografias em microscopia ótica da mesóstase Ma, onde: Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, Px= piroxênio. (a) região selecionada para análise contendo mesóstase Ma, luz natural, ampliação 10x; (b) e (c) detalhe da mesóstase Ma, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x	122
Figura 43: presença de argilominerais na mesóstase Ma, onde E= esmectitas, Px= piroxênio. (a) micrografia obtida através de MEV, ampliação 330x; (b) microrgrafia obtida em MEV mostrando detalhe dos argilominerais, ampliação 1200x (c) (d) espectros obtidos por EDS das esmectitas e do piroxênio	123
Figura 44: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Ma. (a) micrografia obtida em MEV da mesóstase, ampliação 1200x; (b) mapa identificando o Si; (c) mapa identificando o K; (d) mapa identificando o Ca; (e) mapa identificando o Fe	124
Figura 45: micrografias em microscopia ótica da mesóstase Mq, onde: Mq= mesóstase com grãos visualizáveis em microscopia ótica, Px= piroxênio; Q= quartzo; Pl= plagioclásio. (a) região selecionada para análise contendo mesóstase Mq, polarizador cruzado, ampliação 10x; (b) e (c) detalhe da mesóstase Mq, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x	125
Figura 46: presença grãos bem cristalizados na mesóstase Mq, onde Mq= mesóstase com microgrãos visíveis em microscopia ótica, Q= quartzo, K-f= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Op= óxido de Fe (mineral opaco). (a) micrografia obtida através de MEV, ampliação 80x; (b) micrografia obtida em MEV mostrando detalhe da mesóstase Mq, ampliação 500x; (c) (d) (e) (f) espectros obtidos por EDS do quartzo, K-feldspato, plagioclásio e opaco	126
Figura 47: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Mq, onde Q= quartzo bem cristalizado. (a) micrografia obtida em MEV da região da mesóstase Mq, ampliação 500x; (b) mapa identificando a localização do Si; (c) mapa identificando a localização do K; (d) mapa identificando a localização do Ca; (e) mapa identificando a localização do Fe	127
Figura 48: expansão das rochas vulcânicas ao longo do tempo (ensaio NBR 15577-4)	128
Figura 49: sílica dissolvida x redução da alcalinidade das rochas vulcânicas (ASTM C 289)	131
Figura 50: sílica dissolvida nas rochas vulcânicas (ensaio NBR 9848)	133
Figura 51: dissolução das mesóstases Mm e Mq na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, Px= piroxênio, Op= mineral opaco, Pl= plagioclásio. (a) (c) micrografias obtidas em microscopia ótica sob luz natural da rocha BEV mostrando vazios deixados pelo gel da RAA e presença de mesóstase Ma, ampliação 2,5x e 5x; (b) (d) micrografias obtidas em microscopia ótica sob luz natural mostrando detalhes das regiões com mesóstase Ma e vazios, ampliação 5x e 10x	134
Figura 52: mesóstase Ma na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, E= esmectita, Q= quartzo. (a) micrografia obtida em microscopia ótica sob luz natural da rocha mostrando vazios deixados pelo gel da RAA e presença de mesóstase Ma, ampliação 5x; (b) (c) (d) micrografias obtidas em MEV detalhando a presença de grãos de quartzo e esmectitas na mesóstase Ma, ampliação 100x, 1300x e 700x; (e) (f) espectros obtidos por EDS dos grãos de quartzo e esmectita	135

Figura 53: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Ma contida em rocha imersa na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo bem cristalizado. (a) micrografia obtida em MEV da região da mesóstase Ma, ampliação 700x; (b) mapa identificando a localização do Si; (c) mapa identificando a localização do K; (d) mapa identificando a localização do Ca; (e) mapa identificando a localização do Al	136
Figura 54: presença de grãos de quartzo nos poros da argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Px= piroxênio, Q= quartzo bem cristalizado. (a) micrografia obtida em MEV do poro da argamassa, ampliação 80x; (b) micrografia obtida em MEV do grão de quartzo presente no poro, ampliação 1000x; (c) (d) (e) (f) espectros obtidos por EDS do gel da RAA, do piroxênio, do quartzo e da região vazia	137
Figura 55: micrografias obtidas em microscopia ótica do basalto não reativo BNRG, onde: Pl= plagioclásio, Px= piroxênio, Op= opaco (óxido de ferro), A= argilomineral, V= vidro vulcânico. (a) luz natural; b) polarizador cruzado. Ampliação 2,5x	140
Figura 56: difratograma da amostra BNRG	141
Figura 57: comparativo entre difratogramas das amostras vulcânicas. (a) amostra BNRG; (b) amostra BEV; (c) amostra RPF	142
Figura 58: micrografias obtidas em microscopia ótica comparando as mesóstases e o vidro vulcânico, onde: V= vidro vulcânico, Mm= mesóstase com grãos microcristalinos, Ma= mesóstase com predominância de argilominerais, Mq= mesóstase com grãos melhor cristalizados. (a) (b) aspecto do vidro vulcânico sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 10x; (c) (d) aspecto da mesóstase Mm sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x; (e) (f) aspecto da mesóstase Ma sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x; (g) (h) aspecto da mesóstase Mq sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 10x	144
Figura 59: composição química do vidro vulcânico presente na rocha BNRG, onde: V= vidro vulcânico, Pl= plagioclásio, E= esmectita. (a) (b) micrografias obtidas em microscopia ótica sob luz natural e polarizador cruzado de região contendo vidro vulcânico, ampliação 5x; (c) (d) micrografias obtidas em MEV de região contendo vidro vulcânico, ampliação 85x e 3000x; (e) (f) (g) (h) espectros do vidro vulcânico obtidos por EDS	145
Figura 60: mapeamento dos elementos químicos presentes no vidro vulcânico da amostra BNRG. (a) micrografia obtida em MEV da região do vidro vulcânico 3000x; (b) mapa identificando a localização do Si; (c) mapa identificando a localização do K; (d) mapa identificando a localização do Ca; (e) mapa identificando a localização do Fe; (f) mapa identificando a localização do Al	146
Figura 61: micrografia obtida por microscopia ótica sob luz natural dos argilominerais presentes na rocha BNRG, onde E= esmectita, C= celadonita. Ampliação 5x	147
Figura 62: micrografias obtidas em microscopia ótica sob polarizador cruzado, apresentando as texturas das amostras de origem granítica, onde: Q= quartzo; B= biotita; K-f= K-feldspato; Pl= plagioclásio. (a) amostra M1; (b) amostra M2; (c) amostra M3. Ampliação 2,5x	151

Figura 63: micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha M1, onde K-f= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita. Ampliação 1,6x	152
Figura 64: difratograma da amostra M1	153
Figura 65: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado evidenciando as características dos minerais da rocha M1, onde Kf= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita, M= mirmequita. (a) K-feldspato pertitzado e K-feldspato com macla xadrez, ampliação 2,5x; (b) presença de mirmequita entre K-feldspato e plagioclásio, ampliação 10x; (c) plagioclásio maclado com inclusão de quartzo deformado, ampliação 5x; (d) biotita, ampliação 10x; (e) quartzo com extinção ondulante, chegando a formar bandas de deformação, e grãos recristalizados nas bordas, ampliação 2,5x	155
Figura 66: micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha M2, onde K-f= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita. Ampliação 1,6x	156
Figura 67: difratograma da amostra M2	156
Figura 68: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado evidenciando as características dos minerais da rocha M2, onde Kf= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita, I= ilita, R= recristalização. (a) K-feldspato pertitzado apresentando recristalização de quartzo nas sombras de pressão, ampliação 2,5x; (b) plagioclásio, ampliação 2,5x; (c) biotita, ampliação 5x; (d) quartzo muito deformado, chegando a formar subgrãos e com grãos recristalizados nas bordas, ampliação 5x	158
Figura 69: micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha M3, onde Kf= K-feldspato, Qb= banda de quartzo, Bb= banda de biotita. Ampliação 1,6x ...	159
Figura 70: difratograma da amostra M3	159
Figura 71: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado evidenciando as características dos minerais da rocha M3, onde Kf= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita, R= recristalização. (a) K-feldspato cataclasado e com leve extinção ondulante, ampliação 2,5x; (b) plagioclásio alterado, ampliação 2,5x; (c) biotita agrupada em bandas, ampliação 5x; (d) quartzo agrupado em bandas, ampliação 1,6x	161
Figura 72: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando os diferentes graus de deformação do quartzo, onde Q= quartzo, R= quartzo recristalizado. (a) (b) grão sem deformação, ampliação 2,5x e 5x; (c) grão com extinção ondulante leve, ampliação 2,5x; (d) grão com intensa extinção ondulante, formando bandas de deformação, ampliação 5x; (e) grão com forte extinção ondulante, chegando a formar subgrãos, ampliação 5x; (f) recristalização de novos grãos a partir de um grão maior, ampliação 5x	165
Figura 73: resumo dos graus de deformação do quartzo definidos para o trabalho	166
Figura 74: comparação entre os diferentes graus de deformação do quartzo presente nas rochas M1, M2 e M3	169

Figura 75: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando as feições dos graus 3 e 4 de deformação do quartzo, onde SG= subgrão, R= recristalizado. (a) (b) grau 3; (c) (d) grau 4	171
Figura 76: micrografias evidenciando a formação de paredes de deformação e subgrãos no grão de quartzo com deformação grau 1, onde Q= quartzo, SG= subgrãos, P= paredes de deformação, R= grãos recristalizados. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando grão com extinção ondulante leve (grau 1), ampliação 1,6x; (b) (c) (d) micrografias obtidas através de MET evidenciando a formação de subgrãos, paredes de deslocação e grãos recristalizados, ampliação 50.000x, 60.000x e 75.000x	172
Figura 77: micrografias evidenciando a formação de paredes de deformação e subgrãos no grão de quartzo com deformação grau 2, onde Q= quartzo, SG= subgrãos, P= paredes de deformação. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando grão com forte extinção ondulante (grau 2), ampliação 5x; (b) (c) micrografias obtidas através de MET evidenciando a formação de subgrãos, ampliação 40.000x e 60.000x; (d) (e) (f) micrografias obtidas através de MET evidenciando a formação paredes de deslocação, ampliação 60.000x, 75.000x e 150.000x	174
Figura 78: micrografias obtidas através de microscopia ótica evidenciando a presença de inclusões fluidas nos grãos de quartzo deformados, onde F=fluido. (a) micrografia da região contendo quartzo deformado e recristalizado, polarizador cruzado; (b) (c) grão de quartzo deformado com inclusões nas bandas de deformação, polarizador cruzado e luz natural; (d) (e) grão de quartzo recristalizado sem inclusões fluidas, polarizador cruzado e luz natural (adaptado de MESQUITA, 1996)	176
Figura 79: expansão das rochas M1, M2, M3 ao longo do tempo no ensaio da NBR 15577-4	177
Figura 80: efeito do tipo de rocha nas expansões do ensaio da NBR 15577-4	179
Figura 81: relação entre as expansões do ensaio da NBR 15577-4 aos 30 dias e os graus de deformação dos grãos	180
Figura 82: curvas representativas do modelo obtido para avaliar a influência dos graus de deformação do quartzo nas expansões da RAA para as rochas M1, M2 e M3	182
Figura 83: ajuste através de refinamento Rietveld. (a) QM1; (b) QM2; (c) QM3	184
Figura 84: ajuste através de refinamento Rietveld. (a) FM1; (b) FM2; (c) FM3	185
Figura 85: sílica dissolvida x redução da alcalinidade das amostras de quartzo (ASTM C 289)	186
Figura 86: sílica dissolvida x redução da alcalinidade das amostras de feldspato (ASTM C 289)	187
Figura 87: relação entre a dissolução de sílica e a deformação dos grãos quartzo	190

Figura 88: micrografias obtidas através de microscopia ótica evidenciando a dissolução do quartzo nas argamassas submetidas ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo, Pl= plagioclásio, Kf= K-feldspato, M= mica. (a) (b) luz natural e polarizador cruzado, ampliação 2,5x; (c) (d) polarizador cruzado, ampliação 5x	191
Figura 89: fragmento da rocha disseminado na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Q= quartzo. (a) micrografia obtida em microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha mostrando vazios pelo quartzo dissolvido, ampliação 5x; (b) (c) micrografias obtidas em MEV detalhando quartzo ainda não dissolvido, ampliação 75x e 300x; (d) (e) (f) (g) espectros obtidos por EDS do quartzo, do vazio, do plagioclásio, e do K-feldspato	192
Figura 90: fragmento de rocha disseminada na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Kf= K-feldspato, Q= quartzo. (a) micrografia obtida em microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha mostrando vazios dentro do grão de quartzo, ampliação 5x; (b) micrografia obtida em MEV detalhando a presença de grãos de quartzo parcialmente dissolvido, ampliação 130x; (c) (d) espectros obtidos por EDS do grão de quartzo, e do K-feldspato	193
Figura 91: dissolução do quartzo por fluidos alcalinos, onde: Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, C= carbonato, Q= quartzo. (a) fotografias da rocha epissienito (MEXIAS, 2000); (b) micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado do epissienito (MEXIAS, 2000); (c) micrografias obtidas em microscopia ótica sob polarizador cruzado de fragmentos de rocha após o ensaio da NBR 15577-4, ampliação 5x e 10x	194
Figura 92: classificação dos silicatos quanto à conectividade Si-O-Si – Q ⁿ (FLORINDO, 2009)	195
Figura 93: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ²⁹ Si, da amostra QM1	197
Figura 94: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ²⁹ Si, da amostra QM2	197
Figura 95: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ²⁹ Si, da amostra QM3	198
Figura 96: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha QZITO, onde Q= quartzo, M= muscovita. (a) textura do QZITO, ampliação 2,5x; (b) detalhe dos grãos de quartzo e micas, ampliação 20x	201
Figura 97: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha MXT, onde Q= quartzo, Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, B= biotita, M= muscovita. (a) textura do MXT A, ampliação 2,5x; (b) textura do MXT B, ampliação 2,5x ..	202
Figura 98: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha MRR, onde Q= quartzo, Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Bb= banda de biotita, SP= sombra de pressão. (a) textura do MRR, ampliação 2,5x; (b) detalhe do K-feldspato com extinção ondulante, ampliação 10x; (c) detalhe das sombras de pressão, ampliação 20x	203

Figura 99: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha GNRR, onde Q= quartzo, Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Bb= banda de biotita. (a) textura do GNRR, ampliação 2,5x; (b) detalhe das bandas de biotitas, ampliação 2,5x	204
Figura 100: quantidades de grãos de quartzo com diferentes graus de deformação nas amostras QZITO, QMXT A, QMXT B, QMRR, QGNRR, QM1, QM2 e QM3	208
Figura 101: comparação entre a dissolução das amostras QZITO, QGNRR, QM1, QM2 e QM3 no ensaio da NBR 9848	210
Figura 102: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ²⁹ Si, da amostra QZITO	211
Figura 103: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ²⁹ Si, da amostra QGNRR	212
Figura 104: espectros obtidos por XANES das amostras QZITO, QGNRR e QM2 na borda do Si	215
Figura 105: espectros obtidos por XANES das amostras puras e atacadas com KOH	216
Figura 106: espectros obtidos por EXAFS, através de transformada de Fourier, das amostras puras e atacadas com KOH	217
Figura 107: espectros obtidos por EXAFS das amostras puras e atacadas com KOH. (a) primeiros vizinhos; (b) segundos vizinhos	218
Figura 108: espectros obtidos por EXAFS da amostra QGNRR pura e atacada com KOH	219
Figura 109: solubilidade da sílica a 25°C (KRAUSKOPF, 1972)	223
Figura 110: comparativo entre as expansões do ensaio da NBR 15577-4 das rochas M1, M2, M3 e RPF ao longo do tempo	225
Figura 111: poro parcialmente preenchido por gel proveniente da RAA presente na argamassa da rocha BEV submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado, ampliação 10x; (b) (c) micrografias obtidas em MEV, ampliação 130x e 1000x; (d) (e) espectros obtidos por EDS do gel da RAA e de grãos de quartzo presentes no poro	229
Figura 112: fragmento da rocha M2 contendo gel proveniente da RAA presente na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob luz natural, ampliação 5x; (b) micrografia obtida em MEV, ampliação 75x; (c) (d) espectros obtidos por EDS do gel da RAA e de grão de quartzo não dissolvido	230

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: frações granulométricas prescritas pela NBR 15577-4/2008	84
Tabela 02: caracterização química do cimento	84
Tabela 03: caracterização física do cimento	84
Tabela 04: caracterização mecânica do cimento	85
Tabela 05: análise química por FRX do basalto BEV	107
Tabela 06: análise química por FRX do riolito RPF	113
Tabela 07: quantidade percentual das diferentes mesóstases observadas nas amostras vulcânicas	116
Tabela 08: características gerais dos diferentes tipos de mesóstase	117
Tabela 09: sílica livre constituinte das rochas BEV e RPF	132
Tabela 10: análise modal das rochas vulcânicas antes e após o ensaio da NBR 15577-4	138
Tabela 11: composição química das rochas M1, M2 e M3	162
Tabela 12: análise múltipla de variância do efeito dos graus de deformação nas rochas M1, M2 e M3	168
Tabela 13: percentuais das diferentes texturas dos grãos de quartzo observadas nas rochas M1, M2 e M3	170
Tabela 14: análise da variância dos efeitos intervenientes nas expansões do ensaio da NBR 15577-4	179
Tabela 15: quantificação das fases presentes nas amostras de quartzo e feldspatos, através de refinamento Rietveld	183
Tabela 16: dissolução de sílica pelo método da NBR 9848	189
Tabela 17: quantificação dos sítios cristalinos e amorfos dos silicatos obtida através de RNM	199
Tabela 18: comparação entre os diferentes graus de deformação do quartzo para as rochas QZITO, MXT, MRR, GNRR, M1, M2 e M3	205
Tabela 19: expansão aos 30 dias das rochas QZITO, MXT, MRR, GNRR, M1, M2 e M3	207
Tabela 20: quantificação dos sítios cristalinos e amorfos dos silicatos obtida através de RNM	213

RESUMO

TIECHER, F. Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Este estudo se propôs a avaliar a influência da cristalinidade e da deformação do quartzo na ocorrência da reação álcali-agregado. A influência da cristalinidade do quartzo foi analisada através da mesóstase, material intersticial que constitui as rochas vulcânicas, que é um material composto por grãos sub-microscópicos de quartzo e feldspatos. Para tanto foram selecionadas duas rochas vulcânicas, constituídas por quartzo em diferentes quantidades e com diferentes graus de cristalinidade: um basalto, com pouca quantidade de sílica, sem quartzo livre e cuja mesóstase apresenta grãos pobremente cristalizados; e um riolito, com grande quantidade de sílica e de quartzo livre, além de uma mesóstase com grãos melhor cristalizados. A caracterização da cristalinidade do quartzo mostrou que a mesóstase, que tem aparência de material amorfo em microscopia ótica, apresenta diferentes feições quando observada através de microscopia eletrônica de varredura: mesóstase com grãos criptocristalinos de quartzo e K-feldspatos (Mm); mesóstase com grãos de quartzo e feldspato microcristalinos (Mq); mesóstase constituída predominantemente por argilominerais (Ma). Relacionando-se essas características com a reatividade das rochas verificou-se que o quartzo presente nas mesóstases Mm e Mq reage rápida e intensamente, sobressaindo-se à dissolução da mesóstase Mm, enquanto os grãos da mesóstase Ma são preservados. Através da compração dessas constatações, obtidas com o basalto e o riolito, com as características do material intersticial de um basalto inócuo, em ensaios acelerados e em campo, verificou-se que seu material intersticial da rocha inócua possui pouca quantidade de sílica livre (quartzo). Isso evidencia que a reatividade das rochas vulcânicas está relacionada à quantidade de sílica livre presente (quartzo) e a velocidade de ocorrência da reação com a cristalinidade do quartzo constituinte da mesóstase (Mm). A influência da deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado foi avaliada através do estudo de rochas graníticas com diferentes graus de deformação: uma rocha pouco deformada (granito), uma rocha com deformação intermediária (proto-milonito) e uma rocha muito deformada (ortomilonito). Os graus de deformação do quartzo foram caracterizados, através de microscopia ótica, como: grau 0= ausência de deformação; grau 1= grãos pouco deformados, com extinção ondulante leve; grau 2= quartzo muito deformado, com forte extinção ondulante, chegando a formar bandas de deformação; grau 3= forte deformação, com formação de subgrãos; grau 4= grãos recristalizados. O estudo mostrou que a presença preponderante de quartzo com grau 2 nas rochas denota uma maior velocidade de desencadeamento da reação álcali-agregado. A partir dessa constatação efetuou-se a avaliação das características texturais dos grãos de quartzo de rochas reativas em campo, verificando-se que quanto maior a quantidade de grãos com grau 2 mais rápida a ocorrência da reação em campo.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; características do quartzo; mesóstase; rochas vulcânicas; rochas graníticas.

ABSTRACT

TIECHER, F. Influence of the crystallinity and deformation of quartz on alkali-aggregate reaction. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

This research aims to study the influence of crystallinity and deformation of quartz to the occurrence of alkali-aggregate reaction. The influence of the crystallinity of quartz was analyzed through the interstitial material (volcanic glass/mesostase) into volcanic rocks. This material is composed by sub-microscopic grains of quartz and feldspars, thus it was selected a basaltic rock, with poor crystallized interstitial material and low silica content; and a rhyolitic rock, with better crystallized interstitial material and high silica content. The characterization of the crystallinity of the quartz showed that interstitial mesostase has appearance of amorphous material on the optical microscopy, but, at scanning electron microscopy it was observed the following features: mesostase with microcrystalline grains of quartz and K-feldspar (Mm); mesostase with better crystallized grains of quartz and K-feldspar (Mq); mesostase with clay predominantly (Ma). Reactivity potential tests showed that quartz in Mm and Mq react quickly and intensely, especially Mm, while quartz in Ma was preserved. Comparing these evidences, obtained with basalt and rhyolite, with interstitial material into innocuous basalt, it was found that interstitial material in innocuous rock has smaller amount of free silica (quartz). It proves that reactivity of volcanic rocks is related to the amount of free silica present into the rocks and poor crystallinity of quartz into mesostase make alkali-aggregate reaction quickness (Mm). The influence of the deformation of quartz on alkali-aggregate reaction was analyzed through granitic rocks with different degrees of deformation: a rock with very little deformation (granite), a medium deformed rock (proto-mylonite), a very deformed rock (ortho-mylonite). Deformation degree of quartz was characterized through optical microscopy as follows: order 0= absence of the deformation; order 1= slightly deformed grain (weak undulatory extinction); order 2= very deformed quartz, with strong undulatory extinction and forming deformation bands; order 3= very deformed quartz, with formation of sub-grains, order 4= recrystallized quartz. The study showed that rocks with most quartz 'order 2' denotes the development of alkali-aggregate reaction faster than rocks with other 'orders' deformation of the quartz. From this conclusion it was observed the textural characteristics of quartz grains in reactive rocks on the field, confirming that quartz with deformation bands cause alkali-aggregate reaction quickly.

Key-words: alkali-aggregate reaction; quartz characteristics; mesostase; volcanic rocks; granitic rocks.

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 30, quando foi descoberta, a reação álcali-agregado (RAA) vem se tornando um tema cada vez mais recorrente nos estudos a respeito das manifestações patológicas nas estruturas de concreto, isso porque o registro de estruturas por ela afetadas aumentou consideravelmente nos últimos anos.

Trata-se de uma reação química entre alguns minerais presentes nos agregados e os hidróxidos alcalinos, que são gerados durante a hidratação do cimento, presentes no concreto. Tal reação pode levar à fissuração das estruturas e, por conseqüência, comprometer sua durabilidade.

A RAA tornou-se bastante conhecida no meio técnico por ser “a manifestação patológica das barragens de concreto”. Isso se deve ao fato dela estar presente em muitas barragens ao redor do mundo. Há doze anos, em levantamento feito por Kihara *et al.* (1998), havia 142 casos registrados da presença de RAA nesse tipo de estrutura.

No Brasil, a preocupação com o problema tem crescido nos últimos anos, especialmente em função do grande número de barragens que vem sendo construídas. Para se ter ideia, segundo dados da ANEEL-BIG (2003), em 2003 havia 517 barragens em funcionamento no Brasil, incluindo-se as construções de pequeno porte. Em 2007, esse número subiu para 658 (ANEEL-BIG, 2007). Atualmente, estão sendo construídas 17 usinas hidrelétricas de grande porte, sendo que, além dessas foi outorgada a construção de mais 11 (ANEEL-BIG, 2010). Num segundo momento, a preocupação com a RAA aumentou quando, em 2005, notificou-se da presença de RAA em diversas estruturas de fundações de edifícios, do nordeste brasileiro, caso inédito no Brasil até então.

O fato de ser mais comum em estruturas de barragens, não significa que a RAA não possa ocorrer em qualquer tipo de estrutura de concreto. Desde que as condições mínimas para que

a reação aconteça sejam atendidas a reação será desencadeada, ou seja, presença de minerais reativos nos agregados, alcalinidade e umidade suficiente.

Tal desencadeamento não é um processo simples. Existem vários questionamentos, especialmente a respeito dos mecanismos de reação e da mitigação do problema. Assim, diversos estudos vêm sendo feitos. No Brasil, o primeiro estudo a respeito da RAA foi apresentado por Paulon (1981). Nos últimos anos, grande parte dos trabalhos tem focado os estudos na potencialidade reativa dos agregados utilizados no concreto, tais como nos trabalhos de Valduga (2002), Tiecher (2006), Andrade *et al.* (2006), Souza (2007), Valduga (2007), Couto (2008) e Cardoso *et al.* (2009). Ainda no âmbito nacional, foram realizadas diversas investigações a respeito da interferência das adições na reação como, por exemplo, nos trabalhos de Hasparyk (1999), Silveira (2007), Munhoz (2007) e Silva (2009). No Brasil, outro trabalho que merece destaque é a tese de Hasparyk (2005), que estudou profundamente o gel oriundo da reação e diversos aspectos microestruturais relacionados à RAA, especialmente no que diz respeito à utilização de produtos à base de lítio para mitigar o problema.

As investigações a respeito da utilização de mitigadores da RAA também são tema recorrente na literatura internacional, sendo que a avaliação do íon lítio predomina. Para exemplificar, citam-se os trabalhos de Qian *et al.* (2002), Kawamura e Fuwa (2003), Mitcherll *et al.* (2004), Mo (2005), Qi e Zi-yun (2007), Bulteel *et al.* (2009) e Feng *et al.* (2010). Outro assunto bastante abordado nos periódicos internacionais são os estudos de microestrutura que visam compreender melhor os fatores intervenientes na reação, tais como os trabalhos de Tambelli *et al.* (2006), Fernandes *et al.* (2007), Haha *et al.* (2007), Mo e Fournier (2007), Leemann e Lothenbach (2008), Multon *et al.* (2008), Wang *et al.* (2008), Dunant e Scrivener (2009), Fernandes (2009), Chen *et al.* (2010).

Mesmo havendo uma gama imensa de pesquisas a respeito de RAA, dentro do contexto atual ainda existem muitas lacunas a serem estudadas. Uma dessas lacunas está relacionada à influência dos minerais constituintes dos agregados na reação.

O que está claro nesse sentido é que há muitos minerais potencialmente reativos na natureza e estes estão presentes quase que na totalidade das rochas e areias utilizadas como agregados no concreto.

Tratando-se especificamente da reação álcali-sílica e álcali-silicato, é sabido que os minerais constituídos de sílica (SiO_2) são os responsáveis pelo desencadeamento da reação. Entretanto, o papel da sílica no processo de desencadeamento da RAA gera muitos questionamentos, uma vez que está presente em boa parte dos minerais da imensa maioria das rochas e sedimentos da crosta terrestre. Destaca-se dentre esses minerais o quartzo, que pode se apresentar com características variadas nas rochas. Tais características se delineiam de acordo com as condições a que o magma foi submetido no processo de formação das rochas e, ainda, das condições a que esteve sujeito com o passar dos anos na natureza. Assim, o que se sabe é que o quartzo constituinte das rochas e areias se apresenta com diversos graus de cristalinidade e deformação nos agregados utilizados no concreto.

Com relação à RAA, o que pode ocorrer é que agregados com composição química idêntica apresentem minerais bastante diferentes, especialmente no que diz respeito ao seu grau de deformação, o que resulta em distintos potenciais de expansão decorrente da RAA, como mostrou o estudo de Wenk *et al.* (2008). No trabalho de Tiecher (2006), constata-se, ainda, que a quantidade de mesóstase (resíduo constituído por grãos de quartzo e feldspatos com baixa cristalinidade, que muitas vezes é chamada de vidro vulcânico por possuir características semelhantes a este em microscopia ótica) presente nas rochas de origem vulcânica não é fator determinante para classificar o potencial de expansão da rocha, já que agregados com menor quantidade de mesóstase apresentaram expansões maiores no ensaio acelerado da ASTM C 1260 que agregados com grande quantidade.

Sendo assim, a fim de conhecer o que realmente é predominante e deve ser observado nos agregados no que diz respeito à RAA, o presente trabalho se propõe a estudar a influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo constituinte das rochas no desencadeamento da RAA, bem como avaliar seu potencial de dissolução e as mudanças ocorridas quando esse mineral reage com os hidróxidos alcalinos.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

As investigações a respeito do uso de aditivos químicos para recuperar estruturas afetadas pela RAA evoluíram muito nos últimos anos e vários trabalhos vêm comprovando seu efeito benéfico, tais como Qi e Zi-yun (2007), Schneider *et al.* (2008), Silva (2009), Cândido (2009) e Feng *et al.* (2010). Contudo, sua utilização de ainda não é prática comum. A principal

justificativa é a dificuldade que se tem em aplicar esses produtos nas estruturas, sobretudo quando se tratam de grandes volumes de concreto – caso das barragens.

Assim, as medidas preventivas ainda se mostram a melhor maneira de evitar os problemas decorrentes do desencadeamento da RAA e, nesse sentido, conhecer a potencialidade reativa dos agregados é o primeiro passo quando se deseja preveni-la, porém, muitas vezes é bastante difícil definir se um agregado é ou não reativo aos hidróxidos alcalinos, pois os ensaios normalmente realizados para tal definição possuem várias limitações. O que ocorre, na maioria dos casos, é a utilização de um conjunto de testes para avaliação de um agregado quanto ao seu potencial álcali-reativo.

Cabe salientar que quando se deseja evitar o desencadeamento da RAA, além de definir se um agregado é reativo aos álcalis, mostra-se importante entender o que pode levá-lo a reagir mais rapidamente ou com maior intensidade. Dentro desse contexto, sabe-se, por exemplo, que agregados que contêm em sua composição mineralógica sílica no estado ‘amorfo’ (vidro vulcânico) ou com baixa cristalinidade (mesóstase), são propensos, na maioria das vezes, a reagir mais rapidamente e com maior intensidade (reação álcali-sílica). Já os agregados constituídos de quartzo com algum tipo de deformação reagem mais lentamente (reação álcali-silicato).

No entanto, ainda é difícil estabelecer uma relação direta entre a composição mineralógica do agregado e o seu potencial reativo. No trabalho de Andrade *et al.* (2006), por exemplo, os autores relatam que alguns agregados constituídos por silicatos altamente deformados e que desencadearam a RAA nas estruturas de fundações de edifícios da cidade de Recife poderiam ser classificados como inócuos no ensaio acelerado da ASTM C 1260, se o ensaio fosse encerrado aos 16 dias. Silva (2007) verificou que um granito-gnaiss, responsável pela RAA na Usina Hidroelétrica de Moxotó, não foi considerado reativo em ensaios acelerados de expansão. Souza (2007) também obteve resultado semelhante com alguns agregados do seu estudo. Silveira (2007) constatou que um basalto com menor quantidade de mesóstase (5%) expandiu mais que outro com maior quantidade (10-15%), semelhantemente com o que ocorreu com Tiecher (2006). Couto (2008) também observou que alguns basaltos com vidro vulcânico em sua composição não se mostraram reativos em ensaios de expansão.

Sendo assim, o presente trabalho se propõe a estudar a influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo presente nas rochas utilizadas como agregados no concreto, bem como a influência dessas características para o desencadeamento da RAA.

Além da necessidade de conhecer melhor e responder inúmeros questionamentos a respeito da influência dos agregados na RAA, o estudo já se justificaria em função dos problemas que vem sendo relatados dentro do contexto atual das pesquisas sobre o tema no Brasil, onde o número de trabalhos publicados a respeito do assunto tem crescido bastante nos últimos anos.

Outro exemplo que ilustra e justifica a necessidade da realização de estudos aprofundados dentro desse tema é a iniciativa recente de elaboração de uma norma brasileira, a NBR 15577/2008 (Partes 1 a 6), cujo escopo é “estabelecer requisitos para o uso de agregados em concreto tendo em vista as medidas necessárias para evitar a ocorrência da reação álcali-agregado e preservar a amostragem e os métodos de ensaios necessários à verificação desses requisitos”.

Em face desse contexto, o presente trabalho fez parte de um projeto de pesquisa financiado por Furnas Centrais Elétricas S. A., dentro do programa P & D da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), intitulado ‘Identificação de agregados reativos e combate da reação álcali-agregado em barragens’, finalizado em outubro de 2009. Tal projeto resultou, até o momento, em quatro dissertações de mestrado (COUTO, 2008; CÂNDIDO, 2009; FLORINDO, 2009; SILVA, 2009) e na presente tese de doutorado. Há, ainda, uma dissertação de mestrado sendo desenvolvida por Paulo Henrique Rolin, com previsão de conclusão no ano de 2010. Sendo assim, foram reunidos pesquisadores de diversas universidades e empresas brasileiras e do exterior, sendo elas: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Goiás (UFG); Universidade de São Paulo (USP – São Carlos); Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade de Campinas (UNICAMP), Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), *University of California (UC-Berkeley)*, Rheoset Soluções em Concreto e Furnas Centrais Elétricas S. A.

O projeto envolveu desde a avaliação de rochas utilizadas como agregados no concreto até de medidas que possam mitigar a reação uma vez que ela se desencadeie no concreto. A presente proposta se insere na avaliação da influência da cristalinidade e da deformação do quartzo presente nas rochas para o desencadeamento da RAA (UFRGS, Furnas, UFSC, USP – São Carlos, UFMT). As demais pesquisas realizadas no referido projeto envolveram análises do

potencial de dissolução das rochas expostas aos hidróxidos alcalinos (UFSC, Furnas), avaliação em escala atômica dos silicatos quando sujeitos à RAA (USP – São Carlos, UFMT, Furnas, *UC-Berkeley*) e o estudo da influência de produtos químicos mitigadores da RAA nas propriedades do concreto (UFG, Furnas, *UC-Berkeley*, Rheoset).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é avaliar a influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo constituinte das rochas utilizadas como agregados no concreto para o desencadeamento da reação álcali-agregado.

A fim de atingir o objetivo principal do estudo seguem-se alguns objetivos específicos:

- a) estudar rochas constituídas por mesóstase com distintos graus de cristalinidade do quartzo;
- b) analisar rochas de um mesmo afloramento rochoso, porém com texturas diferentes, indicativas de graus de deformação diferentes;
- c) implementar uma metodologia para caracterizar os graus de cristalinidade e deformação do quartzo presente nos agregados;
- d) avaliar a potencialidade reativa das rochas e correlacionar com os diferentes graus de cristalinidade e deformação do quartzo;
- e) validar os resultados obtidos em laboratório replicando as análises a rochas reativas e inócuas em campo.

1.3 ORIGINALIDADE

O estudo das características do quartzo que intervém para a ocorrência da RAA não é um assunto novo dentro dos trabalhos relacionados ao tema (DOLAR-MANTUANI, 1981; WIGUN, 1995; BROEKMANS, 2004; WENK *et al.*, 2008). Entretanto, este trabalho mostra-se original quando emprega uma metodologia diferenciada e inédita para caracterizar os diferentes graus de cristalinidade e deformação do quartzo presente nas rochas e, dessa forma, consegue estabelecer correlações entre essas características e o potencial da rocha desenvolver a RAA.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese de doutorado foi dividida em oito capítulos. Neste primeiro capítulo (INTRODUÇÃO) são feitas considerações iniciais a respeito da pesquisa, contextualizando e justificando a escolha do tema. Foram ressaltados os objetivos do trabalho e os aspectos que o torna original.

O capítulo 2 (A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO) apresenta os estudos que mostraram a importante relação entre as características dos silicatos e a sua reatividade aos hidróxidos alcalinos, bem como os mecanismos descritos pela literatura para a ocorrência da RAA nas estruturas de concreto

O PROGRAMA EXPERIMENTAL desta pesquisa é descrito no capítulo 3. Tal capítulo apresenta os materiais e os métodos utilizados para atingir os objetivos propostos para o estudo.

A apresentação dos resultados obtidos com as análises feitas e as respectivas discussões foram divididas em três capítulos:

- a) capítulo 4: são discutidos os resultados das análises da INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE DO QUARTZO PARA O DESENCADENAMENTO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO;
- b) capítulo 5: é exposta e analisada a INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO DO QUARTZO PARA O DESENCADENAMENTO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO;
- c) capítulo 6: apresenta um COMPARATIVO ENTRE A POTENCIALIDADE REATIVA DAS ROCHAS E AS CARACTERÍSTICAS DO QUARTZO CONSTITUINTE.

As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 7 (CONSIDERAÇÕES FINAIS).

1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Na literatura, a RAA comumente é subdividida em reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato (HOBBS, 1988). No entanto, de acordo com o objetivo principal do presente estudo, que visa a avaliar características intrínsecas do quartzo constituinte dos agregados, o trabalho contemplará somente as reações álcali-sílica e álcali-silicato. Dessa maneira, quando no texto do trabalho for referido o termo RAA não se estará englobando a reação álcali-carbonato.

2 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Chama-se reação álcali-agregado (RAA) a reação química que ocorre entre a sílica presente nos agregados empregados para confecção do concreto e os hidróxidos alcalinos oriundos da hidratação do cimento, cujo produto é um gel sílico-alcalino higroscópico. Ao entrar em contato com a água, o gel da RAA expande, o que, conseqüentemente, causa tensões internas de tração no concreto e leva à sua fissuração.

A química da RAA envolve, essencialmente, uma reação ácido-base para a formação do gel sílico-alcalino, ou seja, a solução básica presente nos poros do concreto (composta por Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^-) reage com as fases ácidas presentes nos agregados (SiO_2). Em 1981, Dent Glasser e Kataoka expuseram esquemas do ataque dos hidróxidos alcalinos à sílica. Os esquemas são bastante claros e mostram que quando a sílica está bem cristalizada, os hidróxidos reagem apenas na superfície do agregado. Em contrapartida, quando a sílica é pobremente cristalina, os hidróxidos alcalinos conseguem penetrar em seu interior, conforme pode ser observado na figura 01.

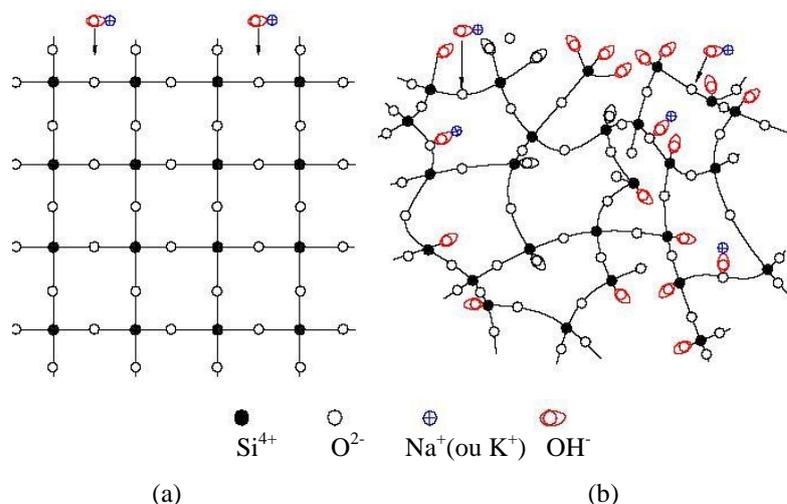


Figura 01: ataque das hidroxilas à sílica. (a) sílica cristalina; (b) sílica amorfa (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981)

O presente estudo se propõe a pesquisar a influência do quartzo (SiO_2) constituinte dos agregados para a ocorrência da RAA. Sendo assim, este capítulo retrata o panorama atual da literatura a esse respeito, bem como os mecanismos envolvidos para que a reação se desencadeie.

2.1 A SÍLICA CONSTITUINTE DOS AGREGADOS

Durante muitos anos, os agregados foram considerados materiais de enchimento no concreto, ou seja, acreditava-se que eles não desencadeavam reações químicas com os outros materiais constituintes, inclusive a NBR 9335 (ABNT, 2005) estabelece que agregado é um “material granular, **geralmente inerte**, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto”. Stanton (1940) foi o primeiro a relatar a ocorrência da reação expansiva entre cimentos com elevado teor de álcalis e certos constituintes dos agregados. Contudo, o meio técnico demorou alguns anos para aceitar que, dependendo da composição mineralógica, os agregados devem ser considerados materiais reativos no concreto. Atualmente, está claro que a escolha dos agregados constituintes desse material de construção deve ser feita de acordo com o emprego que lhe será dado, já que, sob certas condições, a RAA pode ser desencadeada.

A influência dos agregados na RAA se dá segundo alguns aspectos. Primeiramente está relacionada à composição mineralógica desses agregados e, num segundo momento, à sua forma e proporcionamento (traço do concreto). Por se tratar de uma reação que depende da composição mineralógica dos agregados (oriundos de rochas e sedimentos) utilizados no concreto, comumente subdivide-se a RAA de acordo com os constituintes reativos provenientes dos agregados. Assim, os três tipos de reação existentes são: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato. As reações álcali-sílica e álcali-silicato são as mais comuns, sendo o processo de expansão de ambas decorrente da formação de um gel sílico-alcálico. Já a expansão proveniente da reação álcali-carbonato se dá por um processo de decomposição da dolomita. No entanto, por se tratar de um estudo que visa avaliar a influência de características peculiares à sílica na RAA, a reação álcali-carbonato não será abordada.

A diferença entre reação álcali-sílica e álcali-silicato é, basicamente, a origem da sílica que está provocando a reação. Os silicatos amorfos, ou com baixíssima cristalinidade,

desencadeiam a reação do tipo álcali-sílica, tendo-se como exemplos o vidro vulcânico e o material residual microcristalino presente na mesóstase das rochas vulcânicas. Os silicatos melhor cristalizados desencadeiam a reação álcali-silicato. O quartzo é a melhor espécie de sílica que desencadeia esse tipo de reação, porém existem outros que podem desenvolver a RAA, tais como os feldspatos, as micas e os argilominerais. Sendo assim, dada a variedade de silicatos existentes, as reações álcali-sílica e álcali-silicato podem ocorrer simultaneamente no concreto.

Os silicatos são minerais que possuem em sua composição química o silício (Si) ligado ao oxigênio (O) em coordenação 4. Cada silicato possui características em sua estrutura cristalina que acabam por definir seu maior ou menor potencial álcali-reativo, ou seja, os tipos de ligações entre os íons definem a maior ou menor facilidade de acesso dos hidróxidos alcalinos.

Várias estruturas cristalinas se formam a partir do arranjo entre os tetraedros de sílica, já que esses podem se ligar a outros cátions ou compartilhar oxigênio. Os silicatos são formados por um pequeno número de íons combinados em variadas proporções e posições, o que acaba por configurar as seis classes de silicatos (DANA; HURLBUT, 1969):

- (a) nesossilicatos: minerais que contém tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ isolados, ligados principalmente por cátions de Fe e Mg. Principais exemplos são os minerais do grupo da olivina – $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$;
- (b) sorossilicatos: estrutura contendo grupos isolados de duplos tetraedros de Si_2O_7 . Como exemplo, pode-se citar o grupo do epidoto - $\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$;
- (c) ciclossilicatos: silicatos em anel, apresentam tetraedros ligados a Si_xO_{3x} (berilo - $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$; grupo da turmalina – ex. elbaíte $\text{Na}(\text{Li}_{1.5}, \text{Al}_{1.5}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$);
- (d) inossilicatos: formados por tetraedros unidos por oxigênios em comum, formando uma cadeia simples (silicatos anidros – grupo dos piroxênios: $(\text{Mg, Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$) ou formando cadeias duplas (silicatos hidratados – grupo dos anfibólios: $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$);

- (e) filossilicatos: unidades tetraédricas dispostas em folhas. Cada tetraedro liga-se por três oxigênios em comum (silicatos hidratados em folha: micas (muscovita $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e argilominerais (caolinita $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$);
- (f) tectossilicatos: minerais que contêm tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{-4}$ ligados entre si por oxigênios em comum, formando estruturas contínuas tridimensionais (silicatos em cadeias tridimensionais: quartzo – SiO_2 ; grupo dos feldspatos (K-feldspatos, ex. microclínio KAlSi_3O_8 ; plagioclásios, ex. albita $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Dentre as classes de minerais acima descritas, no que diz respeito à RAA, destacam-se os tectossilicatos, pois minerais desse grupo, como quartzo (e seus polimorfos: tridimita, cristobalita e as variedades microcristalinas como a calcedônia), feldspatos, feldspatóides, zeólitas, já foram citados por diversos autores como responsáveis pela reação, bem como o vidro vulcânico e a mesóstase intergranular (DIAMOND, 1976; VAN AARDT; VISSER, 1977; PAULON, 1981; HOBBS, 1988; HASPARYK, 1999; CONSTANTINER; DIAMOND, 2003).

O que ocorre é que sob uma condição de **elevada** alcalinidade (caso do concreto, por exemplo), as ligações Si-O desses minerais são facilmente rompidas. A presença de defeitos nos cristais também facilita a reação dos tetraedros de sílica com os hidróxidos alcalinos. Outro fator que potencializa a reação são as estruturas menos estáveis, pois estas possuem estrutura mais frágil, caso do vidro vulcânico e da opala, por exemplo.

A estrutura dos filossilicatos também lhes confere potencial álcali-reativo. Além de possuírem estrutura foliada, os filossilicatos são minerais hidratados, o que acentua seu poder de dissolução. Os minerais desse grupo (micas e argilominerais) são reconhecidos por diversos autores pela sua contribuição para a RAA (DIAMOND, 1976; VAN AARDT; VISSER, 1977; KNAUSS; WOLERY, 1989; HASPARYK, 1999; ELERT *et al.*, 2008). Dentre as micas, os exemplos mais comuns são a biotita e a muscovita. Para os argilominerais, o grupo mais importante, no que diz respeito à RAA, é o grupo da esmectita, que são argilominerais expansivos e que possuem grande capacidade de troca catiônica.

Quanto às demais classes de silicatos existentes e descritas anteriormente, não existem registros na literatura de uma relação direta com a RAA. Contudo, todos os silicatos podem estar envolvidos na reação; por isso, é importante conhecê-los.

Além disso, os minerais classificados como silicatos correspondem a maior parte dos minerais da crosta terrestre, ou seja, estão presentes na maioria das rochas e sedimentos, que por sua vez são utilizados como agregados na construção civil (brita e areia).

2.2 RELAÇÃO ENTRE AS ROCHAS UTILIZADAS COMO AGREGADOS E A RAA

A estabilidade dos minerais depende do processo de formação das rochas e as alterações podem conferir à rocha ou ao sedimento utilizado como agregado no concreto, maior, ou menor, potencial álcali-reativo.

Para exemplificar as diferenças que podem ocorrer para o desencadeamento da RAA em função do tipo de constituição mineralógica reativa presente nas rochas, cita-se o trabalho de Munhoz (2007). Ao analisar um basalto e um milonito granítico o autor verificou que com o basalto a reação ocorreu rapidamente, apresentando o dobro da expansão do milonito granítico aos 14 dias de imersão em NaOH. As principais fases reativas presentes no basalto (vidro, argilas e calcedônia) desencadearam a reação do tipo álcali-sílica e com o milonito granítico (quartzo microgranular, recristalizado, e cristais de quartzo e feldspato deformados), a reação álcali-silicato. Segundo o autor, a composição química dos produtos das reações também foi diferente de acordo com o agregado. Nos produtos formados com o milonito granítico, verificou-se a presença de sílica, sódio e cálcio. Já para os produtos oriundos do basalto, além do sódio e da sílica, observou-se alumínio e pouco cálcio.

No que diz respeito à RAA, num primeiro momento, poder-se-ia pensar que quanto mais ácida a rocha, maior é seu potencial de reação com os álcalis. Entretanto, rochas básicas têm sido relatadas como extremamente reativas em ensaios acelerados de expansão, tais como os basaltos (KORKANÇ; TRUĞRUL, 2005; GOGUEL, 1995; WAKISAKA, 2000; VALDUGA *et al.*, 2006; TIECHER, 2006).

No Brasil, Valduga *et al.* (2006) realizaram uma busca na literatura por agregados basálticos que fossem considerados inócuos no ensaio acelerado das barras de argamassa da ASTM C 1260. O estudo verificou que 45 basaltos estudados no País são potencialmente reativos de acordo com a referida norma, a menos que se utilizem adições inibidoras.

As fases álcali-reativas dos basaltos e demais rochas vulcânicas parecem ser, além do vidro vulcânico, aquelas microcristalinas, que representam o resíduo rico em álcalis (K e Na) e sílica e que constitui a **mesóstase intergranular**. Esse material intersticial se forma nas rochas ígneas vulcânicas em função do resfriamento brusco do magma e é constituído por fases micro a criptocristalinas que em microscopia óptica têm aparência de material amorfo. Entretanto, Gomes (1996), através de microscopia eletrônica de varredura e com o auxílio de EDS, identificou a presença de pequenos cristais de K-feldspato e de quartzo nesse material. A composição química das mesóstases estudadas por Gomes (1996) é variada. O conteúdo de sílica (SiO_2), por exemplo, varia de 47% - 80%, sendo, em média, aproximadamente 65%. O K_2O representa em torno de 10%, Na_2O de 3%, Al_2O_3 de 18%. Em proporções menores, a autora também verificou a presença de MgO, CaO, FeO.

Tiecher (2006) avaliou petrograficamente 14 basaltos, verificando a presença de quantidades variadas de mesóstase nas amostras. Comparando essas quantidades com as expansões de cada rocha no ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa, a autora verificou alguns comportamentos curiosos. Por exemplo: uma amostra com 20% de mesóstase resultou em expansões maiores que as expansões de outro basalto com 50% de mesóstase em sua matriz. O que pode explicar esse comportamento é, justamente, a quantidade de sílica das mesóstases, pois na amostra com 20% desse material foram observados pequenos grãos de quartzo, o que indica grande quantidade de sílica livre. Na rocha com 50% de mesóstase não foram observados grãos.

De modo geral, todas as rochas que apresentam sílica amorfa ou microcristalina reagem muito rapidamente com os álcalis. Isso ocorre em função da desordem estrutural da fase amorfa. Ponce e Batic (2006) salientam que as rochas com formações vítreas podem desencadear a RAA em um ano de utilização do concreto, dependendo, é claro, das condições ambientais. Ao mesmo tempo, segundo os autores, se a fase reativa for o quartzo, a reação poderá levar de 6 a 10 anos para se desenvolver.

Segundo Munhoz (2007), as fases vítreas reagem rapidamente com os hidróxidos alcalinos em função da sua alta energia interna, a qual pode ser descrita como a capacidade total de um sistema para realizar um trabalho. Essa energia está distribuída entre as partículas que formam o sistema e entre as diversas formas que cada partícula pode armazená-la.

De acordo com o Departamento de Engenharia do Exército dos Estados Unidos (*U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS*, 1994), os vidros vulcânicos reativos são os ácidos, que contêm mais de 65% de sílica na sua composição, e os intermediários, que possuem entre 55% e 65%. Os vidros básicos, constituídos por menos de 55% de sílica, quase não reagem. Segundo o mesmo Departamento, os vidros reativos podem ser identificados através dos seus índices de refração. Índices menores que 1,57 são indicativos de reatividade. Além disso, o documento salienta que a presença de água no vidro também, aparentemente, está associada com a reatividade.

Na literatura internacional, ainda existem poucas publicações a respeito da reatividade aos hidróxidos alcalinos de rochas vulcânicas, se comparadas com os artigos encontrados para granitos, por exemplo. Nesse sentido, merecem destaque dois trabalhos: Wakizaka (2000) e Korkanç e Tuğrul (2005).

Wakizaka (2000) estudou a RAA com agregados japoneses de origem vulcânica, onde identificou a presença de bordas de reação (gel), através de microscópio petrográfico, nos agregados utilizados para confecção de concreto. Segundo o autor, o gel se formou a partir da remoção do vidro vulcânico por dissolução, muitas vezes aparecendo em rochas consideradas inócuas, como o andesito. As demais rochas vulcânicas consideradas reativas pelo autor foram o dacito, o basalto e o riolito.

Já Korkanç e Tuğrul (2005) estudaram rochas basálticas oriundas da Turquia com diferentes texturas e composições. Os autores verificaram que a reatividade dos basaltos é controlada pela presença de mais de 50% de sílica em sua matriz, a qual está preponderantemente presente no vidro vulcânico. Esse percentual encontrado pelos autores é praticamente o mesmo descrito pelo *U.S Army Corps of Engineers* (1994) e mencionado anteriormente, 55%.

Entretanto, apesar de serem consideradas rochas potencialmente reativas nos ensaios acelerados, os basaltos não têm se mostrado os principais responsáveis pela ocorrência da RAA nas estruturas de concreto em campo. Nos ensaios para avaliação da reatividade através de prismas de concreto, os basaltos também não se classificam como potencialmente reativos, conforme mostram os estudos de Couto (2008) e Sanchez *et al.* (2009).

Isso ocorre porque mesmo nos basaltos que contêm mais de 50% de sílica em sua constituição, a presença de sílica **livre** (quartzo) é pequena, corresponde apenas aos grãos de

quartzo presentes na mesóstase. Nos ensaios acelerados em barras de argamassa, com a britagem das rochas, há a exposição desses grãos, que acabam por reagir rápida e intensamente, o que não ocorre quando as análises são feitas no concreto.

Por serem rochas ácidas e de granulação muito fina, contendo material de baixa cristalinidade, os riolitos mostram-se rochas com grande potencial reativo e ao longo dos anos vêm sendo citadas como tal ao redor do mundo.

Duncan *et al.* (1973) apontaram os riolitos como um dos litotipos responsáveis pelos casos de RAA na Nova Escócia. Berra *et al.* (1999) também destacam o papel dos riolitos para a RAA, bem como Katayama *et al.* (2004). Shrimmer (2005) cita um riolito-andesito como uma das rochas mais reativas do noroeste do Pacífico, estando localizada em *Cascade Range*, na província de *British Columbia*, no Canadá. Já Marfil e Maiza (2006) estudaram alguns riolitos da Argentina e verificaram que o quartzo, o, vidro, a mesóstase e os minerais de alteração presentes em sua matriz levam à sua reatividade.

Algumas fases, como o vidro vulcânico (e/ou a mesóstase microcristalina), os argilominerais, a tridimita e a cristobalita possuem uma solubilidade muito alta em soluções alcalinas. Sendo assim, rochas que possuem essas fases, mesmo que em pequena quantidade, tem grande potencial reativo nos ensaios acelerados de expansão das barras de argamassa, que denota uma condição extremamente agressiva, pois a temperatura do ensaio é de 80°C e a concentração da solução alcalina utilizada no ensaio é de 1M (BROEKMANS; JANSEN, 1998; WAKIZAKA, 2000; LEEMANN; HOLZER, 2005; KORKANÇ; TUĞRUL, 2005).

Wakizaka (2000) explica que os fatores que controlam a dissolução da sílica presente nos agregados do concreto são a quantidade de SiO₂ contida, suas propriedades termodinâmicas, superfície específica, tamanho e cristalinidade. Já a redução da alcalinidade é definida pela quantidade de SiO₂, grau de polimerização dos minerais SiO₄⁴⁻ presentes, área superficial, tamanho dos grãos e capacidade de troca de cátions. O referido autor apresenta um gráfico em que relaciona a concentração de sílica dissolvida com a redução da alcalinidade em rochas vulcânicas de acordo com a presença, ou não, de minerais reativos: cristobalita, tridimita e vidro vulcânico (figura 02). Na figura 02, observa-se que as amostras cuja concentração de sílica dissolvida foi elevada possuem minerais reativos, enquanto as amostras com pouca sílica dissolvida não contêm tais minerais, levando a uma distribuição bimodal da concentração de sílica dissolvida.

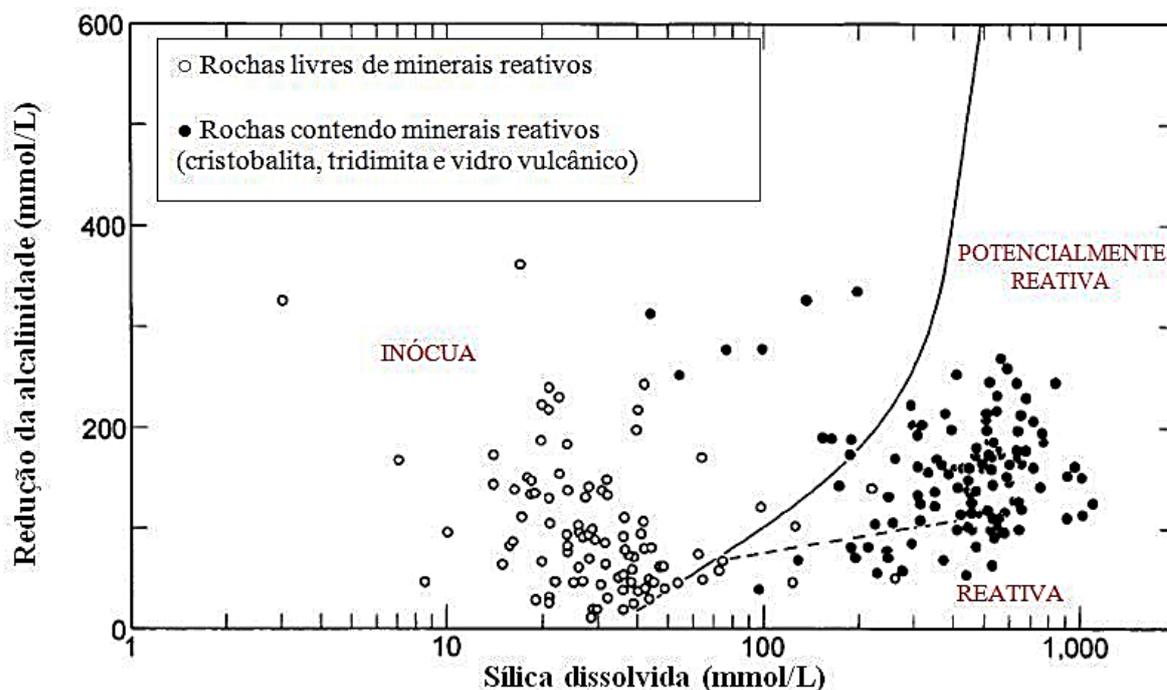


Figura 02: relação entre a quantidade de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade do agregado (WAKIZAKA, 2000)

Os argilominerais presentes nas rochas vulcânicas podem potencializar a RAA, pois podem liberar sílica e álcalis para a solução dos poros do concreto, em alguns casos, ser expansivos em presença de água. Elert *et al.* (2008) estudaram as reações químicas desencadeadas entre alguns argilominerais e soluções alcalinas em temperatura ambiente. Os resultados mostraram que os argilominerais passam por significativas mudanças mineralógicas e texturais ao longo do tempo quando expostos a soluções alcalinas. Foram realizados ataques com diversos tipos de reagentes, e todos resultaram em dissolução das argilas expansivas (esmectita). Entretanto, as soluções de NaOH e KOH promoveram uma destruição mais ‘eficiente’ que a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para a caolinita, a ilita e a paragonita, como era de se esperar.

As esmectitas são argilominerais com características expansivas muito comuns nas rochas de origem vulcânica e podem contribuir para a RAA (GILLOT *et al.*, 1973). Korkanç e Tuğrul (2005) também atribuíram parte da álcali-reatividade dos agregados turcos a esses argilominerais de alteração. Tiecher (2006) salienta a presença de minerais expansivos nos agregados basálticos estudados e sua potencialidade de desencadeamento da RAA.

Nas rochas ácidas a principal fonte de sílica para a RAA é o **quartzo** (DIAMOND, 1976; HOBBS, 1988; BRADY; WALTHER, 1990; SHAYAN, 1993; BROEKMANS, 2004;

PONCE; BATIC, 2006), porém, acredita-se que silicatos como os feldspatos e as micas presentes nessas rochas também podem contribuir para a RAA, em menor escala.

De acordo com o estudo realizado por Ponce e Batic (2006), a respeito das diferentes manifestações da RAA em função dos agregados utilizados, o quartzo é o mineral que desencadeia mais lentamente a RAA.

Yan *et al.* (2004) explicam que a superfície de qualquer partícula de sílica imersa em água exibe uma característica ‘ácida’, que fica pronunciada com o aumento da área específica e da desordem dos minerais. O quartzo possui um arranjo tetraédrico de Si e O que se mantém estável em ambiente natural, mas sob ação de tensões tectônicas a estrutura cristalina do quartzo sofre ‘deslocações’ e ‘deflexões’.

O quartzo é um mineral que se deforma com muita facilidade sob qualquer tipo de esforço que for submetido. Desse modo, a estrutura cristalina desse mineral fica deformada. Isso pode ser observado através da sua extinção ondulante nas análises por microscopia ótica, onde, segundo Munhoz (2007), se verifica que “diferentes zonas de um mesmo grão se extinguem em posições diferentes na platina do microscópio, não havendo uma posição específica em que todo o grão fique homogeneamente extinto”.

A extinção ondulante é um indicativo da potencialidade reativa dos minerais, especialmente do quartzo. Entretanto, existem críticas a respeito da utilização dessa característica, já que se trata de um parâmetro subjetivo e muito difícil de mensurar em microscópios petrográficos comuns em lâmina delgada, especialmente em grãos muito deformados. De qualquer forma, diversos autores, bem como a NBR 15577-3 (2008), citam esse como um dos principais aspectos a serem observados para classificação da potencialidade reativa do quartzo (KHIARA, 1986; ANDERSEN; THAULOW, 1989; SHAYAN, 1993; WIGUN, 1995; BROEKMANS, 2004; TIECHER, 2006; VALDUGA, 2007; NBR 15577-3, 2008).

Ao se deformarem, os minerais sofrem um processo de deslocamento do seu eixo original, havendo a alteração das distâncias de suas moléculas. Isso acaba por criar “zonas frágeis” no mineral que, com o aumento nas tensões internas, tende a se subdividir e formar novos grãos (PASSCHIER; TROW, 1998). Através da observação da extinção ondulante do quartzo é possível verificar onde estão essas zonas frágeis, ou seja, onde o grão tende a se subdividir. A figura 03 mostra esse processo.

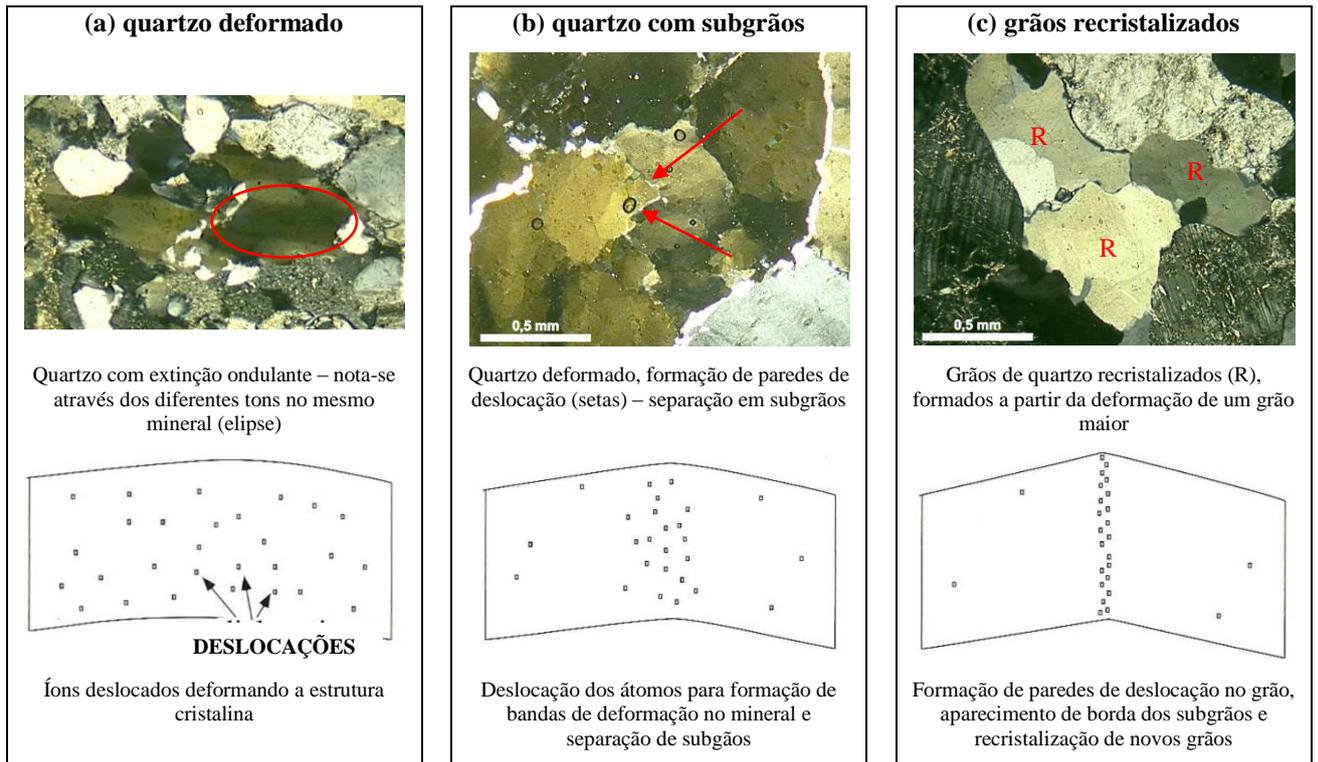


Figura 03: estágios do processo de deformação do quartzo (adaptado de PASSHIER; TROW, 1998)

Wenk *et al.* (2008) observaram as paredes de deslocação em grãos de quartzo através de microscopia eletrônica de transmissão (MET), conforme a figura 04. De acordo como os autores, as deslocações na estrutura cristalina ocorrem em pequenas áreas, formando paredes. Essas paredes dividem o cristal em subgrãos, os quais possuem pouca ou nenhuma deslocação.

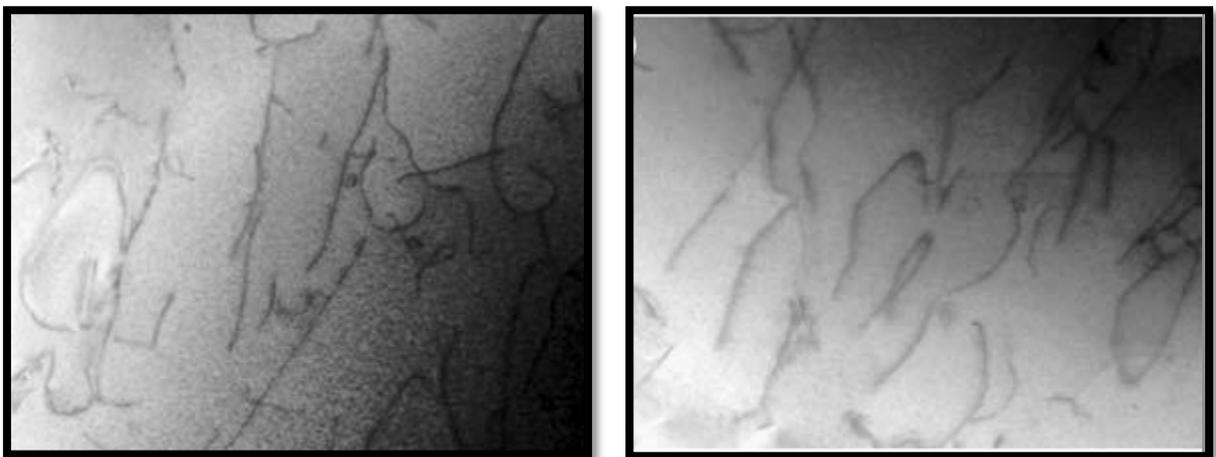


Figura 04: imagens obtidas através de MET mostrando as paredes de deslocação de um grão de quartzo (WENK *et al.*, 2008)

Supõe-se que a formação das paredes de deslocação, que fragiliza algumas zonas dos grãos, acaba por facilitar a penetração dos hidróxidos alcalinos e, por consequência, facilitar também o desencadeamento da RAA.

A solução alcalina pode atacar o quartzo de diferentes maneiras, de acordo com seu grau de deformação. Seguindo essa linha de raciocínio, o mesmo agregado poderia ter zonas mais e menos reativas. Sendo assim, pode-se dizer que a reatividade das rochas plutônicas está diretamente relacionada com a estabilidade termodinâmica dos grãos de quartzo tensionados. Defeitos na estrutura cristalina levam ao aumento na energia livre nas redes cristalinas, a qual transforma a sílica em metaestável e propicia o ataque pela solução nos poros do concreto (PONCE; BATIC, 2006).

Em estudos recentes, têm-se constatado que vários casos de RAA em estruturas de concreto brasileiras estão relacionados com a utilização de agregados de origem metamórfica, constituídos por quartzo altamente deformado. Entre os casos de ocorrência de RAA com a utilização de rochas metamórficas no concreto, está a Usina Hidrelétrica (UHE) Apolônio Sales (Moxotó), que foi construída com granito-gnaiss; UHE Joanes II, construída com gnaiss, a UHE de Furnas, construída com quartzito (FURNAS, 1997). Além das ocorrências de RAA em barragens com agregados metamórficos, em outros tipos de estruturas de concreto com esse tipo de rocha também foi constatado o problema, tais como em alguns edifícios da região metropolitana de Recife (ANDRADE *et al.*, 2006) e na ponte Governador Paulo Guerra (CARNEIRO, 2001).

No âmbito internacional, as rochas metamórficas também têm sido descritas como motivadoras da RAA em diversos países. Marfil e Maiza (2001) constataram a ocorrência de RAA em pavimentos na Argentina (Buenos Aires e Bahia Blanca), onde foi utilizado migmatito e quartzito. Broekmans (2002) descreve a história da reatividade de milonitos na Noruega. Leemann e Holzer (2005) comprovaram que dois agregados metamórficos suíços, um gnaiss e um xisto são reativos aos álcalis.

Muitos outros casos da ocorrência de RAA com esse tipo de rocha poderiam ser descritos. O que todos esses trabalhos têm em comum é a ênfase dada ao papel do quartzo altamente deformado nos agregados de origem metamórfica. Nesse sentido, Ponce e Batic (2006) salientam a presença de quartzo termodinamicamente instável e com elevada energia livre em

suas redes cristalinas (em função da sua elevada deformação) é encontrado somente em granitos muito deformados e em rochas metamórficas.

Contudo, mesmo possuindo elevada deformação e, portanto, elevado potencial para desencadear a RAA, os agregados de origem metamórfica são considerados 'lentos' para desenvolver a reação (LEEMANN; HOLZER, 2005; ANDRADE *et al.*, 2006; HASPARYK, 1999; PONCE; BATIC, 2006; SILVA, 2007). Algumas vezes, inclusive, esses agregados são considerados inócuos ou com pouco potencial reativo nos ensaios que classificam sua reatividade de maneira acelerada, como no caso do estudo desenvolvido por Wakizaka (2000).

O que ocorre com os agregados metamórficos é a redução do tamanho dos grãos de quartzo nos processos de metamorfismo, fazendo com que aumente a superfície disponível para reação, porém, os novos grãos formados nem sempre são deformados e, por isso, podem demorar mais para reagir. Os defeitos dos cristais e as deslocções ocorridas no processo de deformação são fatores que contribuem para a reatividade das rochas metamórficas (BROEKMANS, 2002).

Amo e Pérez (2001) correlacionaram a superfície específica de sílica presente nos agregados (obtida através da análise digital de imagens microscópicas) com as expansões dos mesmos. O estudo foi realizado com agregados espanhóis e os resultados mostraram que a redução dos grãos que ocorre com as rochas metamórficas aumenta a álcali-reatividade dos agregados, o que se justifica pelo aumento de superfície de sílica para reagir. Os autores, inclusive, estabeleceram um índice de reatividade para o quartzo (QRI) presente nas rochas. Tal índice foi estabelecido multiplicando-se a porcentagem de quartzo presente no agregado pela área superficial, verificando-se que quando o QRI for maior que 0,5 o agregado desenvolve expansões deletérias.

No que diz respeito à relação entre o potencial de dissolução do quartzo e sua estrutura cristalina, Broekmans (2004) salienta que as regiões do grão onde ocorre a quebra das ligações da Si-O-Si pelos íons OH⁻ ficam mais suscetíveis à reação com os hidróxidos alcalinos que nas regiões do quartzo onde não houve essa quebra. Por isso, o quartzo que apresenta estrutura cristalina deformada é mais solúvel que o quartzo livre de defeitos.

Monteiro *et al.* (2001) correlacionaram a deformação de agregados metamórficos com a reação álcali-sílica. No estudo, foram utilizados agregados com diferentes graus de deformação, porém, com a mesma origem geológica. Os autores concluíram que as expansões decorrentes da reação dos agregados com os álcalis podem ser correlacionadas com o desenvolvimento de foliação da rocha, acompanhado da redução dos grãos. Os autores salientam que a extinção ondulante do quartzo mostra a sua deformação, quanto mais intensa a extinção ondulante, mais deformado é o grão, entretanto, chamam atenção para o fato que a extinção ondulante pode desaparecer quando a deformação é muito elevada.

No Brasil alguns trabalhos fizeram o uso do ângulo de extinção ondulante do quartzo como um dos parâmetros para classificar a potencialidade reativa das rochas (VIEIRA; OLIVEIRA, 1997; RODRIGUES *et al.*, 1997; HASPARYK, 1999; KHIARA *et al.*, 2006; SANCHEZ, 2008; COUTO, 2008), inclusive, a NBR 15577-3 (2008) contempla esse parâmetro para avaliação da reatividade dos agregados. Esta metodologia foi proposta por Dolar-Mantuani (1981) para classificar o potencial reativo dos agregados. Segundo seu estudo, grãos com ângulo de extinção ondulante maior que 25° são potencialmente reativos, ângulos menores do que 15° denotam quartzo inerte, mas o próprio autor salienta a imprecisão desse parâmetro.

Na petrografia ótica convencional, é muito difícil medir o ângulo de extinção do quartzo, justamente por ser, de modo geral, ondulante, o que lhe confere ausência de parâmetros de estrutura cristalina que possam servir como referência para as medidas. Dessa forma, quando a medida do ângulo de extinção ondulante é utilizada como forma para definir a reatividade de um agregado, são empregadas aproximações desse ângulo e não seu valor exato que, de acordo com Dolar-Mantuani (1981), pode levar a **incerteza de até 60%**.

Além disso, no caso dos agregados metamórficos esse parâmetro não parece aplicável, pois quando o grau de deformação for muito intenso, a extinção ondulante some, e novos grãos menos deformados e com tamanhos menores aparecem, como foi comentado por Monteiro *et al.* (2001). Isso também ficou evidente no trabalho de Wenk *et al.* (2008).

Por esse motivo, Monteiro *et al.* (2001) e Wenk *et al.* (2008) propõem a utilização de outro parâmetro para avaliação da potencialidade reativa dos agregados em rochas metamórficas. Para esse tipo de agregado, os autores propõem a avaliação do grau de orientação dos grãos da mica (biotita) em analogia com o grau de deformação da rocha, através da construção de figuras de pólo para os minerais. Wenk *et al.* (2008) avaliaram agregados com a mesma

origem, porém com graus de deformação diferentes (granito, proto-milonito, milonito e filonito), e verificaram que para os grãos de quartzo não é possível constatar o aumento da deformação, em função da recuperação que ocorre com os grãos desse mineral (figura 05 (a)). Por outro lado, a análise a partir da biotita mostrou-se muito eficiente para avaliar o potencial reativo das rochas metamórficas (figura 05 (b)), contudo, para que possa ser feita as rochas precisam ter biotita em sua matriz.

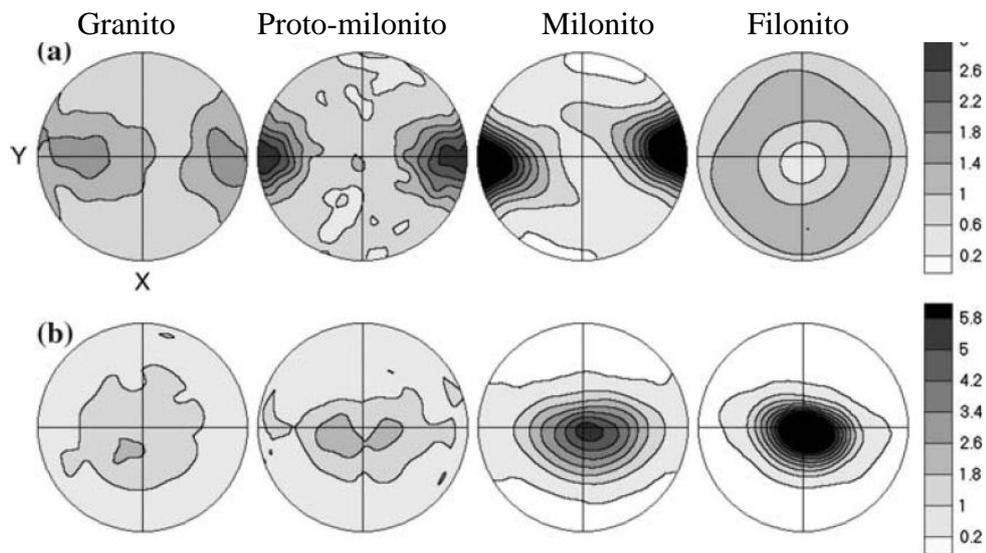


Figura 05: figuras de pólo. (a) quartzo; (b) biotita (WENK *et al.*, 2008)

O que fica claro quando se observa os estudos a respeito das rochas metamórficas é que o seu potencial reativo está diretamente relacionado com a deformação que esse tipo de rocha sofre. Wigun (1995) explica muito bem o que ocorre para que os grãos fiquem mais suscetíveis à reação. Segundo o autor, a deformação e a recuperação fazem com que os cristais passem por tensionamentos. Conseqüentemente, os íons OH^- presentes na pasta de cimento podem ser incorporados à estrutura do cristal, mudando um Si-O-Si para Si-OH:HO-Si . Os prótons podem se recombinar com as hidroxilas para formar água e eventualmente criar inclusões e bolhas contendo não somente água, mas outros íons, por exemplo, alcalinos.

Alguns autores também têm relatado o papel dos feldspatos e das micas na RAA, embora sua reatividade seja considerada secundária se comparada ao quartzo, isso porque ao se dissolverem os feldspatos liberam íons alcalinos e, por essa razão, mais do que propiciar a formação do gel sílico-alcálico, eles podem influenciar na solução dos poros, aumentando sua

alcalinidade e, conseqüentemente, a probabilidade de ocorrência da RAA (CONSTANTINER; DIAMOND, 2003; YUJIANG *et al.*, 2008).

Contudo, no trabalho publicado por Pecchio *et al.* (2006), os feldspatos foram tratados como ‘cúmplices’ para a formação do gel sílico-alcalino das fundações acometidas pela RAA nos edifícios da cidade de Recife, especialmente em função do forte grau de alteração desses minerais nas rochas. Munhoz (2007) também constatou o ataque dos hidróxidos alcalinos aos feldspatos, sugerindo que houve inclusive a penetração desses íons nos feldspatos (semelhantemente com o que ocorreu com o quartzo), o que levou à ruptura das ligações químicas e fragilizou a estrutura dos grãos. Já em 1977, Van Aardt e Visser (1977) salientaram o poder de dissolução dos feldspatos e seu potencial álcali-reativo.

Quanto às micas, poucos estudos são encontrados. Hünger (2007) estudou a RAA em grauvacas, que são rochas ricas em quartzo e micas. No estudo, o autor estabeleceu relações entre a quantidade da mica muscovita e o desencadeamento da RAA. Segundo ele, o alumínio (Al^{3+}) liberado pela muscovita, para a formação da zeólita (silicato de alumínio) numa solução alcalina, inibe a formação do gel da RAA. Tal constatação está de acordo com a teoria da dupla camada, proposta por Prezzi *et al.* (1997), que estabelece que cátions bivalentes e/ou trivalentes (caso do alumínio) diminuem a expansão, os quais foram validados por Hasparyk (1999).

O Departamento de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, em suas recomendações técnicas (*U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS*, 1994), salienta a importância de se tomar cuidado com agregados ricos em micas e argilominerais. De acordo com o documento, esses minerais contribuem tanto quanto o quartzo microcristalino para a RAA. Ao avaliar a influência de impurezas na areia para o desenvolvimento da RAA, Broekmans e Jansen (1998) também enfatizam a importância de se considerar a elevada reatividade das micas.

As micas são silicatos hidratados que têm sua estrutura iônica disposta em folhas (filossilicatos). São minerais bastante susceptíveis à dissolução em meio alcalino. Knauss e Wolery (1989) estudaram a cinética de dissolução da muscovita. O intervalo de pHs utilizados para o estudo foi de 1,4 a 11,8, durante 50 dias, determinado-se a quantidade de sílica, alumínio e/ou potássio dissolvidos. Em todos os pHs foi observada uma elevada taxa de dissolução, porém, essa taxa gradualmente chega a um limite, o que foi interpretado como a

taxa máxima de dissolução do mineral. Por volta do pH= 7 ocorre a taxa limite para dissolução da muscovita.

Os principais exemplares de micas presentes nas rochas ígneas plutônicas são a biotita e a muscovita. As micas podem se alterar em função do intemperismo e dar origem a argilominerais. A muscovita pode originar caolinita e a biotita altera-se para clorita e esmectitas (FRASCÁ; SARTORI, 1998).

Em estudo a respeito da mica flogopita ($\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$), Grattan-Bellew e Beaudoin (1980) verificaram que embora pequena a quantidade de K^+ nesta mica é solúvel em soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e NaOH , os quais estão presentes nos poros do concreto. Assim, os autores concluíram que a presença de flogopita pode potencializar o aumento das taxas de expansão de concretos expostos à intensa umidade, ou seja, potencializar a RAA.

Levando-se em conta que a flogopita e a biotita possuem a mesma quantidade de K (o que varia é que a flogopita contém Mg, enquanto a biotita contém Mg e Fe), a biotita pode ser tão reativa quanto a flogopita.

2.3 MECANISMOS DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Ao longo dos anos, desde a década de 30 quando foi descoberta a RAA, vários autores estudam os mecanismos que levam ao desencadeamento e expansão do gel formado pela reação entre os hidróxidos alcalinos dos poros do concreto e alguns minerais presentes nas rochas utilizadas como agregados. Dentre os autores que apresentaram hipóteses a respeito dos mecanismos da RAA envolvendo silicatos (reação álcali-sílica e álcali-silicato), pode-se referir Hansen (1940) citado por Hobbs (1988), Vivian (1952), Glasser (1979), Prezzi *et al.* (1997), Garcia-Diaz *et al.* (2006) e Ichikawa e Miura (2007).

É consenso entre os pesquisadores de RAA que a reação ocorre com a ruptura das ligações entre os siloxanos. Por esse motivo, Khouchaf *et al.* (2005) salientam a importância de estudar as mudanças que ocorrem ao redor do silício e/ou do oxigênio na reação álcali-sílica.

O que ocorre para o desencadeamento da RAA é a ionização do grupo $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ das partículas de agregado no meio alcalino do concreto. As partículas reativas adquirem densidade de carga negativa. Durante esse processo, Na^+ , Ca^{2+} , OH^- e água entram na partícula, sendo que a

penetração dos hidróxidos alcalinos nas partículas contendo sílica é determinada pelo tamanho de íons positivos hidratados. A entrada dos OH⁻ nas partículas é acompanhada pela quebra das ligações =Si-O-Si=, liberação de sílica e formação de uma dupla camada ionizada ao redor de cada partícula negativa (CHATTERJI, 2005).

A teoria da dupla camada para o desencadeamento da expansão devido à RAA foi estabelecida por Prezzi *et al.* (1997). Para os autores, a expansão do gel da RAA é atribuída a forças de repulsão oriundas da formação de uma dupla camada com íons adsorvidos à superfície das partículas de agregado. Segundo eles, quando um sólido e um líquido entram em contato, a superfície do sólido quase invariavelmente fica excessivamente carregada, ou seja, enriquecida em íons. No caso da RAA uma camada de íons cátions (sódio, potássio e cálcio) desenvolve-se na superfície da sílica que possui uma camada de íons ânions. O sistema composto por partículas de silicato e pela solução dos poros formará primeiramente uma suspensão coloidal. Dependendo da disponibilidade de solvente, do tipo de solução dos poros e das condições de exposição, o agregado poderá precipitar.

De acordo com a teoria da dupla camada, a reação álcali-sílica envolve a interação da superfície altamente carregada da sílica do agregado e a solução alcalina dos poros do concreto. Essa reação leva à dissolução de sílica e formação de um gel, que é mais ou menos expansivo na presença de água, dependendo da sua composição química (PREZZI *et al.*, 1997; HASPARYK, 1999), salientando-se que as partículas de sílica do gel interagem com os fluidos do concreto.

Khouchaf *et al.* (2005) descrevem a penetração dos íons hidroxila (OH⁻) e dos alcalinos (K⁺ e Ca²⁺) na sílica pobremente cristalina dos agregados, segundo a equação 01, na qual verifica-se que o ataque se dá inicialmente pelos íons hidroxila.



Segundo os autores, a partir daí é induzida a ruptura das ligações Si-O-Si entre os tetraedros de SiO₂, chamados Q⁴, produzindo SiO_{5/2}⁻ e SiO_{5/2}H (chamado Q³). Assim, a equação da reação poderia ser escrita conforme a equação 02:



Nessa mesma linha de raciocínio, Verstraete *et al.* (2004) verificaram que com o passar do tempo a fração amorfa Q^3 aumenta linearmente com o número de sítios Q^4 (cristalinos). O aumento da fração amorfa em função da reação álcali-sílica leva à formação de produtos amorfos dentro das partículas de agregado, o que poderia explicar o fenômeno de expansão do agregado no concreto.

Sendo assim, Khouchaf *et al.* (2005) explicam que fases amorfas e cristalinas co-existem no agregado durante o ataque alcalino, pois a formação de Q^3 durante a reação álcali-sílica causa, simultaneamente, a formação de sítios Q^4 pela deformação/relaxação de sua vizinhança. Os resultados de Hasparyk (2005), em análises por ressonância nuclear magnética do gel exsudado da RAA, corroboram com essa afirmação.

Florindo (2009) mostra que a estrutura do gel da RAA é uma rede desordenada do tipo lamelar, formada por domínios extensos de tetraedros Q^3 com ligações OH e conectadas com sítios Q^n com $n=1, 2$ e 4 (n = número de ligações Si-O). Os cátions K^+ estão uniformemente distribuídos sobre as diferentes espécies Q^n . Segundo a autora, existe abundância de água na estrutura do gel, o que lhe confere alta mobilidade.

Baseando-se nesses conceitos, Garcia-Diaz *et al.* (2006) formularam uma nova teoria a respeito dos mecanismos de desencadeamento da reação álcali-sílica. Tal teoria estabelece que a reação pode ser dividida em 3 períodos: um período latente, um período de expansão e um período de cicatrização. Segundo os autores, uma barreira de difusão, constituída por C-S-H, C-Na-S-H e C-K-S-H se forma durante os primeiros estágios da reação (período latente). Num segundo momento, as ligações do siloxano que se quebram para formar Q^3 prevalecem sobre a dissolução durante o período de expansão. A formação de Q^3 causa expansão do agregado e aumento no volume específico dos poros devido à micro-fissuração. Tais conclusões confirmam os resultados do trabalho publicado pela mesma equipe de autores, Bulteel *et al.* (2002), que mostraram, através de análises petrográficas, que a frente de reação penetra profundamente no agregado através da conectividade da porosidade. Com o passar do tempo, segundo Garcia-Dias *et al.* (2006), produtos Q^0 e Q^3 preenchem as fissuras geradas pela expansão e o volume dos poros dos agregados diminui em função do preenchimento das fissuras (cicatrização).

Mais recentemente, Ichikawa e Miura (2007) propuseram um novo modelo para a RAA. Segundo o modelo proposto pelos autores, os íons OH^- , Na^+ e K^+ presentes na solução dos

poros despolimerizam os agregados ricos em sílica para convertê-los em um fluido sílico alcalino hidratado. Assim, a superfície da região do agregado é homogeneamente convertida em silicato alcalino e o consumo de OH^- pelas reações leva à dissolução do Ca^{2+} na solução. O Ca^{2+} penetra facilmente na camada de silicato alcalino para repolimerizá-lo. O agregado é agora rigidamente rodeado pela borda de reação que surge da penetração de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e OH^- , sendo que o Ca^{2+} penetra muito mais lentamente que os íons Na^+ , K^+ . Os íons OH^- , Na^+ e K^+ penetram através da borda de reação para converter o silicato livre em uma massa de silicato alcalino. A pressão expansiva resultante é concentrada no agregado, que acaba por fissurar juntamente com a pasta de cimento ao seu redor. A figura 06 mostra o esquema proposto:

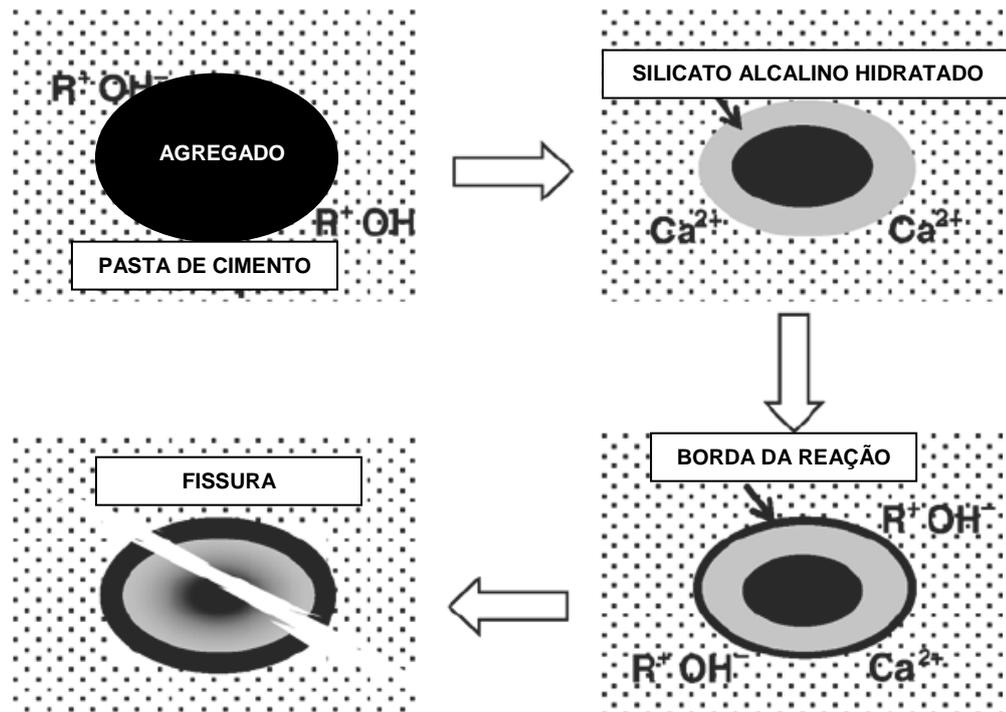


Figura 06: modelo proposto por Ichikawa e Miura (2007)

Munhoz (2007) também verificou a presença de produtos cristalizados da reação álcali-silicato dentro de grãos de agregado, sugerindo que Na^+ , K^+ , Ca^{++} e OH^- penetraram nos grãos e reagiram com a sílica. Segundo o autor, a reação rompeu as ligações químicas dos silicatos e tornou frágil a estrutura dos grãos.

Prince *et al.* (2001) correlacionaram os mecanismos de desencadeamento da RAA em estruturas de concreto com os mecanismos que governam a alteração natural das rochas. Os

autores concluíram que a maioria dos aluminossilicatos presentes nos agregados utilizados no concreto tem potencial para desencadear RAA ao longo do tempo, porém, o desenvolvimento das reações depende de considerações cinéticas e do ambiente. Além disso, o desencadeamento da RAA requer que um filme líquido seja confinado ao redor do agregado para proporcionar a hidrólise. Os novos produtos formados precipitam a partir desse filme. De acordo com o estudo feito, a alteração das rochas silicáticas pode ocorrer pela cristalização da zeólita, mais precisamente da laumontita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Essa zeólita possui o mesmo mecanismo de formação da zeólita calcítica ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), identificada nos produtos da RAA. Os autores salientam ainda que:

- (a) os agregados geralmente são formados por constituintes requeridos para o desenvolvimento da RAA – os álcalis e o cálcio freqüentemente estão presentes nas rochas;
- (b) a RAA pode ser desencadeada sem cimento, embora seja um processo extremamente lento e que ocorre em escala geológica (auto-reação);
- (c) os produtos formados nem sempre são géis, podem ser zeólitas.

Segundo Diop e Grutzeck (2008), as zeólitas sódicas são instáveis e tem facilidade na troca catiônica com outras substâncias presentes na solução do concreto.

A formação da zeólita também é relatada por outros autores. Marfil e Maiza (1993) identificaram uma zeólita correspondente ao grupo da heulandita ($(\text{Ca},\text{Na})_{46}\text{Al}_6(\text{Al},\text{Si})_4\text{Si}_{26}\text{O}_{72}24\text{H}_2\text{O}$) nos produtos da RAA.

Hüenger (2007), em estudo a respeito da contribuição do quartzo e o papel do alumínio presentes na grauvaca para o desenvolvimento da RAA, constatou a formação de zeólita sódica. O autor verificou que o alumínio presente afeta a concentração de sílica, resultando sempre na diminuição dessa concentração, pela formação de aluminossilicatos.

Ao longo dos anos, vários estudos a respeito do papel do cálcio nos mecanismos da RAA também têm sido publicados. Em 1977, Van Aardt e Visser (1977) explicaram que a presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em rochas contendo agregados feldspáticos pode contribuir para a RAA, pois ao longo do tempo, sob condições de umidade, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em contato com os agregados reage com os feldspatos alcalinos (K-feldspatos). Dessa maneira, hidróxidos alcalinos podem ser

liberados sob a forma de Na^+ , K^+ , OH^- , ou silicatos de sódio e potássio, formando um gel parcialmente solúvel em água. Segundo os autores, sob certa concentração de álcalis, os silicatos de cálcio tendem a dissolver, formando um gel constituído por cálcio, potássio e sódio ao redor da sílica, que com o passar do tempo pode expandir ao adsorver água.

Dent Glasser e Kataoka (1982) descrevem o que ocorre quando o gel da RAA está numa solução com álcalis e hidróxido de cálcio. De acordo com os autores há uma imediata liberação de álcalis e hidróxidos devido à adsorção e reação com a sílica sólida (proveniente dos agregados). Se uma quantidade limitada de cálcio está presente, o Ca^{2+} precipita-se imediatamente devido à adsorção na sílica e a precipitação de C-S-H. Se a quantidade de Ca^{2+} é suficientemente baixa, alguns dos íons alcalinos são adsorvidos e liberados ao mesmo tempo.

Alguns anos mais tarde, Chatterji *et al.* (1986) publicaram um estudo mostrando que a presença de Ca(OH)_2 livre é um pré-requisito para o desencadeamento da RAA. Os autores descrevem o mecanismo de expansão afirmando na presença de Ca(OH)_2 livre, íons Na^+ , OH^- e a água penetram nos grãos reativos, quebrando as ligações Si-O-Si e levando à difusão da sílica.

Para Wang e Gillot (1991), a presença de Ca(OH)_2 influencia a reação álcali-sílica. Segundo eles, o Ca(OH)_2 possui duas funções na RAA: primeiramente mantém o pH elevado e, num segundo momento, o Ca^{2+} pode ser substituído por íons alcalinos. Dessa maneira, o processo de expansão poderia ser descrito em 4 passos: (1) reação inicial nos grãos de sílica; (2) ataque dos íons OH^- ao grupo siloxano; (3) substituição do Na^+ e do K^+ por prótons do grupo silanol e formação do gel expansivo; (4) substituição dos íons Ca^{2+} por íons alcalinos no gel e formação do gel menos expansivo, constituído por cálcio, álcalis e sílica.

Chatterji (2005) explica o papel do cálcio nos mecanismos da RAA, dizendo que este dificulta a difusão da sílica liberada quando os OH^- penetram nas partículas de agregados. Por isso, uma dupla camada se forma ao redor de cada partícula negativa. A alta concentração de Ca^{2+} na dupla camada explica a quantidade de CaO contido nos produtos da reação. De acordo com o autor, as reações que ocorrem com o Ca(OH)_2 levam à redução do Ca^{2+} na solução dos poros.

Sendo assim, para evitar que a expansão ocorra, poderia-se pensar em remover o Ca(OH)_2 livre na pasta de cimento. Nesse sentido, vários estudos vem demonstrando que a utilização

de uma adição pozolânica, rica em sílica, suficientemente fina e em proporções adequadas, previne a expansão. Para exemplificar, cita-se o estudo de Hasparyk (1999), que utilizou sílica ativa e cinza de casca de arroz para prevenir as expansões decorrentes de um quartzito e de um basalto.

Hasparyk (1999) e Munhoz (2007) explicam que essas adições mitigam a RAA num primeiro momento através da diluição do cálcio proveniente do clínquer Portland, que refletirá na relação CaO/SiO_2 dos aglomerantes e, num segundo momento, pela redução do Ca(OH)_2 proveniente das reações de hidratação do cimento, através das reações pozolânicas.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura relata de maneira bastante detalhada todos os mecanismos envolvidos na reação entre a sílica presente nos agregados e os hidróxidos alcalinos dos poros do concreto, mas ainda não há consenso a respeito de como ocorre efetivamente a expansão dos produtos oriundos da reação álcali-sílica. Entretanto, fica claro é que o entendimento desses mecanismos abrange estudos em microescala dos envolvidos na reação álcali-sílica: sílica, álcalis e água.

As considerações a respeito da influência da sílica livre presente nos agregados para a ocorrência da RAA evidenciam que a presença de quartzo com cristalinidade baixa nas rochas vulcânicas ou quartzo deformado nas rochas ácidas, são os principais responsáveis para que a reação ocorra.

Através do que foi relatado no presente capítulo também ficou claro que características intrínsecas desses constituintes das rochas podem intervir para a ocorrência de uma reação mais ou menos intensa.

Baseando-se nessas considerações a respeito da relação entre os minerais constituintes das rochas e a RAA foi elaborado o programa experimental desta tese. Além disso, através dos resultados das publicações citadas, foi possível fundamentar os resultados obtidos no presente estudo.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para investigar a influência do grau de deformação e da cristalinidade do quartzo presente nos agregados utilizados no concreto no que diz respeito ao desenvolvimento da RAA, foi proposta uma série de experimentos. Tais experimentos foram elencados de modo que fosse possível atingir os objetivos propostos, de acordo com o que retrata a literatura.

A fim de facilitar o entendimento e a análise dos resultados, o programa experimental foi dividido em dois grupos. O grupo 01 agrupa materiais e ensaios para análise da influência da cristalinidade do quartzo na RAA. O grupo 02 contempla materiais e ensaios pertinentes à avaliação da influência da deformação do quartzo na RAA. A figura 07 mostra esquematicamente como o trabalho foi organizado.

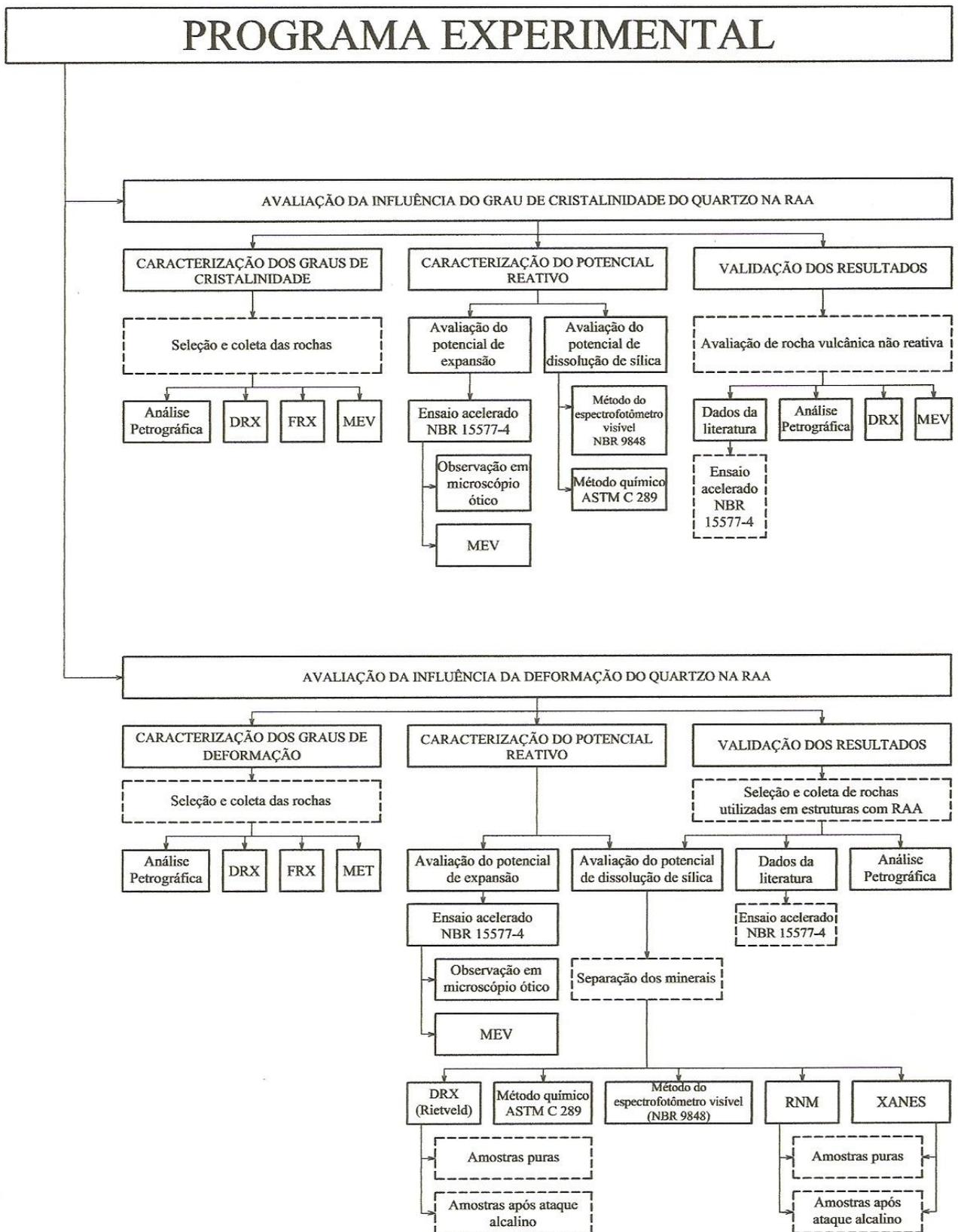


Figura 07: organização do programa experimental

3.1 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

O programa experimental desse estudo foi estruturado de modo a avaliar como e quanto o grau de deformação e a cristalinidade do quartzo das rochas utilizadas como agregados no concreto influenciam na RAA. Para avaliar tais características, primeiramente foi realizada uma seleção criteriosa dessas rochas, que está descrita nos itens a seguir.

3.1.1 Rochas para avaliação da influência do grau de cristalinidade do quartzo na RAA

A fim de avaliar a influência da cristalinidade do quartzo dos agregados na RAA, optou-se pelo estudo de rochas de origem vulcânica. Além de apresentarem minerais bem cristalizados em sua matriz, estas rochas são constituídas de fases de baixa cristalinidade na mesóstase que ocupa os interstícios dos grãos. Esse material intersticial, muitas vezes considerado amorfo por não transmitir luz em microscopia ótica, pode possuir grãos de quartzo e feldspatos bem cristalizados, conforme pode ser observado no trabalho de Tiecher (2006).

Um basalto (BEV) e um riolito (RPF) toleíticos¹² foram as rochas coletadas para avaliação das características desse material intersticial. Essas duas rochas foram escolhidas por apresentarem uma importante diferença entre si no conteúdo de sílica e, ainda, distintos graus de cristalinidade das suas mesóstases. O basalto denominado BEV é oriundo do município de Estância Velha, leste do Rio Grande do Sul e o riolito RPF de Passo Fundo, município localizado na região nordeste do estado, ambos constituintes da Formação Serra Geral (WHITE, 1908), conforme pode ser observado na figura 08.

¹² Rochas formadas por um tipo de magma com ampla distribuição na superfície do globo, sendo encontrado em cadeias oceânicas, vulcões em escudo e regiões continentais relacionadas a basaltos de platô, como os encontrados na Bacia do Paraná. Essas rochas podem possuir mais de 50% de sílica em sua constituição (GUERRA; GUERRA, 2001).

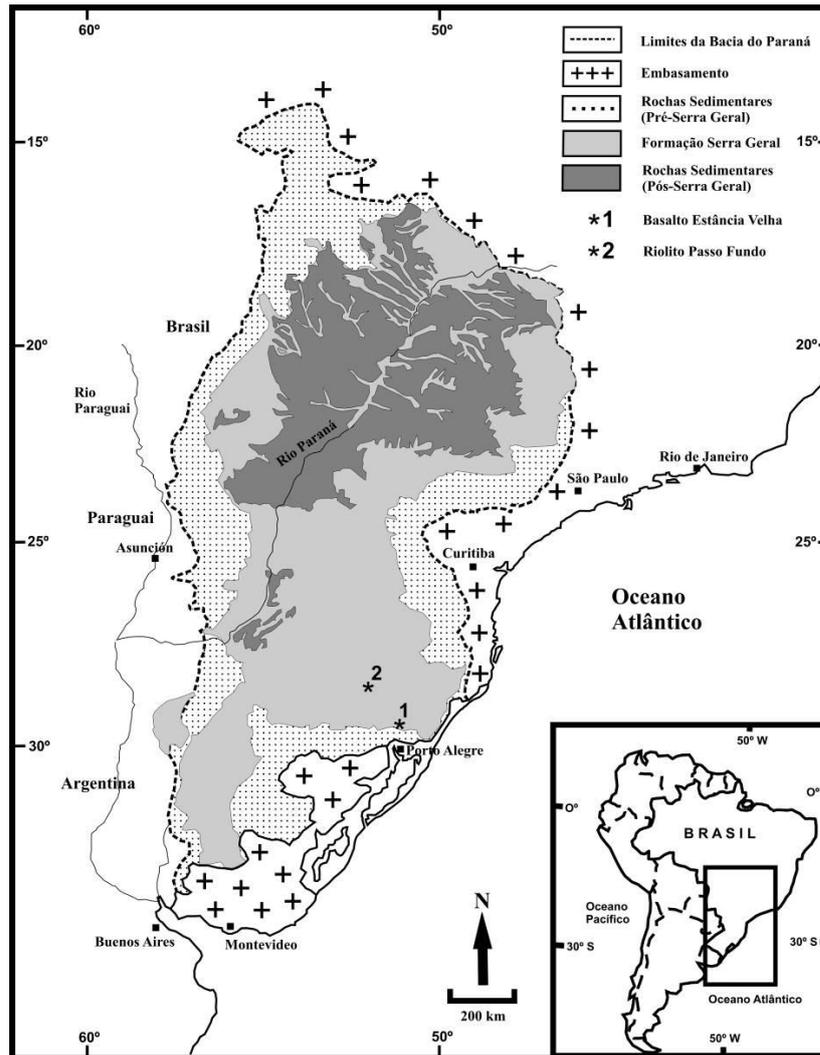


Figura 08: localização da região de coleta das amostras de origem vulcânica (adaptado de Frank, 2008)

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral são o produto de um extenso vulcanismo fissural que se processou no início do Cretáceo, ou seja, há aproximadamente 134 milhões de anos, na Bacia do Paraná e na porção correspondente da África (Namíbia e Angola), antes da separação dos continentes africano e sul-americano. A formação compõe-se de corpos magmáticos extrusivos (derrames) e intrusivos (sills, lacólitos, bismálitos, etc) (TURNER *et al.*, 1994). Segundo Waichel *et al.* (2008), as rochas vulcânicas cobrem aproximadamente 900 mil km² e foram classificadas de acordo com sua composição química por Peate *et al.* (1992).

Na Formação Serra Geral as rochas de composição básica ($\text{SiO}_2 < 60\%$) são mais abundantes, enquanto as rochas de composição mais ácida ($\text{SiO}_2 > 64\%$) são encontradas predominantemente na porção sudoeste da área de ocorrência da formação (LUCETTI *et al.*,

2005). O basalto coletado no município de Estância Velha (figura 09 (a) e figura 9 (b)) é uma rocha vulcânica básica (magma tipo Gramado¹³) e o riolito coletado em Passo Fundo (figura 09 (c) e figura 09 (d)) é um rocha vulcânica ácida (magma tipo Palmas¹⁴).

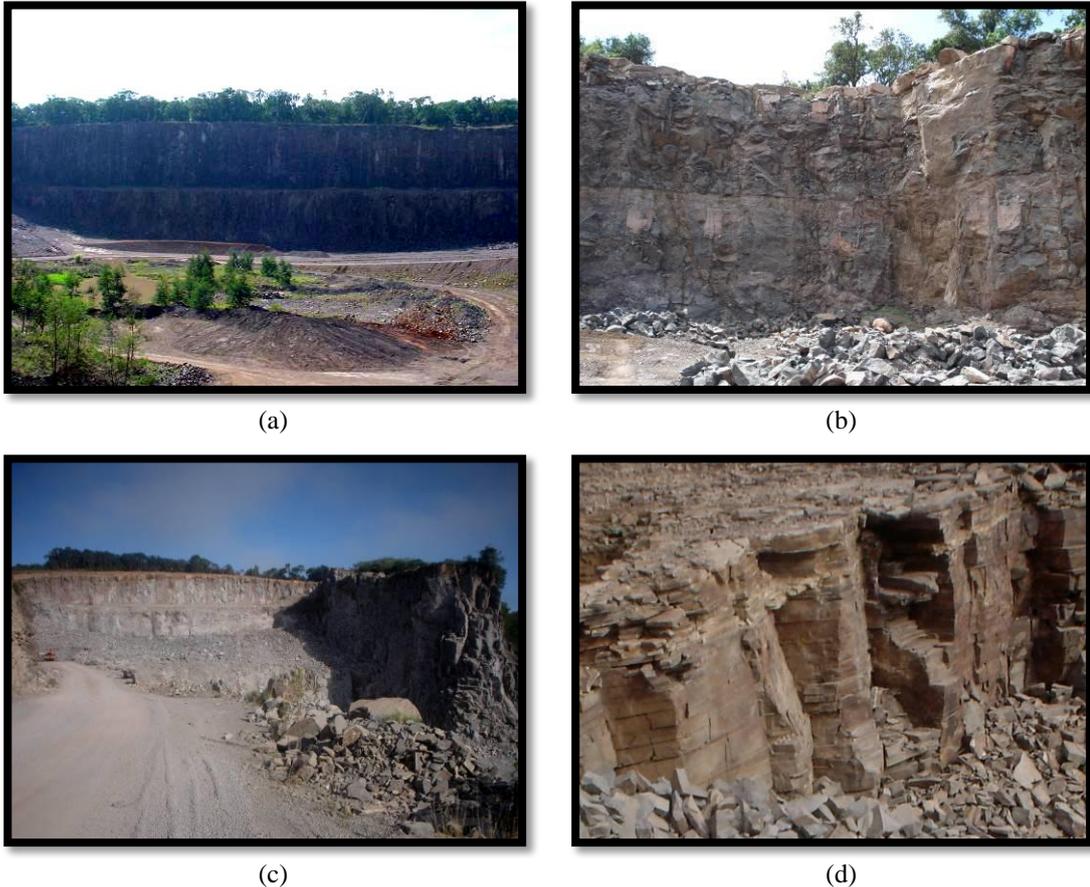


Figura 09: coleta das amostras de origem vulcânica. (a) e (b) basalto BEV; (c) e (d) riolito RPF

Um basalto classificado como inócua no ensaio acelerado das barras de argamassa (ASTM C 1260 e NBR 15577-4) no estudo de Couto (2008) foi selecionado como padrão de rocha vulcânica inócua, a qual também não mostrou-se reativa em campo. Conforme o que tem sido relatado na literatura nacional (VALDUGA (2002); TIECHER (2006); COUTO (2008)), a maior parte dos basaltos brasileiros se classifica como reativa no ensaio acelerado das barras de argamassa (ASTM C 1260 ou NBR 15577-4). A fim de verificar as diferenças existentes entre o material intersticial de rochas vulcânicas reativas e de uma vulcânica inócua, foi selecionado para o estudo um basalto do estado sul de Goiás, que foi chamado de BNRG.

¹³ Variedade de magma com baixo teor de TiO_2 (PEATE *et al.*, 1992)

¹⁴ Variedade de magma intermediário a ácido com baixos conteúdos de P_2O_5 (PEATE *et al.*, 1992)

3.1.2 Rochas para avaliação da influência da deformação do quartzo na RAA

Para avaliar a influência do grau de **deformação** do quartzo dos agregados na RAA, foram selecionadas rochas com diferentes níveis de deformação desse mineral.

A seleção das amostras foi feita de modo que fosse possível comparar diferentes intensidades de deformação sem a interferência de fatores alheios a essa característica do quartzo na rocha, tais como sua composição química. Foram coletadas amostras de origem granítica em um mesmo afloramento rochoso, criando, dessa forma, um padrão de referência para comparação da relação textura/reactividade dos grãos de quartzo constituintes de qualquer rocha.

Tal afloramento localiza-se na região de Monte Bonito, município de Pelotas, sul do estado do Rio Grande do Sul, que faz parte do Batólito Pelotas, conforme ilustra a figura 10.

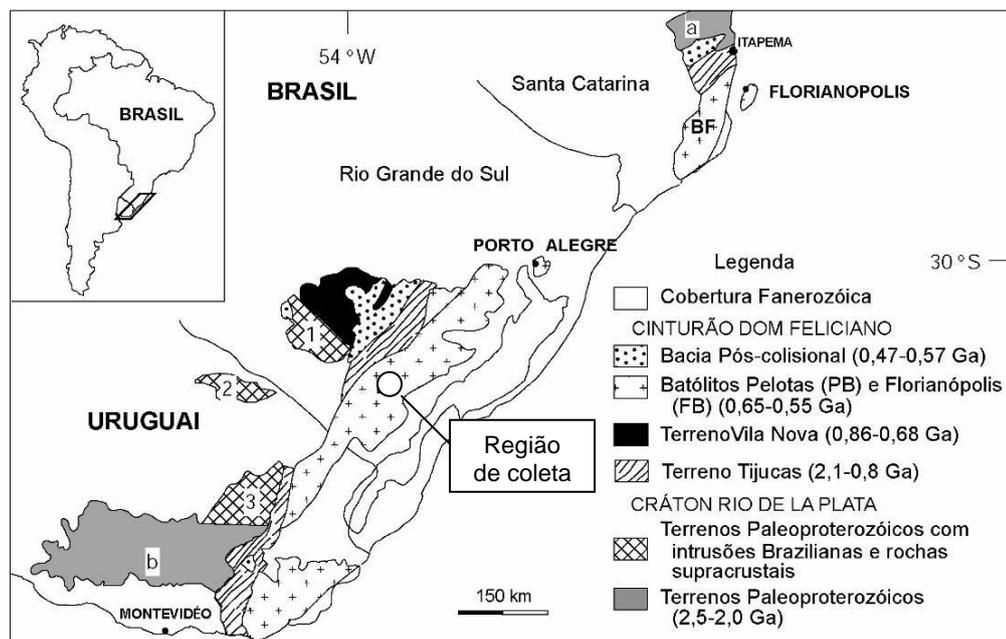


Figura 10: localização da região de coleta das amostras de origem granítica (PHILLIP; MACHADO, 2005)

O Batólito Pelotas situa-se na porção leste do Escudo Sul-Riograndense, sua extensão aproximada é de 370 km e sua largura está entre 70 a 110 km. Possui continuidade em Santa Catarina e no Uruguai (SHUKOWSKY; MANTOVANI, 1991). Segundo Phillip *et al.* (2002), o Batólito Pelotas é um complexo plutônico que compreende seis suítes granitóides formadas por um magmatismo que durou aproximadamente 70 milhões de anos.

As suítes granitóides individualizadas no Batólito são: Suíte Intrusiva Pinheiro Machado, Suíte Intrusiva Eral, Suíte Intrusiva Viamão, Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul, Suíte Granítica Cordilheira e Suíte Granítica Dom Feliciano. As rochas de origem granítica que foram coletadas para o presente estudo fazem parte da Suíte Viamão, possuem textura porfirítica¹⁵ e ocupam aproximadamente 90 km².

No afloramento, foi possível identificar, visualmente, três distintos graus de deformação da rocha, os quais foram chamados de M1, M2 e M3, conforme pode ser observado através da figura 11. Chamou-se M1 a amostra coletada da parte com menor nível de deformação. M2 é a amostra com nível intermediário de deformação e M3 a amostra mais deformada.

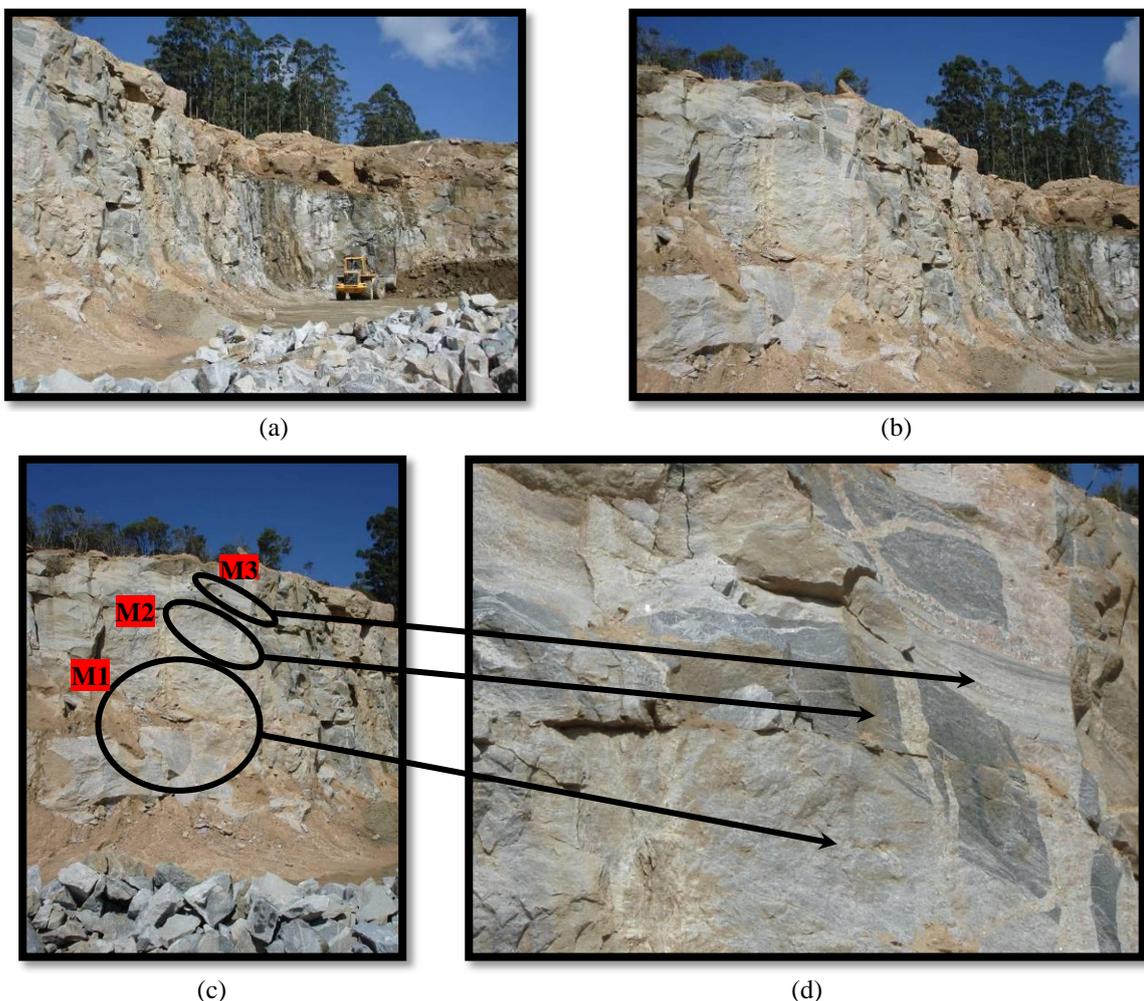


Figura 11: coleta das amostras de origem granítica. (a) e (b) vista geral do local de coleta; (c) posicionamento das amostras no maciço rochoso; (d) detalhe dos níveis de deformação

¹⁵ Porfirítica é uma textura constituída por minerais com duas granulações distintas, minerais grandes e pequenos. Os minerais grandes, normalmente menos freqüentes, são denominados fenocristais, e os pequenos, que constituem a maioria, são chamados de massa fundamental (MOTOKI, 2004).

A distribuição das rochas M1, M2 e M3 é irregular na área do afloramento, podendo constituir faixas desde poucos centímetros até metros, observando-se transição entre o granito e as faixas miloníticas. No momento da coleta, tomou-se cuidado para que não houvesse ‘contaminação’ entre os três graus de deformação. Entretanto, quando as amostras são utilizadas para confecção de concreto, não há essa separação. Sendo assim, se fosse feito o recolhimento de uma amostra genérica, ou seja, correspondente a um volume qualquer, sem a preocupação com o grau de deformação, é possível que a classificação quanto à álcali-reatividade não correspondesse ao todo. Essa colocação enfatiza a necessidade de se conhecer os locais de origem dos agregados que se utiliza no concreto, bem como sua possível heterogeneidade.

Para validar as correlações estabelecidas entre o grau de deformação do quartzo e a ocorrência da RAA com as amostras M1, M2 e M3 através das análises feitas em laboratório, também foram estudados agregados utilizados em estruturas de concreto acometidas pela reação. Estas rochas, comprovadamente reativas em campo, foram selecionadas de acordo com sua composição mineralógica, de modo que fosse possível compará-las com a mineralogia das amostras M1, M2, e M3. A classificação litológica dos agregados selecionados de estruturas de concreto que desenvolveram RAA, sua origem e a estrutura acometida pela reação estão descritos no quadro 01.

Quadro 01: rochas selecionadas que foram empregadas em estruturas com/sem RAA

Rocha	Sigla utilizada	Origem	Estrutura	RAA	
				SIM	NÃO
Quartzito	QZITO	Passos/Minas Gerais	UHE Furnas	X	
Milonito	MXT	Paulo Afonso/Bahia	UHE Apolônio Sales (Moxotó)	X	
Milonito	MRR	Recife/Pernambuco	Fundações	X	
Granito	GNRR	Recife/Pernambuco	Fundações		X

No quadro 01, observa-se que também foi selecionado um granito que não desenvolveu a RAA em campo (GNRR). Este agregado foi utilizado em uma estrutura sob as mesmas condições do milonito MRR (ver quadro 01). O objetivo de tal escolha é conhecer as características de um agregado inócuo e estabelecer um parâmetro para compará-lo com os agregados reativos.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

No presente estudo, todas as amostras foram submetidas aos processos de preparação intrínsecos de cada análise, como por exemplo, moagem, laminação, entre outros. Cada um desses processos será exposto juntamente com a descrição do ensaio em que foram empregados. Entretanto, algumas amostras foram preparadas de forma idêntica para serem analisadas de diferentes maneiras. Neste item serão descritas as formas de preparação comuns à utilização em mais de uma técnica de análise.

3.2.1 Separação dos minerais

Com o objetivo de avaliar a influência da deformação do quartzo na RAA, excluindo-se a interferência de outros silicatos que, comprovadamente, podem contribuir tanto para a dissolução de sílica quanto de álcalis na RAA, foram utilizados grãos de quartzo extraídos da matriz das rochas graníticas.

As rochas que sofreram o processo de separação dos minerais foram: M1, M2, M3, GNRR, QZITO (origem das amostras descrita no item 3.1.1).

Nas amostras de origem vulcânica, essa separação não foi possível. Levando-se em conta que o principal objeto de estudo nessas rochas é a mesóstase, pois as amostras dessa origem foram utilizadas para avaliar a influência da cristalinidade do quartzo na RAA, verificou-se que não seria possível separá-las, como foi feito com o quartzo das rochas graníticas. Conforme foi visto anteriormente, a mesóstase é uma mistura de minerais – especialmente quartzo, K-feldspatos e argilominerais – presente nos interstícios dos grãos.

A separação dos minerais das rochas foi realizada no Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Antes de iniciar o processo de separação dos minerais, cada uma das amostras foi moída, peneirada e lavada, até obter tamanhos de grãos menores que 0,15mm. Tal tamanho de grão mostrou-se adequado, através de observação em lupa, para separar a maior parte dos minerais principais das amostras: quartzo, K-feldspato, plagioclásio e micas.

O primeiro procedimento realizado foi a separação magnética dos minerais, onde foram extraídos os minerais da matriz que continham ferro, que neste estudo são, principalmente, as micas. Esse procedimento foi efetuado com um separador eletromagnético Iso Dynamic, modelo Frantz (figura 12 (a)).

A separação entre quartzo e feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) foi feita através da diferença de densidade entre os mesmos. De acordo com Deer *et al.* (2000), a densidade do quartzo é de 2,65g/cm³ e dos feldspatos varia de 2,55 a 2,63g/cm³.

O trabalho consistiu em imergir a rocha moída, sem as micas, em um líquido de densidade elevada dentro de um balão de separação. O líquido utilizado foi o bromofórmio (CHBr₃), cuja densidade é de 2,84g/cm³.

Nessa etapa todos os minerais ficaram sobrenadantes (figura 12 (b)). Em seguida acrescentou-se outro líquido com densidade menor (no caso foi utilizado acetona – CH₃(CO)CH₃ – 99,5%, densidade 0,788g/cm³) até que o mineral de maior densidade afundasse e o mineral com menor densidade flutuasse (figuras 12 (c) (d) (e) (f)). Nesse processo uma camada intermediária se formou, constituída por grãos onde quartzo e feldspatos unidos em um mesmo grão.

Ao final do processo de separação dos minerais foi observada uma divisão de três camadas distintas dentro do balão volumétrico (figura 12 (d)). A primeira camada constituída pelo mineral mais leve, no caso os feldspatos (figura 12 (e)). Na camada intermediária (segunda) houve uma mistura de feldspatos e quartzo (grãos unidos desses minerais). E, por fim, a terceira camada, composta por grãos de quartzo, os minerais mais pesados da mistura (figura 12 (f)). A figura 12 mostra todas as etapas do processo descrito para a separação dos minerais nas rochas graníticas.

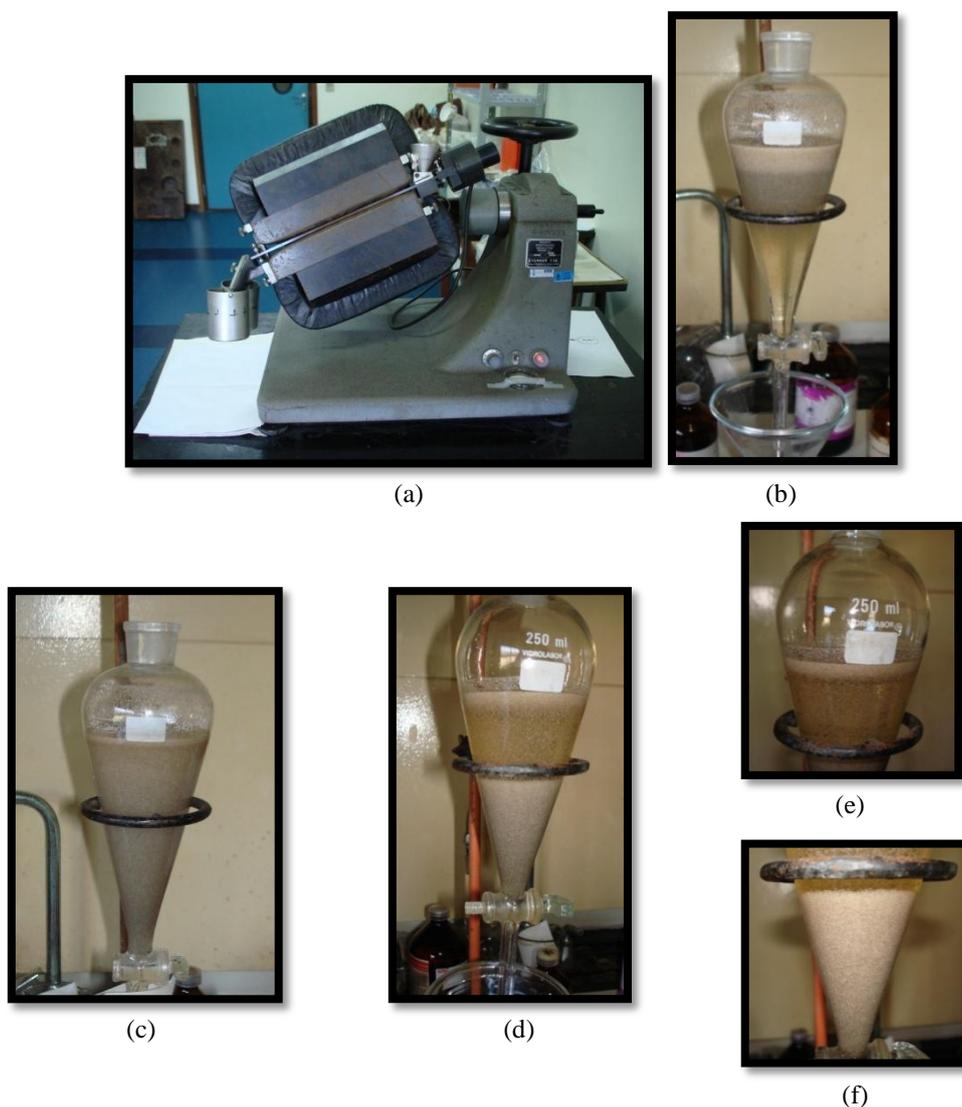


Figura 12: separação dos minerais. (a) separador eletromagnético – retirada das micas; (b) colocação da amostra no bromofórmio puro; (c) quebra inicial da densidade do bromofórmio com a acetona – minerais misturados; (d) acerto da densidade adequada para separação dos minerais; (e) minerais sobrenadantes – feldspatos; (f) minerais afundados – quartzo

Somente os grãos de quartzo obtidos da separação dos minerais foram utilizados para as etapas seguintes deste trabalho. A denominação das amostras após o processo de separação da matriz foi:

- a) QM1: quartzo oriundo da rocha M1;
- b) QM2: quartzo oriundo da rocha M2;
- c) QM3: quartzo oriundo da rocha M3;
- d) QGNRR: quartzo oriundo da rocha GNRR;
- e) QQZITO: quartzo oriundo da rocha QZITO;

3.2.2 Ataque alcalino

O ataque alcalino realizado no presente estudo teve como objetivos avaliar as mudanças que ocorrem com as amostras de quartzo quando estes reagem com os hidróxidos alcalinos (formação do gel da RAA), bem como avaliar o potencial de dissolução do quartzo presente nas rochas graníticas e vulcânicas, comparando o potencial de dissolução do quartzo em função dos diferentes graus de deformação e cristalinidade.

Dessa forma, foram submetidos ao ataque alcalino as rochas vulcânicas BEV e RPF e os grãos de quartzo separados das rochas M1, M2, M3, GNRR, QZITO, conforme procedimento descrito no item 3.2.1.

Para realização do ataque alcalino utilizaram-se amostras com granulação passante em peneira #200. Foi feita a mistura de 0,5g de cada amostra em 5mL de solução de hidróxido de potássio (KOH) com concentração de 1M. As amostras permaneceram durante 3 dias a 80°C em estufa. Após esse período foram retiradas da estufa e, ao atingirem temperatura ambiente, filtradas, para retirada do KOH, sendo secas em estufa (60°C). Esse procedimento justifica-se pelo fato de o KOH ser um reagente higroscópico, o que dificulta a permanência das amostras no estado seco, necessário para boa parte das análises subsequentes (RNM, XANES e EXAFS).

O ataque alcalino aos minerais foi realizado no Laboratório do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE), vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFRGS.

3.3 ANÁLISES EMPREGADAS

A avaliação da influência do grau de deformação do quartzo dos agregados foi realizada paralelamente à avaliação da influência da sua cristalinidade. Como as avaliações utilizam rochas distintas, nem sempre as mesmas análises podem fornecer as respostas necessárias.

Conforme será observado no seguimento do texto deste capítulo, a descrição das análises empregadas no estudo foi feita procurando-se explicar as perspectivas de resultado de cada um, de acordo com as etapas em que foram empregados.

3.3.1 Análise petrográfica por microscopia ótica

A análise petrográfica por microscopia ótica foi realizada no Departamento de Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências da UFRGS. Através dessa análise, foram investigadas as características mineralógicas e texturais das rochas selecionadas para avaliação da influência dos graus de deformação e cristalinidade do quartzo na RAA.

No presente estudo, a análise petrográfica, em conjunto a análise modal quantitativa, teve como objetivo principal caracterizar e quantificar os diversos níveis de deformação, bem como os graus de cristalinidade, do quartzo constituinte das rochas.

A técnica também foi utilizada para observar algumas amostras das barras de argamassa submetidas ao ensaio da NBR 15577-4 (ensaio descrito no item 3.3.7 a seguir), a fim de avaliar as mudanças que ocorrem com os grãos das rochas após o desencadeamento da RAA.

Para tanto, foram confeccionadas lâminas delgadas com as rochas e fragmentos das barras de argamassa (fatias retiradas da parte central das barras). O processo consistiu em cortar uma lâmina de rocha/argamassa em serra diamantada e fixá-la em um vidro (utilizou-se cola araudite). Após, realizou-se o polimento das mesmas até que sua espessura fosse de aproximadamente 30 μ m.

As lâminas petrográficas foram observadas em microscópio ótico de luz transmitida, onde foram descritos detalhadamente os minerais constituintes de cada amostra, dando ênfase à sua textura.

Através de um contador de pontos acoplado ao microscópio, efetuou-se a análise modal quantitativa de todos os minerais, bem como as diferentes texturas do quartzo e das mesóstases presentes. Foram contados 2000 pontos por amostra, sendo repetidas por 5 vezes as contagens (conforme Apêndice B).

3.3.2 Difractometria de raios X (DRX)

A DRX tem se mostrado uma técnica valiosa para o estudo de materiais policristalinos, uma vez que serve tanto para identificação como para o estudo da estrutura cristalina dos materiais.

O processo de difração de raios X ocorre pela interação do feixe de raios X com os elétrons que compõem os cristais, sem a mudança de comprimento de onda. Ao incidir raios X em um plano de átomos formadores de um mineral (cristal) ocorre a difração dos mesmos no prolongamento do feixe incidente e na sua reflexão pelo plano de íons (hkl). Isso ocorre somente quando algumas condições geométricas, expressas pela lei de Bragg (equação 03), são satisfeitas. O plano (hkl) corresponde a um arranjo atômico em que vários conjuntos de átomos se posicionam da mesma maneira, paralelamente um ao outro. As distâncias entre os planos hkl (distâncias interplanares) são características de cada mineral, conforme exemplifica a figura 13. Sendo assim, aplicando-se a lei de Bragg (equação 03), é possível identificá-los por DRX (FORMOSO, 1984).

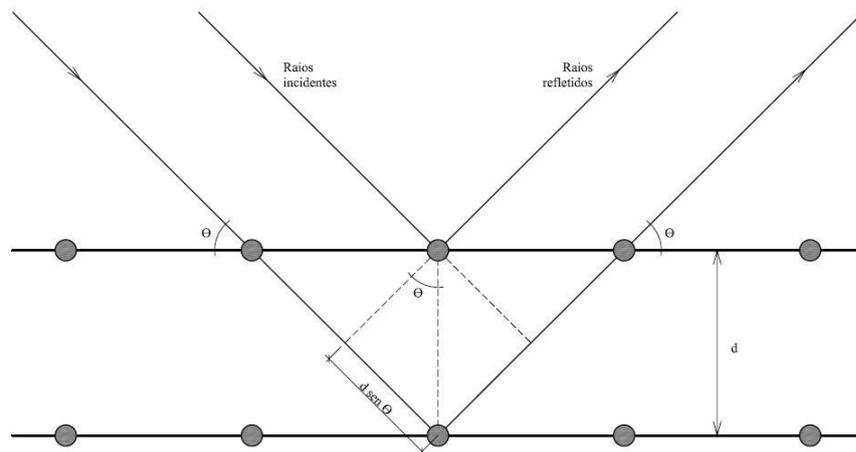


Figura 13: Lei de Bragg

$$2 d \operatorname{sen}\theta = n \lambda$$

Equação 03

Onde: d = distância interplanar;
 θ = ângulo de incidência dos raios X;
 n = ordem de difração;
 λ = comprimento de onda dos raios X

Para a aplicação da lei de Bragg (equação 03), o valor de λ (comprimento de onda dos raios X) é conhecido, pois em DRX utiliza-se radiação monocromática. No caso do presente estudo a radiação utilizada foi Cu-K α , ou seja, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$. θ (ângulo de incidência dos raios X) é obtido através do difratograma e n também é conhecido, pois obedece à ordem de difração, que neste caso é 1 (primeira ordem) e corresponde à diferença de fase entre os raios refletidos nos diferentes planos atômicos. Salienta-se que, segundo a lei de Bragg (figura 13 e equação

03), o ângulo de incidência do feixe de raios X é o mesmo da reflexão e cada reflexão de um mineral corresponde a uma difração.

No presente estudo, a DRX foi empregada com dois objetivos: identificar as fases minerais constituintes das rochas e quantificar o potencial de reatividade do quartzo em função do seu grau de deformação, com o auxílio do refinamento Rietveld, para o qual foi feita uma descrição detalhada no item 3.3.2.2.

As análises por DRX foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios X da UFRGS em um difratômetro Siemens Bruker-AXS, modelo D5000 com goniômetro θ - θ . A radiação utilizada, como mencionado anteriormente, é Cu-K α ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), sendo o monocromador de grafite. As condições de operação foram de 40kV e 25mA.

Utilizou-se o método do pó e também amostras orientadas para análise através de DRX, conforme exposto no item 3.3.2.1. O tempo de aquisição de dados foi de 1 segundo, com exceção das amostras destinadas ao refinamento Rietveld, cujo tempo de aquisição foi de 16 segundos. O passo utilizado para as aquisições foi de $0,02^\circ$, sendo que a varredura das amostras pelo método do pó foi feita de 2° a 72° (escala 2θ) e para as amostras orientadas de 2° a 28° (escala 2θ).

3.3.2.1 Preparação das amostras para realização de DRX

No presente estudo, a DRX foi realizada sob duas condições: método do pó e amostras orientadas.

Na DRX pelo método do pó, as amostras foram analisadas na forma de pó, o qual é disposto aleatoriamente, mas de maneira uniformemente distribuída, sobre o porta-amostra, de modo a não favorecer nenhuma posição cristalográfica. Para realização dessa análise as rochas foram moídas em almofariz de ágata até atingirem granulometria passante em peneira #200 (0,075mm).

O método orientado, proposto por Alves (1987), foi utilizado para verificar a presença de argilominerais expansivos nas amostras de rochas vulcânicas. A técnica consistiu em, após a separação dos argilominerais constituintes da rocha, analisá-los sob três condições: natural, glicolados e calcinados.

Para a condição natural, a amostra de argilomineral úmida (obtida da separação) foi seca sobre uma lâmina de vidro e levada diretamente ao difratômetro, em temperatura ambiente. Uma lâmina idêntica foi preparada e levada ao forno a 500°C por 2h, para a calcinação. A amostra glicolada foi obtida pelo contato dos argilominerais com etilenoglicol. Para tanto, sobre a amostra natural, ainda úmida, gotejou-se etilenoglicol, deixando a amostra secar para a análise.

Para definir a presença de argilominerais expansivos nas rochas efetuou-se a comparação entre os difratogramas nas três condições, pois, ao entrar em contato com o etilenoglicol, ocorre o deslocamento de alguns picos característicos de argilominerais expansivos, os quais são observados na condição natural, bem como esses picos desaparecem após a calcinação.

A separação dos argilominerais para análise pelo método orientado foi feita nas amostras de rocha moídas e com granulação passante na peneira #200. Esse material primeiramente sofreu uma dispersão em água, onde foi agitado por 24h. Após, utilizando-se ondas de ultra-som por 5 minutos, procedeu-se a desintegração entre os argilominerais e os demais grãos.

A etapa seguinte foi, efetivamente, a separação dos argilominerais. Os mesmos foram obtidos por sedimentação diferencial das partículas em meio aquoso em função da ação da gravidade, onde, através da Lei de Stokes, escrita para partículas que caem verticalmente pela ação da gravidade (equação 04), se obtém o tempo de queda de uma partícula de um determinado tamanho.

$$V_s = \frac{2}{9} \times \frac{r^2 g \times (\rho_p - \rho_f)}{\eta} \quad \text{Equação 04}$$

Onde: V_s = velocidade de sedimentação das partículas;
 g = aceleração da gravidade;
 ρ_p = densidade das partículas;
 ρ_f = densidade do fluido.

No presente estudo foram coletadas para as análises partículas menores do que 1µm, a fim de evitar ao máximo a presença dos demais minerais presentes na rocha. Assim, conhecendo-se a densidade aproximada dos argilominerais, verificou-se que o tempo necessário de sedimentação para a obtenção de partículas com esse tamanho é de 18h.

Todo o processo de separação dos argilominerais está ilustrado na figura 14, sendo este realizado no Laboratório de Separação de Argilas do Instituto de Geociências da UFRGS.

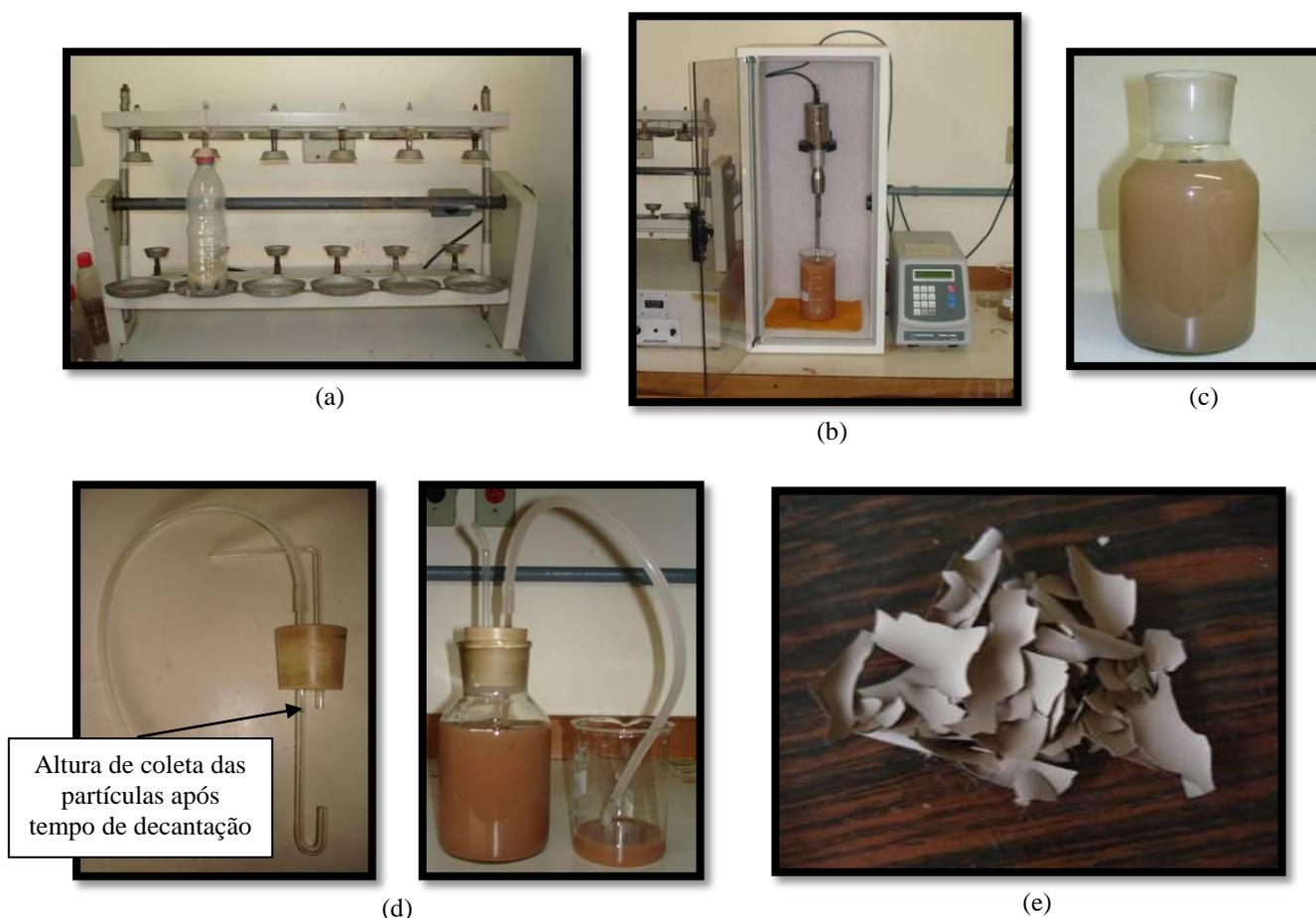


Figura 14: separação dos argilominerais. (a) dispersão mineralógica em água; (b) desintegração em ultra-som; (c) processo de sedimentação das partículas; (d) coleta das partículas menores do que $1\mu\text{m}$; (e) material obtido (argilas e/ou micas)

3.3.2.2 Refinamento Rietveld

A quantificação das fases presentes nos materiais vem se tornando cada vez mais útil à interpretação das análises de DRX. Tal quantificação se dá em função das intensidades integradas dos picos de difração, existindo vários métodos que se propõem a esse tipo de análise, dentre eles o método desenvolvido por Rietveld em 1969 (apud Fancio, 1999).

A grande vantagem do método de Rietveld é que este se baseia da comparação entre um padrão de difração calculado e um padrão observado, diferentemente dos demais métodos para quantificação de fases, cuja precisão é dificultada pela sobreposição dos picos obtidos por DRX.

Segundo Fancio (1999), a posição dos picos do padrão calculado para o método de Rietveld é obtida em função dos dados conhecidos da célula unitária. As posições atômicas e os parâmetros térmicos, que definem as intensidades dos picos, decorrem do ângulo de Bragg e da radiação de fundo. Dessa forma, não há necessidade de preparar amostras para se obter padrões de comparação, ou seja, o padrão calculado é obtido através de modelos matemáticos.

A partir do padrão calculado ajustam-se, pelo método dos mínimos quadrados, os parâmetros do padrão observado (obtido através de DRX). Tarefa que se baseia em complicadas formulações matemáticas e que vem sendo facilitada, ao longo dos anos, pela evolução dos métodos computacionais e que, portanto, acabaram estimulando a utilização do refinamento Rietveld. No presente estudo, foi utilizado para o refinamento o programa FullProf Suite, versão 2008, gratuito, desenvolvido por Rodriguez-Carvajal (1993).

O objetivo do emprego da quantificação de fases no presente estudo foi avaliar se a separação dos grãos de quartzo das diferentes rochas foi realizada de maneira adequada, ou seja, verificar se há predominância de quartzo nas amostras de quartzo separadas das rochas M1, M2 e M2 (QM1, QM2 e QM3), conforme procedimentos do item 3.2.1. Esta análise mostra-se importante na medida em que os grãos separados das rochas foram, posteriormente, utilizados para avaliação do potencial de dissolução de sílica e de mudanças ocorridas (produtos formados) após a reação com os hidróxidos alcalinos.

Hill e Madsen (1987) salientam que para aplicação do refinamento Rietveld é necessário que alguns requisitos básicos sejam atendidos tanto na obtenção do difratograma experimental, quanto na introdução dos dados para o padrão calculado, quais sejam: medidas precisas de intensidades; modelo inicial próximo à estrutura real do cristal; modelo representativo da forma, largura e erros nas posições dos picos. Neste sentido, McCusker *et al.* (1999) salientam a importância de se definir a radiação mais adequada, o comprimento de onda, a preparação das amostras no que diz respeito às suas dimensões, e o tempo de contagem na obtenção dos dados experimentais.

Para que os dados obtidos através de DRX no presente estudo fossem adequados para efetuar o refinamento das estruturas, foram utilizadas amostras em pó com dimensão menor que 0,075mm (passante em #200), tomando-se cuidado para evitar ao máximo a orientação preferencial das partículas. Alguns autores salientam a importância de não haver uma cominuição excessiva das amostras, para evitar a microabsorção de algumas fases cristalinas

presentes (POST; BISH, 1989). Contudo, é importante lembrar que esses cuidados foram comuns a todas as amostras avaliadas através de DRX.

A principal diferença empregada para obtenção dos dados utilizados para refinamento Rietveld foi o tempo de contagem, que foi de 16 segundos por ponto.

Cordeiro (2008) relata, de forma resumida, os principais dados de entrada para realização do refinamento Rietveld. Devem ser inseridos dados correspondentes à cela unitária das fases existentes no material, tais como posições atômicas, ocupação e grupo espacial. Além disso, são necessárias informações a respeito da assimetria, orientação preferencial, largura a meia altura e forma dos picos, bem como parâmetros instrumentais.

Durante o refinamento é importante a observação gráfica dos difratogramas a fim de verificar os problemas a serem ajustados. Quanto mais sobreposta estiver a linha que representa o difratograma calculado da linha do difratograma observado (obtido experimentalmente), melhor será o refinamento. Essa composição gráfica é expressa através de valores numéricos. Quanto mais próximos estiverem os índices ponderado (R_{wp}) e esperado (R_{exp}) melhor será o refinamento. R_{wp} mede a qualidade do ajuste entre dados observados e calculados e R_{exp} está relacionado à qualidade das intensidades obtidas experimentalmente. Quando a relação entre esses dois índices (GOF^{16}) for menor do que 5 pode-se considerar que o refinamento está satisfatório (GOBBO, 2003).

3.3.3 Análise química através de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX)

A análise química é fundamental para a caracterização das rochas. Neste trabalho é especialmente importante a verificação dos teores de SiO_2 e dos álcalis Na_2O e K_2O presentes, pois estes estão diretamente relacionados à ocorrência da RAA.

A técn

ica utilizada para análise química das rochas foi a espectrometria por fluorescência de raios X. Segundo Dutra e Gomes (1984), o ensaio consiste na excitação da amostra em pó através da incidência de raios X emanados de um tubo operado em alta voltagem (radiação primária). O

¹⁶ GOF (*goodness-of-fit*) é um parâmetro estatístico que descreve a discrepância entre dados calculados e observados

feixe de raios X fluorescente é a radiação secundária formada a partir da saída de raios X (radiação primária) através de uma pequena abertura no tubo. A radiação fluorescente é menos intensa e reside na ausência do contínuo¹⁷, sendo característica de cada fase presente na amostra. Para quantificar os elementos constituintes da amostra relacionam-se as intensidades características medidas dos elementos procurados com curvas estabelecidas como padrões.

A realização da análise química por FRX exige que se tenha muito cuidado com a dimensão dos grãos, já que esta característica está diretamente relacionada com a intensidade de radiação medida. Quanto menor a dimensão dos grãos maior a intensidade de leitura, ou seja, mais confiáveis são os resultados.

Por isso, para as análises realizadas neste estudo foram utilizadas amostras em pó com granulação passante em peneira de #200 (< 0,075mm) das rochas M1, M2, M3, BEV e RPF. Os dados a respeito da composição química das demais rochas utilizadas foram coletados da literatura. As análises químicas por FRX foram feitas no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS.

3.3.4 Ensaio de dissolução: método espectrofotométrico visível (NBR 9848/2004)

A fim de determinar o potencial de dissolução do quartzo em função do seu grau de deformação e da sua cristalinidade, foi empregado o ensaio da NBR 9848/2004. Este método de ensaio é muito utilizado para análise química de águas. Não foram encontrados na literatura pesquisada trabalhos relacionados ao tema RAA.

A referida norma especifica o método de ensaio para determinação de sílica em soda cáustica líquida pelo método do espectrofotômetro visível com molibdato de amônio e aplica-se a amostras que contenham entre 2µg e 20µg de SiO₂.

O princípio do método é determinar a coloração resultante de um complexo sílico-molibdico com pH próximo a 1, formado através de espectrofotometria visível, sendo a concentração de sílica proporcional à sílica existente.

¹⁷ O contínuo, frequentemente denominado radiação branca ou policromática, é resultado da formação de um espectro contínuo de radiação emanada do tubo (medida em função do comprimento de onda).

Para realização da análise é necessário uma curva de calibração, a qual é utilizada para quantificar a sílica constituinte das amostras. A curva de calibração foi preparada com 6 pontos: 10 μ g, 20 μ g, 30 μ g, 40 μ g, 50 μ g e 75 μ g de Si. A NBR 9848/2004 não indica a utilização de 75 μ g de Si, mas decidiu-se acrescentar mais um ponto à curva para evitar que ocorressem pontos experimentais fora da curva de calibração padrão. Além dos pontos necessários à confecção da curva de calibração, também foi mantida uma prova em branco, ou seja, sem a adição de Si.

Para confecção da curva padrão primeiramente misturou-se para cada uma das quantidades acima listadas do padrão de Si e para a prova em branco, 10mL de cloreto de sódio, 7,5mL de ácido clorídrico (2M), 20mL de ácido bórico (48g/L) e 10mL da solução de molibdato de amônio (100g/L). Após 10min foi acrescentado 5mL de ácido oxálico (100g/L) e 20mL de ácido sulfúrico (9M) e aguardou-se aproximadamente 2min, quando foi acrescentada a solução redutora¹⁸ à mistura.

Passando-se 10min do final da mistura dos reagentes, efetuaram-se as leituras da amostra em branco e dos 6 pontos da curva de calibração no espectrofotômetro visível, calibrado para comprimento de onda de 680nm. A figura 15 mostra as amostras da curva de calibração, bem como o equipamento utilizado.

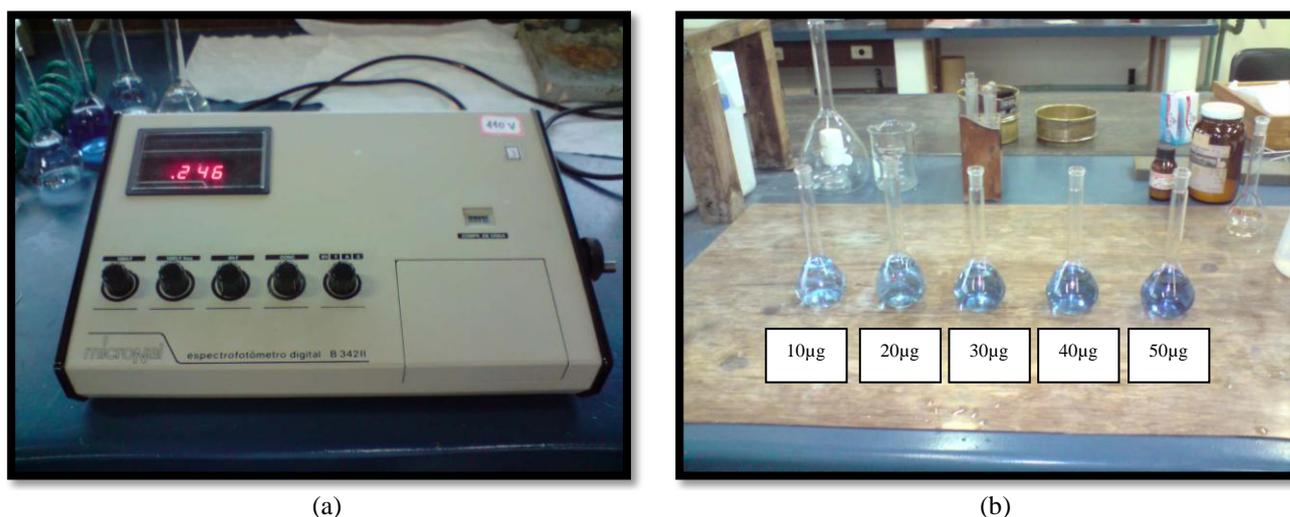


Figura 15: ensaio NBR 9848/2004. (a) espectrofotômetro visível; (c) amostras preparadas para curva de calibração do ensaio

¹⁸ Solução redutora: confeccionada com a mistura de 2g de ácido – 4 amino – 3 hidroxinaftaleno – 1 sulfônico, 12g de metabissulfito de sódio e 2g de sulfito de sódio, avolumados com água deionizada em balão de 100mL.

A etapa seguinte foi a determinação do teor de SiO₂ nas águas coletadas na filtragem das amostras submetidas ao ataque alcalino, conforme procedimento descrito no item 3.2.2. Para tanto foi utilizado 0,2mL de cada amostra (QM1, QM2, QM3, QGNRR, QZITO, BEV e RPF).

De acordo com o procedimento da NBR 9848/2004, efetuou-se a neutralização das amostras (que eram muito alcalinas). O processo consistiu em adicionar à cada amostra 20mL de água deionizada e 2 ou 3 gotas de fenolftaleína (1g/L) e neutralizar as misturas com uma solução de ácido clorídrico (6M).

Às misturas neutralizadas acrescentou-se 7,5g de ácido clorídrico (2M), 20mL de ácido bórico (48g/L) e 10mL da solução de molibdato de amônio (100g/L). Após 10min adicionaram-se 5mL de ácido oxálico (100g/L) e 20mL de ácido sulfúrico (9M), seguindo-se, a partir daí, a mesma sequência utilizada para a confecção da curva de calibração. É importante salientar que também foi deixada uma prova em branco da mistura de reagentes feita para as amostras.

A NBR 9848/2004 recomenda que se utilize 5g da amostra que se deseja analisar. Contudo, como a quantidade de solução disponível era muito pequena, o método foi adaptado para uma condição de volume (0,2mL).

A avaliação da dissolução de sílica utilizando-se o espectrofotômetro visível foi feita no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS.

3.3.5 Método químico da ASTM C 289/1994

O ensaio da ASTM C 289/1994 classifica a potencialidade reativa de um agregado aos álcalis em função da dissolução da sílica nele presente. Este ensaio foi normalizado no Brasil pela NBR 9774/1987, entretanto, essa norma foi cancelada pela ABNT em 2008 devido às inúmeras críticas que o ensaio vem recebendo ao longo dos anos, uma vez que nem sempre retrata o comportamento real da potencialidade reativa dos agregados.

O que ocorre é que muitas vezes agregados considerados reativos em ensaios acelerados de expansão e com características petrográficas indicativas de álcali-reatividade, são classificados como inócuos no ensaio da NBR 9774 ou ASTM C 289 (HASPARYK, 1999; VALDUGA, 2002; OWSIAK, 2007). Não obstante, agregados que efetivamente causaram

problemas em campo, especialmente no Brasil, classificam-se como inócuos pelo método químico, como no trabalho de Hasparyk (1999), que estudou o quartzito utilizado para a construção da UHE de Furnas. Segundo Wigun *et al.* (1997), o método químico não se aplica a qualquer agregado, pois, dependendo do tipo de sílica presente, a dissolução pode ser mais lenta.

Por esse motivo, no presente estudo o ensaio da ASTM C 289/1994 foi utilizado apenas para avaliar o potencial de dissolução de sílica das amostras, ou seja, sem considerar a redução da alcalinidade e sem utilizar a curva de classificação da potencialidade reativa dos agregados que o método recomenda, a qual é apresentada na figura 16.

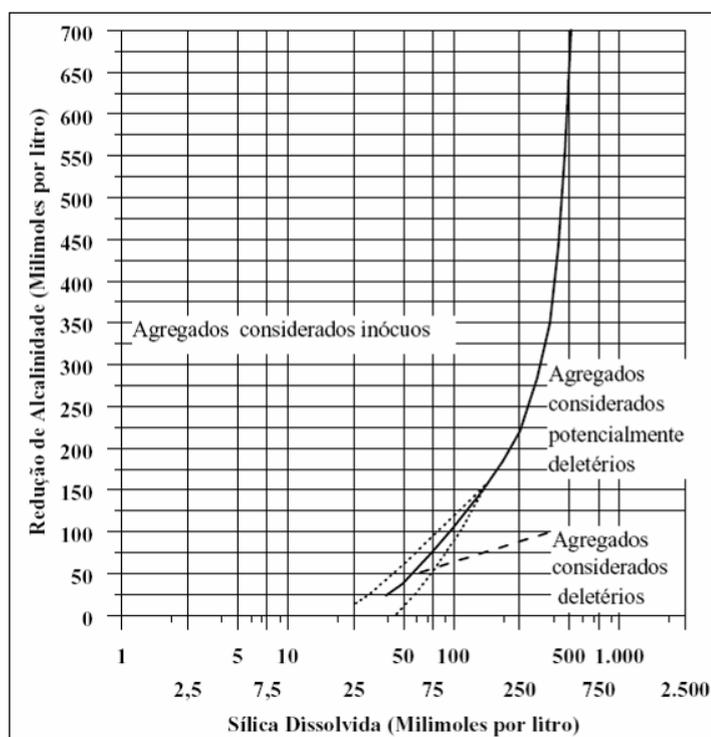


Figura 16: classificação da potencialidade reativa dos agregados pela ASTM C 289/1994

Os procedimentos de ensaio para o método químico são bastante simples e rápidos. Primeiramente as amostras devem ser enquadradas na faixa granulométrica prescrita pela ASTM C 289/1994: material passante na peneira de abertura 0,30mm e retido na peneira de abertura 0,15mm. 25g de cada amostra são imersas por 24h em uma solução de NaOH com concentração de 1M a 80°C, salientando-se que o ensaio é efetuado em triplicata. Após esse período, as amostras são filtradas a vácuo e é feita a verificação da quantidade de sílica

dissolvida (massa) e da redução da alcalinidade da solução (avaliação do pH, através de titulação). Relacionando-se esses dois parâmetros, segundo a ASTM C 289/1994, é possível classificar a potencialidade reativa dos agregados, plotando-se os pontos no gráfico apresentado na figura 17.

Entretanto, como já mencionado, não se pretende avaliar o potencial álcali-reativo das amostras analisadas no presente estudo. Por isso, foram utilizados para avaliação do potencial de dissolução de sílica os grãos de quartzo e feldspatos separados das rochas M1, M2 e M3, os grãos de quartzo das rochas GNRR e QZITO, conforme procedimento descrito no item 3.2.1, e as rochas integrais BEV e RPF.

As análises através do método químico da NBR ASTM C 289/1994 foram realizadas na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.3.6 Ensaio acelerado das barras de argamassa (NBR 15577-4/2008)

A realização de um ensaio de expansão para quantificar a álcali-reatividade dos agregados utilizados no concreto é importante, pois a relação entre as feições petrográficas das rochas e os resultados dos ensaios de expansão ajuda a definir quais são as características mais importantes para que um agregado seja considerado reativo.

A normalização de um ensaio acelerado para avaliação da potencialidade reativa dos agregados é recente no Brasil. A NBR 15577-4 foi lançada no início de 2008. A norma brasileira baseia-se nos procedimentos prescritos pela ASTM C 1260, porém, os limites de expansão são diferentes, tendo como base o comportamento dos agregados brasileiros.

Trata-se de um ensaio onde são realizadas medições periódicas do comprimento de barras de argamassa que ficam imersas em uma solução alcalina, a fim de avaliar a expansão das mesmas ao longo de um período determinado. Para realização do ensaio, as rochas selecionadas foram britadas, peneiradas e lavadas para se enquadrarem nas frações granulométricas prescritas pela NBR 15577-4 (tabela 01). Para a redução inicial dos blocos de rocha foi utilizado um moinho de mandíbulas, em seguida os agregados foram cominuídos em um moinho de martelos. Tal moagem foi realizada no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) do Departamento de Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais da UFRGS.

Tabela 01: frações granulométricas prescritas pela NBR 15577-4/2008

Passante na peneira (mm)	Retido na peneira (mm)	% de cada fração a ser utilizada (massa)	Quantidade para moldar três corpos-de-prova (g)
4,75	2,35	10	99,00
2,35	1,18	25	247,50
1,18	0,60	25	247,50
0,60	0,30	25	247,50
0,30	0,15	15	148,50

Para moldagem dos corpos-de-prova de argamassa utilizou-se o cimento CP I produzido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para a realização do ensaio da NBR 15577-4. Sendo assim, atende a todos os padrões exigidos pela referida norma, os quais se encontram em destaque nas tabelas 02, 03 e 04.

Tabela 02: caracterização química do cimento CPI*

Características avaliadas	Resultado obtido (%)	Padrão exigido pela NBR 15577-4/2008	Padrão exigido pela NBR 5733/91
SiO ₂	19,52		-
Al ₂ O ₃	4,80		-
Fe ₂ O ₃	2,26		-
MgO	1,90		≤ 6,5
SO ₃	3,64		≤ 4,5
CO ₂	2,59		≤ 3,0
CaO total	62,33		-
CaO livre	1,21		-
Resíduo insolúvel	0,31		≤ 1,0
Perda ao fogo	3,05		≤ 4,5
Na ₂ O	0,32		-
K ₂ O	0,87		-
⇒ Na ₂ O _{eq}	0,89	0,90 ± 0,10	0,90 ± 0,10

*Resultados obtidos por laudo fornecido pela ABCP

Tabela 03: caracterização física do cimento CPI*

Características avaliadas	Resultado obtido	Padrão exigido pela NBR 15577-4/2008	Padrão exigido pela NBR 5733/91
Finura 75µm (%)	0,90		≤ 6,0
Finura 45µm (%)	2,20		-
Massa específica (g/cm ³)	3,09		-
Água para consistência normal (%)	29,40		-
Início de pega (h:min)	3:40		≥ 1:00
Fim de pega (h:min)	5:15		≤ 10:00
Expansão a quente (mm)	0,50		≤ 5
⇒ Expansão autoclave (%)	0,02	0,20	-
⇒ Área específica (cm ² /g)	4.920	4.900 ± 200	-

*Resultados obtidos por laudo fornecido pela ABCP

Tabela 04: caracterização mecânica do cimento CPI*

Resistência à compressão (MPa)		Padrão exigido NBR 5733/91
Idade	Média (4 CPs)	
1	25,40	-
3	38,50	≥ 14,0
7	42,40	≥ 24,0
28	50,70	≥ 34,0

*Resultados obtidos por laudo fornecido pela ABCP

O traço utilizado para confecção das barras foi de 1:2,25 (cimento:agregados) e a relação água:cimento foi de 0,47. Sendo assim, para moldagem de três barras de argamassa foram necessários 440g de cimento, 990g de agregado e 208,8g de água.

A mistura foi realizada segundo os procedimentos prescritos pela NBR 13276/2005. Foram moldados prismas de argamassa com 25mm de lado e 285mm de comprimento. Nas extremidades dos corpos-de-prova foram acoplados pinos para que as medidas periódicas da variação de comprimento fossem realizadas sempre na mesma posição.

Após a moldagem, as barras foram acondicionadas em câmara úmida por 24h. Em seguida as mesmas foram retiradas das fôrmas e imersas em água por mais 24h, sendo que água foi aquecida gradualmente até atingir 80°C. Ao retirar as barras da imersão em água foi realizada a leitura inicial das mesmas, que foram imediatamente submetidas à solução alcalina de 1M (NaOH), previamente aquecida a 80°C. A partir daí, foram realizadas medições periódicas do comprimento para verificar sua variação ao longo do tempo, salientando-se que o tempo para realização das medições não ultrapassou 15s para cada barra.

De acordo com a NBR 15577-4, são considerados potencialmente reativos os agregados que apresentarem expansões superiores a 0,19% aos 28 dias de imersão na solução alcalina e potencialmente inócuos quando as expansões forem inferiores a 0,19%, na presença de cimento padrão.

O ensaio acelerado da NBR 15577-4 foi realizado no Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas. A figura 17 mostra algumas imagens das etapas do ensaio.

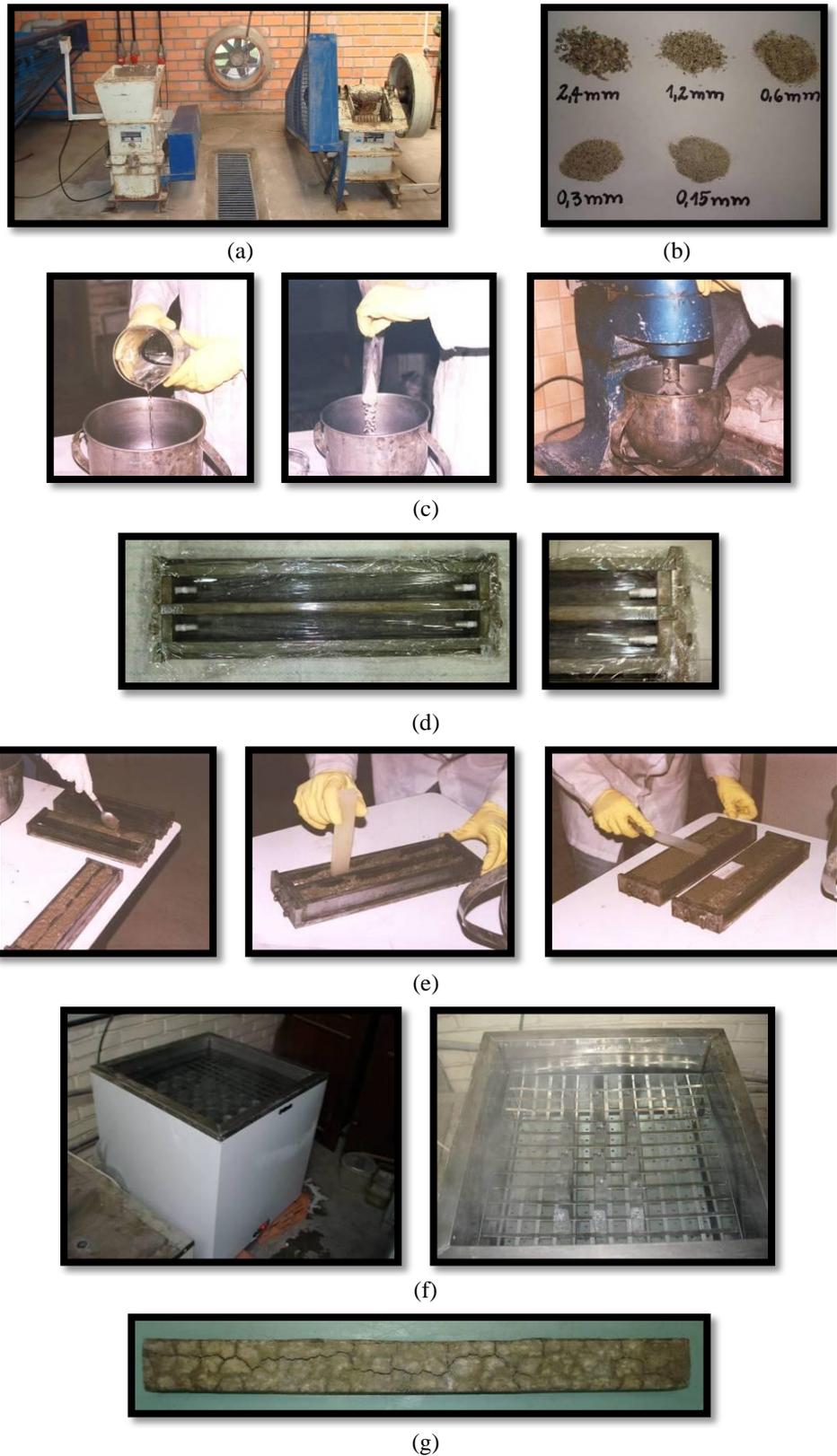


Figura 17: etapas do ensaio da NBR 15577-4. (a) britadores: martelos (esquerda), mandíbulas (direita); (b) granulometrias obtidas após peneiramento; (c) mistura da argamassa; (d) fôrmas para moldagem; (e) moldagem; (f) banho para realização do ataque alcalino; (g) corpos-de-prova após o ataque alcalino

3.3.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria por dispersão de energia (EDS)

A utilização de MEV e EDS é bastante comum em estudos de RAA, principalmente com o intuito de avaliar os produtos formados na reação e diagnosticá-la. Contudo, sua utilização é relativamente recente, já que os primeiros trabalhos que a utilizaram com essa finalidade são datados de, aproximadamente, 9 anos atrás. Alguns exemplos importantes de trabalhos que utilizaram essas técnicas para RAA são: Hasparyk (1999), Owsiak (2004), Fernandes *et al.* (2004), Hasparyk (2005), Peterson *et al.* (2006), Haha *et al.* (2007).

Exceto em algumas exceções, os estudos publicados que utilizaram a MEV obtiveram, principalmente, resultados através de elétrons secundários, ou seja, mostrando a morfologia do gel da RAA e sua composição química (com auxílio de EDS).

Neste trabalho, no entanto, foram obtidas imagens através do detector de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons* – BSE). Tais imagens resultam da variação de contraste devido à composição da amostra (número atômico), sendo estas oriundas da interação do feixe de elétrons ponto a ponto sobre a superfície da mesma. Segundo Kaln (2008), as imagens em BSE compreendem um espalhamento elástico de elétrons, que tem sua trajetória desviada em mais de 90° em relação ao feixe incidente, ou seja, os elétrons penetram substancialmente na amostra antes de serem retroespalhados (ver figura 18). Sendo assim, as informações para obter imagens por elétrons retroespalhados são oriundas de certa profundidade da amostra. A individualização de fases é feita através dos contrastes de cinza, em função do número atômico, e com o auxílio da sonda EDS.

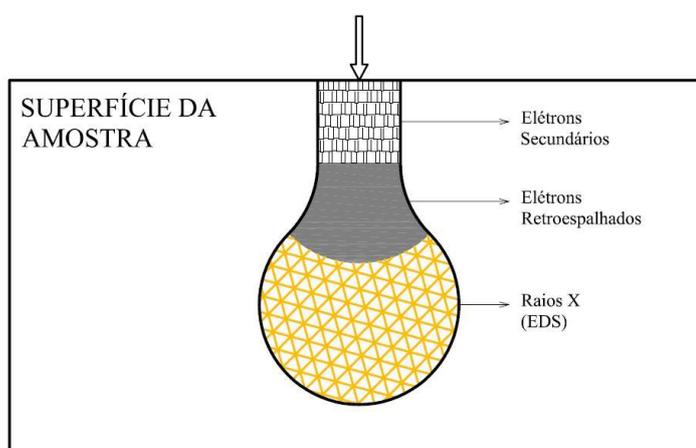


Figura 18: representação esquemática da região de ionização gerada na interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra em MEV (adaptado de MALISKA, 2008)

EDS (*energy dispersive x-ray detector*) é um acessório acoplado ao microscópio eletrônico de varredura que mede a energia associada aos elétrons de um átomo. Ao incidir o feixe de elétrons sobre a amostra provoca-se a excitação dos seus átomos, fazendo com que estes mudem de nível energético. Essa energia adquirida é ‘liberada’ e medida através do detector EDS. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível determinar os elementos químicos presentes.

Neste estudo, a MEV e a EDS foram utilizadas com dois objetivos:

- a) análise do material constituinte das mesóstases intersticiais. Tal observação permitiu a identificação das fases presentes nas mesóstases e sua composição química;
- b) investigar barras de argamassa submetidas ao ensaio acelerado da NBR 15577-4/2008 (descrito no item 3.3.6) com o intuito de observar o que ocorre com as rochas após o desencadeamento da RAA, especialmente no que se refere à dissolução das mesóstases e do quartzo e sua relação com as expansões.

A observação do material que constitui as mesóstases presentes nas amostras vulcânicas através de MEV mostra-se interessante, na medida em que é possível expor a predominância, inclusive quimicamente, de regiões contendo grãos de quartzo, K-feldspatos ou argilominerais nas mesóstases, que muitas vezes não são identificáveis através de microscopia ótica.

Gomes (1996) avaliou as texturas das mesóstases de basaltos através de MEV. As imagens obtidas pela autora mostraram que as mesóstases podem possuir grãos com diferentes graus de cristalinidade. Conforme pode ser observado na figura 19, quando observadas em microscopia ótica o aspecto das mesóstases é de um material homogêneo (figura 19 (a) e figura 19 (c)). Entretanto, comparando as imagens da MEV nas figuras 19 (b) e 19 (d) nota-se que a mesóstase da figura 19 (b) possui menor quantidade de grãos bem desenvolvidos, ou seja, possui menor cristalinidade.

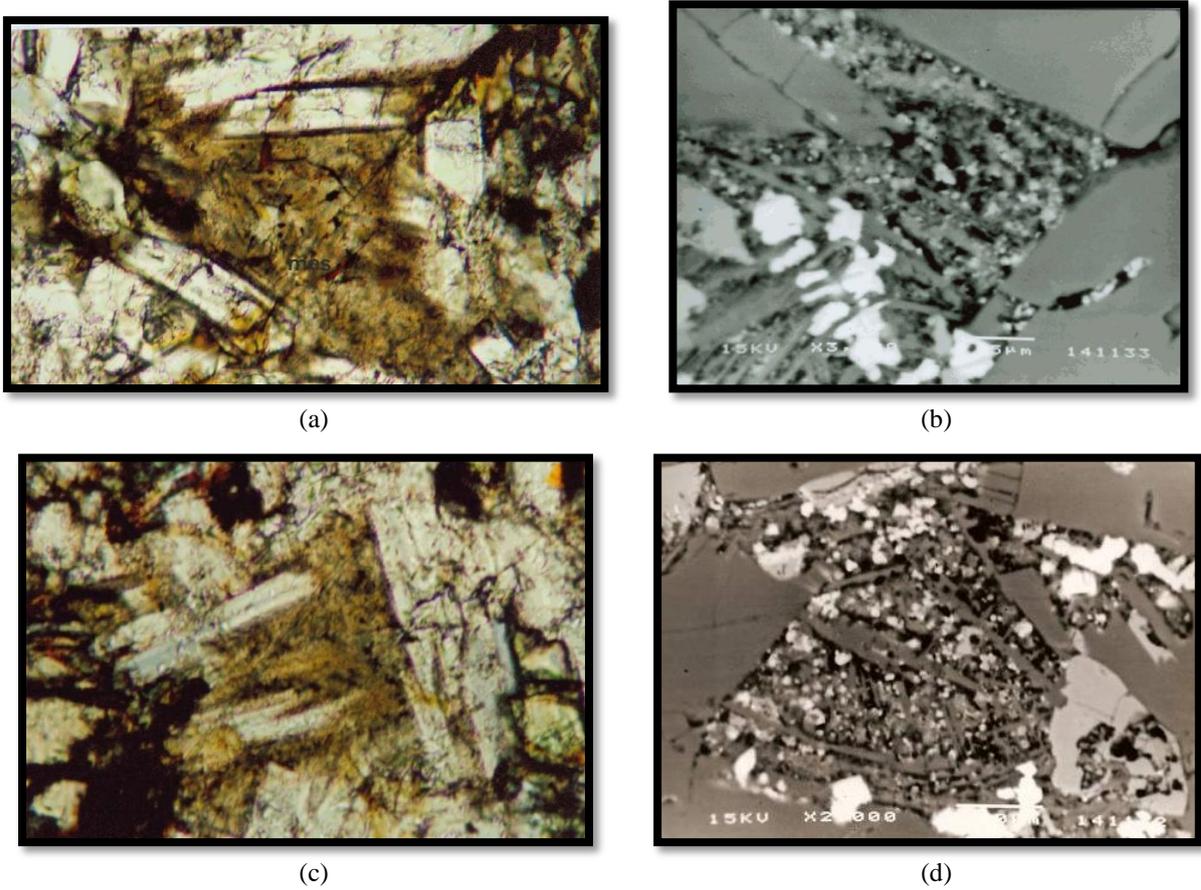


Figura 19: micrografias da mesóstase. (a) e (c) microscopia ótica de luz transmitida, luz natural, ampliação 40x; (b) e (d) MEV com elétrons retroespalhados, ampliação 2000x (GOMES, 1996)

As observações em MEV e análises através de EDS das rochas vulcânicas foram feitas nas mesmas lâminas utilizadas para análise petrográfica (descrita no item 3.3.1) com as amostras BEV, RPF e BNRG.

Também foram confeccionadas lâminas petrográficas com fragmentos das barras de argamassa sujeitas ao ensaio da NBR 15577-4 para análise em MEV e EDS. Utilizaram-se fragmentos (fatias) da parte central dos corpos-de-prova que apresentaram as maiores expansões ao final do ensaio, sendo escolhidas uma amostra granítica (entre os corpos-de-prova confeccionados com as rochas M1, M2 e M3) e uma amostra vulcânica (entre os corpos de prova das rochas BEV e RPF).

O objetivo das análises nas barras submetidas ao ensaio da NBR 15577-4/2008 foi caracterizar as rochas após a ocorrência da RAA quanto à dissolução de sílica, à distribuição do gel, entre outros.

As observações através de MEV e as análises através de EDS foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS, sendo utilizado um microscópio eletrônico da marca Jeol – JSM 5800.

3.3.8 Microscopia eletrônica de transmissão (MET)

A MET possibilita a visualização de imagens da estrutura cristalina dos materiais. Por isso, a técnica permite a avaliação de defeitos e outras feições que caracterizem a deformação da estrutura cristalina dos minerais.

As imagens obtidas através de MET formam-se a partir da incidência de elétrons em alta velocidade sobre uma amostra que está sob alto vácuo da seguinte maneira: os elétrons atravessam a amostra e são redirecionados através de diversas lentes para o aumento das imagens. Ao saírem da parte inferior da amostra, passam pela lente objetiva e formam a primeira imagem, que é ampliada com o uso de outras lentes (CHESCOE; GOODHEW, 1990).

A técnica pode ser utilizada de duas maneiras: modo imagem e modo difração. No modo imagem são obtidas imagens de alta magnificação e no modo difração podem ser obtidas informações sobre a estrutura cristalina da amostra.

No presente estudo utilizou-se o modo imagem para avaliar o grau de deformação dos grãos de quartzo das amostras de rochas graníticas coletadas, onde observou-se a formação de paredes de deslocação nos grãos de quartzo, as quais indicam a formação de subgrãos de quartzo a partir de um grão maior.

A presença de paredes de deslocação nos grãos de quartzo mostra que os mesmos estão deformados. Essas zonas do grão são frágeis, pois as ligações entre os átomos tendem a se romper, aumentando a superfície disponível para reação dos hidróxidos alcalinos com a sílica. Passchier e Trow (1998) destacam a possibilidade de se observar as paredes de deslocação através de MET.

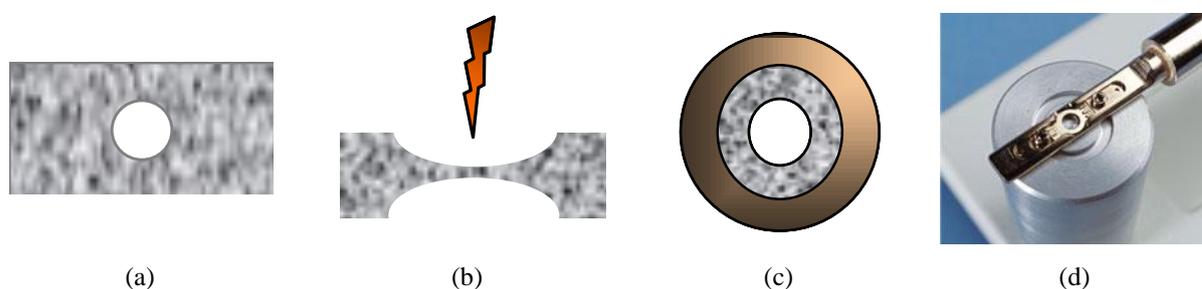
Neste trabalho a MET foi utilizada de maneira semelhante ao que foi feito no estudo de Wenk *et al.* (2008). Os autores observaram as paredes formadas nos grãos de quartzo e relacionaram a presença dessas paredes com a reatividade das rochas.

As análises através de MET deste trabalho foram realizadas nos grãos de quartzo representativos dos diferentes graus de deformação constituintes das rochas de origem granítica. Para tanto, foram confeccionadas lâminas delgadas com espessura de $30\mu\text{m}$, sendo estas de dupla face, ou seja, fixadas sobre o vidro com cola solúvel em acetona.

Nestas lâminas foram selecionados, através de microscopia ótica (análise petrográfica), grãos representativos dos diferentes graus de deformação. Tais grãos foram extraídos da matriz cortando-se a região marcada na lâmina com aparelho de ultra-som e, após, submergindo a mesma em acetona. Dessa forma, foram obtidas amostras com aproximadamente 3mm de diâmetro (dimensão máxima permitida para colocação no porta-amostra) e $30\mu\text{m}$ de espessura dos grãos selecionados.

Em seguida foi realizado o eletro-polimento das mesmas em um equipamento chamado *ion-milling* (desbastador iônico) até que as amostras ficassem suficientemente finas para a transmissão dos elétrons e, conseqüente visualização das imagens, ou seja, aproximadamente $1\mu\text{m}$. Para tanto foi utilizada uma energia de 3,5keV durante 4h. O centro das amostras fica com um furo extremamente pequeno. A região de análise através de MET é ao redor desse pequeno furo. Por fim, para ser levada ao microscópio, a amostra foi afixada em um anel de cobre sobre o porta-amostra.

A figura 20 apresenta um esquema das etapas empregadas para a preparação das amostras utilizadas em MET, que foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS, utilizando-se um microscópio Jeol – JEM 2010.



3.3.9 Absorção de raios X de estruturas finas (XAFS)

A XAFS (*x-ray absorption fine structure* – absorção de raios X de estruturas finas) é uma técnica de avaliação de materiais que fornece informações sobre a estrutura local ao redor do espaço atômico em sólidos, líquidos e gases. O fenômeno é conhecido desde a década de 30, mas o aumento no número de aplicações ocorreu na década de 70, quando houve a normalização de equações e de um método de análise para XAFS (feita pelos físicos Stern, Sayers e Lytle), além da viabilização de ajuste de alto fluxo e alta resolução de energia através da energia Síncrotron¹⁹ (BUNKER, 1997).

A figura 21 apresenta um esquema da obtenção dos dados através de XAFS.

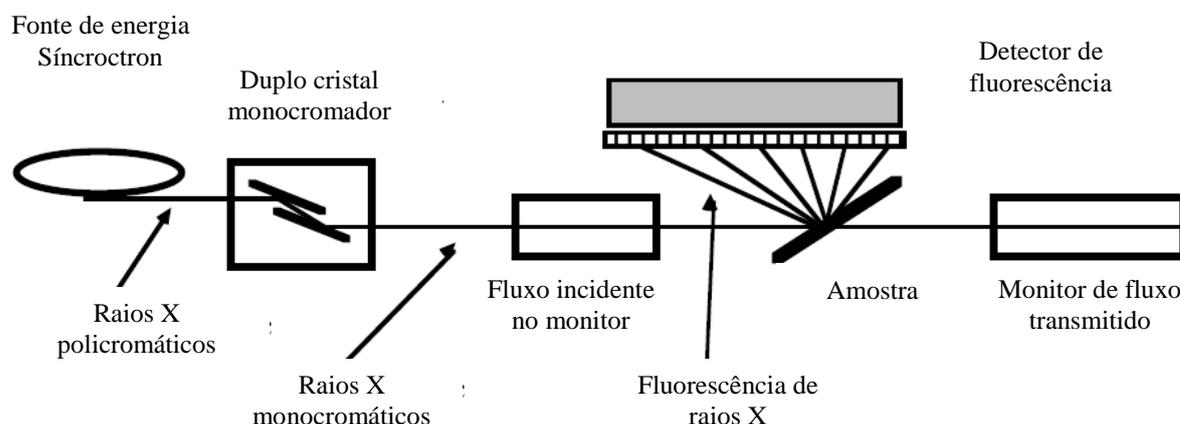


Figura 21: esquema do experimento de XAFS (BUNKER, 1997)

O esquema representado na figura 21 mostra que a obtenção de resultados através de XAFS passa pelas seguintes etapas: primeiramente são produzidos, pela fonte de radiação Síncrotron, os raios X policromáticos de elevada energia. A partir daí é selecionada a banda de energia que se deseja analisar (depende do elemento químico escolhido para análise da vizinhança atômica) através de um monocromador de duplo cristal de silicone. Somente os fótons de raios X que possuem o comprimento de onda desejado serão refletidos no primeiro cristal, os outros serão absorvidos. O segundo cristal monocromador paralelo é usado com um espelho para recuperar a direção original da linha. Então, os raios X monocromáticos passam pela amostra, a qual absorve aproximadamente 50-90% dos raios X incidentes.

¹⁹ A energia Síncrotron é uma “intensa radiação eletromagnética produzida por elétrons de alta energia num acelerador de partículas” (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2008).

Kawai (2000) explica que a quantidade de energia absorvida pela matéria normalmente é estimada por transmissão, mas poderia ser medida por elétrons de Auger, elétrons secundários ou raios X fluorescentes. Obtida a energia de absorção, é possível plotar o espectro de absorção de raios X, que é um gráfico do coeficiente de absorção da matéria contra a energia de raios X incidentes, ou contra os comprimentos de onda. A intensidade (I) dos raios X com determinado comprimento de onda (λ), antes (I_0) e depois (I) da transmissão em um filme fino com determinada espessura (d), pode ser expressa pela equação 05.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp [-\mu_i(\lambda) \rho_i d] \quad \text{Equação 05}$$

Onde: μ_i = coeficiente de absorção de massa;
 ρ_i = densidade de massa

A avaliação através de XAFS compreende duas técnicas: XANES (*X-ray near-edge structure* – absorção de raios X próxima à borda da estrutura) e EXAFS (*extended X-ray absorption fine structure* – absorção de raios X estendida de estrutura fina). Quando se deseja estudar a estrutura atômica ao redor de um determinado elemento de um material é comum considerar separadamente a região próxima à borda desse elemento da região de alta energia do espectro, também chamada de região EXAFS. Não obstante, análises quantitativas dos raios X próximos à borda da estrutura (XANES) são utilizadas para obter informações estruturais e eletrônicas relevantes em muitas áreas da ciência, tais como em sistemas extra diluídos, superfície espectral, medição de sistemas dinâmicos em tempo real, análises de elementos traço e investigações locais em materiais sob condições extremas (NATIOLI *et al.*, 2003).

Nos espectros de XANES e EXAFS aparecem saltos em uma determinada energia. O salto é chamado borda de absorção. Quando a energia está restrita a 50eV, tem-se um espectro de XANES, no qual é possível observar características do material através de energias menores que a energia de estímulo, que é a região da pré-borda no espectro. São possíveis, ainda, algumas análises das energias nas regiões imediatamente após a borda de estímulo (chamados primeiros vizinhos do átomo).

Já para EXAFS a absorção de estruturas finas é estendida para 1000eV além da energia de estímulo, podendo-se obter informações de regiões mais distantes da energia de estímulo (segundos vizinhos do átomo).

A figura 22 mostra a diferença entre os espectros de XANES e EXAFS.

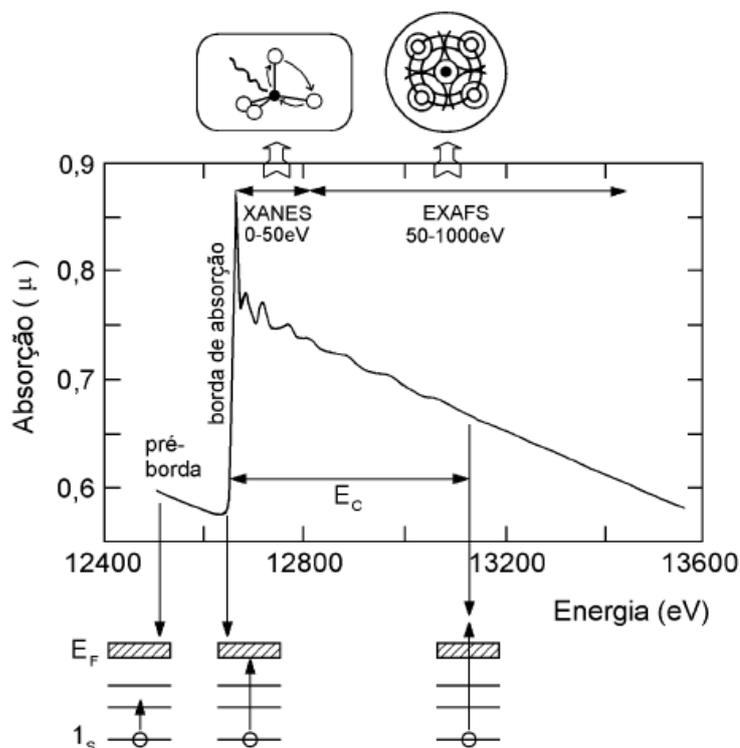


Figura 22: representação esquemática das principais características dos espectros de XANES e EXAFS (MAZALI, 1998)

Mazali (1998) explica que em qualquer espectro de absorção de raios X é importante observar três regiões principais, as quais foram apontadas na figura 22:

- (a) região pré-borda: onde são obtidas informações a respeito de transições eletrônicas com absorção de menor energia de ligação;
- (b) região da borda: região onde a energia absorvida leva a retirada de elétrons do átomo absorvedor;
- (c) região de transições para o estado do contínuo: mostra as características da absorção de energias maiores que a energia de ligação e pode ser subdividida em região de XANES e região de EXAFS.

XANES representa variações estreitas e intensas da absorção. O espectro de XANES fornece informações cristaloquímicas do átomo absorvedor, seu estado de oxidação, densidade dos

estados desocupados e a estrutura cristalina em que está inserido o átomo absorvedor. Já através dos espectros de EXAFS é possível obter dados a respeito da distância e do número atômico de vizinhos ao redor do átomo central.

No presente estudo foi utilizado XAFS para obter informações, através de espectros de XANES, da estrutura entre os átomos ao redor do silício (Si) na RAA. Este elemento químico foi escolhido por ser o principal constituinte formador da sílica (SiO₂). Sua borda de absorção fica em 1845 eV.

Através das informações da estrutura ao redor do Si pretendeu-se investigar se há diferenças nos produtos da reação em função do quartzo envolvido (maior ou menor grau de deformação), bem como entender de que forma a estrutura cristalina da sílica pode interferir para a RAA.

Para interpretar os resultados obtidos através de XANES e EXAFS é preciso realizar uma série de transformações nos dados obtidos experimentalmente. Prado (2001) explica que o sinal de EXAFS obtido experimentalmente do espectro de absorção de raios X ($\chi(k)$) é dado pela equação 06:

$$\chi(k) = \frac{\mu - \mu_1}{\Delta\mu} \quad \text{Equação 06}$$

Onde: $\chi(k)$ = oscilações produzidas pelas diferentes camadas atômicas pelo átomo absorvedor;
 μ = coeficiente de absorção atômico para uma determinada energia (E);
 μ_1 = coeficiente de absorção do átomo absorvedor isolado;
 μ = diferença entre μ_1 e μ_0 (sendo μ_0 a extrapolação da região anterior à borda para energias superiores)

A partir do sinal $\chi(k)$ realiza-se a normalização da linha de base, obtendo-se espectros mais uniformes e evitando que oscilações de maior amplitude prevaleçam sobre as menores. Para tal, através da transformada de Fourier, se obtém espectros cujos picos não correspondem à distância interatômica exata, bem como a altura do pico não é diretamente proporcional à quantidade de átomos presentes.

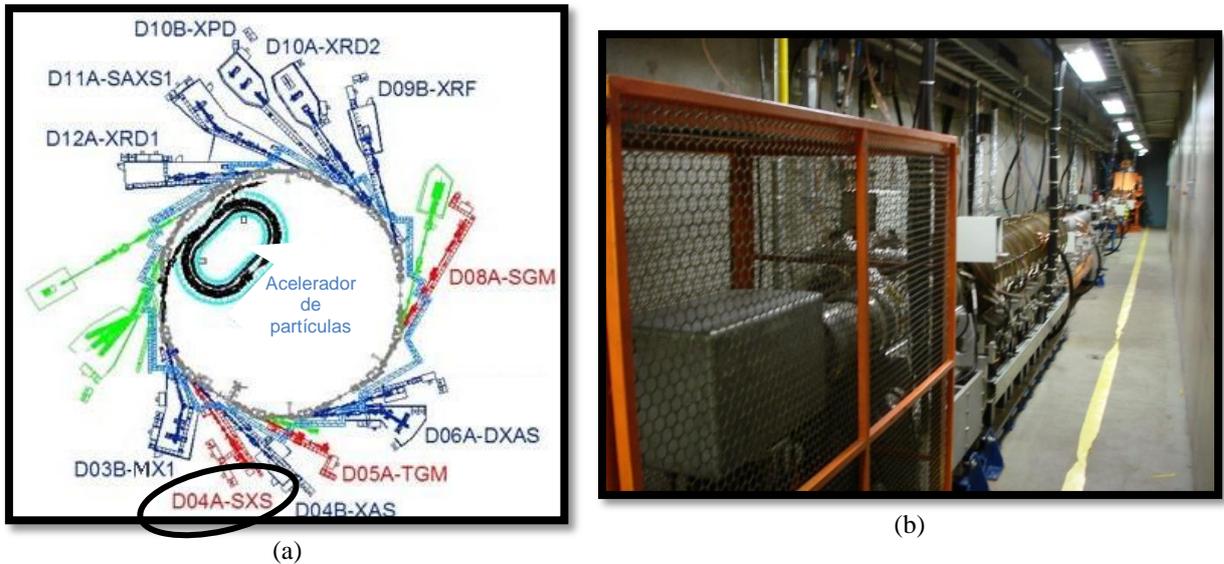
A detecção por absorção de raios X (XAFS) pode ser feita através de transmissão, de rendimento eletrônico total, de fluorescência (ou elétrons de Auger). No presente estudo será utilizado método do rendimento eletrônico total. Prado (2001) explica que esta técnica é a

mais utilizada por não exigir preparação especial das amostras e com a qual é possível detectar todos os elétrons provenientes da mesma (Auger, fotoelétrons e secundários). Segundo o autor “durante o processo de absorção de raios X, cada fóton X produz um fotoelétron de uma energia cinética igual à energia do fóton incidente menos a sua energia de ligação. As lacunas geradas pelo processo são preenchidas por elétrons de cada camada superior, o que acarreta na emissão de mais elétrons do átomo (por efeito de Auger) ou de um fóton de fluorescência”.

As análises de XAFS para obtenção dos espectros de XANES e EXAFS foram realizadas no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), na cidade de Campinas, estado de São Paulo. A energia Síncrotron é empregada em diversos tipos de análises, por isso, nos centros que a fornecem são montadas estações experimentais acopladas a um anel que armazena os elétrons de elevada energia, que são chamadas Linhas de Luz. “Em cada linha de luz chegam fótons (luz Síncrotron) gerados pelos elétrons que circulam no anel de armazenamento” (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2008).

De acordo com a técnica que se pretende empregar, diferentes estruturas são preparadas (estações experimentais) para modificar a luz Síncrotron. Essas modificações são efetuadas através de monocromadores que permitem que a luz Síncrotron adquira as características necessárias para cada tipo de análise. No presente estudo foi utilizada a linha de luz SXS (espectroscopia de absorção de raios X moles).

A figura 23 apresenta um esquema do LNLS e as diversas linhas de luz existentes atualmente, destacando a posição da linha utilizada, bem como imagens da linha e do laboratório.



(c)

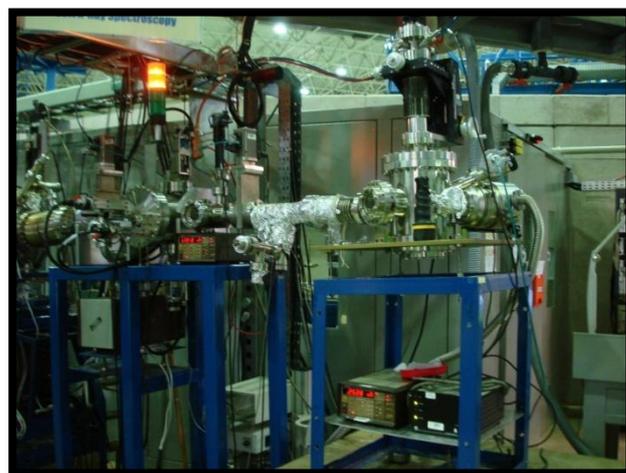
Figura 23: Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. (a) esquema de distribuição das linhas de luz em atividade; (b) acelerador de partículas; (c) imagem panorâmica do laboratório (LNLS, 2008)

Para as análises através de XANES e EXAFS foram utilizados os grãos de quartzo separados das rochas GNRR, M2 e QZITO, antes e após o ataque alcalino (descrito no item 3.2.1 e 3.2.2). Estas amostras foram escolhidas por representarem extremos de deformação (grãos de quartzo pouco deformados (QGNRR), grãos deformados (QM2), grãos muito deformados (QQZITO)). Não foi possível analisar os grãos de todas as rochas utilizadas no estudo em função do período de tempo disponível para realização das análises com a energia síncrotron. Salienta-se, ainda, que o emprego dos minerais separados das rochas tornou a XAFS mais eficiente, pois o Si está presente em todos os silicatos constituintes das rochas e o objetivo desse estudo é avaliar a influência apenas das características do quartzo na RAA.

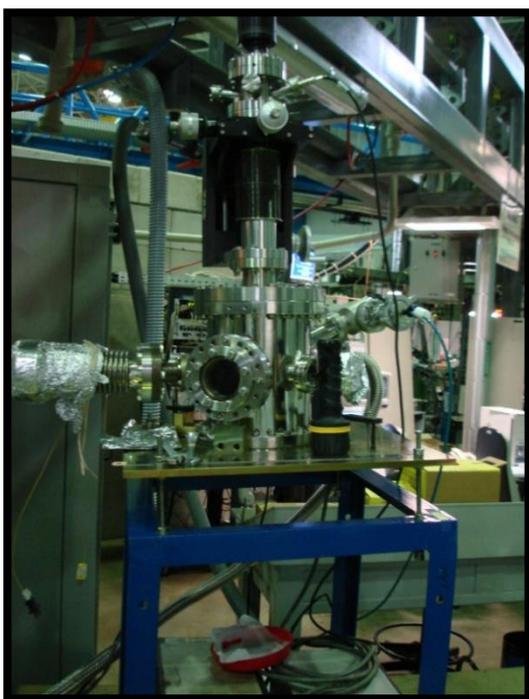
Para realização das análises foram utilizadas amostras com granulação passante em peneira #200 μm (<0,075mm), sendo afixadas sobre uma fita adesiva de carbono no porta-amostra (figura 24 (d) e (e)). A figura 24 mostra imagens da linha de luz utilizada.



(a)



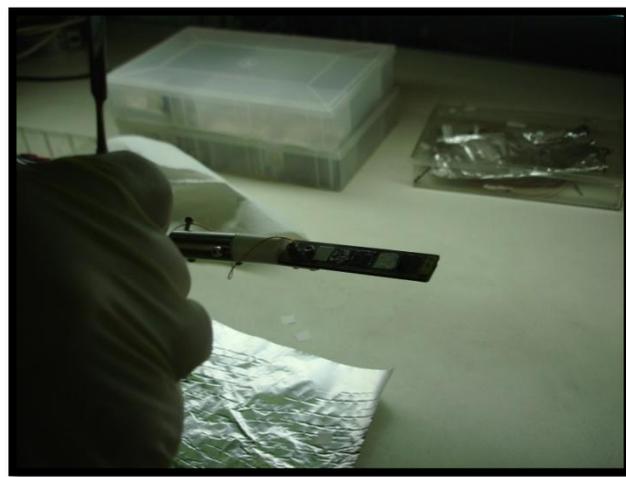
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 24: porta amostra utilizado para realização de XAFS, onde: (a), (b), (c) linha de luz SXS; (d) porta-amostra utilizado; (e) disposição das amostras sobre o porta-amostra

3.3.10 Ressonância Nuclear Magnética (RNM)

A ressonância é um fenômeno comum na natureza. Para entendê-la, é necessário discutir as características dos prótons constituintes dos átomos. Além de terem um momento, também chamado de "*spin*", esses prótons transladam em torno do eixo do campo magnético, seja o do campo magnético da Terra no nosso dia a dia, seja o do campo magnético aplicado para produzir uma imagem, como ocorre com a lua em volta da Terra, como a Terra em volta do sol. A ressonância, na verdade, é a frequência com que o próton gira em torno desse eixo e é proporcional ao campo aplicado e a cada núcleo usado (BOVEY, 1969).

De acordo com Gil e Geraldles (2002), cada próton tem seu próprio campo magnético, que começa a se desorganizar e a afetar núcleos vizinhos em uma reação simultânea, transferindo energia entre si e, conseqüentemente, saindo de fase. Essa relação próton-próton (ou *spin-spin*) é também chamada de tempo 2 de relaxamento ou simplesmente T2. A Aplicação de pulsos de radiofrequência adiciona energia ao sistema e faz com que os prótons mudem para um estado de maior excitação ou de maior energia. O processo de dissipação dessa energia, no ambiente magnético desses prótons, e o seu retorno ao estado de mais baixa energia, é chamado de tempo 1 de relaxamento ou T1.

O efeito resultante do acoplamento *spin-spin* é desdobrar uma determinada absorção em várias absorções individuais (LEAL, 2009).

A espectroscopia de RNM mede a intensidade de absorção ou emissão de radiações eletromagnéticas em cada frequência através de uma faixa escolhida de frequência. Quando a técnica é utilizada para avaliar sólidos é possível determinar a estrutura dos compostos. Então, para medir um espectro de RNM, utiliza-se um material de referência como padrão.

No presente estudo a faixa de frequência que será estudada é o ^{29}Si , com o objetivo de verificar as mudanças estruturais decorrentes da deformação dos grãos de quartzo e relacionar tais mudanças à ocorrência da RAA. Semelhantemente ao estudo realizado por Florindo (2009), neste trabalho foram avaliados os grãos de quartzo separados das rochas M1, M2, M3, GNRR e QZITO, antes e após o ataque alcalino (conforme procedimentos descritos nos itens 3.2.1 e 3.2.2).

Os núcleos atômicos de mesma espécie podem dar origem a linhas diferentes no espectro de RNM, fenômeno que é chamado desvio químico (δ), cuja unidade é ppm. Isso ocorre porque

ao se magnetizar uma amostra ela modifica o campo magnético, fazendo com que este seja, na posição do núcleo, inferior ao campo aplicado na magnetização devido a uma blindagem magnética (σ) que os elétrons fazem ao núcleo. Segundo Donoso (2008), a ocorrência desse fenômeno, em que núcleos de mesma origem emitem sinais com diferentes frequências (ν), mostra que o campo magnético de cada núcleo sofre interferência da vizinhança atômica.

O resultado da análise de um material através de RNM é um gráfico do sinal medido pelo detector versus o tempo, que é chamado de decaimento de livre indução. O sinal é digitalizado e, através da transformada de Fourier, modificado no espectro de RNM, que é dado em frequência (LEAL, 2009).

Lessmann (2008) sintetiza a técnica dizendo a RNM resume-se em alinhar os momentos magnéticos de núcleos atômicos em um campo magnético externo. Em função das posições desses núcleos na estrutura molecular, esses núcleos interagem quando alinhados com a energia no comprimento de onda da radio-frequência. Através da interação energética com a estrutura é possível fazer espectroscopia.

Neste trabalho as análises através de RNM foram realizadas com amostras no estado sólido, com granulação menor que $0,075\mu\text{m}$. O campo magnético foi de 9,4T, pulsos de $4,0\mu\text{s}$. O número de aquisições variou entre 690 e 1100, sendo cada aquisição com 100s. Foi utilizado o espectrômetro de alta resolução *Varian Unity INOVA* do Instituto de Física de São Carlos (USP São Carlos).

4 INFLUÊNCIA DA CRISTALINIDADE DO QUARTZO NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

O quartzo com baixa cristalinidade constitui, juntamente com os alcalinos não aproveitados para formação dos minerais principais da rocha, o resíduo oriundo do resfriamento brusco do magma na formação das rochas vulcânicas. Este resíduo se localiza nos interstícios dos grãos e, por isso, é chamado mesóstase.

A mesóstase é o principal objeto de análise deste capítulo, que apresenta resultados e as discussões a respeito das características da mesóstase e sua relação com a potencialidade de desencadeamento da RAA das rochas vulcânicas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS VULCÂNICAS

Além das diferenças mineralógicas, relativas ao magma de origem, as rochas vulcânicas apresentam variações texturais relacionadas ao processo de resfriamento do magma durante sua formação, sendo estas, principalmente, referentes à quantidade de mesóstase e ao grau de cristalinidade dos minerais constituintes.

Neste estudo, as rochas vulcânicas coletadas foram um basalto e um riolito, conforme descrito nos itens 3.1.1 e 3.1.2. Estas rochas apresentam mesóstases constituídas por diferentes quantidades de quartzo e estes possuem distintos graus de cristalinidade, por isso, foram escolhidas para avaliar a influência da cristalinidade do quartzo na RAA.

A figura 25 apresenta as texturas características do basalto (BEV) e do riolito (RPF) selecionados para o estudo, salientando-se que a composição química de todos os minerais identificados pode ser observada no Apêndice A. Na sequência do texto seguem as descrições

das características de ambas as rochas, bem como uma discussão mais detalhada da relação entre essas características e a potencialidade de desenvolvimento da RAA.

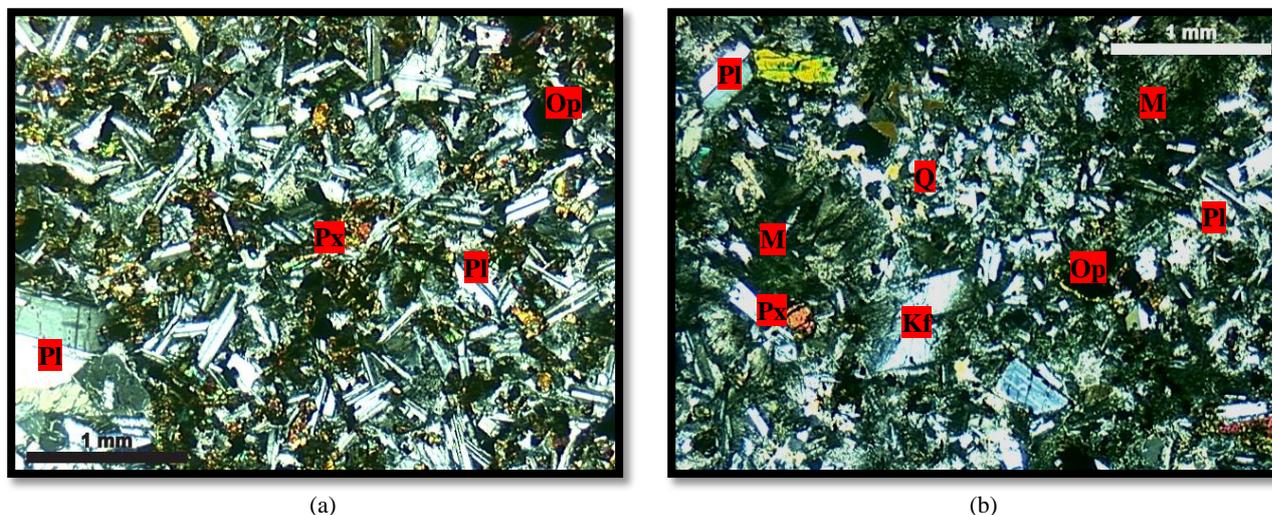


Figura 25: micrografia das rochas vulcânicas, onde: Pl= plagioclásio; Px= piroxênio; Op= opaco (óxido de ferro); Q= quartzo; K-f= K-feldspato; M= mesóstase. (a) amostra basáltica (BEV); (b) amostra riolítica (RPF). Polarizador cruzado, ampliação 2,5x

4.1.1 Basalto BEV

A análise petrográfica da amostra BEV mostrou que se trata de uma rocha hipocristalina²⁰, afírica²¹ a subafírica de granulação fina, podendo conter esparsos microfenocristais²² de plagioclásio, piroxênio e de óxidos de Fe e Ti, imersos em uma matriz fina de mesma composição e em uma mesóstase intersticial.

Conforme pode ser observado na figura 26, a rocha é constituída por plagioclásio (43,4%), piroxênio (35,2%), Ti-magnetita (4,6%) e mesóstase (16,8%). Podem aparecer traços de apatita e hematita, correspondendo à composição de um basalto.

²⁰ Hipocristalina é o nome dado a uma rocha constituída por uma mistura de cristais e vidro/mesóstase (MOTOKI, 2004)

²¹ Afírica é uma textura típica de rochas extrusivas ou de baixa profundidade e consiste num mosaico de cristais muito pequenos para serem identificados a olho nu, sem ajuda de uma lupa ou microscópio (GUERRA; GUERRA, 2001)

²² Fenocristal é o nome dado a um cristal de tamanho maior que os demais cristais presentes numa rocha ígnea. Formam-se na fase inicial de arrefecimento destas rochas (GUERRA; GUERRA, 2001)

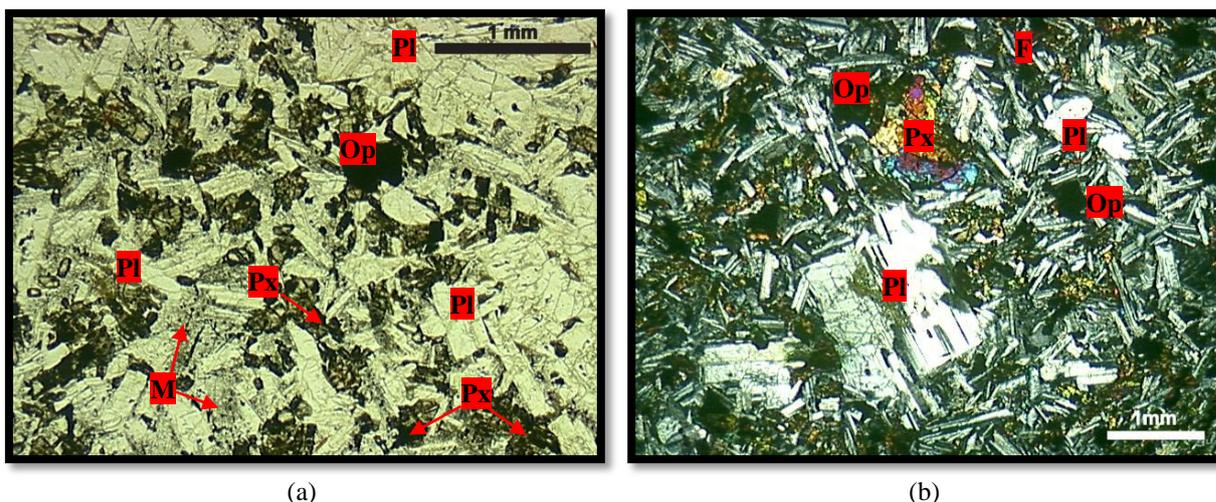


Figura 26: micrografias do basalto BEV, onde: Pl= plagioclásio; Px= piroxênio; Op= opaco (Ti-magnetita); M= mesóstase. (a) imagem sob luz natural, ampliação 2,5x; (b) imagem sob polarizador cruzado, ampliação 1,6x

A análise por DRX dessa rocha mostra que, além da mineralogia observada através da análise petrográfica, há a presença de quartzo (figura 27), indicando que existem grãos submicroscópicos desse mineral que não podem ser identificados com os aumentos da microscopia óptica. O quartzo presente no basalto encontra-se na mesóstase intersticial da rocha.

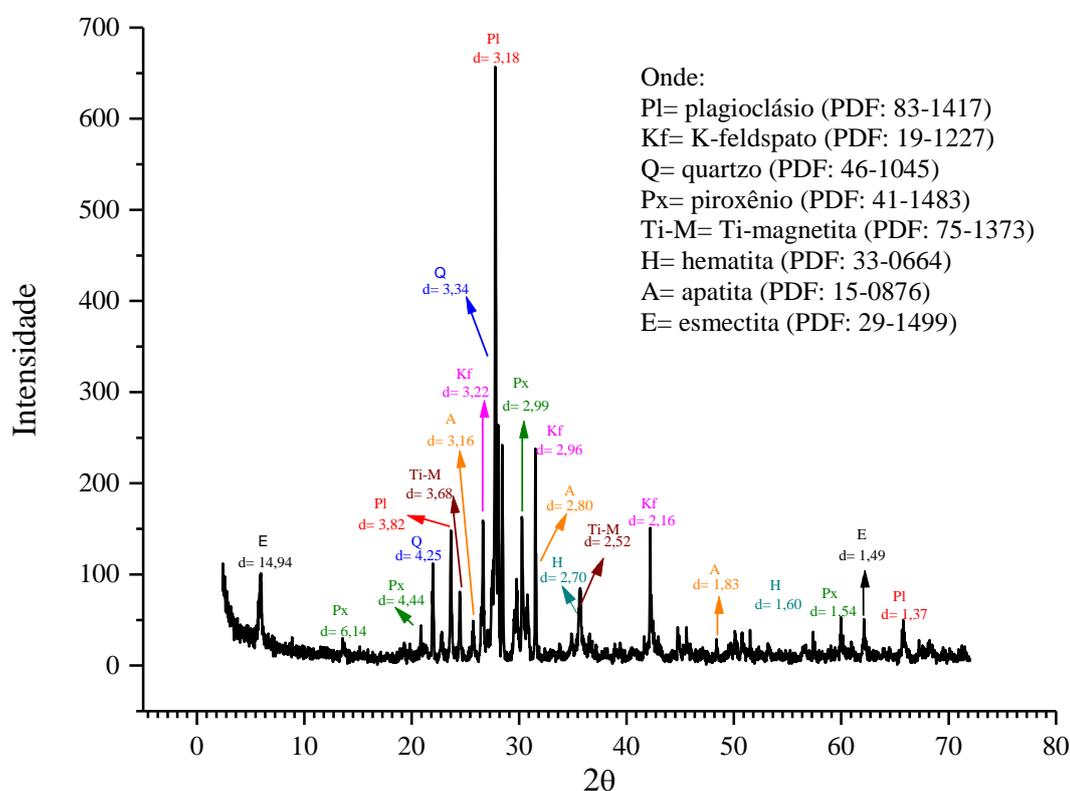


Figura 27: difratograma da amostra BEV

Através da análise por DRX pelo método orientado, foi possível confirmar a presença de esmectita no basalto BEV. Conforme pode ser observado na figura 28, no difratograma da amostra na condição natural constata-se a presença de um pico em torno de 15\AA , o qual se desloca para esquerda (posição $16,5\text{\AA}$) na condição glicolada. Após calcinação surge um pico em torno de $9,5\text{\AA}$, que corresponde a estrutura ideal de uma mica. Este comportamento é característico de argilominerais expansivos - esmectitas. As esmectitas $((\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ podem contribuir para expansões no concreto, tanto por sua natureza expansiva, quanto pela possibilidade de reação com os hidróxidos alcalinos, desencadeando a RAA.

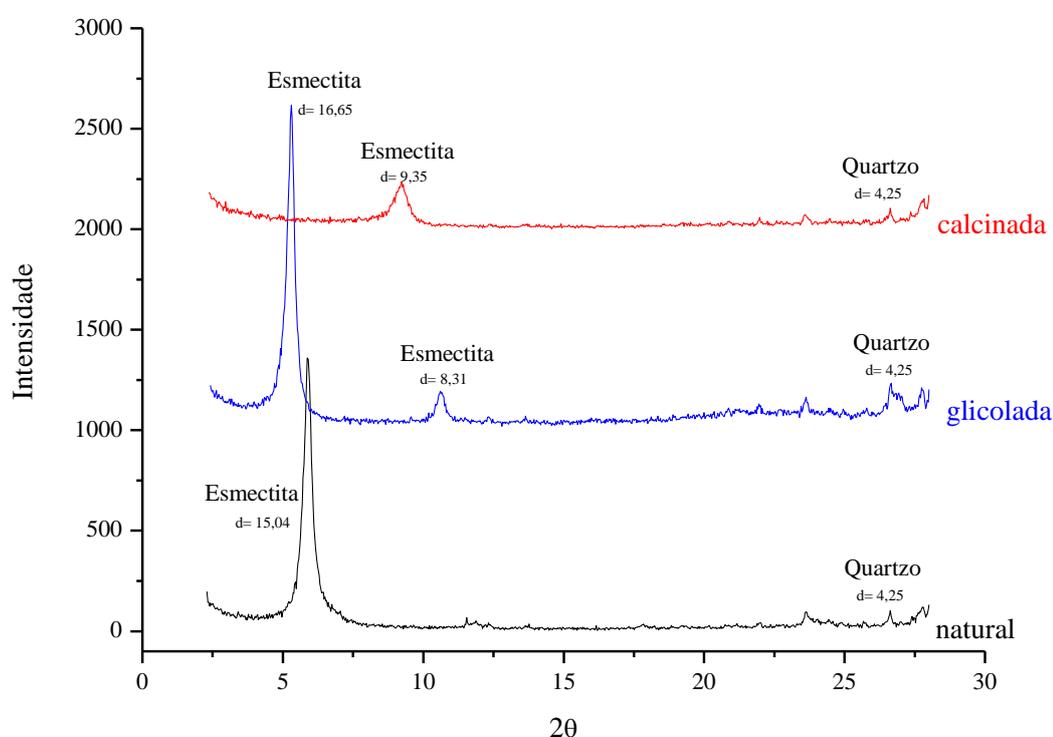


Figura 28: difratograma da porção orientada da rocha BEV

Texturas intergranulares também são observadas na rocha BEV. Na matriz, o piroxênio aparece como grãos subédricos a anédricos, com tamanhos em torno de 0,1 a 0,4mm. São classificados como augitas $((\text{Ca,Mg,Al})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6)$ e ocorrem principalmente na forma de aglomerados de pequenos grãos, conforme pode ser observado através da figura 29 (a).

O plagioclásio tem dimensões da ordem de 0,2 a 0,5mm, com formas tabulares e ripiformes. Este mineral pode apresentar zonação²³ e sua composição determinada oticamente, bem como através de DRX, corresponde à labradorita ((Ca,Na)(Al,Si)₄O₈)), figura 29 (b). Já os minerais opacos são óxidos de Ti-magnetita (Fe_{2,75}Ti_{0,25}O₄) e hematita (Fe₂O₃) com tamanhos desde 0,7 até 0,1mm, formas euédricas a anédricas e irregulares.

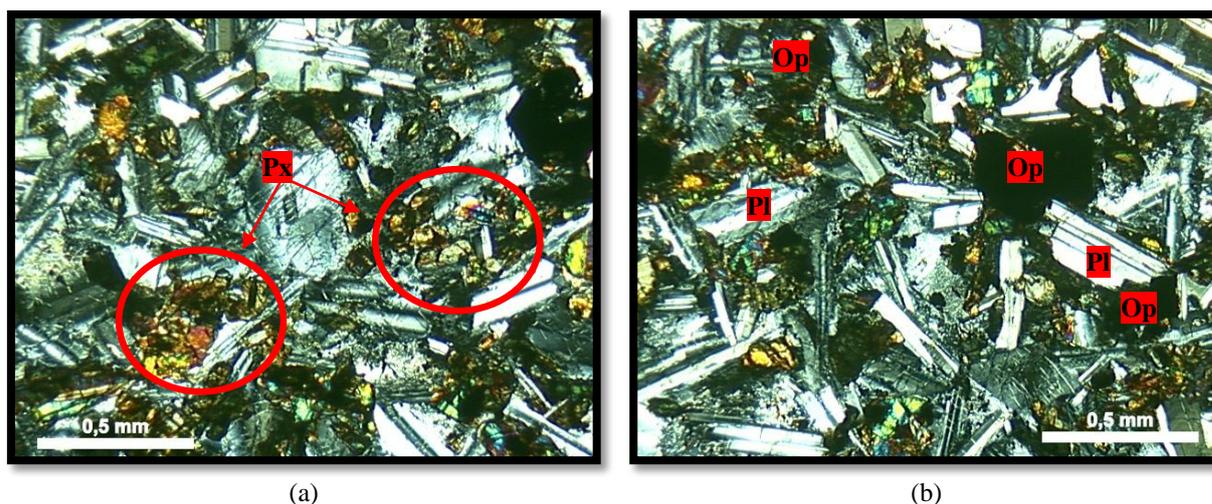


Figura 29: micrografias dos minerais do basalto BEV, onde: Pl= plagioclásio; Px= piroxênio; Op= opaco (Ti-magnetita). (a) imagem mostrando piroxênios aglomerados, polarizador cruzado; (b) imagem mostrando plagioclásios zonados e opacos de dimensões variadas, polarizador cruzado. Ampliação 5x

Os espaços intersticiais da rocha BEV são ocupados pela mesóstase. Esta se apresenta sob formas variadas, podendo ser constituída por material de baixa cristalinidade, por argilominerais (especialmente do tipo esmectita) e, ainda, conter pequenos grãos de quartzo e K-feldspatos (sanidina – KAlSi₃O₈). Em alguns locais (raros) os grãos de quartzo e K-feldspatos presentes na mesóstase podem apresentar tamanhos que chegam a corresponder aos dos grãos da estrutura matriz. Estes têm formas irregulares, mas nem sempre respeitam as formas delimitadas pelos cristais da matriz da rocha.

A figura 30 apresenta imagens da mesóstase constituinte da rocha basáltica. Contudo, a análise detalhada dos diferentes tipos de mesóstase identificados é apresentada no item 4.2.

²³ Zonação é o resultado de diferenças químicas. Ocorre quando a composição da solução ou da fusão muda durante o crescimento do cristal (GUERRA; GUERRA, 2001).

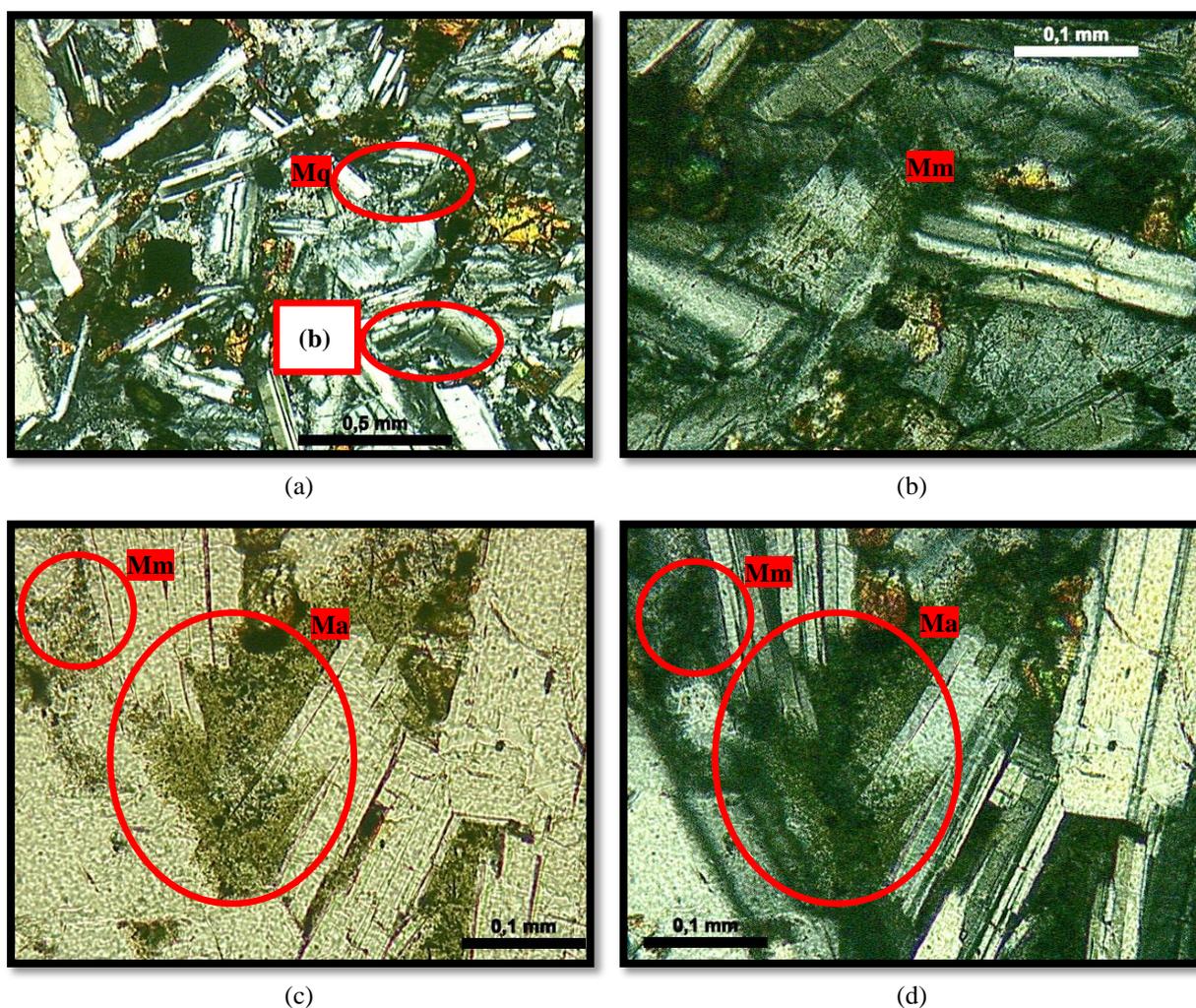


Figura 30: micrografias da mesóstase do basalto BEV, onde: Mm= mesóstase microcristalina; Ma= mesóstase com argilominerais Mq= mesóstase com grãos melhor cristalizados; (a) contexto da mesóstase na rocha, polarizador cruzado, ampliação 5x; (b) detalhe da região da mesóstase, polarizador cruzado, ampliação 20x; (c) e (d) mesóstase com argilominerais, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x

A composição química da amostra BEV, obtida por FXR e apresentada na tabela 05, mostrou que esta amostra possui 54,04% de sílica em sua constituição. Essa quantidade de sílica é comum aos basaltos toleíticos. O percentual corresponde, principalmente, à sílica necessária para formar os minerais principais da rocha, que são os plagioclásios e piroxênios. Sendo assim, a ‘sílica livre’ (SiO_2) existente nos basaltos, mais propensa a reagir, corresponde a um percentual menor, constituinte do resíduo da cristalização rápida do magma (mesóstase), sendo identificado através de DRX como sendo o mineral quartzo.

Dentre os demais constituintes da rocha quantificados por FRX que merecem destaque por estarem relacionados à RAA, ressaltam-se os álcalis Na_2O e K_2O . O Na_2O , juntamente com o

CaO, constituem o plagioclásio. O K_2O entra em pequena quantidade na composição do plagioclásio, concentrando-se, principalmente, no resíduo que, juntamente com a sílica e o excesso de Na_2O , forma a mesóstase. Os constituintes da mesóstase são relativamente solúveis em função da condição ‘instável’ que se encontram no concreto. Por esse motivo, são capazes de contribuir para o aumento da alcalinidade nos poros do concreto, predispondo ainda mais à reação álcali-sílica.

Tabela 05: análise química por FRX do basalto BEV

Elementos maiores (% massa)		Elementos traço (ppm)	
SiO ₂	54,04	Y	39
Al ₂ O ₃	16,71	Pb	12
TiO ₂	0,94	Ni	63
Fe ₂ O ₃ (total)	10,33	Co	57
MnO	0,18	Cu	58
MgO	4,81	Ga	26
CaO	9,22	Sr	285
Na ₂ O	1,73	Zr	124
K ₂ O	1,39	Zn	129
P ₂ O ₅	0,14	Nb	19
Perda ao fogo	0,70	Rb	68
TOTAL	100,21	As	-
		Cr	202
		Ba	374

4.1.1.1 Considerações sobre as características gerais do basalto BEV e sua relação com a RAA

A partir da caracterização geral da rocha, verificou-se que há a presença de grãos de quartzo e K-feldspatos em sua constituição. Estes minerais não fazem parte da mineralogia principal da rocha, estão presentes na mesóstase intersticial, ou seja, possuem baixa cristalinidade, condição que facilita a reação entre o quartzo e os hidróxidos alcalinos e dissolução dos K-feldspatos.

A presença de argilominerais na mesóstase, mais precisamente esmectitas (conforme DRX da amostra orientada), também pode interferir na RAA, pois possui facilidade de dissolução/liberação de sílica e alcalinos. Além disso, as esmectitas são, por si só, expansivas.

Considerando-se a composição química da rocha, verificou-se que o percentual de sílica corresponde a mais de 50% do total. Entretanto, a sílica identificada através de FRX não engloba somente o quartzo, ao contrário, a maior parte constitui os demais silicatos constituintes da rocha. Alguns autores, tais como Korkanç e Tugrul (2005) e *U.S Army Corps of Engineers* (1994), vêm relatando que basaltos com mais de 50% de sílica em sua composição são potencialmente reativos.

Agrupando-se todas essas características da rocha BEV nota-se que são indicativas de uma rocha potencialmente reativa, o que também está de acordo com as prescrições da NBR 15577-3 para classificação da reatividade de um agregado, conforme explicita, com maior detalhe, o Apêndice C deste trabalho.

4.1.2 Riolito RPF

O riolito RPF caracteriza-se, petrograficamente, como uma rocha hipocristalina, afírica a subafírica de granulação fina, da mesma forma que o basalto e podendo conter esparsos microfenocristais de K-feldspato.

A figura 31 mostra que a matriz da rocha RPF, que é constituída por quartzo (23,7%), K-feldspato (19,9%), plagioclásio (18,2%), piroxênio (7,7%), Ti-magnetita (3,2%), mesóstase intersticial (27,2%), contendo traços de argilominerais, apatita e hematita, correspondendo à composição de um riolito. A DRX confirma tal composição mineralógica (figura 32).

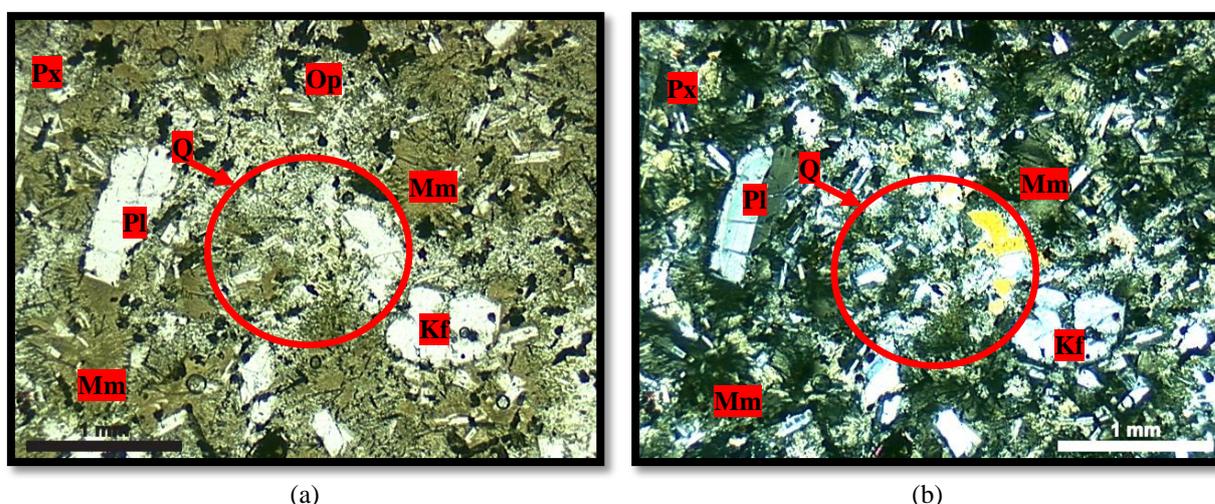


Figura 31: micrografias do riolito RPF, onde: Q= quartzo; Px= piroxênio; Pl= plagioclásio; Kf= K-feldspato; Mm= mesóstase microcristalina. (a) imagem da rocha sob luz natural; (b) imagem da amostra sob luz polarizada. Ampliação 2,5x

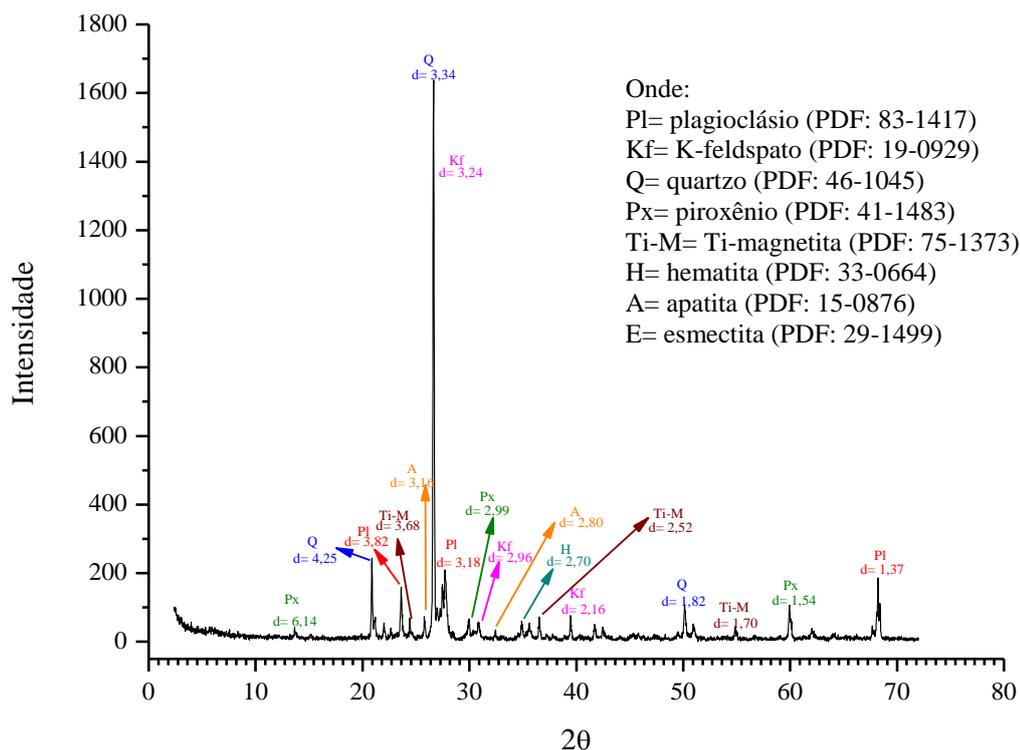


Figura 32: difratograma da rocha RPF

No riolito RPF, as texturas intergranulares e microporfiríticas²⁴ são predominantes, entretanto, a presença de uma mesóstase micro a criptocristalina e vítrea nos espaços intergranulares caracteriza a textura intersetal²⁵. A mesóstase pode ser desde microcristalina à preenchida por cristais automorfos de quartzo (SiO_2) e K-feldspatos, sendo esta mais abundante nos níveis vesiculares. Ocorre uma alteração incipiente para argilominerais de cor verde que, através de DRX da amostra orientada, foram identificados como esmectitas ($(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), figura 34.

A figura 33 mostra o aspecto da mesóstase constituinte do riolito RPF, entretanto, as observações relevantes relativas às características da mesóstase intersticial e sua influência na RAA serão detalhados mais adiante, no item 4.2 deste capítulo.

²⁴ Porfirítica é uma textura constituída por minerais com duas granulometrias distintas: minerais grandes (fenocristais) e minerais pequenos, sendo que, estes últimos compõe a massa fundamental da rocha (MOTOKI, 2004).

²⁵ A textura intersetal tem as mesmas características da textura intergranular, exceto a presença de vidro entre os grãos microcristalinos, como resultado de má cristalização dos minerais (MOTOKI, 2004).

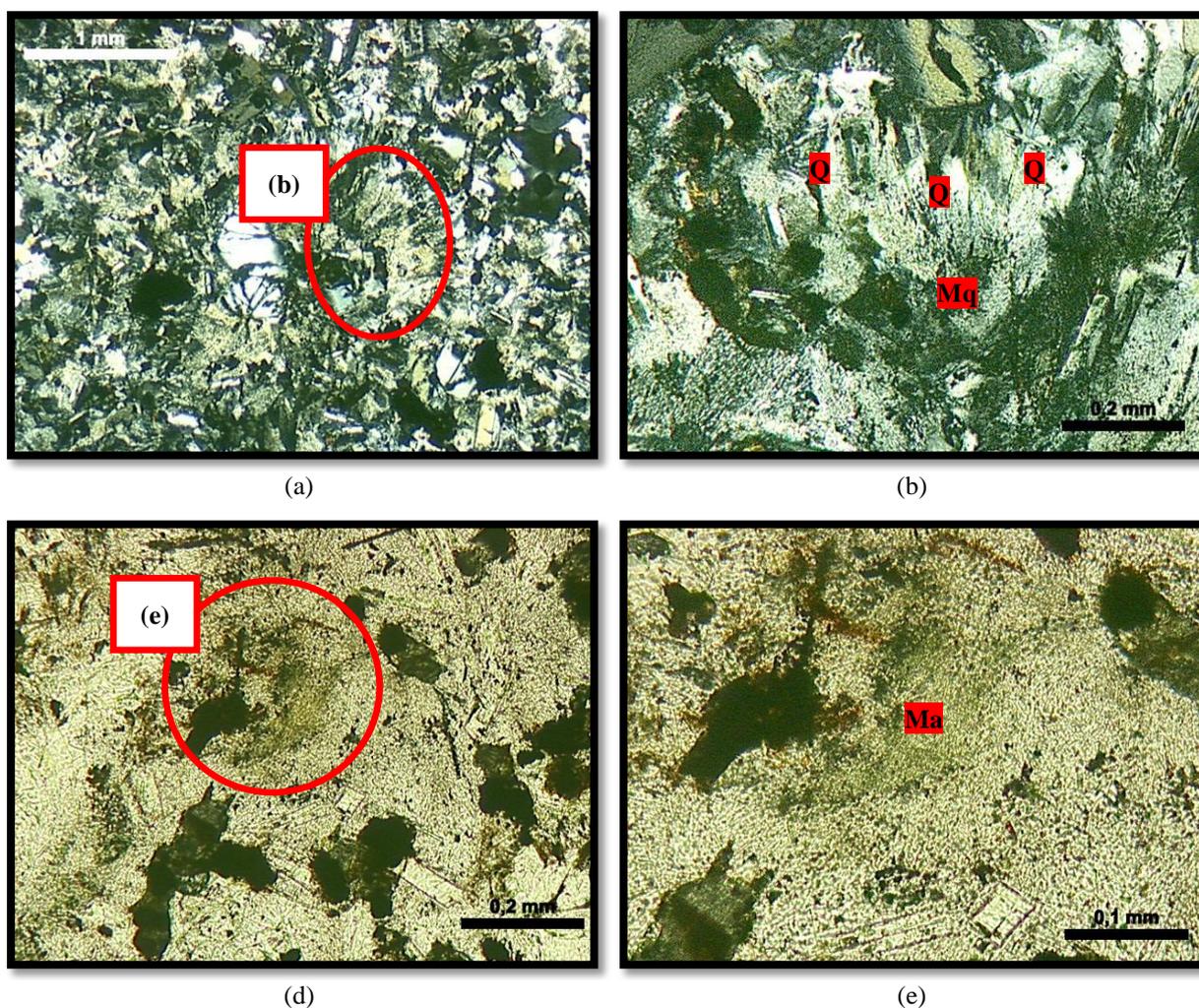


Figura 33: micrografias da mesóstase do riolito RPF, onde: Mq= mesóstase com grãos automorfos de quartzo; Ma= mesóstase com argilominerais; (a) contexto da mesóstase na rocha, polarizador cruzado, ampliação 2,5x; (b) detalhe da região da mesóstase, polarizador cruzado, ampliação 10x; (c) mesóstase com argilominerais, luz natural, ampliação 10x; (d) detalhe da mesóstase com argilominerais, luz natural, ampliação 20x

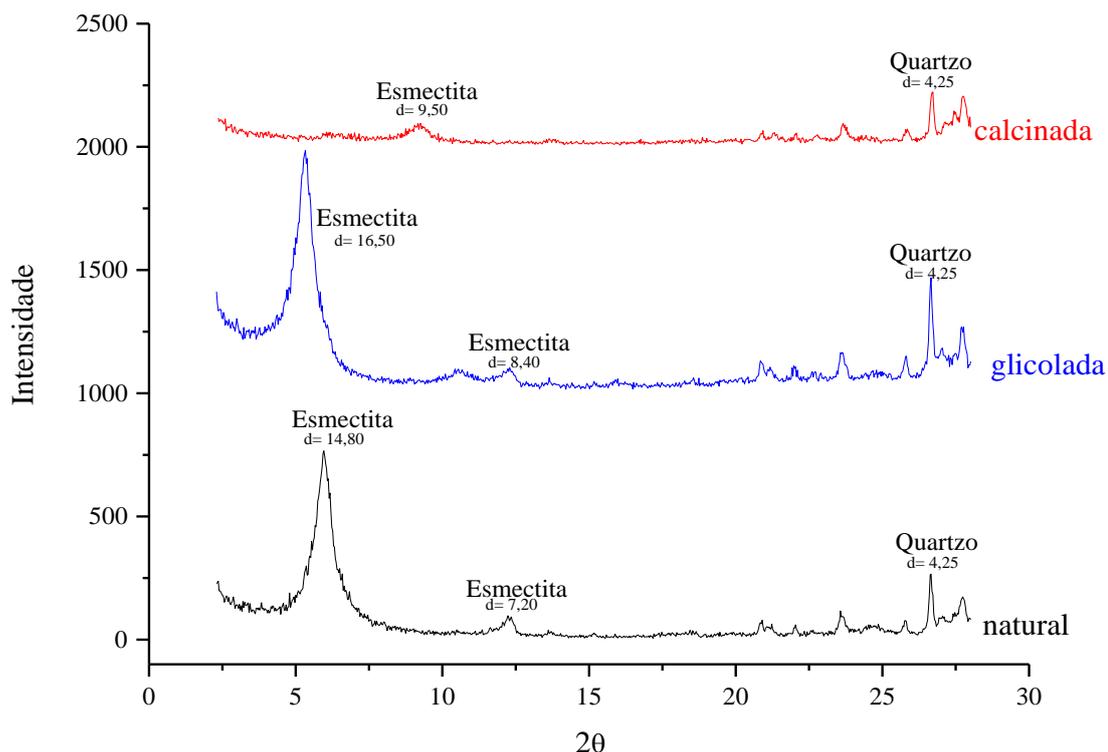


Figura 34: difratograma da porção orientada da rocha RPF

Os fenocristais de feldspato alcalino (K-feldspato – microclínio – KAlSi_3O_8) são predominantemente subédricos a euédricos e os de quartzo são subédricos. Seus tamanhos variam de 0,7 a 1,0mm (figura 35(a)). Os feldspatos, alcalino e plagioclásio, têm dimensões da ordem de 0,2 a 0,5mm, com formas tabulares e ripiformes. O quartzo aparece como grãos anédricos e tamanhos em torno de 0,4mm (figura 35 (a) e figura 35 (b)). Os minerais opacos são óxidos de Ti-magnetita ($\text{Fe}_{2,75}\text{Ti}_{0,25}\text{O}_4$) e hematita (Fe_2O_3) com tamanhos desde 0,5 até 0,1mm, formas euédricas a anédricas (figura 35 (b)).

Na matriz, o piroxênio aparece como grãos anédricos, com tamanhos em torno de 0,1 a 0,3mm. Ocorrem principalmente na forma de aglomerados de pequenos grãos e são classificados como augitas (figura 35 (c)).

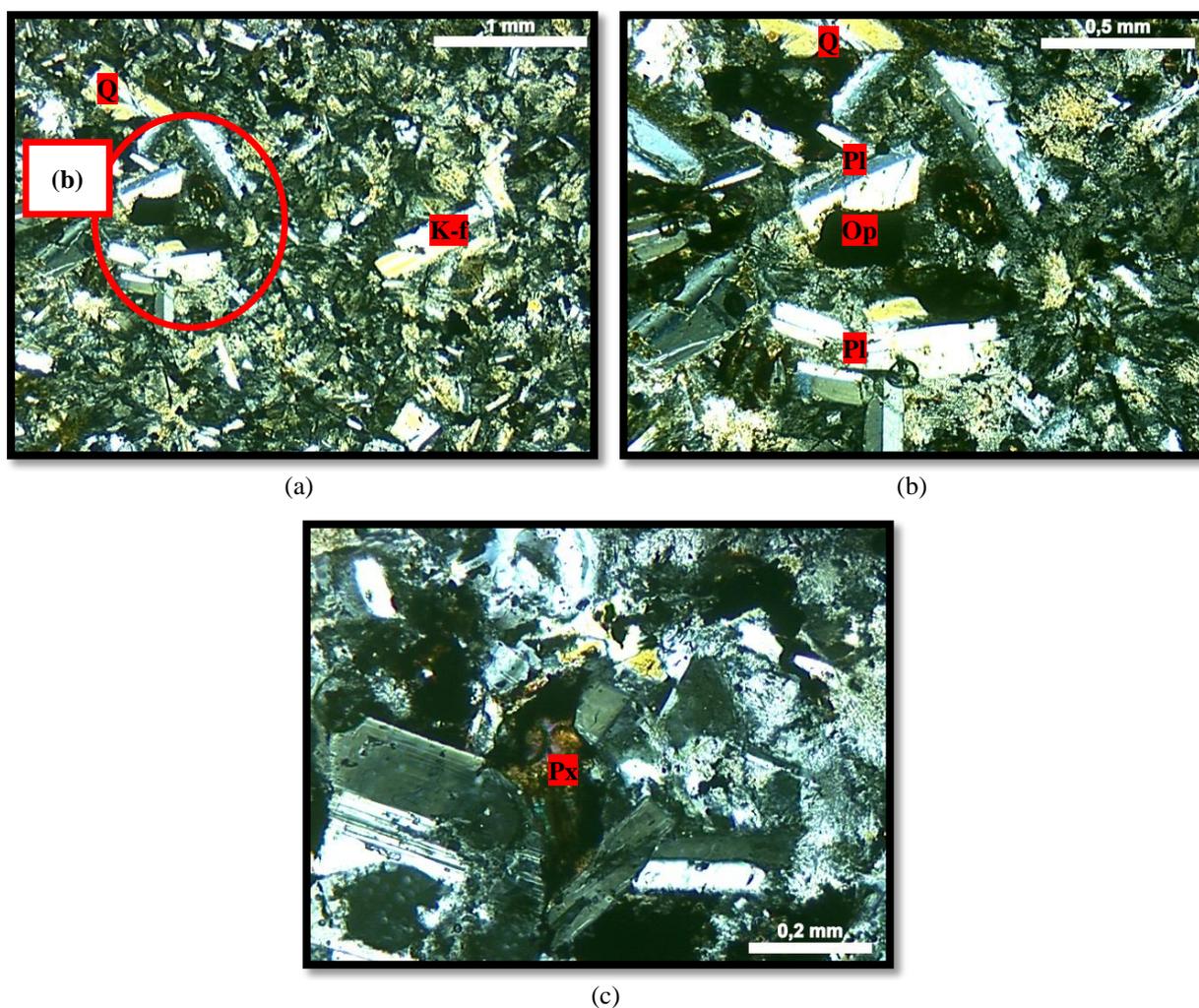


Figura 35: micrografias dos minerais constituintes da rocha RPF, onde: Pl= plagioclásio; Q= quartzo; K-F= K-feldspato; Px= piroxênio. (a) contexto dos fenocristais na matriz, polarizador cruzado, ampliação 2,5x; (b) detalhe dos fenocristais, polarizador cruzado, ampliação 5x; (c) detalhe do piroxênio, polarizador cruzado, ampliação 10x

A análise química do riolito, apresentada na tabela 06, mostra que se trata de uma rocha ácida, com 67,98% de sílica, o que leva à formação de quartzo na matriz da rocha e também sob a forma microcristalina na mesóstase. O percentual de K_2O e Na_2O na amostra riolítica é maior que no basalto, destacando o K_2O , em função da presença mais expressiva do K-feldspato nesta rocha, pois no basalto o K-feldspato encontra-se somente na mesóstase intersticial. Conforme já mencionado no item 4.1.1 deste trabalho, a presença desses constituintes pode incrementar os hidróxidos alcalinos nos poros do concreto devido à sua dissolução. Dessa forma, a amostra riolítica poderia contribuir tanto para a dissolução de sílica quanto de alcalinos.

Tabela 06: análise química por FRX do riolito RPF

Elementos maiores (% massa)		Elementos traço (ppm)	
SiO ₂	67,98	Y	83
Al ₂ O ₃	11,75	Pb	28
TiO ₂	1,15	Ni	-
Fe ₂ O ₃ (total)	7,32	Co	-
MnO	0,12	Cu	45
MgO	0,74	Ga	25
CaO	2,38	Sr	125
Na ₂ O	1,89	Zr	291
K ₂ O	4,15	Zn	102
P ₂ O ₅	0,18	Nb	42
Perda ao fogo	1,01	Rb	329
TOTAL	98,68	As	12
		Cr	39
		Ba	694

4.1.2.1 Considerações sobre as características gerais do riolito RPF e sua relação com a RAA

As características mineralógicas e químicas do riolito apontam para uma grande potencialidade de desenvolvimento da RAA. Tal constatação está de acordo com o que prevê a NBR 15577-3 para classificação da reatividade de uma rocha (conforme pode ser visualizado no Apêndice C).

A primeira consideração a ser feita diz respeito à grande quantidade de quartzo (aproximadamente 24%) com granulação fina (0,4mm) na matriz da rocha RPF. Além disso, a presença de mesóstase contendo grãos com baixa cristalinidade é bastante expressiva nessa rocha, bem como de mesóstase com argilominerais.

Da análise química do riolito RPF se destacou tanto a quantidade de sílica quanto de álcalis presentes (Na₂O e K₂O), os quais também podem contribuir para a RAA, especialmente por estarem presentes na mesóstase e argilominerais. Alguns estudos têm relatado o aumento da alcalinidade do concreto devido à solubilização dos alcalinos dos minerais (GILLOT; ROGERS, 1994; CONSTANTINER; DIAMOND, 2003; WANG *et al.*, 2008).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MESÓSTASE

Conforme o que foi descrito no capítulo 2 (item 2.2), a mesóstase é constituída pelo resíduo oriundo da cristalização rápida do magma, rico em sílica e álcalis. Estes constituintes não foram totalmente aproveitados na cristalização dos minerais da matriz. Sendo assim, a mesóstase contém pequenos grãos de quartzo e feldspatos (principalmente K-feldspato), ambos com baixa cristalinidade.

A literatura vem relatando há alguns anos que a principal constituição reativa presente nas rochas vulcânicas é o material intersticial de baixa cristalinidade: vidro vulcânico e/ou mesóstase (WAKIZAKA, 2000; KORKANÇ; TUĞRUL, 2005; PONCE; BATIC, 2006). Essa constatação é especialmente importante quando se trata de basaltos, uma vez que a mesóstase é a única ‘fonte’ de sílica livre nessa rocha.

As diferenças texturais entre a mesóstase intersticial das amostras BEV e RPF são bastante evidentes. Enquanto no basalto BEV a mesóstase se distribui de maneira homogênea (figura 36), no riolito RPF ocorre grandes volumes concentrados, muitas vezes contendo grãos de quartzo com hábito fibroso e textura radiada, semelhante à calcedônia (figura 37).

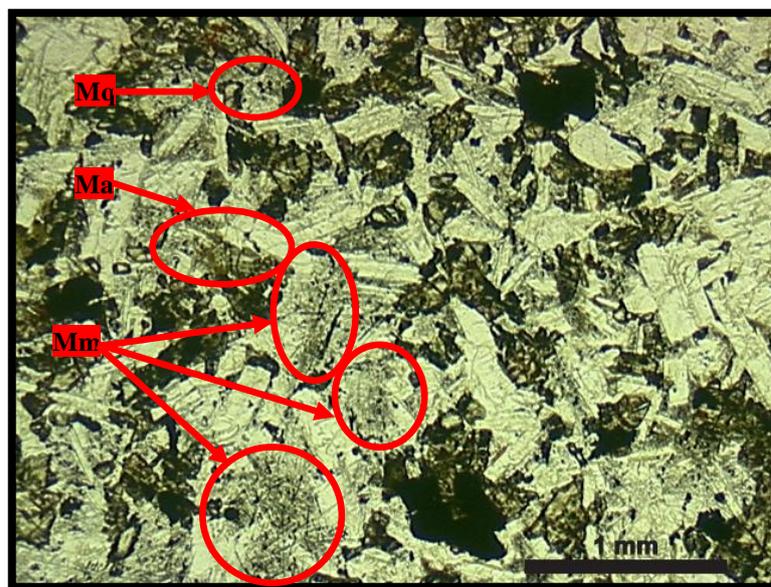


Figura 36: micrografia mostrando a distribuição da mesóstase intersticial na rocha BEV, onde Mq= mesóstase com grãos visualizáveis, Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, Mm= mesóstase com grãos microcristalinos. Micrografia obtida através de microscopia ótica, sob luz natural, ampliação 1,6x

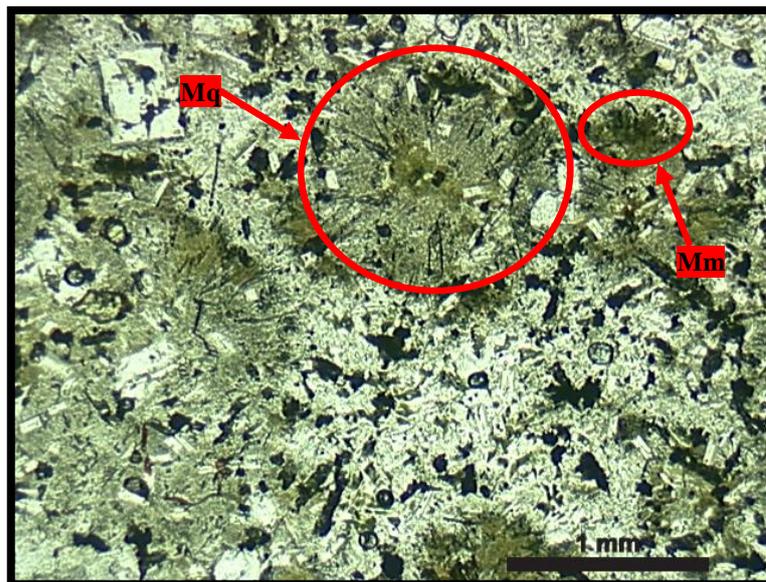


Figura 37: micrografia mostrando a distribuição da mesóstase intersticial na rocha RPF, onde Mq= mesóstase com grãos visualizáveis, Mm= mesóstase com grãos microcristalinos. Micrografia obtida através de microscopia ótica, sob luz natural, ampliação 1,6x

Na amostra BEV, a mesóstase corresponde a 16,8% da matriz, sendo aproximadamente 7,7% mesóstase muito homogênea, onde não se observam microgrãos em microscopia ótica. 5,5% é uma mesóstase contendo argilominerais disseminados e, em torno de 3,6% da mesóstase, são observados microgrãos de quartzo e/ou feldspato.

A mesóstase intersticial da rocha RPF representa aproximadamente 27,2% da matriz. Desse percentual, a mesóstase mais homogênea, sem microgrãos visíveis, corresponde a 16,1%. A presença de mesóstase contendo argilominerais na rocha RPF é um pouco menor que no basalto BEV, e representa 5,0%. Já a mesóstase com microgrãos de quartzo ocupa aproximadamente 6,1% da matriz.

Marfil e Maiza (2006) estudaram diversos riolitos da Argentina e concluíram que um dos fatores que mais pode interferir para sua reatividade é o **tipo** de material intersticial contido. Conforme o que foi observado na caracterização geral das amostras coletadas para o estudo, a mesóstase intersticial presente nas amostras vulcânicas pode se apresentar sob diferentes aspectos numa mesma rocha e, de acordo com as observações feitas, as principais diferenças são relativas à sua composição química e à sua textura. Por isso, buscando avaliar a interferência dessas diferenças na potencialidade reativa das rochas, foram identificados e caracterizados três tipos principais de mesóstase:

- (a) Mm mesóstase contendo grãos microcristalinos de quartzo e feldspatos, não observáveis em microscopia ótica;
- (b) Ma mesóstase constituída predominantemente por argilominerais;
- (c) Mq mesóstase composta por grãos melhor cristalizados de quartzo e feldspatos.

A tabela 07 apresenta um comparativo entre as diferentes mesóstases observadas nas amostras vulcânicas.

Tabela 07: quantidade percentual das diferentes mesóstases observadas nas amostras vulcânicas

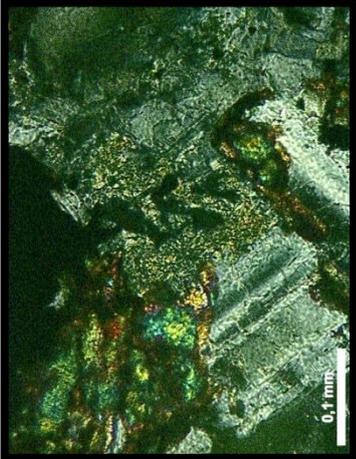
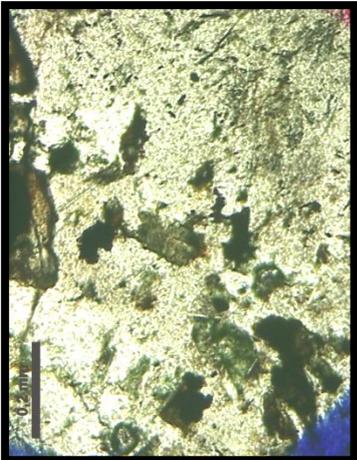
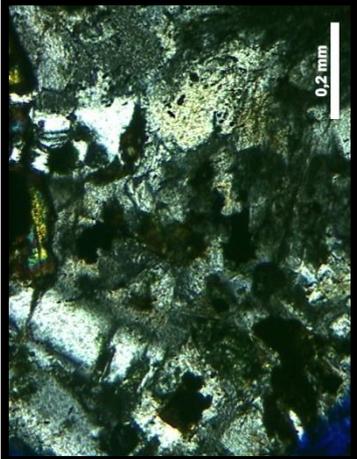
Tipo de mesóstase	Amostra	
	BEV	RPF
Mesóstase microcristalina (Mm)	7,7	16,1
Mesóstase com predomínio de argilominerais (Ma)	5,5	5,0
Mesóstase melhor cristalizada (Mq)	3,6	6,1
TOTAL	16,8	27,2

Conforme pode ser observado na tabela 07, a rocha RPF possui maior quantidade de mesóstase. Considerando-se que essa é uma rocha ácida, que possui quartzo como mineral principal, o percentual expressivo de material intersticial com baixa cristalinidade é um indicativo da sua potencialidade de expansão.

Já na amostra BEV deve-se levar em conta que o percentual de mesóstase melhor cristalizada é bem menor, ou seja, o quartzo presente nessa amostra possui menor cristalinidade. Isso pode influenciar a dissolução de sílica do basalto BEV.

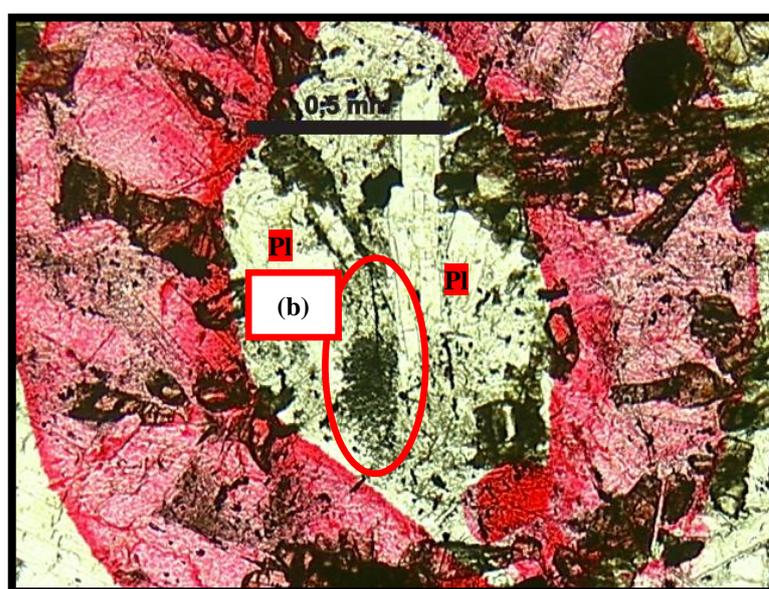
A tabela 08 apresenta as características gerais de cada tipo de mesóstase em microscopia ótica e, com o intuito de propiciar condições de avaliação da relação entre o potencial reativo das rochas vulcânicas e o tipo de mesóstase, realizaram-se análises mais aprofundadas desse material intersticial. Tais análises serão apresentadas a seguir, nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

Tabela 08: características gerais dos diferentes tipos de mesóstase

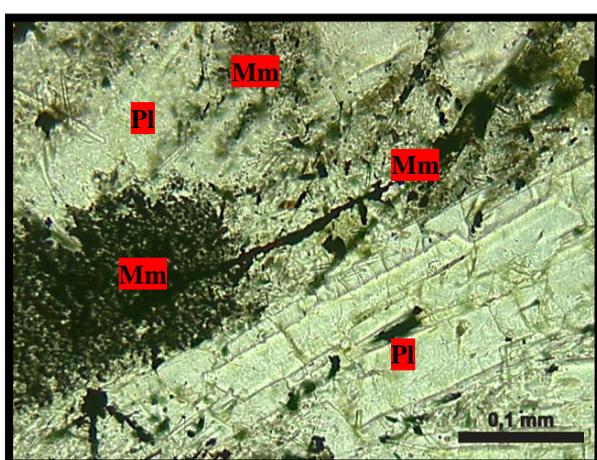
		Micrografia sobtida através de microscópio ótico de luz transmitida		
Tipo de mesóstase	Código	Descrição característica		
		Luz natural	Polarizador cruzado	
Mesóstase constituída por grãos microcristalinos	Mm	De coloração castanha, é constituída por material de baixa cristalinidade, rico em sílica e álcalis acompanhado por pequenos grãos de hematita e agulhas de apatita, não sendo possível individualizar através de microscopia óptica, grãos de quartzo ou feldspatos		
Mesóstase com predomínio de argilominerais	Ma	Mesóstase esverdeada, onde o material quartzo-feldspático é acompanhado por argilominerais (esmectita)		
Mesóstase com grãos melhor cristalizados	Mq	Há a disseminação de grãos de quartzo, que podem ser visualizados em microscopia ótica, associados ao material de composição feldspática, argilominerais e apatitas		

4.2.1 Mesóstase com grãos microcristalinos (Mm)

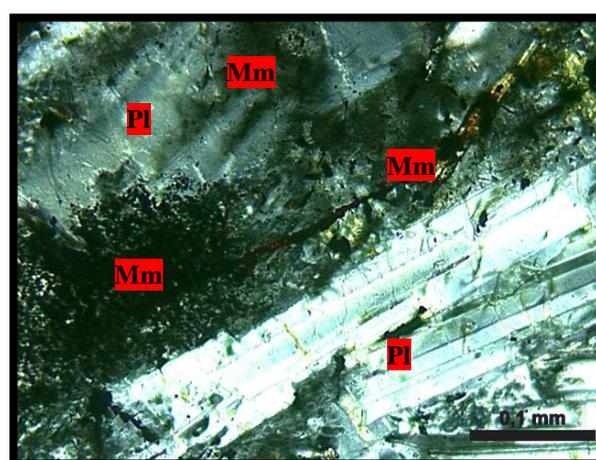
A fim de estudar com maior profundidade as características da mesóstase Mm, foram selecionadas diversas regiões contendo esse tipo de mesóstase nas rochas BEV e RPF através de microscopia ótica para posterior avaliação através de MEV e EDS. A figura 38 apresenta uma região selecionada da rocha BEV, onde se verifica que a mesóstase Mm é um material que transmite menos luz em microscopia ótica, não sendo possível distinguir cristais. Esta característica foi comum a todas as regiões contendo mesóstase Mm avaliadas neste estudo.



(a)



(b)



(c)

Figura 38: micrografias em microscopia ótica de uma região contendo mesóstase Mm na rocha BEV, onde: Mm= mesóstase com grãos microcristalinos, Pl= plagioclásio. (a) região contendo mesóstase Mm selecionada para análise, luz natural, ampliação 5x; (b) e (c) detalhe da mesóstase Mm, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x

O aspecto em MEV por elétrons retroespalhados da mesóstase Mm também mostra regiões na mesóstase com coloração mais escurizada (figura 39 (b)). Nessas regiões, segundo as análises por EDS, prevalecem composições de sílica pura, indicando a presença de quartzo (figura 39 (c)), já nas regiões um pouco mais claras da mesóstase predominam composições de K-feldspato (figura 39 (d)). Considerando-se que a análise apresentada na figura 39 representa todas as diversas regiões contendo a mesóstase Mm avaliadas, tanto na rocha BEV quanto na RPF, pode-se concluir que a mesóstase Mm é composta por grãos de quartzo e K-feldspatos.

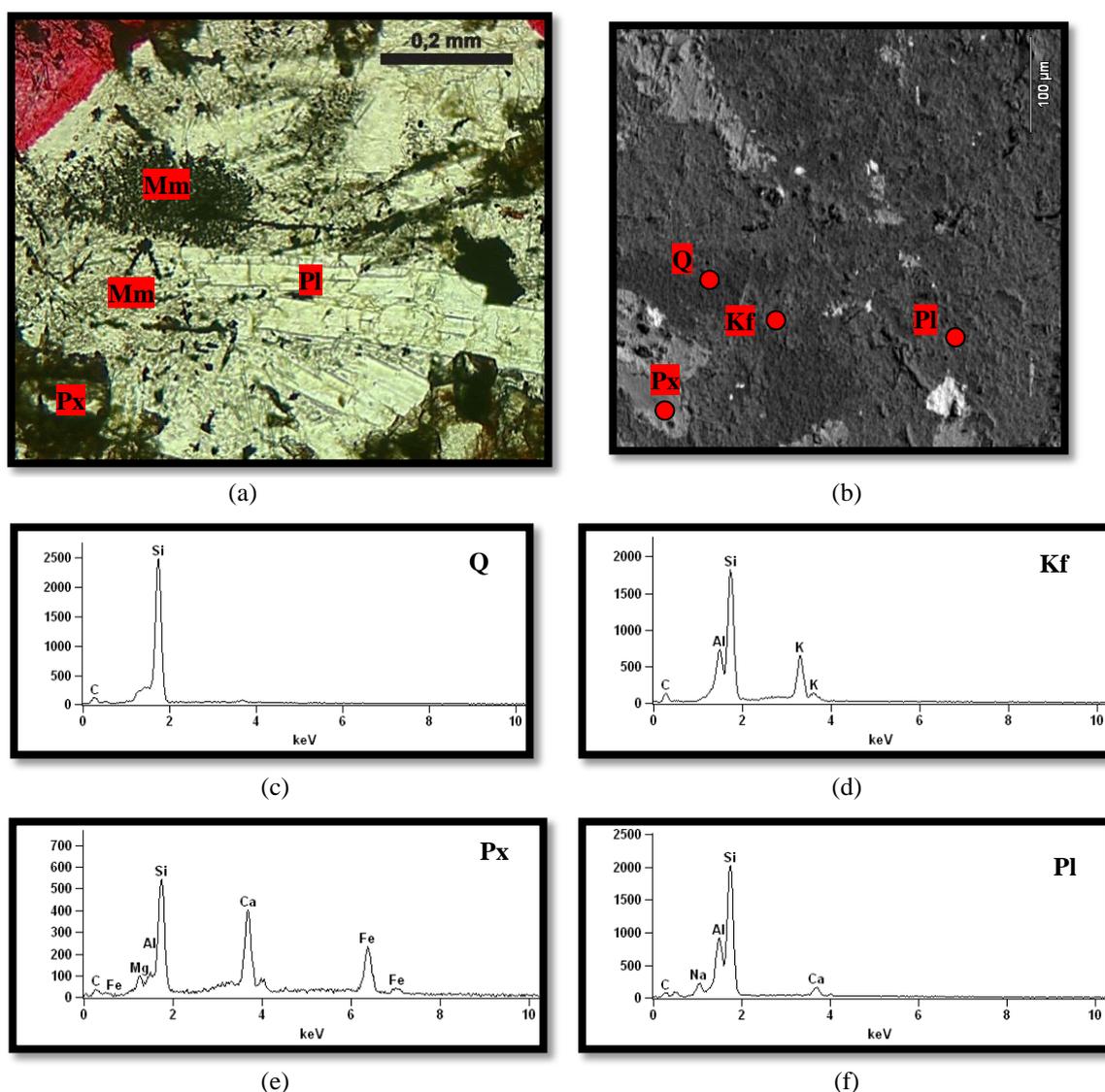


Figura 39: análises da mesóstase Mm (rocha BEV), onde: Mm= mesóstase com grãos microcristalinos, Q= quartzo; Pl= plagioclásio; Px= piroxênio, Kf= K-feldspato. (a) micrografia da região contendo mesóstase Mm em microscopia ótica, luz natural, ampliação 10x; (b) micrografia da região contendo mesóstase Mm em MEV, ampliação 220x; (c) (d) espectros obtidos por EDS identificando quartzo e K-feldspato na mesóstase; (e) (f) espectros obtidos por EDS piroxênio e plagioclásio na matriz

Conforme observado na figura 40, obtida através de MEV por elétrons secundários, foram identificados micro-grãos de quartzo e K-feldspatos na mesóstase Mm possuindo dimensão menor que 5 μ m. Esse tamanho de grãos também foi observado nas mesóstases estudadas por Gomes (1996).

Aqui, é importante salientar, mais uma vez, que no caso dos basaltos tanto o quartzo quanto o K-feldspato presentes ocorrem apenas na mesóstase, pois esses minerais não fazem parte da mineralogia principal da rocha.

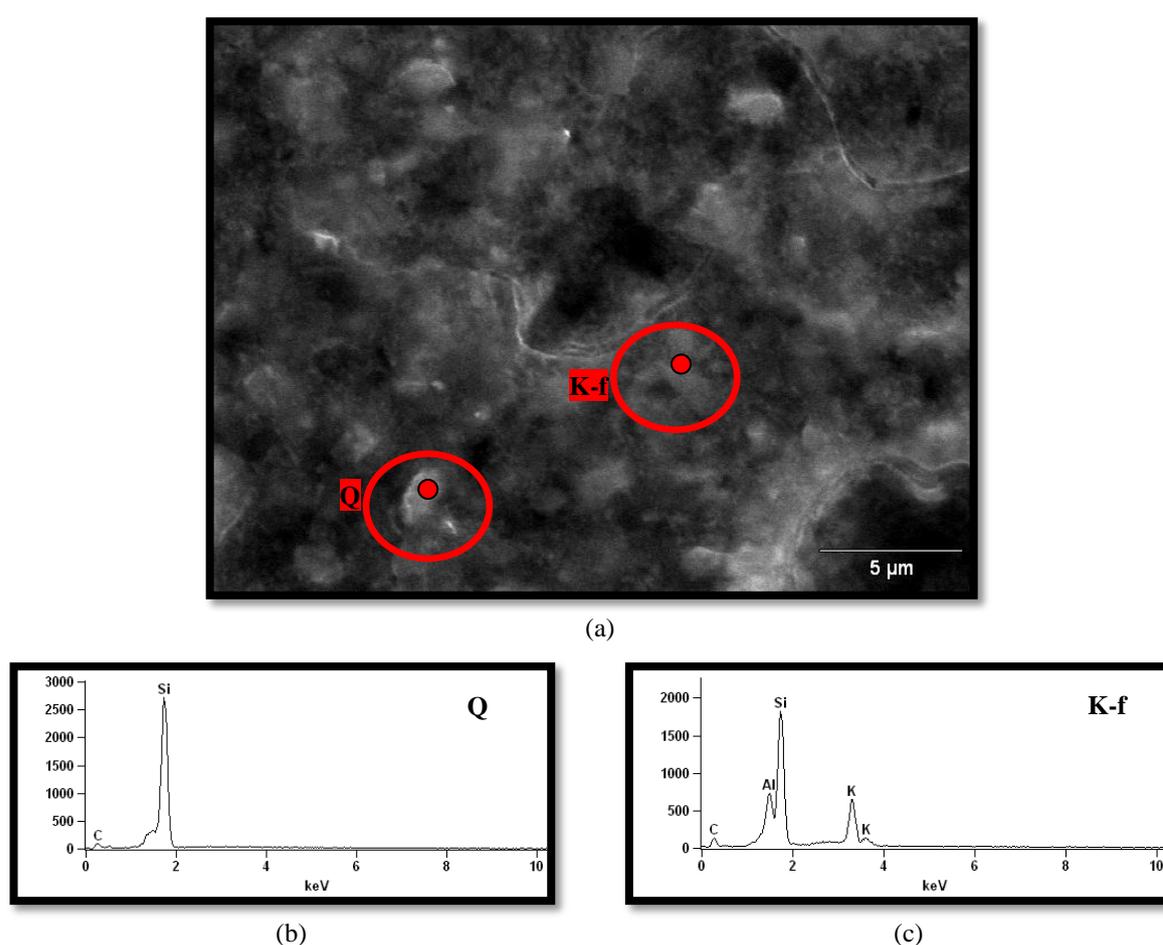


Figura 40: presença de microgrãos na mesóstase Mm (rocha BEV), onde Q= quartzo, K-f= K-feldspato. (a) micrografia obtida através de MEV por elétrons secundários, ampliação 5000x; (b) (c) espectros obtidos por EDS dos grãos de quartzo e K-feldspato

A figura 41 apresenta o mapeamento dos elementos químicos constituintes da mesóstase Mm, na mesma região apresentada anteriormente, na figura 39.

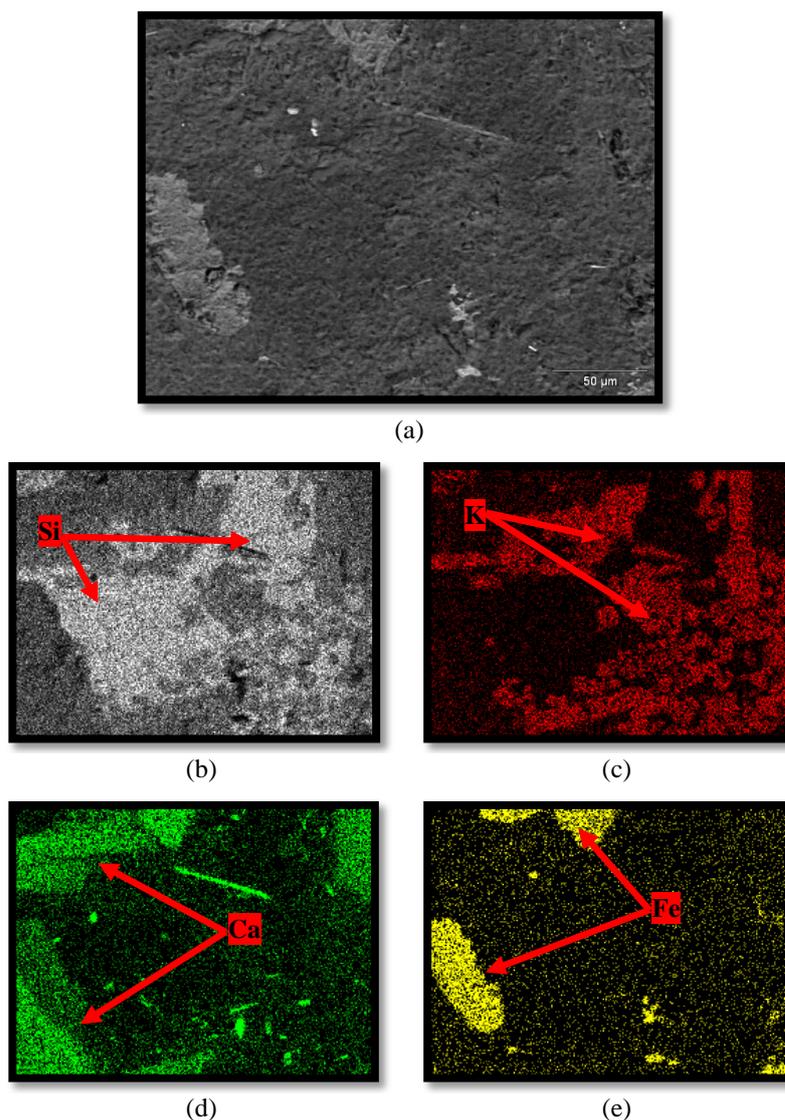


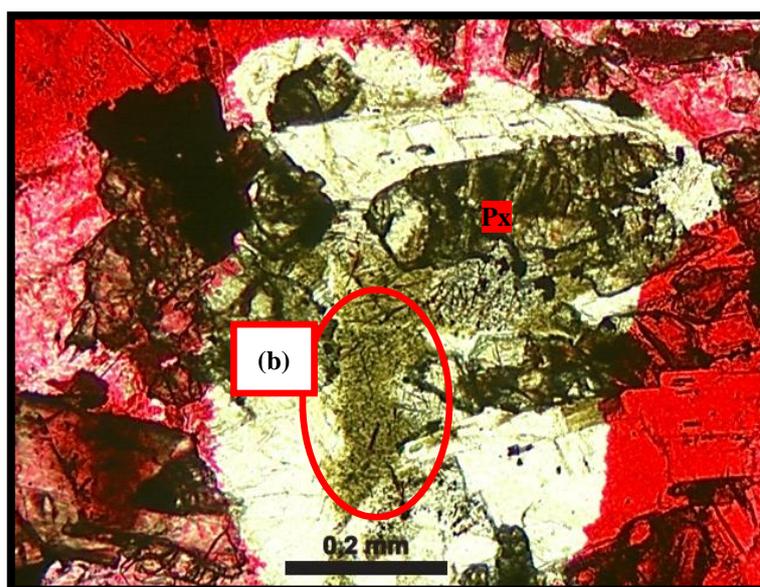
Figura 41: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Mm (rocha BEV). (a) micrografia obtida em MEV da região da mesóstase Mm, ampliação 500x; (b) mapa identificando a localização do Si (quartzo); (c) mapa identificando a localização do K (K-feldspato); (d) mapa identificando a localização do Ca (plagioclásio e piroxênio); (e) mapa identificando a localização do Fe (piroxênio)

O mapeamento dos elementos (figura 41) permitiu a identificação de microgrãos de quartzo e K-feldspato. O quartzo localizado nas partes onde há ocorrência exclusiva de Si (figura 41 (b)) e o K-feldspato onde há concentração de K (figura 41 (c)).

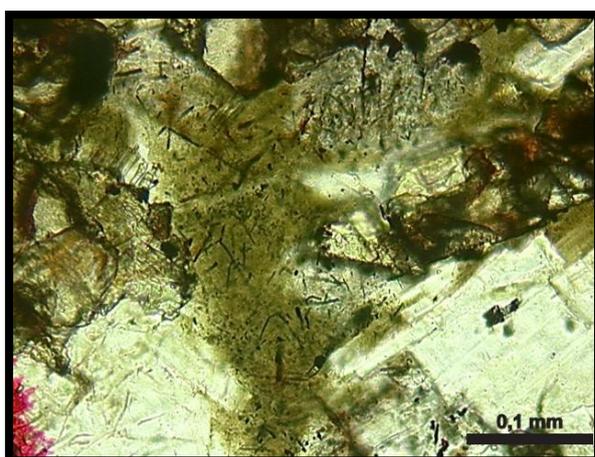
Através das figuras 41 (d) e 41 (e) nota-se que na mesóstase Mm a quantidade de argilominerais é inexpressiva. A ausência dos elementos Fe e Ca nas análises comprovam essa constatação, pois esses elementos, que são comuns aos argilominerais (esmectitas), foram identificados somente no piroxênio.

4.2.2 Mesóstase constituída predominantemente por argilominerais (Ma)

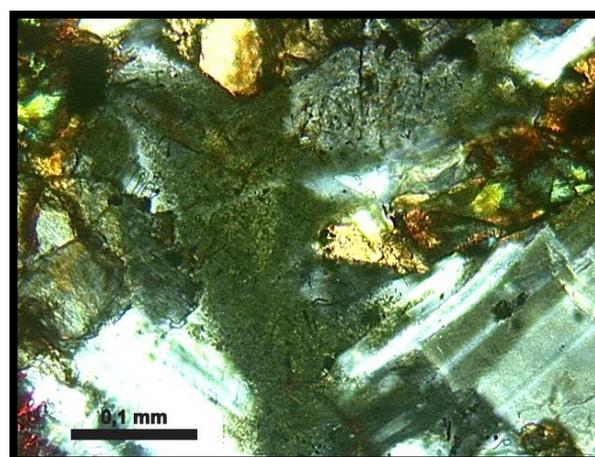
Com o intuito de caracterizar a mesóstase Ma, de maneira análoga ao que foi feito para a mesóstase Mm, foram selecionadas diversas regiões nas rochas BEV e RPF contendo esse tipo de mesóstase através de microscopia ótica. Posteriormente as regiões selecionadas foram analisadas através de MEV e EDS. Uma das regiões contendo esse tipo de mesóstase que foi selecionada para o estudo pode ser observada através da figura 42.



(a)



(b)



(c)

Figura 42: micrografias em microscopia ótica de uma região contendo mesóstase Ma na rocha BEV, onde: Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, Px= piroxênio. (a) região selecionada para análise contendo mesóstase Ma, luz natural, ampliação 10x; (b) e (c) detalhe da mesóstase Ma, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x

De modo geral, a mesóstase Ma está associada à presença de cristais de piroxênio e/ou minerais opacos junto à mesóstase. Entretanto, a principal diferença dessa mesóstase em microscopia ótica sob luz natural é sua coloração mais esverdeada (figura 42 (b)). Sob polarizador cruzado identifica-se um material com aspecto escuro levemente brilhante (figura 42 (c)). Tais características foram observadas em todas as mesóstases do tipo Ma analisadas.

Conforme pode ser verificado na figura 43, as observações em MEV mostram que a mesóstase Ma possui aspecto escamado, bastante diferente das mesóstases Mm e Mq (itens 4.2.1 e 4.2.3). Essa textura é decorrente do hábito lamelar dos argilominerais, do seu tamanho muito pequeno e da baixa dureza no plano (001), que dificultam o polimento da lâmina petrográfica utilizada para análise.

Através da análise química por EDS pontual na região da mesóstase identificaram-se constituintes característicos de argilominerais (Na, K, Ca, Al, Mg, Si), o que corrobora com a premissa de que a mesóstase Ma é constituída predominantemente por argilominerais (figura 43 (c) e figura 43 (d)), que neste caso são esmectitas $((\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$.

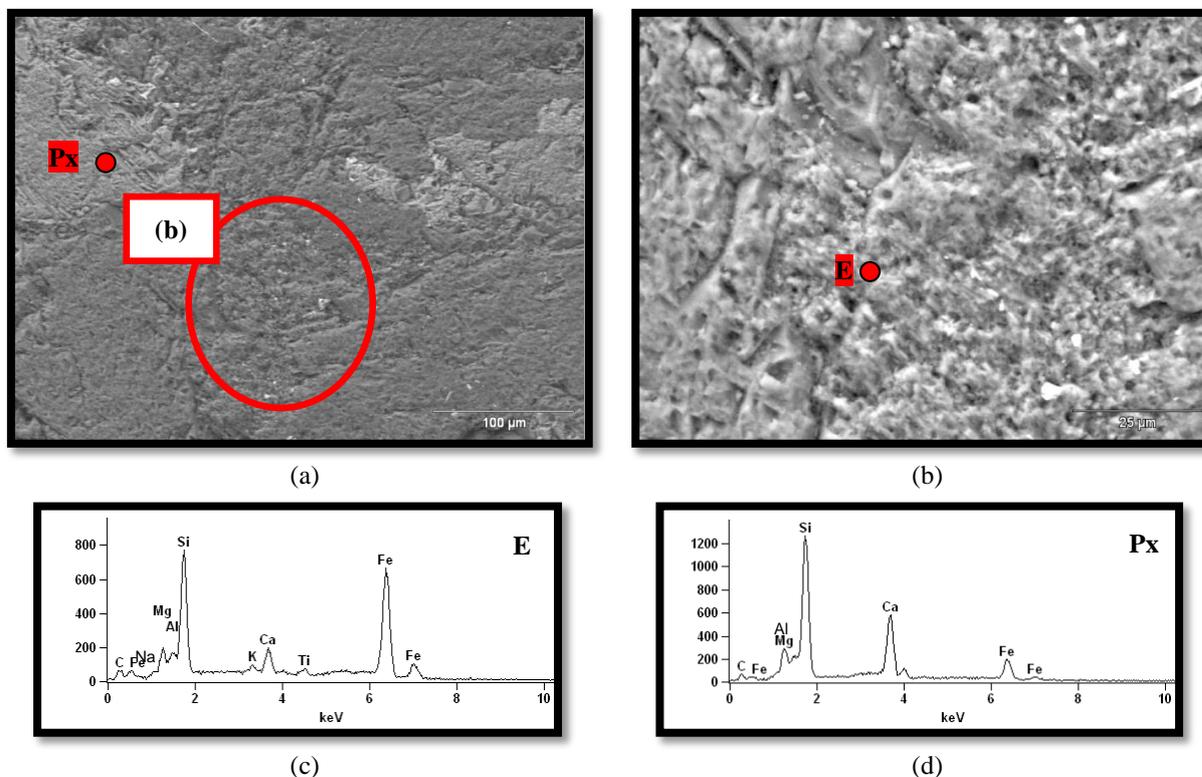


Figura 43: presença de argilominerais na mesóstase Ma (rocha BEV), onde E= esmectitas, Px= piroxênio. (a) micrografia obtida através de MEV, ampliação 330x; (b) micrografia obtida em MEV mostrando detalhe dos argilominerais, ampliação 1200x (c) (d) espectros obtidos por EDS das esmectitas e do piroxênio

A região apresentada na figura 43 (b) foi utilizada para mapear os constituintes da mesóstase Ma, conforme pode ser observado na figura 44. Esta análise mostrou que predominam o K e o Fe (figura 44 (c) e figura 44 (e)). Por estarem presentes nos mesmos locais, conclui-se que não se trata de K-feldspato, pois este mineral não possui Fe, na verdade são constituintes dos argilominerais. De acordo com a literatura, os argilominerais contribuem principalmente para o aumento da alcalinidade do concreto (MARFIL; MAIZA, 2006; WAKIZAKA *et al.*, 2004). Entretanto, na mesóstase Ma foram identificados pequenos espaços com maior intensidade de Si, onde há ausência de Fe (figura 44 (b)). Isso evidencia que também existem pequenos grãos de quartzo nesta mesóstase, porém, em quantidade não expressiva.

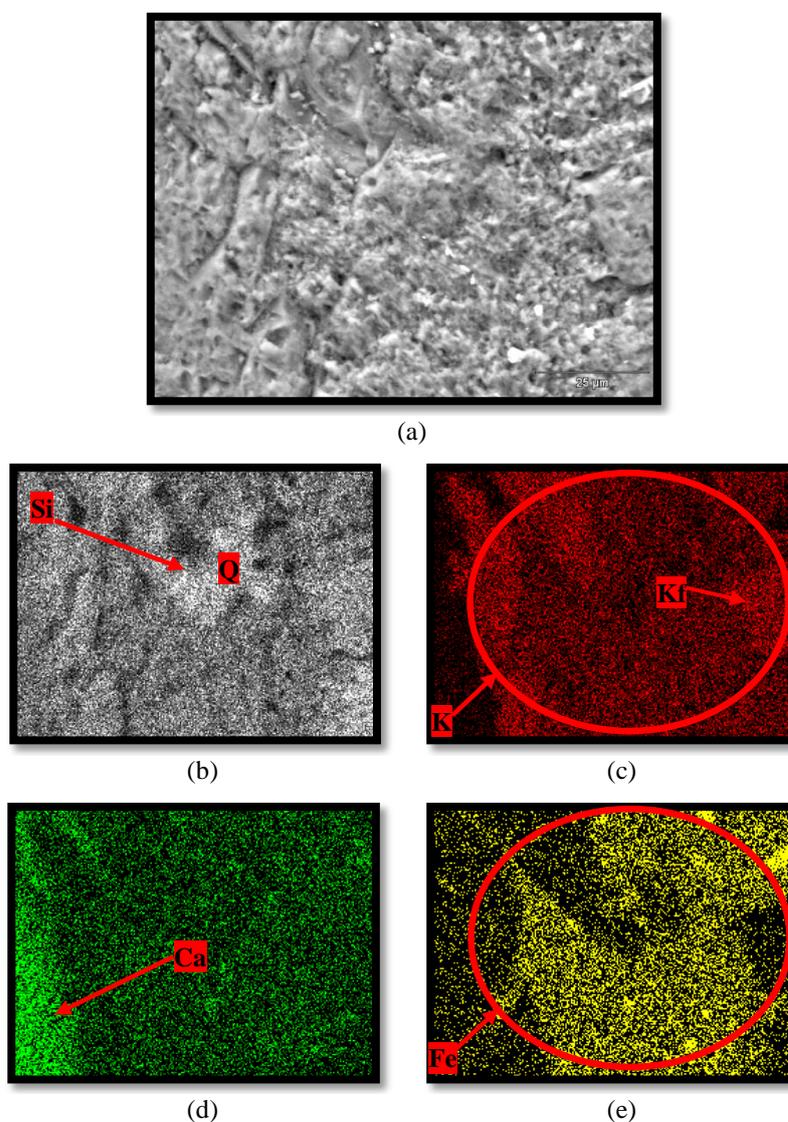
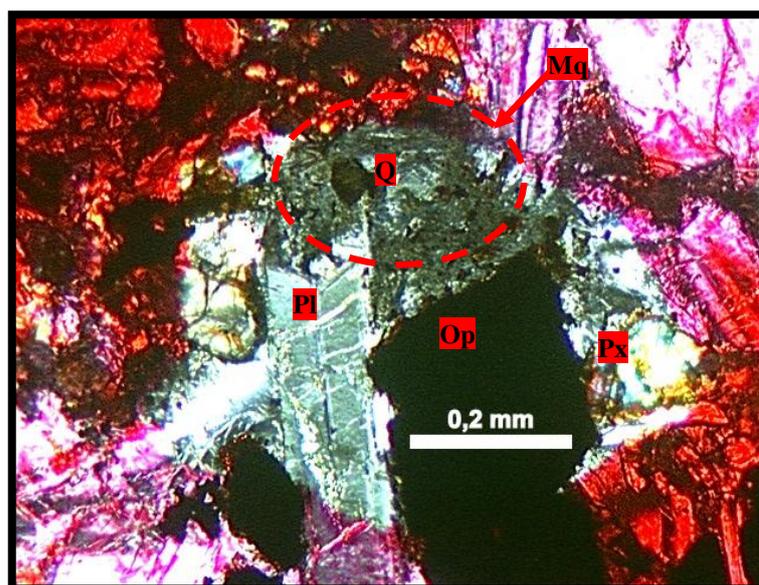


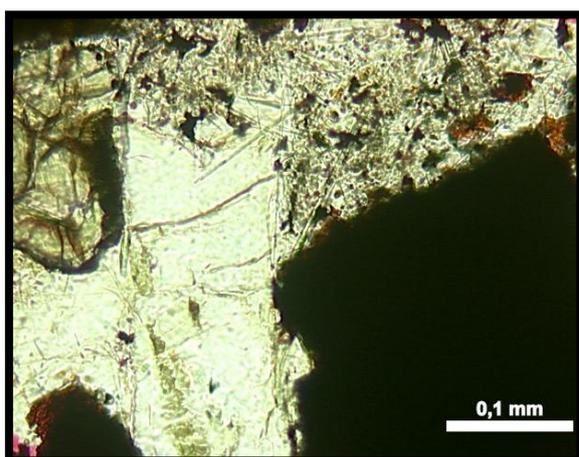
Figura 44: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Ma (rocha BEV), onde Q= quartzo, Kf= K-feldspato. (a) micrografia obtida em MEV da mesóstase, ampliação 1200x; (b) mapa identificando o Si; (c) mapa identificando o K; (d) mapa identificando o Ca; (e) mapa identificando o Fe

4.2.3 Mesóstase com grãos visualizáveis (Mq)

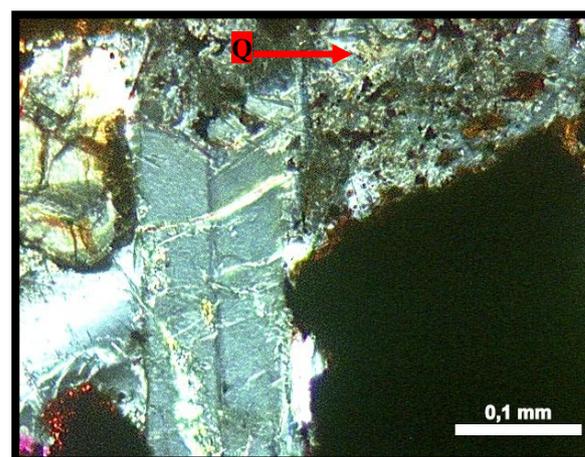
Os interstícios dos grãos preenchidos pela mesóstase do tipo Mq caracterizam-se pela identificação, em microscopia ótica, de grãos de quartzo e K-feldspatos bem cristalizados na mesóstase, em especial o quartzo. Sendo assim, através da seleção de diversas regiões contendo esse tipo de mesóstase foi possível realizar análises mais detalhadas em MEV e EDS. A figura 45 ilustra uma região contendo mesóstase Mq no riolito RPF, a qual é representativa de todo o grupo estudado (BEV e RPF).



(a)



(b)



(c)

Figura 45: micrografias em microscopia ótica de uma região contendo mesóstase Mq na rocha RPF, onde: Mq= mesóstase com grãos visualizáveis em microscopia ótica, Px= piroxênio; Q= quartzo; Pl= plagioclásio; Op= óxido de ferro (mineral opaco). (a) região selecionada para análise contendo mesóstase Mq, polarizador cruzado, ampliação 10x; (b) e (c) detalhe da mesóstase Mq, luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x

Imagens obtidas em MEV por elétrons retroespalhados mostram que nessa condição a mesóstase Mq possui aspecto semelhante ao da mesóstase Mm, conforme pode ser observado através da figura 46. Sua composição química também é quartzo-feldspática, assim como na mesóstase Mm. As análises através de EDS corroboram com essa afirmação. Contudo, cabe salientar que nessa mesóstase os grãos são maiores e melhor cristalizados, sendo possível vizualizá-los em microscopia ótica.

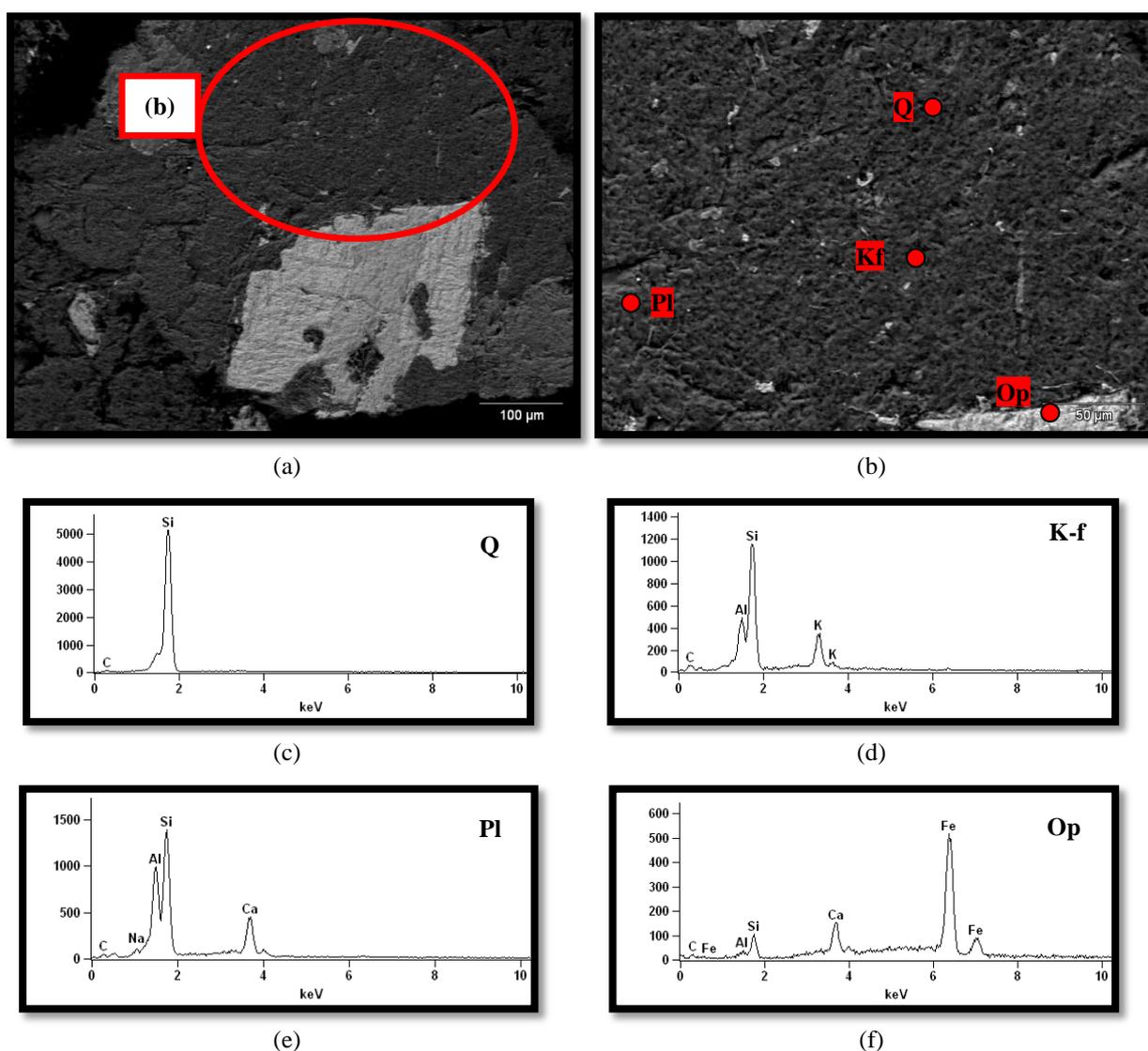


Figura 46: presença grãos bem cristalizados na mesóstase Mq (rocha RPF), onde Mq= mesóstase com microgrãos visíveis em microscopia ótica, Q= quartzo, K-f= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Op= óxido de Fe (mineral opaco). (a) micrografia obtida através de MEV, ampliação 80x; (b) micrografia obtida em MEV mostrando detalhe da mesóstase Mq, ampliação 500x; (c) (d) (e) (f) espectros obtidos por EDS do quartzo, K-feldspato, plagioclásio e opaco

Ao mapear os compostos químicos presentes na região da mesóstase Mq, verificou-se que o Si e o K estão distribuídos de forma homogênea em toda a mesóstase (assim como na mesóstase Mm), porém, nos locais onde os grãos de quartzo ou K-feldspatos estão melhor cristalizados, há maior concentração de Si, no caso do quartzo ou de K, para o K-feldspato. A figura 47 mostra o mapeamento dos elementos químicos constituintes da região contendo mesóstase Mq apresentada na figura 46 (b).

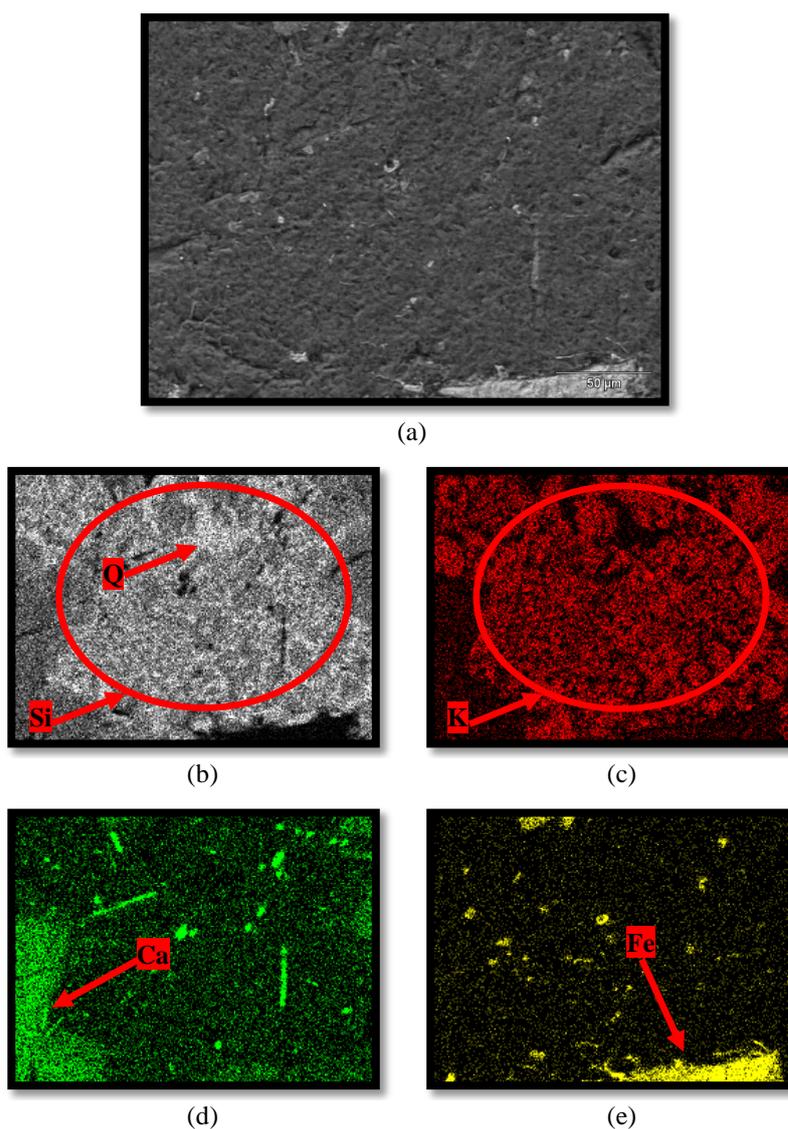


Figura 47: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Mq (rocha RPF), onde Q= quartzo bem cristalizado. (a) micrografia obtida em MEV da região da mesóstase Mq, ampliação 500x; (b) mapa identificando a localização do Si; (c) mapa identificando a localização do K; (d) mapa identificando a localização do Ca; (e) mapa identificando a localização do Fe

4.3 AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA

As rochas vulcânicas selecionadas para este estudo foram avaliadas quanto ao seu potencial de expansão e dissolução de sílica. Os resultados obtidos mostraram-se importantes para correlacionar as características da cristalinidade do quartzo presente nessas rochas (especialmente o quartzo da mesóstase) com o seu potencial reativo.

4.3.1 Avaliação do potencial de expansão

Para avaliar o potencial de expansão das rochas vulcânicas BEV e RPF selecionadas para o presente estudo realizou-se o ensaio acelerado de expansão das barras de argamassa. A figura 48 apresenta as expansões ao longo do tempo de ambas as rochas, mostrando que são potencialmente reativas aos álcalis segundo a classificação da NBR 15577-1, ensaiando pela Parte 4, que estabelece que um agregado é potencialmente reativo quando as expansões forem superiores a 0,19% aos 30 dias.

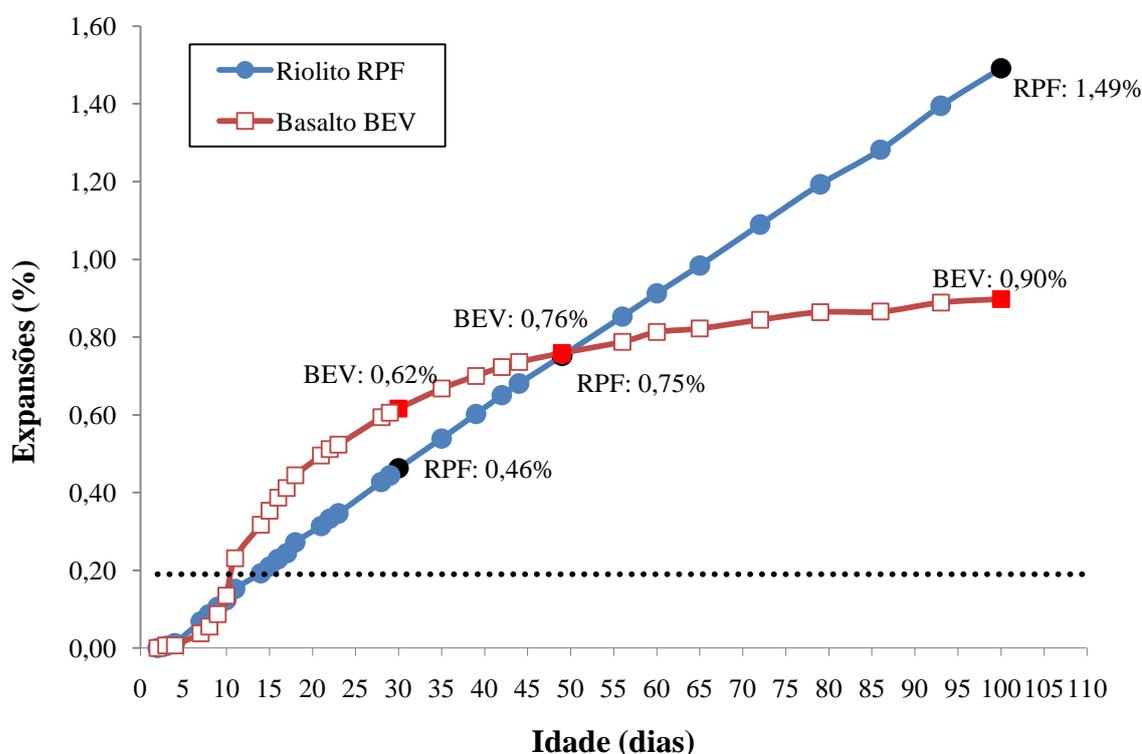


Figura 48: expansão das rochas vulcânicas ao longo do tempo (ensaio NBR 15577-4)

Apesar de ambas as rochas terem sido classificadas como potencialmente reativas, através da figura 48, verifica-se que o basalto resultou em expansões 26% superiores aos 30 dias de ensaio (BEV= 0,62%; RPF= 0,46%), porém, com o passar do tempo, as expansões da rocha basáltica mostraram tendência de estabilização. Aos 50 dias, tornaram-se praticamente idênticas às expansões do riolito (BEV= 0,76%; RPF= 0,75%). As leituras prosseguiram até os 100 dias e, ao final do ensaio, as expansões do riolito superaram em 65% as expansões do basalto (BEV= 0,90%; RPF= 1,49%).

Valduga (2007) e Couto (2008), entre outros autores, observaram o mesmo comportamento deste estudo para agregados basálticos no ensaio acelerado de expansão, ou seja, uma expansão intensa no início do ensaio, com tendência a estabilização por volta dos 30 dias.

Considerando-se as taxas médias de expansão, percebe-se nitidamente a tendência de estabilização das expansões do basalto BEV, pois até os 30 dias essa taxa foi de 0,21% e, dos 30 aos 100 dias caiu para 0,04%. Por sua vez, o riolito manteve a mesma taxa de expansão do início ao fim do ensaio, que foi de 0,15%.

Os basaltos mostram-se bastante sensíveis aos ensaios acelerados de expansão. Diversos autores vem comprovando essa constatação, tais como Batic *et al.* (1994), Korkanç e Tuğrul (2005), Tiecher (2006) e Valduga (2006). Entretanto, são raros os casos registrados na literatura de estruturas de concreto construídas com basalto e que apresentam RAA. Os ensaios com prismas de concreto, cuja condição de avaliação é menos agressiva, também não apontam potencialidade reativa para os basaltos, como mostram os estudos de Couto (2008), Sanchez (2008) e Lukschová *et al.* (2009).

Isso chama atenção para o fato que para as rochas vulcânicas básicas os ensaios acelerados de expansão, tais como o ensaio da NBR 15577-4 (empregado neste estudo), sejam muito agressivos, o que acaba por indicar reatividade para rochas que, na prática, podem não desenvolver RAA.

Analisando-se o comportamento das expansões da rocha basáltica ao longo do tempo, e as análises dos itens 4.1 e 4.2 (especialmente tabela 8), verifica-se que a sílica **livre** constituinte da rocha basáltica (quartzo com cristalinidade baixa) encontra-se somente na mesóstase, especialmente na mesóstases Mm. Considerando-se que quartzo e K-feldspatos não fazem parte da mineralogia característica dos basaltos, nessa rocha a mesóstase Mm denota uma

condição bastante instável à matriz. Por isso, quando o fluido alcalino entra em contato com a mesóstase no basalto a reação ocorre fácil, rápida e intensamente, porém, como a quantidade de sílica livre disponível é pequena, logo a RAA se estabiliza (cessa). O fato de moer a rocha com o intuito de obter granulometria de areia para realização do ensaio acelerado também disponibiliza mais o quartzo da mesóstase, influenciando para sua rápida dissolução, o que não ocorre nos ensaios realizados com concreto, por exemplo.

Já no riolito, quartzo e K-feldspatos fazem parte da mineralogia principal da rocha, a única diferença é que na mesóstase encontram-se na dimensão microcristalina. Dessa forma, pode-se dizer que no riolito a mesóstase está numa condição mais ‘equilibrada’ com o meio e, por isso, quando a rocha entra em contato com os hidróxidos alcalinos, estes reagem tanto com o quartzo constituinte da mesóstase, quanto com o quartzo bem cristalizado da matriz ao longo do tempo e mais lentamente. A ocorrência da mesma taxa de expansão do início ao fim do ensaio da NBR 15577-4 indica justamente esse mecanismo de ataque à matriz riolítica. A menor taxa de expansão verificada no ensaio acelerado para o riolito, em relação ao basalto, também pode ser justificada pela condição estável que se encontra o quartzo constituinte da mesóstase no riolito, ou seja, os constituintes da mesóstase no riolito estão menos propensos a reagir que no basalto, pois se encontram em equilíbrio com o restante da matriz. De qualquer maneira, por se tratar de uma rocha ácida (grande quantidade de quartzo) de granulação fina, quando sujeito a uma condição de elevada alcalinidade, o riolito tende a causar maiores expansões que o basalto ao longo do tempo.

Na literatura alguns autores chamam atenção para o potencial reativo dos riolitos, dentre eles cita-se Gillot *et al.* (1973), Marfil e Maiza (2001), Katayama *et al.* (2004), Read (2008) e Lukschová *et al.* (2009) que observaram **em campo** a reatividade de agregados riolíticos.

4.3.2 Avaliação do potencial de dissolução de sílica

O potencial de dissolução de sílica das rochas vulcânicas está intimamente relacionado ao seu potencial de desenvolvimento da RAA no concreto. Entretanto, muitas vezes os métodos utilizados para medir a dissolução de sílica não permitem estabelecer esta relação.

Por esse motivo a NBR 9774/1997, que estabelecia relação entre o potencial de dissolução de sílica e redução da alcalinidade das rochas com seu potencial reativo, foi cancelada. Ocorre é

que os limites para classificar a potencialidade reativa dos agregados da referida norma não eram condizentes com as situações observadas por outras técnicas de avaliação e mesmo em campo (WIGUN *et al.*, 1997; HASPARYK, 1999; VALDUGA, 2002; OWSIAK, 2007).

Conforme o que foi relatado no capítulo 3 (item 3.3.5), o método prescrito pela NBR 9774/1987 é o mesmo da norma americana ASTM C 289/1994. Rolim *et al.* (2009) mostraram que nem a alteração das idades prescritas pelo método da ASTM C 289 para exposição do agregado à solução alcalina e posterior avaliação da sílica dissolvida e redução de alcalinidade são eficazes para que o método químico torne-se confiável para classificação do potencial reativo dos agregados. Por isso, no presente estudo, tal método de ensaio foi empregado com o intuito **principal** de avaliar a dissolução do quartzo das rochas vulcânicas, relacionando essa dissolução à sua cristalinidade dentro da mesóstase, sem considerar a redução da alcalinidade.

A figura 49 apresenta o gráfico utilizado para classificar o potencial de reatividade dos agregados pela ASTM C 289, onde é possível perceber que tanto o basalto BEV quanto o riolito RPF classificam-se como potencialmente inócuos. Isso também foi constatado utilizando-se a curva de reatividade proposta por Couto (2008) para este ensaio.

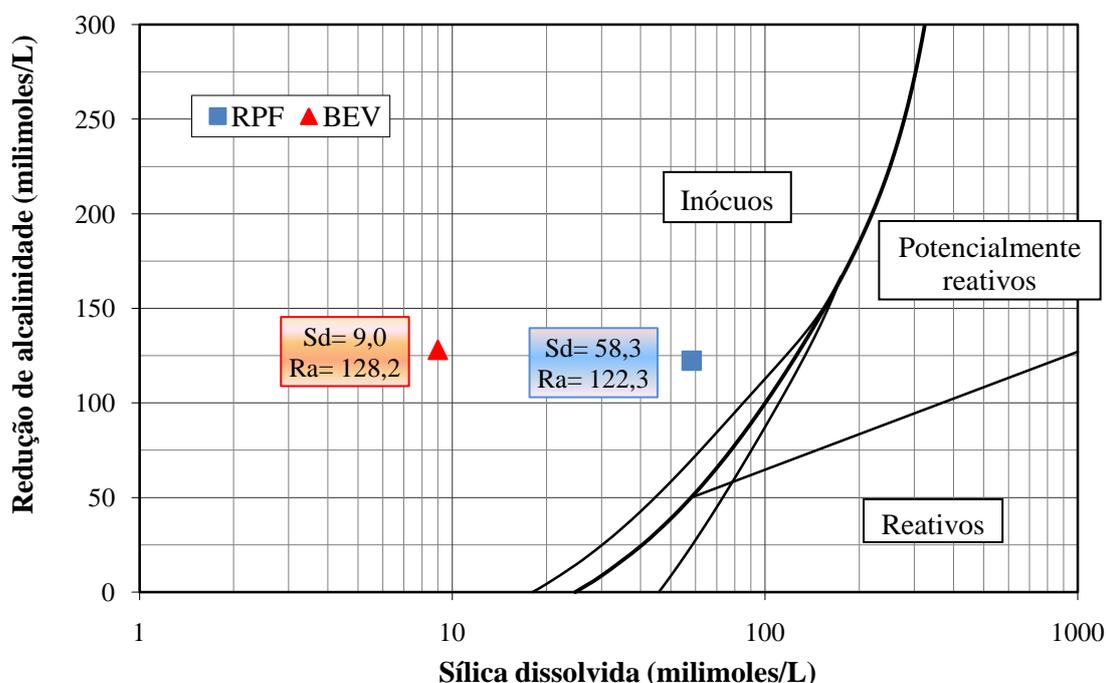


Figura 49: sílica dissolvida (Sd) x redução da alcalinidade (Ra) do basalto BEV e do riolito RPF (ASTM C 289)

Desconsiderando-se os limites classificatórios de dissolução impostos pelo método ASTM C 289 apresentados na figura 49 e analisando-se os valores absolutos obtidos, verifica-se que a principal diferença entre as rochas BEV e RPF é a dissolução de sílica, já que a redução da alcalinidade da solução foi muito semelhante para ambas as rochas. Em relação à dissolução de sílica, observa-se que enquanto para a rocha BEV a dissolução foi de 9,0 milimoles/L (39,7 μ g/mL), na rocha RPF foi de 58,3 milimoles/L (257,0 μ g/mL), ou seja, para RPF é aproximadamente 85% superior.

Realizando-se um comparativo entre o percentual de sílica presente nas rochas BEV e RPF, e o percentual de sílica livre, representada pelo quartzo constituente das rochas e dos diferentes tipos de mesóstase, conforme tabela 09, é possível observar que o riolito possui quantidades maiores tanto de quartzo bem cristalizado, quanto de mesóstase quartzofeldspática (Mm e Mq, conforme item 4.2).

Tabela 09: sílica livre constituinte das rochas BEV e RPF

Amostras	SiO ₂ – FRX (%)	Quartzo (%)	Mm (%)	Ma (%)	Mq (%)
BEV	50,04	-	7,7	5,5	3,6
RPF	67,98	23,1	16,1	5,0	6,1

A partir do que pode ser observado na tabela 9 pode-se dizer que a dissolução de sílica medida foi proporcional à quantidade de sílica livre disponível em ambas as rochas. RPF possui, aproximadamente, 75% mais sílica livre do que BEV. Esse percentual foi obtido considerando-se que a **sílica livre** na rocha BEV corresponde, basicamente, às mesóstases Mm (7,7%) e Mq (3,6%), já que na mesóstase Ma predominam argilominerais. Da mesma maneira ocorre para a rocha RPF, somando-se a mesóstase Mm (16,1%), Mq (6,1%) e o quartzo da matriz (23,1%).

Segundo o que foi observado no ensaio acelerado de expansão da NBR 15577-4 (item 4.3.1) o potencial de expansão do riolito RPF é bastante superior ao do basalto BEV em idade mais avançada. Considerando-se **os percentuais de sílica dissolvida** do ensaio da ASTM C 289, constata-se que a rocha RPF possui potencial de reatividade bem superior ao basalto BEV.

A quantidade de sílica dissolvida pelas rochas BEV e RPF também foi avaliada através do método de determinação de sílica em meio alcalino pelo espectrofotômetro visível

normalizado pela NBR 9848 (figura 50). Para tanto foi empregada a solução utilizada para imersão das amostras vulcânicas no ensaio da ASTM C 289, conforme descrito no item 3.3.4.

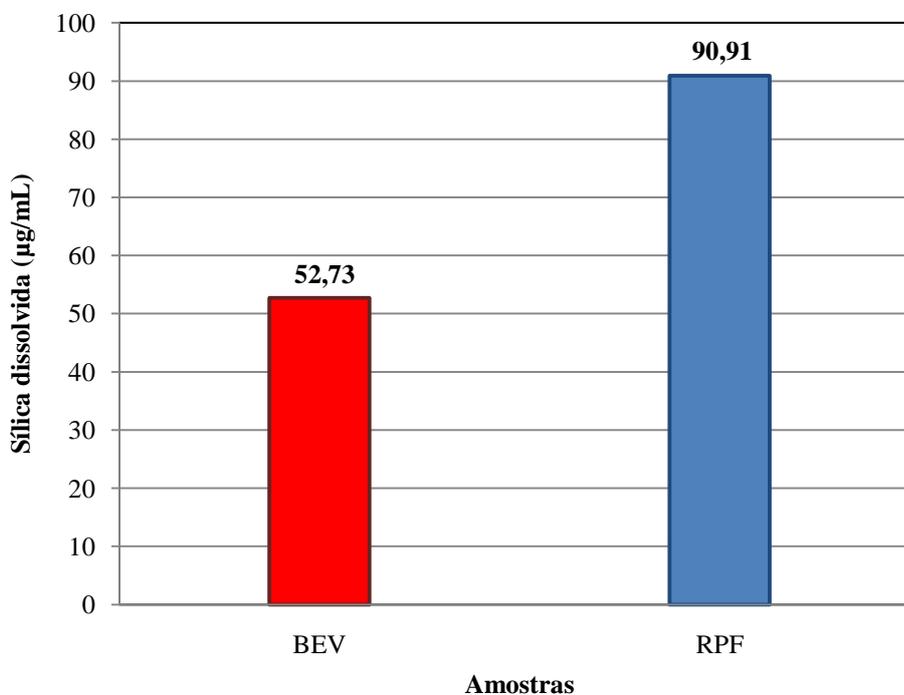


Figura 50: sílica dissolvida no basalto BEV e no riolito RPF (ensaio NBR 9848)

O método espectrofotométrico (NBR 9848) também mostrou que a quantidade de sílica dissolvida no riolito RPF é maior que no basalto BEV, corroborando com os resultados do ensaio da ASTM C 289 e da NBR 15577-4. Entretanto, cabe salientar que a dissolução de sílica medida através do ensaio da NBR 9848 não pode ser diretamente correlacionada com o potencial de reatividade das rochas e nem com a sílica dissolvida pelo método da ASTM C 289, já que para isso seria necessário um estudo mais amplo, com maior número de rochas.

As diferenças nas concentrações de sílica medidas pelos dois métodos ocorrem em função dos diferentes princípios de medição de ambos. O método da ASTM C 289 mede a concentração de sílica dissolvida pela diferença de massa da amostra antes e após o ataque alcalino. Já no método da NBR 9848 a concentração de sílica é medida na solução utilizada para o ataque químico. Trata-se de um método indireto, que relaciona a concentração de sílica com a coloração resultante da reação do molibdato de amônio com a solução alcalina.

De qualquer forma, o ensaio da NBR 9848 ajuda no entendimento a respeito da dissolução de sílica, indicando, mais uma vez, que nas **rochas vulcânicas** o potencial de reatividade está

relacionado à quantidade de **sílica livre** presente, ou seja, quanto maior a quantidade de sílica livre (quartzo livre e quartzo com baixa cristalinidade nas mesóstases Mm e Mq), maior o potencial de dissolução e por consequência de desenvolvimento da RAA.

4.3.2.1 Avaliação da dissolução na argamassa

Uma análise complementar para justificar que a dissolução de sílica no basalto se dá pela dissolução do quartzo das mesóstases Mm e Mq pode ser observada através da figura 51, onde se apresentam imagens através de microscopia ótica de um dos fragmentos de argamassa moldados com a rocha basáltica após o ensaio da NBR 15577-4.

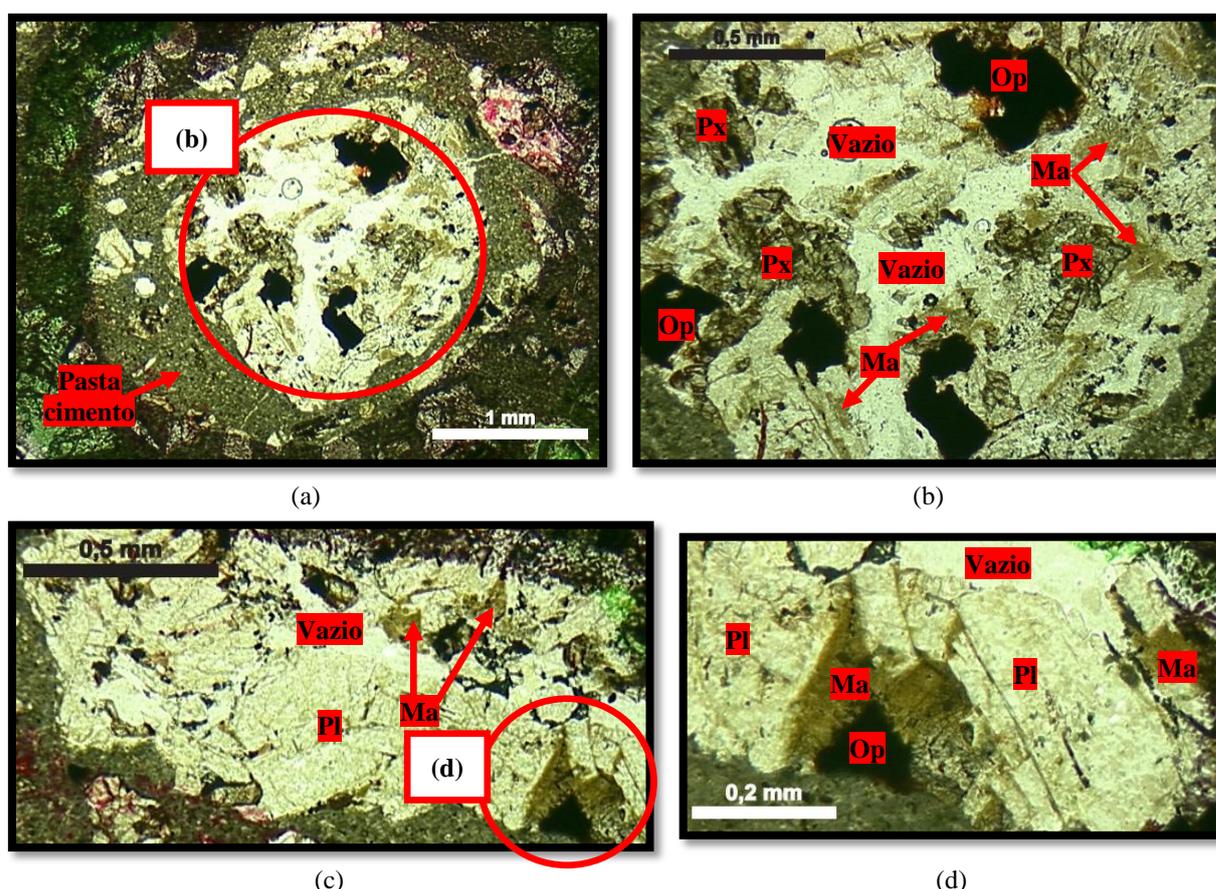


Figura 51: dissolução das mesóstases Mm e Mq na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, Px= piroxênio, Op= mineral opaco, Pl= plagioclásio. (a) (c) micrografias obtidas em microscopia ótica sob luz natural da rocha BEV mostrando vazios deixados pelo gel da RAA e presença de mesóstase Ma, ampliação 2,5x e 5x; (b) (d) micrografias obtidas em microscopia ótica sob luz natural mostrando detalhes das regiões com mesóstase Ma e vazios, ampliação 5x e 10x

Através de MEV com auxílio de EDS é possível identificar os argilominerais (esmectita) no fragmento de rocha imerso em argamassa e observar os caminhos de percolação do gel devido a RAA, notando-se fissuração do grão de rocha devido à expansão (figura 52).

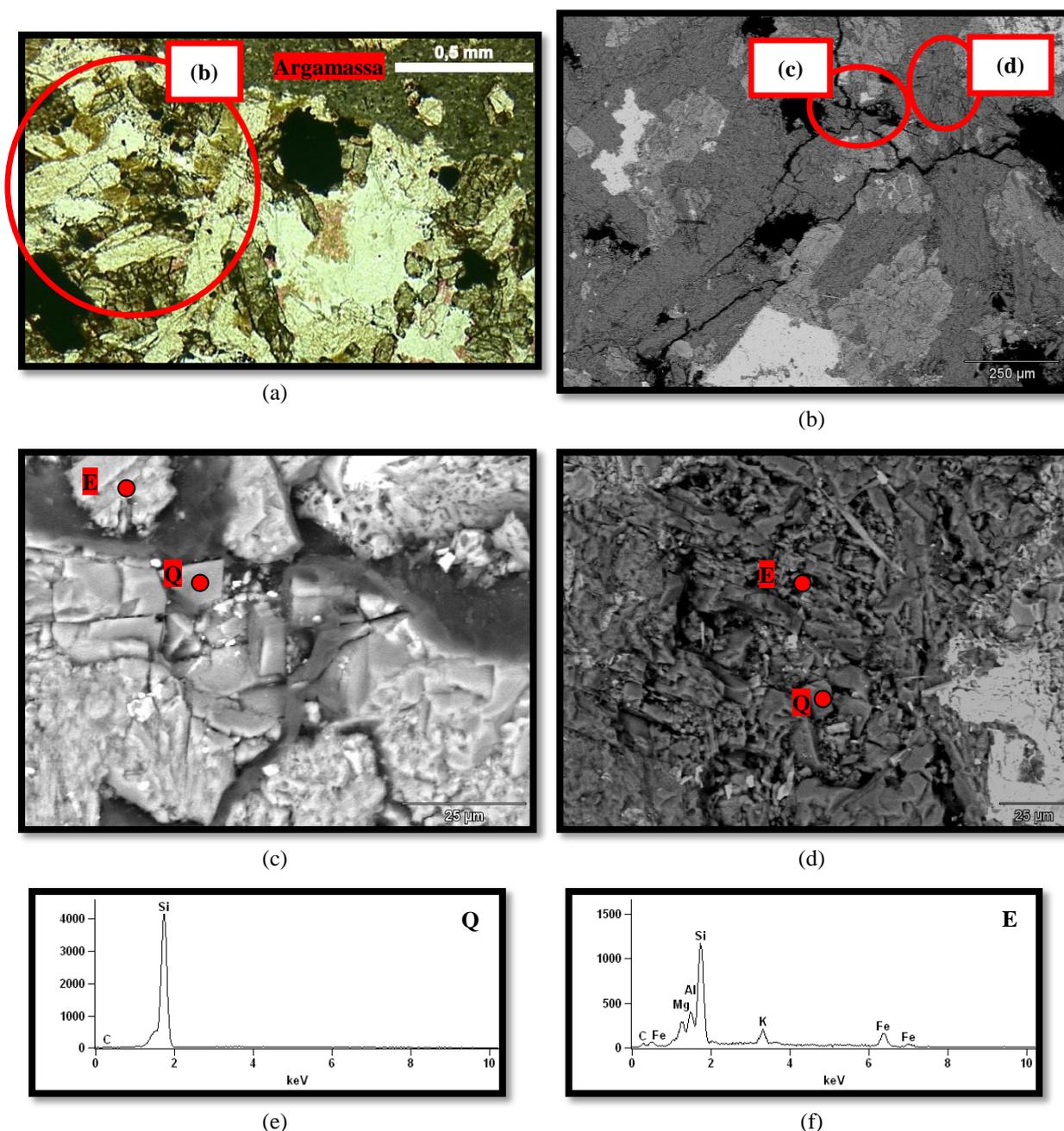


Figura 52: mesóstase Ma na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Ma= mesóstase com predomínio de argilominerais, E= esmectita, Q= quartzo. (a) micrografia obtida em microscopia ótica sob luz natural da rocha mostrando vazios deixados pelo gel da RAA e presença de mesóstase Ma, ampliação 5x; (b) (c) (d) micrografias obtidas em MEV detalhando a presença de grãos de quartzo e esmectitas na mesóstase Ma, ampliação 100x, 1300x e 700x; (e) (f) espectros obtidos por EDS dos grãos de quartzo e esmectita, respectivamente

As mesóstases Mm e Mq, cuja constituição é, essencialmente, quartzo-feldspática, encontram-se em quantidade muito pequena nos grãos de rocha imersos na argamassa após o ensaio acelerado, o que indica que a dissolução dessa mesóstase foi bastante intensa. Contudo, ainda foi possível identificar, através das análises por MEV e EDS, alguns grãos de quartzo não dissolvidos pela reação com os hidróxidos alcalinos durante o ensaio da NBR 15577-4, conforme expõem as figuras 52 (c) e (d). Isso também pode ser constatado através da figura 53, que mostra o mapeamento dos elementos químicos na mesóstase Ma apresentada na figura 52 (d).

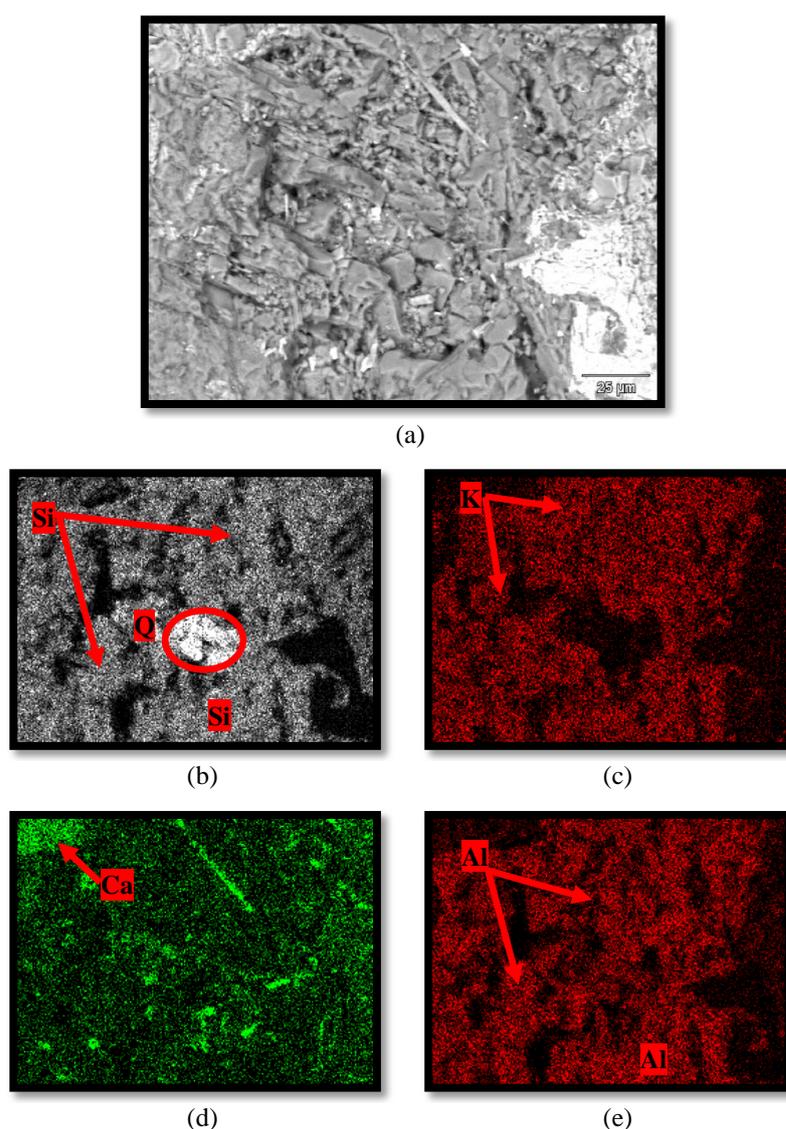


Figura 53: mapeamento dos elementos químicos presentes na mesóstase Ma contida em rocha imersa na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo bem cristalizado. (a) micrografia obtida em MEV da região da mesóstase Ma, ampliação 700x; (b) mapa identificando a localização do Si; (c) mapa identificando a localização do K; (d) mapa identificando a localização do Ca; (e) mapa identificando a localização do Al

O mapeamento dos elementos apresentado na figura 53 mostra que, na mesóstase Ma presente na argamassa que sofreu ataque alcalino, prevalecem os argilominerais, mas há uma região com grãos de quartzo bem cristalizados preservados. Raros grãos de quartzo também puderam ser identificados próximos a regiões ocupadas pelo gel, tais como em poros da argamassa. A figura 54 registra essa situação, mostrando, ainda, que boa parte do gel dissolve-se na solução utilizada para o ensaio da NBR 15577-4, restando, por exemplo, pequenas quantidades nas bordas do poro (figura 54 (a)).

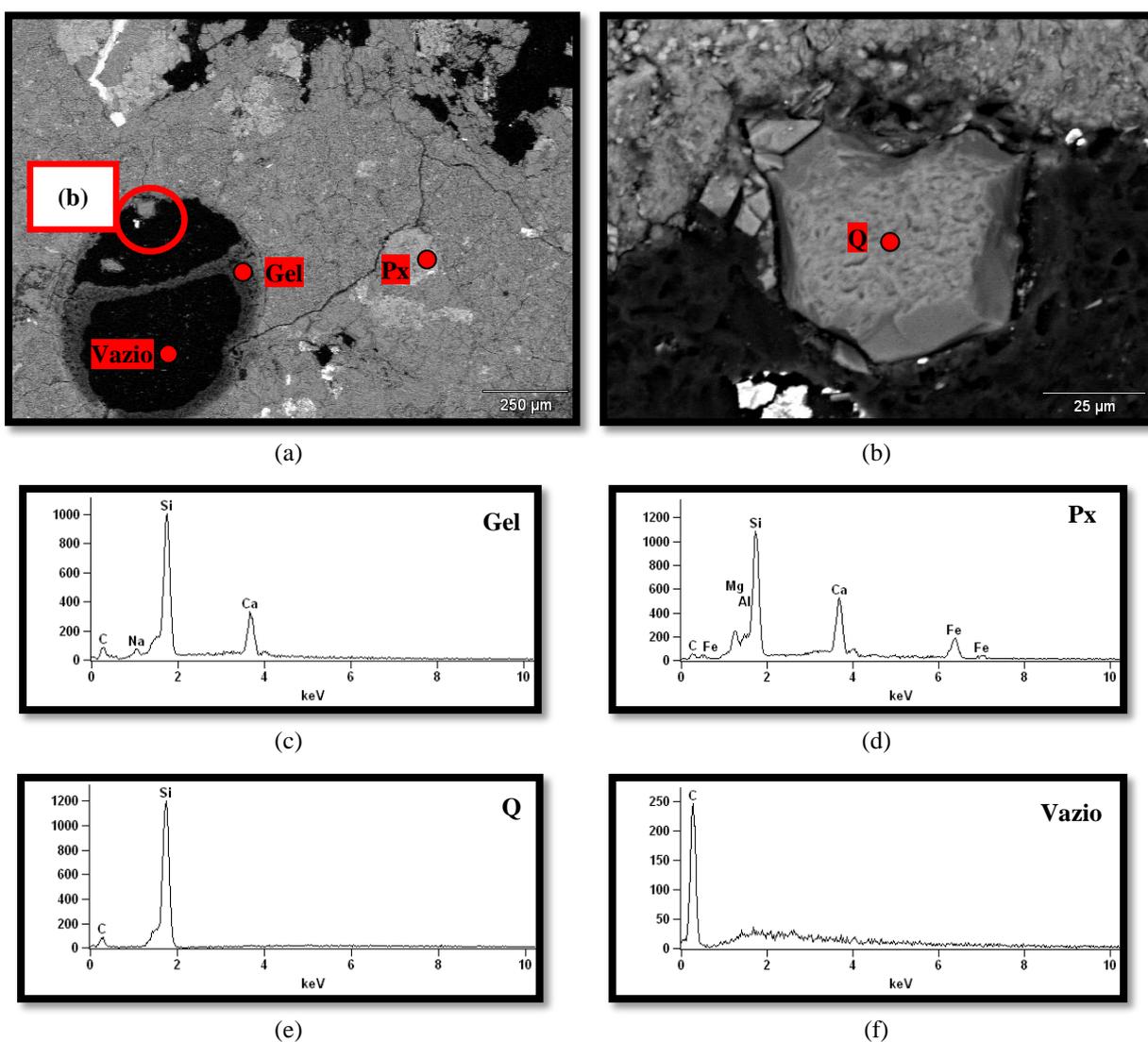


Figura 54: presença de grãos de quartzo nos poros da argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Px= piroxênio, Q= quartzo bem cristalizado. (a) micrografia obtida em MEV do poro da argamassa, ampliação 80x; (b) micrografia obtida em MEV do grão de quartzo presente no poro, ampliação 1000x; (c) (d) (e) (f) espectros obtidos por EDS do gel da RAA, do piroxênio, do quartzo e da região vazia

O fato de grãos de quartzo disseminados na mesóstase Ma não dissolverem após o ataque químico indica que, possivelmente, os argilominerais protegem esses grãos do ataque alcalino, o que é chamado de ‘efeito armadura’ por Garrels e Mackenzie (1971). Estes autores também discorrem a respeito da seletividade dos fluidos na reação que leva à dissolução dos minerais nas rochas, dizendo que na natureza os fluidos reagem primeiramente com os minerais mais facilmente ‘dissolúveis’, ou seja, um fluido ácido, reage antes com os feldspatos, por exemplo, e um fluido alcalino com o quartzo.

A constatação que a presença da mesóstase Ma prevaleceu sobre Mm e Mq indica que o fluido alcalino utilizado para o ensaio acelerado da NBR15577-4 dissolveu primeiramente a sílica livre presente nessas mesóstases. Assim, pode-se dizer que Ma é menos suscetível a esse ataque que as demais mesóstases, ou seja, contribuiu menos para a ocorrência da RAA no referido ensaio (menor dissolução). A tabela 10 permite quantificar o potencial de dissolução das mesóstases das rochas imersas na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, após a idade de 100 dias, ou seja, quando as barras foram retiradas da solução alcalina.

Tabela 10: análise modal por microscopia ótica das rochas vulcânicas antes e após o ensaio da NBR 15577-4

Mineral	Basalto BEV (%)			Riolito RPF (%)		
	Rocha pura	Argamassa	Redução	Rocha pura	Argamassa	Redução
Quartzo	-	-	-	23,7	11,8	50,2
K-feldspato	-	-	-	19,9	17,4	12,6
Plagioclásio	43,4	36,5	16,0	18,2	18,8	-
Piroxênio	35,2	21,0	40,0	7,7	6,8	11,7
Mesóstase Mm	7,7	2,0	74,0	16,1	3,8	76,4
Mesóstase Ma	5,5	5,3	3,6	5,0	5,0	-
Mesóstase Mq	3,6	0,3	91,7	6,1	1,0	83,6
Opacos	4,6	4,4	4,3	3,2	3,0	6,2
Vazio	-	23,5	-	-	32,4	-
TOTAL	100	100	-	100	100	

Os resultados apresentados na tabela 10 corroboram com as observações feitas através de microscopia ótica, que mostraram que as mesóstases Mm e Mq foram mais suscetíveis ao ataque alcalino, apresentando maior dissolução. No basalto BEV, 74% da mesóstase Mm se dissolveu, para Mq a dissolução foi de 91,7%. Segundo o que foi visto anteriormente no ensaio acelerado de expansão (figura 47), a partir de 30 dias de ensaio, as expansões da rocha

BEV começaram a se estabilizar, o que, segundo o que pode ser constatado na tabela 10, se deve ao esgotamento da **sílica livre** disponível para reação.

Para o riolito RPF a análise modal mostra que 76,4% da mesóstase Mm foi dissolvida e 83,6% de Mq (tabela 10). Nessa rocha deve ser levado em conta o percentual de dissolução do quartzo bem cristalizado que constitui a matriz. Para esse mineral a dissolução foi de 50,2%, ou seja, o riolito RPF ainda possui aproximadamente 50% do quartzo que não foi dissolvido, o que explica o porque de não ter ocorrido a estabilização das expansões no ensaio acelerado das barras de argamassa mesmo ao 100 dias de exposição à solução alcalina, mantendo-se sempre a mesma taxa de expansão do início ao final do ensaio. No riolito RPF ainda não se esgotou a sílica livre disponível para a reação.

A mesóstase Ma sofreu menor dissolução para ambas as rochas. No basalto BEV foi de 4% e no riolito RPF não foi observada dissolução. O percentual de dissolução observado para o basalto é semelhante ao encontrado por Edwards e Russel (1996) para alguns argilominerais. Os autores avaliaram a dissolução de silicatos em diversos pH e verificaram 5% de dissolução para os argilominerais após a exposição durante 100 dias em pH de 12 e temperatura de 25°C.

De qualquer maneira, os resultados a respeito da dissolução da mesóstase Ma, que contém predominantemente esmectitas, não estão de acordo com o que a literatura vem relatando a respeito da dissolução desses argilominerais e sua contribuição para a RAA (GRATTAN-BELLEW; BEAUDOIN, 1980; WAKIZAKA, 2000; ELERT *et al.*, 2008).

Aparentemente o que ocorre é que as condições agressivas do ensaio acelerado propiciam a intensa dissolução da sílica mais disponível nas rochas BEV e RPF, constituinte das mesóstases Mm e Mq e, no caso de RPF, do quartzo bem cristalizado. O quartzo presente na mesóstase Ma fica protegido pelos argilominerais que, diante da fácil disponibilidade da sílica das demais mesóstases e/ou quartzo bem cristalizado, ‘perdem a importância’ na escala de dissolução. Entretanto, acredita-se que, num segundo momento, sob as condições agressivas que o ensaio da NBR 15577-4 impõe, ocorrerá a dissolução da mesóstase Ma.

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Conforme o que pôde ser verificado, os resultados apresentados até o presente momento mostram o comportamento de rochas vulcânicas potencialmente reativas aos hidróxidos

alcalinos. Essa afirmação baseia-se nas características petrográficas das rochas BEV e RPF, bem como nos resultados do ensaio acelerado da ASTM C 15577-4 e também, na intensa dissolução de sílica de ambas (proveniente, **principalmente**, do quartzo mal cristalizado presente na mesóstase).

Por isso, a fim de comparar as características das rochas vulcânicas selecionadas para o estudo com as características de uma rocha vulcânica potencialmente inócua no ensaio acelerado da ASTM C 15577-4 e em campo e, desta maneira, validar os resultados obtidos neste trabalho, foi selecionado, a partir dos resultados de Couto (2008), o basalto (BNRG) oriundo do sul do estado de Goiás. As expansões dessa rocha foram inferiores a 0,10% aos 30 dias.

A figura 55 mostra o aspecto da amostra sob microscopia ótica onde é possível constatar que a amostra é hipocristalina e possui granulação fina, sendo constituída por plagioclásio (39,3%), piroxênio (22,7%), argilominerais (24,8%), Ti-magnetita (1,7%), vidro vulcânico (2,9%) e mesóstase (8,5%, sendo Mm= 7,7% e Ma= 0,8%), o que corresponde a composição de um basalto.

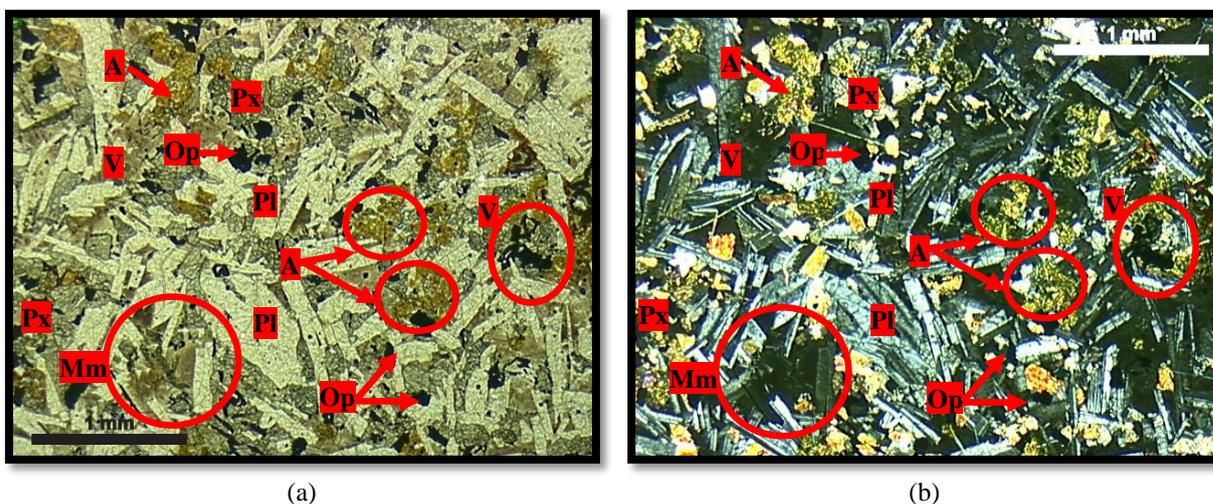


Figura 55: micrografias obtidas em microscopia ótica do basalto não reativo BNRG, onde: Pl= plagioclásio, Px= piroxênio, Op= opaco (óxido de ferro), A= argilomineral, V= vidro vulcânico. (a) luz natural; b) polarizador cruzado. Ampliação 2,5x

Observando-se a mineralogia identificada na amostra BNRG, chama atenção a presença de vidro nos interstícios dos grãos, além da mesóstase Mm. Vidro vulcânico é a constituição **amorfa** (sem cristalização de minerais) oriunda do rápido resfriamento do magma presente nas rochas vulcânicas. Sua composição química é a mesma do restante da rocha, contudo, ao

contrário da mesóstase, o vidro vulcânico não possui minerais microcristalinos em sua composição, ou seja, é um material completamente amorfo.

Através do difratograma da figura 56 foi possível constatar a baixa intensidade dos picos cristalinos presentes na amostra BNRG, o que é uma característica da presença de material amorfo em meio aos cristais. Entretanto, como o percentual de vidro vulcânico é pequeno nessa amostra (em torno de 3%), não se sobressai o halo amorfo, também característico. Além disso, na análise por DRX é identificado quartzo, o qual está presente na mesóstase Mm que também constitui esta rocha.

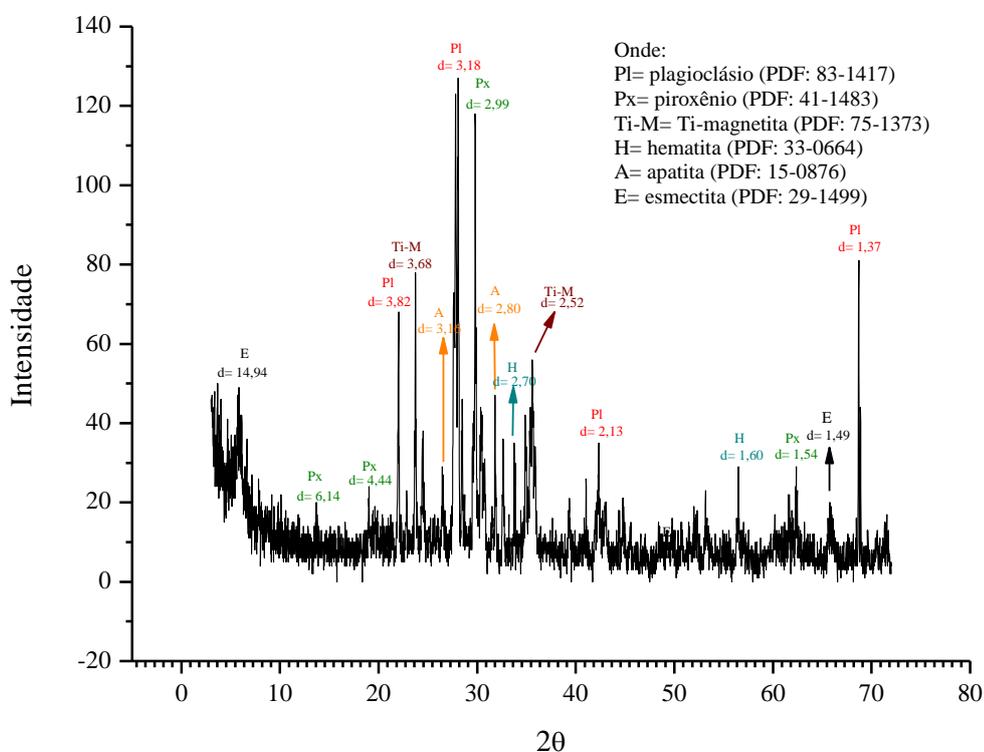


Figura 56: difratograma da amostra BNRG

A figura 57 mostra um comparativo entre os difratogramas das rochas BNRG, BEV e RPF, todos obtidos sob as mesmas condições e apresentados em escalas iguais. Como se trata de rochas vulcânicas fica bastante evidente as diferenças de intensidades dos picos cristalinos nas rochas BEV e RPF, que **não contém** vidro, em relação à rocha BNRG que possui.

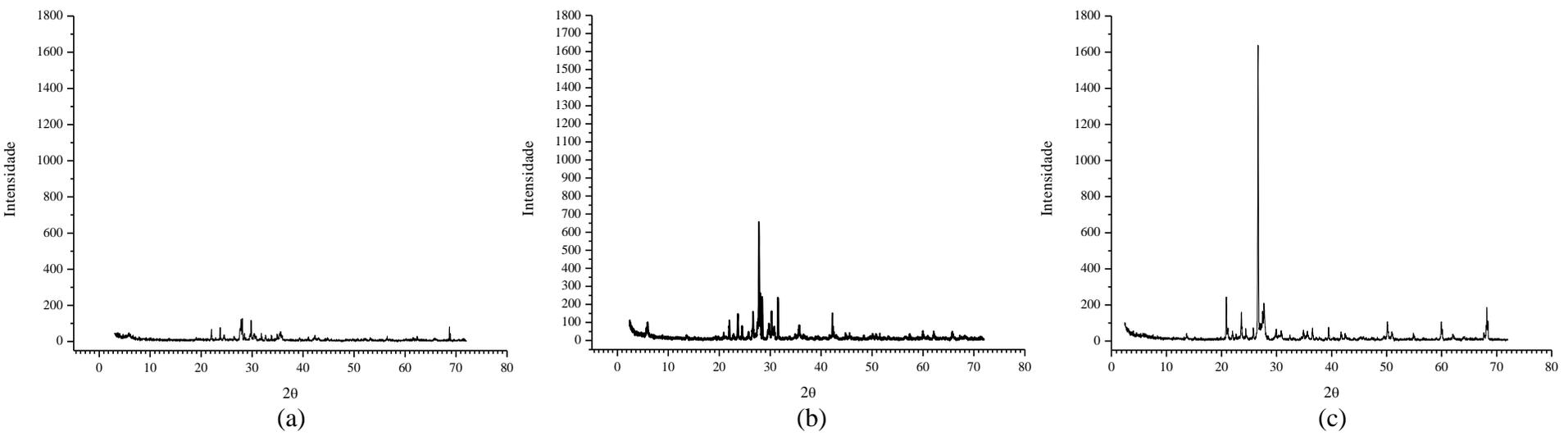


Figura 57: comparativo entre difratogramas das amostras vulcânicas, (a) amostra BNRG; (b) amostra BEV; (c) amostra RPF

A diferenciação entre vidro vulcânico e mesóstase talvez não seja muito importante quando se deseja realizar uma caracterização geral das rochas vulcânicas, já que ambos são materiais intersticiais e que, em microscopia ótica, possuem aspecto parecido. No entanto, quando se trata da análise geoquímica tal diferenciação mostra-se imprescindível, pois são constituições com composições e cristalinidades diferentes.

Conforme o que foi visto, a mesóstase é formada por minerais microcristalinos (especialmente quartzo e K-feldspatos) e argilominerais, podendo apresentar, muitas vezes, grãos bem cristalizados. O vidro, por sua vez, possui a mesma composição química dos minerais principais da rocha, mas esses estão numa condição amorfa (não cristalizada, como ocorre nas mesóstases).

Sendo assim, parece ser importante diferenciar o vidro da mesóstase também para caracterização petrográfica das rochas quanto ao seu potencial reativo, uma vez que ambos (mesóstase e vidro) denotarão em comportamentos reativos diferentes frente à reação com os hidróxidos alcalinos. Por isso, a fim de apresentar essas diferenças, plotaram-se as figuras 58 e 59.

Na figura 58 são apresentadas micrografias obtidas em microscopia ótica do vidro vulcânico e das diferentes mesóstases. Nestas micrografias percebe-se que o vidro vulcânico é um material que ocupa os interstícios dos grãos e, diferentemente das mesóstases Mm, Ma e Mq, quando observado em microscopia ótica, não transmite luz (semelhante aos minerais opacos) tanto sob luz natural quanto em luz polarizada, (figuras 58 (a) e 58 (b)).

Já na figura 59 são apresentadas análises através de MEV e EDS de uma região contendo vidro vulcânico na amostra BNRG, onde é possível observar que o vidro vulcânico da rocha BNRG em MEV denota uma massa densa, aparentemente com pequenos grãos disseminados (figura 59 (d)). No entanto, através da análise por EDS é possível constatar que o vidro é composto pelos mesmos elementos químicos constituintes dos minerais da rocha (Si, Al, Ca, K, Na, Fe, Mg), ou seja, trata-se de plagioclásio e piroxênio de baixa cristalinidade. Apenas nos locais onde a micrografia mostra pontos mais claros observa-se uma concentração maior de Fe e Ti.

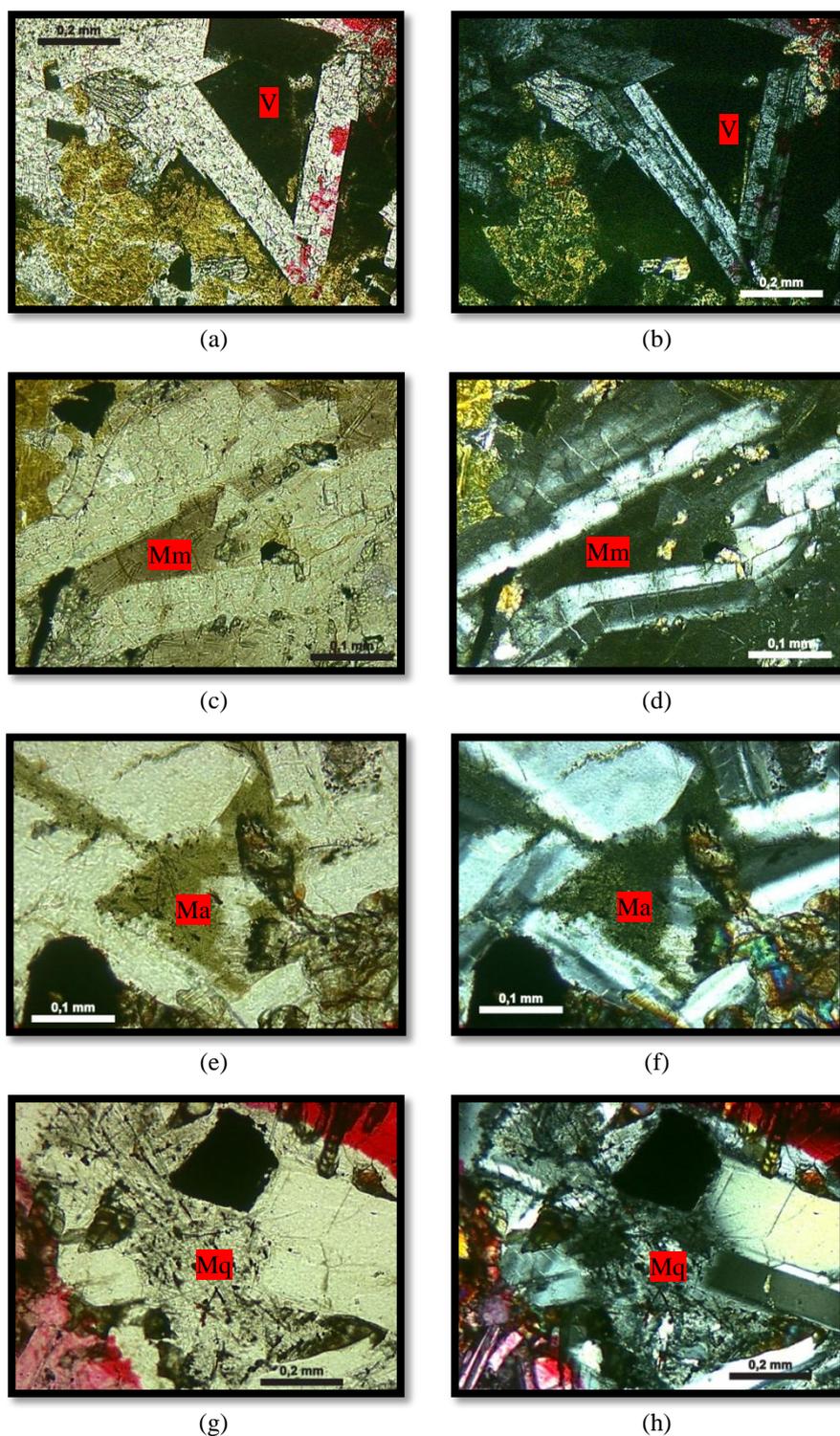


Figura 58: micrografias obtidas em microscopia ótica comparando as mesóstases e o vidro vulcânico, onde: V= vidro vulcânico, Mm= mesóstase com grãos microcristalinos, Ma= mesóstase com predominância de argilominerais, Mq= mesóstase com grãos melhor cristalizados. (a) (b) aspecto do vidro vulcânico sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 10x; (c) (d) aspecto da mesóstase Mm sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x; (e) (f) aspecto da mesóstase Ma sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 20x; (g) (h) aspecto da mesóstase Mq sob luz natural e polarizador cruzado, ampliação 10x

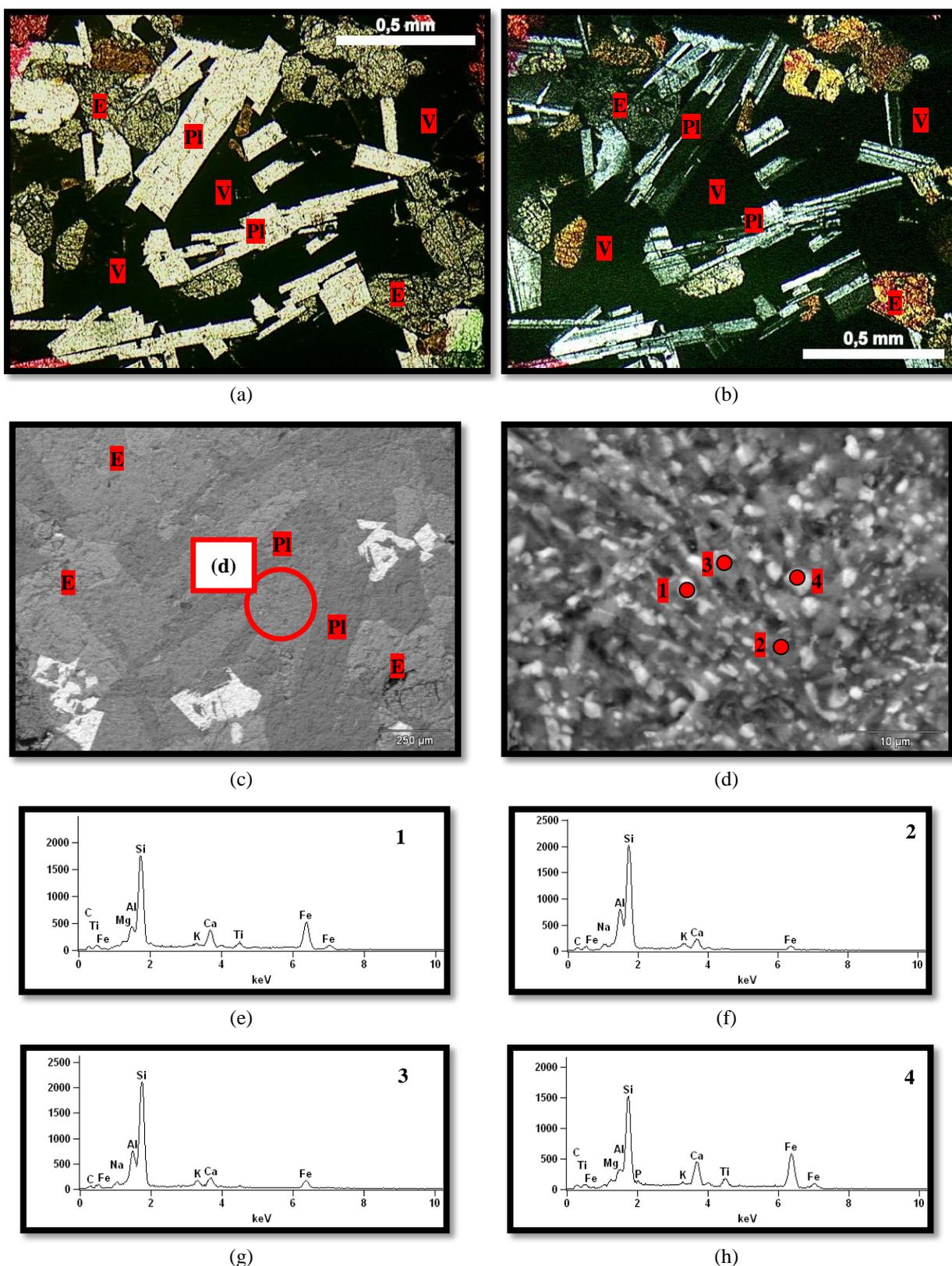


Figura 59: composição química do vidro vulcânico presente na rocha BNRG, onde: V= vidro vulcânico, Pl= plagioclásio, E= esmectita. (a) (b) micrografias obtidas em microscopia ótica sob luz natural e polarizador cruzado de região contendo vidro vulcânico, ampliação 5x; (c) (d) micrografias obtidas em MEV de região contendo vidro vulcânico, ampliação 85x e 3000x; (e) (f) (g) (h) espectros do vidro vulcânico obtidos por EDS

O mapeamento dos elementos químicos na região da micrografia da figura 59 (d) pode ser visualizado na figura 60, a qual legitima o que foi descrito anteriormente a respeito do vidro vulcânico da amostra BNRG, isto é, que o vidro vulcânico é formado pelos mesmos elementos químicos da rocha. Nas mesóstases, conforme mostram as figuras 41, 44 e 47 (item 4.2), há regiões bem distintas ocupadas pelo Si, que representa o quartzo, e pelo K, constituinte do K-feldspato, por exemplo. No vidro Si, K, Ca, Al e Fe encontram-se distribuídos de maneira homogênea.

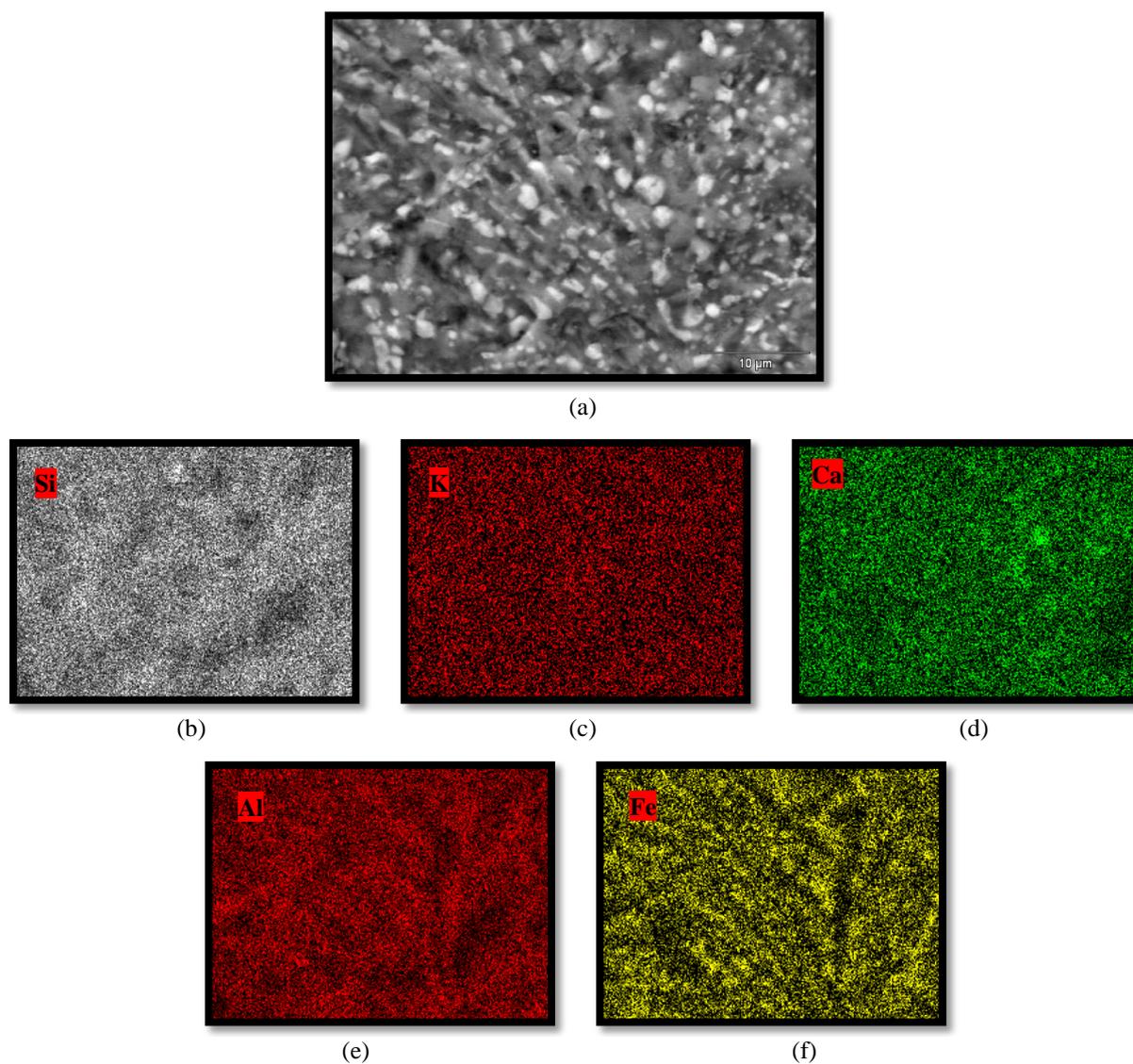


Figura 60: mapeamento dos elementos químicos presentes no vidro vulcânico da amostra BNRG. (a) micrografia obtida em MEV da região do vidro vulcânico 3000x; (b) mapa identificando a localização do Si; (c) mapa identificando a localização do K; (d) mapa identificando a localização do Ca; (e) mapa identificando a localização do Fe; (f) mapa identificando a localização do Al

Na amostra BNRG também chama atenção a grande quantidade de **argilominerais bem cristalizados** presente (24,8%), esmectitas, conforme mostra a figura 61. Na amostra, além de esmectitas (argilominerais marrons), também observa-se celadonita (argilominerais verdes), esta última sem comportamento expansivo. A quantidade de mesóstase Ma na amostra BNRG é muito pequena, corresponde a 0,8%.

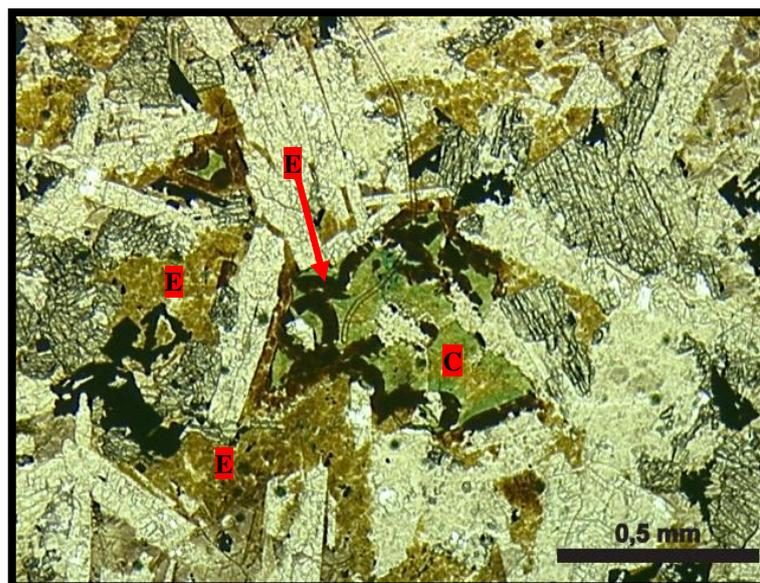


Figura 61: micrografia obtida por microscopia ótica sob luz natural dos argilominerais presentes na rocha BNRG, onde E= esmectita, C= celadonita. Ampliação 5x

Como se sabe, o basalto BNRG foi considerado inócuo no ensaio acelerado da NBR 15577-4. Relacionando-se a essa informação as análises que mostraram que nas amostras BEV e RPF os argilominerais foram menos suscetíveis à dissolução pelo referido ensaio, inclusive protegendo da dissolução os grãos de quartzo presentes na mesóstase Ma (figuras 52 e 53; tabela 10), tem-se indícios que os argilominerais bem cristalizados juntamente com a mesóstase Ma presentes na rocha BNRG evitaram que a rocha fosse classificada como potencialmente reativa nas argamassas moldadas por Couto (2008) em função das baixas expansões verificadas no ensaio acelerado.

Conforme o que foi visto, a mesóstase Mm é a única fonte de sílica livre tanto na amostra BEV quanto na BNRG, uma vez que o vidro vulcânico presente **nesta última** não apresentou sílica livre em sua composição (mapeamento dos elementos químicos apresentado na figura 60).

Esta constatação pode ser complementada considerando-se o fato de a rocha BNRG apresentar 7,7% de mesóstase Mm em sua constituição, percentual idêntico ao da rocha BEV para esse tipo de mesóstase. Assim, é possível validar os resultados e conclusões obtidos até o presente momento neste trabalho a respeito da influência do material intersticial nas expansões decorrentes da RAA.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas no presente capítulo mostraram que o material intersticial presente nas rochas vulcânicas pode ser bastante heterogêneo. Nas rochas BEV e RPF foram diferenciados três tipos de mesóstases. A mesóstase microcristalina (Mm) que, segundo os resultados apresentados, é rica em quartzo e K-feldspatos com dimensão microcristalina não observáveis em microscopia ótica. A mesóstase com predominância de argilominerais (Ma), que além dos argilominerais também contém alguns grãos de quartzo microcristalinos, e uma mesóstase melhor cristalizada (Mq), onde os grãos de quartzo e K-feldspatos podem ser identificados em microscopia ótica.

Nos interstícios dos grãos do basalto BNRG, além da mesóstase Mm e Ma (não foi observada a presença de mesóstase Mq) foi constatada a presença de vidro vulcânico não reativo, cuja composição é equivalente a do plagioclásio e piroxênio, assim, nesta rocha o vidro não possui sílica livre para reagir.

O estudo mostrou que o comportamento que rege o ataque dos hidróxidos alcalinos à sílica constituinte das rochas vulcânicas muda de acordo com sua mineralogia.

As expansões originadas pela rocha basáltica BEV no ensaio da NBR 15577-4 advêm da presença de quartzo na mesóstase Mm. Tais expansões são muito intensas em função da condição que se encontram os minerais constituintes da mesóstase nessa rocha, que não contém quartzo e K-feldspatos em sua matriz. Isso acaba por facilitar o ataque dos hidróxidos alcalinos, contudo, as expansões decorrentes da RAA tendem à rápida estabilização, em função da pequena quantidade de sílica livre disponível para reação.

Em uma rocha vulcânica ácida, como o riolito RPF, constituída por quartzo e K-feldspatos, as expansões oriundas da RAA podem ser mais danosas à estrutura, uma vez que a quantidade

de sílica disponível para reagir é maior. Nessa rocha a taxa de expansão no ensaio acelerado da NBR 15577-4 tende a ser contínua, ou seja, sem tendência à estabilização.

As análises a respeito da dissolução das rochas sujeitas à RAA mostraram que a mesóstase Ma, constituída predominantemente por argilominerais, é menos suscetível ao ataque alcalino. Considerando-se a mineralogia da rocha BNRG, rocha com comportamento inócuo no ensaio da NBR 15577-4, utilizada para validar os resultados obtidos para as rochas BEV e RPF, verifica-se a grande quantidade de argilominerais bem cristalizados na matriz. Isso é um indício que, ao contrário do que vinha sendo relatado na literatura, os argilominerais podem proteger a sílica livre presente nas rochas vulcânicas da dissolução. Enfatiza-se esse indicativo a partir da constatação que o vidro vulcânico presente na rocha BNRG não possui sílica livre e que a única fonte de sílica livre é a mesóstase Mm, cujo percentual nessa rocha é idêntico ao da rocha BEV, considerada potencialmente reativa.

5 INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO DO QUARTZO NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Por ser uma das formas de sílica livre mais comum nas rochas, o quartzo é um dos principais motivadores da ocorrência da RAA nas estruturas, uma vez que esta reação acontece entre a sílica e os hidróxidos alcalinos presentes no concreto.

Conforme o que vem sendo relatado ao longo dos anos pela a literatura, a deformação dos grãos de quartzo presentes nos agregados está intimamente relacionada à ocorrência da RAA. Para se ter ideia, de acordo com Paulon (1981), Hasparyk (1999), Andrade (2006), entre outros autores, no Brasil **todas** as obras em que a RAA foi constatada foram construídas com agregados constituídos por grãos de quartzo intensamente deformados.

Por isso a motivação deste capítulo do trabalho foi estabelecer relações entre os mecanismos de desencadeamento da RAA e o grau de deformação do quartzo constituinte das rochas.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS GRANÍTIAS

Rochas graníticas com diferentes graus de deformação foram selecionadas para avaliar a influência dessa característica no quartzo para o desencadeamento da RAA. Conforme explicado anteriormente, no capítulo 3, as rochas foram coletadas no mesmo maciço rochoso, a fim de evitar a interferência de agentes de alheios à deformação nas correlações das características das rochas com a RAA. Dessa maneira, foram estudados três graus de deformação, sendo chamadas de: M1= amostra menos deformada; M2= deformação intermediária; M3= amostra mais deformada.

A classificação dos graus de deformação foi feita a partir da constatação que o granito M1 é cortado por zonas de cisalhamento onde são produzidas rochas miloníticas com diferentes graus de deformação. A observação em escala mesoscópica permitiu a distinção de dois

campos estruturais representativos de uma progressiva deformação a partir da estimativa **qualitativa** da intensidade relativa da deformação. A definição dos graus de deformação foi em função da foliação da rocha, estiramento e orientação preferencial dos grãos (especialmente das micas), assim, foram separados os milonitos M2 e M3 com graus crescentes de deformação, conforme ilustra a figura 10 do item 3.1.2 (capítulo 3). As diferenças entre as texturas do quartzo nas rochas M1, M2 e M3 podem ser observadas através da figura 62.

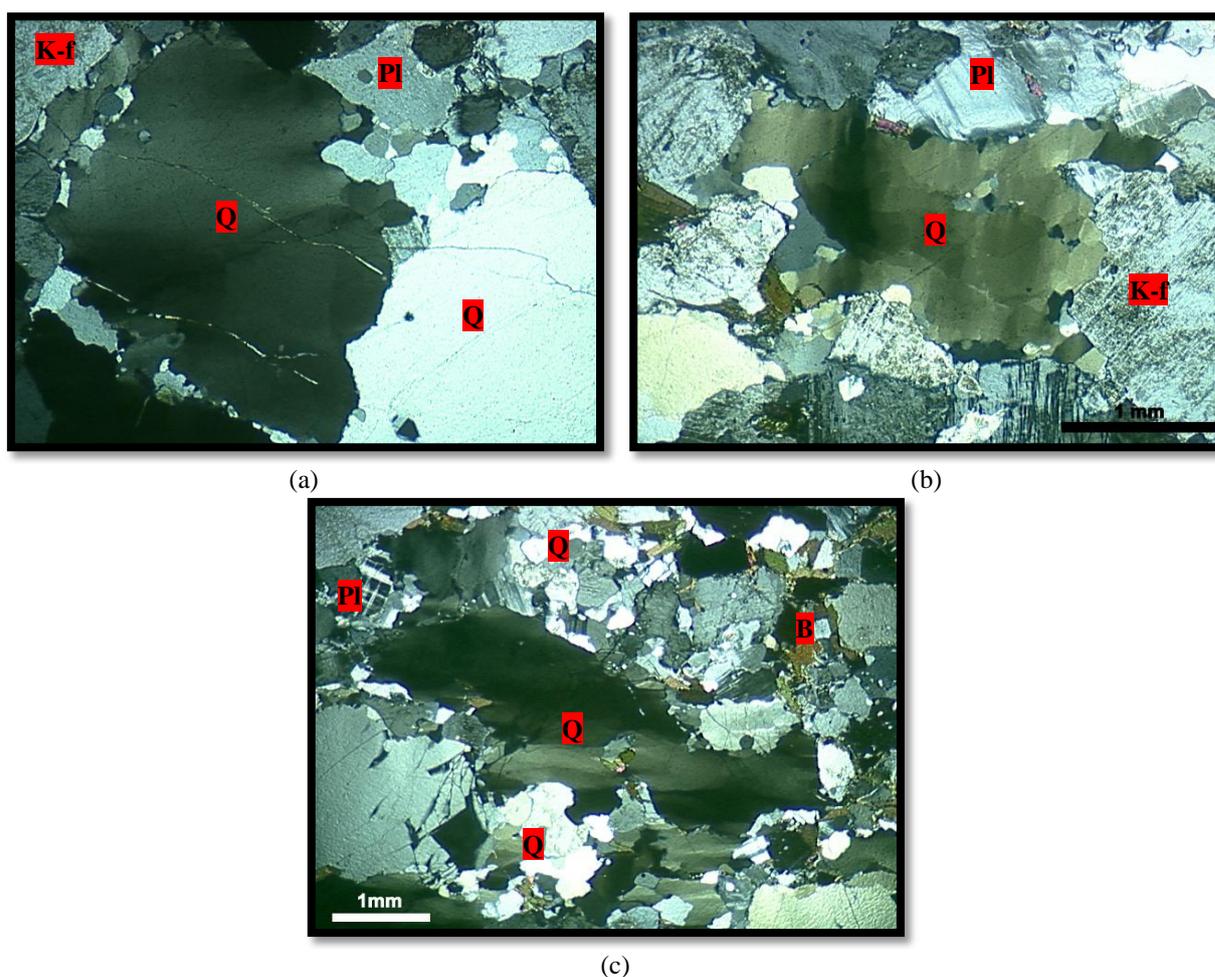


Figura 62: micrografias obtidas em microscopia ótica sob polarizador cruzado, apresentando as texturas das amostras graníticas, onde: Q= quartzo; B= biotita; K-f= K-feldspato; Pl= plagioclásio. (a) amostra M1; (b) amostra M2; (c) amostra M3. Ampliação 2,5x

A seguir serão descritas as características gerais de cada uma das rochas, **evidenciando as feições de deformação dos seus minerais, especialmente do quartzo**. As comparações relevantes à ocorrência da RAA entre as rochas M1, M2 e M2 serão discutidas separadamente dentro deste item do trabalho.

5.1.1 Granito M1

De acordo com a análise petrográfica a rocha M1 é monzogranítica³², com textura hipidiomórfica³³, porfirítica de granulação grossa. Apresenta cor predominantemente rosada, podendo localizadamente ser de cor cinza, com megacristais de feldspato alcalino (K-feldspato) com tamanho médio em torno de 2,0mm e matriz equigranular³⁴, com tamanho de grãos entre 0,3 – 0,8mm.

A amostra M1 é composta por quartzo (37,6%), K-feldspato (33,8%), plagioclásio (25,2%) e biotita (3,5%), conforme mostram as figuras 63 e 64. Como minerais acessórios aparecem minerais opacos, zircão, epidoto, alanita e apatita.

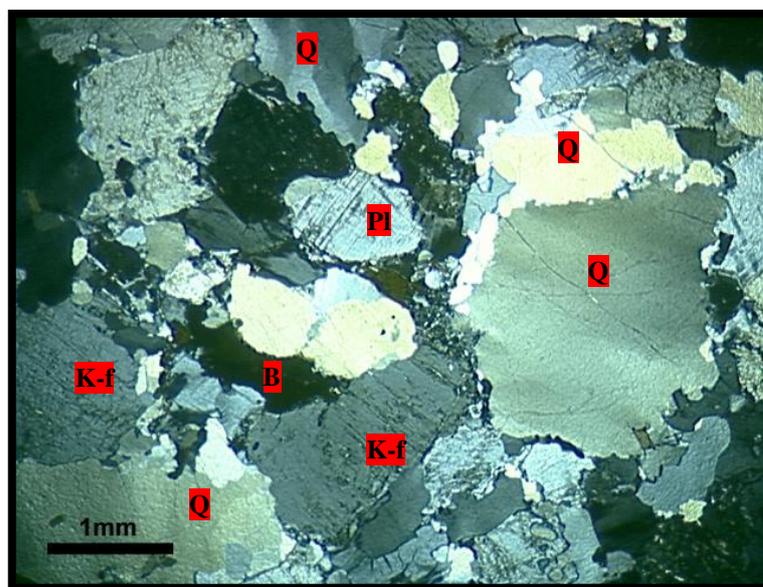


Figura 63: micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha M1, onde K-f= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita. Ampliação 1,6x

³² Monzogranitos são granitos em que o plagioclásio excede o K-feldspato (DANA, 1974)

³³ Hipidiomórfica é um tipo de textura em que parte dos minerais possui forma euédrica e outra parte, de maior proporção, forma subédrica (MOTOKI, 2004)

³⁴ Equigranular é a textura de rocha com minerais de tamanho aproximadamente iguais – granulometria homogênea (MOTOKI, 2004)

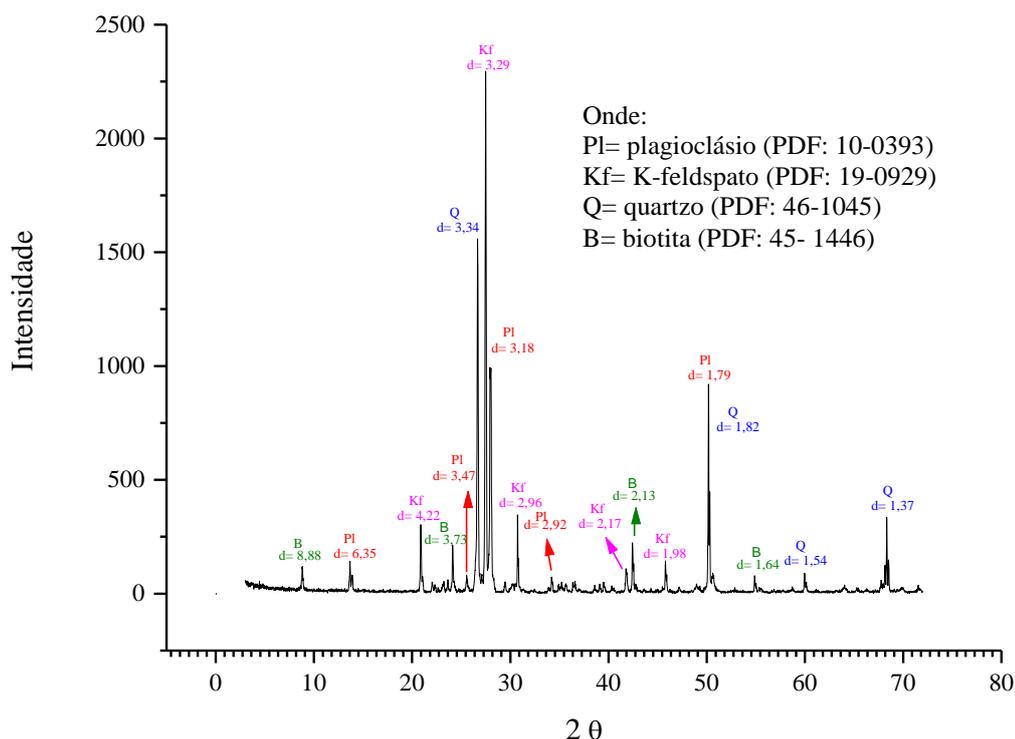


Figura 64: difratograma da amostra M1

O granito M1 apresenta uma estrutura foliada que é marcada pela presença de bandas irregulares constituídas pela biotita, com espessuras variáveis, desde 1,0 até 4,0mm, que tendem a contornar os megacristais de K-feldspato. Feições de deformação, de recuperação e recristalização são observadas principalmente no quartzo, mas também mais localizadamente nos feldspatos e nas micas. No quartzo são caracterizadas pela presença de forte extinção ondulante, bandas de deformação e, principalmente, de subgrãos. Observa-se também, em certos locais, a presença de novos grãos já evidenciando processos de recristalização dinâmica, especialmente nas posições de concentração de deformação, como limites dos grãos e nas bandas de deformação.

Os cristais de K-feldspato são predominantemente subédricos a euédricos, intensamente pertitizados³⁵. Mostram orientação preferencial incipiente e as feições de deformação relacionadas aos processos de recuperação são extinção ondulante e formação de maclas³⁶ mecânicas do microclínio – $KAlSiO_3$ (figura 65 (a)). Feições de recristalização aparecem nas

³⁵ Pertitas: lamelas geradas pela exsolução do Na no K-feldspato (DANA, 1974).

³⁶ Maclas são imperfeições superficiais que separam duas orientações da estrutura cristalina, representadas através de imagens espelhadas uma da outra. Podem ser originadas durante o crescimento de um mineral ou durante a deformação (DANA, 1974).

bordas dos grãos, sendo formados agregados finos com K-feldspatos, plagioclásio e quartzo, muitas vezes na forma de mirmequitas³⁷ (figura 65 (b)).

O plagioclásio presente na amostra é o oligoclásio ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). A análise petrográfica mostrou que este mineral tem formas subédricas a euédricas e tamanhos entre 0,6 e 1,0mm. Há tendência ao arredondamento dos grãos com a diminuição da granulação. Apresentam alteração leve para argilominerais e epidoto. As principais feições de deformação são a extinção ondulante, o desenvolvimento de bandas de deformação associadas à formação de “*kink bands*”³⁸ e a presença de maclas de deformação, conforme ilustra a figura 65 (c). Feições de recristalização são restritas e ocorrem nas zonas de alta deformação, especialmente nas margens dos grãos, onde é provável a ocorrência de composições mais sódicas nestes grãos.

A biotita aparece como cristais castanho-esverdeados, com tamanhos entre 0,5 e 0,2mm, conforme ilustra a figura 65 (d). A deformação é caracterizada pela extinção ondulante, arqueamento dos grãos, formação de “*kink bands*”. Apresentam transformação incipiente para ilita.

O quartzo da rocha M1 aparece como grãos anédricos com tamanhos entre 2,0 e 6,0mm. Apresentam invariavelmente feições de deformação como forte extinção ondulante, bandas de deformação e subgrãos. A extinção ondulante e as bandas de deformação ocorrem nos cristais maiores e tornam-se difusas nas proximidades dos limites dos grãos onde as bandas de deformação são substituídas por pequenos subgrãos, conforme mostra a figura 65 (e). Feições de recristalização dinâmica ocorrem na periferia dos grãos, caracterizadas pelo aparecimento de pequenos grãos recristalizados.

³⁷ Mirmequitas são o intercrescimento de massas de quartzo diminutas, sob forma de ‘vermes’ ou ‘dedos’ inclusos no plagioclásio. As mirmequitas ocorrem devido a reações entre o plagioclásio e o K-feldspato (MINEROPAR, 2009).

³⁸ Chama-se *kink band* a textura microscópica ou macroscópica, desenvolvida em minerais que se recristalizam sob ação de esforços tectônicos. É comum em minerais placóides ou que apresentam lamelas, como plagioclásios e biotitas. Esta textura caracteriza-se pelo aparecimento de dobras em ângulo agudo nos minerais (GUERRA; GUERRA, 2001).

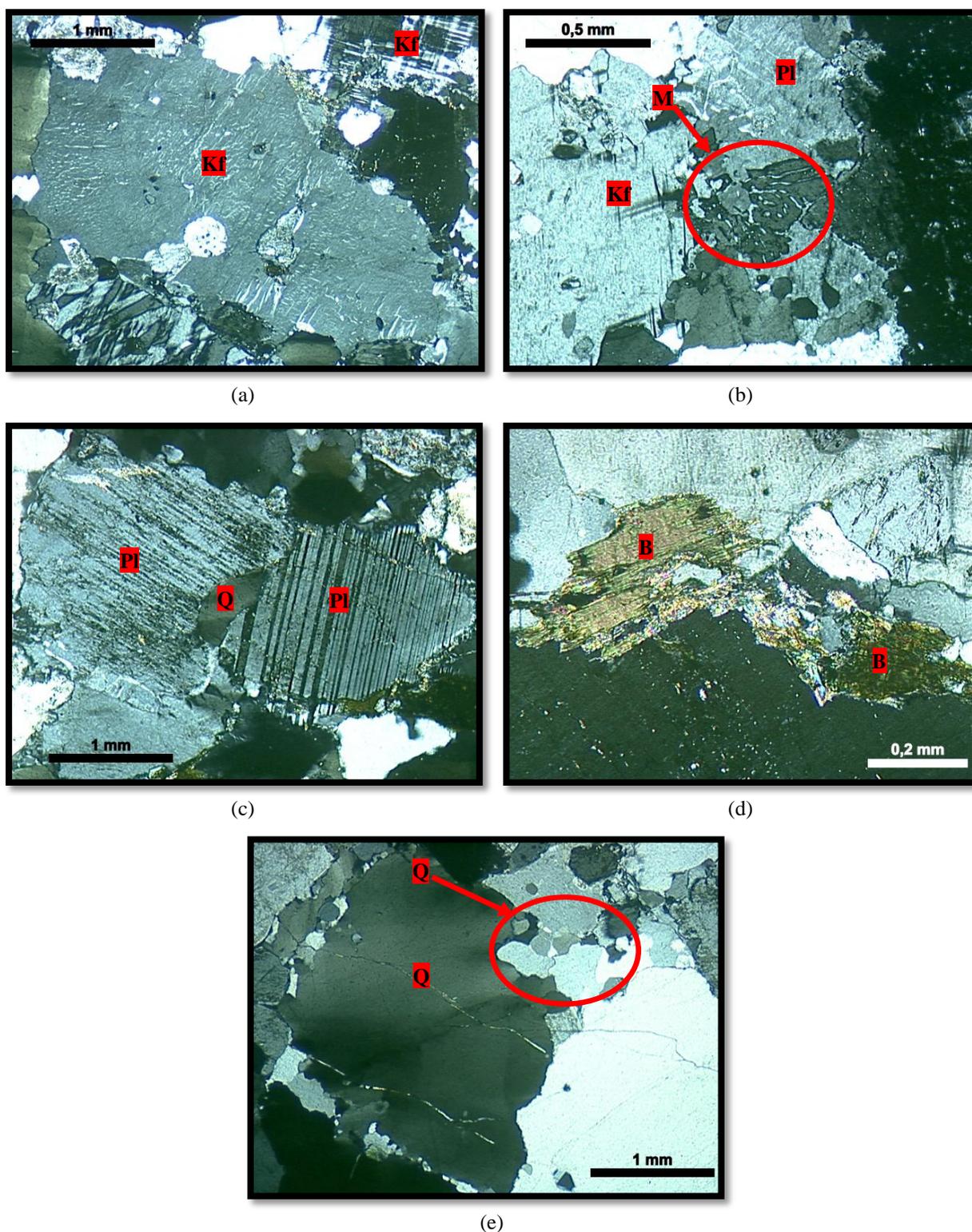


Figura 65: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado evidenciando as características dos minerais da rocha M1, onde Kf= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita, M= mirmequita. (a) K-feldspato pertitizado e K-feldspato com macla xadrez (microclínio), ampliação 2,5x; (b) presença de mirmequita no contato entre K-feldspato e plagioclásio, ampliação 10x; (c) plagioclásio maclado, ampliação 5x; (d) biotita, ampliação 10x; (e) quartzo com extinção ondulante, chegando a formar bandas de deformação, e grãos recrystalizados nas bordas, ampliação 2,5x

5.1.2 Milonito M2

Esta rocha representa o menor grau de deformação milonítica do granito, que é marcada principalmente pela diminuição no tamanho dos grãos. A rocha é composta por quartzo (28,7%), K-feldspato (39,6%), plagioclásio (26,3%) e biotita (5,4%), conforme análise petrográfica e DRX (figuras 66 e 67).

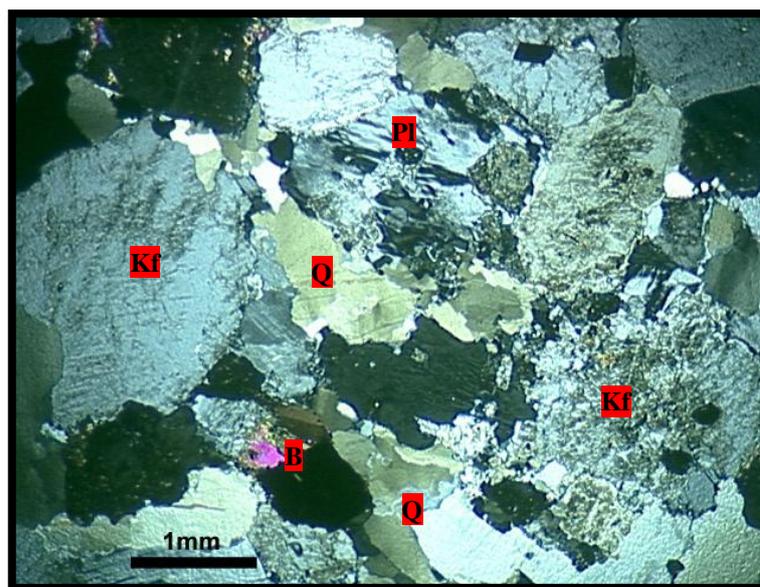


Figura 66: micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha M2, onde K-f= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita. Ampliação 1,6x

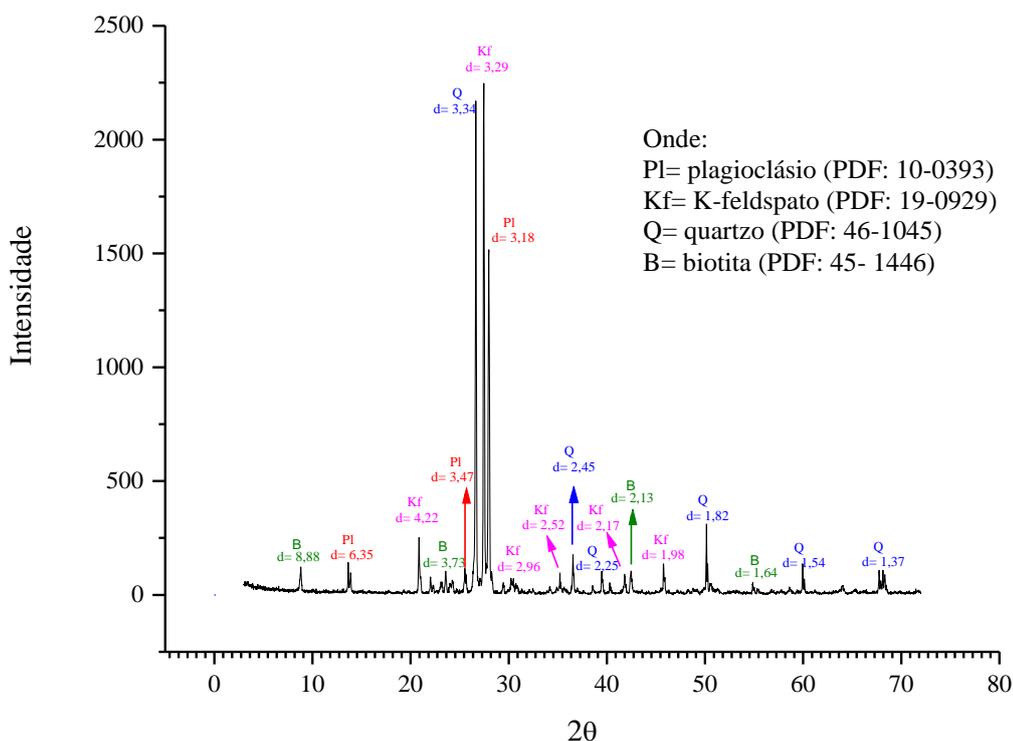


Figura 67: difratograma da amostra M2

A rocha M2, segundo a classificação de Wise (1984), corresponde a um protomilonito. Como característica geral desta rocha, pode-se dizer que os feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) têm tamanho médio em torno de 1,5mm e neste domínio (M2) a rocha adquire uma foliação³⁹ mais intensa. Os feldspatos mantêm as formas originais apenas aumentando o arredondamento e já mostram tendência ao estiramento, havendo a fragmentação dos grãos. O quartzo começa a adquirir formas mais alongadas, estiradas segundo a foliação, com forte extinção ondulante e bandas de deformação. Formam-se pequenas bandas de quartzo recristalizado de grão fino, constituindo arranjos irregulares com contatos serrilhados.

O K-feldspato apresenta feições de deformação principalmente relacionadas ao fraturamento. A deformação leva à orientação destes minerais paralelamente à foliação. Há recristalização nas margens dos grãos, com formação principalmente de quartzo e albita nas zonas de sombra de pressão e nas pertitas que se tornam maiores e mais irregulares, conforme ilustra a figura 68 (a).

O plagioclásio no milonito M2 mostra feições muito semelhantes ao granito M1 (figura 68 (b)). Há tendência ao arredondamento dos grãos e a principal feição de deformação é o fraturamento dos grãos acompanhado da recristalização de albita nas fraturas e nas “*kink bands*”.

A biotita ocorre como finas palhetas menores que 0,2mm, com as mesmas feições de deformação da rocha M1 (figura 68 (c)), porém com maior alteração para mica branca (ilita).

Na rocha M2, o quartzo apresenta tendência à redução nos tamanhos dos grãos, havendo maior uniformidade dos mesmos nesta rocha. Algumas vezes ainda aparece como grandes cristais, com 1,0 a 2,0mm, mas com feições de deformação como extinção ondulante, bandas de deformação, subgrãos e com coroas de quartzo recristalizado ao redor dos grãos maiores, conforme ilustra a figura 68 (d). Na rocha M2 começam a aparecer bandas (*ribbons*) de quartzo, separadas dos outros minerais da rocha. Nesses locais os grãos são mais estirados e podem ter desde feições com intensa deformação, com forte extinção ondulante e subgrãos, até mosaicos de grãos novos sem extinção ondulante e livres de deformação.

³⁹ “A palavra foliação pode ser usada como um termo genérico para descrever feições planares que se reproduzem de forma penetrativa no meio rochoso. Nesse sentido podemos então classificar como foliação um acamamento rítmico de uma rocha metamórfica, o bandamento composicional de rochas ígneas, ou outras estruturas planares de rochas metamórficas.” (CARNEIRO *et al.*, 2003)

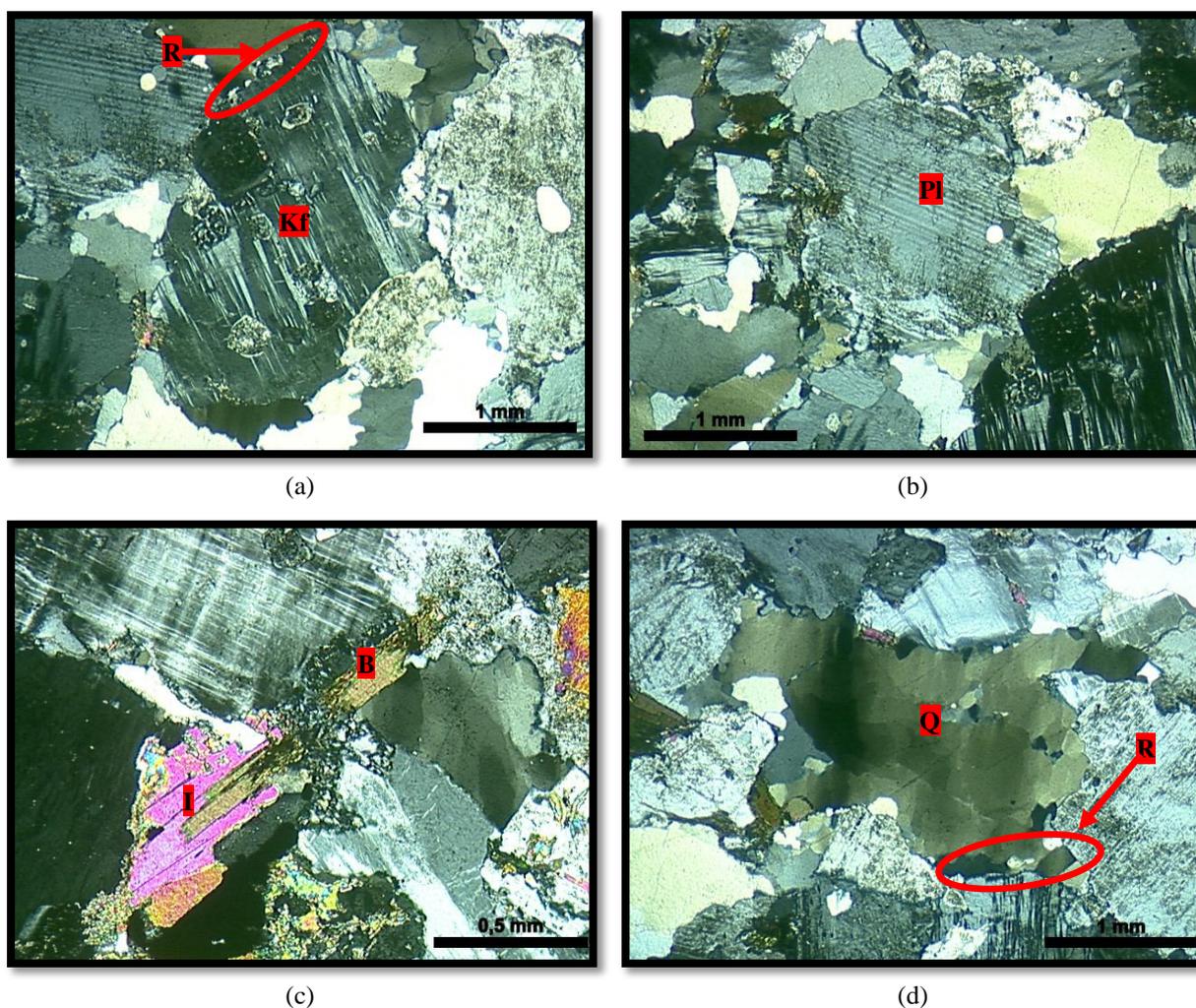


Figura 68: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado evidenciando as características dos minerais da rocha M2, onde Kf= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita, I= ilita, R= grãos de quartzo recrystalizados. (a) K-feldspato pertitzado apresentando recrystalização de quartzo nas sombras de pressão, ampliação 2,5x; (b) plagioclásio, ampliação 2,5x; (c) biotita, ampliação 5x; (d) quartzo muito deformado, chegando a formar subgrãos e com grãos recrystalizados nas bordas, ampliação 5x

5.1.3 Milonito M3

A composição mineralógica identificada através de análise petrográfica (figura 69) e DRX (figura 70) rocha M3 é: quartzo (33,3%), K-feldspato (36,5%), plagioclásio (24,0%) e biotita (6,3%).

No domínio do maciço rochoso em que a amostra M3 foi coletada, as rochas apresentam uma fábrica planar mais homogênea e penetrativa, com uma forte foliação e bandamentos caracterizados pela alternância de bandas milimétricas de feldspatos, bandas de biotitas e micas brancas e bandas exclusivamente compostas por quartzo, conforme ilustra a figura 69.

Nesta rocha, também há uma diminuição no tamanho dos clastos (grãos), que ficam entre 0,5 e 1,0mm e a matriz passa a ter tamanhos de 0,1cm, sendo classificada como um ortomilonito, segundo Wise (1984).

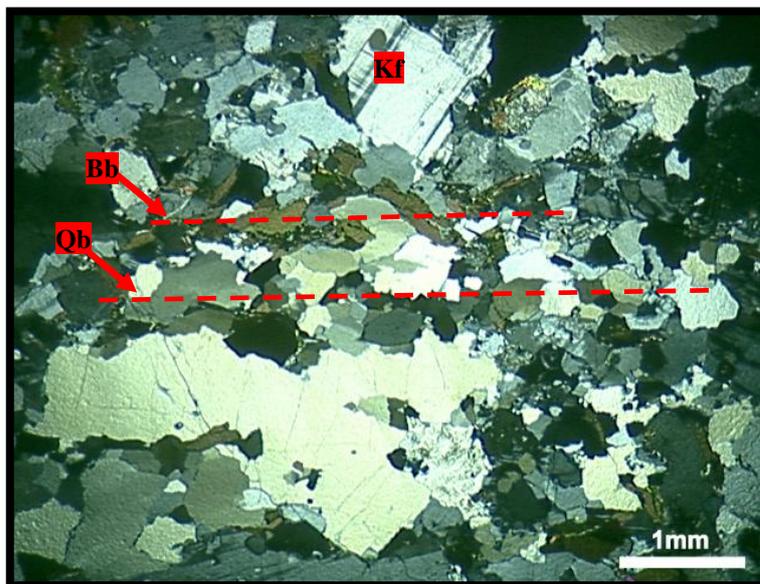


Figura 69: micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha M3, onde Kf= K-feldspato, Qb= banda de quartzo, Bb= banda de biotita. Ampliação 1,6x

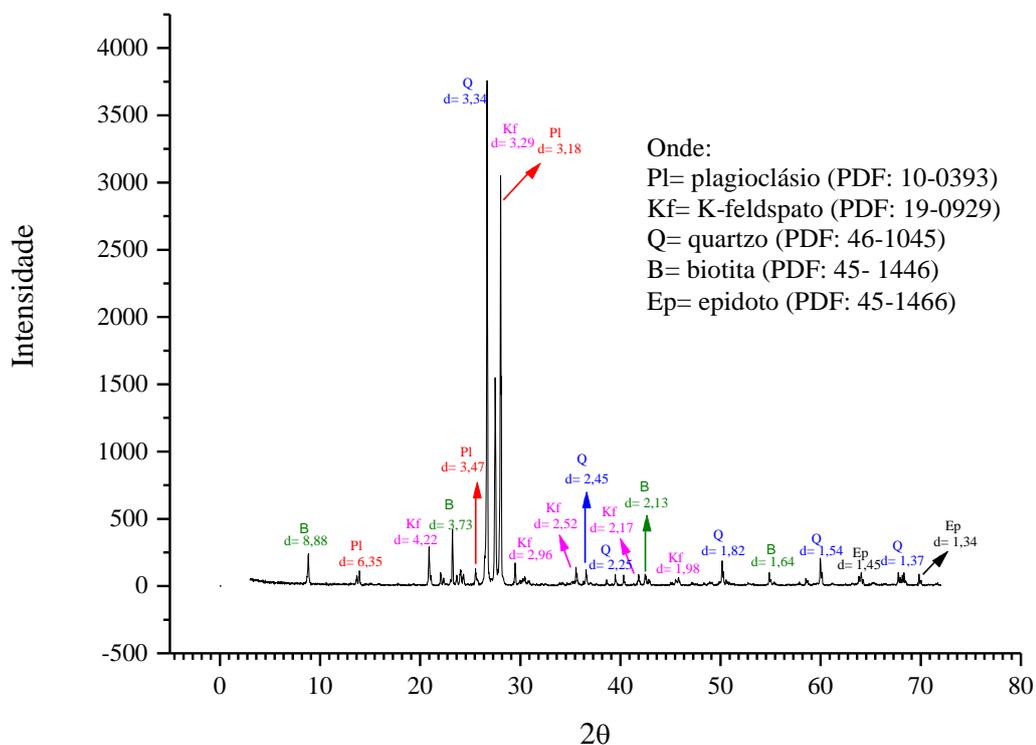


Figura 70: difratograma da amostra M3

O K-feldspato da rocha M3 tem diminuição no tamanho de grãos nesta rocha, com os grandes cristais fraturados e parcialmente recristalizados nas bordas (figura 71 (a)). Já o plagioclásio (figura 71 (b)) apresenta como principais feições de deformação, encurvamento de maclas e extinção ondulante.

A biotita ocorre como finas palhetas menores que 0,1mm. Tais palhetas encontram-se alinhadas subparalelamente umas as outras com orientação preferencial, formando finas bandas que evidenciam o processo de segregação que gera o fino bandamento observado nestas rochas (figura 71 (c)). A transformação da biotita para mica branca é intensa.

Na rocha M3 o quartzo ainda preserva grandes grãos com extinção ondulante e subgrãos, mas a principal feição é a presença de agregados resultantes do estiramento e reorganização dos grãos na forma de bandas (“*ribbons*”) que definem a foliação milonítica mais forte nesta rocha em relação à M2.

Segundo o que pode ser visualizado na figura 71 (d), nas bandas de quartzo aparecem tanto grãos maiores ainda com as feições de deformação intensa, mas, principalmente, agregados de novos grãos de tamanhos pequenos (0,3 – 0,1mm). Estes novos grãos podem ter desde contatos serrilhados e interpenetrativos, com forte orientação preferencial e, ainda, deformados, com extinção ondulante, até contatos mais retos, poligonais e sem orientação preferencial, já livres de deformação.

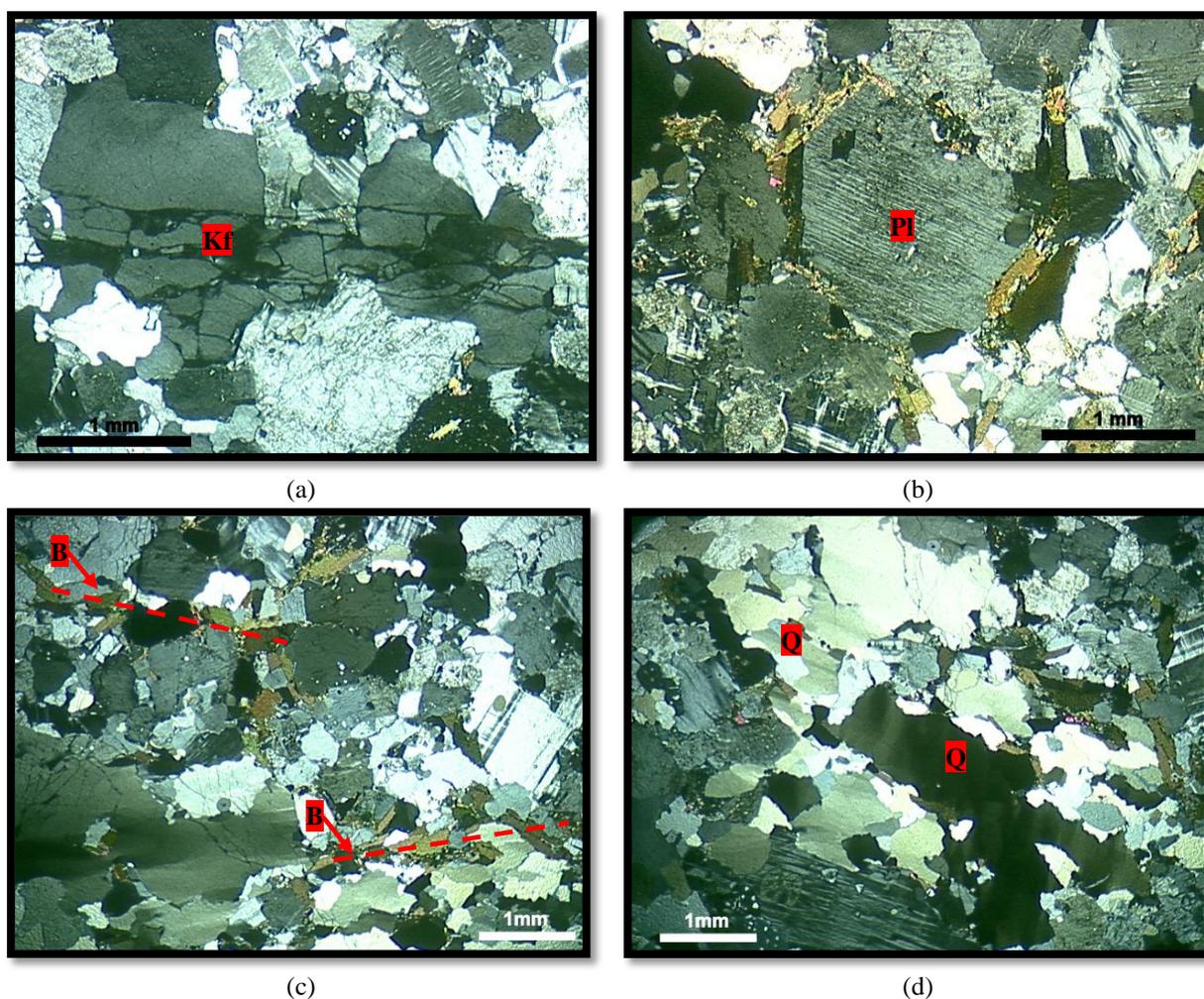


Figura 71: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado evidenciando as características dos minerais da rocha M3, onde Kf= K-feldspato, Q= quartzo, Pl= plagioclásio, B= biotita, R= recristalização. (a) K-feldspato cataclasado e com leve extinção ondulante, ampliação 2,5x; (b) plagioclásio alterado, ampliação 2,5x; (c) biotita agrupada em bandas, ampliação 5x; (d) quartzo agrupado em bandas, ampliação 1,6x

5.1.4 Considerações sobre as características gerais das rochas M1, M2 e M3 e sua relação com a RAA

A caracterização das rochas M1, M2 e M3, através de análise petrográfica e DRX, mostrou que são compostas pelos mesmos minerais, porém, estes se diferenciam de uma rocha para outra em função do seu grau de deformação.

A análise química por FRX, apresentada na tabela 11, foi obtida por PHILIPP (1990) para as rochas do afloramento onde foram coletadas as amostras M1, M2 e M3, utilizadas neste estudo.

Tabela 11: composição química das rochas M1, M2 e M3

Elementos maiores (% massa)		Elementos traço (ppm)	
SiO ₂	71,54	Rb	179
Al ₂ O ₃	13,78	Sr	170
TiO ₂	0,45	Ba	728
Fe ₂ O ₃	0,45	Zr	250
FeO	2,41		
MnO	0,04		
MgO	0,40		
CaO	1,58		
Na ₂ O	3,24		
K ₂ O	5,15		
P ₂ O ₅	0,12		
Perda ao fogo	0,10		
TOTAL	99,26		

Algumas feições observadas nas rochas graníticas são importantes no que diz respeito à liberação de sílica para o desenvolvimento da RAA no concreto. As principais são relativas ao mineral quartzo, as quais serão discutidas com maior atenção na sequência deste capítulo do trabalho. No entanto, existem outros aspectos importantes que devem ser enfatizados.

Na amostra M1, por exemplo, o plagioclásio está alterado para mica branca, bem como essa alteração ocorre com a biotita nas três rochas analisadas. Um dos reflexos dos diferentes graus de deformação entre M1, M2 e M3 apresenta-se através da transformação da biotita para mica branca, mais precisamente ilita. Além de apresentarem feições de deformação, as micas são silicatos bastante solúveis e, por isso, podem ser susceptíveis à RAA.

Foi observada a textura mirmequítica nos feldspatos das amostras M1 e M2. As mirmequitas originam-se da reação entre K-feldspatos e plagioclásios. Essa reação leva à formação de pequenos grãos de quartzo dentro do K-feldspato e do plagioclásio, ou seja, há liberação de sílica, que cristaliza formando grãos menores, talvez mais susceptíveis à RAA. Além disso, é comum em todas as amostras M1, M2 e M3 a presença K-feldspatos pertitizados. Estas estruturas tendem a se alterar mais facilmente e sua presença pode contribuir para o aumento da quantidade de hidróxidos alcalinos disponíveis para a RAA no concreto.

Tais características mineralógicas e texturais mostram que as rochas M1, M2 e M3 podem ser consideradas potencialmente reativas, o que também está de acordo com o que prevê a NBR 15577-3 para classificação da reatividade de uma rocha (conforme pode ser visualizado no Apêndice C).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS GRAUS DE DEFORMAÇÃO DO QUARTZO

O quartzo é uma das formas de **sílica livre** mais abundante nas rochas utilizadas como agregados no concreto, tais como as rochas ígneas félsicas (ricas em sílica, ex.: granitos), metamórficas e sedimentares. Por isso, pode ser considerado o principal responsável pelo desenvolvimento de RAA.

Entretanto, a disponibilidade desse mineral para reagir é fortemente dependente da ‘estabilidade da sua estrutura cristalina’, ou seja, grãos de quartzo sem, ou com poucos, defeitos na estrutura cristalina tem menos chances de desenvolver RAA, ou melhor, levam mais tempo para desenvolvê-la. Para exemplificar cita-se o trabalho de Fernandes *et al.* (2007), em que os autores constataram a presença de RAA em uma barragem de Portugal, construída em 1960, onde o quartzo do granito utilizado mostrava-se muito pouco deformado. Krauskopf (1972) explica que isso ocorre porque o meio alcalino propiciado pelo cimento no concreto, cujo pH varia em torno de 12, é capaz de desestabilizar qualquer grão de quartzo, até aqueles grãos com estruturas mais perfeitas, mesmo que isso leve muito tempo.

Assim, seguindo-se esse raciocínio, quanto maior a quantidade de defeitos nos grãos de quartzo, mais rapidamente será desencadeada a RAA, logo, maior seu potencial de reatividade. Tais defeitos surgem durante o processo de deformação das rochas ao longo do tempo, onde ocorrem deslocamentos dos átomos na estrutura cristalina dos minerais. Essas deslocamentos são mais ou menos intensas dependendo do campo tensional a que a rocha é submetida e podem, por exemplo, transformar um granito em um milonito.

Parsschier e Trouw (1998) explicam que um cristal possui uma determinada energia interna, a qual é mínima quando está livre de deslocamentos (cristal perfeito – sem defeitos). Quando o cristal se deforma, há um aumento das deslocamentos e aumento da energia interna, o que muda a distância entre os átomos. O aumento da energia é proporcional ao aumento no comprimento das deslocamentos por volume de material cristalino, também conhecido como densidade de deslocamentos.

Diversos níveis de deformação dos minerais podem ser identificados dependendo do estágio de deformação da rocha, ou seja, quanto maior a densidade de deslocamentos (deformação) mais defeituoso será o cristal (WENK *et al.*, 2008). Contudo, o contínuo aumento nas deslocamentos do cristal leva a um agrupamento das redes planares de átomos, conhecidas como paredes de

subgrãos, que, com o aumento das tensões podem dividir o cristal de origem em diversos novos grãos menores e recuperados, ou seja, sem deslocamentos.

O objetivo deste item do trabalho é, justamente, caracterizar os diferentes graus de deformação do quartzo a fim de, posteriormente, relacioná-los com a potencialidade de desenvolvimento da RAA. Tal caracterização foi feita através de microscopia ótica, conforme ilustra a figura 72, podendo ser explicada da seguinte maneira:

a) Estágio 0: grão livre de deformação

Considerando-se um grão de quartzo livre de defeitos, sem nenhuma deformação, tem-se o aspecto apresentado nas figuras 72 (a) e 72 (b). Estes grãos extinguem de forma homogênea ao girar a platina do microscópio ótico, o que mostra que seu retículo cristalino está livre de defeitos (deslocamentos);

b) Estágio 1: grão com extinção ondulante

O primeiro estágio no processo de deformação está representado na figura 72 (c), onde é possível observar que o grão de quartzo está com extinção ondulante, ou seja, não extingue de maneira homogênea, ficando com zonas mais claras e mais escuras. Esta característica ótica do mineral reflete que há deformação do retículo cristalino, porém de baixa intensidade (leve extinção ondulante);

c) Estágio 2: grão com forte extinção ondulante formando bandas de deformação

Com o aumento da deformação, figura 72 (d), a extinção ondulante se acentua, criando zonas bem definidas dentro do cristal (início da formação das paredes de deslocamento). Tais zonas/faixas são chamadas de bandas de deformação e representam regiões onde o retículo cristalino está deformado, com uma fragilização das ligações químicas;

d) Estágio 3: grão com forte extinção ondulante, chegando a formar subgrãos

Através da figura 72 (e) observa-se que com a crescente deformação amplificam-se as bandas de deformação do grão, ou seja, crescem os defeitos no retículo cristalino do mineral, criando regiões de arqueamento, onde as ligações químicas tendem a se quebrar com maior facilidade (paredes de **subgrãos** bem definidas dentro do grão de origem);

e) Estágio 4: grão recristalizado

No último estágio do processo de deformação (figura 72 (f)), os subgrãos se individualizam completamente e formam novos grãos, sem defeitos, num processo que se chama recristalização. Os grãos recristalizados possuem as mesmas características do primeiro estágio, ou seja, grãos sem deformação do retículo cristalino, porém, possuem dimensão menor.

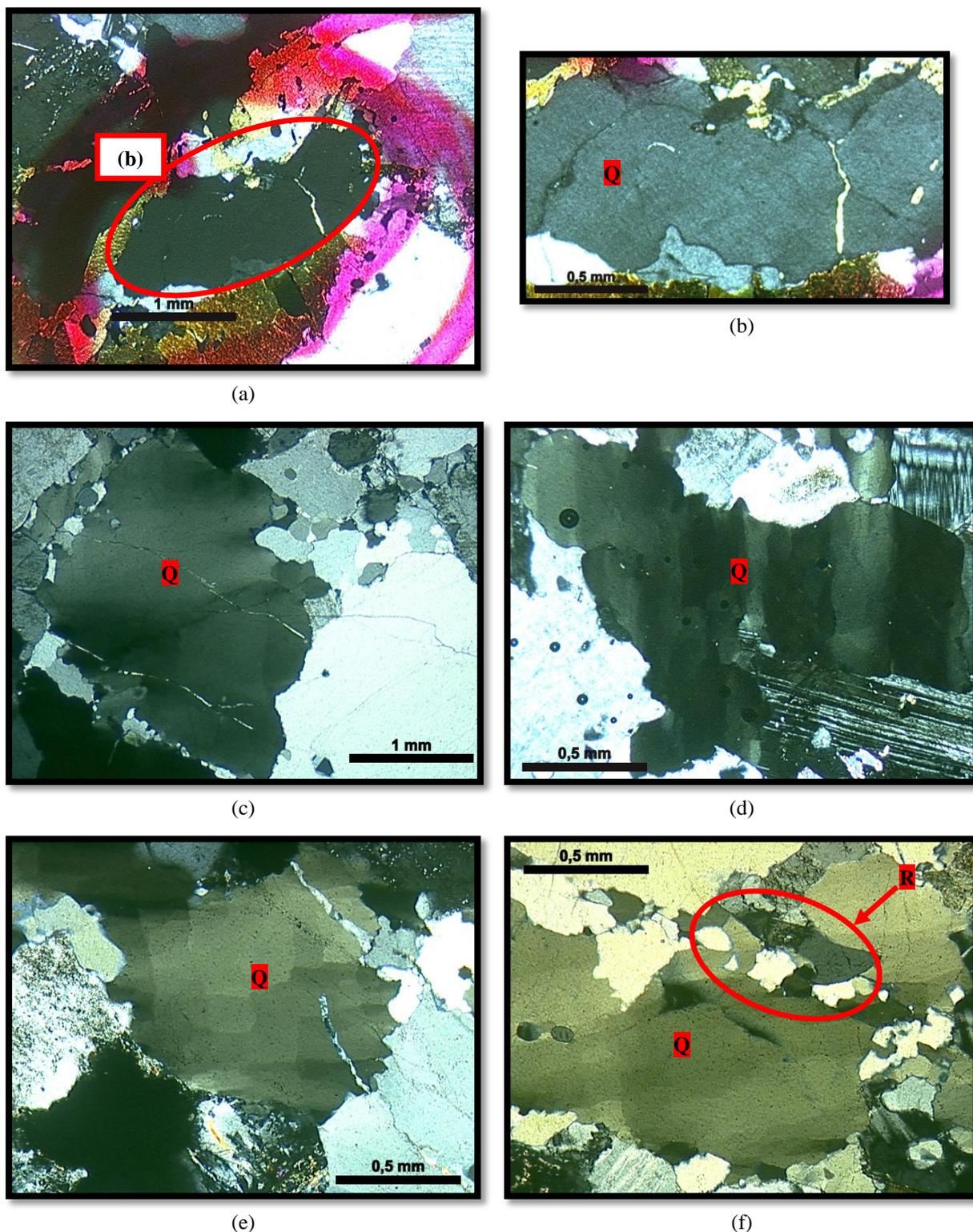


Figura 72: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando os diferentes graus de deformação do quartzo, onde Q= quartzo, R= quartzo recristalizado. (a) (b) grão sem deformação, ampliação 2,5x e 5x; c) grão com extinção ondulante leve, ampliação 2,5x; (d) grão com intensa extinção ondulante, formando bandas de deformação, ampliação 5x; (e) grão com forte extinção ondulante, chegando a formar um mosaico de subgrãos, ampliação 5x; f) recristalização de novos grãos a partir de um grão maior, ampliação 5x

Dolar-Mantuani (1981) propôs medir o ângulo de extinção ondulante como forma de caracterizar o potencial reativo dos agregados. Contudo, conforme o que já foi relatado no capítulo 2, o próprio autor salientou que esta forma de classificação tem uma incerteza de aproximadamente **60%**. Isso ocorre porque quando a extinção é ondulante parte do grão extingue a luz e outra parte não, fazendo com que não exista uma referência para medida da extinção.

Considerando-se o que foi visto a respeito da deformação do quartzo também parece ser incoerente medir a extinção ondulante, uma vez que o próprio nome já diz: é ondulante, ou seja, varia dentro do mesmo grão. Além disso, a formação das paredes de deslocação nos grãos de quartzo denota a formação de um novo grão, recristalizado e sem deformação. Ou seja, grandes ângulos de extinção ondulante (maiores que 25°) que, segundo Dolar-Mantuani (1981), são considerados reativos, podem ser resultantes de um subgrão formado. No caso da presença de subgrãos fica ainda mais difícil medir o ângulo de extinção ondulante, pois dentro de um mesmo grão existem vários outros, todos com extinções bem distintas.

Por esses motivos e, a partir do que foi exposto neste item do trabalho a respeito dos estágios de deformação dos grãos de quartzo, no presente estudo foram definidos 4 graus de deformação dos grãos como forma de avaliar o quartzo constituinte das rochas M1, M2, e M3, conforme mostra o fluxograma apresentado na figura 73.

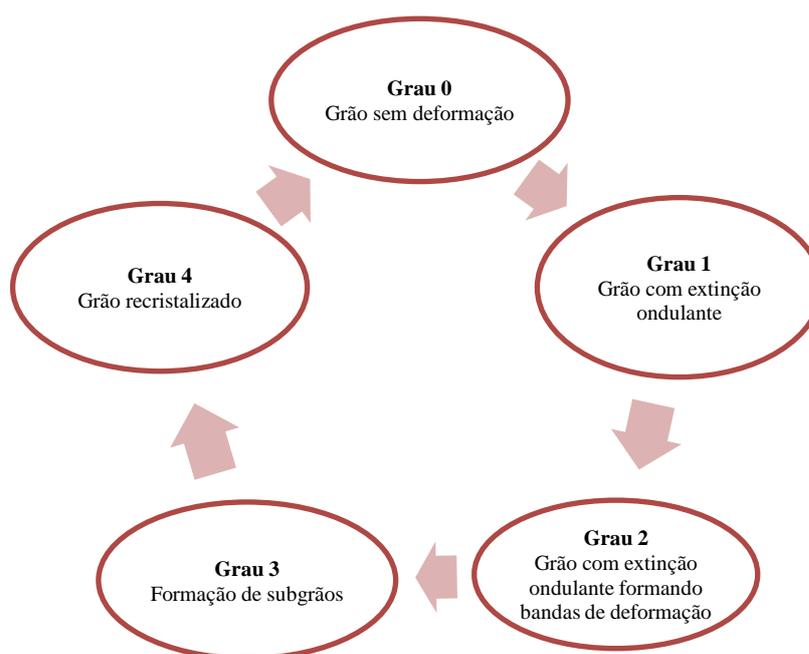


Figura 73: resumo dos graus de deformação do quartzo definidos para o trabalho

5.2.1 Avaliação dos graus de deformação do quartzo nas rochas M1, M2 e M3

A fim de avaliar e caracterizar os graus de deformação do quartzo constituinte em cada uma das rochas selecionadas e, através disso, possibilitar o estudo da influência da deformação desse mineral na RAA, realizou-se a quantificação percentual de cada grau de deformação do quartzo presente nas rochas M1, M2 e M3.

Esta análise mostrou que a rocha M1 possui 37,4% de quartzo em sua composição. Desse percentual 46,6% são grãos com o grau 1 de deformação, ou seja, apresentam apenas extinção ondulante (corresponde a 17,2% da matriz). No grau 2 de deformação (intensa extinção ondulante, chegando a bandas de deformação) foi verificada a presença de 33,6% dos grãos de quartzo (11,7% da matriz). 15,2% do quartzo presente na rocha M1 faz parte do grau 3 de deformação, onde os grãos estão muito deformados, chegando a formar sub-grãos (5,5% da matriz) e 5,2 % são grãos recristalizados, ou seja, grau 4 (2,1% da matriz).

Na rocha M2 28,7% da matriz é composta por quartzo. Grãos com grau 1 de deformação correspondem a 13,6% do quartzo (3,9% da matriz). Para o grau 2 foi verificada a presença de 56,1% dos grãos de quartzo (16,1% da matriz). Já a presença de sub-grãos (grau 3) foi observada em 23,7% desse mineral (6,8% da matriz) e grãos recristalizados 6,6% (1,9% da totalidade de minerais da matriz).

Por fim, a análise modal mostrou que a amostra M3 é constituída por 34,3% de quartzo. 22,8% são grãos com extinção ondulante (grau 1 de deformação – 5,7% da matriz). Grãos de quartzo com deformação no grau 2 são 39,6% do total (14,1% da matriz) e deformação no grau 3 são 22,2% (8,2% da matriz). Para grãos no grau 4 foi verificada a presença de 15,6% (6,3% da matriz).

Os percentuais verificados para cada textura de deformação nas três rochas evidenciam a crescente deformação de M1 para M2 e desta para M3, salientando-se que em nenhuma das amostras foi identificada a presença de grãos sem nenhuma deformação (grau 0).

A fim de avaliar se as diferenças entre os graus de deformação quantificados são estatisticamente significativas entre as rochas M1, M2 e M3, realizou-se a análise múltipla de variância (MANOVA). Para tal análise foram utilizados os dados discriminados no APÊNDICE A deste trabalho. Os resultados podem ser observados através da tabela 12.

Tabela 12: análise múltipla de variância do efeito dos graus de deformação nas rochas M1, M2 e M3

Efeito: Graus de deformação	Graus de liberdade do efeito	Média quadrada do efeito	Graus de liberdade do erro	Média quadrada do erro	Teste F	Valor-p	Significância
Grau 1	2	1.720,353	12	32,422	53,061	0,000	Significativo
Grau 2	2	741,650	12	41,760	17,760	0,000	Significativo
Grau 3	2	123,065	12	13,845	8,889	0,004	Significativo
Grau 4	2	240,450	12	12,200	19,709	0,000	Significativo

Teste F= média quadrada do grau de deformação/média quadrada do erro;

Valor-p= probabilidade, distribuição t de Student.

Significativo= valor-p menor ou igual a 0,05

A tabela 12 mostra que os percentuais obtidos para cada grau de deformação são estatisticamente diferentes nas três rochas avaliadas. Sendo assim, foi possível plotar o gráfico da figura 74 e afirmar que a rocha menos deformada, M1, possui um percentual maior de grãos com extinção ondulante leve (grau 1). Na rocha com deformação intermediária (M2), se sobressai a presença de grãos de quartzo com intensa extinção ondulante chegando a formar bandas de deformação (grau 2), bem como já formando subgrãos (grau 3). Para a rocha mais deformada, a presença de grãos recristalizados é maior (grau 4), ou seja, a deformação que essa rocha sofreu foi mais intensa, favorecendo a recristalização de novos grãos a partir de grãos intensamente deformados.

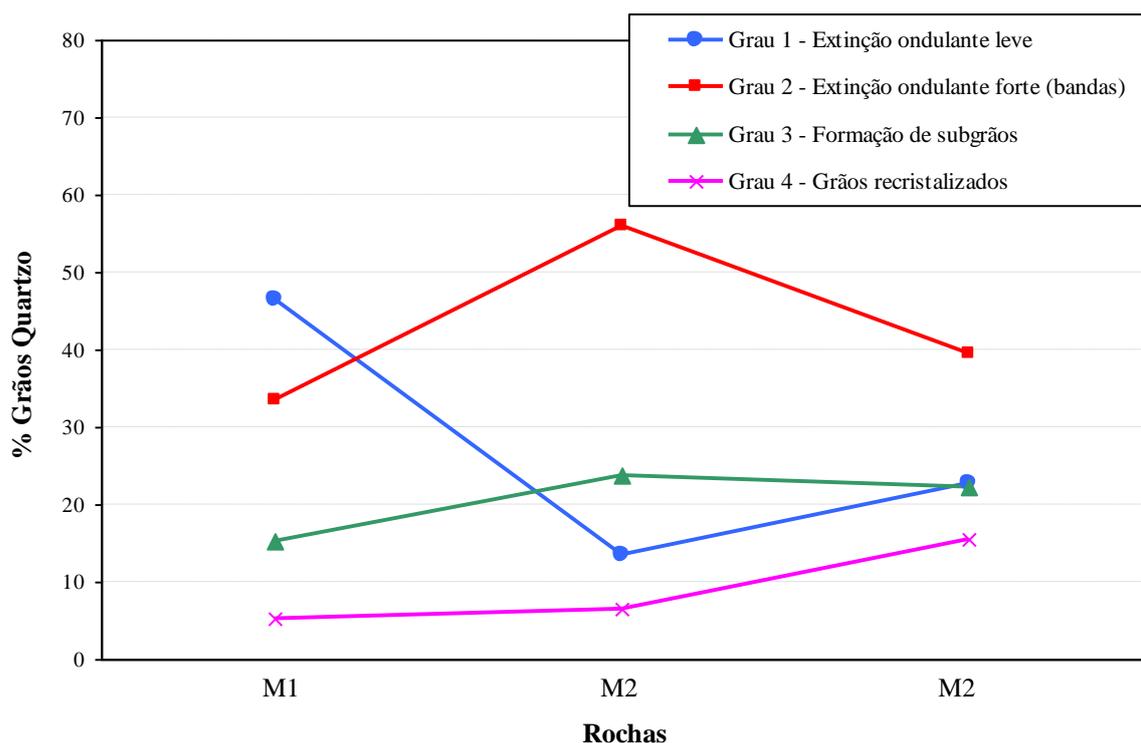
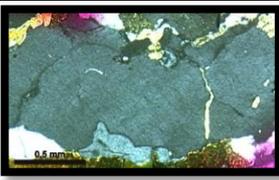


Figura 74: comparação entre os diferentes graus de deformação do quartzo presente nas rochas M1, M2 e M3

Conforme pôde ser percebido através da figura 74, de modo geral, em uma mesma lâmina delgada podem aparecer feições representativas de várias intensidades de deformação, desde grãos completamente recristalizados e sem deformação (grau 4) até grãos com acúmulo de intensa deformação (graus 2 e 3). Isso foi observado para os três tipos de rocha, e fica bem explícito quando se observa os dados da tabela 13.

Tabela 13: percentuais das diferentes texturas dos grãos de quartzo observadas nas rochas M1, M2 e M3

Grau de deformação	Descrição característica	Imagem	Rochas		
			M1	M2	M3
Grau	Quartzo sem deformação		-	-	-
Grau 1	Quartzo com extinção ondulante leve		46,6	13,6	22,8
Grau 2	Quartzo com forte extinção ondulante, com formação de bandas de deformação no grão		33,6	56,1	39,6
Grau 3	Quartzo com forte extinção ondulante, com formação de subgrãos		15,2	23,7	22,2
Grau 4	Quartzo recristalizado a partir de subgrão		5,2	6,6	15,6

A deformação dos grãos de quartzo propicia o aumento da superfície disponível para reação com os hidróxidos alcalinos, uma vez que nas zonas deformadas os grãos possuem ligações químicas mais frágeis, já que a estrutura cristalina está deformada. A fragilização das ligações químicas entre os átomos faz com que haja tendência de subdivisão do grão.

As paredes que subdividem os grãos de quartzo são bastante evidentes no grau 3 de deformação, onde é possível observar **nitidamente** em microscopia ótica a forma do subgrão, conforme ilustram as figuras 75 (a) e 75 (b). Nos graus 1 e 2 observa-se a extinção ondulante mais ou menos intensa nos grãos, mas não se evidenciam os caminhos/paredes dentro do quartzo. Para deformações no grau 4 os grãos recristalizados podem ser considerados sem

deformação, ou seja, sem paredes, pois neste caso os grãos já estão totalmente separados do grão de origem; seu comportamento é semelhante aos grãos com grau 0, que não foram identificados nas amostras M1, M2 e M3. A figura 75 (c) mostra os grãos recristalizados a partir de um grão que se deformou, notando-se a linha vermelha que aparece na figura, que delimita o grão de origem. Salienta-se, no entanto, que a feição apresentada na figura 75 (c) representa um extremo de recristalização. De modo geral, nas rochas M1, M2 e M3 os grãos recristalizados ocorrem apenas nas bordas do grão de origem, conforme evidencia a figura 75 (d).

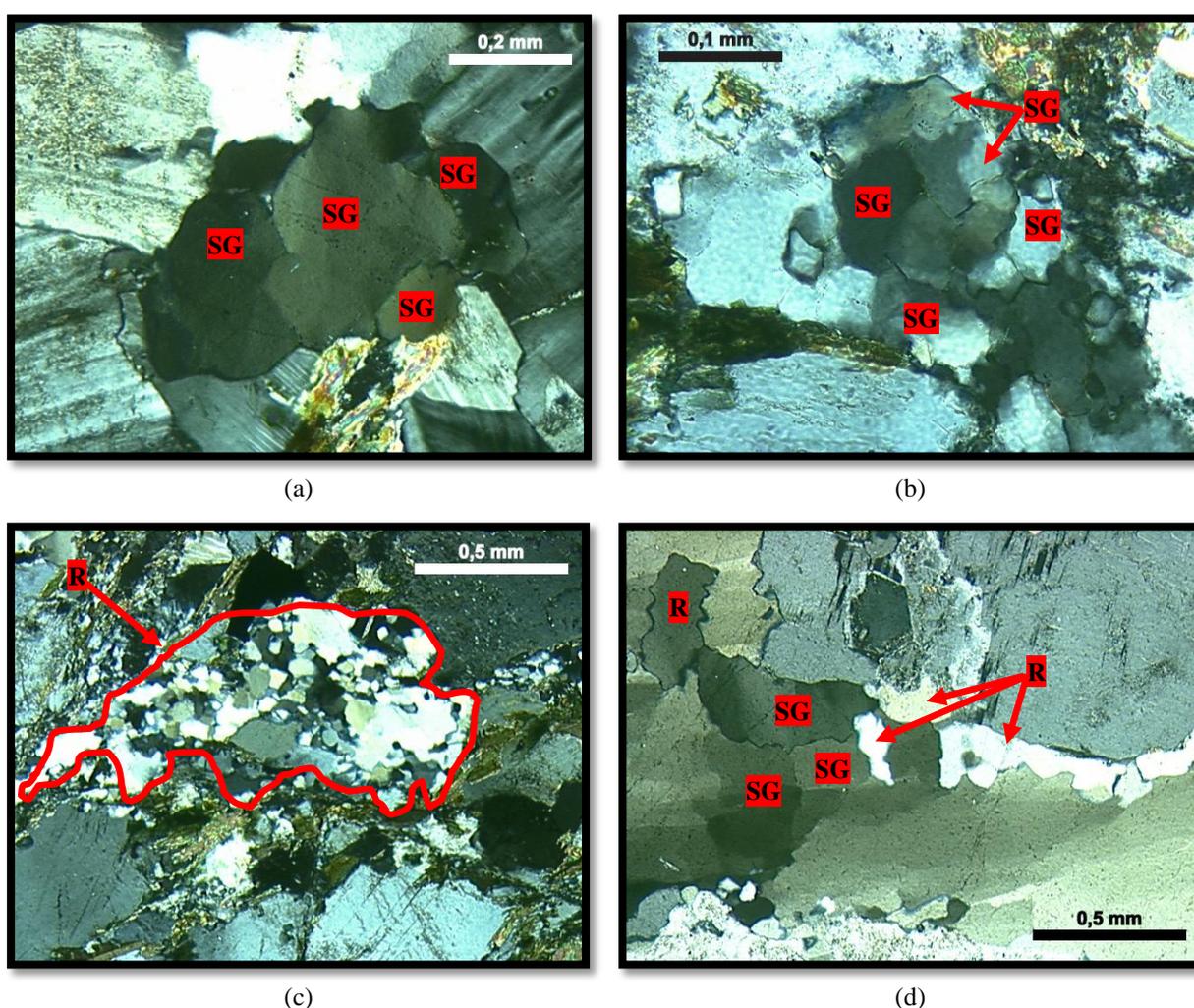


Figura 75: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando as feições dos graus 3 e 4 de deformação do quartzo, onde SG= subgrão, R= recristalizado. (a) (b) grau 3; (c) (d) grau 4

A fim de avaliar se nos grãos com graus 1 e 2 de deformação ocorre a formação de paredes que fragilizam o grão e propiciam ou aumento da reatividade do quartzo, realizaram-se análises através de MET. Tais análises mostraram que tanto grãos com extinção ondulante leve (grau 1), quanto grãos com intensa extinção ondulante, com formação de bandas no grão (grau 2), possuem regiões onde o grão tende a se subdividir. A avaliação do grão com grau 1 pode ser visualizada através da figura 76.

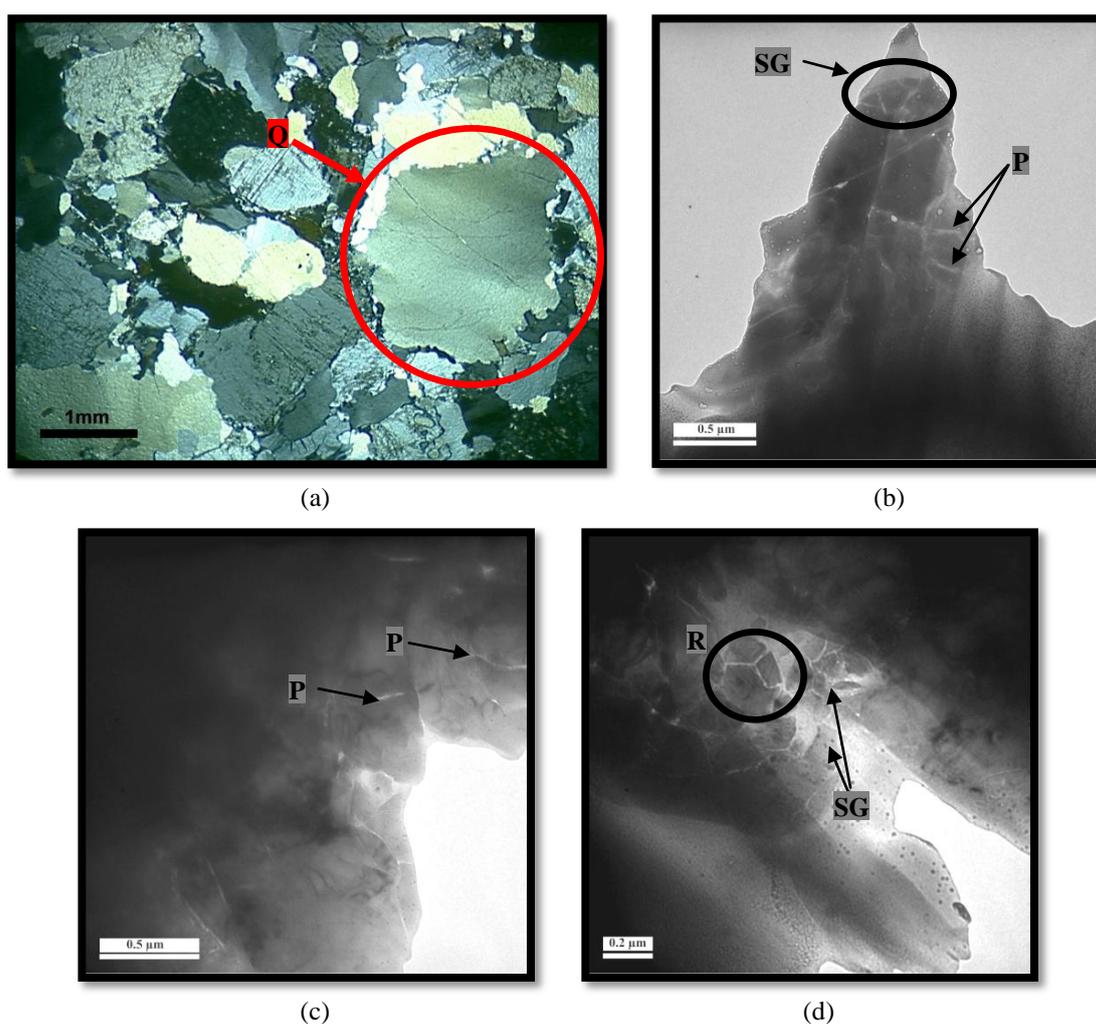


Figura 76: micrografias evidenciando a formação de paredes de deformação e subgrãos no grão de quartzo com deformação grau 1, onde Q= quartzo, SG= subgrãos, P= paredes de deformação, R= grãos recristalizados. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando grão com extinção ondulante leve (grau 1), ampliação 1,6x; (b) (c) (d) micrografias obtidas através de MET evidenciando a formação de subgrãos, paredes de deslocação e grãos recristalizados, com junções trípticas, formando grãos poligonais, ampliação 50.000x, 60.000x e 75.000x

Observando-se um grão com leve extinção ondulante através de MET verificou-se que este possui regiões onde se formam paredes de deslocação (figuras 76 (b) e 76 (c)). Segundo Putnis (1992), a deslocação é uma pequena linha defeituosa na qual o plano de átomos se ‘quebra’ dentro do cristal. As linhas (paredes) de deslocação são definidas pela borda dos planos de átomos defeituosos. O autor explica que quando o cristal sofre tensões, deslocações são geradas fazendo com que seus planos de átomos se movimentem e acabem quebrando.

De qualquer maneira há que se salientar que estas ‘quebras’ nos planos atômicos não foram muito freqüentes nas análises do grão de quartzo com deformação de grau 1 em MET. Entretanto, conforme mostram a figura 76 (b) e 76 (d), em alguns locais foi possível observar, inclusive, a formação de subgrãos. Isto mostra que mesmo num grão com pouca deformação existem caminhos internos propensos a reagir com a solução alcalina dos poros do concreto e desencadear a RAA.

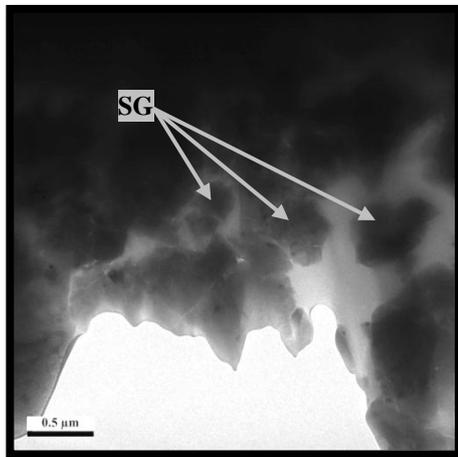
Na figura 76 (d) chama muita atenção a feição de grão de quartzo recristalizado que foi observada, já que no grão analisado a deformação ainda é muito pequena. Reconhece-se a completa recristalização em função da formação de cristais com faces perfeitamente hexagonais à 120°. No sistema cristalino hexagonal, do qual o quartzo faz parte, existem três eixos de simetria, separados entre si por ângulos de 120° em todos os comprimentos (WENK; BULAKH, 2004).

As análises através de MET, apresentadas na figura 77, mostram que podem existir micro a nanoestruturas defeituosas num grão aparentemente com pouquíssima deformação em microscopia ótica (figura 77 (a)). Com o crescimento da deformação a densidade de microestruturas defeituosas permite o acoplamento dos hidróxidos alcalinos e a quebra das ligações Si-O-Si, formando sítios amorfos dentro dos grãos de quartzo.

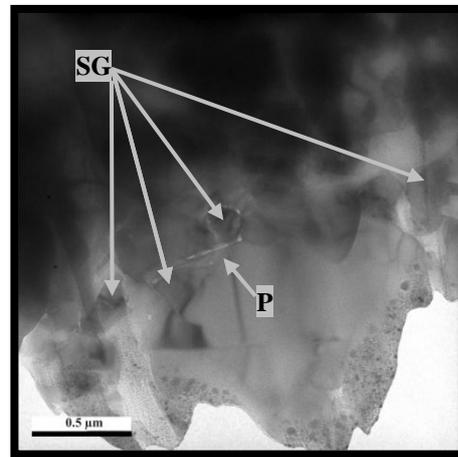
O aumento na densidade de deslocações foi percebido nas análises feitas em MET com o grão de quartzo com deformação grau 2 (figura 77 (a)). Este grão está intensamente deformado, apresenta forte extinção ondulante e bandas de deformação. Passchier e Trow (1994) explicam a formação das bandas dizendo que ao sofrer tensões ocorrem deslocações no grão que tendem a se concentrar em zonas planares, fazendo com que diminua a densidade de deslocação nas outras partes do grão de quartzo. Em microscopia ótica isso é observado através cristais com zonas de extinção distinta. A transição de uma zona para outra é chamada banda de deformação.



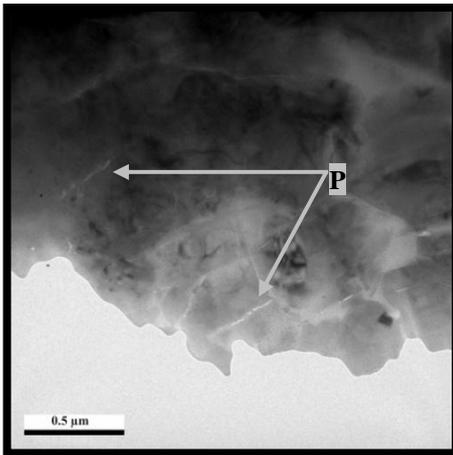
(a)



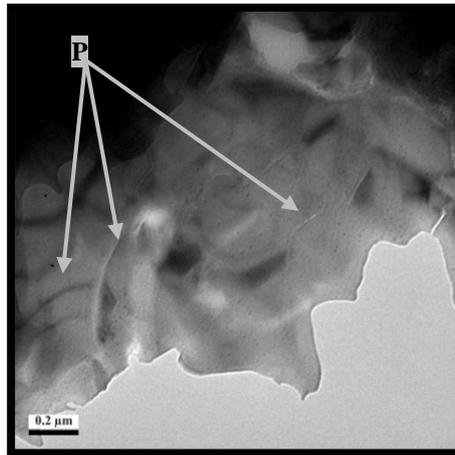
(b)



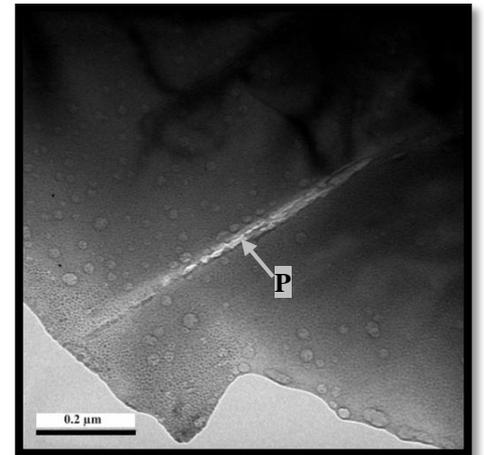
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 77: micrografias evidenciando a formação de paredes de deformação e subgrãos no grão de quartzo com deformação grau 2, onde Q= quartzo, SG= subgrãos, P= paredes de deformação. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado mostrando grão com forte extinção ondulante (grau 2), ampliação 5x; (b) (c) micrografias obtidas através de MET evidenciando a formação de subgrãos, ampliação 40.000x e 60.000x; (d) (e) (f) micrografias obtidas através de MET evidenciando a formação paredes de deslocação, ampliação 60.000x, 75.000x e 150.000x

Os subgrãos observados nas micrografias das figuras 77 (b) e 77 (c) foram identificados em maiores proporções na amostra com grau 2 de deformação, o que é resultado do aumento nos defeitos na estrutura cristalina desse grão. O mesmo ocorreu com as paredes de deslocação que se mostraram disseminadas em todas as regiões analisadas. Wenk *et al.* (2008) compararam a densidade de deslocação de grãos de quartzo com distintos graus de deformação e, assim como no presente estudo, constataram que a crescente deformação dos grãos implica no aumento de paredes de deslocação.

Wenk *et al.* (2008) também chamam atenção para a presença de franjas de deslocação quando a deformação do grão é muito intensa. Putnis (1992) explica que o aparecimento de franjas de deslocação dificulta a visualização das paredes de deslocação. Segundo o autor, as franjas mostram a **intensa desordem da estrutura cristalina**, contudo, salienta que muitas vezes podem ser confundidas com franjas de espessura, que refletem a espessura inadequada do grão para observação em MET. No presente estudo foram observadas franjas em algumas regiões, contudo, não foi possível definir se estas eram resultado de desordem estrutural ou diferença de espessura da região de análise.

Sendo assim, de acordo com a caracterização dos graus de deformação dos grãos de quartzo nas rochas M1, M2 e M3, qualquer grão possui defeitos que propiciam a ocorrência da RAA, ou seja, regiões que permitem a entrada dos hidróxidos alcalinos. Os grãos pouco deformados possuem paredes de deslocação e, também, subgrãos, que não são visíveis com aumentos de microscopia ótica. Quanto mais deformados os grãos, maior o número de defeitos na estrutura cristalina, até que, ao recrystalizar, ocorre a total recuperação do quartzo, que fica isento de deformações.

Um bom exemplo de como ocorre a penetração dos hidróxidos alcalinos nos grãos de quartzo, promovendo a RAA, é ilustrado a seguir através das micrografias publicadas por Mesquita (1996). A autora estudou a alteração metamórfico-hidrotermal do quartzo na natureza e verificou que a presença de paredes de deslocação nos grãos permite a entrada de fluidos que alteram o quartzo (figuras 78 (b) e 78 (c)). Entretanto, em grãos recrystalizados, não se observam inclusões fluidas (figuras 78 (d) e 78 (e)), ou seja, nesses grãos não há caminhos para a penetração dos fluidos.

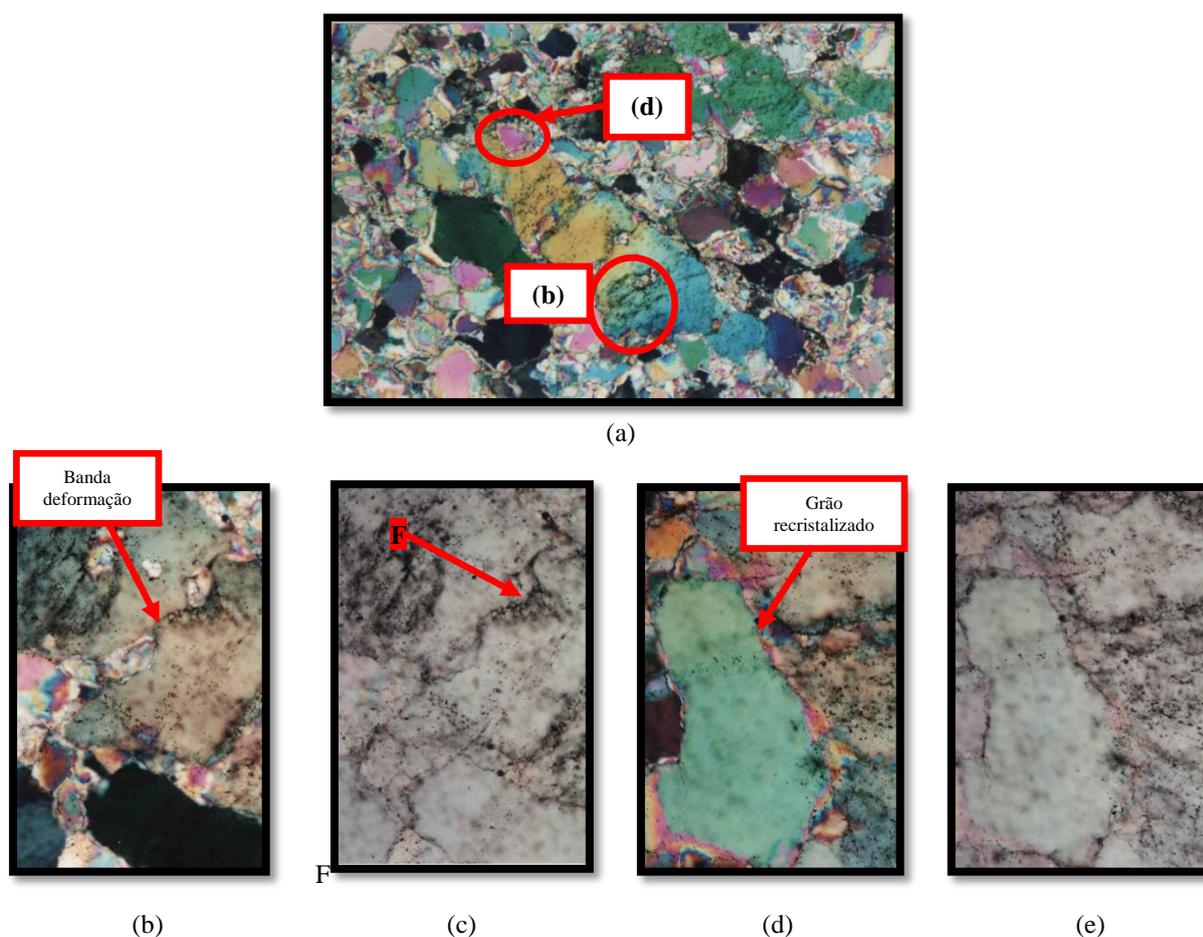


Figura 78: micrografias obtidas através de microscopia ótica evidenciando a presença de inclusões fluidas nos grãos de quartzo deformados, onde F=fluido. (a) micrografia da região contendo quartzo deformado e recristalizado, polarizador cruzado; (b) (c) grão de quartzo deformado com inclusões nas bandas de deformação, polarizador cruzado e luz natural; (d) (e) grão de quartzo recristalizado sem inclusões fluidas, polarizador cruzado e luz natural (adaptado de MESQUITA, 1996)

5.3 AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA

A fim de entender a influência da deformação do quartzo no desenvolvimento da RAA foi realizada avaliação do potencial de expansão das rochas M1, M2 e M3, bem como do potencial de dissolução de sílica dos grãos com diferentes graus de deformação. As avaliações feitas serão apresentadas e discutidas na sequência deste item do trabalho.

5.3.1 Avaliação do potencial de expansão

O ensaio acelerado das barras de argamassa, normalizado pela NBR 15577-4, permite observar e classificar o potencial reativo dos agregados de maneira relativamente rápida.

Por este motivo, é o mais largamente utilizado no Brasil para avaliar as rochas quanto a sua reatividade e, no presente estudo, também foi escolhido para avaliar o potencial de **expansão** das rochas M1, M2 e M3.

A figura 79 apresenta as expansões médias medidas ao longo do tempo de ensaio, salientando-se que as leituras realizadas estão discriminadas no APÊNDICE D. Tal figura mostra que as expansões das três rochas aos 30 dias, idade estabelecida pela NBR 15577-4 para classificação da potencialidade reativa dos agregados, são inferiores a 0,19%. Logo, M1, M2 e M3 são potencialmente inócuas segundo a referida norma.

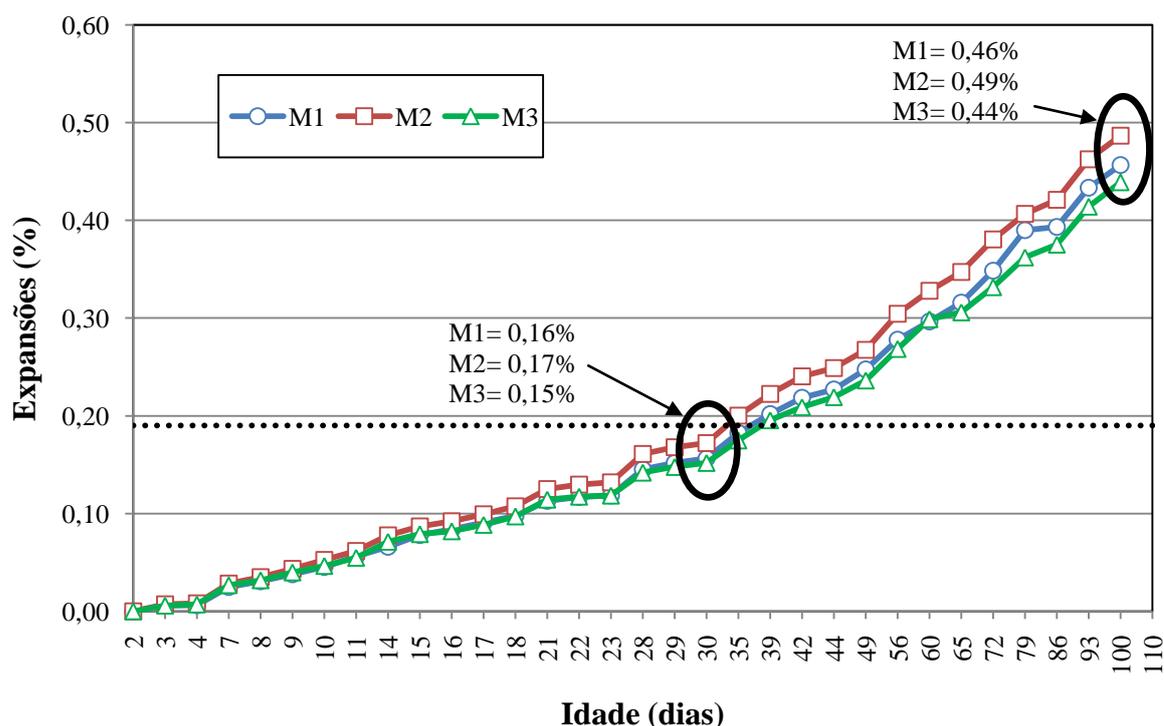


Figura 79: expansão das rochas M1, M2 e M3 ao longo do tempo no ensaio da NBR 15577-4

Com o prosseguimento das leituras verificou-se que em torno dos 38 dias as rochas M1, M2 e M3 apresentaram expansões superiores a 0,19%. Esse comportamento é bastante comum quando a sílica envolvida na reação provém do quartzo deformado, pois esse mineral demora

mais para reagir. Nesse sentido cita-se o trabalho de Valduga (2007), em que a autora mostra que as rochas graníticas demoram mais para atingir expansões consideradas deletérias, e o estudo realizado por Hasparyk *et al.* (2008) mostrando que, aos 30 dias, as rochas graníticas brasileiras reativas expandem, em média, 0,17% no ensaio acelerado.

Aliando-se essas constatações ao fato de que através da caracterização dos graus de deformação dos grãos de quartzo, apresentado no item 5.2.1, constatou-se que mesmo grãos pouco deformados apresentam caminhos defeituosos que permitem a reação com os hidróxidos alcalinos, enfatiza-se que os resultados da NBR 15577-4 aos 30 dias não devem ser tomados como únicos para classificar a potencialidade reativa de um agregado.

Através do ensaio, observa-se, ainda, que as curvas que correlacionam as expansões ao longo do tempo para as três rochas denotam um comportamento com crescimento contínuo das expansões, sem tendência de estabilização até os 100 dias de exposição das amostras à solução alcalina. Isso sugere que se tenha cautela com o uso desses agregados, pois o comportamento no ensaio de expansão aos 30 dias pode ter sido mascarado pela demora de desenvolvimento da reação pelos grãos de quartzo, apesar da agressividade do meio.

Outro aspecto que chama atenção na figura 79 é a semelhança entre expansões obtidas com as amostras M1, M2 e M3. De certa forma, tal semelhança já era esperada, uma vez que, conforme o que vem sendo relatado neste trabalho, tais amostras foram coletadas no mesmo afloramento rochoso, possuem os mesmos minerais e a mesma composição química. O que diferencia M1, M2 e M3 é o grau de deformação, especialmente no que diz respeito ao quartzo, que é o principal responsável pela ocorrência da RAA.

Contudo, mesmo sendo **muito** semelhantes, as diferenças entre as expansões das rochas M1, M2 e M3 mantiveram-se constantes do início ao fim do ensaio. Indicando que M2 expandiu/reagiu mais intensamente que M1, que por sua vez expandiu mais do que M3.

A fim de avaliar se as diferenças entre as expansões das rochas M1, M2 e M3 podem ser consideradas significativas e, desta forma, utilizadas como referencial do potencial de expansão dos agregados no decorrer deste trabalho, realizou-se a análise da variância (ANOVA) da influência das idade e do tipo de rocha nas expansões do ensaio da NBR 15577-4. A tabela 14 apresenta os resultados obtidos com esta análise que foi feita a partir dos dados do APÊNDICE D.

Tabela 14: análise da variância dos efeitos intervenientes nas expansões do ensaio da NBR 15577-4

Efeito	Graus de liberdade	Média quadrada	Graus de liberdade do erro	Média quadrada do erro	Teste F	Valor-p	Significância
Tipo de rocha	2	0,010758	192	0,000052	207,357	0,0000	Significativo
Idade	31	0,164571	192	0,000052	3.174,891	0,0000	Significativo
Tipo de rocha x idade	62	0,000208	192	0,000052	4,016	0,0000	Significativo

Teste F= média quadrada do tipo de cimento/média quadrada do erro;

Valor-p= probabilidade, distribuição t de Student.

Significativo= valor-p menor ou igual a 0,05

Segundo as análises de variância apresentadas na tabela 14, as expansões no ensaio acelerado das barras de argamassa para as rochas M1, M2 e M3 podem ser consideradas distintas entre si. A tabela 14 mostra que o tipo de rocha influencia significativamente as expansões, assim como a idade e a interação entre o tipo de rocha e a idade. A figura 80 foi obtido a partir da análise do efeito do tipo de rocha nas expansões globais do ensaio da NBR 15577-4 ao longo do tempo analisado (100 dias).

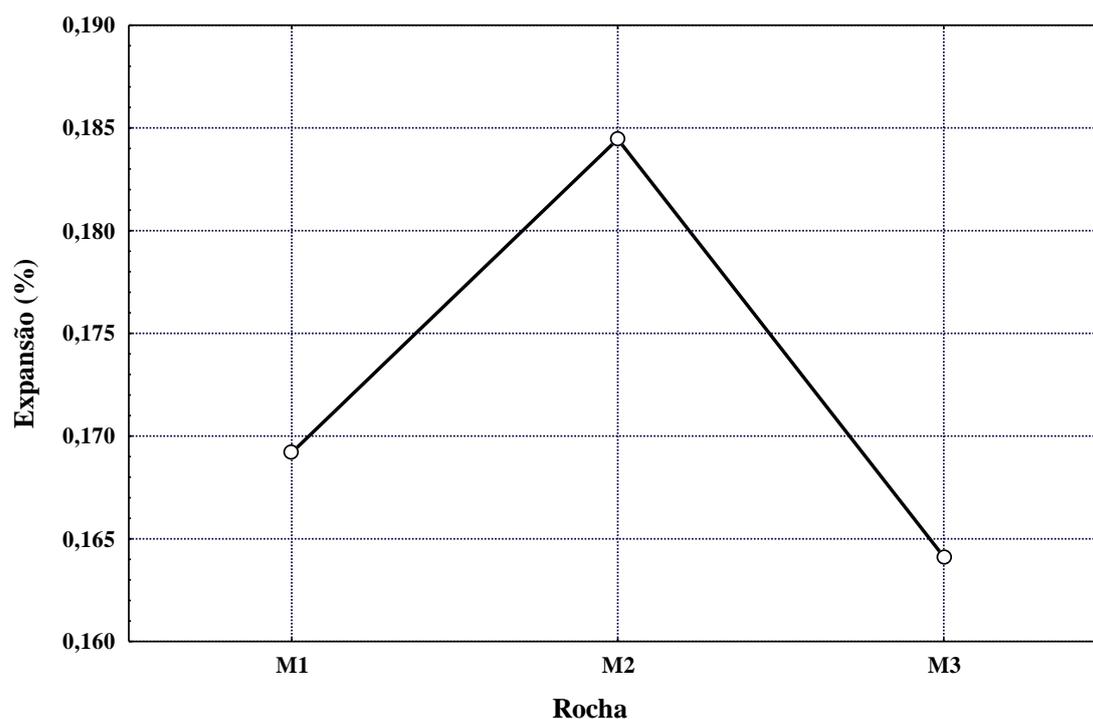


Figura 80: Efeito do tipo de rocha nas expansões do ensaio da NBR 15577-4

Considerando-se a caracterização do grau de deformação das amostras (item 5.2.1) verifica-se que na rocha M2, que foi a que mais expandiu no ensaio acelerado, o percentual de grãos com forte extinção ondulante e formação de bandas de deformação (grau 2) é preponderante sobre as demais.

Na figura 81 evidencia-se o papel dos grãos com grau 2 de deformação para as expansões aos 30 dias. Deve-se observar, ainda, a contribuição dos grãos com grau de deformação 1 (extinção ondulante leve). Nota-se que M3 possui um percentual 15% maior que M1 de grãos com grau 2 de deformação, porém as expansões medidas para M3 foram inferiores às expansões de M1. Isso mostra que os grãos pouco deformados, predominantes no agregado M1, contribuíram efetivamente para sua expansão, juntamente com os grãos grau 2, que também são expressivos nessa amostra. De acordo com as análises em MET realizadas nos grãos com grau de deformação 1 e 2, nesses grãos existem paredes de deslocação e subgrãos que não são identificáveis em microscopia ótica, participando assim da reação.

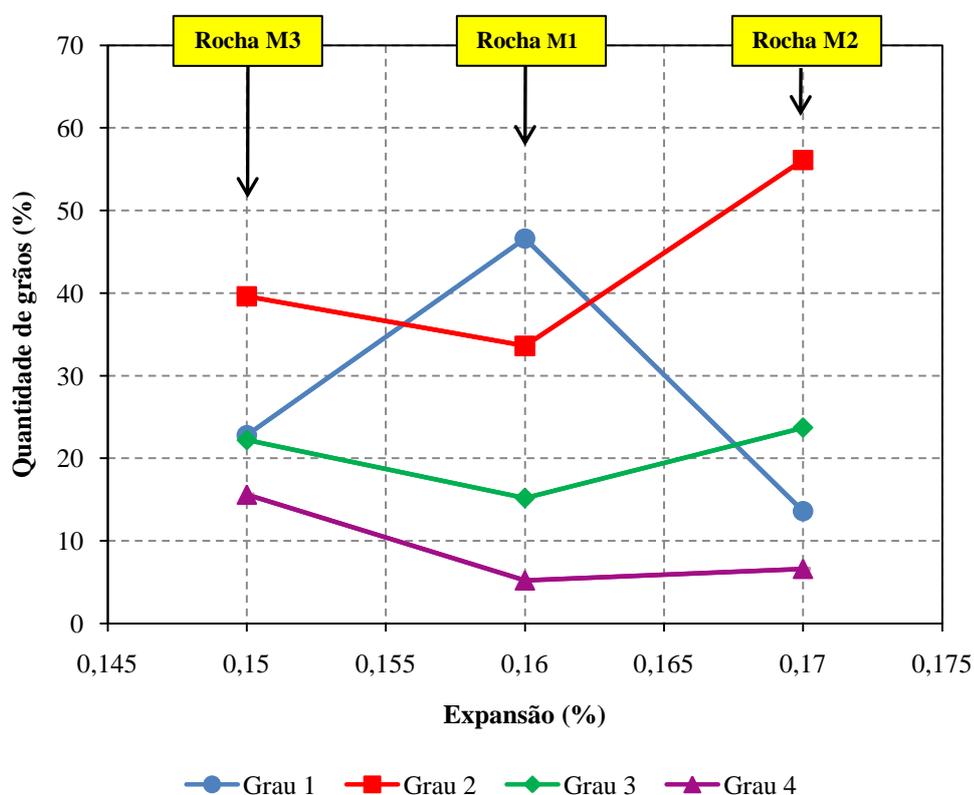


Figura 81: relação entre as expansões do ensaio da NBR 15577-4 aos 30 dias e os graus de deformação dos grãos de quartzo

Conforme mostra a figura 81, a rocha M3 possui as maiores quantidades de grãos com graus 3 e 4, que são os grãos resultantes de deformações mais intensas sofridas pela rocha. No entanto, suas expansões foram inferiores às demais, o que evidencia que os grãos recristalizados (grau 4) demoram mais para reagir, uma vez que sua deformação compara-se ao grau 0 (nenhuma deformação do grão). Contudo, de acordo com o que relata a literatura (KRAUSKOPF, 1972; KNAUSS; WOLERY, 1988), ao longo do tempo e sob condições de elevada alcalinidade (caso do concreto), mesmo os grãos sem deformação tendem a se desestabilizar e reagir com os hidróxidos alcalinos.

A fim de avaliar a influência de cada grau de deformação do quartzo nas expansões do ensaio acelerado da NBR 15577-4 realizou-se uma análise de regressão linear múltipla, através do *software* Statgraphics. A partir da quantificação dos grãos de quartzo para cada grau de deformação e das expansões obtidas aos 30 dias para as rochas M1, M2 e M3 foi possível obter uma equação que representa um modelo de comportamento para essas rochas. Esta idade foi adotada por ser a idade estabelecida pela NBR 15577-4 para a classificação da reatividade de um agregado.

A equação 07 foi obtida com o ajuste, bem como o respectivo coeficiente de determinação. Através desta equação foram recalculadas as expansões. Os valores foram obtidos variando-se cada grau de deformação isoladamente e mantendo constantes os demais. Sendo assim, foi possível traçar as curvas de comportamento para cada grau de deformação, conforme ilustra a figura 82, salienta-se, no entanto, que o modelo representa 70% dos dados obtidos experimentalmente (R^2).

Equação 07:

$$\text{Expansão} = \left(0,156516 - \frac{0,147477}{\text{Grau 1}}\right) + \left((0,151112E^{-9}) \times (\text{Grau 2})^4\right) + \left((2,06331E^{-8}) \times (\text{Grau 3})^4\right) - \left((3,40005E^{-8}) \times (\text{Grau 4})^4\right)$$

Coefficiente de determinação (R^2)= 70%

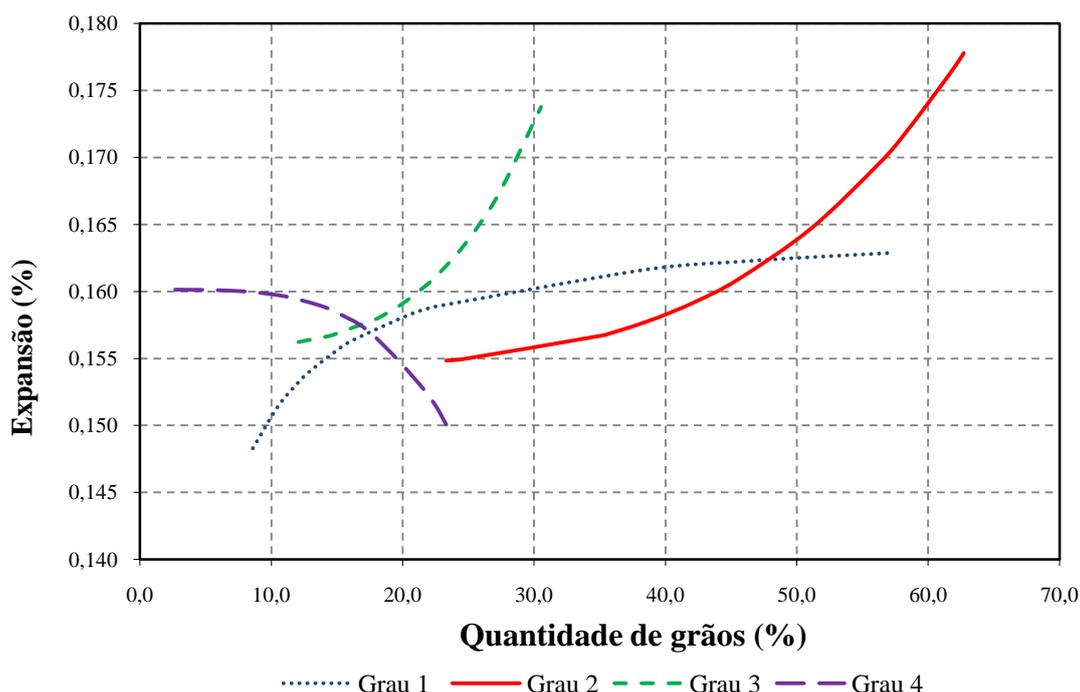


Figura 82: curvas representativas do modelo obtido para avaliar a influência dos graus de deformação do quartzo nas expansões da RAA para as rochas M1, M2 e M3

As curvas obtidas através do modelo representado pela equação 07 são válidas apenas para interpretar o comportamento das expansões em função dos graus de deformação das rochas M1, M2 e M3. Sendo assim, observando-se a figura 82, nota-se que as expansões menores são resultantes da presença de grãos pouco deformados (grau 1) e recristalizados. Na figura observa-se a importância dos graus 2 e 3 para o crescimento das expansões. O que ocorre, aparentemente, é que o grau 3 de deformação representa uma transição de comportamento entre o grau 2 e o grau 4. A curva obtida para o grau 4 mostra que as menores expansões foram obtidas quando prevaleceram os grãos recristalizados, no entanto, a variação da quantidade de grãos com essa deformação foi muito pequena para esse grau de deformação (de 2% a 23%).

5.3.2 Avaliação do potencial de dissolução de sílica

A avaliação do potencial de dissolução de sílica do quartzo presente nas rochas M1, M2 e M3 foi feita a partir da separação do quartzo presente nessas amostras, conforme descrito no item 3.2.1, do capítulo 3. Por isso as amostras serão chamadas de QM1, QM2 e QM3. Também será avaliado o papel dos feldspatos para a dissolução de sílica e redução da alcalinidade. As amostras de feldspato serão chamadas de FM1, FM2 e FM3.

A fim de avaliar se a separação dos grãos de quartzo e feldspatos das rochas foi eficiente, ou seja, se realmente os grãos separados são **preponderantemente** quartzo ou feldspatos, realizou-se a quantificação das fases presentes nas amostras através de refinamento Rietveld.

Os resultados obtidos com o refinamento podem ser visualizados através da tabela 15. Nesta tabela é possível observar que as amostras de quartzo e feldspato (microclínio e albita) das três rochas possuem ‘contaminação’ por outros minerais. Isso já era esperado, uma vez que existem grãos onde os minerais ficam agrupados. Para a amostra QM3 e FM1 a contaminação constatada foi maior, chegando a aproximadamente 30% e 25%, respectivamente. De qualquer maneira, mesmo nestas amostras, predominam os grãos de quartzo em QM3 e feldspato em FM1.

Tabela 15: quantificação das fases presentes nas amostras de quartzo e feldspatos, através de refinamento Rietveld

Amostras quartzo	Fases identificadas	GOF*	Amostras feldspatos	Fases identificadas	GOF
QM1	Quartzo – 95,10% Albita – 2,33% Microclínio – 2,43% Biotita – 0,15%	1,87	FM1	Quartzo – 25,07% Albita – 20,99% Microclínio – 53,94%	1,62
QM2	Quartzo – 98,51% Albita – 1,21% Microclínio – 0,28%	1,80	FM2	Quartzo – 15,39% Albita – 9,90% Microclínio – 74,72%	1,73
QM3	Quartzo – 69,63% Albita – 24,26% Microclínio – 2,01% Biotita – 4,11%	1,98	FM3	Quartzo – 4,67% Albita – 17,25% Microclínio – 78,08%	2,00

*GOF (Goodness off it)= índice de qualidade do refinamento – deve ser menor que 5,00.

Os valores do GOF obtidos com o refinamento Rietveld indicam que os refinamentos podem ser considerados adequados (tabela 15). A qualidade dos refinamentos também pode ser observada graficamente, através das figuras 83 e 84. Nestas figuras os pontos em vermelho representam os dados obtidos experimentalmente e a linha preta denota os dados calculados pelo refinamento. O erro das análises é expresso através da linha azul.

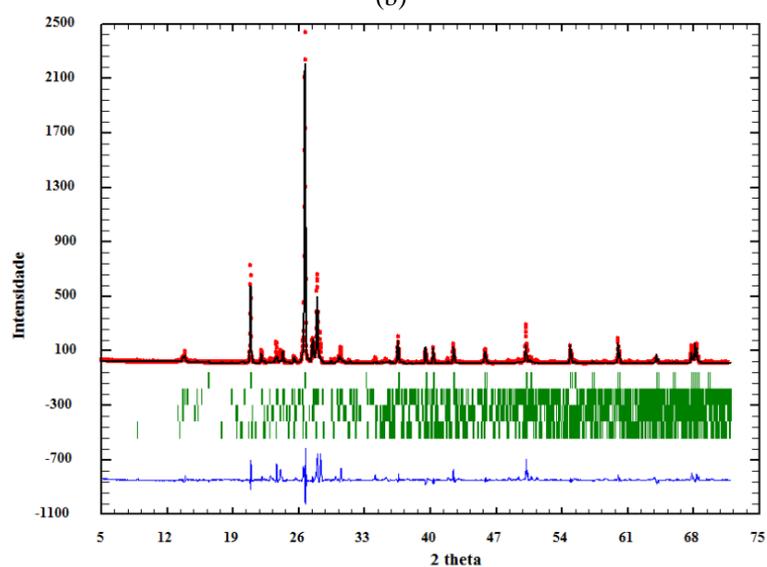
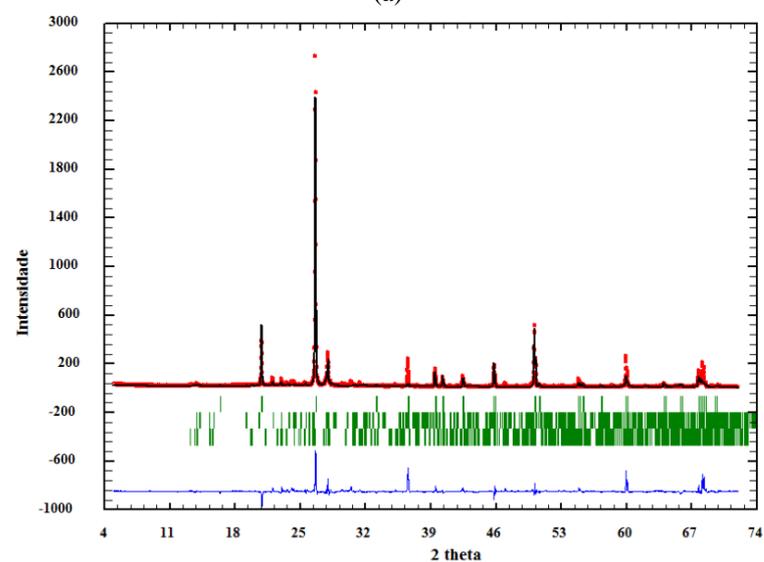
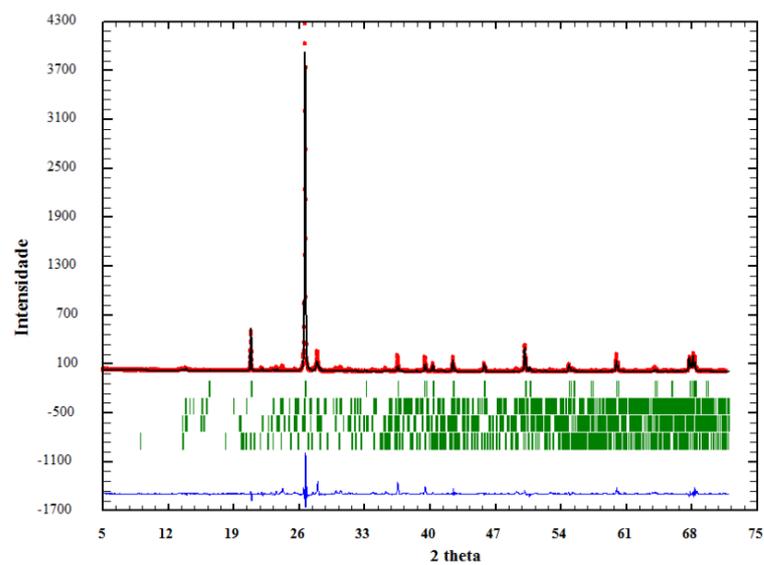


Figura 83: ajuste através de refinamento Rietveld. (a) QM1; (b) QM2; (c) QM3

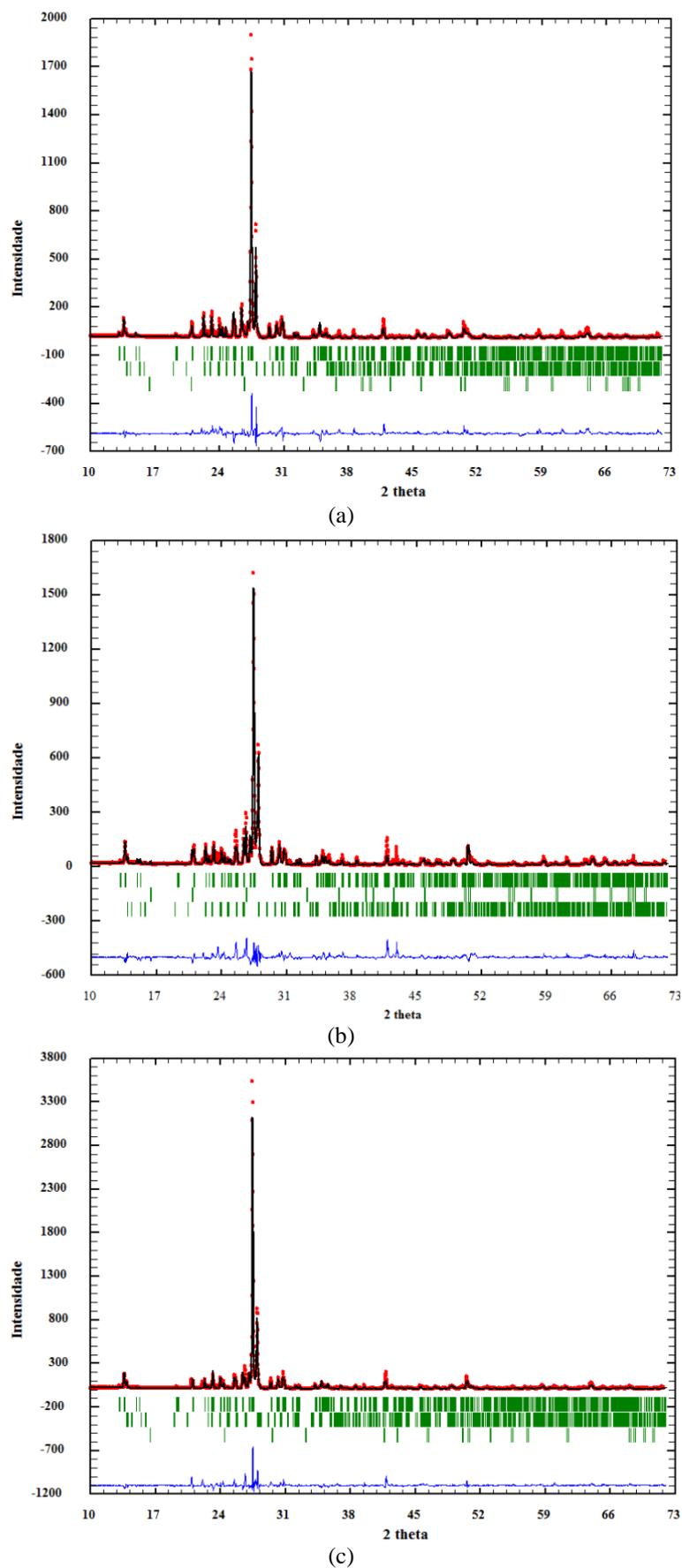


Figura 84: ajuste através de refinamento Rietveld. (a) FM1; (b) FM2; (c) FM3

Os refinamentos Rietveld das amostras submetidas ao ataque alcalino descrito no item 3.2.2 não mostraram mudanças em relação às amostras puras e, por isso, não serão apresentados neste trabalho. Pensa-se que estas mudanças não foram observadas em função da filtragem realizada após o ataque com KOH, para retirada do reagente. Esse procedimento pode ter dissolvido a maior parte dos produtos da reação. Não foram obtidos espectros adequados para realização do refinamento quando as amostras não foram filtradas, isso porque o KOH presente é um reagente muito higroscópico, fazendo com que as amostras não permaneçam numa condição completamente seca fora da estufa. Quando as amostras estão úmidas não é possível distribuí-las adequadamente no porta-amostra para realização da DRX.

Os ensaios utilizados para avaliar a dissolução de sílica seguiram o preconizado pela norma ASTM C 289/1994 que, inclusive, foi desenvolvido para classificar a potencialidade reativa dos agregados; e o método do espectrofotômetro visível, normalizado pela NBR 9848/2004, utilizado para quantificar a sílica dissolvida em águas.

As figuras 85 e 86 apresentam os resultados do ensaio da ASTM C 289, onde é possível constatar que, segundo os limites propostos pela referida norma, os grãos de quartzo e feldspatos puros, selecionados a partir das três rochas, são classificados como inócuos.

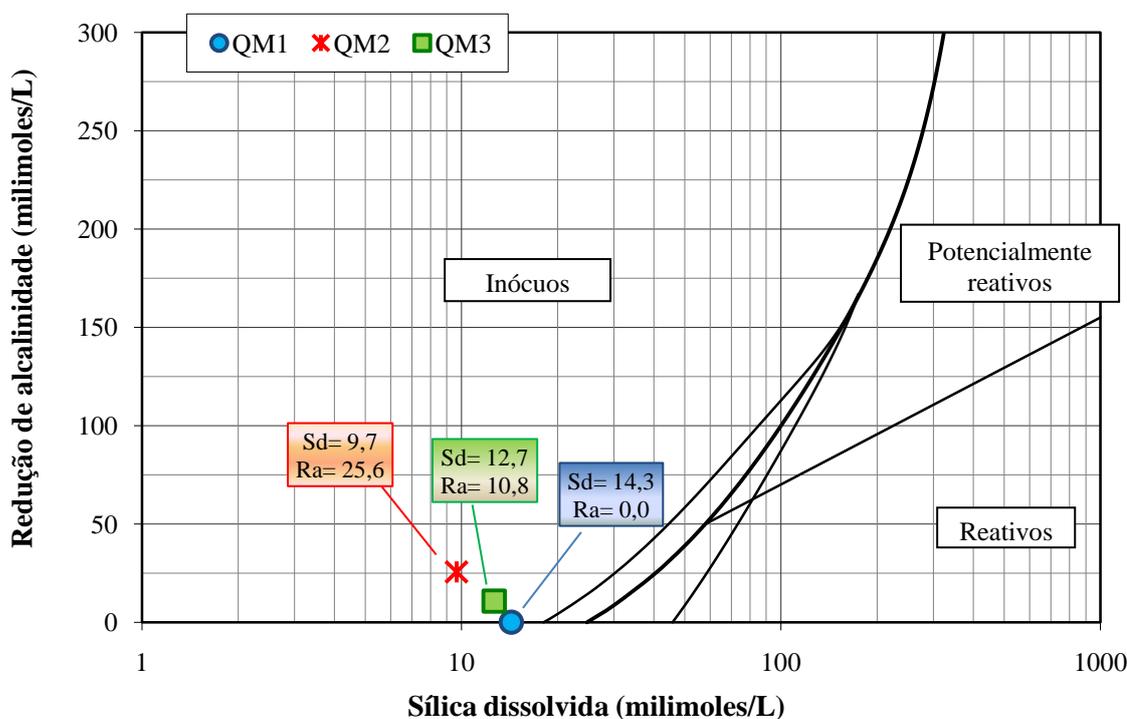


Figura 85: sílica dissolvida (Sd) x redução da alcalinidade (Ra) das amostras de quartzo (ASTM C 289)

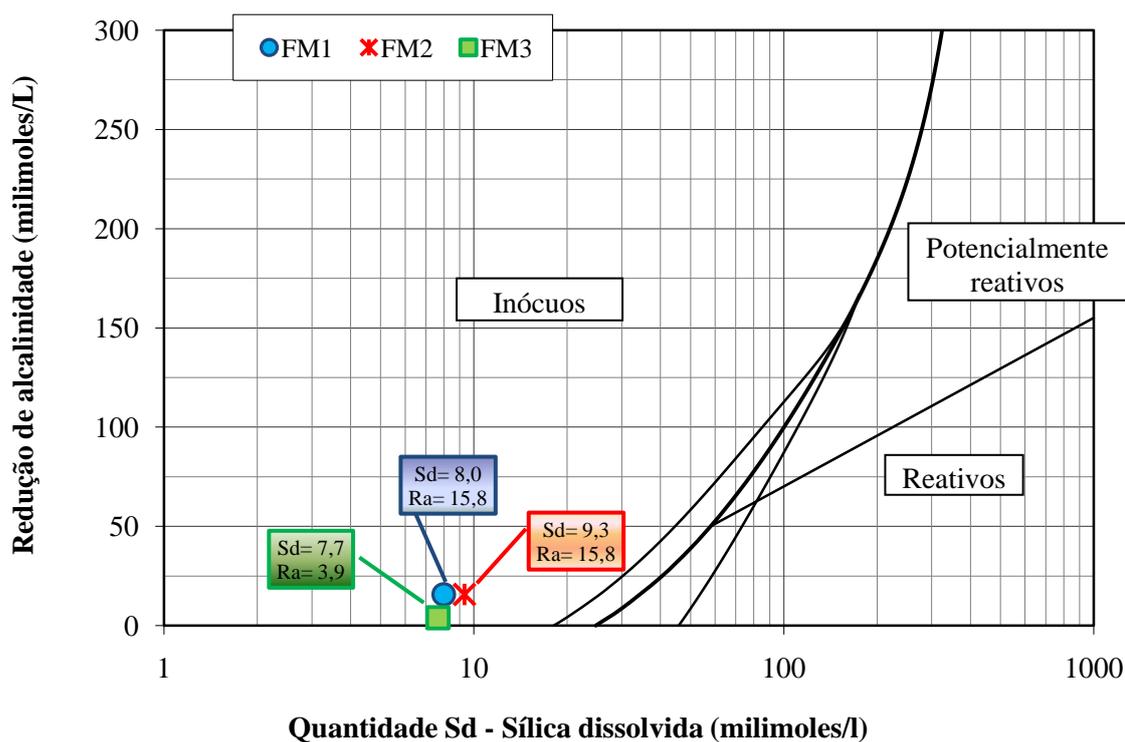


Figura 86: sílica dissolvida (Sd) x redução da alcalinidade (Ra) das amostras de feldspato (ASTM C 289)

No que diz respeito à dissolução de sílica (Sd) e redução da alcalinidade (Ra) das amostras, apresentadas na figura 85, observa-se que a amostra QM1 foi a que apresentou maior dissolução de sílica dentre as três amostras avaliadas (Sd= 14,3milimoles/L, que é equivalente a 63,04 μ g/mL), sendo que nesta amostra não houve redução da alcalinidade, seguida por QM3 (Sd= 12,7milimoles/L, que é equivalente a 55,99 μ g/mL) e QM2 (Sd= 9,7milimoles/L, que é equivalente a 42,76 μ g/mL).

QM2 resultou nas maiores expansões no ensaio da NBR 15577-4, sugerindo que a predominância de grãos com grau 2 de deformação leva a maior reatividade. Entretanto, o ensaio da ASTM C 289 mostra justamente o contrário, pois nesta amostra foi medida a menor dissolução de sílica. Tal comportamento poderia ser explicado em função da quantidade de feldspatos (minerais alcalinos) presente nas amostras QM1, QM2 e QM3. A amostra QM2 é a que possui menor quantidade de feldspatos (albita e microclínio) em sua composição (conforme refinamento Rietveld – tabela 16). Dessa forma, a sílica dissolvida pelo quartzo leva a uma maior redução da alcalinidade da solução que, por consequência, diminui a capacidade de dissolução dos grãos (reduz o pH da solução).

Para a amostra QM3 a presença de maior quantidade de feldspatos provavelmente foi a responsável pela manutenção do pH elevado da solução, uma vez que a sílica dissolvida ficou em torno de 12,7milimoles/L (55,99 μ g/mL). Contudo, mesmo com o elevado pH, os grãos recristalizados (menos propensos a reagir) e os sub-grãos, que somados são predominantes nesta amostra, se mostraram menos suscetíveis à dissolução do que os grãos com pouca deformação (grau 1) presentes na amostra QM1. Os grãos com grau 1 de deformação, segundo o que foi constatado através de MET (item 5.2.1), possuem paredes internas de deslocação que, em microscopia ótica, não podem ser visualizadas, mas que elevam o potencial de reatividade do grão com os hidróxidos alcalinos.

Em relação aos resultados apresentados na figura 86 para o ensaio da ASTM C 189 com as amostras de feldspatos (FM1, FM2 e FM3), nota-se que a dissolução de sílica foi menor do que nas amostras de quartzo (QM1, QM2 e QM3), bem como a redução da alcalinidade. Esse resultado é coerente com o que se espera, já que nas amostras de feldspato a quantidade de sílica livre é menor (corresponde a ‘contaminação’ da amostra pelo mineral quartzo – ver tabela 16), logo, haverá menos dissolução e, por consequência, menor será a redução da alcalinidade. Além disso, a presença predominante de feldspatos ajuda a manter a alcalinidade da solução.

A quantificação da dissolução de sílica dos feldspatos pelo método da ASTM C 289 mostrou que a dissolução da amostra FM2 foi superior às demais, correspondendo a 9,3milimoles/L ou 41,0 μ g/mL. FM1 apresentou dissolução de sílica de 8,0milimoles/L (63,04 μ g/mL). A menor dissolução foi medida para a amostra FM3, que foi de 7,7milimoles/L (63,04 μ g/mL).

De qualquer forma, o ensaio da ASTM C 289, além de não ser confiável na classificação da reatividade dos agregados, também não é **preciso** para avaliar o potencial de dissolução de sílica e redução da alcalinidade. Ressalta-se, neste momento, que a extinta norma NBR 9774 baseava-se no mesmo método de ensaio da ASTM C 289, e foi cancelada justamente por apresentar problemas na forma de avaliar o potencial de reatividade de um agregado.

Porém, no presente estudo, além do método da ASTM C 289, também foi empregado o método do espectrofotômetro visível (NBR 9848) para efetuar correlações a respeito da deformação dos grãos de quartzo e sua capacidade de dissolução em meio alcalino (RAA). Os resultados obtidos com este ensaio para as amostras de quartzo e feldspatos podem ser observados na tabela 16.

Tabela 16: dissolução de sílica pelo método da NBR 9848

Amostra	SiO ₂ dissolvida (µg/mL)
QM1	18,2
QM2	21,2
QM3	6,1
FM1	0,0
FM2	6,1
FM3	0,0

A tabela 16 mostra que a concentração de sílica dissolvida na solução da amostra QM2 foi maior do que nas demais amostras. QM1 ficou em segundo lugar, e QM3 foi a solução com menor quantidade de sílica dissolvida. Tais resultados estão de acordo com o ensaio acelerado de expansão da NBR 15577-4.

Para os feldspatos não foi constatada a presença de sílica dissolvida na solução das amostras FM1 e FM3, mesmo que na amostra FM1 tenha sido constatada a presença de 25% de quartzo, aproximadamente. Para a amostra FM2 a dissolução foi de 6,1µg/mL. Tais resultados obtidos com o ensaio da NBR 9848 para os feldspatos evidenciam que estes minerais têm uma contribuição pequena para a dissolução de sílica e, dessa forma, para a reatividade da rocha. Esta constatação está de acordo com o que relata a literatura a respeito da influência dos feldspatos na RAA. Para exemplificar cita-se o estudo de Leemann e Holzer (2005), que também constataram a baixa dissolução de micas e feldspatos quando submetidos à solução alcalina. Mexias (2000) observou o comportamento na natureza de uma rocha ácida em contato com um fluido alcalino, verificando que o quartzo constituinte foi completamente dissolvido, restando apenas K-feldspatos e micas.

A relação entre os graus de deformação do quartzo de cada amostra e a dissolução de sílica medida no ensaio da NBR 9848 pode ser observada graficamente através da figura 87.

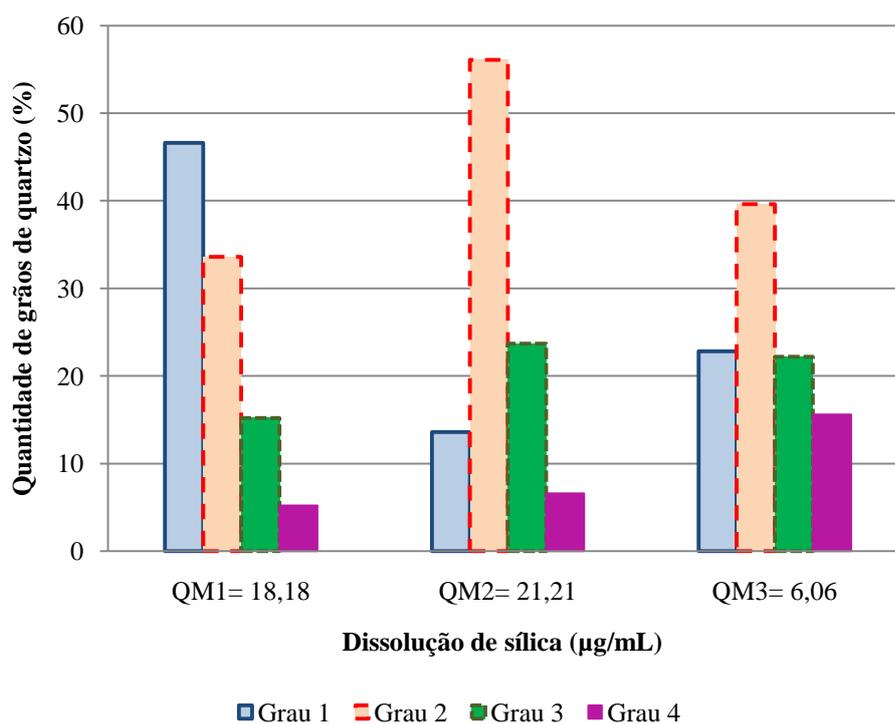


Figura 87: relação entre a dissolução de sílica e a deformação dos grãos quartzo

Segundo a figura 87, os grãos com deformação grau 2 (quartzo com forte extinção ondulante) dissolvem-se mais intensamente, pois estes são os grãos predominantes na amostra QM2, que apresentou maior dissolução de sílica. Os grãos classificados como pouco deformados (grau 1), que apresentam extinção ondulante leve em microscopia ótica, mostraram-se bastante suscetíveis à dissolução, segundo o referido ensaio, pois a amostra QM1 apresentou dissolução superior à amostra mais deformada, QM3. Por sua vez, a amostra QM3 mostrou-se pouco suscetível à dissolução de sílica se comparada as demais, evidenciando que o comportamento dos grãos com grau 3 (sub-grãos) e grau 4 (recristalizados) é semelhante no que diz respeito à RAA, comportamento que também foi verificado pelo ensaio da NBR 15577-4 para esta amostra.

5.3.2.1 Avaliação da dissolução na argamassa

Observando-se a dissolução do quartzo nas argamassas submetidas ao ensaio da NBR 15577-4, através da análise petrográfica, após 100 dias de ensaio, verifica-se que a solução alcalina efetivamente dissolve primeiramente os grãos de quartzo, por meio dos vazios identificados. Conforme ilustra a figura 88, os feldspatos e micas presentes nos fragmentos não são dissolvidos pela solução alcalina.

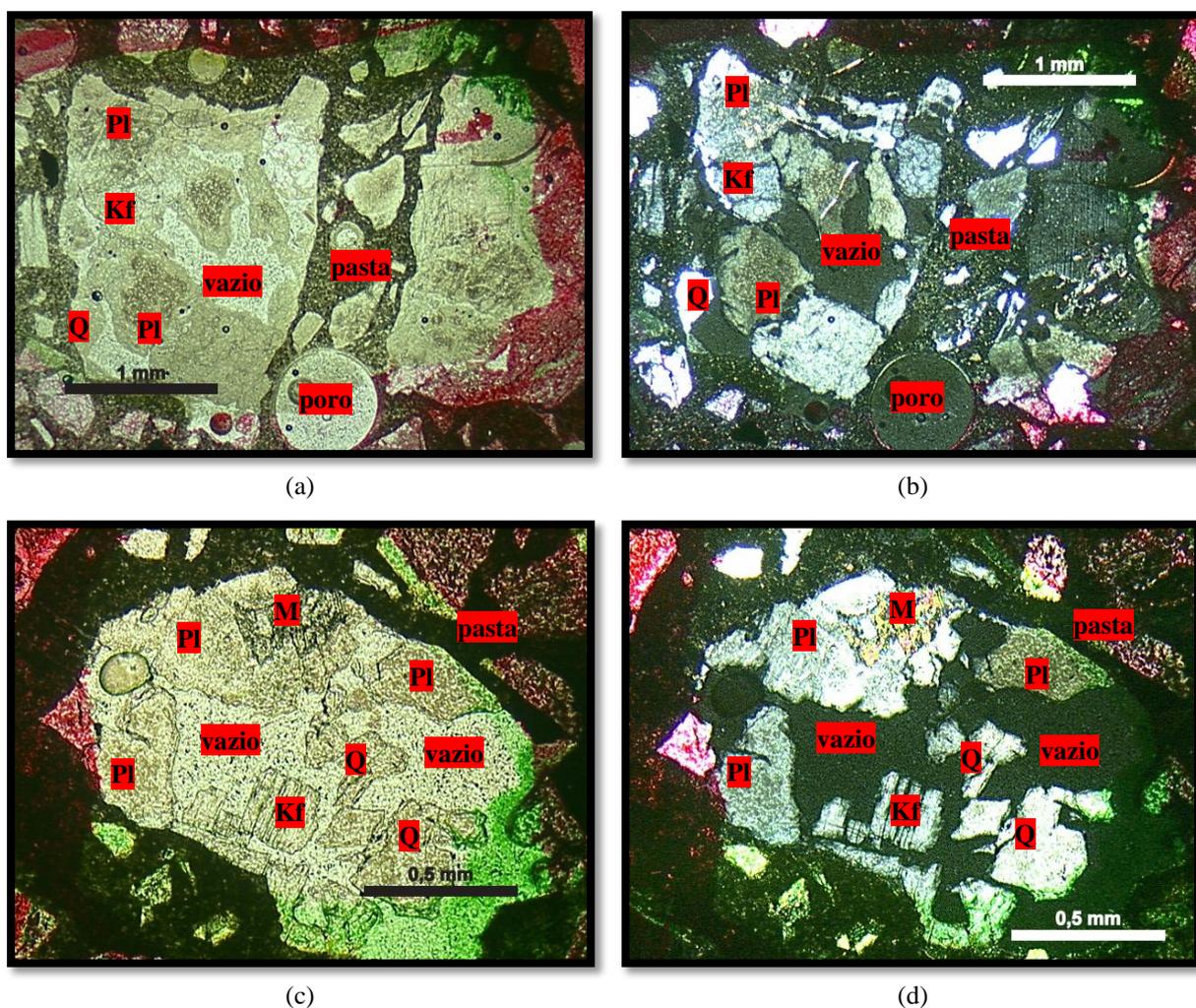


Figura 88: micrografias obtidas através de microscopia ótica evidenciando a dissolução do quartzo nas argamassas submetidas ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo, Pl= plagioclásio, Kf= K-feldspato, M= mica. (a) (b) luz natural e polarizador cruzado, ampliação 2,5x; (c) (d) polarizador cruzado, ampliação 5x

Através de MEV, com auxílio de EDS, foi possível comprovar a predominância dos plagioclásios e K-feldspatos nos fragmentos de rocha expostos à solução alcalina (figuras 89 (a), 89 (b), 89 (f) e 89 (g)). Nas figuras 89 (c) e 89 (e) nota-se, ainda, vazios dentro dos grãos das rochas M1, M2 e M3, que correspondem ao quartzo que foi dissolvido em função da RAA.

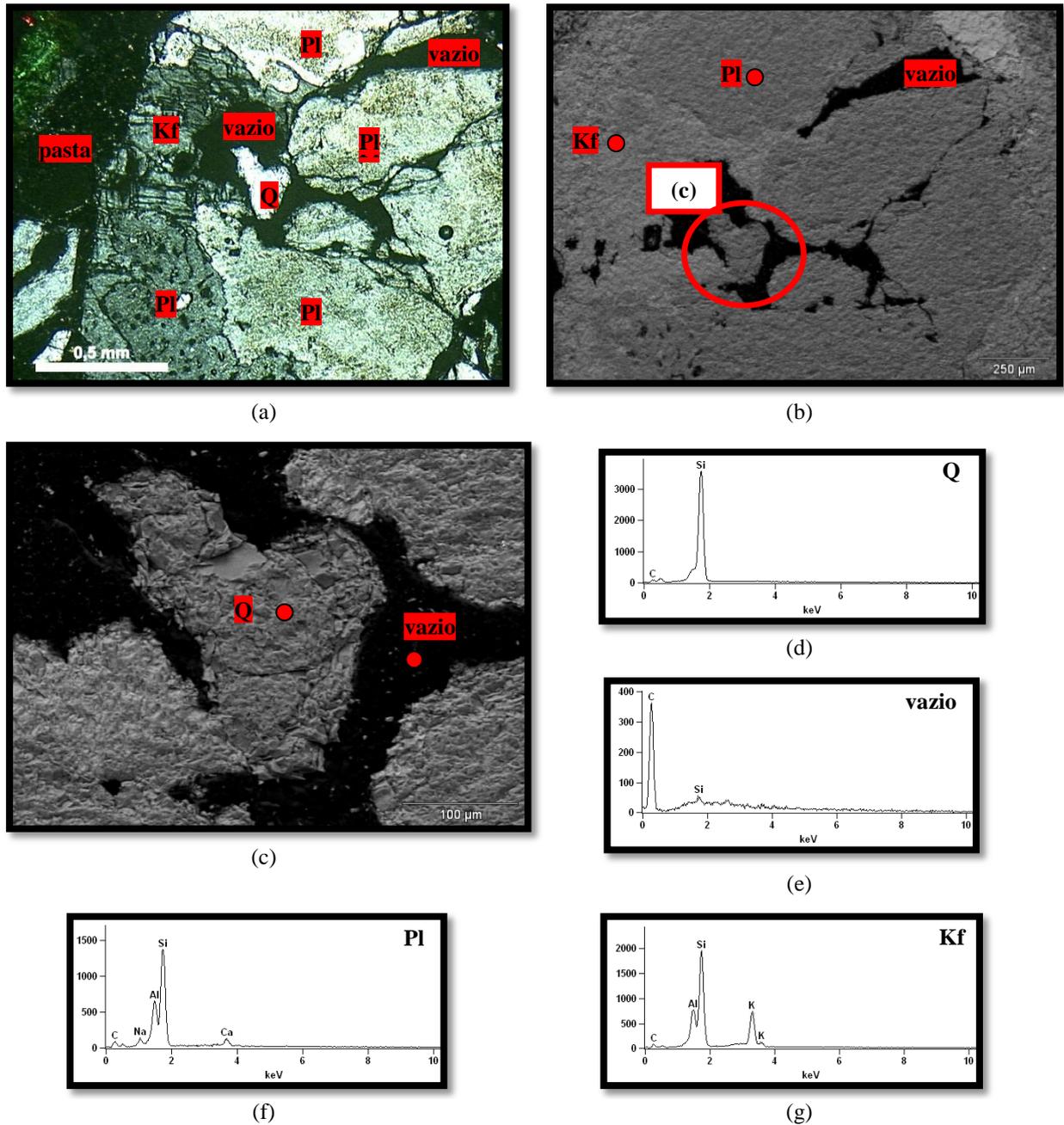


Figura 89: fragmento da rocha disseminado na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Q= quartzo. (a) micrografia obtida em microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha mostrando vazios pelo quartzo dissolvido, ampliação 5x; (b) (c) micrografias obtidas em MEV detalhando quartzo ainda não dissolvido, ampliação 75x e 300x; (d) (e) (f) (g) espectros obtidos por EDS do quartzo, do vazio, do plagioclásio, e do K-feldspato

Nas análises por MEV e EDS efetuadas em argamassas após o ensaio acelerado não foi constatada relação entre o **tamanho** dos grãos de quartzo e seu potencial de dissolução. Muitas vezes grãos pequenos são recristalizados, tendo menor potencial de dissolução. Contudo, verificou-se que a dissolução dos grãos ocorre a partir das paredes internas de

deslocação, ou seja, em grãos deformados. Em estudo semelhante, Leemann e Holzer (2005) também não observaram conexão entre o tamanho do quartzo e seu potencial de dissolução, mas esta relação foi verificada para a deformação desse mineral.

Observando-se os fragmentos de rocha constituintes das argamassas do ensaio da NBR 15577-4, foram percebidos grãos de quartzo parcialmente dissolvidos, apresentando vazios dentro do próprio grão. Tal situação é registrada através da figura 90, na qual se observa que a solução alcalina penetra nas regiões mais frágeis do quartzo (paredes de deslocação do grão). Contudo, com o passar do tempo, todo o quartzo tende a se dissolver e contribuir para a RAA.

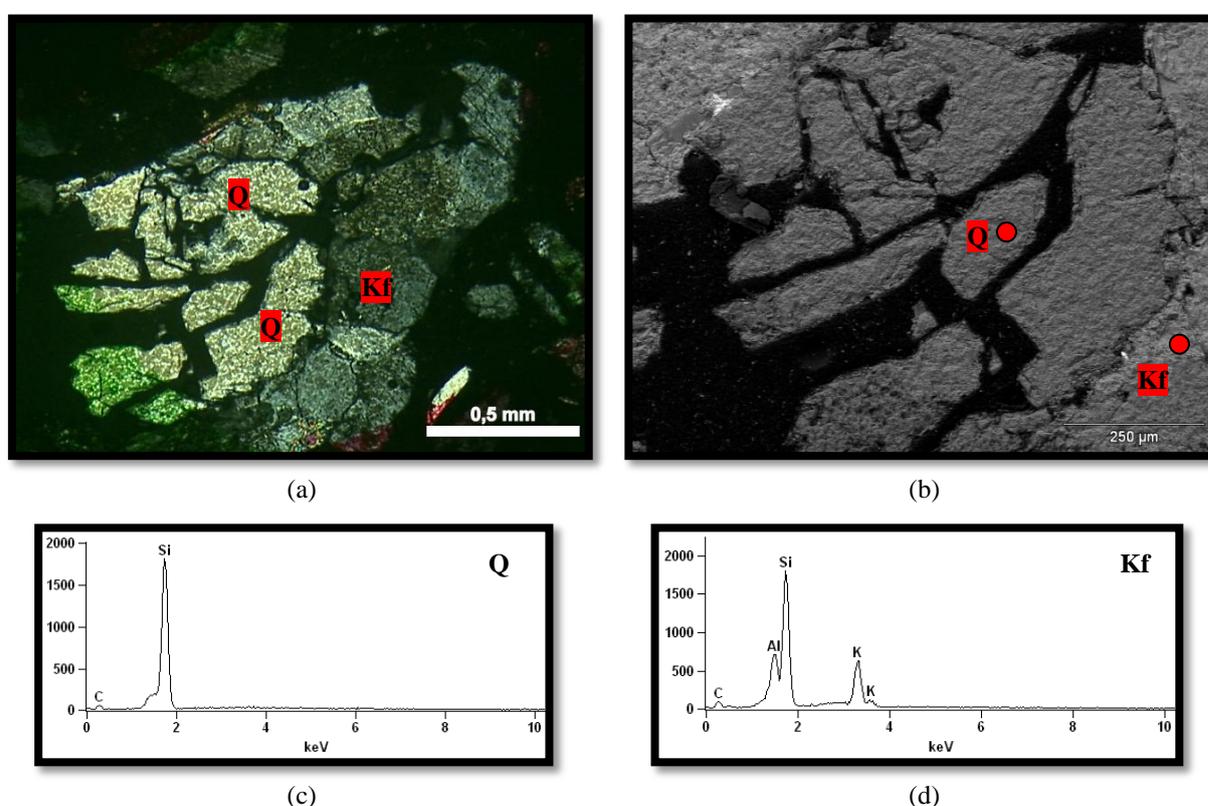


Figura 90: fragmento de rocha disseminada na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde: Kf= K-feldspato, Q= quartzo. (a) micrografia obtida em microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha mostrando vazios dentro do grão de quartzo, ampliação 5x; (b) micrografia obtida em MEV detalhando a presença de grãos de quartzo parcialmente dissolvido, ampliação 130x; (c) (d) espectros obtidos por EDS do grão de quartzo, e do K-feldspato, respectivamente

A dissolução do quartzo observada nas barras de argamassa assemelha-se ao que ocorre na natureza, quando fluidos alcalinos entram em contato com rochas ácidas. Mexias (2000) expõe o aspecto de epissienitos, que são rochas oriundas da alteração hidrotermal de granitos,

com muitos vazios, outrora ocupados pelo mineral quartzo, conforme ilustra a figura 91 (a). A figura 91 (b) evidencia o aspecto da rocha estudada pelo autor sob microscopia ótica, a qual pode ser comparada com a figura 91 (c) que mostra o que foi constatado no presente estudo com os fragmentos de rocha constituintes das argamassas do ensaio da NBR 15577-4.

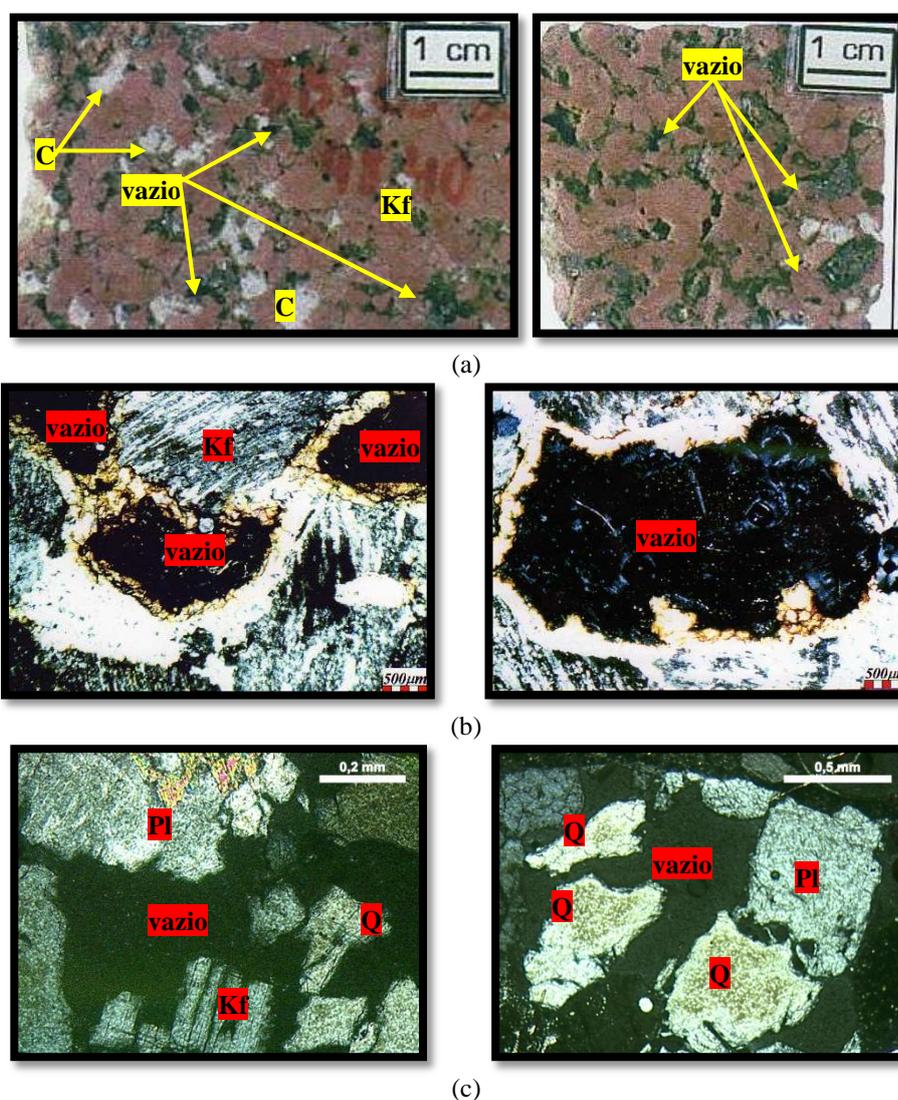


Figura 91: dissolução do quartzo por fluidos alcalinos, onde: Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, C= carbonato, Q= quartzo. (a) fotografias da rocha epissienito (MEXIAS, 2000); (b) micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado do epissienito (MEXIAS, 2000); (c) micrografias obtidas em microscopia ótica sob polarizador cruzado de fragmentos de rocha após o ensaio da NBR 15577-4, ampliação 5x e 10x

5.3.3 Avaliação das mudanças em escala atômica dos grãos de quartzo, de acordo com os diferentes graus de deformação, em função da RAA

Com o objetivo de verificar as mudanças que ocorrem em escala atômica com os diferentes graus de deformação do quartzo quando estes grãos reagem com os hidróxidos alcalinos, foram realizadas análises através de ressonância nuclear magnética (RNM).

A RNM foi empregada para determinar diferenças na distribuição de grupos de silicatos nas amostras QM1, QM2 e QM3 e verificar possíveis alterações na sua estrutura após a RAA. Conforme o que foi descrito no item 3.3.10 (capítulo 3), tal determinação foi feita através da avaliação do silício ^{29}Si .

O desvio químico (δ) resultante da RNM para o grupo dos silicatos é determinado pelo número de pontes Si-O-Si e/ou Si-O-Al, além de perturbações mais fracas produzidas por cátions coordenando os outros átomos de oxigênio (O) presentes. As espécies de tetraedros são identificadas com a nomenclatura $Q^n_m\text{Al}$, onde **n** é o número dos oxigênios em pontes Si-O-Si ($n= 0, 1, 2, 3$ ou 4) e **m** o número de oxigênios em pontes Si-O-Al, conforme ilustra a figura 92 (FLORINDO, 2009).

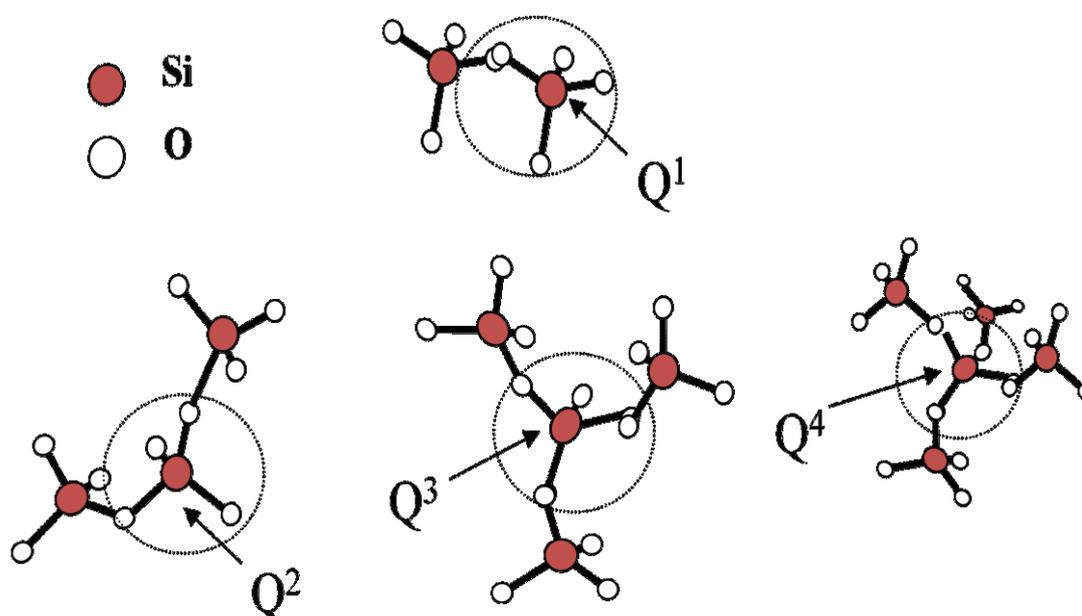


Figura 92: classificação dos silicatos quanto à conectividade Si-O-Si – Q^n (FLORINDO, 2009)

De acordo com Florindo (2009), cada sítio Q^n apresenta uma distribuição de desvios químicos isotrópicos causados pela desordem estrutural do ^{29}Si , o que origina formas de linha de tipo gaussianas nos espectros de RNM. Os grupos Q^0 , Q^1 , Q^2 , Q^3 e Q^4 podem estar presentes em áreas amorfas ou cristalinas (sob a forma de linhas estreitas mais pronunciadas nos espectros). Os grupos Q^4 (tetraedros), que formam a estrutura da sílica (quartzo), possuem desvio químico com valores em torno de -110ppm.

Entenda-se que os sítios chamados amorfos em RNM são aqueles que representam grãos nanométricos de silicatos presentes na amostra. Os sítios cristalinos, por sua vez, não correspondem a grãos perfeitamente cristalizados, mas sim grãos maiores e mais estáveis.

Os espectros de RMN de ^{29}Si das figuras 93, 94 e 95 são referentes às amostras de QM1, QM2 e QM3, respectivamente. Tais espectros corroboram o que havia sido constatado através do refinamento Rietveld, ou seja, todas as amostras de quartzo contêm contaminação com K-feldspato (microclínio), plagioclásio (albita) e micas (biotita). Observa-se que, tanto para as amostras puras, quanto para as amostras atacadas, há a presença de um pico em -107,4ppm, que corresponde a um sítio Q^4 cristalino (quartzo cristalino). Também foi possível identificar em todos os espectros sítios mais estreitos em -93,4ppm, -97,3ppm e -100,2ppm, associados, pela literatura (ENGELHARDT; MICHEL, 1987), a silicatos contendo K e Al, como os K-feldspatos (KAlSi_3O_8). O pico em -105,2 ppm corresponde a fases contendo Na e Al, ou seja, plagioclásio ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e o pico estreito em -87,4ppm é referente à biotita ($(\text{Ca,Na})(\text{Mg,Fe,Al,Ti})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$). Todos os picos referentes aos sítios Si-O-Al estão agrupados nos espectros e identificados pela nomenclatura Q^n_{mAl} .

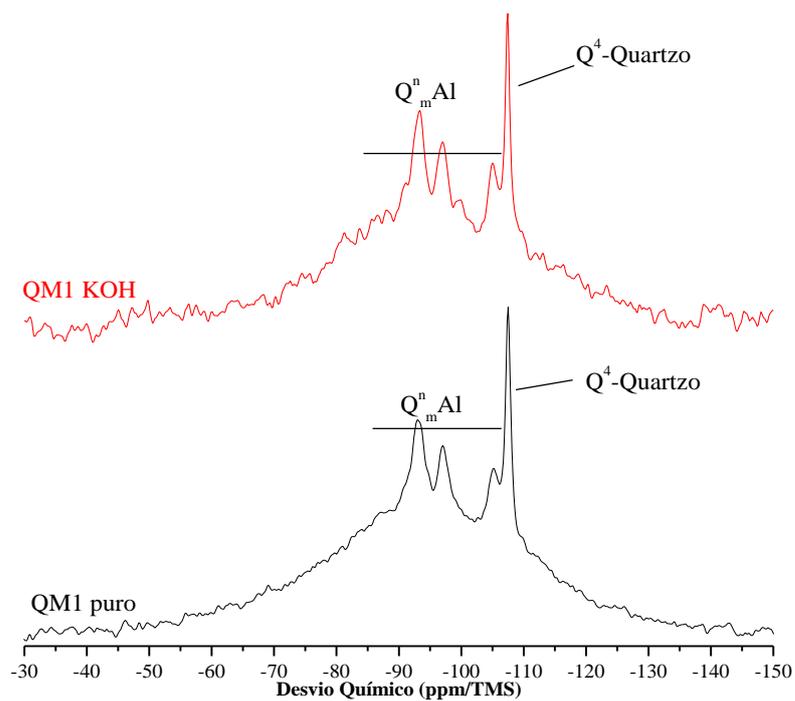


Figura 93: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ^{29}Si , da amostra QM1

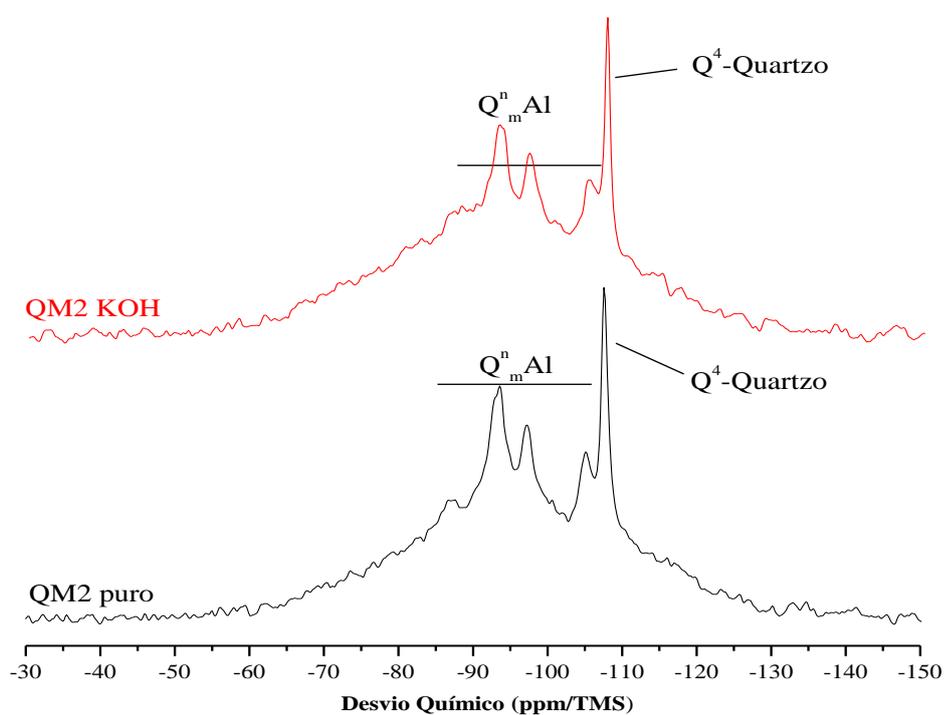


Figura 94: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ^{29}Si , da amostra QM2

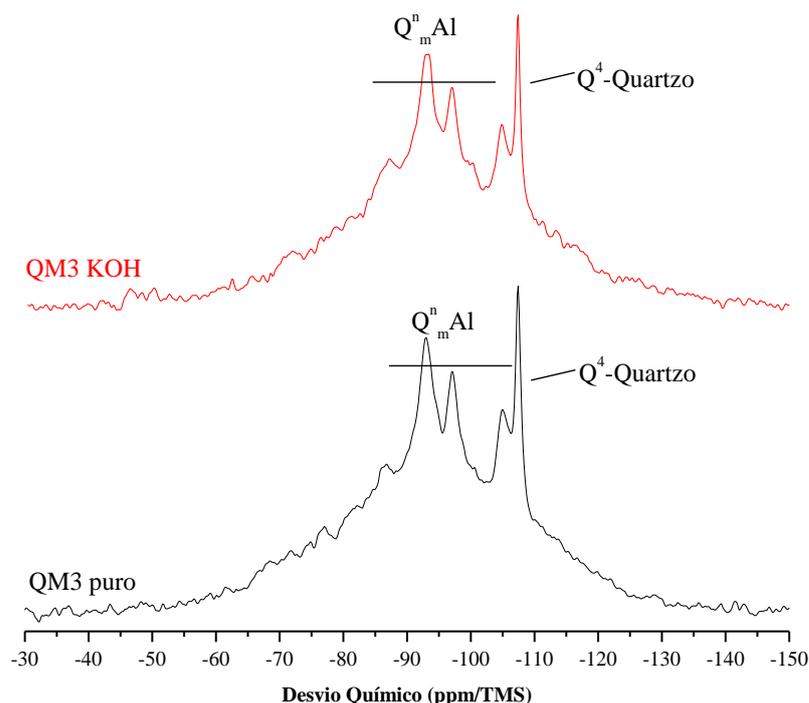


Figura 95: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ^{29}Si , da amostra QM3

Observando-se as figuras 93, 94 e 95 nota-se que em todos os espectros (amostras puras e amostras atacadas com KOH) há uma base larga, que, de acordo Stebbins (1995), corresponde a silicatos (quartzo) numa rede amorfa, que neste caso significa a presença de quartzos nanométricos, e pequenas porcentagens de biotita. Essa constatação corrobora o que foi visualizado através de MET, ou seja, paredes de deslocação dentro dos grãos de quartzo, formando subgrãos nanoscópicos (ver item 5.2.1). Em relação às diferenças entre os graus de deformação dos grãos de quartzo presentes nas amostras QM1, QM2 e QM3, a RNM mostrou que os grãos classificados como pouco deformados (grau 1) em microscopia ótica, predominantes na amostra QM1, em escala atômica são comparáveis aos grãos com grau 2 de deformação (com bandas de deformação).

Na parte amorfa dos espectros das figuras 93, 94 e 95, os sítios Q^n possuem diferentes conectividades Si-O-Si, correspondentes as espécies Q^0 , Q^1 , Q^2 , Q^3 e Q^4 . Contudo, não foi possível atribuir adequadamente esses sítios devido à baixa resolução dos espectros.

Florindo (2009), em estudo com amostras de granito puro e atacado com KOH, verificou que a estrutura da rocha pura (não houve a separação dos minerais em seu estudo) é composta, essencialmente, por sítios Q^4 e Q^3 , referentes ao quartzo e muscovita. O ataque com KOH promoveu o aumento dos sítios mais conectados (Q^1 e Q^4).

A tabela 17 apresenta a quantificação de áreas relativas a ajustes de curvas com funções gaussianas dos espectros de polarização direta do ^{29}Si (nos sítios amorfos e cristalinos).

Tabela 17: quantificação dos sítios cristalinos e amorfos dos silicatos obtida através de RNM

Amostra	Silicatos cristalinos (% em área)	Silicatos amorfos (% em área)	Quartzo cristalino (% em área)
QM1 puro	28,5	65,1	6,4
QM1 KOH	28,5	65,5	6,0
QM2 puro	30,0	63,1	6,9
QM2 KOH	29,8	64,0	6,2
QM3 puro	31,7	63,1	5,3
QM3 KOH	28,6	66,1	5,2

Através da tabela 17 percebe-se que o percentual (em área) de sítios de silicatos amorfos (grãos nanoscópicos) é bem superior ao percentual de sítios de silicatos cristalinos em todas as amostras de quartzo. De acordo com a referida tabela, os sítios do quartzo cristalino representam apenas uma pequena parte da área dos silicatos cristalinos presentes. Isso evidencia, mais uma vez, que mesmo os grãos que em microscopia ótica apresentam pouca deformação (predominantes na amostra QM1, por exemplo) possuem paredes de deslocação formadoras de subgrãos nanométricos (observados através de MET, item 5.2.1), ou seja, possuem zonas frágeis que podem reagir, ao longo do tempo, com os hidróxidos alcalinos.

Nota-se que houve uma redução do percentual dos sítios de silicatos cristalinos após o ataque para todas as amostras, bem como um aumento no percentual de sítios amorfos (tabela 17). Embora o erro considerado para esta análise seja de 3%, é nítido nos resultados que todas as amostras tiveram o mesmo comportamento. A semelhança entre os resultados das amostras puras e atacadas já era prevista uma vez que o ataque realizado não foi muito severo (ver item 3.2.2, do capítulo 3) e, além disso, as rochas são muito parecidas (ver item 5.1).

Os resultados da tabela 17 mostram que a redução dos sítios cristalinos do quartzo após o ataque segue a mesma tendência observada no ensaio de expansão (NBR 15577-4) e de dissolução de sílica (NBR 9848) para as amostras M1, M2 e M3, ou seja, na amostra QM2

foram observadas as mudanças mais intensas, houve uma redução de 10% dos sítios cristalinos após o ataque com KOH, seguida por QM1, cuja redução foi de 6,5% e QM3 1,9%.

Neste momento é importante salientar que estas constatações não poderiam ser tomadas como verdadeiras se fossem obtidas através das análises por RNM isoladamente, uma vez que as diferenças observadas entre as amostras antes e após o ataque com KOH foram muito pequenas. Contudo, há o respaldo dos demais resultados obtidos no presente trabalho com as outras técnicas empregadas.

Sendo assim, através das análises de RNM, por polarização direta do ^{29}Si , foi possível verificar que mesmo os grãos de quartzo considerados pouco deformados em microscopia ótica apresentam, **em escala molecular**, características de grãos mais deformados e mais reativos. Além disso, as análises indicaram que há maior redução dos sítios cristalinos na amostra QM2 após o ataque alcalino, sugerindo que esta amostra pode reagir mais rapidamente do que QM1 e QM3, respectivamente.

5.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A fim de avaliar se a interpretação dos resultados obtidos a respeito da relação entre o grau de deformação do quartzo e a ocorrência da RAA está de acordo com o que ocorre com as rochas quando utilizadas como agregados em estruturas de concreto que desenvolveram a reação, foram selecionadas rochas constituídas por quartzo comprovadamente reativo e inócuo em campo. Salienta-se que as rochas selecionadas para o estudo já foram largamente estudadas por outros autores. Por isso, os resultados de **alguns** ensaios utilizados para realização dessa análise são oriundos da literatura.

5.4.1 Caracterização das rochas reativas e inócuas em campo

A seguir segue uma **breve e resumida** caracterização petrográfica das rochas reativas e inócuas selecionadas para validação dos resultados das análises que avaliaram a influência do grau de deformação do quartzo na RAA. O quadro 1 do item 3.1.2 (capítulo 3) descreve a origem dessas rochas e a obra em que foram empregadas.

Tal caracterização mostra-se importante na medida em que evidencia a presença de minerais semelhantes nas rochas reativas e inócua em campo, porém, texturalmente bastante distintas. Essas diferenças texturais estão intimamente relacionadas com o grau de deformação dos grãos de quartzo, que é a principal fonte de sílica livre presente nessas rochas, ou seja, o principal responsável pela ocorrência da RAA. Enfatiza-se, no entanto, que a avaliação mais aprofundada dos graus de deformação do quartzo presente nas rochas reativas e inócua será descrita na sequência do trabalho (item 5.4.2).

5.4.1.1 Quartzito reativo da UHE de Furnas (QZITO)

O QZITO possui textura granoblástica²³, de granulação fina (figura 96). É constituído, basicamente, por quartzo (93,5%) e micas (6,5%). O quartzo encontra-se intensamente deformado, possuindo grãos serrilhados, o que é um indicativo de grãos ainda não recristalizados. O tamanho dos grãos varia de 0,05mm a 0,3mm. As micas (muscovita) encontram-se na forma de palhetas alongadas e muito finas, com 0,3mm.

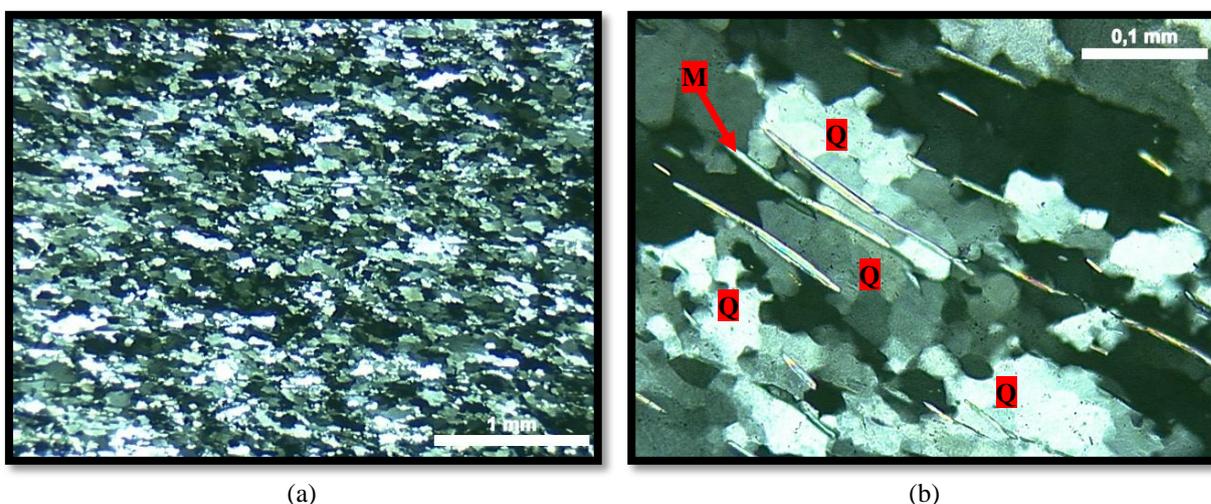


Figura 96: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha QZITO, onde Q= quartzo, M= muscovita. (a) textura do QZITO, ampliação 2,5x; (b) detalhe dos grãos de quartzo e micas, ampliação 20x

5.4.1.2 Milonito reativo da UHE Apolônio Sales – Moxotó (MXT)

A rocha MXT é bastante heterogênea. Duas amostras bastante distintas dessa rocha foram coletadas, MXT A (figura 97 (a)) e MXT B (figura 97 (b)).

²³ Granoblástica é uma textura de rocha metamórfica cujos minerais possuem tamanho aproximadamente igual e estão dispostos em um arranjo de tipo mosaico (GUERRA; GUERRA, 2001).

A matriz do MXT A possui textura hipidiomórfica, característica de um granito com pouca deformação, sendo constituído por quartzo (22,1%), K-feldspato (42,3%), plagioclásio (32,3%) e biotita (3,4%). O quartzo apresenta-se bastante deformado. De modo geral os grãos estão bandados ou formando subgrãos, possuem forma anédrica com tendência ao estiramento, sua dimensão média é de 2,4mm. O K-feldspato (microclínio) está bastante alterado para micas e o plagioclásio encontra-se sob a forma de fenocristais. A biotita possui alteração para muscovita.

No MXT B há muita alteração para mica branca e clorita e os cristais estão cataclasados. A rocha é constituída por quartzo (25,1%), K-feldspato (51,1%), plagioclásio (2,7%), clorita (20,1%) e muscovita (1,1%). O quartzo encontra-se muito deformado, bandado e com subgrãos. A forma dos grãos é anédrica com dimensão média de 1,2mm. Os feldspatos (plagioclásio e K-feldspato) estão completamente sericitizados, e as muscovitas são minerais bem formados na matriz.

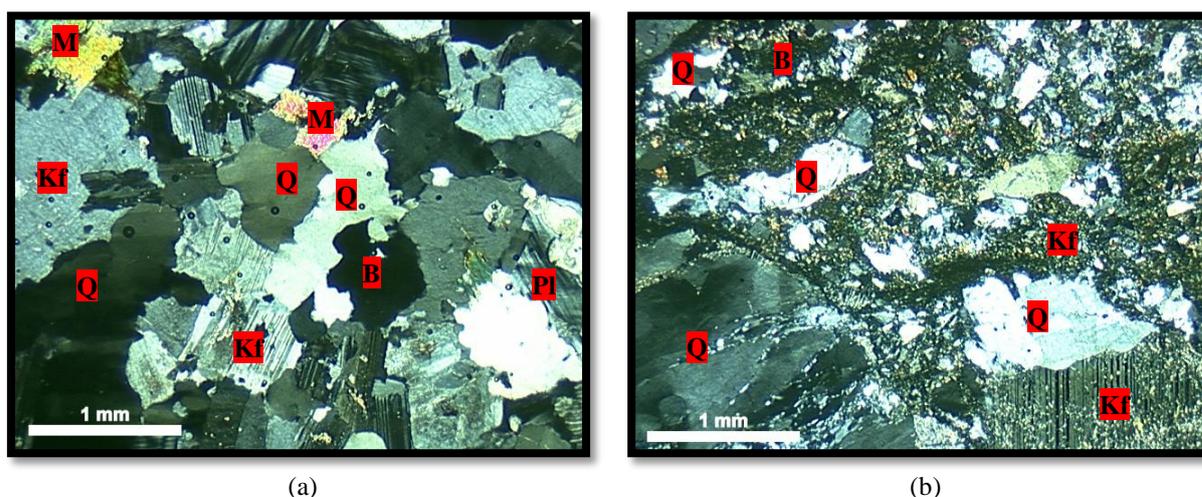


Figura 97: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha MXT, onde Q= quartzo, Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, B= biotita, M= muscovita. (a) textura do MXT A, ampliação 2,5x; (b) textura do MXT B, ampliação 2,5x

5.4.1.3 Milonito (reativo) de Recife (MRR)

A rocha MRR possui textura milonítica. Sua granulação é fina, intercalando bandas de quartzo e micas (figura 98 (a)). Os minerais constituintes da matriz são quartzo (14,9%), K-feldspato (34,8%), plagioclásio (12,9%) e micas (38,8%). O quartzo constituinte dessa rocha encontra-se agrupado em bandas. Os grãos estão intensamente deformados, bandados e

formando subgrãos. Os subgrãos de quartzo, por sua vez, também estão bandados. Sua forma é anédrica com tamanhos variados (0,01mm – 1,2mm), prevalecendo grãos menores. Assim como o quartzo, as micas também formam bandas, tendo, de modo geral, dimensão pequena – 0,05mm. Os K-feldspatos (predominantemente microclínio) estão muito deformados, e pertitzados, apresentam extinção ondulante e alteração para micas. Sua dimensão média é de 2,4mm, com forma anédrica. Observa-se formação de sombras de pressão, constituídas por quartzo e micas com baixa cristalinidade, nas regiões onde as deformações são mais intensas (figura 98 (c)). O plagioclásio aparece em menor quantidade no MRR, possui forma anédrica e os grãos têm dimensão aproximada de 1mm. Esse mineral também apresenta extinção ondulante, porém, menos intensa que os K-feldspatos (figura 98 (b)).

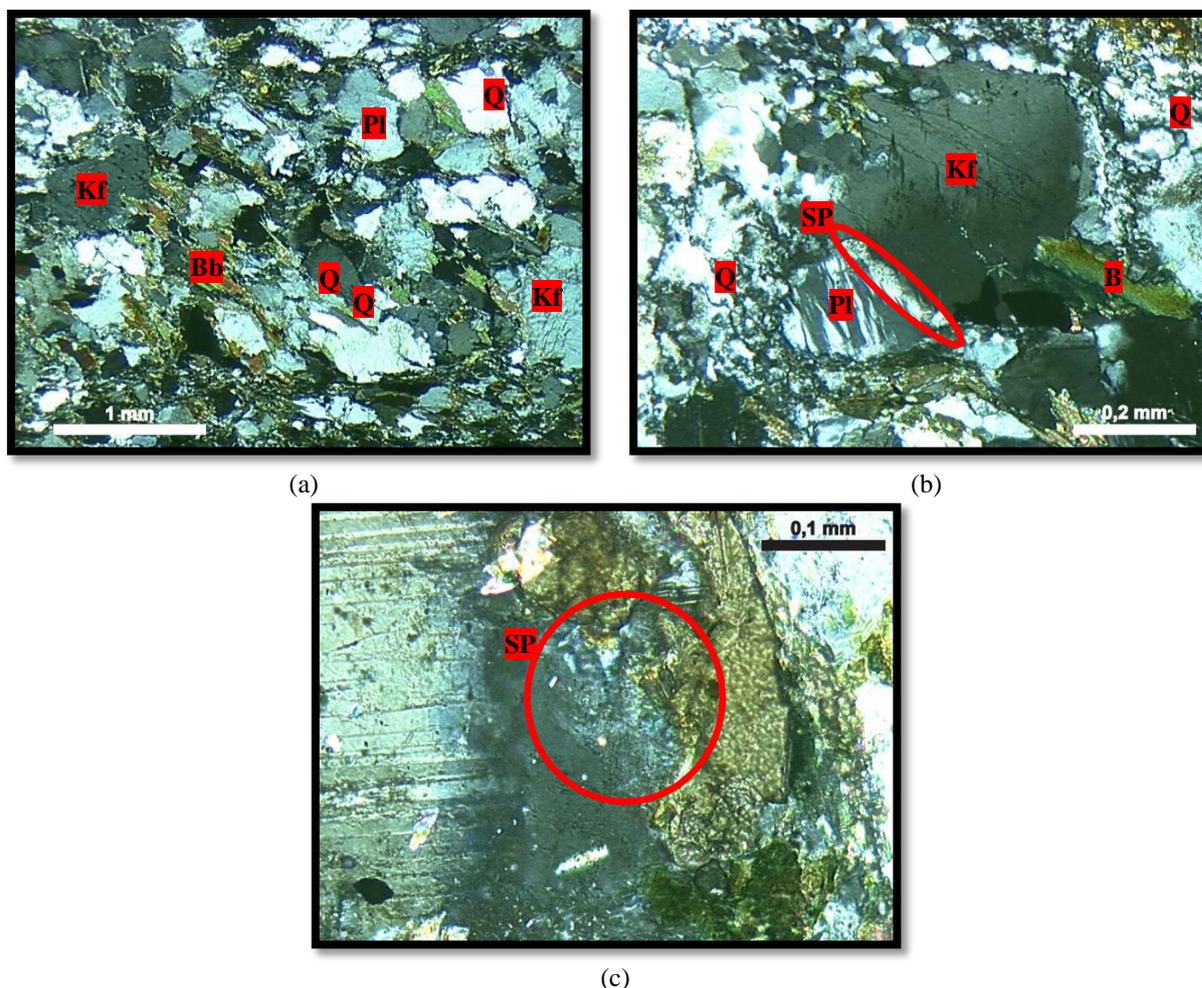


Figura 98: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha MRR, onde Q= quartzo, Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Bb= banda de biotita, SP= sombra de pressão. (a) textura do MRR, ampliação 2,5x; (b) detalhe do K-feldspato com extinção ondulante, ampliação 10x; (c) detalhe das sombras de pressão, ampliação 20x

5.4.1.4 Granito inócuo de Recife (GNRR)

A textura observada para a amostra GNRR é fanerítica²⁴, sendo constituído por quartzo (23,9%), K-feldspato (24,2%), plagioclásio (36,5%) e biotita (15,4%), conforme ilustra a figura 99. Os grãos de quartzo, de modo geral, são pouco deformados, poucos grãos possuem extinção ondulante, sendo esta de intensidade leve. Sua dimensão média é de 1,2mm com forma anédrica. Os K-feldspatos presentes no GNRR encontram-se alterados para carbonatos e micas, apresentando pertitização. São minerais grandes, cuja dimensão varia de 2,5mm – 5mm. O plagioclásio, por sua vez, possui dimensão média de 1,2mm e não apresenta alteração. Há a tendência de formação de bandas de biotitas, este mineral possui alteração incipiente para muscovita e sua dimensão é de 1,2mm.

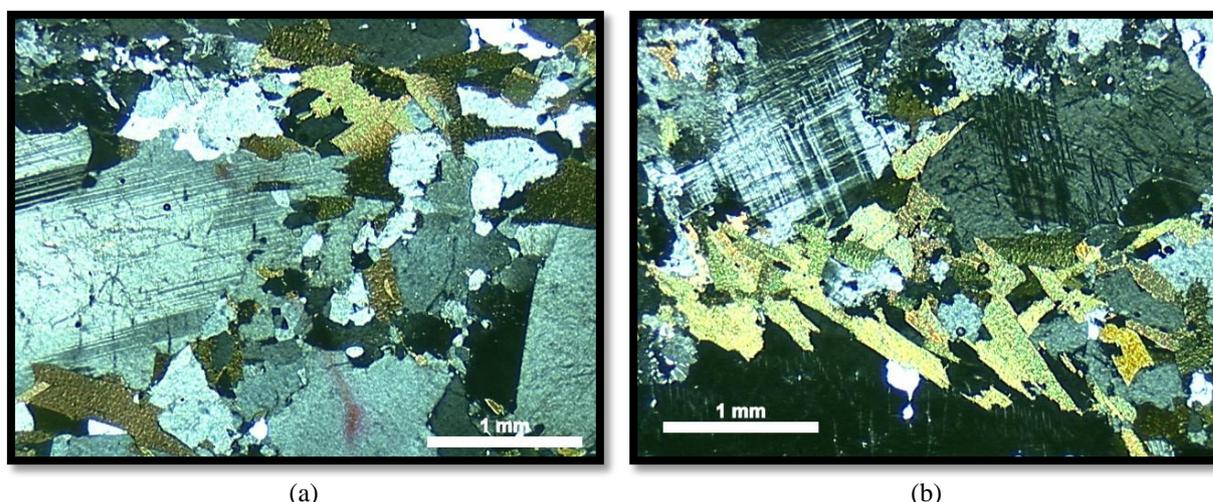


Figura 99: micrografias obtidas através de microscopia ótica sob polarizador cruzado da rocha GNRR, onde Q= quartzo, Kf= K-feldspato, Pl= plagioclásio, Bb= banda de biotita. (a) textura do GNRR, ampliação 2,5x; (b) detalhe das bandas de biotitas, ampliação 2,5x

5.4.2 Comparação entre os graus de deformação do quartzo das rochas reativas e inócuas em campo com as rochas M1, M2 e M3

Este item do trabalho destina-se a apresentar os resultados da avaliação dos diferentes graus de deformação dos grãos de quartzo das rochas QZITO (reativa em campo), MXT (reativa em campo), MRR (reativa em campo), GNRR (inócuas em campo) e compará-los com o que foi obtido para as rochas M1, M2 e M3. A tabela 18 apresenta a quantificação dos diferentes graus de deformação do quartzo para essas rochas.

²⁴ Textura fanerítica é aquela formada por grãos cristalinos que se distinguem uns dos outros a olho nu

Tabela 18: comparação entre os diferentes graus de deformação do quartzo para as rochas QZITO, MXT, MRR, GNR, M1, M2 e M3

Amostras	Quantidade de grãos (%)					
	Grau 0	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4	
	Quartzo sem deformação	Quartzo com extinção ondulante leve	Quartzo com forte extinção ondulante, com formação de bandas de deformação	Quartzo com forte extinção ondulante, com formação de subgrão	Quartzo recristalizado a partir de subgrão	
QQZITO	-	2,8	48,4	36,4	12,4	
QMXT	A	-	21,7	66,9	8,9	2,4
	B	-	15,9	59,7	22,7	1,5
QMRR	-	1,3	57,4	27,7	13,6	
QGNRR	37,1	21,3	13,1	10,8	18,0	
QM1	-	46,6	33,6	15,2	5,2	
QM2	-	13,6	56,1	23,7	6,6	
QM3	-	22,8	39,6	22,2	16,6	

Vários aspectos podem ser ressaltados a partir dos dados da tabela 18. Primeiramente, nota-se que o grau 2 de deformação é preponderante nas rochas reativas em campo (QZITO, MXT e MRR), assim como na rocha M2 (mais reativa dentre as três rochas selecionadas para o estudo). Isso indica que os grãos de quartzo com intensa extinção ondulante chegando a formar **bandas de deformação dentro do grão** (grau 2) são mais facilmente atacados pelos hidróxidos alcalinos.

Considerando-se a velocidade com que a RAA foi constatada nas estruturas executadas com a rocha QZITO, MXT e MRR, tem-se que: QZITO= 13 anos (HASPARYK, 2005); MXT= 8 anos (ANDRIOLO, 2000); MRR= 12 anos (ANDRADE *et al.*, 2006). Esses dados mostram que quanto maior a quantidade de grãos de quartzo com grau 2, maior a velocidade de ocorrência da RAA **em campo**. Contudo, é importante salientar que existem outros fatores que intervêm para a ocorrência da RAA nessas estruturas, tais como a umidade e o teor de

álcalis do concreto entre outros, os quais não estão sendo apreciados nas análises do presente estudo.

A partir dessa constatação e considerando-se a quantidade de grãos com grau 2 de deformação existentes nas rochas M1, M2 e M3, supõe-se que a rocha M2 é mais propensa a desenvolver a RAA em campo.

Num segundo momento, mostra-se interessante analisar individualmente a distribuição dos grãos de quartzo, de acordo com os diferentes graus de deformação, nas rochas reativas e inócua em campo. No QZITO, conforme o que mostra a tabela 18, preponderam grãos com grau 2, contudo essa rocha também possui grande quantidade de subgrãos (grau 3), o que é um reflexo da intensa deformação da rocha.

Conforme o que foi visto no item 5.4.1.2, a rocha MXT pode ser muito heterogênea. Entretanto, mesmo na amostra MXT A, considerada menos deformada (ver item 5.4.1.2), prevalecem os grãos com grau 2, ou seja, tanto MXT A quanto MXT B são agregados propensos a reagir. A diferença observada para os grãos de quartzo da rocha MXT A e MXT B é que na MXT B aumentam os grãos grau 3, enquanto na MXT A é maior a quantidade de grãos grau 1.

As rochas oriundas de Recife possuem características bem distintas. MRR possui grande quantidade de quartzo com grau 2, ou seja, intensamente deformado formando, bandas de deformação. Já na rocha GNRR prevalecem os grãos grau 0, com pouca deformação. Considerando-se o percentual de grãos com grau 2 obtido para a rocha GNRR e levando-se em conta que não foi constatado o desenvolvimento de RAA em estruturas em que esta rocha foi empregada, pode-se dizer que, **possivelmente**, agregados que contenham um percentual menor ou igual a 13,1% de grãos com grau 2 são menos propensos a reagir.

5.4.3 Comparação entre o potencial de expansão das rochas reativas e inócua em campo com as rochas M1, M2 e M3

A comparação entre o potencial de expansão das rochas reativas e inócua em campo em relação a M1, M2 e M3 foi feita através do ensaio acelerado de expansão das barras de argamassa (NBR 15577-4; ASTM C 1260). Os resultados desse ensaio para as rochas QZITO, MXT, MRR e GNRR foram obtidos do trabalho de Couto (2008), uma vez que as mesmas já

foram bastante estudadas por este e por outros autores, tais como Hasparyk (1999), Hasparyk (2005), Andrade (2006), Silva (2007).

Couto (2008) utilizou a norma ASTM C 1260 para realização do ensaio acelerado, pois a norma brasileira (NBR 15577-4) foi implementada apenas em maio de 2008. Os procedimentos de ensaio da norma americana são idênticos aos da norma brasileira. Ambas diferenciam-se pelo limite estabelecido para classificação da potencialidade reativa de um agregado e pelas idades sugeridas para tal classificação. Contudo, verificou-se que Couto (2008) procedeu o ensaio até a idade prescrita pela NBR 15577-4, 30 dias, logo, os procedimentos adotados para obtenção desses resultados foram os mesmos.

Dentre os cimentos utilizados pelo autor para tal análise encontra-se o CP II-F 32, cujas características são compatíveis ao cimento utilizado no presente estudo. Portanto, os resultados das análises realizadas por Couto (2008) mostram-se comparáveis aos obtidos para as amostras M1, M2 e M3. Tal comparação pode ser observada através da tabela 19 (média das expansões de 3 barras de argamassa aos 30 dias).

Tabela 19: expansão aos 30 dias das rochas QZITO, MXT, MRR, GNRR, M1, M2 e M3

Amostra	Expansão média (%)	Classificação NBR 15577-4 ^A	Quantidade de quartzo na rocha (%)
QZITO	0,36 ^C	Potencialmente reativo	93,5
MXT	0,11 ^C	Potencialmente inócuo	23,6 ^B
MRR	0,28 ^C	Potencialmente reativo	14,9
GNRR	0,08 ^C	Potencialmente inócuo	23,9
M1	0,16	Potencialmente inócuo	37,6
M2	0,17	Potencialmente inócuo	28,7
M3	0,15	Potencialmente inócuo	33,3

^AExpansões inferiores a 0,19%= potencialmente inócuo; Expansões iguais ou superiores a 0,19%= potencialmente reativo

^BMédia dos valores quantificados para MXT A (22,1%) e MXT B (25,1%)

^CDados obtidos de Couto (2008)

A tabela 19 mostra que o ensaio acelerado de expansão não é totalmente ‘confiável’ quando se deseja classificar a potencialidade reativa de uma rocha cuja principal fonte de sílica livre é

o quartzo. Nota-se que a rocha MXT, reativa em campo, apresentou comportamento considerado potencialmente inócuo neste ensaio, assim como M1, M2 e M3. Por isso uma discussão a respeito do comportamento lento de alguns agregados nos ensaios acelerados de expansão foi feita no item 5.3.1.

Considerando-se a quantidade total de quartzo presente nas rochas apresentados na tabela 19 nota-se que, exceto para as amostras QZITO e MRR, todas as demais têm quantidades não tão divergentes de quartzo, inclusive a rocha GNRR, que é inócua no ensaio acelerado, o que as diferencia é a deformação dos grãos. Observa-se que a rocha QZITO, que apresentou o maior percentual de expansão, possui as maiores proporções desse mineral. Entretanto, para as demais amostras, esta correlação entre a quantidade de quartzo e as expansões não pôde ser estabelecida, justamente em função do comportamento mais lento dos grãos com grau 1 (presente em maiores proporções nas amostras **inócuas no ensaio acelerado**).

O gráfico da figura 100 compara a distribuição dos grãos de acordo com os diferentes graus de deformação nas amostras reativas e inócua em campo.

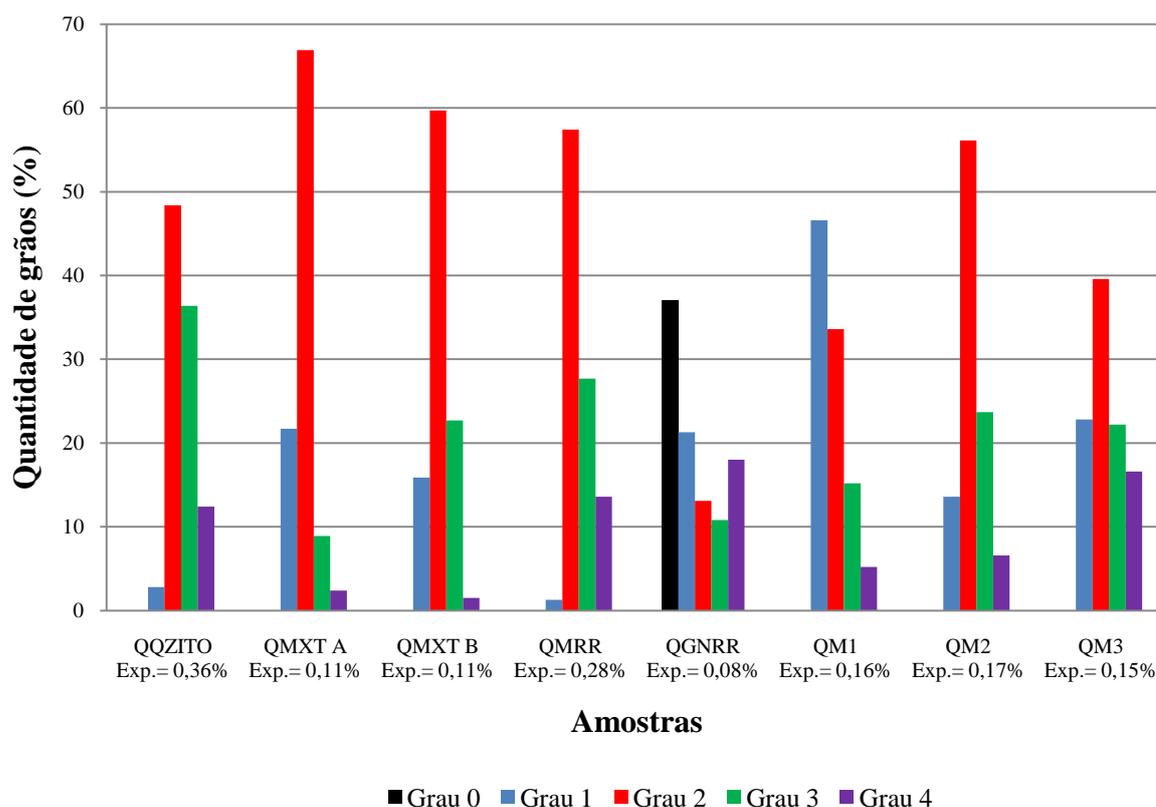


Figura 100: quantidades de grãos de quartzo com diferentes graus de deformação nas amostras QQZITO, QMXT A, QMXT B, QMRR, QGNRR, QM1, QM2 e QM3

Através da figura 100, nota-se que as amostras classificadas como inócuas no ensaio da NBR 15577-4 (MXT, GNRR, M1, M2 e M3), aos 30 dias, possuem grandes quantidades de grãos pouco deformados (grau 1) em relação às rochas classificadas como potencialmente reativas neste ensaio (QZITO e MRR). Os grãos com grau 1 demoram mais para reagir com os hidróxidos alcalinos, mas mesmo que demore muito tempo, a tendência é que a reação ocorra. Knauss e Wolery (1988) explicam que em pHs superiores a 7 o quartzo perde a estabilidade e tende a se dissolver com o passar do tempo. No caso do concreto o pH varia em torno de 12, o que propicia esta dissolução.

Assim, fica nítido que há uma interação e contribuição de todos os grãos de quartzo, independente do seu grau de deformação, para as expansões da RAA. Logo, mesmo nas rochas cujos grãos de quartzo predominantes não são deformados, caso de GNRR, a reação pode se manifestar devido ao tempo de exposição do quartzo ao elevado pH do concreto.

5.4.4 Comparação entre o potencial de dissolução das rochas reativas em campo e as rochas M1, M2 e M3

Para comparar e, desta forma, validar os resultados obtidos neste estudo no que diz respeito à dissolução do quartzo, foram selecionadas duas rochas: QZITO, por ser reativa em campo e ter resultado nas maiores expansões no ensaio acelerado da NBR 15577-4 aos 30 dias (exp.= 0,36%) e a rocha GNRR, inócua em campo e no referido ensaio (exp.= 0,08%). Para avaliar a dissolução do quartzo nessas rochas realizou-se a separação dos grãos de quartzo presentes, analogamente ao que foi realizado para as amostra M1, M2 e M3.

Os ensaios empregados para a validação dos resultados no que diz respeito à influência do grau de deformação dos grãos de quartzo na dissolução das rochas foram: método do espectrofotômetro visível (NBR 9848), RNM, XANES e EXAFS.

5.4.4.1 Avaliação da quantidade de sílica dissolvida

O gráfico da figura 101 apresenta um comparativo entre as quantidades de sílica dissolvida, através do ensaio da NBR 9848, nas amostras QQZITO, QGNRR, QM1, QM2 e QM3.

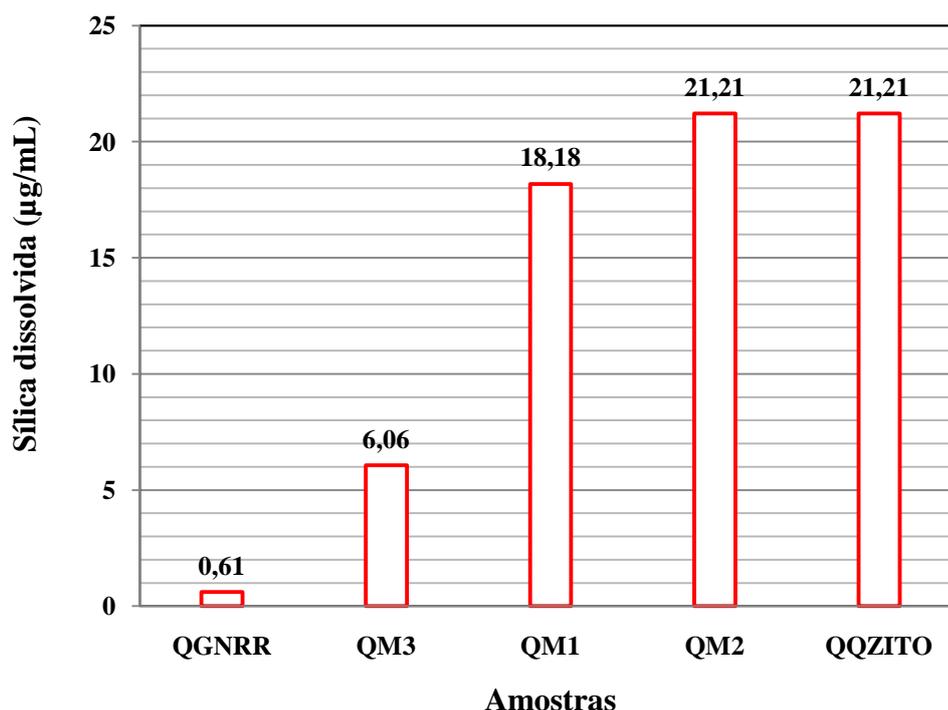


Figura 101: comparação entre a dissolução das amostras QZITO, QGNRR, QM1, QM2 e QM3 no ensaio da NBR 9848

Através da figura 101 é possível perceber que a amostra QGNRR, que correspondente aos grãos de quartzo separados da rocha inócua em campo, foi a que apresentou a menor dissolução de sílica. QGNRR é composta predominantemente por grãos de quartzo sem deformação (grau 0), ou seja, menos propensos à dissolução. Já a dissolução de sílica medida para a amostra QQZITO (quartzo retirado da amostra QZITO, reativa em campo) foi idêntica à da amostra QM2. A característica em comum entre ambas é a predominância de grãos com grau 2 de deformação, bastante suscetíveis à reação com os hidróxidos alcalinos. A dissolução de sílica medida pelo método do espectrofotômetro visível evidencia, mais uma vez, o importante papel dos grãos com grau 1 de deformação para a dissolução de sílica da amostra QM1.

Assim, comparando-se os resultados obtidos no referido ensaio para as amostras reativa (QQZITO) e inócua (QGNRR) em campo com QM1, QM2 e QM3, percebe-se que estes são coerentes com o que foi visto a respeito até o presente momento em relação à influência do grau de deformação do quartzo para a dissolução de sílica. Tais comparações evidenciam, de uma maneira geral, o maior potencial de dissolução do quartzo com grau 2 de deformação.

5.4.4.2 Avaliação das mudanças em escala atômica das amostras em função do ataque alcalino, através de RNM

Através de análises por RNM buscou-se avaliar mudanças ocorridas em escala molecular nas amostras QQZITO e QGNRR. Os espectros obtidos para a amostra QQZITO, através da técnica de polarização direta do ^{29}Si , podem ser observados na figura 102.

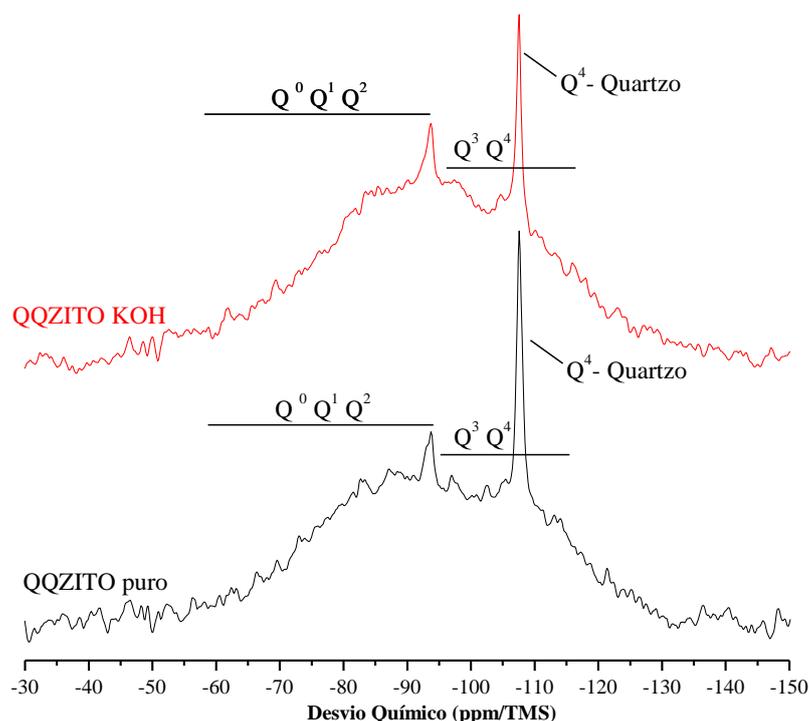


Figura 102: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ^{29}Si , da amostra QQZITO

A figura 102 mostra que a amostra QQZITO pura e atacada com KOH, a 80°C, possui sítios Q^n com diferentes conectividades entre Si e O na **parte amorfa**, correspondentes às espécies Q^0 , Q^1 , Q^2 , Q^3 e Q^4 . Contudo, devido à baixa resolução dos espectros, não foi possível atribuir exatamente a posição desses sítios. Em -107,4 ppm o pico foi identificado como um Q^4 e refere-se ao quartzo cristalino.

Comparando-se o espectro da amostra pura com o espectro da amostra atacada com KOH é possível observar uma pequena diminuição na área do sítio de quartzo cristalino, indicando que o ataque causou mudanças em escala molecular nos grãos de quartzo. Essa constatação

também pode ser comprovada através do cálculo das áreas dos sítios amorfos e cristalinos, apresentadas na tabela 20, que se encontra na sequência deste item do trabalho.

Florindo (2009) também estudou as mudanças ocorridas na estrutura atômica do quartzito após o ataque com KOH em diversas temperaturas e tempos de ataque e verificou a ocorrência de mudanças significativas nos espectros atacados. A autora constatou que o aumento da temperatura dissolve os silicatos amorfos de conectividade baixa e média (Q^0 , Q^1 e Q^2) e produz um silicato altamente conexo formado por espécies Q^3 e Q^4 . O aumento do tempo de ataque à temperatura ambiente não produz transformações apreciáveis na parte amorfa, mas sim dissolução de silicatos Q^4 pertencentes a grãos de quartzo de maior tamanho.

A figura 103 apresenta os espectros obtidos através de RNM por polarização direta do ^{29}Si da amostra QGNRR. Tais espectros mostram que, semelhantemente ao que foi visto nos espectros de RNM das amostras QM1, QM2 e QM3, há uma base larga com sítios de silicatos de diferentes conectividades correspondentes a quartzos nanométricos e uma parte de muscovita.

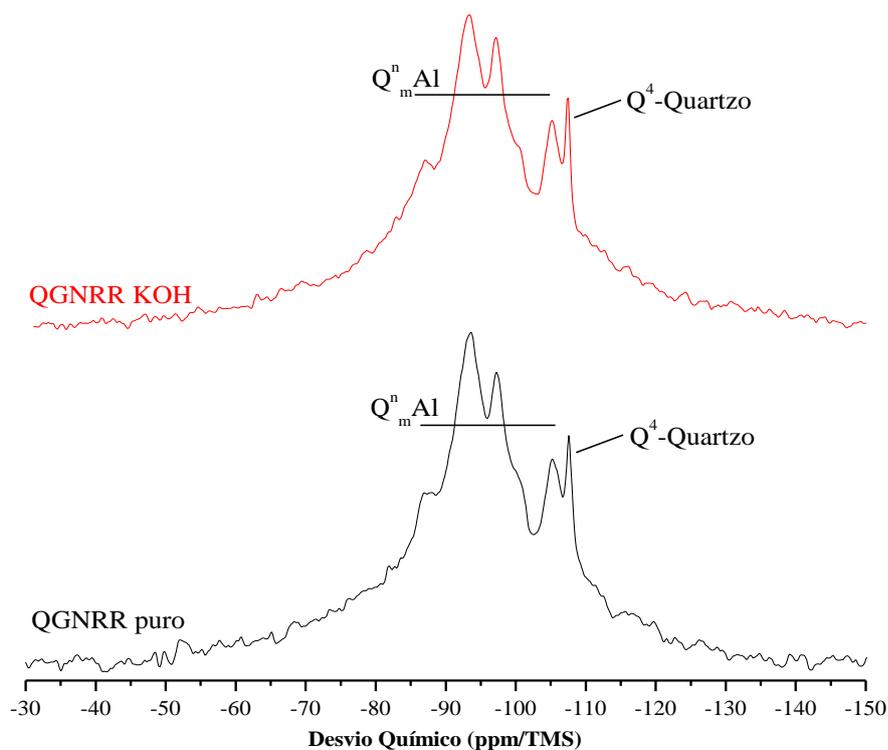


Figura 103: espectros obtidos por RNM, através de polarização direta do ^{29}Si , da amostra QGNRR

Na figura 103 observa-se que foram identificados vários sítios contendo Q_m^nAl . As linhas estreitas em -93,4ppm, -97,3ppm e -100,2ppm presentes nos espectros da amostra pura e atacada com KOH correspondem a sítios de silicatos contendo fases com K e Al, ou seja, representam K-feldspatos (microclínio $KAlSi_3O_8$) constituintes da amostra. Estes sítios também foram identificados nas amostras QM1, QM2 e QM3 (ver item 5.3.3), contudo, na amostra QGNRR suas intensidades são bem maiores. Já o pico estreito observado em -105,2 ppm, associado ao plagioclásio (albita - $NaAlSi_3O_8$), manteve sua intensidade com relação às amostras de QM1, QM2 e QM3. Tais constatações ratificam a menor deformação da rocha GNRN observada através da análise petrográfica (ver item 5.4.1.4).

Nos espectros obtidos através de RNM pode ocorrer a sobreposição de picos característicos dos sítios Q^n de cada fase presente, desde que essas fases apresentem sítios com conectividades em comum, caso do quartzo e dos feldspatos (ambos possuem ligações Si-O). Por isso a maior intensidade dos picos do K-feldspato na amostra QGNRR, em relação a QG1, QG2 e QG3, observada nas figuras 93, 94, e 95 (ver item 5.3.2), pode ser um indicativo que os grãos de quartzo sem deformação (grau 0), predominantes na amostra QGNRR, estejam sobrepondo sítios cristalinos do quartzo aos sítios atribuídos aos K-feldspatos.

A fim de avaliar se o ataque com KOH provocou mudanças nos espectros obtidos por RNM das amostras QQZITO e QGNRR, foram calculadas as áreas dos sítios cristalinos e amorfos nas amostras puras e atacadas, conforme pode ser visualizado através da tabela 20.

Tabela 20: quantificação dos sítios cristalinos e amorfos dos silicatos obtida através de RNM

Amostra	Silicatos cristalinos (% em área)	Silicatos amorfos (% em área)	Quartzo cristalino (% em área)
QQuartzito	7,3	92,7	7,3
QQuartzito+KOH	5,6	94,4	5,6
QGNRR	43,7	53,7	2,6
QGNRR+KOH	43,7	54,2	2,1

Observando-se a tabela 20 nota-se que a quantidade de silicatos cristalinos na amostra QQZITO é idêntica à de quartzo cristalino, isso porque nessa amostra o único silicato presente

é o quartzo. A referida tabela também ratifica o que foi observado nos espectros da figura 102. Ou seja, comparando-se as áreas dos sítios cristalinos na amostra pura e na amostra atacada com KOH, percebe-se que houve uma redução de 23% na área dos sítios cristalinos após o ataque. Tal resultado corrobora com o fato de a rocha QZITO ter desencadeado RAA em campo.

Os resultados da tabela 20 também mostram que em ambas as amostras predominam os sítios amorfos. Entretanto, as proporções de amorfos e cristalinos são mais parecidas para a amostra QGNRR, o que evidencia, mais uma vez, a presença de grande quantidade de grãos sem deformação nessa amostra, conforme o que foi visto através de análise por microscopia ótica e também ficou refletido nas análises de expansão e dissolução. Isto é, em escala atômica a amostra QGNRR possui menor quantidade de grãos nanoscópicos que as demais amostras avaliadas por RNM (QM1, QM2 e QM3), o que ajuda a justificar o fato de a rocha GNRR não ter apresentado reatividade em campo e nem nos ensaios de expansão, apesar de ser uma rocha ácida.

5.4.4.3 Avaliação das mudanças em escala atômica das amostras em função do ataque alcalino, através de XANES e EXAFS

A fim de avaliar se ocorrem mudanças expressivas na estrutura atômica ao redor do Si presente nos grãos de quartzo quando sujeito ao ataque dos hidróxidos alcalinos, bem como verificar se essas mudanças são influenciadas pelo grau de deformação do quartzo, foram realizadas análises através XANES (*X-ray near-edge structure* – absorção de raios X próxima à borda da estrutura) e EXAFS (*extended X-ray absorption fine structure* – absorção de raios X estendida de estrutura fina) das amostras QZITO, QGNRR e QM2 puras e atacadas com KOH, conforme detalhado no item 3.3.9 (capítulo 3). Também foi analisado através das mesmas técnicas o gel da RAA coletado a UHE de Furnas, a fim de comparar se os espectros das amostras atacadas se assemelham ao espectro do gel.

A figura 104 apresenta os espectros obtidos para as três amostras na condição pura. Tais espectros foram obtidos pela normalização do sinal de XANES obtido em termos de $\mu d(E)$, sendo d a espessura da amostra, para obtenção de oscilações $\chi\mu(K)$.

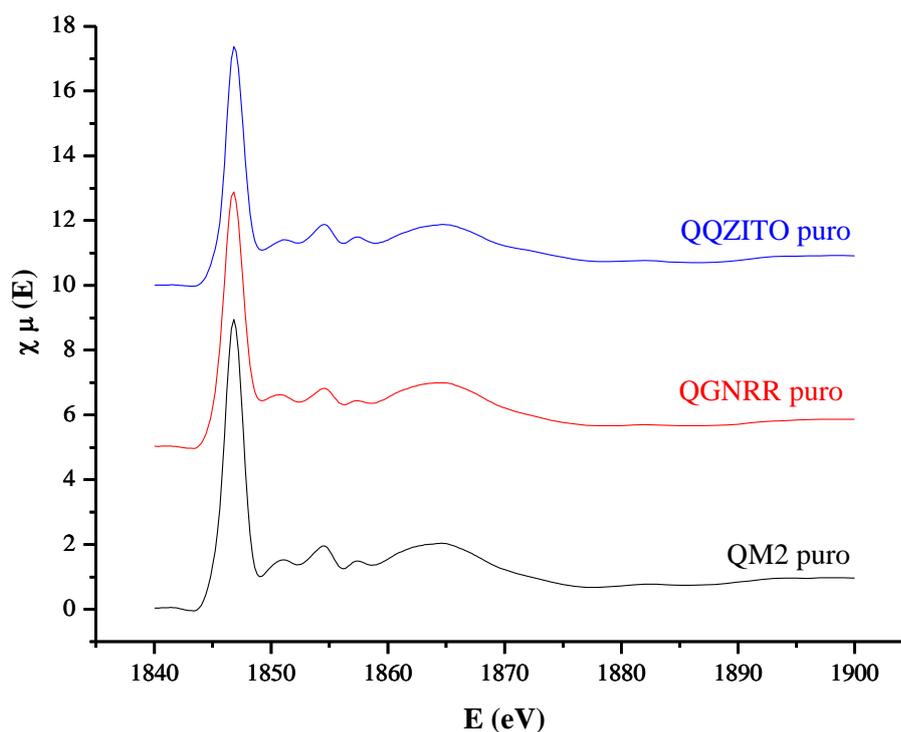


Figura 104: espectros obtidos por XANES das amostras QQZITO, QGNRR e QM2 na borda do Si

Na figura 104 nota-se que QQZITO, QGNRR e QM2 apresentam espectros semelhantes, o que já era esperado, uma vez que a estrutura ao redor do Si no quartzo é a mesma, independente do grau de deformação do grão. As configurações dos espectros caracterizam a presença de quartzo alfa em todas as amostras, o que também foi observado por Khouchaf *et al.* (2005), em análises semelhantes realizadas com a rocha flint.

Nos espectros de XANES apresentados na figura 105 é possível comparar as amostras sob a condição pura e atacada com KOH. Nesta figura observam-se pequenas diferenças em relação à desordem estrutural dos primeiros e segundos vizinhos do Si nas amostras atacadas. A borda de absorção do Si fica em 1839 eV. As informações a respeito dos primeiros vizinhos são observadas na região imediatamente após a borda do Si.

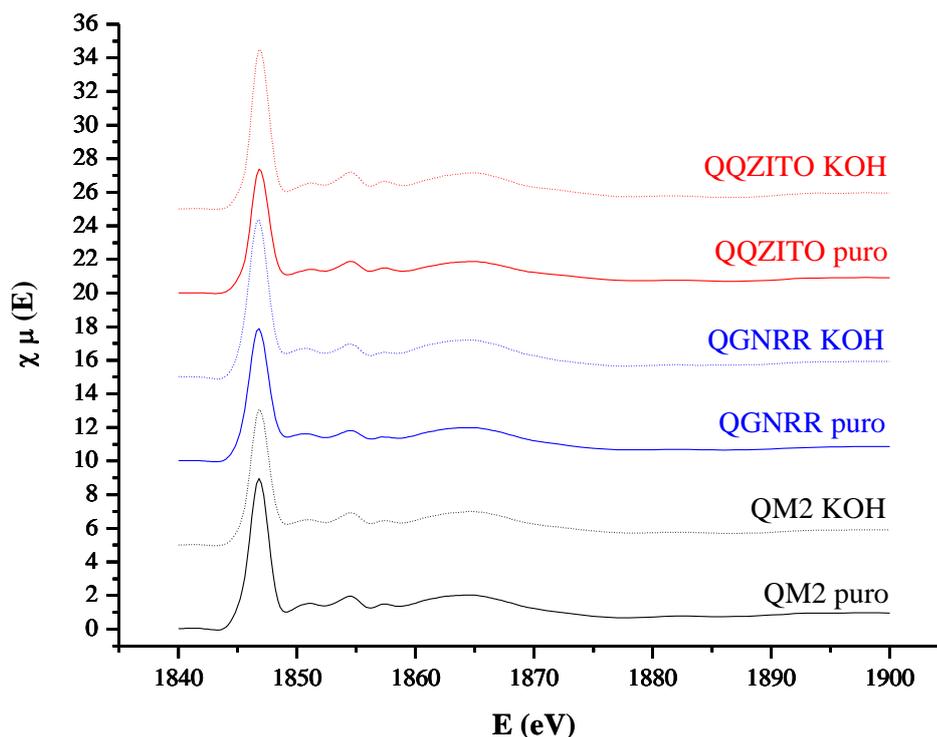


Figura 105: espectros obtidos por XANES das amostras puras e atacadas com KOH

A fim de estudar com maior detalhe as diferenças observadas nos primeiros vizinhos e verificar possíveis mudanças nos segundos vizinhos do Si nas amostras QQZITO, QGNRR e QM2, foram realizadas medidas de EXAFS.

Conforme o que foi explanado no item 3.3.9 (capítulo 3), a interpretação de espectros de EXAFS está condicionada a sua normalização via transformada de Fourier. Na figura 106 é possível observar a transformada de Fourier de cada uma das amostras e o do gel da RAA, onde fica evidente, mais uma vez, a grande diferença entre o espectro do gel em relação às demais amostras de rocha pura e atacada.

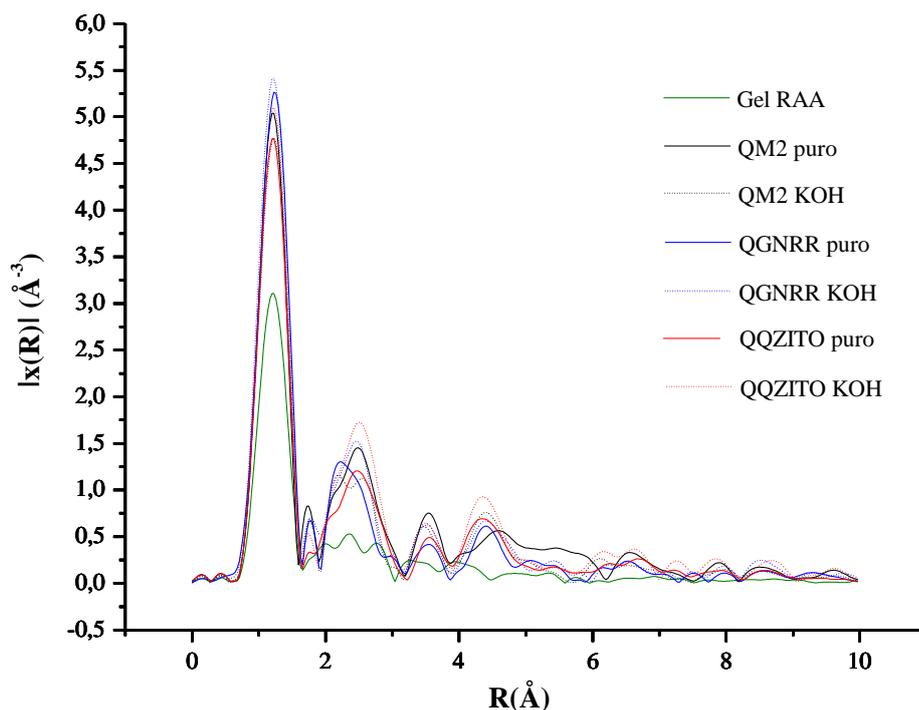


Figura 106: espectros obtidos por EXAFS, através de transformada de Fourier, das amostras puras e atacadas com KOH

Na figura 107 observam-se espectros de EXAFS, obtidos via transformada de Fourier inversa, evidenciando a contribuição isolada dos primeiros e dos segundos vizinhos do Si nas amostras de quartzo e no gel.

Os espectros obtidos para os primeiros vizinhos, figura 107 (a), possuem configuração esperada quando os primeiros vizinhos do Si são átomos de O. Isso foi observado tanto para as amostras de quartzo puras quanto para as atacadas. Entretanto, o espectro obtido para o gel apresentou valores de k ligeiramente maiores, o que mostra que no produto da RAA (gel) as ligações químicas Si-O são mais curtas e não se assemelham com o que foi observado para os quartzos atacados. Ressalta-se, contudo, que o gel analisado neste estudo foi formado após vários anos de construção da barragem de Furnas e apresentava-se exsudado na superfície do concreto, segundo Hasparyk (2005),

As diferenças dos valores de k em relação à amostra de gel e as demais amostras analisadas também foram observadas para os segundos vizinhos do átomo do Si, o que pode ser observado através da figura 107 (b). Para as amostras de quartzo puras e atacadas, os espectros dos segundos vizinhos mostram oscilações similares até $5,0 \text{ \AA}^{-1}$, mas para valores de k superiores diferenciam-se, o que atesta diferenças na segunda esfera de coordenação.

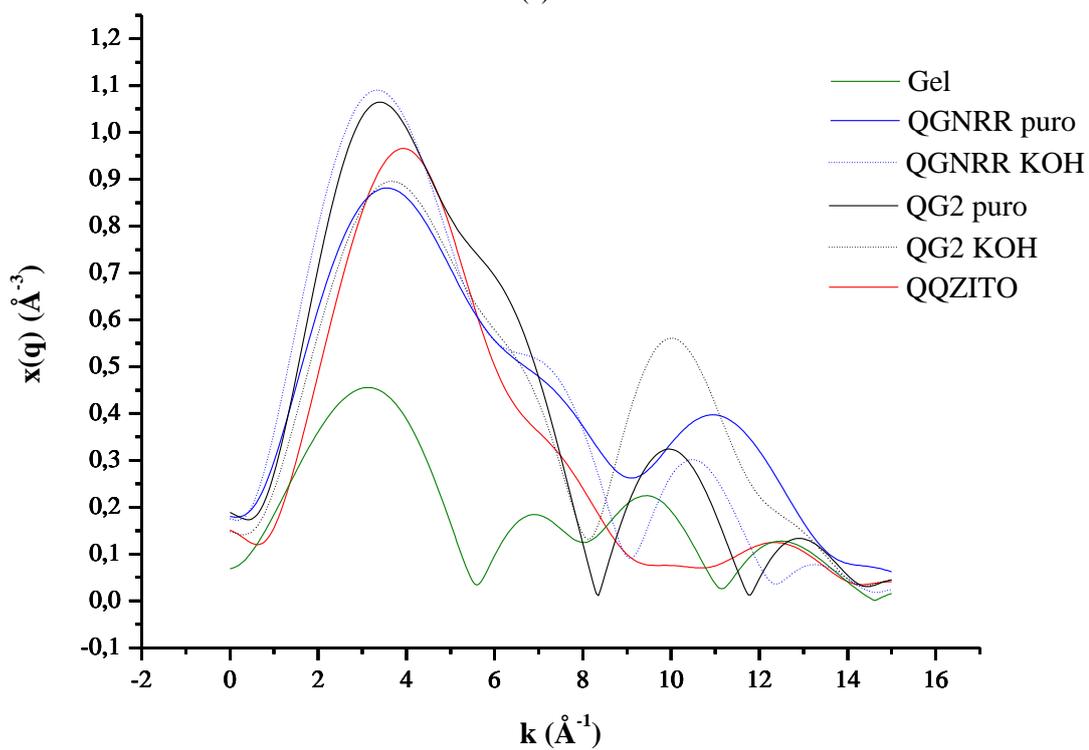
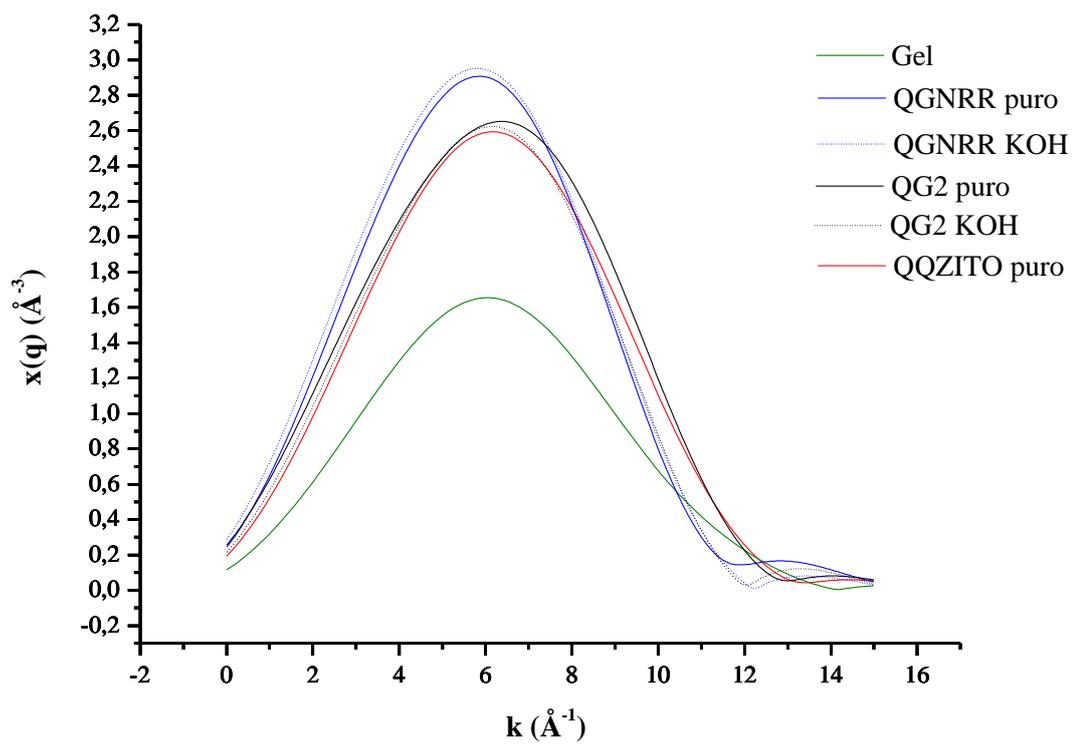


Figura 107: espectros obtidos por EXAFS das amostras puras e atacadas com KOH. (a) primeiros vizinhos; (b) segundos vizinhos

Analisando-se isoladamente a amostra QGNRR, antes e após o ataque com KOH, percebem-se, através dos espectros da figura 108, as diferenças nas transformadas de Fourier entre 1,65 e 3,00 Å. Isso evidencia que mesmo os grãos de quartzo sem deformação (grau 0), predominantes nessa amostra, reagem com os hidróxidos alcalinos. Entretanto, para essa amostra mudanças estruturais ocorridas com o ataque só puderam ser observadas nos segundos vizinhos do átomo de Si.

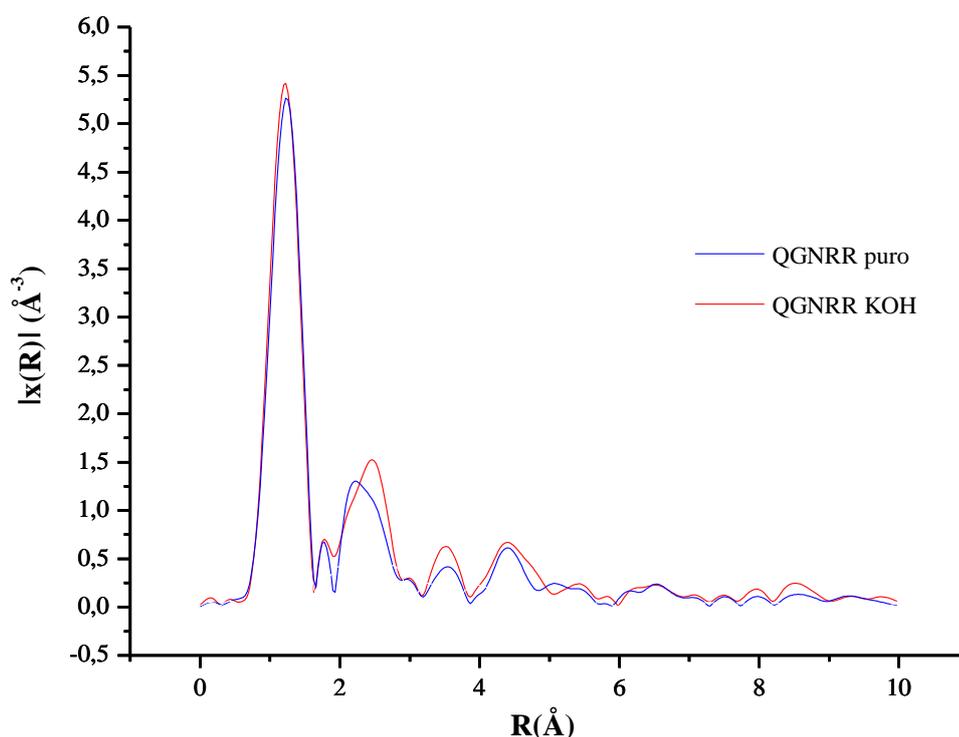


Figura 108: espectros obtidos por EXAFS da amostra QGNRR pura e atacada com KOH

Fazendo-se uma análise geral dos resultados obtidos através de XANES e EXAFS para este estudo verifica-se que um número maior de repetições na obtenção dos espectros se faz necessário para que conclusões mais contundentes pudessem ser percebidas. Estas repetições não foram efetuadas em função do tempo limitado disponibilizado pelo LNLS para realização das análises.

Entretanto, as análises que foram apresentadas neste estudo mostram que a estrutura do átomo de Si é idêntica para todas as amostras de quartzo na condição pura, ou seja, não há diferenças em função dos graus de deformação desse mineral. Contudo, quando as amostras são atacadas com KOH (RAA), mudanças na esfera dos segundos vizinhos do Si foram verificadas. Isso

ocorreu até mesmo na amostra de quartzo oriunda de uma rocha inócua em campo, o que pode ser um indicativo de que ao longo de muito tempo esta rocha também poderá desenvolver a reação.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o que foi discutido neste capítulo do trabalho, os grãos de quartzo podem apresentar 5 graus de deformação distintos quando observados em microscopia ótica:

- a) grau 0: grãos sem deformação;
- b) grau 1: grãos pouco deformados com extinção ondulante leve;
- c) grau 2: grãos muito deformados com forte extinção ondulante, chegando a formar bandas de deformação no grão;
- d) grau 3: grãos muito deformados com forte extinção ondulante e formação de subgrãos;
- e) grau 4: grãos recristalizados a partir de subgrãos.

Através das análises realizadas verificou-se que as rochas constituídas preponderantemente por grãos de quartzo com grau 2 de deformação tem maior potencial de expansão no ensaio acelerado das barras de argamassa (NBR 15577-4). Tal grau de deformação também se mostrou mais suscetível à dissolução de sílica.

Nas rochas reativas em campo, selecionadas para validação dos resultados, o quartzo predominante também possui grau 2.

Foi observado através de MET que os grãos de quartzo com grau de deformação 2 possuem paredes internas de deslocação, as quais são regiões no grão onde as ligações químicas entre os átomos de Si e O estão fragilizadas e, por isso, são mais suscetíveis à reação com os hidróxidos alcalinos. Tais paredes também foram observadas em MET nos grãos pouco deformados (grau 1) e as análises através de RNM corroboraram com essa constatação, evidenciando, ainda, que os grãos de quartzo com grau 1 apresentam sítios amorfos equivalentes aos grãos com grau 2.

Com relação ao grau 3 de deformação, caracterizado pela presença de subgrãos, verificou-se que estes representam um comportamento de interface entre os grãos com grau 2 e os grãos recristalizados (grau 4), podendo contribuir significativamente para o aumento das expansões, especialmente nas rochas consideradas menos deformadas. Os grãos com grau de deformação 4, por sua vez, são grãos de menores dimensões mas que não apresentam deformação e não contribuem tanto para a RAA quanto os grãos com grau 0.

Grãos sem deformação (grau 0) foram observados somente na rocha inócua em campo, na qual são predominantes. Conforme o que já era esperado, grãos sem deformação não denotam comportamento potencialmente reativo. Contudo, as análises através de XANES e EXAFS foram as únicas que mostraram que ao entrar em contato com a solução alcalina, a vizinhança atômica ao redor do átomo de Si é modificada, especialmente na esfera dos segundos vizinhos.

6 COMPARATIVO ENTRE A POTENCIALIDADE REATIVA DAS ROCHAS E AS CARACTERÍSTICAS DO QUARTZO CONSTITUINTE

O quartzo é a principal fonte de sílica livre nas rochas, por isso é considerado o principal responsável pela ocorrência da RAA nas estruturas de concreto. Algumas características desse mineral influenciam diretamente no seu potencial reativo, que são: a sua cristalinidade e seu grau de deformação. O estudo da influência dessas características para o desenvolvimento da RAA foi apresentado nos capítulos 4 e 5 deste trabalho. As relações existentes entre elas serão discutidas neste capítulo.

6.1 DISSOLUÇÃO DE SÍLICA DO QUARTZO

A RAA está intimamente relacionada à facilidade de dissolução de sílica do quartzo. De acordo com a literatura, quando a sílica presente nos agregados se encontra no estado amorfo, ou com baixa cristalinidade, seu potencial de dissolução é maior (KRAUSKOPF, 1972; TROMANS; MEECH, 2001; PONCE; BATIC, 2006). Ponce e Batic (2006) explicam que isso ocorre porque a energia livre da sílica com baixa cristalinidade é maior, o que leva a sua metaestabilidade.

A figura 109 mostra um gráfico apresentado por Krauskopf (1972) que compara a sílica dissolvida pelo quartzo e pela sílica amorfa presente nas rochas. Na figura percebe-se que quando o pH varia de 2 a 8 a quantidade de sílica medida permanece estável para ambos. A partir do pH=8 ocorre um aumento na sílica dissolvida para o quartzo e para a sílica amorfa, entretanto, para a sílica amorfa a dissolução é maior. Com o crescimento do pH, segundo o que mostra a figura 109, a diferença entre a dissolução desses constituintes tende a se equiparar.

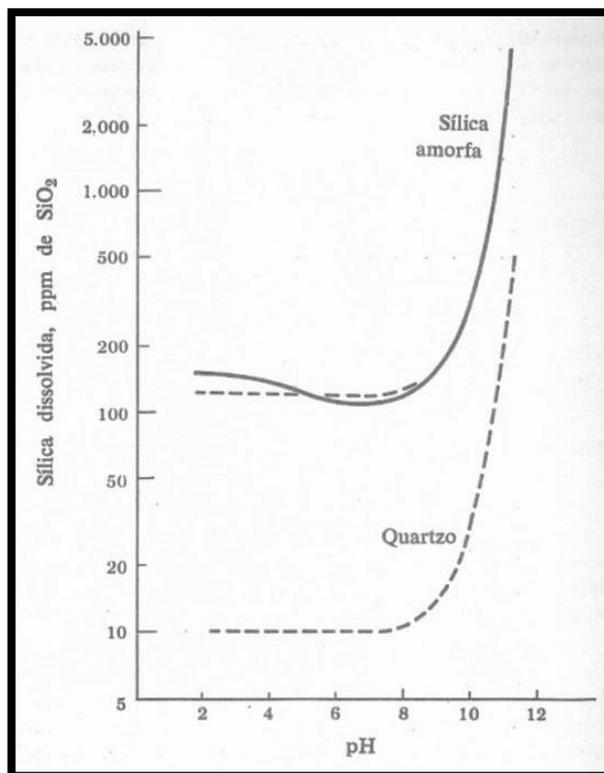


Figura 109: solubilidade da sílica a 25°C (KRAUSKOPF, 1972)

No presente estudo os resultados medidos para a sílica dissolvida pelo método do espectrofotômetro visível (NBR 9848) estão de acordo com o que foi apresentado na figura 109. As amostras BEV e RPF, constituídas por mesóstase com quartzo de baixa cristalinidade, apresentaram maior quantidade de sílica dissolvida que as amostras de quartzo das rochas M1, M2 e M3. A essa constatação deve-se levar em conta, ainda, que para as amostras BEV e RPF a avaliação da dissolução de sílica foi feita a partir de toda a rocha, enquanto nas rochas M1, M2 e M3 foram analisados os grãos de quartzo separados do restante dos minerais, ou seja, mesmo estando mais expostos à solução alcalina, os grãos de quartzo deformados dissolveram menos que os grãos de quartzo da mesóstase (quartzo com baixa cristalinidade).

Observando-se as argamassas das rochas vulcânicas (BEV e RPF), conforme item 4.3.2.1 do capítulo 4, fica bem explícita a dissolução mais intensa do material intersticial, constituído por quartzo, em relação às argamassas moldadas com M1, M2, M3 (item 5.3.2.1 do capítulo 5). Contudo, no caso dos basaltos (por exemplo, amostra BEV) a quantidade de sílica presente é pequena e, por isso, rapidamente é completamente consumida pela reação com os hidróxidos alcalinos. Os grãos de quartzo constituintes das mesóstases Mm e Mq são criptocristalinos e com baixa cristalinidade, por isso dissolvem-se rápida e intensamente em um pH alcalino.

Já as rochas ácidas²⁵ (RPF, M1, M2 e M3) contêm grande quantidade de sílica disponível, que demora a se esgotar, dessa forma, podem resultar em expansões muito intensas com o passar do tempo. Nas rochas em que a sílica disponível é o quartzo bem cristalizado, mas com deformações, caso de M1, M2 e M3, a reação é um pouco mais lenta. Para os riolitos há a presença tanto de sílica amorfa e/ou quartzo com baixa cristalinidade quanto de quartzo bem cristalizado, e seu potencial de dissolução é muito superior. Por isso, chama-se atenção para o potencial álcali reativo dos riolitos.

Jeschke e Dreybrodt (2002) explicam que a dissolução dos minerais está intimamente relacionada à morfologia da sua superfície, ou seja, grãos muito pequenos e com baixa cristalinidade são bastante suscetíveis à dissolução.

Entretanto, mesmo os grãos de quartzo que reagem lentamente, que são pouco deformados e bem cristalizados, podem levar à ocorrência da RAA (M1, M2 e M3). Isso ocorre porque o pH nos poros do concreto é muito elevado, em torno de 12. Knauss e Wolery (1988) mostram, em seu estudo, que a dissolução do quartzo não é afetada quando o pH vai de 2 até cerca de 6. A partir daí, quanto maior o pH, maior a dissolução do quartzo, o que está de acordo com o que foi exposto por Krauskopf (1972) na figura 109. Segundo os autores, a magnitude torna-se quatro vezes superior para pH maior que 11,8.

Algumas considerações a respeito dos ensaios utilizados para avaliar a dissolução do quartzo nas rochas empregadas no presente estudo mostram-se pertinentes. O ensaio da ASTM C 289, que no Brasil era normalizado pela extinta NBR 9774, não é preciso o suficiente para classificar a reatividade das rochas. Este ensaio não foi capaz de detectar as diferenças observadas entre as texturas quantificadas para os grãos de quartzo nas rochas M1, M2 e M3. Para as rochas BEV e RPF o ensaio da ASTM C 289 se mostrou mais coerente. No entanto, mesmo o riolito, que é uma rocha ácida, foi classificado como inócuo.

Os resultados obtidos com o ensaio da NBR 9848 foram bastante satisfatórios e condizentes com as demais análises realizadas. Tal ensaio é muito preciso e pequenas diferenças nas quantidades de sílica presente nas amostras podem ser detectadas. A NBR 9848 foi desenvolvida para medir a quantidade de sílica dissolvida em soda caustica líquida, mas o método de ensaio também é muito empregado para medir a presença de sílica em águas. Contudo, não existem estudos que o utilizaram para avaliar a dissolução de sílica de

²⁵Rochas ácidas são as rochas constituídas por mais de 65% de sílica.

agregados, como foi feito neste trabalho. Por isso, não há como estabelecer limites classificatórios de reatividade através desta técnica. Acredita-se que com um número maior de análises de rochas com diferentes litotipos seja possível obter correlações com outros ensaios, bem como com a reatividade das rochas em campo.

6.2 POTENCIALIDADE DE EXPANSÃO DAS ROCHAS

Os riolitos são rochas vulcânicas que possuem composição mineralógica correspondente ao granito (plutônica). A diferença entre essas rochas é que nos riolitos os grãos possuem dimensões menores e há, ainda, a mesóstase nos interstícios dos grãos, conforme o que já foi discutido neste capítulo. A ‘equiparação’ na mineralogia desses dois tipos de rocha ficou refletida no presente estudo nos resultados do ensaio acelerado da NBR 15577-4, conforme ilustra a figura 110.

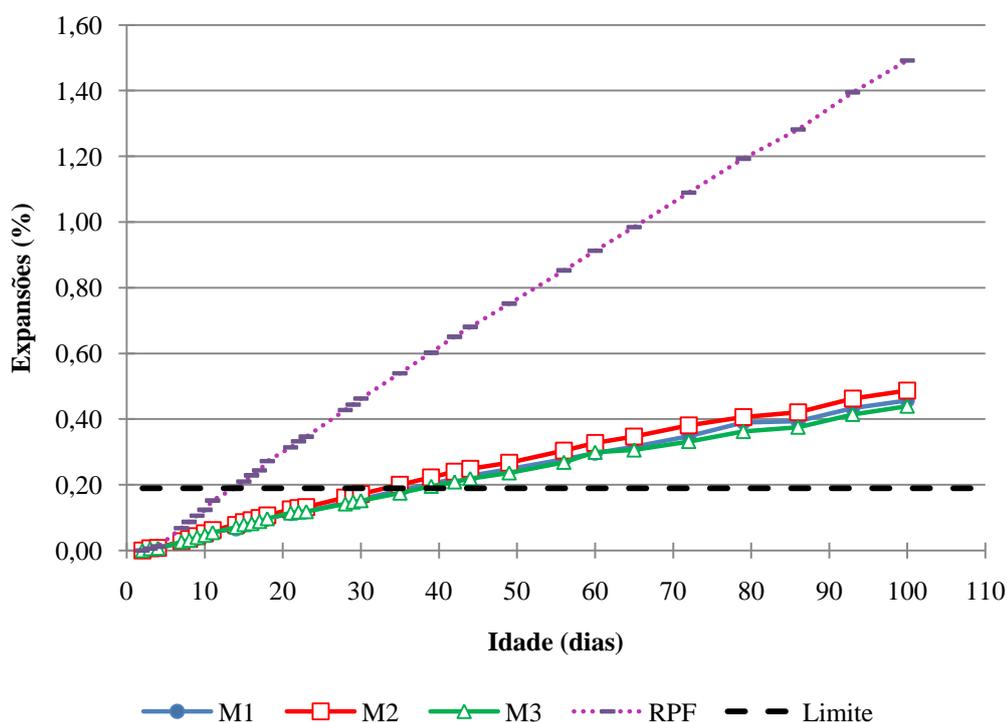


Figura 110: comparativo entre as expansões do ensaio da NBR 15577-4 das rochas M1, M2, M3 e RPF ao longo do tempo

Comparando-se o comportamento das expansões ao longo do tempo para as rochas M1, M2 e M3 e a rocha RPF verifica-se que estes se assemelham. A principal diferença são as taxas de reatividade, que para M1, M2 e M3 são menores. Isso foi demonstrado através da classificação da reatividade para este ensaio, pois aos 30 dias RPF possui uma expansão de 0,46%, enquanto para M1, M2 e M3 as expansões foram de 0,16%, 0,17% e 0,15%, respectivamente. Nota-se, ainda, que aos 100 dias de ensaio não há tendência de estabilização das expansões para nenhuma dessas rochas, em função da grande quantidade de sílica livre ainda disponível para reagir, sendo a taxa de crescimento para o riolito superior às demais rochas.

A principal influência para uma maior taxa de reatividade do riolito RPF é a dimensão do quartzo que está contribuindo para a RAA. Essa comparação entre o riolito RPF com as rochas de origem granítica M1, M2 e M3 evidencia a influência do tamanho dos grãos para a ocorrência da reação. Contudo, aliado ao tamanho dos grãos de quartzo, deve ser considerada a quantidade de sílica presente.

Nos ensaios acelerados de expansão os basaltos têm sido classificados como potencialmente reativos, em função da rápida e intensa reatividade do quartzo presente (quartzo microcristalino constituinte das mesóstases Mm e Mq). Para corroborar com essa afirmação, citam-se os trabalhos de Wakizaka (2000), Korkanç e Tuğrul (2005), Tiecher (2006), Valduga et al. (2006), Sanchez (2008), entre outros. A composição da mesóstase no basalto está disseminada numa matriz com composição muito distinta, logo, quando o fluido alcalino entra em contato com o quartzo da mesóstase do basalto, tende a dissolvê-lo rapidamente devido à instabilidade que se encontra naquele meio.

No entanto, quando os ensaios para classificação da reatividade dos basaltos são realizados em prismas de concreto (NBR 15577-6), ao invés de prismas de argamassa, estes não se mostram potencialmente reativos (SANCHEZ, 2008; COUTO, 2008), ou seja, as expansões decorrentes da RAA são menos intensas nesses ensaios. Os registros de estruturas de concreto afetadas pela RAA também indicam que os basaltos não são os principais responsáveis pela ocorrência da reação ao redor do mundo. No Brasil, em especial, não há nenhum caso oficialmente publicado até o presente momento.

Essas considerações demonstram que os ensaios acelerados como, por exemplo, os preconizados pela NBR 15577-4 e ASTM C 1260, são muito agressivos para os basaltos. O

fato de haver a necessidade de moer a rocha para realização do ensaio faz com que o quartzo presente na mesóstase fique mais disponível, aumentando seu poder de reação com os hidróxidos alcalinos. Por isso, na vida prática os basaltos não são rochas tão perigosas quanto parecem nos ensaios acelerados de avaliação da sua reatividade aos álcalis. Contudo, para corroborar com este comportamento verificado para os basaltos, mais estudos em concretos devem ser realizados.

Em contrapartida, há casos em que rochas classificadas como inócuas nos ensaios acelerados de expansão denotam comportamento reativo em campo. O milonito utilizado na UHE de Moxotó (MXT) é um dos exemplos que pode ser citado (ver item 5.4 do capítulo 5).

No caso das rochas ácidas, cuja principal fonte de sílica livre é o quartzo bem cristalizado, porém deformado, a RAA pode ser mais lenta, dependendo do grau de deformação dos grãos. Grãos de quartzo pouco deformados ou recristalizados demoram mais para reagir, porém, ao longo do tempo, sob uma condição de elevada alcalinidade a reação tende a se manifestar, já que essas rochas possuem grande quantidade de sílica disponível. A própria NBR 15577-1, no seu item 5.3, chama atenção para a possibilidade de resultados falso negativos e falso positivos neste ensaio.

Há que se considerar, ainda, que os resultados dos ensaios acelerados da NBR 15577-4 e da ASTM C 1260 podem ser influenciados pela forma de britagem dos agregados para obtenção da granulometria necessária. Valduga (2007) mostra que dependendo da forma dos grãos de uma mesma rocha pode ser classificada como potencialmente inócua ou reativa, sendo que os grãos mais arredondados resultam nas maiores expansões.

Por fim, ressalta-se que a discussão que está sendo feita neste item do trabalho tem por objetivo chamar atenção para que não sejam utilizados somente de ensaios acelerados de expansão quando se deseja avaliar a reatividade dos agregados. Vários autores têm chamado atenção para observações nesse mesmo sentido, tais como Mizumoto *et al.* (2009), Silva *et al.* (2009).

Considerando-se os resultados desses ensaios e o que vem sendo observado nas estruturas de concreto afetadas pela RAA, nota-se que a presença de quartzo com baixa cristalinidade, desde que em pequenas quantidades, não é tão problemática, visto que são raras as estruturas construídas com basalto que foram acometidas pela RAA. Por outro lado, em algumas rochas,

cuja classificação do ensaio foi de comportamento potencialmente inócuo, houve o desencadeamento da reação em campo. Sendo assim, uma análise detalhada da mineralogia e da textura dos grãos por microscopia ótica, conforme o que foi feito neste estudo, parece ser bastante pertinente e eficaz para avaliar a potencialidade reativa real de uma rocha, além de ser um tipo de avaliação rápida, o que é importante em função da demanda de uso dos agregados.

6.3 PRODUTOS ORIUNDOS DA RAA

Através das avaliações em MEV com auxílio de EDS nas barras de argamassa ensaiadas pelo método da NBR 15577-4 foi possível constatar, em algumas regiões da argamassa e dos fragmentos de rocha nela imersos, a presença do gel oriundo da RAA.

As análises apresentadas na figura 111 mostram um poro parcialmente preenchido por gel da RAA na amostra de argamassa da rocha BEV. Nas rochas BEV e RPF, de modo geral, o gel foi observado nos poros da argamassa e, muitas vezes, percebeu-se, ainda, fissuras radiais a partir do poro, o que evidencia as expansões ocorridas.

A composição química constatada através de EDS para os produtos da reação na rocha BEV é Si, Ca e Na, conforme ilustra a figura 111 (d). Nas argamassas moldadas com as rochas RPF, M1, M2 e M3, além desses constituintes, foi verificada a presença de K (figura 111 (d)). A ausência de K no gel da rocha BEV é o reflexo da sua ausência na própria rocha, uma vez que, nos basaltos, o potássio é encontrado apenas na mesóstase (K-feldspatos) e em pequena quantidade, conforme foi verificado no item 4.2, capítulo 4 deste estudo, apesar de estar contido no cimento Portland.

Contudo é importante salientear que os géis encontrados neste estudo foram gerados a partir da interação da sílica dos agregados com o Na da solução utilizada no ensaio da NBR 15577-4, sem a interação do K do cimento. Segundo Hasparyk (2005), em estruturas de concreto acometidas pela RAA o gel se forma de maneira diferente, sendo composto, principalmente por Si, K e Ca.

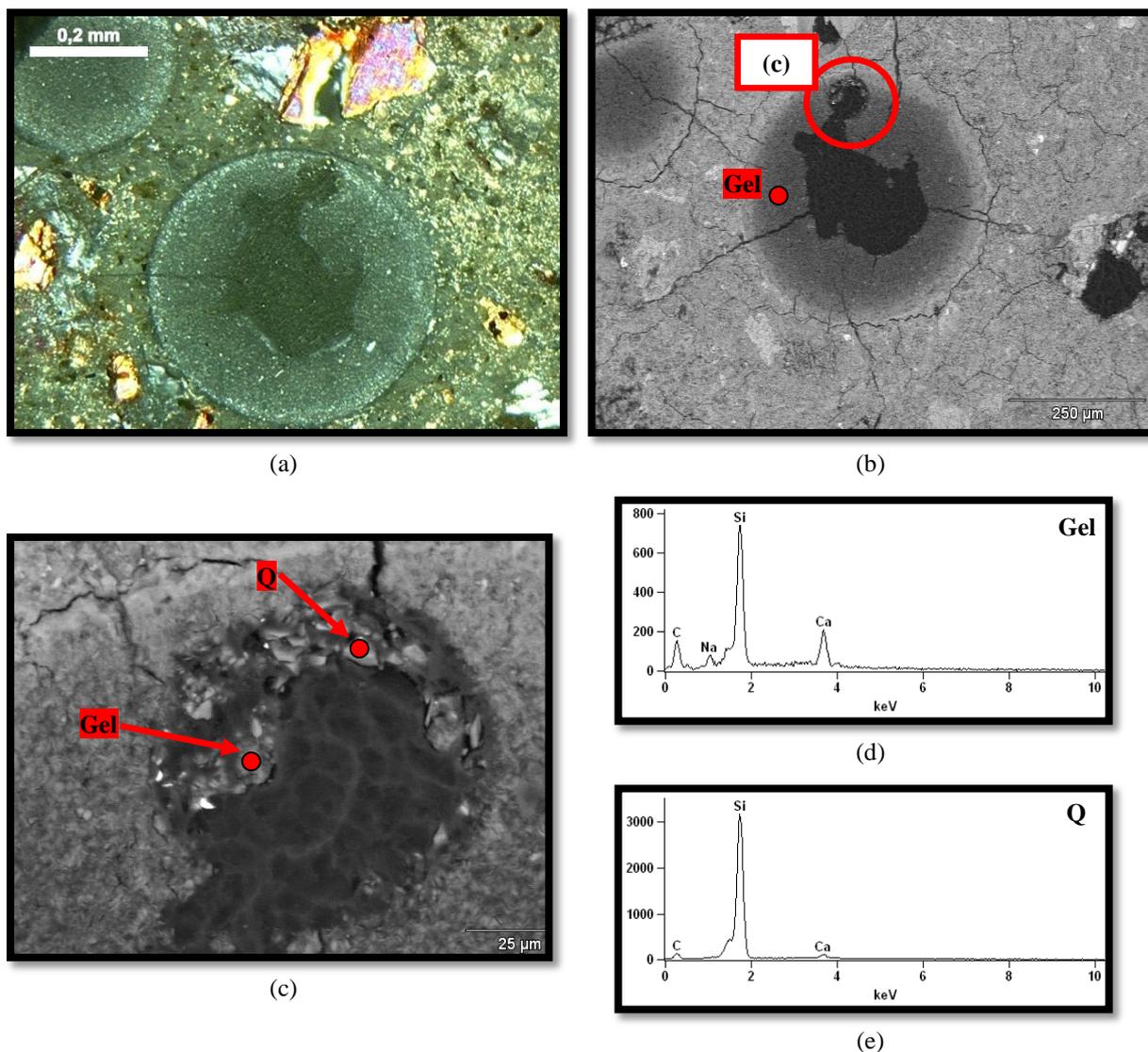


Figura 111: poro parcialmente preenchido por gel proveniente da RAA presente na argamassa da rocha BEV submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob polarizador cruzado, ampliação 10x; (b) (c) micrografias obtidas em MEV, ampliação 130x e 1000x; (d) (e) espectros obtidos por EDS do gel da RAA e de grãos de quartzo presentes no poro

Na figura 112 nota-se o gel circundando um poro da argamassa moldada com a amostra M2. Este poro está ‘conectado’ a um fragmento de rocha contendo quartzo parcialmente dissolvido pela reação com os hidróxidos alcalinos. Tal configuração ilustra o comportamento dos produtos expansivos na argamassa, ou seja, o gel formado a partir da dissolução do quartzo migra para os poros vazios da argamassa e estes, por sua vez, ao serem preenchidos sofrem tensões de tração e acabam por fissurar.

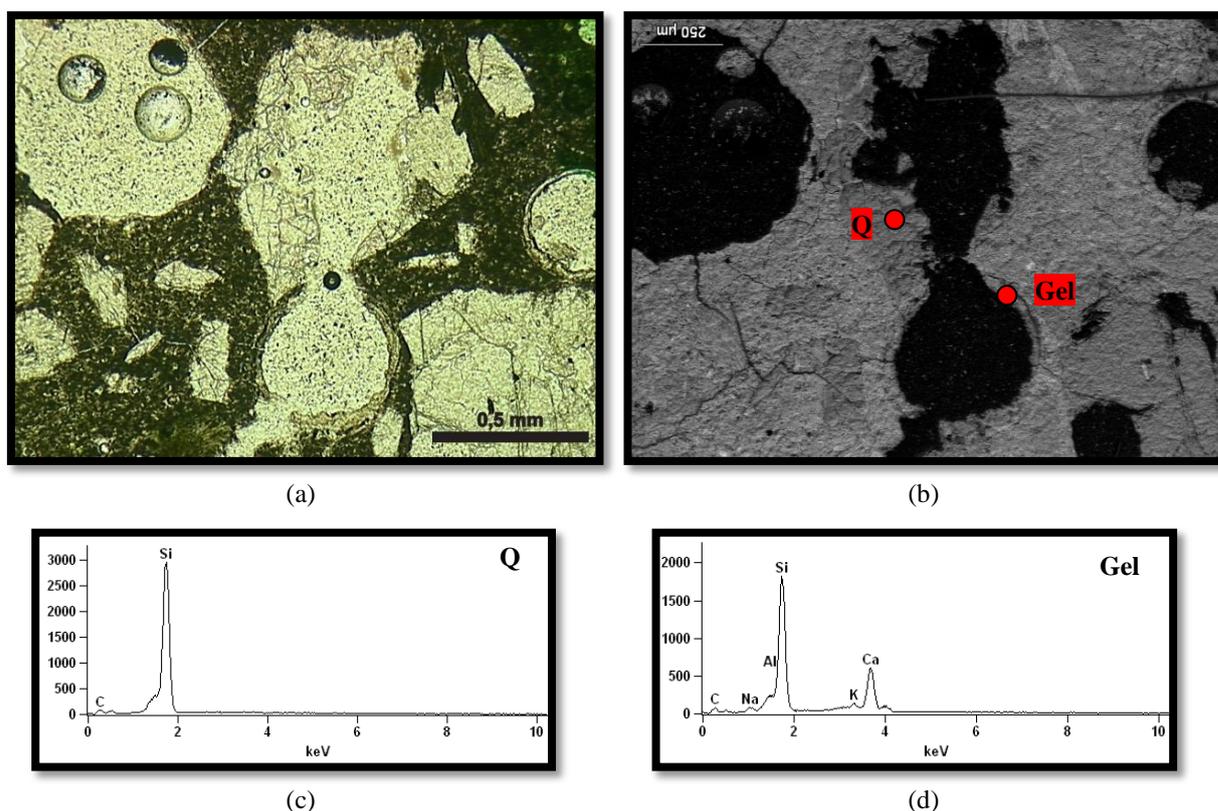


Figura 112: fragmento da rocha M2 contendo gel proveniente da RAA presente na argamassa submetida ao ensaio da NBR 15577-4, onde Q= quartzo. (a) micrografia obtida através de microscopia ótica sob luz natural, ampliação 5x; (b) micrografia obtida em MEV, ampliação 75x; (c) (d) espectros obtidos por EDS do gel da RAA e de grão de quartzo não dissolvido

A análise química por EDS dos produtos da RAA observados nas rochas M1, M2 e M3 identificou a presença de Si, Ca, Na e K. Tais resultados corroboram com o que mostra Fernandes (2009) em estudo a respeito da composição química dos produtos da RAA em diferentes regiões de concretos confeccionados com granito e acometidos pela RAA. A autora verificou que os produtos da RAA presentes dentro do concreto são constituídos por grande quantidade de Ca ao passo que os produtos exsudados não contêm esse elemento químico, o que também está de acordo com o trabalho de Hasparyk (2005).

6.4 CONSIDERAÇÕES RELATIVAS À MINERALOGIA E À TEXTURA DAS ROCHAS

Os resultados do presente estudo em relação à mineralogia identificada e à textura dos minerais, especialmente do quartzo, mostram que as rochas BEV, RPF, M1, M2 e M3 podem ser consideradas potencialmente reativas.

A principal diferença entre as rochas vulcânicas e as rochas M1, M2 e M3 para a ocorrência da RAA é a dimensão dos grãos de quartzo presentes. Nas rochas vulcânicas os grãos são muito pequenos e quando constituem a mesóstase, na maioria das vezes, não são visualizáveis através de microscopia ótica.

A presença de grãos de quartzo com baixa cristalinidade, constituintes da mesóstase, levam à reatividade do basalto BEV no ensaio acelerado da NBR 15577-4. Contudo, em função da pequena quantidade, podem não resultar em comportamento deletério em campo. No caso do riolito RPF, além da mesóstase constituída por quartzo criptocristalino há, ainda, quartzo melhor cristalizado na matriz. Logo, esta rocha possui grande quantidade de quartzo com pequenas dimensões. Tais constatações são indícios de elevada reatividade da rocha com o passar do tempo.

As rochas M1, M2 e M3 possuem grande quantidade de quartzo deformado em sua matriz, o que por si só já implica em potencialidade reativa dessas rochas (conforme discussão do item 6.1). Entretanto, a presença de grãos muito deformados, com bandas de deformação, predominantes na rocha M2 e em rochas comprovadamente reativas em campo, evidenciam que grãos com essas características reagem mais rapidamente.

No Brasil, a NBR 15577-3 estabeleceu alguns critérios para classificação da potencialidade reativa de um agregado. Tais critérios foram atendidos para que as rochas BEV, RPF, M1, M2 e M3 fossem classificadas como potencialmente reativas, conforme mostra o Apêndice C.

Algumas considerações importantes a respeito da NBR 15577-3 são pertinentes neste momento. Primeiramente mostra-se louvável a tentativa de estabelecer, através de uma norma, critérios para classificação da reatividade de um agregado, facilitando a tarefa do examinador responsável. Entretanto, a partir dos resultados e análises deste trabalho, alguns ajustes na referida norma são propostos:

- a) acrescentar na listagem de minerais deletérios presentes na composição mineralógica da rocha os argilominerais que, embora neste estudo não tenham se mostrado potencializadores da RAA, vêm sendo retratados pela literatura internacional como constituintes importantes para que a reação ocorra, especialmente no que diz respeito à esmectita, que é um argilomineral expansivo (GILLOT *et al.*, 1973; WAKIZAKA, 2000; ELERT *et al.*, 2008);

- a.1) o termo clorofeita utilizado na listagem de minerais deletérios da NBR 15577-4 e definido pela referida norma como mistura de argilominerais de Fe, Mg e Ca não está relacionado na literatura internacional com a ocorrência de RAA. No Brasil, alguns trabalhos consideraram a clorofeita um constituinte bastante deletério, tais como Vieira e Oliveira (1997), Hasparyk (1999), Munhoz (2007). Contudo, este termo é encontrado apenas em artigos da década de 70 na literatura internacional, como por exemplo Weaving (1962), Meyer e Sigurdsson (1978), não sendo mais usual nos dias de hoje. Considerando que se trata de uma mistura de argilominerais (definição da própria norma) sugere-se retirar o termo clorofeita da listagem de minerais deletérios e substituí-lo por argilominerais;
- b) conforme o que foi comprovado no presente estudo, o material intersticial das rochas de origem vulcânica, na maioria das vezes, não é amorfo. Trata-se de uma mesóstase constituída por quartzo criptocristalino e feldspatos (especialmente K-feldspato), localizadamente, com grãos pior cristalizados (Mm), outras com grãos visualizáveis em microscopia ótica (Mq) e, ainda, com predominância de argilominerais (Ma) (ver item 4.2, capítulo 4). Dessa forma, mostra-se importante acrescentar a mesóstase à listagem de deletérios;
- c) Dolar-Mantuani (1981) propõe uma metodologia para avaliar a reatividade dos grãos de quartzo através da medida do ângulo de extinção ondulante desse mineral. Tal metodologia foi adotada pela NBR 15577-3, entretanto, os próprios autores enfatizam que tal medida pode incorrer em até 60% de erro, visto que é bastante subjetivo e difícil realizá-la (conforme discussão feita no item 5.2). Por isso, pensa-se que a melhor forma de avaliar as texturas reativas do quartzo seria através do que foi proposto no presente estudo. Sugere-se, desta forma, a utilização da avaliação percentual do quartzo segundo as categorias estabelecidas para este trabalho: grau 0 (quartzo sem deformação, sem extinção ondulante); grau 1 (quartzo pouco deformado, com extinção ondulante leve); grau 2 (quartzo muito deformado, com forte extinção ondulante, chegando a formar bandas de deformação); grau 3 (quartzo muito deformado, com forte extinção ondulante, chegando a formar subgrãos); grau 4 (quartzo recristalizado).

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo do estudo mostrou algumas correlações existentes entre as rochas BEV, RPF, M1, M2 e M3 para a ocorrência da RAA.

Através da discussão apresentada, juntamente com os resultados expostos neste capítulo e nos capítulos 4 e 5, verifica-se que a presença de grãos de quartzo com baixa cristalinidade incorre em rápida ocorrência de expansões em ensaios acelerados (NBR 15577-4). Contudo, quando a quantidade de grãos com essa característica é pequena, a reação pode não ocorrer em campo. Por outro lado, em rochas ácidas a presença de grãos melhor cristalizados, com ou sem deformação, muitas vezes denota resultados inócuos nos ensaios acelerados, mas em campo tais rochas mostram-se reativas. Evidencia-se, assim, que sob condições de elevada alcalinidade, por um período maior de tempo, o quartzo tende a se solubilizar e formar o gel expansivo da RAA.

Os produtos da RAA formados a partir do ensaio da NBR 15577-4 mostraram-se diferentes em função da rocha empregada. As avaliações foram feitas em produtos encontrados dentro de poros e fragmentos das rochas imersos nas argamassas (não em gel exsudado) e evidenciaram que o gel oriundo de agregado basáltico (BEV) é composto, basicamente, por Si, Ca, Na. Nas rochas em que há a presença de K-feldspato na matriz, além desses constituintes, há a presença de K.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal da presente tese de doutorado foi correlacionar as características do quartzo constituinte das rochas com a potencialidade das mesmas desenvolverem a RAA. Para tanto foi necessária a interação entre duas grandes áreas da ciência, engenharia civil e geologia, além das interfaces com a química e a física. Tais inter-relações permitiram ampliar o entendimento do tema RAA, bem como possibilitaram que os objetivos do estudo pudessem ser atendidos satisfatoriamente.

A partir de uma série de experimentos realizados e de resultados apresentados pela literatura pertinente, diversas conclusões foram compreendidas no que diz respeito à influência da cristalinidade e da deformação do quartzo na RAA. Entretanto, como é comum aos trabalhos científicos, este estudo não exaure todas as lacunas do conhecimento relacionadas ao tema do trabalho.

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir das avaliações realizadas, bem como enumera uma série de sugestões para futuras pesquisas que visem expandir o entendimento do assunto.

7.1 CONCLUSÕES

7.1.1 Influência da cristalinidade do quartzo na reação álcali-agregado

A influência da cristalinidade do quartzo na RAA foi estudada a partir de rochas vulcânicas: um basalto, denominado BEV, e um riolito, RPF. Grãos de quartzo com diferentes graus de cristalinidade foram identificados na mesóstase intersticial dessas rochas. Sendo assim, de acordo com esses graus de cristalinidade, foram diferenciados três tipos de mesóstase:

- a) mesóstase com grãos microcristalinos (Mm), caracterizada pela coloração castanha quando observada através de microscopia ótica. Contém grãos microcristalinos, com baixa cristalinidade, de quartzo ou feldspato, que somente podem ser identificados através de MEV com auxílio de EDS. É acompanhada por pequenos grãos de hematita e agulhas de apatita;
- b) mesóstase constituída por grãos melhor cristalizados (Mq), onde há a disseminação de grãos de quartzo que podem ser visualizados em microscopia ótica, associados ao material de composição feldspática, argilominerais e apatita;
- c) mesóstase composta predominantemente por argilominerais (Ma), que sob microscopia ótica possui coloração esverdeada, onde o material quartzo-feldspático é acompanhado por argilominerais, sendo estes identificados como esmectitas;

O estudo mostrou que o comportamento que rege o mecanismo de ataque dos hidróxidos alcalinos ao quartzo com baixa cristalinidade muda de acordo com a mineralogia das rochas vulcânicas.

Comparativamente, o basalto apresentou, inicialmente, expansões maiores que as do riolito no ensaio acelerado das barras de argamassa. Contudo, logo essas expansões do basalto se estabilizaram, evidenciando o término da sílica livre mais disponível para reagir. O riolito, por sua vez, manteve a mesma taxa de expansão do início ao fim do ensaio.

Conclui-se que esse comportamento mais ‘agressivo’ ao quartzo constituinte do basalto reflete a condição completamente instável que esse mineral se encontra na rocha, uma vez que o quartzo presente na mesóstase do basalto forma-se a partir do resíduo de sílica que não foi aproveitado para formar os minerais principais da rocha, que são plagioclásio, piroxênios e opacos. O magma que origina o basalto possui pouca quantidade de sílica. Sendo assim, ao entrar em contato com os hidróxidos alcalinos, o quartzo pobremente cristalizado da mesóstase dissolve-se rapidamente. Como a rocha possui pouca quantidade de quartzo, logo a sílica livre disponível se esgota, fazendo com que a RAS cesse.

Para a rocha riolítica o quartzo com baixa cristalinidade encontra-se numa condição mais equilibrada com o restante da matriz. Assim, os hidróxidos alcalinos agem de uma maneira

menos intensa que no basalto. Numa condição estável, o quartzo nessa rocha é menos propenso a reagir, porém, por apresentar uma quantidade bem superior de quartzo em sua constituição, o riolito tende a representar maiores danos ao longo do tempo do que o basalto devido à RAA.

Com base nas características de uma rocha vulcânica inócua (BNRG), utilizada para validar os resultados obtidos com as rochas BEV e RPF, observa-se que a quantidade de quartzo com baixa cristalinidade é muito pequena, uma vez que o material intersticial predominante nesta rocha é um vidro vulcânico rico em Fe, Mg, Al, Ca e Si. Tais constituintes originam os plagioclásios e piroxênios da matriz dessa rocha, contudo, ao esfriar rapidamente solidificam numa condição completamente amorfa, mas pobre em sílica; diferentemente do que foi observado nas amostras BEV e RPF, em que o material intersticial apresenta grãos microcristalinos de quartzo e K-feldspatos.

Além disso, a amostra BNRG apresenta em sua composição mineralógica argilominerais bem cristalizados. Considerando que as análises realizadas nas amostras BEV e RPF mostraram que os argilominerais presentes na mesóstase Ma protegem o quartzo nela disseminado da dissolução pela reação com os hidróxidos alcalinos, pode-se concluir que a presença de argilominerais nas rochas de origem vulcânica pode tornar menos intensa a dissolução da sílica e, por consequência, à RAA.

7.1.2 Influência da deformação do quartzo na reação álcali-agregado

As rochas selecionadas para o estudo da influência da deformação dos grãos de quartzo na RAA, M1, M2 e M3, atenderam ao requisito proposto, ou seja, diferenciam-se entre si apenas pela textura, já que possuem intensidades de deformação distintas. Tais rochas permitiram que fossem identificados cinco graus de deformação para o quartzo e, a partir dessas categorias, foi possível estabelecer as correlações que culminaram nas conclusões apresentadas neste item do trabalho. Os graus de deformação estabelecidos para os grãos de quartzo foram:

- a) grau 0: grãos sem deformação;
- b) grau 1: grãos pouco deformados com extinção ondulante leve;

- c) grau 2: grãos muito deformados com forte extinção ondulante, chegando a formar bandas de deformação no grão;
- d) grau 3: grãos muito deformados com forte extinção ondulante e formação de subgrãos;
- e) grau 4: grãos recristalizados a partir de subgrãos.

Este estudo permitiu concluir que existem paredes de deslocação nos grãos de quartzo que propiciam maior reatividade dos grãos. As paredes são regiões nos grãos onde as ligações químicas entre Si e O estão fragilizadas, por isso representam uma condição que facilita a reação com os hidróxidos alcalinos.

Tais paredes foram observadas através de microscopia ótica nos grãos com grau 3 de deformação. Nos grãos com grau de deformação 1 e 2 a microscopia ótica permitiu visualizar apenas extinção ondulante fraca (grau 1) e intensa com formação de bandas (grau 2). Por isso foram realizadas observações através de MET em grãos com esses graus de deformação, as quais constataram a presença de paredes de dislocação tanto nos grãos com grau 1 quanto nos grãos com grau 2. Isso evidenciou que mesmo grãos pouco deformados possuem caminhos mais frágeis para a reação com os hidróxidos alcalinos. As análises através de RNM também evidenciaram que, em escala atômica, os grãos com grau 1 podem ser considerados tão deformados quanto os grãos grau 2.

O grau 2 representa maior potencial de reatividade tendo como base as quantidades de grãos de cada diferente grau de deformação com a dissolução de sílica e as expansões. Isso foi confirmado através das rochas reativas em campo, pois em todas o quartzo predominante apresentou forte extinção ondulante com bandas de deformação (grau 2).

Em relação ao potencial reativo dos grãos de quartzo com grau 1, constatou-se que estes podem contribuir substancialmente para as expansões, contudo, de maneira menos intensa que o grau 2. Já o grau 3 representa uma transição entre o grau 2 e o grau 4, e o seu comportamento também mostrou que este contribui para a ocorrência de expansões deletérias. Isso foi verificado especialmente nas rochas reativas em campo.

Na rocha inócua selecionada para validar os resultados, verificou-se a presença predominante de grãos sem deformação (grau 0) por microscopia ótica. Contudo, as análises através de

XANES, EXAFS mostraram que os grãos de quartzo dessa rocha são afetados pela RAA, especialmente na esfera dos átomos de segunda vizinhança ao Si.

7.1.3 Conclusões gerais

Segundo os resultados deste estudo, em concordância com o que relata a literatura, o quartzo com baixa cristalinidade possui maior facilidade de dissolução que o quartzo bem cristalizado, mesmo que este apresente deformações.

Os resultados obtidos em relação ao potencial expansivo das rochas estudadas mostraram que o riolito (RPF) denota um comportamento semelhante ao observado para as rochas M1, M2 e M3. Todas essas rochas são ácidas e, portanto, possuem grande quantidade de sílica livre disponível. Contudo, a taxa de expansão da rocha riolítica foi bem superior, o que evidencia o maior potencial de dissolução do quartzo com baixa cristalinidade presente nessa rocha.

Na rocha basáltica (BEV) o quartzo que contribui para a ocorrência da RAA também possui baixa cristalinidade, e as expansões para esta rocha também foram bastante intensas, no entanto, estabilizaram-se rapidamente devido ao esgotamento da sílica livre presente. Tal constatação, aliada aos resultados da literatura que mostram que os basaltos não são rochas que apresentam intensa reatividade em campo, nem em ensaios realizados no concreto, ao contrário dos granitos e riolitos, conclui-se que a quantidade de sílica livre presente com baixa cristalinidade nas rochas de origem vulcânica é determinante para que a RAA ocorra ou não.

A presença preponderante de grãos de quartzo intensamente deformados com bandas de deformação nas rochas utilizadas como agregados para o concreto denota grande potencialidade de ocorrência da RAA em campo (conforme foi visto para as rochas QZITO, MXT, GRR), mesmo que os ensaios acelerados de expansão não denotem potencialidade reativa da rocha. Sendo assim, considerando-se os resultados obtidos para as análises da influência dos graus de cristalinidade e deformação do quartzo na RAA, pode-se dizer que através de uma análise petrográfica detalhada das rochas é possível determinar seu potencial álcali-reativo.

Assim, como conclusão geral deste trabalho, pode-se dizer que rochas com grande quantidade de sílica livre disponível (com baixa cristalinidade/amorfa ou não) são propensas a desenvolver RAA. Os grãos pouco deformados de quartzo podem demorar mais para

desencadear a reação, porém ao longo do tempo tendem desenvolvê-la, devido à elevada alcalinidade do concreto, que desestabiliza os grãos.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propiciou o entendimento e a correlação de uma série de fatores intervenientes à ocorrência da RAA nas estruturas de concreto, especialmente no que diz respeito à influência da cristalinidade e da deformação do quartzo. Entretanto, por se tratar de um assunto bastante amplo e complexo, diversas apreciações podem contribuir para que se amplie a compreensão deste tema de pesquisa. Sendo assim, sugere-se o estudo dos seguintes tópicos:

- a) avaliar a potencialidade reativa de um sienito, que é uma rocha rica em sílica mas sem quartzo, a fim evidenciar a importância da sílica livre (proveniente do quartzo e seus polimorfos – opala, calcedônia, por exemplo) para a ocorrência da RAA;
- b) analisar a potencialidade de desenvolvimento da RAA através de ensaios desenvolvidos com concreto e comparar com os diferentes graus de deformação e cristalinidade do quartzo presente nas rochas empregadas;
- c) estudar a dissolução de sílica através do método do espectrofotômetro visível (NBR 9848) em diferentes litotipos;
- d) comparar a reatividade de um número maior de rochas basálticas com as quantidades dos diferentes tipos de mesóstase identificados no presente estudo;
- e) ampliar os estudos através de RNM das amostras de quartzo com diferentes graus de deformação nas condições pura e atacada com KOH, variando o tempo e a temperatura de ataque, a fim de avaliar, efetivamente, a influência das diferentes estruturas cristalinas (distintos graus de deformação) dos grãos de quartzo na ocorrência da RAA;
- f) quantificar, através de refinamento Rietveld, os produtos formados a partir da reação entre os grãos de quartzo com diferentes graus de deformação e os hidróxidos alcalinos (RAA);

- g) analisar através de micro-difração de raios X, utilizando a energia Síncrotron, como ocorre o ataque dos hidróxidos alcalinos aos grãos de quartzo com diferentes graus de deformação;
- h) Estudar o papel dos argilominerais na RAA, especialmente no que diz respeito ao seu potencial de dissolução.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T.; SILVA, J. J. R.; HASPARYK, N. P.; SILVA, C. M. Investigação do potencial de reatividade para o desencadeamento de RAA do agregados miúdos e graúdos comercializados na região metropolitana de Recife. In: **II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto**, 2006. Rio de Janeiro. Anais...São Paulo:IBRACON, 2006.
- ANDRIOLO, F. R. AAR dams affected in Brazil on the current situation. In: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2000. Québec. **Proceedings...**Québec, 2000, p. 1243-1252.
- ALVES, D. B. Desenvolvimento da metodologia de preparação de amostras para análise difratométrica de argilominerais no centro de pesquisas da Petrobrás. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro: Petrobrás, n. 1(2), p. 157-175, 1987.
- AMO, D. G.; PERÉZ, B. C. Diagnosis of the alkali-silica reactivity potential by means of digital image analysis of aggregate thin sections. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1449-1454, 2001.
- ANDERSEN, K. T. ; THAULOW, N. The application of undulatory extinction angles (UEA) as an indicator of alkali-silica reactivity of concrete aggregate. **Journées d'étude**, Paris: École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 1-6, 1989.
- ANEEL-BIG. Agencia Nacional de Energia Elétrica – Banco de Informações de Geração. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. 2.ed. 2003. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>>. Acesso em: 22 out. 2007.
- ANEEL-BIG. Agencia Nacional de Energia Elétrica – Banco de Informações de Geração. **Capacidade de Geração**. 2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15>>. Acesso em: 22 out. 2007.
- ANEEL-BIG. Agência Nacuinal de Energia Elétrica. **Capacidade de Geração**. 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 25 fev. 2010.
- 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 test)**. Philadelphia, 2001. Section 4 (Construction), (Concrete and aggregate), p.4.
- _____. **ASTM C 289/94: Standard testing method for potential alcali-silica reactivity of aggregates (chemical method)**. Philadelphia, 1994. Section 4 (Construction), (Concrete and Aggregates), p. 5.
- 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**. São Paulo, 2005.

_____. **NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis no concreto.** São Paulo, 2008.

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

_____. **NBR 5733 EB-2: Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 9774: Agregado: Verificação da reatividade potencial pelo método químico.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9848: Soda cáustica líquida - determinação de sílica: método espectrofotométrico visível com molibdato de amônio.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 9935: Agregado - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2005.

BATIC, O.; MAIZA, P.; SOTA, J. Alkali silica reaction in basaltic rocks NBRI method. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 7, p. 1317-1326, 1994.

BERRA, M.; MANGIALARDI, T.; POLINI, A.E. Rapid evaluation of the threshold alkali level for alkali-reactive siliceous aggregates in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 4, p. 325-333, 1999.

BOVEY, F. A. **Nuclear magnetic resonance spectroscopy.** New York: Academic Press, 1969.

BRADY, P. V.; WALTHER, J. V. Kinetics of quartz dissolution at low temperatures. **Chemical Geology**, v. 82, p. 253-264, 1990.

BROEKMANS, M. A. T. M. Structural properties of quartz and their potential role for ASR. **Materials Characterization**, v. 56, n. 2-4, p. 129-140, 2004.

BROEKMANS, M. A. T. M. **The alkali-silica reaction: mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegian mylonites.** 2002.143f. PhD (Thesis). University of Utrecht, Dutch.

BROEKMANS, M. A. T. M.; JANSEN, J. B. H. Silica dissolution in impure sandstone: application to concrete. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 62, n. 1-3, p. 311-318, 1998.

BULTEEL, D.; GARCIA-DIAS, E.; VERMET, C.; ZANNI, H. Alkali-silica reaction: a method to quantify the reaction degree. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1199-1206, 2002.

BULTEEL, D.; GARCIA-DIAZ, E.; DÉGRUGILLIERS, P. Influence of lithium hydroxide on alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**. *Article in press* (Disponível online), 2009.

BUNKER, G. **Elements of XAFS**. Physics Department: Illinois Institute of Technology, Chicago, p. 1-10, 1997. Disponível em: <<http://gbxafs.iit.edu/training/xafsoverview.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2007.

CÂNDIDO, W. F. **Estudo de tratamentos com lítio no combate da reação álcali-agregado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

CARDOSO, A. S.; HASPARYK, N. P.; DÓREA, S. C. L. Reação álcali-agregado: potencialidade reativa dos agregados utilizados em concretos no estado de Sergipe. In: **51º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2009, Curitiba. Anais...São Paulo:IBRACON, 2009.

CARNEIRO, A. **Pontes do Recife sem manutenção**. [S.I.]: Jornal do Comércio, 18 mar. 2001. Disponível em: <http://www2.uol.com.br/JC/_2001/1803/cd1803_7.htm>. Acesso em: 9 jul. 2008.

CARNEIRO, C. D. R.; FILHO, C. R. S.; ARAÚJO, M. N. C.; SANTOS, T. J. S.; SILVA, W. L. **Típos de foliação**. Notas de aula 2003. Disciplina: Geologia estrutural. Universidade de Campinas. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/site/aulas/87/FOLIACOES.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2008.

CHATTERJI, S. Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 7-8, p. 788-795, 2005.

CHATTERJI, S.; JENSEN, A.D.; THAUWLOW, N.; CHRISTENSEN, P. Studies of alkali - silica reaction, part 3: Mechanisms by which NaCl and Ca(OH)₂ affect the reaction. **Cement and Concrete Research**, v.16, n. 2, p. 246-254, 1986.

CHEN, J.; JUYAPALAN, A. R.; KIM, J-Y.; KURTIS, K. E.; JACOBS, L. J. Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique. **Cement and Concrete Research**. *Article in press* (Disponível online), 2010.

CHESCOE, D.; GOODHEW, P. J. **The operation of transmission and scanning electron microscopes**. New York: Oxford University Press, 1990.

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

CORDEIRO, L. N. P. C. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

DANA, J. D. **Manual de mineralogia**. Tradução: Rui Ribeiro Franco. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1974.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas: uma introdução**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2. ed., 2000.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. On the role of calcium in the alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 12, n. 3, p. 321-331, 1982.

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

DIOP, M. B.; GRUTZECK, M. W. Low temperature process to create brick. **Construction and Building Materials**, v. 22, n.6, p. 1114-1121, 2008.

DOLLAR-MANTUANI, L. M. M. Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali-reactive rocks. In: **Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, 1983, Cape Town. Proceedings...Toronto: ICAAR, 1981.

DONOSO, J. P. **Ressonância Magnética Nuclear**. Notas de aula 2008. Instituto de Física de São Carlos. Disciplina: Espectroscopia Física. Universidade de São Paulo. Disponível em: <www.ifsc.usp.br/~donoso/espectroscopia/RMN.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2010.

DUNANT, C. F.; SCRIVENER, K. L. Micro-mechanical modeling of alkali-silica-reaction-induced degradation using the AMIE framework. **Cement and Concrete Research**. *Article in press* (Disponível online), 2009.

DUNCAN, M. A. G.; GILLOT, J. E.; SWENSON, E. G. Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia: field and petrographic studies. **Cement and Concrete Research**, v. 3, n. 2, p. 119-128, 1973.

DUTRA, C. V.; GOMES, C. B. A fluorescências de raios X na geologia. In: **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**. Coordenador Celso B. Gomes. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1984, p. 84-120.

EDWARDS, B. R.; RUSSEL, J. K. A review and analysis of silicate mineral dissolution experiments in natural silicate melts. **Chemical Geology**, v. 130, n. 3-4, p. 233-245, 1996.

ELERT, K.; SEBASTIÁN, E.; VALVERDE, I.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. Alkaline treatment of clay minerals from Alhambra Formation: implications for conservation of earthen architecture. **Applied Clay Science**, v. 39, n. 3-4, p. 122-132, 2008.

ELERT, K.; SEBASTIÁN, E.; VALVERDE, I.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. Alkaline treatment of clay minerals from the Alhambra Formation: implications for the conservation of earthen architecture. **Applied Clay Science**, v. 39, n. 3-4, p. 122-132, 2008.

ENGELHARDT, G.; MICHEL, D. **High resolution solid-state NMR of silicates and zeolites**. New York: John Willy and Sons, 1987.

FANCIO, E. **Aplicação do método de Rietveld para análise quantitativa de fases dos polimorfos da zircônia por difração de raios X**. 1999. 172f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FENG, X.; THOMAS, M. D. A.; BREMMER, T. W.; FOLLIARD, K. J.; FOURNIER, B. New observations on the mechanism of lithium nitrate against alkali silica reaction (ASR). **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 1, p. 94-101, 2010.

FERNANDES, I. Composition of alkali-silica reaction products at different locations within concrete structures. **Materials Characterization**, v. 60, n. 7, p. 655-668, 2009.

FERNANDES, I.; NORONHA, F.; TELES, M. Examination of concrete from an old Portuguese dam: Texture and composition of alkali-silica gel. **Materials Characterization**, v. 58, n. 11-12, p. 1160-1170, 2007.

FERNANDES, I.; NORONHA, F.; TELLES, M. **Microscopic analysis of alkali-aggregate reaction products in a 50-year-old concrete**. **Materials Characterization**, v. 53, n. 2-4, p. 295-306, 2004.

FLORINDO, R. N. **Estudo da reação álcali-silica em concretos através de ressonância magnética nuclear de alta resolução**. 2009. 148f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de raios X. In: **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**. Coordenador Celso B. Gomes. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1984, p. 2-42.

FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. Review to the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation - Paraná Basin, South America. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre. Submetido.

FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. Minerais e rochas. In: **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, CNPQ, FAPESP, 1998, p. 15-38.

FURNAS, Equipe de.; Laboratório de Concreto; ANDRADE, W.P. (Ed.). Reatividade potencial álcali-agregado. In: **Concretos massa estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

GARCIA-DIAZ, E.; RICHE, J.; BULTEEL, D.; VERNET, C. Mechanism of damage for the alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, p. 395-400, 2006.

GARRELS, R. M.; MACKENZIE, F. T. **Evolution of sedimentary rocks**. New York: W. W. Norton & Company. Inc., 1971.

GIL, V. M. S.; GERALDES, C. F. G. C. **Ressonância magnética nuclear: fundamentos, métodos e aplicações**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

GILLOT, J. E.; DUNCAN, M. A. G.; SWENSON, E. G. Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia: character of the reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 3, n. 2, p. 521-535, 1973.

GILLOTT, J. E.; ROGERS, C. A. Alkali-aggregate reaction and internal release of alkalis. **Magazine of Concrete Research**, v. 46, n. 167, p. 99-112, 1994.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios X e quantificação por refinamento de Rietveld**. 2003. 157f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Faculdade de Geologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GOGUEL, R. Alkali release by volcanic aggregate in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 4, p. 841-852, 1995.

GOMES, M. E. B. **Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da bacia do Paraná – região de Frederico Westphalen (RS – Brasil)**. 1996. 264f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GRATTAN-BELLEW, P. E.; BEAUDOIN, J. J. Effect of phlogopite mica on alkali-aggregate expansion in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 10, n. 6, p. 789-797, 1980.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico - geomorfológico**. 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2001.

HAHA, B. M.; GALLUCCI, E.; GUIDOUM, A.; SCRIVENER, K. L. Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 8, p. 1206-1214, 2007.

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

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

HASPARYK, N. P.; BATTAGIN, A.; CASTRO, A. P.; SALLES, F. M.; MUNHOZ, T. A.; KUPERMAN, S. C.; FILHO, J. M. Comportamento reativo de agregados brasileiros do ponto de vista da reação álcali-agregado. In: **50º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2008. Salvador. Anais...IBRACON, 2008.

HILL, J. R.; MADSEN, I. C. Data collection strategies for constant wavelength Rietveld analysis. **Powder Diffraction**, v. 2, p. 146-163, 1987.

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

HÜNGER, K. J. The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 8, p. 1193-1205, 2007.

JESCHKE, A. A.; DREYBRODT, W. **Dissolution rates of minerals and their relation to surface morphology**. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 66, n. 17, p. 3055-3062, 2002.

KAHN, H. **Microscopia eletrônica de varredura**. Notas de aula 2008. Instituto de Geociências. Disciplina: Microscopia eletrônica de varredura e microanálise química. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_4_MEV_PMI-2201.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2008.

KATAYAMA, T.; TAGAMIA, M.; SARAIA, Y.; IZUMIB, S.; HIRAB, T. Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan. **Materials Characterization**, v. 53, n. 2-4, p. 105-122, 2004.

KAWAI, J. Absorption techniques in x-ray spectrometry. **Encyclopedia of Analytical Chemistry**. R. A. Meyers (Ed.). Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000.

KAWAMURA, M.; FUWA, H. Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 6, p. 913-919, 2003.

KAWAMURA, M.; IWAHORI, K. ASR gel composition and expansive pressure in mortars under restraint. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, n.1, p. 47-56, 2004.

KHIARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: **I Simpósio Nacional de Agregados**, 1986. São Paulo. Anais...São Paulo: EPUSP, 1986, p. 127-138.

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

KHIARA, Y.; SBRIGHI, C. N.; KUPERMAN, S. C. Reação álcali-agregado: visão atual e situação brasileira. In: **Simpósio sobre durabilidade do concreto**, 1998. São Paulo. Anais...São Paulo: IBRACON/USP, 1998.

KHOUCHEF, L.; VERSTRAETE, J.; PRADO, R. J.; TUILIER, M. H. XANES, EXAFS and RMN contributions to follow the structural evolution induced by alkali-silica reaction in SiO₂ aggregate. **Physica Scripta**, v. T115, p. 552-555, 2005.

KNAUSS, K. G.; WOLERY, T. J. Muscovite dissolution kinetics as a function of pH and time at 70°C. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 53, n. 4, p. 1493-1501, 1989.

KNAUSS, K. G.; WOLERY, T. J. The dissolution kinetics of quartz as a function of pH and time at 70°C. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 52, n. 1, p. 43-53, 1988.

KORKANÇ, M.; TRUĞRUL, A. Evaluation of selected basalts form the point of alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n.3, p. 505-512, 2005.

KRAUSKOPF, K. B. **Introdução à geoquímica I**. Tradução: Lando, M.; Bogus, P. S. C. São Paulo: Editora Polígono, 1992.

LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON. **Fonte de luz Síncrotron**.

Disponível em: <<http://www.lnls.br/lnls/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=12>>. Acesso em 08 ago. 2008.

LEAL, K. Z. **Ressonância magnética nuclear**. Material didático 2009. Programa de Pós-Graduação em Física-Orgânica. Disciplina: Espectrometria. Universidade Federal Fluminense. Disponível em:

<<http://www.uff.br/fisicoquimica/docentes/katialeal/didatico/Capitulo8.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2010.

LEEMANN, A.; HOLZER, L. Alkali-aggregate reaction: identifying reactive silicates in complex aggregates by ESEM observation of dissolution features. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 7-8, p. 796-801, 2005.

LEEMANN, A.Ç; LOTHENBACH, B. The influence of potassium-sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1162-1168, 2008.

LESSMANN, V. E. **Estudo da reação de cura de resinas uréia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear**. 2008. 121f. Dissertação (Mestrado em Química) - Faculdade de Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LOPES, A. M. C. **Propriedades físicas dos minerais**. Apostila 2002. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Ciências da Terra. Universidade de Coimbra. Disponível em: <http://www.dct.uc.pt/alunos/PROPRIEDADES_FISICAS_DOS_MINERAIS.pdf>. Acesso em 17 ago 2008.

LUCHETTI, A. C. F.; MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R.; SQUISATO, E.; OLIVEIRA, M. A. F. Litoestratigrafia e Litogeoquímica das Rochas Vulcânicas Ácidas Associadas ao Vulcanismo Serra Geral. In: 3º **Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados**, 2005, Cabo Frio, Rio de Janeiro, Brasil. Anais...São Paulo: SBG, 2005. p. 277-282.

LUKSCHOVÁ, Š.; PŘIKRYL, R.; PERTOLD, Z. Petrographic identification of alkali-silica aggregates in concrete from 20th century bridges. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 734-741, 2009.

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura**. Apostila 2008. Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em 17 ago. 2008.

MARFIL, S. A.; MAIZA, P. Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction: a petrography study of three cases in Argentina. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 7, p. 1017-1021, 2001.

MARFIL, S. A.; MAIZA, P. J. Assessment of the potential alkali reactivity of rhyolitic rocks from Argentina. In: **10º Internaternational Congress of IAEG (International Association for Engineering Geology)**, Nottingham. **Proceedings...**Nottingham: United Kingdom, v. 1, p. 1-6, 2006.

MARFIL, S. A.; MAIZA, P. J. Zeolite crystallization in portland cement concrete due to alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 6, p.1283-1288.

MAZALI, I. O. **EXAFS como técnica de caracterização estrutural de materiais: fundamentos teóricos e aplicações**. 1998. 33f. Exame de Qualificação para obtenção do título de Doutor - Instituto de Química, Universidade de Campinas, Campinas.

McCUSKER, L. B.; VON-DREELE, R. B.; COX, D. E.; LOUEËRD, D.; SCARDIE, P. Rietveld refinement guidelines. **Journal Application Crystallography**, v. 32, p. 36-50, 1999.

MESQUITA, M. J. M. **Controle estrutural e alteração metamórfico-hidrotermal na Província Aurífera de Porto Nacional - TO**. 1996. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEXIAS, A. S. **Alteração hidrotermal e mineração de ouro associada no distrito aurífero de Lavras do Sul/RS - a área do Bloco Butiá**. 2000. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEYER, P. S.; SIGURDUSSON, H. Interstitial acid glass and chlorophaeite in Iceland basalts. **Lithos**, v. 11, n. 3, p. 231- 241, 1978.

MINEROPAR. Mineropar minerais do Paraná. **Glossário de geologia**. [S.I.]. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/mineropar/modules/glossario/conteudo.php>>. Acesso em: 20 dez. 2009.

MITCHELL, L. D.; BEAUDOIN, J. J.; GRATTAN-BELLEW, P. The effects of lithium hydroxide solution on alkali silica reaction gels created with opal. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 4, p. 641-649, 2004.

MIZUMOTO, C.; SALLES, F. M.; KUPERMAN, S. C.; SEGANTINI, A. A. S. Análise dos granitos nos ensaios de reatividade potencial em barras de argamassa e prismas de concreto. In: **51º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2009. Curitiba. Anais...São Paulo:IBRACON, 2009.

MO, X. Laboratory study of LiOH inhibiting alkali-silica reaction at 20°C: a contribution. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 499-504, 2005.

MO, X.; FOURNIER, B. Investigation of structural properties associated with alkali-silica reaction by means of macro and micro-analysis. **Materials Characterization**, v. 58, n. 2, p. 179-189, 2007.

MONTEIRO, P. J. M.; SHOMGLIN, K.; WENK, H. -R.; HASPARYK, N. P. Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 2, p. 179-183, 2001.

MOTOKI, A. **Descrição petrográfica de rochas ígneas**. Apostila didática 2004. Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://motoki5.tripod.com/Ign/Ign2004.pdf>>. Acesso em: 5 abr 2008.

MULTON, S.; CYR, M.; SELIER, A.; DIEDERICH, P.; PETIT, L. Effect of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**. *Article in press* (Disponível *online*), 2009.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito das adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato**. 2007. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

NATIOLI, C. R.; BENFATTO, M.; DELLA LONGA, S.; HATADA, K. X-ray absorption spectroscopy: state-of-the-art analysis. **Journal of Synchrotron Radiation**, v. 10, p. 26-42, 2003.

O'DONOGHE, M. **Quartz**. London: Butterworks Gem Books, 1987.

OWSIK, Z. Alkali-aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 7-11, 2004.

OWSIK, Z. Testing alkali-reactivity of selected concrete aggregates. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 13, n. 3, p. 201-207, 2007.

PASSCHIER, C. W.; TROW, R. A. J. **Micro-tectonics**. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. 1981. 114f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 119-139, 1992.

PECCHIO, M.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F.; ANDRADE, T. Produtos da reação álcali-silicato em concretos e edificações da região do grande Recife-PE. In: **II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto**, 2006. Rio de Janeiro. Anais...São Paulo: IBRACON, 2006.

PEISER, H. S.; ROOKSBY, H. P.; WILSON, A. J. C. **X-ray diffraction by polycrystalline materials**. London: Ed. Chapman & Hall, 1960.

PETERSON, K.; GRESS, D.; DAM, T. V.; SUTTER, L. Crystallized alkali-silica gel in concrete from the late 1890s. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 8, p. 1523-1532, 2006.

PHILIPP, R. P. **Geologia e petroquímica da região de Monte Bonito, Pelotas – RS**. 1990. 233f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PHILLIP, R. P.; MACHADO, R. The late neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. **Journal of South American Earth Science**, n. 19, p. 461-478.

PHILLIP, R. P.; MACHADO, R.; NARDI, L. V. S.; LAFON, J. M. O magmatismo granítico neoproterozóico no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 2, p. 277-290, 2002.

PONCE, J. M.; BATIC, O. R. Different manifestation of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 6, p. 1148-1156, 2006.

POPP, J. H. **Geologia Geral**. Rio de Janeiro: Ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 1998.

PORCHER, C; HINRICHS, R. **Os Materiais da terra: minerais e rochas**. 2001. Disponível em:
<http://www.ufrgs.br/geociencias/cporcher/Atividades%20Didaticas_arquivos/Geo02001/Minerais.htm>. Acesso em: 15 fev. 2008.

POST, J. E.; BISH, D. L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data. In: **Modern Powder Diffraction**. Mineralogical Society of America, Washington, v.20, p. 277-308, 1989.

PRADO, R. J. **Análise das propriedades químicas, morfológicas e estruturais de filmes finos de α -Si_{1-x}C_x:H depositados por PECVD**. 2001. 159f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

PRINCE, W.; CASTANTINER, G.; GIAFFERI, J. L. Similarity between alkali-aggregate reaction and the natural alteration of rocks. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 271-276, 2001.

PUTNIS, A. **Introduction to mineral sciences**. United Kingdom: Cambridge University Press, 1992.

QI, Y.; ZI-YUN, W. Effects of lithium hydroxide on alkali silica reaction gels created with opal. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 8, p.1656-1660, 2007.

QIAN, G.; DENG, M.; TANG, M. Expansion of silicious and dolomitic aggregates in lithium hydroxide solution. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 5, p. 763-768, 2002.

READ, A. S. Alkali aggregate reaction in Hong Kong - Now, New and Next. In: **Materials Science and Technology in Engineering Conference**. Hong Kong. Proceedings...Hong Kong: China, Proceedings of MaSTEC, 2003.

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. Anais...São Paulo: IBRACON, 1997, p. 1-6.

RODRIGUES-CARVAJAL, J. **Reference for Guide for the computer program FullProf**. Laboratoire LeÅon Brillouin, CEA-CNRS, Saclay, France. Disponível em: <http://www.ccp14.ac.uk/tutorial/fullprof/doc/fp_text.htm>. Acesso em: 10 out. 2008.

ROLIN, H. B.; GLEIZE, P. J. P.; HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. Variações no método químico de ensaio para determinação da reatividade álcali-agregado de rochas. In: **51º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2009, Curitiba. Anais...São Paulo:IBRACON, 2009.

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

SANCHEZ, L.; KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. Incompatibilidade nos ensaios de concreto e argamassa para classificar a reatividade potencial álcali-agregado. In: **51º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2009, Curitiba. Anais...São Paulo:IBRACON, 2009.

SENGIK, E. **As rochas e os minerais**. Notas de aula. Faculdade de Zootecnia. Disciplina: Solos. Universidade Estadual de Maringá. Disponível em: <www.dzo.uem.br/disciplinas/Solos/rocha.doc>. Acesso em: 13 fev. 2008.

SHAYAN, A. Alkali reactivity of deformed granitic rocks: a case study. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 5, p. 1229-1236, 1993.

SHRIMER, F. H. Progress in the evaluation of alkali-aggregate reaction in concrete construction in the Pacific Northwest, United States and Canada. In: **Contributions to Industrial-Minerals Research**, 2005, Reston (Virginia): U.S. Geological Survey, 2005, p. 1-15.

SHUKOWSKY, W.; MANTOVANI, M. S. M. Estruturação dos terrenos Pré-Crambianos da região sul do Brasil e oeste do Uruguai: um estudo por modelamento gravimétrico. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 9, n. 2, p. 275-287, 2005.

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

SILVA, C. F. C.; MONTEIRO, E. C. B.; GUSMÃO, A. D.; SILVA, P. N. Análise dos limites de expansão de normas do método acelerado das barras. In: **51º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2009, Curitiba. Anais...São Paulo:IBRACON, 2009.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas Usinas Hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/CHESF: Influência da reação nas propriedades do concreto**. 2007. 274f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SOUZA, J. L. F. **Estudo da durabilidade de concretos e argamassas através de RAA em agregados convencionais da Região de Campina Grande e alternativos em concreções lateríticas Sepé-PB e Jacumã-PB**. 2007. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **Proceedings of American Society of Civil Engineers**, v. 66, n. 10, p. 1791-1811, 1940.

STEBBINS, J. F. Nuclear magnetic resonance spectroscopy of silicates and oxides in geochemistry and geophysics. In: **Handbook of physical constants**. Washington: T. J. Ahrens, American Geophysical Union, 1995, p. 303-332.

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, n.32-35, p. 3429-3426, 2006.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- TROMANS, D.; MEECH, J. A. Enhanced dissolution of minerals: stored energy, amorphism and mechanical activation. **Minerals Engineering**, v. 14, n. 11, p. 1359-1377, 2001.
- ICHIKAWA, T.; MIURA, M. Modified model of alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 11, p. 1291-1297, 2007.
- TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 121, p. 333-348, 1994.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineer Manual 1110-2-2000: Standard Practice for Concrete for Civil Works Structures**, 1994. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-2000/entire.pdf>>. Acesso em: 07 maio 2008.
- VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado**. 2007. 204f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo**. 2002. 213f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- VALDUGA, L.; DAL MOLIN, D. C. C.; PAULON, V. A. Levantamento da reatividade potencial de basaltos no Brasil. In: **II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto**, 2006. Rio de Janeiro. Anais...São Paulo: IBRACON, 2006.
- VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. **Cement and Concrete Research**, v. 7, n. 6, p. 643-648, 1977.
- VERSTRAETE, J.; KHOUCHEF, L.; BULTEEL, D.; GARCIA-DIAZ, E.; FLANK, A. M.; TUILIER, M. H. Amorphisation mechanism of a flint aggregate during the alkali-silica reaction: x-ray diffraction and x-ray absorption XANES contributions. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 4, p. 321-331, 1982.
- VIEIRA, S. R. S. S.; OLIVEIRA, M.A.F. Estudo de alguns agregados brasileiros, com ênfase na avaliação de sua reatividade potencial frente aos álcalis do cimento. In: **39º REIBRAC (Reunião Anual do Ibracon)**, 1997, São Paulo. Anais...São Paulo: IBRACON, 1997, p. 77-91.
- VIVIAN, H. E. Studies in cement-aggregate reaction - XIX: Effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate. **Australian Journal of the Applied Science**, v. 2, n. 108, p. 488-494.
- WAKIZAKA, Y. Alkali-silica reactivity of Japanese rocks. **Engineering Geology**, v. 56, n. 1-2, p. 211-221, 2000.
- WANG, H.; GILLOT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. **Cement and Concrete Research**, v. 21, n. 4, p. 647-654.

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 Research**, v. 30, n. 4, p. 353-359, 2008.

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, n. 4, p. 353-359, 2008.

WEAVING, B. The effects of heating on chlorophaeite and their importance in rock magnetism. **Proceedings of the Physical Society**, v. 80, n. 5, p. 1149-1154, 1962.

WENK, H.-R.; MONTEIRO, P.J.M.; SHOMGLIN, K. Relationship between aggregate microstructure and mortar expansion: a case study of deformed granitic rocks from the Santa Rosa mylonite zone. **Journal of Materials Science**, v. 23, n. 4, p. 1278-1285, 2008.

WENK, H.-R.; BULAKH, A. **Minerals: their construction and origin**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004.

WHITE, I. C. Relatório sobre as "coal measures" e rochas associadas do Sul do Brasil. Relatório Final da Comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil, Rio de Janeiro, **Imprensa Nacional**, Rio de Janeiro, 28, 617 f., 1908.

WIGUN, B. J. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. **Engineering Geology**, v. 40, n. 3, p. 195-214, 1995.

WIGUN, B. J.; FRENCH, W. J.; HOWARTH, R. J.; HILLSF, C. Accelerated tests for assessing the potential exhibited by concrete aggregates for alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, n. 5-6, p. 451-476, 1997.

YAN, L.; LEE, C. F.; PEI-XING, F. Alkali-silica reaction (ASR) characteristics of concrete made from granite aggregates. In: **12^o International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, 2004, Beijing. Proceedings...Beijing: China, Proceedings of ICAAR, v. 1, p. 369-375, 2004.

YUJIANG, W.; MIN, D.; MINGSHU, T. Alkali release from aggregate and the effect on AAR expansion. **Materials and Structures**, v. 41, n. 1, p. 159-171, 2008.

APÊNDICE A – Composição química dos minerais

Mineral	Composição química
Albita (plagioclásio)	$\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$
Apatita (mineral opaco)	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$
Augita (piroxênio)	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Ti},\text{Al})_2[(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6]$
Biotita (mica)	$\text{K}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_{6-4}(\text{Fe}^{3+},\text{Al},\text{Ti})_{0-2}[\text{Si}_{6-5}\text{Al}_{2-3}\text{O}_{20}](\text{OH},\text{F})_4$
Celadonita	$(\text{K},\text{Ca},\text{Na})_{\sim 1,6}(\text{Fe}^{3+},\text{Al},\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_{4,0}\text{Si}_{7,3}\text{Al}_{0,7}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
Clorita	$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Mn},\text{Al})_{12}[(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$
Epidoto	$\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+},\text{Al})\text{Al}_2\text{O}.\text{OH}.\text{Si}_2\text{O}_7.\text{SiO}_4$
Hematita (mineral opaco)	Fe_2O_3
Ilita (mica)	$\text{K}_{1,5-1,0}\text{Al}_4[\text{Si}_{6,5-7,0}\text{Al}_{1,5-1,0}\text{O}_{20}](\text{OH})_4$
Labradorita (plagioclásio)	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$
Microclínio (K-feldspato)	$\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$
Montmorilonita (esmectita)	$(\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$
Muscovita	$\text{K}_2\text{Al}_4[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}](\text{OH},\text{F})_4$
Ti-magnetita (mineral opaco)	$\text{Ti}[\text{Fe}^{3+}_2\text{Fe}^{2+}\text{O}_4]$
Quartzo	SiO_2
Zircão	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$

**APÊNDICE B – Análise modal dos minerais constituintes das rochas
estudadas**

Rocha M1

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	-	-	-	-	-	-
Quartzo grau 1	13,8	21,1	18,5	16,7	15,7	17,2
Quartzo grau 2	13,4	8,6	15,3	13,2	7,8	11,7
Quartzo grau 3	7,2	5,4	4,9	5,2	4,6	5,5
Quartzo grau 4	1,6	1,8	1,9	1,6	3,6	2,1
K-feldspato	28,4	36,8	32,7	37,1	30,5	33,1
Plagioclásio	30,7	23,1	25,0	21,9	25,8	25,3
Biotita	4,9	3,2	1,7	4,3	6,8	4,2
Outros	-	-	-	-	5,2	1,0
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha M2

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	-	-	-	-	-	-
Quartzo grau 1	4,5	2,8	4,1	5,7	2,5	3,9
Quartzo grau 2	16,7	14,3	19,7	12,7	17,0	16,1
Quartzo grau 3	7,7	5,7	5,9	6,7	8,0	6,8
Quartzo grau 4	0,8	1,9	2,2	2,8	1,6	1,9
K-feldspato	46,4	35,7	30,7	50,2	35,0	39,6
Plagioclásio	18,3	33,0	30,2	17,7	32,4	26,3
Biotita	5,6	6,6	7,2	4,2	3,5	5,4
Outros	-	-	-	-	-	-
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha M3

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	-	-	-	-	-	-
Quartzo grau 1	4,1	5,6	3,9	8,1	6,7	5,7
Quartzo grau 2	17,0	13,5	13,0	14,5	12,7	14,1
Quartzo grau 3	7,3	7,8	11,3	9,0	5,4	8,2
Quartzo grau 4	4,9	7,5	8,8	4,9	5,3	6,3
K-feldspato	30,1	32,9	37,8	35,4	43,9	36,0
Plagioclásio	28,3	26,8	17,7	21,9	19,7	22,9
Biotita	8,3	5,9	5,9	6,2	6,3	6,5
Outros	-	-	1,6	-	-	0,2
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha BEV

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Plagioclásio	42,6	48,7	35,2	38,6	44,1	41,2
Piroxênio	33,2	34,5	41,0	39,6	34,0	36,5
Opacos	3,9	4,2	4,0	6,6	5,2	4,8
Mesóstase Mm	9,4	5,4	12,2	6,2	6,6	8,0
Mesóstase Ma	5,6	5,3	4,8	5,6	5,2	5,3
Mesóstase Mq	5,3	1,9	2,8	3,4	4,9	3,7
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha RPF

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo	25,5	24,1	23,8	24,2	21,0	23,7
Plagioclásio	16,8	18,1	16,0	16,8	23,4	18,2
K-feldspato	14,3	25,5	25,0	20,4	14,4	19,9
Piroxênio	9,6	8,8	7,4	5,0	7,8	7,7
Opacos	5,6	1,9	3,2	2,6	2,6	3,2
Mesóstase Mm	15,2	11,7	15,0	22,6	16,2	16,1
Mesóstase Ma	6,5	2,4	5,6	4,8	5,6	5,0
Mesóstase Mq	6,5	7,5	4,0	3,6	9,0	6,1
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha BNRG

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Plagioclásio	39,6	39,0	37,5	45,4	35,0	39,3
Piroxênio	23,6	22,4	19,8	21,0	26,8	22,7
Argilominerais	20,3	29,0	30,9	20,6	23,2	24,8
Mesóstase Mm	8,1	6,0	6,1	7,8	10,6	7,7
Mesóstase Ma	1,2	0,6	0,4	0,8	1,2	0,8
Vidro	5,6	0,7	4,0	2,8	1,4	2,9
Opacos	1,6	2,3	1,3	1,6	1,8	1,7
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha QZITO

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	-	-	-	-	-	-
Quartzo grau 1	4,2	2,5	2,0	2,2	2,0	2,6
Quartzo grau 2	53,2	48,4	48,0	42,4	34,3	45,3
Quartzo grau 3	36,8	43,4	36,8	28,0	25,4	34,1
Quartzo grau 4	2,8	1,4	8,4	20,2	25,0	11,6
Micas	2,8	4,3	4,8	7,2	13,3	6,5
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha MXT A

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	-	-	-	-	-	-
Quartzo grau 1	3,5	6,3	4,1	6,6	3,5	4,8
Quartzo grau 2	14,3	19,2	10,7	18,9	10,8	14,8
Quartzo grau 3	1,1	3,1	2,3	1,0	2,3	2,0
Quartzo grau 4	0,2	0,3	0,7	1,5	0,0	0,5
K-feldspato	40,8	32,2	43,4	41,9	53,0	42,3
Plagioclásio	36,3	35,6	36,3	26,3	26,8	32,3
Micas	3,8	3,3	2,5	3,8	3,6	3,4
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha MXT B

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	-	-	-	-	-	-
Quartzo grau 1	3,5	4,7	4,4	3,4	4,0	4,0
Quartzo grau 2	10,1	14,2	13,8	19,8	17,0	15,0
Quartzo grau 3	1,2	7,6	5,5	3,5	10,7	5,7
Quartzo grau 4	0,0	0,0	0,5	1,0	0,4	0,4
K-feldspato	57,8	55,3	54,2	49,6	38,4	51,1
Plagioclásio	13,2	0,0	0,0	0,3	0,0	2,7
Clorita	12,7	17,2	21,6	21,3	27,8	20,1
Veios	1,5	1,0	0,0	1,1	1,7	1,1
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Rocha MRR

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	-	-	-	-	-	-
Quartzo grau 1	0,6	0,0	0,4	0,0	0,0	0,2
Quartzo grau 2	6,7	9,0	12,1	6,2	8,8	8,6
Quartzo grau 3	4,2	1,6	5,1	4,7	5,0	4,1
Quartzo grau 4	0,1	6,3	0,0	2,5	1,2	2,0
K-feldspato	35,1	32,2	31,0	86,2	40,7	34,8
Plagioclásio	12,7	18	12,2		8,7	12,9
Biotita	40,6	32,9	39,2		42,5	38,8
TOTAL	100	100	100	99,6	106,9	101,3

Rocha GNRR

Minerais	Contagem (% grãos)					Média
	1	2	3	4	5	
Quartzo grau 0	7,2	6,7	8,7	6,4	15,3	8,9
Quartzo grau 1	2,7	4,3	9,1	3,9	5,4	5,1
Quartzo grau 2	2,1	4,1	4,2	2,0	3,2	3,1
Quartzo grau 3	1,9	2,6	2,5	1,7	4,2	2,6
Quartzo grau 4	4,1	3,5	1,7	5,8	6,4	4,3
K-feldspato	27,2	24,5	25,9	23,2	20,2	24,2
Plagioclásio	38,2	36,8	37,8	40,3	29,3	36,53
Biotita	16,6	17,5	10,1	16,7	16,0	15,4
TOTAL	100	100	100	100	100	100

**APÊNDICE C – Análise da reatividade potencial aos álcalis segundo a NBR
15577-3/2008**

IDENTIFICAÇÃO: rocha M1				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: rosada				
ESTRUTURA: (X) Maciça () Foliada () Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita.				
DELETÉRIOS				
	Constituinte	Quantidade aproximada		
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) (X) Média (5 e 1mm) () Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã (X) Rocha pouco alterada () Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: (X) Mirmequita (quartzo vermiforme) (X) Pertita em chama () Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: (X) Ígnea () Sedimentar () Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: granito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: rocha M2				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: rosada				
ESTRUTURA: () Maciça () Foliada (X) Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita.				
DELETÉRIOS				
Constituinte	Quantidade aproximada			
() Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
() Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) (X) Média (5 e 1mm) () Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã (X) Rocha pouco alterada () Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: (X) Mirmequita (quartzo vermiforme) (X) Pertita em chama () Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: () Ígnea () Sedimentar (X) Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: protomilonito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: rocha M3				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: rosada				
ESTRUTURA: () Maciça () Foliada (X) Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita.				
DELETÉRIOS				
	Constituinte	Quantidade aproximada		
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) (X) Média (5 e 1mm) () Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã (X) Rocha pouco alterada () Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: (X) Mirmequita (quartzo vermiforme) (X) Pertita em chama () Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: () Ígnea () Sedimentar (X) Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: ortomilonito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: rocha BEV				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: cinza escuro				
ESTRUTURA: (X) Maciça () Foliada () Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: plagioclásio, piroxênio, óxidos de Fe e Ti, argilominerais.				
DELETÉRIOS				
	Constituinte	Quantidade aproximada		
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Outros: <u>mesóstase</u>	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Outros: <u>argilominerais</u>	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) () Média (5 e 1mm) (X) Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã () Rocha pouco alterada (X) Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: () Mirmequita (quartzo vermiforme) () Pertita em chama (X) Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: (X) Ígnea () Sedimentar () Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: basalto				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: rocha RPF				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: cinza escuro				
ESTRUTURA: (X) Maciça () Foliada () Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, piroxênio, óxidos de Fe e Ti, argilominerais.				
DELETÉRIOS				
Constituinte	Quantidade aproximada			
() Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
() Outros: <u>mesóstase</u>	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
() Outros: <u>argilominerais</u>	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) () Média (5 e 1mm) (X) Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã () Rocha pouco alterada (X) Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: () Mirmequita (quartzo vermiforme) () Pertita em chama (X) Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: (X) Ígnea () Sedimentar () Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: riolito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: rocha BNRG				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: cinza escuro				
ESTRUTURA: (X) Maciça () Foliada () Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: K-feldspato, plagioclásio, piroxênio, óxidos de Fe e Ti, argilominerais.				
DELETÉRIOS				
	Constituinte	Quantidade aproximada		
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Outros: <u>mesóstase</u>	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Outros: <u>argilominerais</u>	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) () Média (5 e 1mm) (X) Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: (X) Rocha sã () Rocha pouco alterada () Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: () Mirmequita (quartzo vermiforme) () Pertita em chama (X) Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: (X) Ígnea () Sedimentar () Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: basalto				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: rocha QZITO				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: cinza claro				
ESTRUTURA: () Maciça (X) Foliada () Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, muscovita.				
DELETÉRIOS				
	Constituinte	Quantidade aproximada		
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) () Média (5 e 1mm) (X) Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: (X) Rocha sã () Rocha pouco alterada () Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: () Mirmequita (quartzo vermiforme) () Pertita em chama (X) Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: () Ígnea () Sedimentar (X) Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: quartzito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: MXT A				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: rosada				
ESTRUTURA: () Maciça () Foliada (X) Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita.				
DELETÉRIOS				
Constituinte		Quantidade aproximada		
() Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
() Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
() Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) (X) Média (5 e 1mm) () Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã (X) Rocha pouco alterada () Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: (X) Mirmequita (quartzo vermiforme) (X) Pertita em chama () Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: () Ígnea () Sedimentar (X) Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: milonito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: MXT B				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: rosada				
ESTRUTURA: () Maciça () Foliada (X) Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita.				
DELETÉRIOS				
	Constituinte	Quantidade aproximada		
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) (X) Média (5 e 1mm) () Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã () Rocha pouco alterada (X) Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: (X) Mirmequita (quartzo vermiforme) (X) Pertita em chama () Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: () Ígnea () Sedimentar (X) Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: milonito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

IDENTIFICAÇÃO: MRR					
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada					
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica					
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável					
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:					
COR: rosada					
ESTRUTURA: () Maciça () Foliada (X) Bandada () Outra: _____					
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:					
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA					
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita.					
DELETÉRIOS					
	Constituinte	Quantidade aproximada			
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5%	(X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5%	() ausente
TEXTURA:					
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) (X) Média (5 e 1mm) () Fina (<1mm)					
ESTADO DE ALTERAÇÃO: () Rocha sã () Rocha pouco alterada (X) Rocha alterada Observações: _____					
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica					
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica					
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: (X) Mirmequita (quartzo vermiforme) (X) Pertita em chama () Não se aplica					
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica					
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica					
TIPO DE ROCHA: () Ígnea () Sedimentar (X) Metamórfica					
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: milonito					
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:					
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo					

IDENTIFICAÇÃO: GNRR				
TIPO: () Cascalho () Pedrisco (X) Fragmento de rocha () Testemunho de sondagem () Pedra britada				
FORMA / ÍNDICE DE FORMA (para pedra britada e pedrisco): () Lamelar () Equidimensional () Alongada (X) Não se aplica				
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS: () Rocha muito coerente (X) Rocha coerente () Rocha pouco coerente () Rocha friável				
CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS:				
COR: rosada				
ESTRUTURA: (X) Maciça () Foliada () Bandada () Outra: _____				
CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:				
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA				
PRINCIPAL: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita.				
DELETÉRIOS				
	Constituinte	Quantidade aproximada		
()	Opala	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Clorofeita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Calcedônia	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Zeólita	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro vulcânico	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Vidro devitrificado	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
()	Quartzo deformado	() < 1%	() 1% a 5%	(X) > 5% () ausente
()	Quartzo microgranular	() < 1%	() 1% a 5%	() > 5% (X) ausente
TEXTURA:				
GRANULAÇÃO: () Grossa (3 cm e 5 mm) (X) Média (5 e 1mm) () Fina (<1mm)				
ESTADO DE ALTERAÇÃO: (X) Rocha sã () Rocha pouco alterada () Rocha alterada Observações: _____				
QUARTZO: ÂNGULO EXTINÇÃO ONDULANTE: () < 15° () 15° a 30° () > 30° (X) Não se aplica				
PROCENTAGEM DE QUARTZO MICROGRANULAR: () < 5% () 5% a 15% () > 15% (X) Não se aplica				
FELDSPATOS – Texturas potencialmente reativas: () Mirmequita (quartzo vermiforme) (X) Pertita em chama () Não se aplica				
GRANULAÇÃO MATRIZ / CIMENTO (ROCHAS SEDIMENTARES): () > 1 mm () 1 mm a 0,20 mm () < 0,20 mm (X) Não se aplica				
MICROFISSURAÇÃO: () Ausente ou fraco () Moderado () Forte (X) Não se aplica				
TIPO DE ROCHA: () Ígnea () Sedimentar (X) Metamórfica				
CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: granito				
REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO:				
() Potencialmente inócuo (X) Potencialmente reativo				

**APÊNDICE D – Expansões do ensaio acelerado das barras de argamassa
(NBR 15577-4/2008)**

Rocha M1

Rocha M1				
Idade	Data da primeira leitura: 3/12/2008			
	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,006	0,005	0,006	0,01
4	0,006	0,006	0,006	0,01
7	0,025	0,025	0,024	0,02
8	0,031	0,031	0,031	0,03
9	0,038	0,038	0,038	0,04
10	0,048	0,044	0,044	0,05
11	0,058	0,057	0,053	0,06
14	0,073	0,072	0,053	0,07
15	0,079	0,079	0,077	0,08
16	0,084	0,084	0,083	0,08
17	0,091	0,090	0,090	0,09
18	0,098	0,100	0,095	0,10
21	0,112	0,115	0,113	0,11
22	0,117	0,117	0,117	0,12
23	0,118	0,118	0,119	0,12
28	0,146	0,146	0,144	0,15
29	0,152	0,151	0,152	0,15
30	0,159	0,155	0,156	0,16
35	0,183	0,182	0,183	0,18
39	0,201	0,201	0,204	0,20
42	0,217	0,217	0,221	0,22
44	0,225	0,228	0,229	0,23
49	0,244	0,248	0,251	0,25
56	0,272	0,278	0,283	0,28
60	0,291	0,296	0,302	0,30
65	0,311	0,313	0,323	0,32
72	0,345	0,346	0,354	0,35
79	0,404	0,378	0,388	0,39
86	0,389	0,389	0,401	0,39
93	0,428	0,430	0,442	0,43
100	0,452	0,453	0,466	0,46

Rocha M2

Rocha M2				
Idade	Data da primeira leitura 3/12/2008			
	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,005	0,010	0,006	0,01
4	0,006	0,010	0,007	0,01
7	0,027	0,032	0,027	0,03
8	0,033	0,038	0,033	0,03
9	0,042	0,045	0,043	0,04
10	0,049	0,053	0,055	0,05
11	0,058	0,063	0,064	0,06
14	0,079	0,074	0,080	0,08
15	0,087	0,085	0,088	0,09
16	0,092	0,090	0,093	0,09
17	0,100	0,097	0,101	0,10
18	0,107	0,106	0,110	0,11
21	0,124	0,122	0,129	0,13
22	0,130	0,127	0,131	0,13
23	0,132	0,128	0,136	0,13
28	0,163	0,153	0,168	0,16
29	0,169	0,164	0,171	0,17
30	0,173	0,169	0,174	0,17
35	0,202	0,194	0,205	0,20
39	0,224	0,214	0,229	0,22
42	0,241	0,230	0,249	0,24
44	0,250	0,240	0,257	0,25
49	0,271	0,255	0,276	0,27
56	0,303	0,285	0,325	0,30
60	0,323	0,308	0,352	0,33
65	0,342	0,324	0,376	0,35
72	0,377	0,356	0,409	0,38
79	0,411	0,391	0,418	0,41
86	0,424	0,405	0,434	0,42
93	0,466	0,445	0,477	0,46
100	0,491	0,468	0,501	0,49

Rocha M3

Rocha M3				
Idade	Data da primeira leitura 3/12/2008			
	Média individual em mm			
	BA1	BA2	BA3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,008	0,004	0,006	0,01
4	0,009	0,006	0,007	0,01
7	0,030	0,025	0,025	0,03
8	0,034	0,030	0,032	0,03
9	0,040	0,039	0,040	0,04
10	0,049	0,044	0,046	0,05
11	0,059	0,052	0,053	0,05
14	0,071	0,071	0,071	0,07
15	0,079	0,079	0,079	0,08
16	0,083	0,081	0,083	0,08
17	0,089	0,087	0,089	0,09
18	0,096	0,097	0,098	0,10
21	0,109	0,111	0,123	0,11
22	0,114	0,114	0,123	0,12
23	0,115	0,116	0,125	0,12
28	0,140	0,142	0,144	0,14
29	0,145	0,148	0,150	0,15
30	0,149	0,152	0,154	0,15
35	0,175	0,175	0,175	0,17
39	0,194	0,196	0,197	0,20
42	0,206	0,210	0,210	0,21
44	0,215	0,219	0,223	0,22
49	0,233	0,238	0,238	0,24
56	0,261	0,267	0,278	0,27
60	0,292	0,296	0,310	0,30
65	0,299	0,306	0,313	0,31
72	0,328	0,333	0,334	0,33
79	0,358	0,364	0,364	0,36
86	0,370	0,377	0,379	0,38
93	0,411	0,415	0,416	0,41
100	0,435	0,442	0,440	0,44

Rocha BEV

Rocha BEV				
Idade	Data da primeira leitura 3/12/2008			
	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,008	0,006	0,006	0,01
4	0,008	0,007	0,006	0,01
7	0,043	0,036	0,034	0,04
8	0,055	0,058	0,054	0,06
9	0,087	0,091	0,085	0,09
10	0,134	0,140	0,131	0,14
11	0,226	0,241	0,226	0,23
14	0,315	0,323	0,315	0,32
15	0,350	0,357	0,352	0,35
16	0,386	0,389	0,385	0,39
17	0,409	0,414	0,412	0,41
18	0,431	0,438	0,465	0,44
21	0,494	0,494	0,497	0,49
22	0,510	0,510	0,514	0,51
23	0,523	0,522	0,525	0,52
28	0,594	0,590	0,596	0,59
29	0,606	0,602	0,609	0,61
30	0,617	0,612	0,620	0,62
35	0,670	0,659	0,674	0,67
39	0,702	0,692	0,706	0,70
42	0,724	0,714	0,731	0,72
44	0,736	0,728	0,744	0,74
49	0,761	0,748	0,768	0,76
56	0,789	0,774	0,800	0,79
60	0,826	0,796	0,817	0,81
65	0,819	0,812	0,835	0,82
72	0,844	0,832	0,858	0,84
79	0,867	0,849	0,877	0,86
86	0,868	0,850	0,879	0,87
93	0,892	0,873	0,903	0,89
100	0,900	0,881	0,913	0,90

Rocha RPF

Rocha RPF				
Idade	Data da primeira leitura 3/12/2008			
	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,007	0,004	0,006	0,01
4	0,015	0,009	0,012	0,01
7	0,069	0,066	0,069	0,07
8	0,088	0,088	0,085	0,09
9	0,105	0,106	0,108	0,11
10	0,123	0,125	0,123	0,12
11	0,157	0,157	0,143	0,15
14	0,189	0,194	0,194	0,19
15	0,206	0,212	0,210	0,21
16	0,226	0,233	0,228	0,23
17	0,241	0,249	0,242	0,24
18	0,260	0,290	0,266	0,27
21	0,309	0,318	0,315	0,31
22	0,325	0,338	0,335	0,33
23	0,338	0,353	0,348	0,35
28	0,420	0,436	0,427	0,43
29	0,435	0,453	0,445	0,44
30	0,451	0,471	0,465	0,46
35	0,525	0,550	0,542	0,54
39	0,584	0,614	0,608	0,60
42	0,632	0,663	0,657	0,65
44	0,663	0,694	0,685	0,68
49	0,730	0,767	0,758	0,75
56	0,827	0,870	0,861	0,85
60	0,883	0,931	0,924	0,91
65	0,955	1,002	0,995	0,98
72	1,056	1,104	1,108	1,09
79	1,157	1,206	1,216	1,19
86	1,246	1,293	1,308	1,28
93	1,355	1,404	1,426	1,40
100	1,450	1,501	1,525	1,49

ANEXO A – Expansões do ensaio acelerado das barras de argamassa (NBR 15577-4/2008) das rochas reativas e inócuas em campo

Rocha BNRG**Dados obtidos de Couto (2008)**

Rocha BNRG				
Idade	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,004	0,006	0,006	0,01
6	0,017	0,017	0,016	0,02
7	0,022	0,023	0,020	0,02
8	0,026	0,024	0,023	0,02
9	0,029	0,027	0,025	0,03
10	0,030	0,028	0,027	0,03
13	0,036	0,036	0,035	0,04
14	0,037	0,037	0,035	0,04
15	0,039	0,038	0,038	0,04
16	0,043	0,042	0,040	0,04
17	0,046	0,046	0,044	0,05
20	0,049	0,049	0,047	0,05
22	0,052	0,052	0,053	0,05
23	0,053	0,053	0,054	0,05
24	0,056	0,055	0,056	0,06
27	0,058	0,058	0,057	0,06
29	0,065	0,063	0,061	0,06
30	0,065	0,064	0,062	0,06

Rocha QZITO**Dados obtidos de Couto (2008)**

Rocha QZITO				
Idade	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,019	0,018	0,021	0,02
5	0,062	0,064	0,065	0,06
6	0,083	0,087	0,090	0,09
7	0,107	0,115	0,112	0,11
8	0,132	0,140	0,139	0,14
9	0,150	0,162	0,159	0,16
10	0,169	0,182	0,180	0,18
12	0,200	0,215	0,217	0,21
13	0,212	0,228	0,228	0,22
14	0,223	0,243	0,242	0,24
15	0,234	0,253	0,253	0,25
16	0,243	0,263	0,267	0,26
19	0,270	0,289	0,295	0,28
20	0,280	0,305	0,308	0,30
21	0,285	0,309	0,311	0,30
22	0,294	0,319	0,322	0,31
23	0,302	0,326	0,325	0,32
26	0,319	0,347	0,344	0,34
27	0,323	0,353	0,349	0,34
28	0,326	0,357	0,353	0,35
29	0,337	0,366	0,362	0,35
30	0,337	0,370	0,366	0,36

Rocha MXT**Dados obtidos de Couto (2008)**

Rocha MXT				
Idade	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,003	0,005	0,006	0,00
4	0,008	0,010	0,010	0,01
5	0,018	0,016	0,015	0,02
7	0,022	0,019	0,018	0,02
8	0,026	0,027	0,025	0,03
9	0,030	0,032	0,030	0,03
10	0,031	0,033	0,031	0,03
11	0,031	0,033	0,032	0,03
14	0,038	0,045	0,045	0,04
15	0,050	0,053	0,053	0,05
16	0,053	0,056	0,056	0,06
17	0,058	0,061	0,060	0,06
18	0,065	0,065	0,064	0,07
21	0,069	0,069	0,069	0,08
22	0,075	0,078	0,077	0,08
23	0,080	0,083	0,081	0,09
24	0,086	0,088	0,087	0,09
25	0,087	0,092	0,088	0,10
28	0,090	0,100	0,098	0,10
29	0,090	0,101	0,098	0,10
30	0,091	0,102	0,138	0,11

Rocha MRR**Dados obtidos de Couto (2008)**

Rocha MRR				
Idade	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,010	0,014	0,014	0,01
5	0,042	0,047	0,045	0,04
6	0,058	0,062	0,059	0,06
7	0,075	0,081	0,079	0,08
8	0,094	0,100	0,094	0,10
9	0,109	0,115	0,110	0,11
10	0,126	0,132	0,126	0,13
12	0,154	0,159	0,153	0,16
13	0,166	0,171	0,164	0,17
14	0,175	0,182	0,174	0,18
15	0,184	0,191	0,183	0,19
16	0,192	0,198	0,188	0,19
19	0,215	0,221	0,210	0,22
20	0,226	0,233	0,222	0,23
21	0,232	0,239	0,230	0,23
22	0,237	0,245	0,237	0,24
23	0,244	0,252	0,244	0,25
26	0,261	0,270	0,259	0,26
27	0,266	0,275	0,268	0,27
28	0,271	0,279	0,271	0,27

Rocha GNRR**Dados obtidos de Couto (2008)**

Rocha GNRR				
Idade	Média individual em mm			
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Média
2	0,000	0,000	0,000	0,00
3	0,006	0,006	0,006	0,01
5	0,018	0,018	0,018	0,02
6	0,022	0,021	0,021	0,02
7	0,026	0,026	0,026	0,03
8	0,028	0,030	0,030	0,03
9	0,029	0,031	0,031	0,03
10	0,032	0,033	0,033	0,03
12	0,037	0,037	0,037	0,04
13	0,041	0,040	0,040	0,04
14	0,044	0,042	0,042	0,04
15	0,044	0,043	0,043	0,05
16	0,047	0,046	0,046	0,05
19	0,056	0,053	0,053	0,05
20	0,062	0,059	0,059	0,06
21	0,063	0,061	0,061	0,06
22	0,065	0,063	0,063	0,06
23	0,067	0,066	0,067	0,07
26	0,074	0,072	0,072	0,07
27	0,075	0,075	0,074	0,07
28	0,077	0,077	0,076	0,08
29	0,083	0,083	0,083	0,08
30	0,085	0,085	0,085	0,08