FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA, QUÍMICA E FÍSICA DE AGREGADOS GRANÍTICOS EM BETÕES. ESTUDO DE CASOS DE OBRA

MARIA ISABEL GONÇALVES FERNANDES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

PORTO, 2005

FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA, QUÍMICA E FÍSICA DE AGREGADOS GRANÍTICOS EM BETÕES. ESTUDO DE CASOS DE OBRA

MARIA ISABEL GONÇALVES FERNANDES

Tese apresentada para candidatura ao grau de Doutor em Geologia
pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

PORTO, 2005

Este trabalho está inserido no projecto de investigação REMIGAIA, do Centro de Geologia da Universidade do Porto, subsidiado pelo Programa de Financiamento Plurianual de I & D (FCT).

Aos meus Pais.

AGRADECIMENTOS

São numerosas as pessoas e instituições que colaboraram, de forma directa ou indirecta, para o desenvolvimento do trabalho e permitiram que a elaboração da tese fosse possível. Na impossibilidade de citar cada uma dessas pessoas, a todas dirijo os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Fernando Noronha, orientador científico da tese, a quem muito devo, expresso o meu reconhecimento. Atribuo-lhe a responsabilidade por me dedicar actualmente a um domínio de conhecimento vasto e aliciante, que desconhecia por completo. Os conselhos e a compreensão foram essenciais para a concretização deste trabalho.

À Professora Doutora Madalena Teles, co-orientadora da tese, agradeço reconhecidamente o acompanhamento, a amizade e todos os esforços que envidou para que este trabalho fosse desenvolvido. Pelos ensinamentos acerca de um assunto novo e pela simpática compreensão relativamente à minha ignorância em matérias do domínio da Engenharia Civil, a minha gratidão.

À EDP/CPPE, nas pessoas dos Engs. Francisco da Rocha e Silva e José Franco, agradeço a autorização para realização do estudo e colheita de amostras das barragens do Cabril e do Alto Rabagão. Aos Engs. Elídio Ferreira, Fernando Teixeira de Sousa e Fernando Almeida, o meu reconhecimento pelo apoio na realização do trabalho de campo e fornecimento de documentação. A todos os funcionários da EDP que me ajudaram na colheita de amostras em cada uma das barragens e, em especial, aos Senhores João Lima e António Amaro, a minha gratidão.

Ao Professor Doutor João Manuel Cotelo Neiva, meu Mestre desde há muitos anos, a quem devo conselhos, ensinamentos e valioso incentivo para o desenvolvimento profissional e pessoal, em diferentes fases da minha vida, o profundo agradecimento. Pela revisão crítica do texto e pelas interessantes observações efectuadas, um grande obrigada.

Ao LCPC, e em especial à Doutora Sylvine Guédon-Dubied, quero agradecer a realização de um curto estágio, numa fase em que as dúvidas quanto ao trabalho até então desenvolvido eram cruciais para o seguimento da investigação. Agradeço também a realização de alguns ensaios de laboratório.

Ao LNEC, aos elementos do Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos e, em especial, ao Dr. António Santos Silva, que amavelmente se disponibilizou para realizar alguns ensaios de laboratório com um rigor e celeridade inestimáveis, o meu efusivo reconhecimento. Agradeço também a amizade e o apoio bibliográfico, para além da permanente disponibilidade para troca de impressões.

Ao Eng. Armando Camelo, a minha gratidão pelo apoio bibliográfico, pela amizade e pela disponibilidade para valiosas trocas de impressões, importantes contributos para a realização do trabalho.

Ao INETI, em particular ao Doutor João Manuel Farinha Ramos, tenho a agradecer o apoio na realização dos ensaios e obtenção de dados de microssonda electrónica.

À Professora Doutora Ana Margarida Neiva, agradeço a ajuda preciosa na interpretação dos dados das análises químicas e apoio na elaboração do capítulo respectivo.

Às Doutoras Alexandra Guedes e Maria Armanda Dória, pela realização de análises à microssonda RAMAN, o meu reconhecimento.

Ao Doutor Iulius Bobos, agradeço a obtenção de dados de raio-X, que permitiram confirmar resultados encontrados por outras técnicas.

À Dra. Cândida Garcia, a minha gratidão pela disponibilidade e pela realização de alguns ensaios de laboratório.

À Dra. Daniela Silva e ao CEMUP, quero demonstrar o reconhecimento pelo apoio na realização de observações e análises ao MEV/EDS, bem como pelas muitas horas de simpatia.

Ao Senhor Fernando Araújo agradeço a realização de alguns dos desenhos da tese.

Ao Senhor José Pinto pela meticulosa preparação das lâminas delgadas, imprescindíveis para este trabalho.

Às Senhoras D. Manuela Tavares, Manuela Valongueiro e Maria de Lurdes Gomes, pelo apoio na realização de muitas pequenas tarefas, o meu apreço.

A todos os colegas do Departamento de Geologia e do Centro de Geologia que me acompanharam nos últimos anos e que, de algum modo, contribuíram para a concretização desta tese, a minha gratidão.

Pelo incentivo, amizade e paciência, agradeço às minhas colegas de gabinete, Ângela Almeida e Clara Vasconcelos, que me ouviram nos momentos melhores e ajudaram nos menos bons.

À Maria dos Anjos Ribeiro, pessoa ímpar pelas suas qualidades pessoais, o meu eterno agradecimento: por me ter ajudado antes de me conhecer, pela amizade, pela disponibilidade permanente e pelos muitos ensinamentos no domínio da petrografia.

À minha família, principal vítima dos meus sonhos, a quem não dei durante estes anos o tempo e atenção devidos, e que me apoiou incondicionalmente, manifesto o meu carinho. Em particular, aos meus pais, a quem devo tanto que é impossível expressar em poucas linhas.

Ao Luís, meu marido, agradeço o "apoio logístico" nos momentos em que o meu tempo e a minha energia não eram suficientes para responder a todas as solicitações.

Em especial, quero expressar o meu carinho aos meus filhos, André e Joana, a quem privei de muitas brincadeiras conjuntas e para quem tenho uma dívida incomensurável. Quero agradecer-lhes a compreensão e o amor que me dedicam, mesmo quando me é difícil dedicar-lhes o tempo que merecem.

RESUMO

Os componentes do betão provêm directa ou indirectamente de formações rochosas, pelo que o estudo do betão tem, necessariamente, uma vertente que se enquadra no âmbito da Geologia, em especial no que respeita a selecção e avaliação dos agregados e análise petrográfica do betão endurecido.

Atendendo a que o granito é um dos tipos de rocha mais utilizados como agregado para betão em Portugal, procurou-se neste trabalho de investigação fazer a caracterização desta rocha com o objectivo de avaliar o seu possível comportamento.

As causas de deterioração do betão são variadas. Neste trabalho deu-se especial destaque às reacções álcali-agregado, ou seja, as reacções químicas que podem ocorrer entre certos tipos de agregados e a pasta de cimento e que podem produzir danos nas estruturas em obra.

A presente dissertação surgiu do interesse de aplicar técnicas de utilização frequente em geologia, em particular a petrografia, ao estudo dos agregados e seu comportamento quando expostos a um meio fortemente alcalino como o do betão.

Uma vez que as reacções álcali-agregado são lentas e prolongadas no tempo, foram estudadas duas grandes obras de engenharia, as barragens do Cabril e do Alto Rabagão, com várias dezenas de anos, com o objectivo de comparar o comportamento previsível dos granitos aplicados no betão com o seu desempenho efectivo em obra.

Os granitos das pedreiras exploradas para o fabrico do betão foram estudados com vista à detecção de espécies minerais potencialmente reactivas.

A inspecção às obras onde estes granitos foram aplicados permitiu identificar manifestações de deterioração do betão com origem, provável, na ocorrência de reacções álcali-agregado. Nas estruturas foram observados eflorescências, exsudações e *pop-outs*, indícios de reacções álcali-sílica, dos quais foram colhidas amostras para caracterização em laboratório. A aplicação de diferentes técnicas de petrografia mostrou-se particularmente relevante na identificação destes produtos, tendo contribuído definitivamente para a compreensão dos fenómenos envolvidos.

A utilização do microscópio electrónico de varrimento e a realização de análises por espectrómetro de dispersão de energia permitiram caracterizar a morfologia e determinar a composição semiquantitativa dos produtos estudados, tendo-se concluído que existe gel sílico-alcalino composto por silício, baixo conteúdo em álcalis e, por vezes, cálcio e alumínio. O gel tem textura variável, predominando o gel amorfo, de superfície lisa com

fissuras de retracção. Ocorre carbonatação do gel quando exposto à atmosfera, o que foi verificado pela existência de frequentes cristais de trona e, por vezes, de carbonato de cálcio, sobre o gel amorfo.

A observação de lâminas delgadas de betão ao microscópio óptico e de fragmentos de betão ao microscópio electrónico de varrimento, permitiu ainda identificar cristais de etringite preenchendo poros, fissuras e, raramente, crescendo na pasta de cimento.

ABSTRACT

The study of the concrete as a building material is included in the domain of geology as the components of the concrete have their origin in the rock masses. Geology covers especially the selection of concrete aggregates and the petrographic analysis of hardened concrete when there are signs of deterioration.

Granitic rocks are usually applied as concrete aggregates in Portugal. In the present research work the characterisation of granite was made in order to evaluate its performance as aggregate.

There is a range of possible causes for the deterioration of the concrete. In this work, emphasis is given to alkali-aggregate reactions, the reactions which occur between certain aggregates and the cement paste and that can be deleterious to the structures.

The present work rose from the interest of applying the techniques of geology and especially of the petrography to the study of aggregates and to the evaluation of their performance when exposed to an extremely alkaline environment.

Considering that alkali-aggregate reactions are slow/retarded, two old concrete dams were selected, the Cabril Dam and the Alto Rabagão Dam, with the goal to evaluate the performance of the granites applied in the concrete.

The granites from the quarries were examined in order to identify potentially reactive forms of silica.

The in situ investigation of the two dams revealed the existence of signs of deterioration which can be due to alkali-aggregate reactions. Efflorescence, exudations and pop-outs were identified and samples were collected for laboratory examination. The techniques of petrography were attempted to characterise these products and to understand the phenomena involved.

The scanning electron microscope and the dispersive energy spectrometry were applied in order to characterise the morphology and to obtain the semi-quantitative composition of the products. It was concluded that there is alkali-silica gel composed of silicon and a low content of alkalis, with calcium and aluminium in some of the analyses. The amorphous gel can show different structures but a smooth surface with shrinkage cracks is the predominant. When exposed to the environment the gel can carbonate, as was verified by the existence of trona and calcium carbonate crystals growing over the gel surface.

The examination of thin sections and the analyses of peaces of concrete by scanning electron microscope also permitted the identification of ettringite crystals in the voids, cracks and, in some cases, within the cement paste.

LISTA DE ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BCA	British Cement Association
BRE	Building Research Establishment
BS	British Standards
CEB	Comité Euro-International du Béton
CEMUP	Centro de Estudo de Materiais da Universidade do Porto
CEN	Comité Européen de Normalisation
CR	CEN Report
CRPG	Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques
DEF	Delayed Ettringite Formation
DG-FCUP	Departamento de Geologia – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
DRX	Difracção de raio-X
EDS	Energy Dispersive Spectrometry
EDXA	Energy Dispersive X-ray Analysis
EN	Norma Europeia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HREE	Heavy Rare Earth Elements
INETI	Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial
ICOLD	International Commission on Large Dams
ICP	Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Emission Mass Spectrometry
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISRM	International Society of Rock Mechanics
IST	Instituto Superior Técnico
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LREE	Light Rare Earth Elements
MEV	Microscópio Electrónico de Varrimento
NBRI	National Building Research Institute
NF	Normalisation Française
NP	Norma Portuguesa
N//	Nicóis paralelos
NX	Nicóis cruzados
PNCOLD	Portuguese National Committee on Large Dams

RAA	Reacções álcali-agregado
RAS	Reacções álcali-sílica
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Constructions et Ouvrages
SHRP	Strategic Highway Research Program
VFS	Vertical Full Scale
WGPNCOLD	Working Group of the Portuguese National Committee on Large Dams

ÍNDICE

Agradecimentos i

Resumo v

Abstract vii

Lista de abreviaturas ix

Índice xi

Índice de Figuras xix

Índice de Quadros xxv

Índice de Fotografias xxix

INTRODUÇÃO xxxvii

1. Generalidades xxxix

2. Objectivos e limitações xli

3. Organização do trabalho xliii

PARTE I - ENQUADRAMENTO TEÓRICO 1

Capítulo 1. FACTORES QUE CONDICIONAM O DESEMPENHO DO BETÃO 3

1.1. Generalidades 3

1.2. Principais constituintes do betão 6

1.2.1. Cimento 6

1.2.2. Adjuvantes e adições 11

1.2.3. Agregados 13

1.2.3.1. Natureza 13

1.2.3.2. Distribuição da dimensão das partículas 17

1.2.3.3. Forma das partículas 18

1.2.3.4. Características físicas e mecânicas 20

1.2.4. Interface pasta de cimento-agregado 22

Capítulo 2. CAUSAS DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO 24

2.1. Generalidades 24

2.2. Ataque por sulfatos 25

2.2.1. Ataque por sulfatos de origem interna 26

2.2.2. Ataque por sulfatos de origem externa 27

2.2.3. Características microscópicas do ataque por sulfatos 28
2.2.4. Relação entre ataque por sulfatos, reacção álcali-sílica e expansão do betão 29
2.3. Reacções álcali-agregado 30
2.3.1. Reacções álcali-carbonato 31
2.3.2. Reacções álcali-sílica 31
2.3.3. Reacções álcali-silicato 32
Capítulo 3. AS REACÇÕES ÁLCALI-SÍLICA 33
3.1. Condições de ocorrência 33
3.1.1. Humidade 33
3.1.2. Existência de álcalis 36
3.1.2.1. Álcalis no cimento 36
3.1.2.2. Contribuição dos agregados para os álcalis 38
3.1.3. Existência de agregados reactivos 41
3.1.3.1. Generalidades 41
3.1.3.2. Deformação e recristalização em rochas graníticas 48
3.1.3.3. Silicatos potencialmente reactivos 55
3.1.4. Ensaios de avaliação da reactividade potencial aos álcalis 56
3.1.4.1. Generalidades 56
3.1.4.2. Exame petrográfico dos agregados 57
3.1.4.3. Ensaio químico 58
3.1.4.4. Ensaio de expansão da barra de argamassa 60
3.1.4.5. Ensaio acelerado da barra de argamassa 61
3.1.4.6. Ensaio do prisma de betão 62
3.1.4.7. Ensaio da barra de argamassa em autoclave 62
3.2. Mecanismos da reacção álcali-sílica 63
3.3. O hidróxido de cálcio nas reacções álcali-sílica 67
Capítulo 4. DIAGNÓSTICO DAS REACÇÕES ÁLCALI-SÍLICA 73
4.1. Generalidades 73
4.2. Inspecção das estruturas *in situ* 74
4.2.1. Fissuração e abertura das fissuras 74
4.2.2. Expansão da estrutura 75
4.2.3. Exsudações e eflorescências 76
4.2.4. *Pop-outs* 76

4.3. Estudo em laboratório 77
4.3.1. Caracterização macroscópica 77
4.3.2. Análise petrográfica 77
4.3.3. Ensaio de fluorescência do acetato de uranilo 78
Capítulo 5. SITUAÇÃO EM PORTUGAL 80

PARTE II – APRESENTAÇÃO DOS CASOS DE OBRA 85
Capítulo 1. BARRAGEM DO CABRIL 87
1.1. Generalidades 87
1.2. Descrição 88
1.3. Geomorfologia 91
1.4. Geologia 91
1.5. Agregados 96
1.6. Cimento 97
1.7. Propriedades mecânicas do betão 97
Capítulo 2. BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO 99
2.1. Generalidades 99
2.2. Descrição 101
2.3. Geomorfologia 102
2.4. Geologia 103
2.5. Agregados 105
2.6. Cimento 106
2.7. Propriedades mecânicas do betão 106

PARTE III – TRABALHO EXPERIMENTAL 107

PARTE III.1. BARRAGEM DO CABRIL 109
Capítulo 1. OBJECTIVOS 111
Capítulo 2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS 113
2.1. Enquadramento 113
2.2. Análise petrográfica dos granitos da pedreira 115
2.2.1. Granito de "Cabril Norte" 115
2.2.2. Granito de "Cabril Sul" 119

2.2.3. Características mais importantes como agregado 124
2.3. Características químicas 127
2.4. Características físicas e mecânicas 129
2.5. Ensaios de reactividade aos álcalis 132
2.5.1. Ensaio acelerado da barra de argamassa 133
2.5.2. Ensaio químico 136
2.5.3. Ensaio da barra de argamassa em autoclave 137
2.6. Conclusões 138
Capítulo 3. EXPOSIÇÃO DA BARRAGEM AO AMBIENTE 141
Capítulo 4. DISPONIBILIDADE DE ÁLCALIS DO BETÃO 142
Capítulo 5. AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO BETÃO 147
5.1. Objectivos 147
5.2. Estudo do betão. Inspecção *in situ* e amostragem 147
5.2.1. Fissuração 149
5.2.2. *Pop-outs* 150
5.2.3. Eflorescências e exsudações 150
5.3. Caracterização e composição das eflorescências e exsudações 153
5.3.1. Eflorescências 153
5.3.2. Exsudações 157
5.3.3. Estalactites 165
5.3.4. Outros produtos 166
5.4. Estudo do betão. Trabalho experimental em laboratório 167
5.4.1. Descrição macroscópica 168
5.4.2. Propriedades mecânicas 170
5.4.3. Exame petrográfico 174
5.4.3.1. Agregados grossos 175
5.4.3.2. Agregados finos 179
5.4.3.3. Pasta de cimento 182
5.4.3.4. Fissuras 188
5.4.3.4.1. Fissuras na interface pasta de cimento-agregado 188
5.4.3.4.2. Fissuras no seio da pasta de cimento 190
5.4.3.4.3. Fissuras que atravessam as partículas de agregado grosso 193
5.4.3.5. Poros 196

5.4.3.6. Análise de amostras de betão ao MEV 199
5.4.3.6.1. Fragmentos do betão das carotes 199
5.4.3.6.2. Amostras de betão em escamação nas paredes das galerias 201
5.5. Conclusões 206
Capítulo 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A BARRAGEM DO CABRIL 209

PARTE III.2. BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO 213
Capítulo 1. OBJECTIVOS 215
Capítulo 2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS 216
2.1. Enquadramento 216
2.2. O granito da pedreira de Pisões 217
2.2.1. Análise petrográfica 217
2.2.2. Características mais importantes como agregado 222
2.3. Características químicas 224
2.4. Características físicas e mecânicas 224
2.5. Ensaios de reactividade aos álcalis 228
2.5.1. Ensaio acelerado da barra de argamassa 229
2.5.2. Ensaio químico 234
2.5.3. Ensaio da barra de argamassa em autoclave 235
2.6. Conclusões 235
Capítulo 3. EXPOSIÇÃO DA BARRAGEM AO AMBIENTE 238
Capítulo 4. DISPONIBILIDADE DE ÁLCALIS DO BETÃO 239
Capítulo 5. AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO BETÃO 244
5.1. Objectivos 244
5.2. Estudo do betão. Inspecção *in situ* e amostragem 244
5.2.1. Fissuração 245
5.2.2. *Pop-outs* 249
5.2.3. Eflorescências e exsudações 251
5.3. Caracterização e composição de *pop-outs*, eflorescências e exsudações 252
5.3.1. *Pop-outs* 253
5.3.2. Eflorescências 263
5.3.3. Exsudações 264
5.3.4. Estalactites 269

5.4. Estudo do betão. Trabalho experimental em laboratório 269
5.4.1. Caracterização macroscópica 270
5.4.2. Propriedades mecânicas 271
5.4.3. Exame petrográfico 273
5.4.3.1. Agregados grossos 275
5.4.3.2. Agregados intermédios 275
5.4.3.3. Agregados finos 276
5.4.3.4. Pasta de cimento 278
5.4.3.5. Fissuras 281
5.4.3.5.1. Fissuras na interface pasta de cimento-agregado e atravessando a pasta 281
5.4.3.5.2. Fissuras que atravessam as partículas de agregado 282
5.4.3.6. Poros 287
5.4.3.7. Análise de amostras de betão ao MEV 289
5.5. Conclusões 292
Capítulo 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO 295

PARTE IV – DISCUSSÃO. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS 299

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 313

ANEXOS

ANEXO A – Descrição de amostras e lâminas delgadas de betão (ASTM C 856-04, 2004)
Exame visual do betão A3
Exame do betão à lupa binocular A5
Exame do betão em lâmina delgada A7

ANEXO B – Ensaios ASTM C 1260-94, 2002
Granito "Cabril Norte" B3
Granito "Cabril Sul" B5
Granito da pedreira de Pisões B7

ANEXO C – Observações e análises ao MEV/EDS e ao microscópio óptico

Gel sílico–alcalino C5
Trona C47
Carbonato de cálcio C55
Etringite C61
Portlandite C79
Cristais ricos em cálcio e sódio C83
Aspectos encontrados em fragmentos de betão C87

ÍNDICE DE FIGURAS

PARTE I

Figura I.1 - Representação esquemática do processo de fabrico do cimento (Larive, 1990). 8
Figura I.2 - Figura I.2 - Formação dos principais compostos do betão (CPA – cimento portland anidro) (Larive, 1990). 10
Figura I.3 – Evolução dos produtos de reacção durante a hidratação (Rendell et al., 2002). 11
Figura I.4 – Avaliação visual da forma das partículas: (a) A partir da medição da esfericidade e do arredondamento; (b) Baseado em observações morfológicas (Krumbein e Sloss, 1966; Powers, 1953). 18
Figura I.5 - Fissuração macroscópica típica do ataque por sulfatos de origem externa (CEB, 1992). 27
Figura I.6 - Representação esquemática do mecanismo de expansão de uma barra de argamassa devida à ocorrência de DEF. A expansão não uniforme da pasta dá origem a fissuras na pasta e na interface com as partículas de agregado. Formam-se cristais de etringite e portlandite nas fissuras, que não contribuem significativamente para a expansão (Taylor et al., 2001). 29
Figura I.7 - Efeito da humidade relativa sobre a expansão do betão devido a reacções álcali-sílica (Poole, 1992). 34
Figura I.8 - Relação entre o teor em álcalis no cimento e no betão (Oberholster, 1983). 38
Figura I.9 - Dispositivo para determinação dos álcalis livres segundo a norma francesa LPC Nº 37 (LCPC, 1993). 40
Figura I.10 – Relação entre a reactividade e a cristalinidade (Mielenz et al., 1947) 44
Figura I.11 – "Conteúdo péssimo": a relação água/cimento e agregado/cimento são de 0,4 e 2,75, respectivamente; o teor em álcalis é de 6 kg/m^3 (Hobbs, 1988). 45
Figura I.12 – Diagrama mostrando como os planos cristalográficos encurvados produzem extinção ondulante nos grãos de quartzo (West, 1991). 49
Figura I.13 – Ilustração do procedimento para determinação do ângulo de extinção ondulante (Dolar-Mantuani, 1981). 49
Figura I.14 – Comparação do grau de deformação, em escala arbitrária, com a expansão de barras de argamassa armazenadas a 60ºC durante 6 meses (Mullick, 1987). 50
Figura I.15 – Desenvolvimento de extinção ondulante e de subgrãos em resposta à tensão: (a) deslocamentos mínimos; (b) aumento dos deslocamentos e desenvolvimento de subgrãos; (c) recristalização (indicada pelas setas); (d) grão recristalizado para quartzo microcristalino (Grattan-Bellew, 1992). 53
Figura I.16 – Correlação entre o inverso da dimensão média dos grãos de quartzo, $1/d_{50}$ (mm^{-1}), e a expansão média aos 14 dias, para um total de 29 amostras de agregado diferentes, examinadas por três operadores (Wigum et al., 2000). 54
Figura I.17 – Correlação entre a área superficial total dos grãos de quartzo (m^2/cm^3) e a expansão média aos 14 dias, para um total de 29 amostras de agregado diferentes, examinadas por três operadores (Wigum et al., 2000). 54
Figura I.18 - Gráfico de identificação da reactividade potencial de um agregado com base no ensaio químico (adaptado de ASTM C 289-94, 2002). 59
Figura I.19 - Ataque dos álcalis sobre (a) sílica cristalina e (b) sílica hidratada pobremente cristalina (representação esquemática) (Dent Glasser e Kataoka, 1981) 64

Figura I.20 - Reacção hipotética com a sílica reactiva (Chatterji et al., 1986). 65
Figura I.21 – Condições de estabilidade dos polimorfos de sílica (Heaney et al., 1994). 66
Figura I.22 - Relação entre a solubilidade de algumas substâncias e o pH da solução (Longhnan, 1969). 67
Figura I.23 – Zonamento da composição do gel sílico-alcalino na orla de uma partícula de opala do agregado (Wang e Gillott, 1991). 68
Figura I.24 – Diagrama triangular (Si-Ca-K+Na) mostrando a composição de gel em fissuras e em poros e de gel cristalino em fissuras nos agregados (percentagem atómica excluindo água, oxigénio e elementos traço) (Thaulow et al., 1996). 69
Figura I.25 – Diagramas triangulares de gel sílico-alcalino em vários grãos de agregado reactivo em: (a) argamassas imersas em solução de 0,6 N de NaOH, com $Ca(OH)_2$, para 21 e 63 dias, a 38ºC; (b) solução de 0,6 N de NaOH, com e sem $Ca(OH)_2$, para 182 dias, a 20ºC, e 21 dias, a 38ºC; (c) argamassas imersas em solução de 0,6N de NaOH para 21 e 63 dias, a 38ºC; (d) argamassas imersas em solução de NaOH para 182 dias, a 20ºC (Kawamura et al., 1998). 70
Figura I.26 – Diagramas triangulares de geles sílico-alcalinos em partículas de agregado reactivo, em argamassas com 56 dias: (a) com razão água/cimento de 0,23; (b) com cimento rico em álcalis (Kawamura et al., 2001). 72
Figura I.27 - Fissuração macroscópica devida a reacções álcali-sílica (BCA, 1992), em representação esquemática de um corte numa carote de betão. 75
Figura I.28 - Esquema de formação de *pop-out* devido a reacção álcali-sílica (Idorn, 1967). 76
Figura I.29 – Esquemas da textura, morfologia e composição dos tipos de rochas potencialmente reactivos. Características da microfissuração no interior e irradiando das partículas siliciosas de diferente mineralogia e morfologia, quando afectadas por reacções álcali-sílica expansivas (Idorn et al., 1992). 78
Figura. I.30 – Modelo teórico do modo como a fissuração pode ser induzida pela ocorrência de reacções álcali-sílica (Hobbs, 1988). 79

PARTE II

Figura II.1.1 – Localização da barragem do Cabril (adaptado de PNCOLD, 1992). 87
Figura II.1.2 – Representação esquemática em planta, corte e alçado da barragem do Cabril (adaptado de Rocha et al., 1959). 89
Figura II.1.3 – Faseamento da betonagem da barragem do Cabril (Teles, 1985). 89
Figura II.1.4 – Excerto da carta geológica do local da barragem (Carta Geológica de Portugal, 1992, Escala 1:500.000, Folha Norte). 92
Figura II.1.5 – Cartografia do "maciço granítico de Pedrógão Grande" (Pereira, 1987). 93
Figura II.1.6 – Planta geológica do maciço de fundação da barragem do Cabril (Neiva, 1981). 95
Figura II.2.1 – Localização da barragem do Alto Rabagão (adaptado de PNCOLD, 1992). 99
Figura II.2.2 – Representação esquemática da planta e secções transversais dos trechos em gravidade e abóbada da barragem do Alto Rabagão. 101
Figura II.2.3 – Excerto da carta geológica do local da barragem, à escala 1:50.000 (Carta Geológica de Portugal, 1982, Folha 6-A Montalegre). 104

PARTE III – 1. BARRAGEM DO CABRIL

Figura III.1.1 – Espectro de microssonda RAMAN da calcite identificada como alteração da plagioclase mais antiga do granito de "Cabril Sul". 123
Figura III.1.2 – Espectros RAMAN e EDS do fosfato presente no granito. 124
Figura III.1.3 – Histogramas dos valores de ângulo de extinção ondulante dos cristais 126

de quartzo dos granitos estudados petrograficamente.
Figura III.1.4 – Projecção dos granitos do Cabril no diagrama Rb-Ba-Sr (El Bouseily e El Sokkary, 1975, com extensão do campo S.D.G. de Biste, 1979). Campos: D – diorito, Qz.D – quartzo-diorito, Gr – granodiorito, N.G. – granito normal, S.D.G – granitos muito diferenciados. 129
Figura III.1.5 – Perfis de terras raras normalizados para condritos dos granitos do Cabril. Dados de condritos de Haskin et al., 1968. 129
Figura III.1.6 – Resultados dos ensaios ASTM C 1260-94, 2002, nos dois tipos de granito identificados na pedreira. 133
Figura III.1.7 – Espectro EDS dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002. 135
Figura III.1.8 – Resultados dos ensaios ASTM C 289-94, 2002, relativos aos granitos de "Cabril Norte" e "Cabril Sul". 137
Figura III.1.9 – Espectro EDS da pasta de cimento. Uma percentagem significativa de carbono pode dever-se à impregnação da lâmina por araldite. 142
Figura III.1.10 – Espectro da pasta de cimento obtido em microssonda RAMAN. 143
Figura III.1.11 – Alçado da barragem do Cabril com indicação da localização dos furos para colheita de amostras de betão. Não estão representados os furos realizados nas galerias de acesso à galeria de coroamento. 149
Figura III.1.12 – Registos difractométricos de três amostras de eflorescências. Notação: M – Mica (moscovite); m – riscas beta de M; T – Trona, $Na_3H(CO_3)_2.2H_2O$, t – riscas beta de T; F – Feldspato (albite?); Q – Quartzo; C – Calcite (análise realizada no LNEC). 157
Figura III.1.13 – Espectro típico da composição do gel que forma as exsudações. 158
Figura III.1.14 – Espectro EDS dos cristais tabulares que se encontram sobre as superfícies de gel maciço, amorfo. São constituídas essencialmente por sódio, admitindo-se que possam corresponder a trona. 160
Figura III.1.15 – Composição do gel existente nas exsudações, analisado por EDS. 163
Figura III.1.16 – Espectro EDS das estalactites existentes na galeria à cota 255,50. 165
Figura III.1.17 – Espectro, EDS, correspondente a produto de cor negra presente na água de escorrência da galeria de drenagem, na margem esquerda. 166
Figura III.1.18 – Gráficos tensão-deformação dos provetes de betão submetidos a compressão uniaxial. 173
Figura III.1.19 – Nomenclatura das ortoclorites e clorites oxidadas (Hey, 1954). 181
Figura III.1.20 – Espectros, EDS, correspondentes à composição da pasta de cimento observada em lâminas delgadas polidas. A análise F2 mostra um decréscimo de silício e álcalis relativamente a F1. 185
Figura III.1.21 – Espectros da pasta de cimento obtidos em microssonda RAMAN nos locais em que se realizaram análises EDS (Figura III.1.20). 186
Figura III.1.22 – Espectros, EDS, correspondentes à composição da pasta de cimento observada em lâminas delgadas polidas. As análises são idênticas quanto ao teor de silício e cálcio, variando a percentagem de álcalis e alumínio. 187
Figura III.1.23 – Espectros, EDS, correspondentes à composição do material de preenchimento de um contacto entre a pasta de cimento e uma partícula granítica de agregado grosso. 189
Figura III.1.24 – Espectro EDS da etringite que preenche uma fissura que atravessa a pasta de cimento. 191
Figura III.1.25 – Espectro EDS correspondente à composição do material de preenchimento da fissura que atravessa uma partícula de agregado grosso. 193
Figura III.1.26 – Espectro EDS correspondente à composição do material de preenchimento da fissura que atravessa uma partícula de agregado grosso. 194
Figura III.1.27 – Espectro EDS correspondente ao material de preenchimento da fissura no agregado, próximo do contacto com a pasta de cimento. 195
Figura III.1.28 – Espectros, RAMAN e EDS, correspondentes à etringite que preenche, parcial ou totalmente, os poros do betão. 197

Figura III.1.29 – Espectro, EDS, correspondente à etringite que preenche parcialmente os poros do betão. 199
Figura III.1.30 – Espectro, EDS, correspondente aos filamentos que se encontram sobre um cristal de quartzo. 201
Figura III.1.31 – Espectros, EDS, correspondentes à pasta de cimento nas amostras de betão. 202
Figura III.1.32 – Espectro, EDS, correspondente aos cristais de arcanite. 203
Figura III.1.33 – Espectro, EDS, dos cristais de aptitalite. 204
Figura III.1.34 – Espectro, EDS, do gel sílico-alcalino presente em amostras de betão, em que predomina o silício, com pequenos teores em sódio e potássio. 205

PARTE III – 2. BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO

Figura III.2.1 – Histograma dos valores de ângulo do extinção ondulante dos cristais de quartzo do granito da pedreira de Pisões. 223
Figura III.2.2 – Projecções do granito da pedreira de Pisões no diagrama Rb-Ba-Sr (El Bouseily e El Sokkary, 1975, com extensão do campo S.D.G. de Biste, 1979). Campos: D – diorito, Qz.D – quartzo-diorito, Gr – granodiorito, N.G. – granito normal, S.D.G – granitos muito diferenciados. 226
Figura III.2.3 – Perfil de terras raras normalizado para condritos do granito da pedreira de Pisões Dados de condritos de Haskin et al., 1968. 227
Figura III.2.4 – Resultado do ensaio ASTM C 1260-94, 2002, para o granito da pedreira de Pisões. 230
Figura III.2.5 – Espectros EDS dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002. 231
Figura III.2.6 – Espectros EDS dos cristais ricos em sódio presentes nos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C1260-94, 2002. 232
Figura III.2.7 – Espectro EDS do material que preenche parcialmente dois dos poros dos provetes de argamassa utilizados no ensaio ASTM C1260-94, 2002. 233
Figura III.2.8 – Resultado do ensaio ASTM C 289-94, 2002 executado sobre o granito da pedreira de Pisões. 235
Figura III.2.9 – Espectros, EDS, da pasta de cimento. Predominam o silício e o cálcio. 239
Figura III.2.10 – Espectros da pasta de cimento obtidos em microssonda RAMAN. Foram produzidos vários espectros, obtendo-se os dois tipos que se apresentam como exemplo. 240
Figura III.2.11 – Alçados da barragem do Alto Rabagão com indicação da localização dos furos para colheita de amostras de betão: (a) na abóbada; (b) na gravidade direita. 247
Figura III.2.12 – Planta da abóbada do Alto Rabagão à cota 865,15 com indicação das galerias e localização dos furos para colheita de amostras de betão. 247
Figura III.2.13 – Espectros EDS do gel existente na cavidade do bloco J-K da abóbada, observado em lâmina delgada. 256
Figura III.2.14 – Espectros EDS dos produtos presentes no revestimento da cavidade observada no bloco J-K da abóbada. Predomina o gel sílico-alcalino, sobre o qual se desenvolvem cristais de carbonato de cálcio (Z1). 257
Figura III.2.15 – Espectros EDS do gel encontrado no *pop-out* da galeria GFE1. 259
Figura III.2.16 – Espectro EDS do material de preenchimento da fissura que se encontra na rocha de matriz micro a criptocristalina. 260
Figura III.2.17 – Espectros EDS do material de preenchimento de um *pop-out* existente na galeria GFE 1. 262
Figura III.2.18 – Espectro EDS dos produtos com textura em roseta encontrados nos *pop-outs*. 262
Figura III.2.19 – Espectro EDS dos produtos ricos em sódio que existem nas eflorescências. 263

Figura III.2.20 – Espectros EDS do gel existente nas exsudações. No gel encontra-se, por vezes, cálcio e alumínio. 265
Figura III.2.21 – Diagramas triangulares correspondentes à composição do gel existente nas exsudações e *pop-outs*, analisado por EDS. Nestes diagramas não estão incluídas as análises dos produtos que continham alumínio. 267
Figura III.2.22 – Gráficos tensão-deformação dos provetes de betão submetidos a compressão uniaxial. 274
Figura III.2.23 – Espectros EDS correspondentes a dois locais da pasta de cimento. 279
Figura III.2.24 – Espectros EDS correspondentes a dois locais da pasta de cimento com tonalidade diferente. 280
Figura III.2.25 – Espectros EDS dos produtos que preenchem uma fissura em partícula de agregado grosso. 283
Figura III.2.26 – Espectro EDS do produto de preenchimento de uma fissura que atravessa o agregado grosso. 283
Figura III.2.27 – Espectro EDS do material de preenchimento da fissura que existe entre os limites dos cristais de quartzo. 284
Figura III.2.28 – Espectro EDS do material que preenche a fissura que atravessa o agregado (cristal de ortoclase). 285
Figura III.2.29 – Espectro EDS do material que forma uma orla num grão de feldspato de dimensão areia. 286
Figura III.2.30 – Espectro, EDS, dos cristais que preenchem total ou parcialmente os poros do betão. 287
Figura III.2.31 – Espectro EDS dos cristais que preenchem totalmente os poros do betão e que poderão conter gel sílico-alcalino, para além de etringite. 289
Figura III.2.32 – Espectros EDS do gel e dos cristais de etringite existentes em poro do betão. A análise foi realizada sobre a lâmina delgada da carote retirada da rampa exterior do encontro esquerdo. 290
Figura III.2.33 – Espectro EDS correspondente a cristais de etringite que preenchem parcialmente alguns poros do betão. 291

PARTE IV

Figura IV.1 – Diagramas triangulares correspondentes às análises de gel sílico-alcalino encontrado em amostras de exsudações e *pop-outs* colhidas nas barragens de Cabril e Alto Rabagão. 308

ÍNDICE DE QUADROS

PARTE I

Quadro I.1 – Selecção de métodos petrográficos para análise do betão (Concrete Society, 1989). 6
Quadro I.2 – Composição habitual do cimento portland (Neville, 1999). 8
Quadro I.3 – Os vinte e sete produtos da família de cimentos correntes (NP EN 197-1, 2001). 9
Quadro I.4 - Classificação de agregados em grupos (BS 812: Part 1, 1975). 16
Quadro I.5 – Classificação das partículas quanto à forma (BS 812: Part 102, 1989). 19
Quadro I.6 – Classificação das partículas quanto à textura superficial (BS 812: Part 102, 1989). 20
Quadro I.7 – Valores típicos da porosidade de algumas rochas comuns (Farmer, 1968). 21
Quadro I.8 – Valores de massa volúmica para as rochas mais comuns (Rocha, 1981). 21
Quadro I.9 - Valores do coeficiente de dilatação térmica linear para vários tipos de rochas (Rhoades e Mielenz, 1946; * Coutinho, 1988). 22
Quadro I.10 - Resistência à compressão uniaxial das rochas habitualmente utilizadas como agregado (*Rocha, 1981; Neville, 1999). 23
Quadro I.11 - Características utilizadas em exame microscópico para distinguir ataque por sulfatos de origem interna e externa (Jakobsen e Thaulow, 2000). 28
Quadro I.12 – Classificação das estruturas quanto ao risco associado a deterioração (Nixon et al., 2004). 35
Quadro I.13 – Classes de exposição das estruturas ao ambiente (Nixon et al., 2004). 35
Quadro I.14 - Níveis de risco ambiental para que ocorram reacções álcali-sílica (BCA, 1992). 36
Quadro I.15 – Minerais e rochas considerados potencialmente reactivos aos álcalis (Mielenz, 1946; Silva e Rodrigues, 1993; Le Roux et al., 1999). 43
Quadro I.16 – Rochas e minerais com baixa probabilidade de serem reactivos (Concrete Society, 1987). 46
Quadro I.17 – Classificação norueguesa dos agregados de acordo com a sua reactividade potencial (Wigum, 1995). 46
Quadro I.18 - Composição química média de gel límpido e cristalino (incluindo oxigénio e elementos traço) (Thaulow et al., 1996). 69
Quadro I.19 - Características e verificação da conformidade dos inertes (Especificação LNEC E 373, 1993). 81
Quadro I.20 – Rochas e minerais com formas de sílica potencialmente reactivas (QT – quartzo tectonizado) (Especificação LNEC E 415, 1993). 82
Quadro I.21 – Rochas e minerais potencialmente fornecedores de álcalis (Especificação LNEC E 415, 1993). 83

PARTE II

Quadro II.1.1 – Composição granulométrica dos agregados aplicados na barragem do Cabril (dimensão máxima D) obtidos por britagem do granito. Betão com introdutor de ar (Nunes e Machado, 1961). 96
Quadro II.2.1 – Granulometria média do betão de 200 kg/m^3 (Neves et al., 1964). 106

Quadro II.2.2 – Resistência à compressão do betão (adaptado de Neves et al., 1964). 106

PARTE III – 1. BARRAGEM DO CABRIL

Quadro III.1.1 – Valores médios, mínimos e máximos do ângulo de extinção ondulante do quartzo, com a classificação correspondente, segundo a Especificação LNEC E 415, 1993. 126
Quadro III.1.2 – Análises químicas em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm, dos granitos da pedreira do Cabril. 128
Quadro III.1.3 – Ensaios de compressão uniaxial das rochas. 130
Quadro III.1.4 – Distribuição da percentagem em massa das partículas segundo a granulometria, para o ensaio ASTM C1260-94, 2002. 133
Quadro III.1.5 – Distribuição de massa das partículas de agregado a utilizar no ensaio NF P18-590, 1993. 138
Quadro III.1.6 – Composição da pasta de cimento obtida em microssonda electrónica (valores em percentagem). 144
Quadro III.1.7 – Análise química em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm da pasta de cimento do betão da barragem do Cabril. 145
Quadro III.1.8 – Designação, localização, comprimento de furação e ângulo de inclinação, medido relativamente ao plano vertical, dos furos para amostragem do betão da barragem do Cabril. 149
Quadro III.1.9 – Localização e características das amostras de eflorescências, exsudações e estalactites colhidas nas visitas de inspecção. 154
Quadro III.1.10 – Características dos provetes ensaiados à compressão uniaxial. A inclinação é relativa ao plano vertical. 170
Quadro III.1.11 – Dados obtidos à microssonda electrónica relativos à composição da clorite vermicular existente nos agregados (valores em percentagem). 181

PARTE III – 2. BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO

Quadro III.2.1 – Composição da clorite vermicular existente no granito da pedreira de Pisões, a partir de dados obtidos à microssonda electrónica (valores em percentagem). 222
Quadro III.2.2 – Valor médio, mínimo e máximo do ângulo de extinção ondulante do quartzo, com a classificação correspondente, segundo a Especificação LNEC E 415, 1993. 223
Quadro III.2.3 - Análise química em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm, do granito da pedreira de Pisões. 225
Quadro III.2.4 – Aplicação da norma CIPW para determinação da composição normativa do granito da pedreira de Pisões. 226
Quadro III.2.5 – Ensaios de compressão uniaxial do granito da pedreira de Pisões. 227
Quadro III.2.6 – Composição da pasta de cimento obtida em microssonda electrónica (valores em percentagem). 241
Quadro III.2.7 – Análise química em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm da pasta de cimento do betão da barragem do Alto Rabagão. 242
Quadro III.2.8 – Designação, localização, comprimento de furação e ângulo de inclinação, medido relativamente ao plano vertical, dos furos para amostragem do betão da barragem do Alto Rabagão. 246
Quadro III.2.9 - Localização e características das amostras de *pop-outs*, eflorescências, exsudações e estalactites colhidas nas visitas de inspecção. 254
Quadro III.2.10 – Composição semiquantitativa, em base anidra, obtida por EDS do 268

gel que contém alumínio (valores em percentagem).
Quadro III.2.11 – Características dos provetes ensaiados à compressão uniaxial. O ângulo de inclinação é medido entre o eixo da carote e o plano vertical. 272

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

PARTE II

Fotografia II.1.1 – Imagem da barragem do Cabril, vista para Norte. 88
Fotografia II.1.2 – Fotografia aérea digital do local da barragem do Cabril e da pedreira (Instituto Geográfico do Exército, sem escala). 92
Fotografia II.2.1 – Imagem da barragem do Alto Rabagão, vista para Este. 100
Fotografia II.2.2 – Fotografia aérea digital do local da barragem do Alto Rabagão e pedreira (Instituto Geográfico do Exército, sem escala). 103

PARTE III – 1. BARRAGEM DO CABRIL

Fotografia III.1.1 – Pedreira, actualmente abandonada, de onde foram retirados os agregados para a construção da barragem do Cabril: (a) Fotografia aérea digital do local (sem escala); (b) frente de escavação Norte; (c) frente de escavação Este; (c) frente de escavação Sudoeste (Novembro de 2002).
Fotografia III.1.2 – Aspecto do granito "Cabril Norte" em amostra de mão. 115
Fotografia III.1.3 – "Cabril Norte": indícios de deformação registados nos planos de macla da plagioclase (NX). 116
Fotografia III.1.4 – "Cabril Norte": extinção ondulante dos cristais de quartzo (NX). 117
Fotografia III.1.5 – "Cabril Norte": aspectos da deformação dos cristais de moscovite (NX). 118
Fotografia III.1.6 – "Cabril Norte": aspectos dos cristais de clorite, frequentemente associados à moscovite (N//). 118
Fotografia III.1.7 – "Cabril Norte": aspectos dos cristais de turmalina, sobrepondo-se ao contacto entre outros minerais (N//). 119
Fotografia III.1.8 – Aspecto do granito "Cabril Sul" em amostra de mão. 120
Fotografia III.1.9 – "Cabril Sul": aspectos dos cristais de plagioclase (NX). 120
Fotografia III.1.10 – "Cabril Sul": aspecto dos cristais de ortoclase (NX). 121
Fotografia III.1.11 – "Cabril Sul": aspectos dos cristais de moscovite (NX). 122
Fotografia III.1.12 – "Cabril Sul": aspectos dos cristais de biotite e de clorite (N//). 122
Fotografia III.1.13 – "Cabril Sul": aspectos de saussurização da plagioclase mais antiga, com formação de zoizite, calcite, sericite, albite e quartzo (N// e NX). 123
Fotografia III.1.14 – Imagem à lupa binocular (escala em centímetros) e ao MEV do fosfato existente no granito. O espectro EDS da Figura III.1.2 corresponde à zona indicada como Z1. 124
Fotografia III.1.15 – Imagens dos provetes cilíndricos e cúbicos preparados para os ensaios de compressão uniaxial dos granitos de "Cabril Norte" e "Cabril Sul". 131
Fotografia III.1.16 – Imagens dos provetes após a realização dos ensaios de compressão uniaxial dos granitos de "Cabril Norte" e "Cabril Sul". 132
Fotografia III.1.17 – Imagens ao MEV dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002 (a análise da Figura III.1.7 corresponde a Z1). 135
Fotografia III.1.18 – Aspecto dos romboedros de carbonato de cálcio existentes na superfície dos provetes de argamassa. 136
Fotografia III.1.19 – Imagem ao MEV de um aspecto geral da pasta de cimento (análise EDS na Figura III.1.9). 143
Fotografia III.1.20 – Pequenos *pop-outs* observados no interior da galeria de coroamento. 150
Fotografia III.1.21 – Eflorescências de cor branca que se encontram 151

predominantemente nas galerias de acesso à galeria de coroamento em ambas as margens. A barra corresponde a cerca de 150 milímetros.
Fotografia III.1.22 - Exsudações endurecidas, sólidas e com forte aderência às paredes da galeria, em geral com tom amarelado (escala em centímetros). 152
Fotografia III.1.23 - Exsudações translúcidas, que formam gotículas de aparência viscosa e apresentam aspecto leitoso nas zonas sólidas (escala em centímetros). 152
Fotografia III.1.24 - Escorrências de cor branca e aspecto sacaróide, em forma de estalactites e estalagmites. Localizam-se junto aos drenos da galeria à cota 255,50 (escala da direita em centímetros). 152
Fotografia III.1.25 – Forma dos cristais ricos em sódio presentes nas eflorescências. 156
Fotografia III.1.26 – Evolução dos materiais inicialmente globulares, com crescimento de agulhas ricas em sódio. As imagens, obtidas com intervalo de cerca de um ano, pertencem à mesma amostra. 156
Fotografia III.1.27 – Aspecto predominante do gel sílico-alcalino que constitui as exsudações. Na imagem da direita a zona de aparência gelatinosa foi analisada em EDS (espectro na Figura III.1.13). 158
Fotografia III.1.28 – Texturas observadas no gel sílico-alcalino das exsudações: gel com textura lisa, formando filamentos, vacuolar, botrióide, esquelética ou com carácter viscoso. 159
Fotografia III.1.29 – Cristais de um mineral rico em sódio, que poderá corresponder a trona. A composição é idêntica em todos os casos (análise na Figura III.1.14). 160
Fotografia III.1.30 – Aspecto de algumas exsudações em que a superfície sólida, constituída por cristais ricos em sódio, está fissurada, permitindo visualizar o material subjacente, de aparência viscosa. 161
Fotografia III.1.31 – Aspectos da evolução de uma amostra que continha gel viscoso, quando observada, em momentos diferentes, com intervalo de três meses: (a) imagens obtidas durante a primeira observação; (b) imagens do gel em observação após três meses. 162
Fotografia III.1.32 – Cristais de carbonato de cálcio presentes nas estalactites da galeria à cota 255,50 (análise na Figura III.1.16). 165
Fotografia III.1.33 – Imagem, obtida ao MEV, do produto de cor negra presente na água de escorrência da galeria de drenagem, na margem esquerda. 166
Fotografia III.1.34 – Imagens de tarolos de betão retirados da barragem do Cabril. O betão mostra-se compacto e são. As superfícies de fractura correspondem aos limites de furação do amostrador. 169
Fotografia III.1.35 – Imagens dos provetes de betão após realização dos ensaios de compressão uniaxial (os provetes têm 94 milímetros de diâmetro). 172
Fotografia III.1.36 – Partícula de rocha metamórfica constituída por biotite, quartzo, moscovite e clorite (N//). 176
Fotografia III.1.37 – Orla difusa entre partícula de rocha metamórfica e a pasta de cimento (N//). 176
Fotografia III.1.38 – Aspectos da textura e da extinção ondulante dos cristais de quartzo do "Granito de Sra. da Confiança" (NX). 177
Fotografia III.1.39 – Rocha de composição granítica e textura cataclástica, presente nas partículas de agregado grosso. Pode observar-se deformação dos cristais de moscovite e clorite (N//), a existência de uma banda constituída por pequenos cristais de quartzo (quartzo microcristalino) e a deformação dos cristais de plagioclase (NX). 178
Fotografia III.1.40 – Forma das partículas. As partículas de agregados finos são muito angulosas e de baixa esfericidade, de formas frequentemente alongadas e pontiagudas (N//). 179
Fotografia III.1.41 – Orientação preferencial das partículas de moscovite (N//). 180
Fotografia III.1.42 – Aspectos das partículas de quartzo, que apresentam extinção 180

ondulante (NX).
Fotografia III.1.43 – Partículas de agregado de origem provavelmente metassedimentar, mostrando uma matriz sericitizada (NX). 182
Fotografia III.1.44 – Aspectos da pasta de cimento em luz natural (N//). A pasta tem tonalidade acastanhada heterogénea, por vezes mais escura junto às partículas de agregado. 183
Fotografia III.1.45 – Imagens da pasta de cimento (NX) mostrando indícios de carbonatação. Observam-se cristais de carbonato de cálcio, que conferem à pasta o aspecto dourado característico deste fenómeno. 183
Fotografia III.1.46 – Aspecto da coloração da pasta de cimento em N//, NX e ao MEV. Na imagem, ao MEV, estão indicadas as duas zonas (F1 e F2) analisadas em EDS (Figura III.1.20). A pasta junto ao agregado grosso é mais escura tanto em N// como em NX e mais densa ao MEV. 185
Fotografia III.1.47 – Aspecto da coloração da pasta de cimento em N//, NX e ao MEV. Na imagem ao MEV estão indicadas as duas zonas (Z5 e Z6) analisadas em EDS (Figura III.1.22). Ao MEV há uma ligeira distinção de densidade da pasta mas não é evidente, neste caso, o enriquecimento em sílica e álcalis junto ao agregado. 187
Fotografia III.1.48 – Aspecto da fissuração existente entre as partículas de agregado grosso (granito) e a pasta de cimento (N//). Localmente, esta fissura atinge 200 μm de largura. 188
Fotografia III.1.49 – Imagens obtidas ao microscópio óptico e ao MEV da interface pasta de cimento-agregado e da faixa de material de preenchimento analisado em EDS (análises F1 e F2 correspondentes aos espectros da Figura III.1.23). Verifica-se o enriquecimento em cálcio e o decréscimo de álcalis da orla mais próxima do agregado para a orla junto à pasta de cimento. 189
Fotografia III.1.50 – Imagem, ao MEV, de fissura sem preenchimento que atravessa uma partícula de agregado grosso e se prolonga pela pasta de cimento. 190
Fotografia III.1.51 – Fissura preenchida por etringite observada ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, no contacto entre a pasta de cimento e o agregado grosso, prolongando-se para a pasta de cimento (espectro na Figura III.1.24). 192
Fotografia III.1.52 – Etringite existente na pasta de cimento, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, exibindo cristais aciculares de orientação aleatória. 191
Fotografia III.1.53 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV da fissura e material de preenchimento analisado em EDS (análise Z1). 194
Fotografia III.1.54 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV da fissura e material de preenchimento analisado em EDS (análise Z1). O gel mostra uma textura semicristalina. 195
Fotografia III.1.55 – Fissura com preenchimento que atravessa uma partícula de granito e que se prolonga para o exterior da partícula, na interface pasta de cimento-agregado (análise F Z4 da Figura III.1.27). 195
Fotografia III.1.56 – Aspectos dos poros observados nas lâminas delgadas do betão. Alguns poros apresentam preenchimento, parcial ou total, por etringite. 196
Fotografia III.1.57 – Imagens, obtidas ao MEV, da etringite que preenche os poros. Na imagem da esquerda a etringite preenche parcialmente o poro e os cristais crescem perpendicularmente à parede do mesmo. Na imagem da direita (análise EDS-Z1 na Figura III.1.28), os cristais estão entrelaçados, apresentam um desenvolvimento desorganizado e é possível observar fissuras de retracção. 197
Fotografia III.1.58 – Imagens, obtidas ao MEV, de poros preenchidos por etringite, aos quais estão associadas fissuras finas na pasta de cimento, sem preenchimento. 198
Fotografia III.1.59 – Aspectos dos cristais de etringite em poros existentes no betão. A imagem da esquerda mostra fissuras de retracção e a da direita uma fissura 200

que atravessa o preenchimento, mas que não se propaga à pasta adjacente.
Fotografia III.1.60 – Imagens, ao MEV, de etringite comprimida observada nos fragmentos de betão no contacto pasta de cimento-agregado. A imagem da direita mostra o mesmo tipo de etringite em lâmina delgada. 200
Fotografia III.1.61 - Aspectos da corrosão dos grãos de quartzo pertencentes aos agregados finos. Na imagem da direita encontra-se uma pequena percentagem de cálcio, para além do silício predominante (espectro da Figura III.1.30). 201
Fotografia III.1.62 – Aspectos dos cristais de carbonato de cálcio que se encontram à superfície das partículas de betão. 202
Fotografia III.1.63 – Cristais de arcanite, de hábito tabular, existentes em amostra do betão em escamação. 203
Fotografia III.1.64 – Aspecto dos cristais de aptitalite presentes nas amostras de betão, nos locais em que ocorre escamação. 204
Fotografia III.1.65 – Cristal de portlandite disposto paralelamente à superfície de contacto pasta de cimento-agregado. Observa-se também um poro com um fino revestimento de etringite. 204
Fotografia III.1.66 – Textura do gel sílico-alcalino na amostra de betão, com fissuras de retracção características resultantes da perda de água. 205
Fotografia III.1.67 – Aspecto dos cristais tabulares, ricos em sódio, que existem na superfície de algumas amostras de betão e, essencialmente, sobre o gel sílico-alcalino. 206

PARTE III – 2. BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO

Fotografia III.2.1 – Pedreira de onde foram retirados os agregados para a construção da barragem do Alto Rabagão e que se mantém em laboração: (a) Fotografia aérea digital do local (sem escala); (b) frente de escavação Este, vista para Nordeste; (c) frente de escavação Este, vista para Sudoeste (Março de 2002). 217
Fotografia III.2.2 – Aspecto do granito da pedreira de Pisões em amostra de mão. 218
Fotografia III.2.3 – Quartzo com extinção ondulante e quartzo em pequenos cristais, com textura cataclástica (NX). 219
Fotografia III.2.4 – Aspectos dos cristais de feldspato potássico que mostram, por vezes, macla de Carlsbad (NX). 220
Fotografia III.2.5 – Aspecto dos cristais de plagioclase (NX). 220
Fotografia III.2.6 – Moscovite com inclusões de fibrolite orientada (NX). 221
Fotografia III.2.7 – Clorite com textura vermicular (N//). Ocorre frequentemente associada a quartzo microcristalino. 222
Fotografia III.2.8 – Imagens dos provetes cúbicos e cilíndricos preparados para os ensaios de compressão uniaxial do granito da pedreira de Pisões. 228
Fotografia III.2.9 – Imagens dos provetes após a realização dos ensaios de compressão uniaxial do granito da pedreira de Pisões: (a) cubo AR1; (b) cubo AR3; (c) cilindro AR2; (d) cilindro AR3. 229
Fotografia III.2.10 – Aspectos do preenchimento parcial dos poros em observação à lupa binocular. 230
Fotografia III.2.11 – Imagens dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002. As zonas assinaladas com Z1 e Z2 correspondem aos espectros da Figura III.2.5. 231
Fotografia III.2.12 – Aspecto dos cristais ricos em sódio existentes na superfície dos provetes de argamassa do ensaio ASTM C1260-94, 2002. Os espectros correspondentes às zonas assinaladas encontram-se na Figura III.2.6 (a) e (b). 233

Fotografia III.2.13 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV das lâminas produzidas a partir dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C1260-94, 2002. Foi detectado preenchimento parcial em dois poros. A composição deste produto encontra-se no espectro da Figura III.2.7. 234

Fotografia III.2.14 – Imagens, ao MEV, da pasta de cimento (análises EDS de Z3 e Z6 na Figura III.2.9. 239

Fotografia III.2.15 – Fissuras, com padrão em *map-cracking,* existentes na GFE2 (encontro esquerdo da abóbada). As fissuras, que estão fechadas, são assinaladas por uma descoloração do betão. 248

Fotografia III.2.16 - Fissuras com padrão em *map-cracking* existentes na parede exterior do encontro esquerdo da abóbada. As fissuras têm, por vezes, exsudações de carbonato de cálcio. 248

Fotografia III.2.17 – Imagens da carote retirada da parede exterior do encontro esquerdo da abóbada. A carote tem 94 milímetros de diâmetro. É possível observar as fissuras superficiais, com exsudação, e a caverna interior. 249

Fotografia III.2.18 – Imagem de três pequenas cavidades no betão da gravidade direita. 249

Fotografia III.2.19 – *Pop-out* existente na galeria GFE1 da abóbada. 250

Fotografia III.2.20 – Cavidade de grande diâmetro no bloco 68-69 da gravidade esquerda, que deverá corresponder a um *pop-out*. 250

Fotografia III.2.21 – Imagens das eflorescências em filamentos translúcidos e longos que existem nas juntas Y1 e Y2 do encontro esquerdo da abóbada. Escala em centímetros. 252

Fotografia III.2.22 – Aspectos das exsudações existentes nas galerias da gravidade direita. Escala em centímetros. 252

Fotografia III.2.23 – Aspecto da humidade e das estalactites existentes nas juntas de betonagem na galeria de montante da gravidade direita. 252

Fotografia III.2.24 – Aspecto da cavidade existente no bloco J-K, contida em carote de betão (o tarolo tem 94 milímetros de diâmetro). 255

Fotografia III.2.25 – Gel existente na cavidade do bloco J-K, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV. O gel, com fissuras de retracção características, envolve partículas de quartzo. As zonas indicadas como Z2 e Z3 correspondem aos espectros da Figura III.2.13. 256

Fotografia III.2.26 – Imagens, ao MEV, do produto que constitui o revestimento da cavidade observada no bloco J-K da abóbada. O gel sílico-alcalino apresenta-se amorfo, liso e com fissuras de retracção. Sobre o gel formam-se cristais de carbonato de cálcio. A composição das zonas assinaladas encontra-se nos espectros da Figura III.2.14. 258

Fotografia III.2.27 – Imagens à lupa binocular: (a) do produto de cor branca existente no topo do *pop-out* que se destacou do tecto da galeria GFE1 (ampliação de 0,6X); (b) do material translúcido e gelatinoso, mais superficial (ampliação de 1,6X). 258

Fotografia III.2.28 – Imagens obtidas ao MEV do gel presente no vértice do *pop-out* da galeria GFE1. Predomina a estrutura cavernosa e a superfície lisa e com fissuras. Nas imagens estão indicadas as zonas que correspondem aos espectros da Figura III.2.15. 259

Fotografia III.2.29 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N// e NX) da partícula de rocha que está na origem do *pop-out* existente na galeria GFE1. As duas imagens correspondem a locais diferentes da lâmina delgada. 260

Fotografia III.2.30 – Imagem obtida ao microscópio óptico (N//) da interface da rocha com a pasta de cimento. 260

Fotografia III.2.31 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV de fissuras que atravessam a partícula de rocha que está na origem do *pop-out* observado na galeria GFE1 do encontro esquerdo: (a) fissura sem 261

preenchimento; (b) e (c) fissura com preenchimento de tom ferruginoso, analisado ao MEV/EDS (Figura III.2.16).
Fotografia III.2.32 – Imagens ao MEV do gel que existe em cavidade detectada no topo da galeria GFE1. Pode observar-se um carácter viscoso e uma textura esquelética. Sobre o gel crescem cristais ricos em sódio. Na Figura II.2.17 encontram-se os espectros EDS do gel. 262
Fotografia III.2.33 – Imagem ao MEV dos produtos com estrutura em roseta compostos essencialmente por silício e cálcio, existentes nos *pop-outs* (espectro da Figura III.2.18). 263
Fotografia III.1.34 – Forma dos cristais ricos em sódio presentes nas eflorescências da barragem do Alto Rabagão. São frequentes os cristais globulares, formando *clusters*. 264
Fotografia III.2.35 – Imagens do gel existente nas exsudações da barragem do Alto Rabagão: (a) gel viscoso; (b) com textura porosa, esquelética; (c) e (d) gel com superfície lisa e fissuras de retracção. As imagens estão referenciadas com as letras (a), (b), (c) e (d) para indicação da correspondência com os espectros da Figura III.2.20. As zonas compostas por gel, representadas nas imagens, estão referidas nos espectros respectivos. 266
Fotografia III.2.36 – Imagens dos cristais de trona que estão espacialmente relacionados com o gel amorfo. 266
Fotografia III.2.37 – Imagens, ao MEV, de cristais de carbonato de cálcio que existem nas exsudações. 267
Fotografia III.2.38 – Imagens, ao MEV, do gel que contém alumínio presente no cone retirado do *pop-out*. A textura é semelhante à observada em gel sílico-alcalino de outras amostras. As zonas assinaladas estão indicadas a sombreado no Quadro III.2.10. 268
Fotografia III.2.39 – Imagens dos tarolos de betão retirados da barragem do Alto Rabagão. O betão mostra-se compacto e são. Os troços das carotes fotografados foram serrados para preparação dos provetes para ensaios à compressão uniaxial. 270
Fotografia III.2.40 – Imagens dos provetes de betão após realização dos ensaios de compressão uniaxial. Alguns provetes necessitaram de aplicação de uma força superior a 250 kN, para o que foi utilizado o equipamento ToniPack, modelo 3000 (os provetes têm 94 milímetros de diâmetro). 273
Fotografia III.2.41 – Aspectos de um granito com textura cataclástica presente nas partículas de agregado grosso. 276
Fotografia III.2.42 – Forma das partículas de agregado fino. As partículas são rugosas, angulares a subangulares, de baixa esfericidade. 277
Fotografia III.2.43 – Aspectos da pasta de cimento em luz natural (N//). A pasta tem tonalidade acastanhada heterogénea, por vezes mais escura junto às partículas de agregado. 278
Fotografia III.2.44 – Aspectos da carbonatação da pasta de cimento com a tonalidade dourada devida à existência de pequenos cristais de calcite "em pipocas". 278
Fotografia III.2.45 – Imagem, ao MEV, de um local em que se observou escurecimento da pasta de cimento junto a partículas de agregado. 279
Fotografia III.2.46 – Imagens, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, de um local em que se observou escurecimento da pasta de cimento junto a partículas de agregado (análises Z3 e Z4 nos espectros da Figura III.2.24). 280
Fotografia III.2.47 – Aspecto, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, dos cristais de etringite presentes na pasta de cimento, relacionados com partícula de agregado. 281
Fotografia III.2.48 – Imagens, ao microscópio óptico (N// e NX), de fissuras existentes na pasta de cimento e que, por vezes, atravessam partículas de agregado fino. Não contêm preenchimento. 281
Fotografia III.2.49 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) da microfissuração do 282

betão da rampa exterior do encontro esquerdo.
Fotografia III.2.50 – Imagem, obtida ao MEV, da fissura que atravessa o agregado e é preenchida por um material de textura e composição variáveis. Os espectros EDS de F1 e F2 encontram-se na Figura III.2.25. 283
Fotografia III.2.51 – Imagem obtida ao MEV de fissura que atravessa o agregado e é preenchida por um material de composição semelhante ao da pasta de cimento. A fissura não se prolonga para a pasta de cimento. 284
Fotografia III.2.52 – Imagens, ao microscópio óptico (NX) e ao MEV, de uma partícula de quartzo que constitui o agregado fino e apresenta coloração amarelada nos bordos dos cristais. 285
Fotografia III.2.53 – Imagens, ao microscópio óptico e ao MEV, da fissura que atravessa o agregado e é preenchida por um material de textura fibrosa. 286
Fotografia III.2.54 – Imagens, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, de uma orla composta por silício e alumínio, no contacto de um grão de feldspato com a pasta de cimento (Z4). 287
Fotografia III.2.55 – Imagens dos cristais de etringite, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV. A análise EDS mostrou composição idêntica para os dois casos, embora a forma e distribuição dos cristais sejam diferentes. 288
Fotografia III.2.56 – Aspecto dos cristais de etringite que preenchem um poro do betão e que coexistem, possivelmente, com gel sílico-alcalino. Observam-se finas fissuras na pasta, em volta do poro. 289
Fotografia III.2.57 – Aspecto, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, dos cristais de etringite que preenchem parcialmente um poro, envolvendo gel sílico-alcalino. A composição semiquantitativa encontra-se na Figura III.2.32. 290
Fotografia III.2.58 – Imagens, ao MEV, de cristais aciculares de etringite que se encontram nos poros do betão. Por vezes existem vazios entre os cristais e a parede dos poros, o que poderá ser atribuído a dessecação da etringite. 291

INTRODUÇÃO

1. GENERALIDADES

O betão, principal material de construção do século XX, foi considerado durante décadas como um material de durabilidade ilimitada. No entanto, é actualmente reconhecido que o betão, por várias ordens de factores, pode deteriorar-se. A deterioração tem origens diversas, químicas, físicas e biológicas, estando muitas vezes relacionada com a composição, fabrico, colocação e cura do próprio betão. Entre as causas de deterioração, merecem destaque, no presente trabalho, as reacções químicas no betão, em especial aquelas em que intervêm os componentes do betão e que podem originar danos nas estruturas.

Os factores que podem provocar deterioração e os seus efeitos estruturais abrangem um domínio de conhecimento multidisciplinar, no qual participam especialistas em engenharia civil, geologia, química, biologia e ciências dos materiais, que, sobre o assunto, realizam abordagens diferentes. Existem, no entanto, frequentes temas comuns relativamente às questões que afectam a durabilidade e desempenho do betão e seus efeitos sobre a funcionalidade da estrutura. O que preocupa, em última análise, os técnicos envolvidos em obras de betão, é garantir um desempenho adequado durante um período de tempo relativamente longo (CEB, 1992), correspondente à vida útil da obra.

Os componentes do betão provêm directa ou indirectamente de formações rochosas cujas propriedades condicionam as características do produto final, pelo que o estudo do betão tem, necessariamente, uma vertente que se enquadra no âmbito da Geologia. Reveste-se de particular importância a intervenção do geólogo no estudo dos materiais a utilizar como agregados, tanto antes como após a sua aplicação. Esta intervenção alarga-se ao diagnóstico das reacções internas, com recurso a técnicas habitualmente utilizadas em petrografia, tirando partido das potencialidades de equipamentos como o microscópio óptico de polarização e de reflexão, a microssonda electrónica, o microscópio electrónico de varrimento e a difracção por raio-X.

Por razões ambientais e económicas, agregados anteriormente considerados pouco adequados estão a ser cada vez mais utilizados para o fabrico de betão, pelo que é necessário assegurar a sua qualidade antes da aplicação na construção. Algumas rochas aplicadas frequentemente como agregados contêm minerais potencialmente reactivos no meio fortemente básico da solução intersticial do betão.

As reacções químicas internas com mais ocorrências descritas na bibliografia são o ataque por sulfatos e as reacções entre os agregados e o cimento, estas classificadas em

função da composição do agregado. As mais frequentes são as designadas por reacções álcali-sílica e álcali-silicato. Neste trabalho estudam-se em particular estas reacções.

As reacções internas podem dar origem a compostos expansivos, gerando tensões que, quando excedem a resistência à tracção do betão, provocam a fissuração. No entanto, a ocorrência destes compostos não significa necessariamente que o fenómeno seja nocivo para a estrutura e, por vezes, a sua presença permanece desconhecida por não ter qualquer efeito sobre o comportamento do betão.

As reacções álcali-agregado afectam todos os tipos de estruturas, destacando-se as barragens, pontes, estradas e quebra-mares (ICOLD, 1991). A identificação e estudo destes fenómenos têm vindo a evoluir desde meados do século XX. Refira-se que uma das primeiras estruturas em que estas reacções foram identificadas foi a barragem de Parker, nos Estados Unidos da América, em 1941. Processos idênticos foram reconhecidos na Dinamarca na década de 1950 (Chatterjee et al., 1992) e na Alemanha em 1960 (Hobbs, 1988). Em França, este fenómeno foi reconhecido pela primeira vez na barragem de Chambon em 1976 (Louarn e Larive, 1993; Larive, 1998) e no Reino Unido, em 1971, foi atribuída a reacções álcali-agregado a fissuração do betão da barragem de Val de la Mare, em Jersey (BRE Digest 330, 1991; Sims, 1992; Rendell et al., 2002). Existem registos ainda mais recentes do que aqueles, na Bélgica, em que o primeiro caso de reacção álcali-agregado foi detectado em 1984 (Besem e Demars, 1989) e na República Checa, com o primeiro caso identificado em 1999 (Gregerová e Pospíšil, 2003).

Em Portugal, a identificação de degradação em estruturas de betão devida a reacções internas é relativamente recente e o percurso difícil de reconstituir, dado que, na sua maioria, os documentos sobre este assunto constituem relatórios confidenciais. Foi durante a década de 1990 que foram divulgados, pela primeira vez, em artigos técnicos e científicos, casos de obra nos quais foi diagnosticada deterioração do betão devida a reacções álcali-agregado (Silva e Rodrigues, 1993; Neiva et al., 1995; Ramos et al., 1996; Reis et al., 1996). Os principais estudos neste âmbito foram desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), essencialmente na área de grandes barragens e obras de arte. Refira-se, neste domínio, a tese de doutoramento de Henrique Silva (1992), que versa sobre um assunto mais vasto, mas na qual as reacções álcali-agregado são abordadas pela óptica de um geólogo, com apresentação de vários casos de obra.

Como marco importante na divulgação destes fenómenos em Portugal, é de referir a organização pelo LNEC, em colaboração com o *Laboratoire Central des Ponts et*

Chaussées, do Seminário "Degradação de Estruturas por Reacções Expansivas de Origem Interna", em 2001, no qual especialistas portugueses e franceses, de diferentes domínios de conhecimento, falaram da sua experiência e da investigação em curso.

A propósito da ocorrência de reacções álcali-agregado em grandes obras de engenharia, destaca-se o trabalho desenvolvido pela ICOLD, 1991, que refere casos registados em barragens em vários países.

Relativamente à situação em Portugal, a análise de grandes barragens de betão e alvenaria mostra a predominância de incidentes no corpo da barragem (12 casos, correspondendo a 66% do total de casos em que há deterioração). Quanto às principais origens dos incidentes, as reacções álcali-agregado são referidas, para as barragens de betão, em apenas três casos (Pinto, 2001).

2. OBJECTIVOS E LIMITAÇÕES

O presente trabalho surgiu do interesse em implementar a aplicação das técnicas de petrografia ao estudo do betão de grandes obras de engenharia. Desde o início da sua preparação, foi possível reconhecer que o assunto merece cada vez mais a atenção dos técnicos responsáveis pelas obras. A esta evolução não será certamente alheio o facto de se tratar de reacções lentas, cujos efeitos começam agora a surgir nas obras, algumas décadas após a construção.

Verifica-se que este assunto se encontra pouco desenvolvido no nosso país, ao contrário do que sucede em outros países onde existem empresas privadas e institutos públicos que têm como principal ocupação o estudo e diagnóstico da deterioração do betão nas estruturas. Em Portugal, embora sejam realizados com alguma frequência ensaios de laboratório relacionados com a avaliação da reactividade potencial de agregados para betão, a utilização da análise petrográfica, como forma de caracterização de agregados e como diagnóstico das reacções internas do betão, não é ainda um método utilizado com regularidade.

Em Portugal o granito é um dos tipos de rochas mais utilizados como agregado para betão, em especial nas zonas Norte e Centro do País, onde esta rocha é mais abundante.

Tomando em consideração o número de grandes obras de engenharia construídas com agregados graníticos nas zonas Norte e Centro do país, e uma vez que uma parte substancial destas obras foi edificada entre as décadas de 1950 e 1970, parece de

grande interesse a avaliação do seu estado de conservação e a comparação do desempenho dos agregados em obra com a reactividade previsível com base nos ensaios e técnicas actualmente aplicados com este fim, uma vez que na literatura se encontram várias referências à existência de reacções álcali-agregado em betão fabricado com agregados graníticos (Gogte, 1973; West, 1991; Shayan, 1993; West, 1994; Michel et al., 2003; Owsiak, 2004).

O presente trabalho tem como principal objectivo a caracterização do granito como material de construção, em especial como agregado para betão, e a avaliação das propriedades desta rocha, que eventualmente contribuam para a degradação do betão.

Com este objectivo foi solicitada à empresa EDP – CPPE (Electricidade de Portugal – Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade) apoio para o estudo de algumas barragens de betão em que foram aplicados agregados graníticos. A empresa autorizou a investigação de dois casos de grandes barragens, a Barragem do Alto Rabagão, localizada no Norte do país, e a Barragem do Cabril, localizada na região Centro, nas quais foram aplicados agregados graníticos com características distintas.

O estudo debruçou-se sobre os granitos utilizados em cada caso e também sobre a eventual degradação do betão atribuível a reacções internas, em especial as que envolvem os agregados e sua interacção com a pasta de cimento. Foram excluídas desta investigação outras possíveis causas de deterioração, por não apresentarem relação directa com o tipo de agregado utilizado no betão.

Para atingir este objectivo, foram programadas e realizadas diferentes actividades que incluíram:

- Colheita de amostras dos granitos nas pedreiras de onde foram extraídos os materiais para os agregados;
- Caracterização petrográfica, mecânica e química dos granitos;
- Recolha de informação acerca dos maciços de fundação das duas barragens;
- Inspecção macroscópica do betão, nomeadamente nas galerias interiores das barragens;
- Registo de indícios de deterioração;
- Colheita de amostras de eflorescências, exsudações e *pop-outs* e seu estudo;
- Colheita de amostras de betão para análise petrográfica e ensaios mecânicos;
- Identificação e caracterização dos produtos resultantes das reacções internas no betão.

Não se pretendeu fazer a análise exaustiva do fenómeno das reacções álcali-agregado relacionado com a utilização de agregados portugueses. No entanto, pensa-se

que o País carece da execução de um trabalho amplo de avaliação da intervenção dos agregados no estado de conservação das grandes obras de engenharia, construídas nos últimos 50 anos, e de uma previsão, quando possível, da sua evolução num futuro próximo.

Neste contexto, espera-se que este trabalho de investigação possa contribuir para o desenvolvimento do tema entre nós, em especial na captação do interesse de outros geólogos relativamente à petrografia aplicada aos materiais de construção. Esta técnica é uma daquelas em que a intervenção de um geólogo mais se justifica, seja porque domina os métodos e equipamentos da petrografia, ou porque os seus conhecimentos lhe permitem, à partida, prever as possíveis limitações de um agregado, com base na sua natureza e história geológica.

Tal como sucede noutros países, seria desejável que fosse desenvolvida uma cultura de prevenção que conduzisse à classificação sistemática das rochas portuguesas com vista à sua utilização como agregados, envolvendo especialistas das diferentes áreas de conhecimento. A actual legislação (EN 206-1, 2000; Especificação LNEC E 373, 1993), para além dos ensaios físicos e químicos necessários à certificação de um agregado, contempla a análise petrográfica como método de determinação da presença de espécies potencialmente reactivas aos álcalis do cimento.

3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese foi organizada para que a sua leitura fosse compreensível para investigadores menos familiarizados com a temática do betão e seus componentes, pelo que os capítulos de enquadramento teórico são, quiçá, um pouco longos.

Assim, entendeu-se que era relevante incluir uma primeira parte de enquadramento teórico e revisão bibliográfica, com o objectivo de estabelecer um *state-of-the-art* que abarcasse os aspectos relacionados com o fabrico do betão e as propriedades mais importantes dos agregados. É também neste âmbito que se apresentam, de forma sucinta, os fenómenos relativos às reacções internas no betão, assunto sobre o qual existe uma bibliografia muito extensa, por vezes controversa, devido à complexidade dos processos envolvidos.

Também, com características de enquadramento teórico, são apresentadas as duas obras em estudo, sua localização e características, com base nos documentos escritos e desenhos que foi possível consultar sobre os dois locais.

Segue-se a exposição dos ensaios e técnicas aplicados para estudo dos agregados e dos betões e principais resultados obtidos. A apresentação é feita separadamente para os dois casos, dadas as particularidades de cada um. As técnicas e equipamentos utilizados são, no entanto, as mesmas para as barragens do Cabril e do Alto Rabagão.

A interpretação dos resultados é feita no final dos capítulos, sendo no final do trabalho realizada a discussão e apresentadas as principais conclusões.

Assim, o trabalho está organizado em quatro partes:

- A Parte I, de enquadramento teórico;
- A Parte II, de apresentação dos dois empreendimentos estudados, com base na informação recolhida;
- A Parte III, em que é apresentado todo o trabalho experimental desenvolvido;
- A Parte IV, onde é feita a discussão e referidas as linhas de investigação a desenvolver.

Na Parte I faz-se uma introdução breve acerca do material betão e seus constituintes. Merece relevância o capítulo sobre os agregados e suas características, por se tratar do assunto fundamental deste trabalho. As propriedades principais são apresentadas, desenvolvendo as questões relativas à eventual reactividade das rochas e minerais. Embora os ensaios laboratoriais de reactividade sejam importantes, a sua falibilidade é frequentemente referida na literatura sobre o tema, pelo que os seus resultados devem ser confirmados pela petrografia. Esta, apesar da subjectividade que lhe é intrínseca, é a técnica menos discutida e aquela cujos resultados melhor traduzem o comportamento dos agregados em obra.

São referidas as principais causas de deterioração das estruturas de betão, em particular as reacções álcali-agregado, tema relevante para a Geologia, dado que um dos principais métodos de investigação – senão mesmo o principal – é baseado em técnicas petrográficas, dominadas primordialmente por geólogos.

Os mecanismos das reacções são apresentados, com ênfase nas reacções álcali-sílica e álcali-silicato, possíveis no caso de aplicação de rochas graníticas, bem como os factores que conduzem à ocorrência destas reacções.

Os métodos de diagnóstico são referidos, envolvendo a inspecção da estrutura *in situ* e a confirmação do diagnóstico com análises e trabalhos de laboratório.

É aqui abordada a situação em Portugal, num capítulo relativamente curto, uma vez que, sobre este assunto, existem ainda poucos trabalhos publicados e são escassas as estruturas em que foi feito o diagnóstico de reacções álcali-sílica.

Na Parte II é feita a apresentação dos dois casos em estudo, as barragens do Cabril e do Alto Rabagão. Têm em comum a aplicação de agregados graníticos para o fabrico do betão e o facto de as obras terem sido construídas há algumas dezenas de anos. Situam-se em áreas afastadas geograficamente e foram construídas por empresas diferentes. São escassos os elementos publicados sobre os dois empreendimentos, fazendo-se a súmula possível para cada um dos casos.

A Parte III refere-se ao trabalho experimental desenvolvido, sendo tratados os dois casos independentemente. A investigação realizada debruça-se essencialmente sobre a caracterização dos agregados, procurando fazer uma aplicação prática dos métodos de avaliação e previsão do comportamento das rochas como agregado. Para esta avaliação, a petrografia foi de primordial importância e consumiu a maior parte do tempo utilizado na investigação, embora tenham sido efectuados outros estudos laboratoriais.

Na avaliação do estado de conservação das estruturas, foi feita a apreciação das características actuais do betão, verificando-se que os indícios de deterioração são escassos em ambos os casos. O levantamento foi realizado através da inspecção das obras e do estudo petrográfico do betão. Das técnicas de petrografia disponíveis, o exame ao microscópio óptico constituiu a base do trabalho e condicionou a selecção de técnicas adicionais. Atendendo à pouca experiência na identificação dos produtos presentes no betão, o microscópio electrónico de varrimento e a análise por espectrómetro de dispersão de energia foram utilizados com alguma frequência e deram um importante contributo para a evolução do trabalho.

Para cada um dos exemplos estudados existe um capítulo de conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

Finalmente, na Parte IV, são apresentadas as conclusões gerais, comparando os dois casos estudados.

O presente trabalho constitui o início de uma investigação que se pretende mais generalizada, em termos de variedade de tipos de agregados e de tipologia de obras abordada. Por esta razão, referem-se os trabalhos a desenvolver, abordando a investigação e técnicas que, idealmente, se deseja sejam implementados num futuro próximo.

PARTE I

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Capítulo 1. FACTORES QUE CONDICIONAM O DESEMPENHO DO BETÃO

1.1. Generalidades

Etimologicamente, a palavra betão deriva do francês *béton*, podendo a origem atribuir-se ao termo latim *bitumen* (betume) (Coutinho, 1988).

O betão é constituído por uma mistura de partículas em geral rochosas, os agregados, cimento, água e, eventualmente, adjuvantes e adições. No caso da dimensão máxima das partículas de agregado ser igual ou inferior a 4 mm, o material resultante da mistura é designado por argamassa.

A utilização do betão como material de construção remonta a cerca de 1350 A.C., no antigo Egipto, na Grécia e em Roma (Mays, 1992; West, 1996), sendo o ligante então constituído essencialmente por cal e, às vezes, por argila. Após este período, e durante séculos, a aplicação do betão foi muito limitada e o produto utilizado de baixa qualidade, até meados do século dezoito, quando da construção do farol de Eddystone (*Eddystone Lighthouse*) por John Smeaton. Durante o século dezanove assistiu-se ao desenvolvimento do betão como material de construção, com o aparecimento do betão armado e a criação, em 1824, de um "cimento de qualidade superior, semelhante à Pedra de Portland", por Joseph Aspdin. O protótipo do cimento actual foi fabricado em 1845 por Isaac Johnson (Neville, 1999), que aqueceu os ingredientes a uma temperatura suficientemente elevada para que ocorresse fusão parcial. Durante o século vinte, na década de quarenta, é utilizado por Eugene Freyssinet, pela primeira vez, o betão pré-esforçado (West, 1996).

Sendo o betão considerado até à época como um material de elevada durabilidade, foram publicados na década de 1940 os primeiros trabalhos acerca da existência de fenómenos de deterioração do betão por reacções álcali-sílica em pavimentos na Califórnia (ACI, 1998). Stanton desenvolveu estudos que levaram à conclusão de que esta deterioração se devia a reacções entre os agregados e a pasta de cimento. Processos idênticos foram reconhecidos nas décadas seguintes noutros países, e vários organismos começaram a estudar as reacções álcali-agregado: o *Army Corps of Engineers*, o *Bureau of Public Roads* e a *Portland Cement Association*, nos Estados Unidos da América, o *Australian Council for Scientific and Industrial Research* e o *Danish National Committee for Alkali Aggregate Research* (ACI, 1998).

Desde meados do século vinte, as questões relativas à deterioração do betão por reacções internas têm vindo a ser investigadas com o objectivo de determinar as causas, estudar métodos de detecção e implementar medidas de recuperação e tratamento das obras afectadas por este fenómeno.

Acerca das reacções álcali-sílica, que constituem o fenómeno mais comum, foram escritas algumas obras de carácter geral (Hobbs, 1988; Swamy, 1992), um elevado número de artigos, em especial a partir da década de 1970, e várias teses de doutoramento. Há, ainda, a considerar as comunicações apresentadas nos congressos da especialidade, realizados desde 1974 (International Conference on Alkali-Aggregate Reactions), cuja décima segunda edição se realizou em 2004 na China. Um estudo desenvolvido pela Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1991) mostrou que o fenómeno se verifica em todo o mundo com frequência suficientemente elevada para preocupar os especialistas envolvidos neste tipo de obras, tanto no que respeita ao projecto como à manutenção.

As reacções álcali-agregado dão origem a mecanismos de deterioração lentos e não catastróficos (Berra e Bertacchi, 1991); frequentemente ocorrem sem provocar danos significativos na estrutura, pelo que não existe registo de qualquer caso em que a obra tenha colapsado devido a este processo de deterioração. Os efeitos das reacções surgem normalmente 5 a 15 anos após a construção, mas por vezes este período pode ir até 25 a 40 anos (Poole, 1992). O estudo desenvolvido pela ICOLD, 1991, refere que, nas barragens em que ocorreram reacções álcali-agregado, estas verificaram-se geralmente 30 anos após a construção, mas mais de 25% destas barragens mostraram indícios de alteração ao fim de 5 anos e 75% ao fim de 15 anos. Atendendo a que a reacção cessa logo que esteja esgotado um dos intervenientes na reacção, há casos de barragens em que a reacção terminou ao fim de 15 anos. Noutros casos, porém, a reacção mantém-se ao fim de 40 anos, em especial quando os elementos que participam nas reacções têm origem externa. O facto de as manifestações surgirem vários anos após a construção, pode significar que algumas construções mais recentes irão eventualmente apresentar indícios de reacções álcali-agregado apenas dentro de alguns anos.

Relativamente à intervenção do geólogo no estudo das reacções internas do betão, é oportuno apresentar um resumo da aplicação das técnicas de petrografia ao estudo dos agregados e do betão.

A descrição microscópica das fases que constituem o clínquer ocorreu pela primeira vez em 1887 com o trabalho do químico francês Le Chatelier, e em 1897 com a atribuição

de designações às principais fases por Tornebohm (French, 1991; Campbell, 1999). Esta técnica foi utilizada e desenvolvida durante o século XX por vários investigadores, tendo sido fundada em 1980 a ICMA – International Cement Microscopy Association, num esforço de reunir especialistas e promover a aplicação da microscopia à indústria do cimento e do betão.

É, actualmente, uma técnica aplicada em alguns países como processo de rotina na identificação de indícios de reacção álcali-agregado, através da observação de lâminas delgadas e polidas de betão. As principais características que é possível identificar por análise microscópica do betão são as seguintes (Concrete Society, 1989; St John et al., 1998):

- Volume relativo de agregados grossos, finos, cimento e poros; esta análise contempla a caracterização dos agregados quanto a tipos de rochas e composições mineralógicas, graus de alteração e interacção com a pasta de cimento;
- Forma, textura superficial e granulometria das partículas de agregado (naturais ou britadas);
- Presença ou ausência de agregados artificiais e substituições do cimento;
- Natureza, tipo e proporção dos poros;
- Identificação do tipo de cimento e da relação água/cimento (Mayfield, 1990; Wirgot, 1992);
- Identificação de grãos de cimento não hidratados;
- Existência de segregação ou orientação preferencial das partículas de agregado ou lixiviação de componentes do betão;
- Investigação de problemas de durabilidade química e física;
- Indicação de existência de carbonatação e forma como se apresenta o hidróxido de cálcio;
- Evidência de ataque por sulfatos, reacções álcali-agregado e sua extensão.

As técnicas utilizadas são as tradicionalmente aplicadas em petrografia, embora existam métodos mais eficazes do que outros na detecção de determinadas características (Quadro I.1).

A descrição microscópica tem revelado, também, uma importância crescente na avaliação das propriedades dos agregados para betão, permitindo, de uma forma relativamente rápida, identificar os componentes potencialmente reactivos, numa fase de avaliação da reactividade anterior à aplicação em obra. Nos próximos capítulos, serão referidas as principais características dos componentes do betão – a pasta de cimento e

os agregados – de forma a compreender os fenómenos essencialmente de natureza química que envolvem estes materiais e que podem intervir na deterioração das estruturas.

Quadro I.1 – Selecção de métodos petrográficos para análise do betão (Concrete Society, 1989).

* Método preferido ou combinação de métodos • Método alternativo □ Análise difícil, mas melhor método ou combinação conhecidos Notas: 1 – Método preferencial para análise quantitativa 2 – Necessita de outros métodos	Cimentos					Substituições do cimento						Proporção da mistura			Estudos de deterioração						
	Cimento Portland de clínquer	Cimento Portland de endurecimento rápido	Cimento Portland resistente aos sulfatos	Cimento branco	Cimento aluminoso	Escórias de alto forno	Cinzas volantes	Pozolanas naturais	Sílica de fumo	Tipo de agregado	Poros	Razão agregado/cimento	Razão agregado grosso/fino	Razão água/cimento	Ataque químico	Reacção álcali-sílica	Carbonatação	Lixiviação	Retracção	Acção do gelo	Acção do fogo
Inspecção visual				*	*	*				*					*	*				*	*
Lupa binocular										*					*	*					*
Lupa binocular com superfícies polidas										*	*	* 2	*	* 2		*			*	*	*
Lâminas delgadas		□			*	*	*	*		*					*	*	*	*	*	*	*
Lâminas/superfícies polidas	*	□	*	*		●	●														
Mic. electrónico de varrimento							●		□						*						
Microssonda electrónica	●		●	●	●	* 1	* 1	*	□					●	*						
Microscopia de fluorescência														●							

1.2. Principais constituintes do betão

1.2.1. Cimento

A palavra cimento deriva do latim *caementum,* criada pelos romanos para designar a mistura de pedras, pedaços de tijolo, cascalho, areia, cal e água, isto é, o que hoje se designa por argamassa ou betão. Apenas no final do século XVIII, com a revolução

industrial, começa a ser feita a distinção entre a argamassa ou betão e o ligante, que passa então a chamar-se cimento.

O cimento é um material inorgânico, granular e muito fino, com propriedades adesivas e coesivas que o tornam capaz de ligar fragmentos de rochas e/ou minerais e formar um todo compacto (Neville, 1999; NP EN 197-1, 2001).

Os cimentos são ligantes que endurecem em resultado de reacções químicas com a água, sendo ligantes hidráulicos por endurecerem dentro de água e serem resistentes à sua acção.

A designação de "cimento portland" deve-se à semelhança de cor e qualidade entre o cimento endurecido e a pedra de Portland, um calcário explorado em Dorset (Neville, 1999). Este tipo de cimento é obtido pela mistura proporcionada de materiais calcários (cerca de 80%) e materiais argilosos (cerca de 20%), ou outros que contenham sílica, alumina e ferro, reduzida a pó e submetida a temperatura elevada da ordem de 1450ºC (Neville, 1999, Taylor, 1997). As matérias reagem entre si e fundem parcialmente para produzir, por arrefecimento rápido, um produto designado por clínquer (Coutinho, 1988), com a composição química e a constituição mineralógica convenientes. O produto habitualmente conhecido por cimento resulta da mistura do clínquer com uma quantidade de gesso próxima de 5%, actuando, este último, como retardador de presa, ao intervir sobre a hidratação do aluminato tricálcico (St John et al., 1998) e, eventualmente, outros aditivos para facilitar a moagem. Na Figura I.1 apresenta-se um esquema do processo de fabrico do cimento.

A composição do cimento é frequentemente apresentada sob a forma de óxidos (Neville, 1999), conforme indicado no Quadro I.2.

Existem ainda outros óxidos, não necessariamente de menor importância, metais alcalinos, magnésio, manganésio, titânio, fósforo e, eventualmente, sulfatos, que constituem apenas uma pequena percentagem da massa do cimento (Coutinho, 1988; Neville, 1999).

Por reacção com a água, os óxidos formam compostos dos quais se destacam (Neville, 1999; Taylor, 1997):

- Silicato tricálcico - (C_3S) – $3CaO.SiO_2$ (50 a 70%);
- Silicato bicálcico - (C_2S) – $2CaO.SiO_2$ (15 a 30%);
- Aluminato tricálcico - (C_3A) – $3CaO.Al_2O_3$ (5 a 10%);
- Aluminoferrato tetracálcico - (C_4AF) – $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ (5 a 15%).

(Nota: CaO = C; SiO_2 = S; Al_2O_3 = A; Fe_2O_3 = F; H_2O = H; SO_3 = $\overline{S}$)

Os cimentos são divididos em diferentes tipos ou famílias, atendendo à sua composição (Quadro I.3) (NP EN 197-1, 2001) e em classes de resistência de referência 32,5, 42,5 e 52,5, definidas pela resistência média à compressão aos 28 dias (32,5, 42,5 e 52,5 MPa).

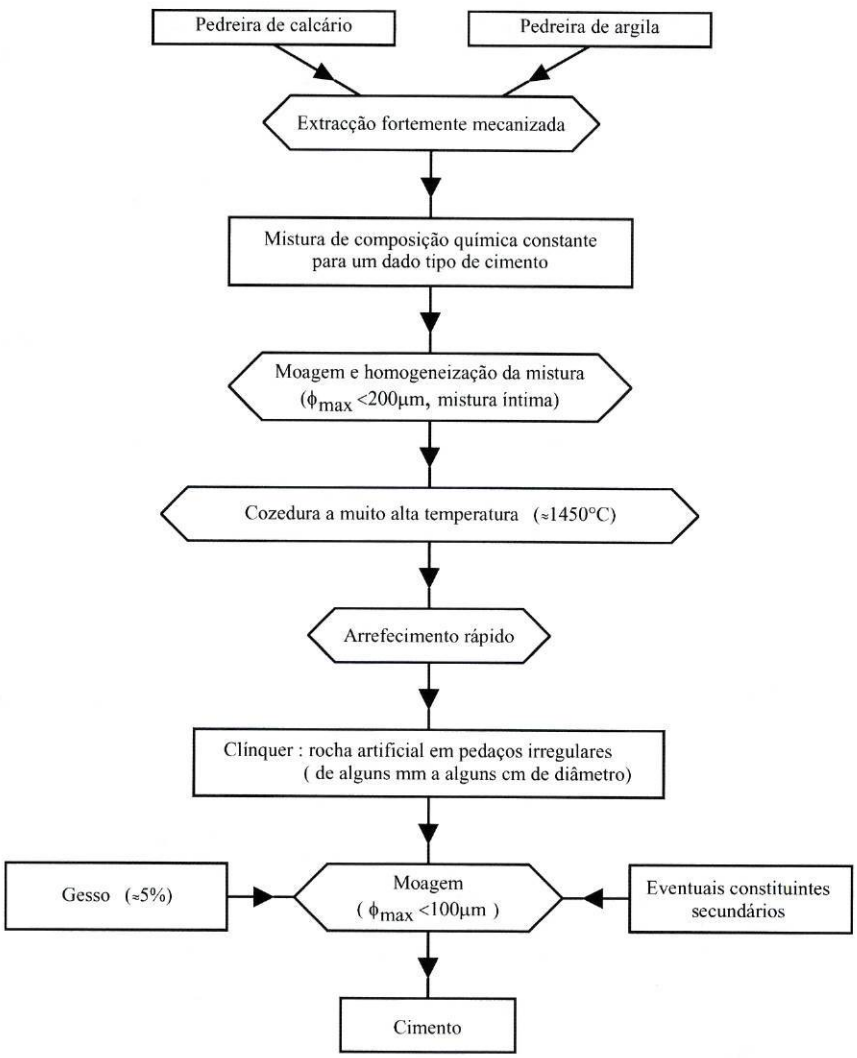


Figura I.1 – Representação esquemática do processo de fabrico do cimento (Larive, 1990).

Quadro I.2 – Composição habitual do cimento portland (Neville, 1999).

Óxidos	Teor (%)
CaO (cal)	60 - 67
SiO_2 (sílica)	17 - 25
Al_2O_3 (alumina)	3 - 8
Fe_2O_3	0,5 – 6,0

Quadro I.3 – Os vinte e sete produtos da família de cimentos correntes (NP EN 197-1, 2001).

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente		Composição (percentagem em massa [a]) Constituintes principais									Constituintes adicionais minoritários
			Clínquer	Escória de alto forno	Sílica de fumo	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido	Calcário	
						Natural	Natural calcinada	Siliciosa	Calcária			
			K	S	D[b]	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cimento Potland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cimento Portland composto[c]	CEM II/A-M	80-94	<---------- 6-20 ---------->									0-5
		CEM II/B-M	65-79	<---------- 21-35 ---------->									0-5
CEM III	Cimento de alto forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cimento pozolânico[c]	CEM IV/A	65-89	-	<---------- 11-35 ---------->					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	<---------- 36-55 ---------->					-	-	-	0-5
CEM V	Cimento composto[c]	CEM V/A	40-64	18-30	-	<---------- 18-30 ---------->			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	<---------- 31-50 ---------->			-	-	-	-	0-5

a) Os valores do quadro referem-se à soma dos constituintes principais e dos adicionais minoritários.
b) A incorporação de sílica de fumo é limitada a 10%.
c) Nos cimentos Portland compostos CEM II/A-M e CEM II/B-M, nos cimentos pozolânicos CEM IV/A e CEM IV/B e nos cimentos compostos CEM V/A e CEM V/B os constituintes principais, além do clínquer, devem ser declarados na designação do cimento.

Os cimentos compostos apresentam maior resistência às acções químicas de ataque pelos sulfatos e por ácidos e às reacções álcali-agregado.

Por mistura com água, é possível obter um sólido resistente a partir do cimento, através de reacções químicas. Os componentes do cimento dão origem a compostos hidratados e novos compostos resultantes da hidratação dos silicatos e dos aluminatos (Figura I.2), através de reacções das quais se referem de forma simplificada (Coutinho, 1988):

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O = 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O = 3{,}3CaO.2SiO_2.3{,}3H_2O + 0{,}7Ca(OH)_2$$

$$3CaO.Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + 12H_2O = 4CaO.Al_2O_3.13H_2O$$

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 7H_2O = 3CaO.Al_2O_3.6H_2O + CaO.Fe_2O_3.H_2O$$

$$CaO.Fe_2O_3.H_2O + 2Ca(OH)_2 + nH_2O = 3CaO.Fe_2O_3.mH_2O3CaO.Al_2O_3 + 3(CaSO_4.2H_2O)$$

$$+ 26H_2O = 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$$

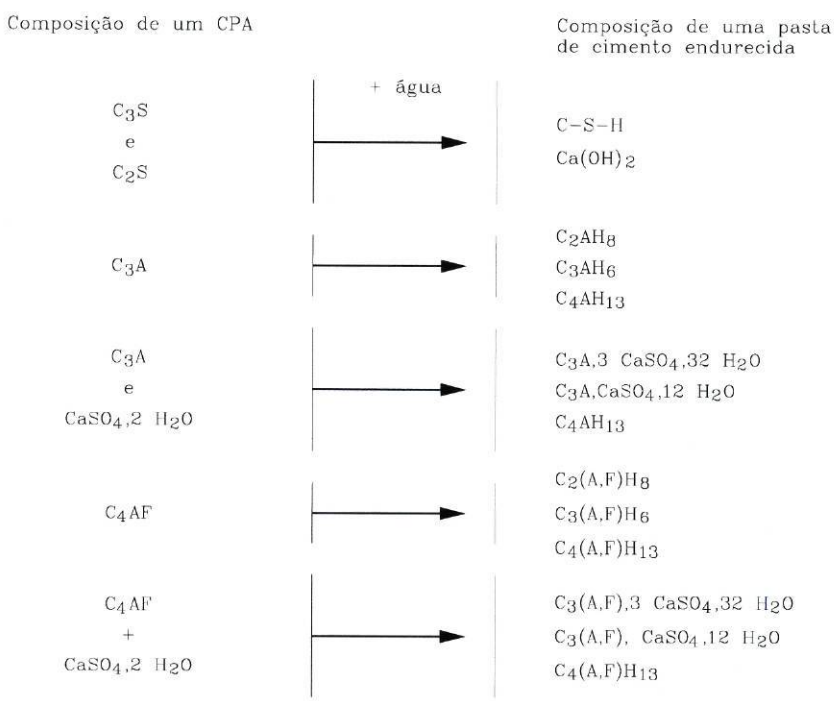


Figura I.2 - Formação dos principais compostos do betão (CPA – cimento portland anidro) (Larive, 1990).

As reacções de hidratação são escalonadas no tempo e divididas em dois períodos, a presa e o endurecimento.

A hidratação dos silicatos bicálcico e tricálcico dá origem a um conjunto de silicatos de cálcio hidratados, designados CSH (*calcium silicate hidrates*), que apresentam textura

fibrosa e representam 50 a 60% do volume da pasta de cimento. Estas reacções libertam hidróxido de cálcio, parte do qual fica em solução e parte cristaliza, designando-se portlandite, que constitui 20 a 25% da pasta hidratada. Estes silicatos apenas são estáveis quando em contacto com soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio, o que corresponde a um domínio de pH de 11,00 a 12,34.

Esta elevada alcalinidade protege as armaduras existentes no betão da corrosão. No entanto, as reacções expansivas no betão dão-se apenas na presença de soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio.

O aluminato tricálcico e o aluminoferrato tetracálcico originam, por reacção com o sulfato de cálcio, trissulfoaluminato de cálcio hidratado, designado por etringite, que pode representar 15 a 20% da pasta de cimento. Quando o gesso é consumido, a etringite torna-se instável e forma-se monosulfato de cálcio hidratado (Figura I.3).

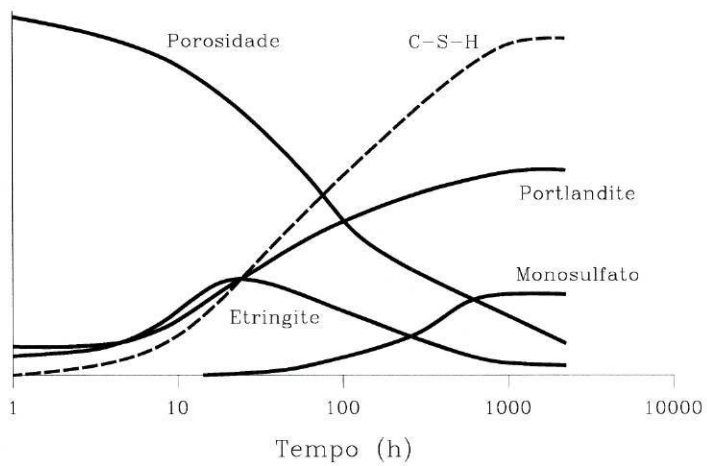


Figura I.3 – Evolução dos produtos de reacção durante a hidratação (Rendell et al., 2002).

1.2.2. Adjuvantes e adições

A utilização de adjuvantes é tão antiga como o fabrico do cimento, embora o tipo de substâncias tenha sido substancialmente modificado ao longo do tempo.

Os adjuvantes e as adições são materiais que modificam certas características da pasta de cimento, da argamassa ou do betão devido a uma acção química ou físico-química (Coutinho, 1988), sendo os objectivos da sua aplicação diversos. Os adjuvantes são classificados de acordo com a sua acção predominante:

- Redutores da água de amassadura (plastificantes e superplastificantes),
- Introdutores de ar,
- Aceleradores de presa,

- Retardadores de presa,
- Aceleradores de endurecimento,
- Hidrófugos (redutores da capilaridade),
- Expansivos.

As adições, também designadas por substituições, são substâncias que devem ser acrescentadas à pasta de cimento em quantidades superiores a 5% da massa de cimento (Neville, 1999). As adições são classificadas em adições do tipo I – materiais quase inertes – e adições do tipo II – materiais hidraulicamente activos que, em presença da água e à temperatura ambiente, com o hidróxido de cálcio ou por si só, podem formar compostos semelhantes aos originados na hidratação do cimento portland.

A adição do tipo I mais utilizada é um *filler* calcário, material finamente dividido com, aproximadamente, a mesma finura do cimento que, em virtude das suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico em algumas propriedades do betão, como, por exemplo, a trabalhabilidade, a compactação (Neville, 1999) e a tendência para fissurar.

As adições do tipo II mais comuns são a pozolana natural ou artificial – cinzas volantes e escória de alto forno – e a sílica de fumo. Qualquer destas adições é utilizada para melhorar o comportamento químico do betão, diminuindo o conteúdo em hidróxido de cálcio, para baixar o calor de hidratação, parâmetro importante quando se colocam grandes volumes de betão, ou para diminuir o custo de produção do cimento (Proença, 1995; St John et al., 1998; Rendell et al., 2002).

O termo pozolana foi utilizado originalmente para designar um tufo vulcânico situado em Puzzuoli, próximo de Nápoles (Stievenard-Gireaud, 1987). A pozolana consiste essencialmente em sílica e alumina; é constituída por partículas finas que têm a característica de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água, e formar produtos de hidratação com propriedades ligantes. A mistura com pozolana foi aplicada pelos gregos cerca de 700-600 A.C. e, posteriormente, utilizada também pelos romanos. As cinzas volantes constituem os resíduos da combustão do carvão pulverizado nas centrais térmicas (Stievenard-Gireaud, 1987). A sílica de fumo é um material amorfo rico em sílica, com partículas de dimensão 0,02-0,50 μm e com propriedades hidráulicas; apesar de extremamente reactivo aos álcalis, este material tem sido utilizado como adição para evitar a ocorrência de reacções álcali-agregado. Uma das explicações reside no facto das partículas muito finas provocarem uma reacção muito rápida, com consumo de álcalis, mesmo antes da colocação do betão (Wigum, 1995).

1.2.3. Agregados

1.2.3.1. Natureza

No domínio de conhecimento do betão, designa-se geralmente por agregado o material constituído por substâncias naturais, artificiais ou recicladas, britadas ou não, com partículas de tamanho e forma adequadas para o fabrico do betão. Consideram-se naturais os que provêm de rochas móveis ou maciças que foram submetidas apenas a tratamento por processos mecânicos; artificiais os que resultaram de transformações térmicas e mecânicas; e reciclados os que são reutilizados ou que resultam de demolição de obras. Os agregados correntes diferem dos leves e dos pesados porque os primeiros têm massa volúmica inferior a 2000 kg/m^3 e, os últimos, superior a 3000 kg/m^3 (EN 206-1, 2000).

Os agregados constituem pelo menos três quartos do volume do betão (Mielenz, 1946; Gillott, 1980; St John et al., 1998; Neville, 1999), pelo que as suas características condicionam as propriedades deste material de construção, no que respeita a resistência, durabilidade e desempenho estrutural.

A utilização dos agregados na composição do betão deve-se a razões de ordem económica, dado que os agregados são mais baratos do que o cimento, e a aspectos de ordem técnica como, por exemplo, a diminuição da retracção das pastas de cimento; não devem afectar negativamente as propriedades do betão e devem ser química e fisicamente estáveis durante a vida útil da estrutura.

Os agregados foram durante décadas designados em português por inertes, por se considerar que não reagiam quimicamente com o cimento. Actualmente sabe-se que tal não corresponde à verdade, sendo utilizada a designação mais próxima da anglo-saxónica, *aggregate*.

As propriedades físicas e químicas são controladas pela composição mineralógica, pelo grau de alteração e pela textura das partículas minerais e rochosas (Sims e Brown, 1998). As propriedades físicas mais importantes de um agregado incluem a porosidade, a resistência mecânica, a forma e textura das partículas, a distribuição granulométrica e as dimensões mínima e máxima das partículas (Rendell et al., 2002).

A composição do agregado, em termos da identidade mineralógica e petrológica das partículas que o constituem, é denominada "composição petrográfica". A petrografia, como descrição sistemática da composição e modo de formação das rochas, remonta ao século XIX. A sua aplicação ao estudo dos agregados teve início em 1935. Na década de 1940, Rhoades e Mielenz, 1946, debruçaram-se sobre a importância e aplicação da petrografia ao estudo dos agregados para betão. Defendiam, já na época, que a

petrografia proporcionava informação rápida sobre a qualidade dos agregados, permitia identificar substâncias nocivas e comparar materiais novos com outros dos quais existia experiência em obra, ou seja, podia ser útil na prospecção de novos agregados e no controlo de depósitos em exploração.

O exame petrográfico dos agregados, utilizado há várias décadas em muitos países, tem recebido aceitação crescente junto da indústria, sobretudo no que respeita a prevenção das reacções internas do betão. A análise petrográfica permite estudar as características principais dos agregados, ou seja, a natureza e propriedades das rochas e minerais constituintes, prever, dentro do possível, o desempenho e identificar a presença de impurezas e constituintes indesejáveis ou prejudiciais (Power e Hammersley, 1978; Sims e Brown, 1998; Smith e Collis, 2001; Grattan-Bellew, 2001; Jensen e Sibbick, 2001). É, por isso, de grande interesse em fase de confecção, quando a obra ainda não existe e se pretende conhecer os materiais a aplicar, ou quando a obra existe e é necessário avaliar a reactividade potencial, total ou residual do betão (Silva e Rodrigues, 1993).

A classificação é dificultada nos casos em que é necessário fazer o estudo dos agregados em betões colocados em obra, uma vez que as partículas se encontram isoladas do seu contexto, por vezes têm origens diversas, e a caracterização é baseada apenas na mineralogia e textura das partículas.

Desde que teve início a aplicação da petrografia ao estudo dos agregados, têm surgido várias propostas de classificação, que pretendem caracterizar os materiais de acordo com a sua adequabilidade à utilização no betão.

A classificação dos agregados difere, no entanto, conforme o ponto de vista considerado. A forma mais simples refere-se exclusivamente à origem, podendo distinguir-se os agregados obtidos a partir da exploração de materiais granulares que existem em depósitos naturais, os agregados resultantes de britagem de rocha explorada em pedreira e os agregados artificiais (BS 812: Part 102, 1989), estes últimos com menor interesse do ponto de vista do geólogo. Nesta perspectiva, a distinção entre um agregado britado e uma areia natural é feita essencialmente com base na observação da forma das partículas e da uniformidade de composição.

Dentro do conjunto de materiais granulares, faz-se a classificação quanto à dimensão das partículas, o que permite distinguir os agregados finos, habitualmente designados areia, dos agregados grossos. A divisão é feita a partir de peneiração, e consideram-se agregados grossos os que ficam retidos no peneiro de 4 mm (RILEM AAR-1, 2003; NP EN 12620, 2004) ou no peneiro ASTM número 4, a que corresponde uma malha de 4,75

milímetros (Neville, 1999). Existem ainda os designados "finos", correspondentes ao material que passa no peneiro de 0,063 milímetros (NP EN 12620, 2004).

Em Mielenz, 1946, encontra-se uma primeira tentativa de classificação dos agregados quanto às suas características físicas e químicas, e é referido que a adequabilidade de um agregado é estabelecida quando é sabido que produziu betões satisfatórios em diversas condições ambientais. Com base no exame petrográfico, aquele investigador estabeleceu os critérios "bom", "satisfatório", "razoável" e "fraco", do ponto de vista físico, e "inócuo" e "nocivo" do ponto de vista químico.

Embora tenha havido tentativas para uma sistematização por grupos dos agregados, como por exemplo a que consta da BS 812: Part 1, 1975 (Quadro I.4), as classificações actuais em petrografia do betão baseiam-se na divisão tradicional quanto à origem em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, apresentando uma listagem de termos petrográficos simples, aplicáveis à maior parte dos tipos de rocha usados como agregados.

Destacam-se as normas internacionais e nacionais ASTM C 294-98, 2002; BS 812: Part 102, 1989; NP EN 932-3, 2000, e Especificação LNEC E 415, 1993. A recomendação comum é que a classificação do agregado contenha três elementos essenciais: a descrição do tipo de agregado; a descrição das características físicas; a classificação petrológica (Smith e Collis, 2001).

A descrição de uma amostra de rocha deve contemplar informação acerca da granulometria dos constituintes principais, textura, anisotropia, cor, composição mineralógica e respectivas proporções aproximadas e estado de alteração. Pode ainda incluir comentários acerca da presença de constituintes eventualmente preocupantes em circunstâncias particulares (NP EN 932-3, 2000).

A descrição de uma amostra de agregado granular, constituída por partículas minerais ou por fragmentos de rocha, é executada para cada fracção granulométrica, incluindo uma breve referência à forma das partículas e rugosidade da superfície, para além da identificação petrográfica, baseada na observação de um número representativo de partículas.

A simples designação petrológica de uma rocha tem-se mostrado insatisfatória quando é necessário classificá-la, em termos de reactividade, em inócua, potencialmente reactiva ou reactiva, dado que a experiência tem mostrado a existência de uma forte condicionante regional e local, e que um mesmo tipo de rocha tem classificação diferente em países diversos. O exame petrográfico pormenorizado, com a descrição exaustiva da

litologia e textura, é, por esta razão, essencial, como complemento da designação (Wigum, 1995).

Quadro I.4 - Classificação de agregados em grupos (BS 812: Part 1, 1975).

1. Grupo de agregados artificiais	**5. Grupo do granito**	**9. Grupo do pórfiro**
tijolo britado	gnaisse	aplito
escórias	granito	dacito
bauxite calcinada	granodiorito	felsito
agregados sintéticos	granulito	granófiro
	pegmatito	queratófiro
2. Grupo do basalto	quartzo-diorito	microgranito
andesito	sienito	pórfiro
basalto		quartzo-porfirítico
pórfiro basáltico	**6. Grupo arenítico** (incluindo	riólito
diabase	rochas vulcânicas	traquito
doleritos de todos os tipos,	fragmentadas)	
incluindo teralito e techenito	arcose	**10. Grupo do quartzito**
epidiorito	grauvaque	quartzito sedimentar
lamprófiro	arenito com grãos angulosos	arenitos quártzicos
quartzo-dolerito	arenito	quartzito recristalizado
espilito	tufo	
		11. Grupo do xisto
3. Grupo da sílica criptocristalina	**7. Grupo da corneana**	filito
cherte	todos os tipos de rochas de	xisto
sílica criptocristalina	metamorfismo de contacto,	argilito
	excepto mármore	todas as rochas
4. Grupo do gabro		intensamente cisalhadas
diorito básico	**8. Grupo do calcário**	
gnaisse básico	dolomito	
gabro	calcário	
rocha de horneblenda	mármore	
norito		
peridotito		
picrito		
serpentinito		

A classificação petrográfica de um material não corresponde directamente à sua qualidade como agregado para o fabrico do betão, embora alguns minerais e tipos de rochas sejam previsivelmente menos adequados do que outros. A atribuição de uma classificação e a previsão do comportamento de um agregado são processos complexos, pelo que a forma mais correcta de conhecer a adequabilidade para o fabrico do betão deve ser baseada no conhecimento do desempenho em obra (Neville, 1999). Para os novos materiais não existe o conhecimento adquirido relativamente aos materiais já

explorados. A sua avaliação deve ser fundamentada na experiência do petrógrafo e na sua comparação com materiais idênticos.

1.2.3.2. Distribuição da dimensão das partículas

Designa-se por granulometria a distribuição, expressa em percentagem, da massa das partículas que passam num conjunto de peneiros de malha especificada (NP EN 12620, 2004). Para que o espaço entre as partículas de agregado seja minimizado após compactação do betão, é necessário que exista uma distribuição relativamente contínua das dimensões das partículas, o que é, em geral, conseguido através da mistura de rocha britada, de maiores dimensões (agregado grosso), com materiais de granulometria fina usualmente naturais, podendo também ser britados (areia). A dimensão máxima do agregado é um elemento importante do qual depende o custo do betão. A dosagem de cimento e o custo de preparação do agregado decrescem com o aumento da dimensão máxima das partículas, até um certo valor (Nunes e Machado, 1961), mas aumenta a energia necessária à compactação do betão.

A utilização de agregados de grande diâmetro, por exemplo 75 a 150 milímetros, é pouco frequente e limitada a obras maciças, nas quais é importante minimizar o teor em cimento e a geração de calor (Sims e Brown, 1998), como é o caso das barragens. A granulometria do agregado influencia a trabalhabilidade, a resistência, a possibilidade de atingir uma densidade satisfatória por compactação e a economia do betão (French, 1991), já que condiciona a área superficial das partículas, a quantidade de água necessária para molhar todas as partículas sólidas, o volume relativo ocupado pelo agregado e a tendência para exsudação do betão, ou seja, o processo de diferenciação pelo qual a água da mistura tende a subir e a concentrar-se na superfície do betão recentemente colocado (Neville, 1999).

A presença de partículas de argila leva ao aumento da quantidade de água necessária para uma dada trabalhabilidade e pode afectar a ligação entre os agregados e a pasta de cimento (Sims e Brown, 1998), sobretudo quando estes finos se encontram sobre a superfície das partículas mais grossas.

No caso particular das barragens, em que são grandes os volumes a betonar, e, em consequência, o volume de cada amassadura, o betão é fabricado com agregados de dimensão superior à encontrada noutro tipo de estruturas. As curvas granulométricas incluem, normalmente, agregados com dimensão máxima de 150 milímetros (Ramos, 2001).

1.2.3.3. Forma das partículas

A forma das partículas de agregado condiciona a trabalhabilidade e a resistência do betão. É descrita com base no arredondamento e na esfericidade, parâmetros utilizados na caracterização das rochas sedimentares clásticas (St John et al., 1998) (Figura I.4).

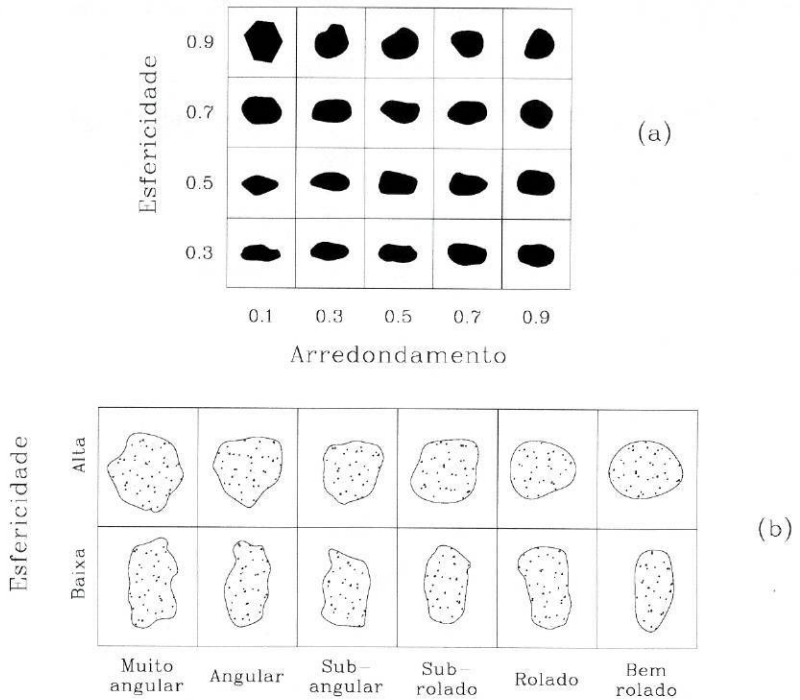


Figura I.4 – Avaliação visual da forma das partículas: (a) A partir da medição da esfericidade e do arredondamento; (b) Baseado em observações morfológicas (Krumbein e Sloss, 1966; Powers, 1953).

O arredondamento é uma medida da angularidade relativa dos bordos de uma partícula e é definido como a razão entre o raio médio das arestas e o raio do círculo máximo inscrito na partícula. Está relacionado com a origem das partículas – britadas ou naturais – e depende da resistência à abrasão da rocha. As partículas britadas são, em geral, caracterizadas por formas angulosas, embora a forma dependa também do tipo de moinho utilizado no processo de britagem (Neville, 1999).

O arredondamento afecta a ligação entre o cimento e o agregado, a possibilidade de desenvolvimento de fissuras na interface e a quantidade de água necessária, devido ao aumento da superfície das partículas.

A esfericidade é uma função da razão da área superficial de uma partícula sobre o seu volume. Para avaliação da esfericidade, French, 1991, sugere a determinação da razão entre a maior e a menor dimensão da partícula. Os dados experimentais indicam que, quando a maior parte das partículas tem uma razão menor do que 3:1, a forma das partículas tem pouca influência na qualidade do betão. A resistência do betão é afectada

se mais de 50% das partículas tiverem uma relação de 5:1, o que pode provocar baixa compacidade e elevado índice de vazios, resultando em baixa resistência e menor durabilidade do betão.

Os aspectos relacionados com a esfericidade podem atribuir-se ao tipo de rocha; por exemplo, rochas com estratificação ou clivagens muito próximas tendem a originar partículas alongadas (St John et al., 1998). A designação das partículas quanto à forma é apresentada na norma BS 812: Part 102: 1989 (Quadro I.5).

Quadro I.5 – Classificação das partículas quanto à forma (BS 812: Part 102, 1989).

Classificação	Descrição
Rolada	A forma deve-se a atrito ou à acção da água.
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente trabalhado por atrito, com bordos arredondados.
Flocular	Partícula com uma dimensão significativamente mais pequena do que as outras duas dimensões.
Angular	Possui bordos bem definidos formados pela intersecção de faces aproximadamente planas.
Alongada	Partícula em que uma dimensão é significativamente maior do que as outras duas dimensões.
Flocular e alongada	Partícula que tem três dimensões significativamente diferentes, por exemplo, o comprimento consideravelmente superior à largura e a largura superior à espessura.

No trabalho de Rhoades e Mielenz, 1946, é referido que uma elevada proporção de partículas achatadas ou alongadas leva a menor trabalhabilidade e à necessidade de utilizar mais areia, cimento e água. Por outro lado, as partículas podem tomar uma orientação horizontal preferencial no betão, levando à acumulação de água nas interfaces inferiores, o que impede o desenvolvimento de uma boa ligação pasta de cimento-agregado. Este fenómeno verifica-se quando estão presentes micas, constituintes habituais de vários tipos de rochas, incluindo granitos, gnaisses e arenitos, que se apresentam em cristais lamelares.

As micas, quando constituem partículas individuais dos agregados finos, conduzem normalmente ao aumento de água de amassadura e reduzem a coesão da mistura, o que pode afectar negativamente a resistência final e a durabilidade do betão (Sims e Brown, 1998). Na tentativa de quantificar este efeito, Dewar, 1963, no estudo de uma areia

proveniente de granito, no Reino Unido, concluiu que a resistência à compressão de uma mistura típica de betão pode ser reduzida em 5% pela presença de 1% de moscovite no peso total do betão; e Fookes e Revie, 1982, estudaram agregados do Nepal e concluíram que a presença de mica (moscovite) afectava negativamente tanto a resistência como a quantidade de água da mistura.

O atrito entre as partículas, para uma dada dimensão e distribuição dos agregados, depende da forma das mesmas e da textura da superfície, com valores mais elevados de atrito para os agregados britados, que apresentam em geral partículas mais angulares, com maior rugosidade, resultando em maior área superficial, do que no caso de agregados naturais da mesma dimensão, que têm partículas mais roladas e lisas (Wigum, 1995).

Relativamente à textura da superfície das partículas de agregados granulares, a norma BS 812: Part 102, 1989, descreve seis classes, em função das características superficiais (Quadro I.6).

Quadro I.6 – Classificação das partículas quanto à textura superficial (BS 812: Part 102, 1989).

Textura da superfície	Características
Vítrea	Fractura concoidal (curva).
Lisa	Desgastada pela água ou lisa devido a fractura de rocha laminada ou de grão muito fino.
Granular	Fractura mostrando grãos rolados de tamanho mais ou menos uniforme.
Rugosa	Fractura de rochas de grão fino a médio, contendo constituintes cristalinos dificilmente visíveis.
Cristalina	Contendo constituintes cristalinos facilmente visíveis.
Em favo de mel	Com poros e cavidades visíveis.

1.2.3.4. Características físicas e mecânicas

As características do betão são condicionadas pelas propriedades físicas e mecânicas dos agregados, como a porosidade, o peso específico, o coeficiente de dilatação térmica e a resistência à compressão.

A porosidade de um agregado e a sua permeabilidade influenciam a ligação com a pasta de cimento, a resistência ao gelo e degelo, a estabilidade química e a resistência à abrasão do betão (Neville, 1999). A colocação de agregados porosos pode, no entanto,

ter uma influência benéfica por reduzir a expansão causada pelas reacções internas do betão, e, assim, cada agregado deve ser tratado individualmente e a experiência regional é fundamental (Sims e Brown, 1998). A porosidade está também relacionada com a retracção plástica do betão que, quando excessiva, pode conduzir a retracção excessiva e à ocorrência de danos.

No Quadro I.7 encontram-se valores médios de porosidade para algumas das rochas mais utilizadas como agregados para betão.

Quadro I.7 – Valores típicos da porosidade de algumas rochas comuns (Farmer, 1968).

Rocha	Porosidade (%)
Basalto	0,1 - 2,0
Calcário	5,0 – 20,0
Mármore	0,3 – 2,0
Quartzito	0,1 – 0,5
Granito	0,5 – 1,5

A massa volúmica aparente de um agregado depende da massa volúmica dos minerais que o compõem e do teor de vazios. A maior parte dos agregados naturais têm massa volúmica entre 2600 e 2700 kg/m^3, para rochas não alteradas, o que nem sempre se verifica nos agregados para betão. Este parâmetro não é uma medida directa da qualidade do agregado, mas é utilizado no cálculo das quantidades de agregado a aplicar no betão (Quadro I.8).

Quadro I.8 – Valores de massa volúmica para as rochas mais comuns (Rocha, 1981).

Rocha	Massa volúmica (kg/m^3)
Basalto	2800 – 2900
Calcário	2200 – 2600
Mármore	2600 – 2700
Quartzito	2600 – 2700
Granito	2600 – 2700

A importância do coeficiente de dilatação térmica deve-se ao facto de os valores característicos das rochas mais vulgares serem diferentes daqueles que se encontram no cimento. Este facto pode conduzir a rotura de ligações entre os dois elementos, em casos de grande variação de temperatura (Coutinho, 1988) ou exposição a temperaturas muito baixas ou muito elevadas. Embora o coeficiente de dilatação térmica da pasta de cimento dependa da relação água/cimento, varia em geral entre 11 e 20x10^{-6}/º C (Neville, 1999).

As rochas mais vulgares apresentam um coeficiente de dilatação térmica muito variável, geralmente relacionado com o teor em sílica, mas raramente superior a $12x10^{-6}/^{o}$ C (Quadro I.9).

Quadro I.9 – Valores do coeficiente de dilatação térmica linear para vários tipos de rochas (Rhoades e Mielenz, 1946; * Coutinho, 1988).

Rocha	Coeficiente de dilatação térmica ($10^{-6}/^{o}$ C)
Basalto	3,6 a 9,7
Calcário	0,9 a 12,2
Mármore	1,1 a 16,0
Quartzito*	7,4 a 13,1
Granito	1,8 a 11,9

Uma das características mais importantes no que respeita às propriedades físicas e mecânicas do betão é a resistência à compressão das rochas utilizadas como agregado, a qual depende da mineralogia, textura, geoquímica e grau de alteração das rochas (Moore e Gribble, 1980), assim como da sua granulometria.

A resistência à compressão simples e o valor do módulo de elasticidade têm sido dois dos parâmetros mais utilizados na classificação das rochas e dos maciços rochosos, do ponto de vista da geologia de engenharia.

À medida que cresce a dosagem do cimento de um betão, a sua tensão de rotura tende para um valor constante, que depende da tensão de rotura do cimento. Como normalmente a tensão de rotura das rochas utilizadas como agregado é superior a 60 ou 70 MPa, a resistência do betão depende apenas da resistência do cimento. Apenas no caso de se utilizarem rochas com tensão de rotura inferior a cerca de duas vezes a da pasta de cimento, a resistência do betão depende da resistência do agregado (Coutinho, 1988). No Quadro I.10 encontram-se os valores da resistência à compressão uniaxial das rochas mais utilizadas.

1.2.4. Interface pasta de cimento-agregado

A interface pasta de cimento-agregado apresenta uma microestrutura diferente daquela que se encontra na pasta de cimento (Neville, 1999). A aderência entre as partículas de agregado e o cimento é condicionada, como referido anteriormente, pela forma das partículas, rugosidade, porosidade do agregado e pela existência de partículas soltas nessa interface, principalmente partículas de argila (Rhoades e Mielenz, 1946; Coutinho, 1988). É comum ocorrerem microfissuras ao longo da interface pasta de

cimento-agregado (French, 1991), e parece existir uma relação entre a resistência do betão e a resistência desta ligação.

Quadro I.10 – Resistência à compressão uniaxial das rochas habitualmente utilizadas como agregado (*Rocha, 1981; Neville, 1999).

Rocha	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
Basalto*	216
Calcário	159
Mármore	117
Quartzito	252
Granito	181

A resistência da interface é inferior tanto à da pasta de cimento como à do agregado, pelo que representa uma zona de fraqueza no betão (Taylor, 1997). Esta ligação resulta da combinação da inter-relação mecânica dos produtos de hidratação do cimento com o agregado e das reacções químicas entre os dois componentes (Struble et al., 1980). É uma zona em que existe uma maior concentração de tensões, uma vez que se encontram em contacto dois meios de características físicas diferentes no que respeita a deformabilidade e dilatação térmica. É também nesta zona que existe maior porosidade do betão, dado que, durante a mistura, as partículas de cimento secas têm mais dificuldade em se acomodar junto das partículas de agregado de maiores dimensões (Neville, 1999).

Existem vários modelos relativos à zona de transição pasta de cimento-agregado (Breton et al., 1993), em que são discutidas a distribuição e a arrumação dos materiais que se formam no contacto. Nesta interface, de 0 a 15 μm de espessura, formam-se essencialmente hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$], silicatos de cálcio hidratados e etringite, sendo a quantidade de hidróxido de cálcio tanto maior quanto menor a dimensão das partículas de agregado (French, 1991).

Capítulo 2. CAUSAS DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO

2.1. Generalidades

Quando uma estrutura em betão é construída, espera-se que mantenha a resistência e a funcionalidade durante a sua vida útil. A durabilidade é uma medida da resistência de uma estrutura de betão às condições físicas e químicas a que é exposta, e pode ser considerada como a capacidade de resistir à deterioração ambiental (Rendell et al., 2002). Pode ainda ser entendida como o intervalo de tempo no qual as diferentes propriedades de um material se deterioram até um limite específico considerado no projecto.

Os insucessos ocorridos em estruturas de betão armado devem-se essencialmente a erros de construção (49%), concepção (40%), deficiente conservação (7%) e materiais (4%), estando incluída na concepção a composição do betão (Proença, 1995).

A deterioração pode ter origem em factores internos ou externos e resulta em geral da acção paralela de processos físicos, químicos e biológicos (Gregerová e Pospíšil, 2003), podendo raramente ser atribuída a uma única causa (Neville, 1999). Entre as causas mais frequentes da deterioração encontram-se as seguintes:

- Impacte, abrasão, erosão e cavitação;
- Acção gelo-degelo;
- Acção da temperatura;
- Ataques químicos ao betão (sulfatos, álcali-agregado, ácidos, águas puras, etc.);
- Corrosão das armaduras (carbonatação, penetração de cloretos, etc.).

A deterioração do betão nas estruturas é muito afectada pelo transporte de gases e líquidos, com ou sem substâncias em solução ou suspensão. A maior ou menor facilidade deste transporte depende basicamente da estrutura porosa do betão e das condições ambientais que actuam na sua superfície.

Em função das classes de exposição ambiental, e para atender às exigências de durabilidade, é necessário definir a composição do betão no que respeita a: razão água/cimento, dosagem do cimento, tipo de cimento, classes de resistência e permeabilidade (Sampaio, 1995).

Relativamente às causas de deterioração atrás referidas, serão abordadas aquelas em que a petrografia pode ser utilizada como técnica essencial de identificação e em especial as que envolvem os agregados.

Assim, a seguir, serão analisados especificamente os factores de deterioração do betão relativos ao ataque por sulfatos e às reacções álcali-agregado, por serem os mais importantes nos dois casos em estudo.

2.2. Ataque por sulfatos

O ataque por sulfatos foi referido pela primeira vez por Candlot, em 1887, em argamassas dos fortes de Paris construídos sobre terrenos gipsíferos (Divet, 2001a). É um fenómeno que provoca uma fissuração associada à expansão por formação de produtos de reacção no betão, de que se destaca a etringite (sulfo-aluminato de cálcio hidratado – $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) e, por vezes, a taumasite ($CaSiO_3.CaCO_3.CaSO_4.15H_2O$) e o gesso ($CaSO_4.2H_2O$).

A literatura sobre este assunto é complexa e confusa e os mecanismos envolvidos são ainda matéria de controvérsia (St John et al., 1998). O ataque por sulfatos resulta essencialmente da reacção química entre os aluminatos do betão (aluminatos de cálcio hidratados do cimento ou alumina reactiva dos agregados) e os iões sulfato, que podem ter diferentes origens, sendo os produtos de reacção essencialmente a etringite e algum gesso. A formação de etringite dá-se com aumento de volume, podendo causar expansão e fissuração do betão e conduzir à perda de adesão e resistência (Ouyang et al., 1988; Mehta, 1992; Collepardi, 2003). O ataque por sulfatos pode ser dividido em dois grupos, em função da origem do ião sulfato:

- Ataque por sulfatos de origem interna;
- Ataque por sulfatos de origem externa.

No primeiro caso, o sulfato tem origem no próprio betão, a partir dos agregados ou da pasta de cimento.

O ataque por sulfatos de origem externa ocorre quando o sulfato penetra no betão proveniente do solo, das águas subterrâneas ou de escorrência e da poluição.

A reacção apenas se processa quando existe humidade (Fu et al., 1997; Taylor et al., 2001), pelo que, para que a deterioração por ataque por sulfatos seja prevenida ou reduzida, o betão deve ter baixa permeabilidade (Mehta, 1992; St John et al., 1998; Skalny et al., 2002; Collepardi, 2003).

A NP EN 197-1, 2001, limita os sulfatos do cimento, expressos em teor em SO_3, a 3,5 e 4,0% da massa de cimento, conforme o tipo e a classe de resistência do mesmo.

2.2.1. Ataque por sulfatos de origem interna

O ataque por sulfatos de origem interna pode resultar de diferentes processos (Fu et al., 1997; Taylor, 1997; Jakobsen e Thaulow, 2000; Divet, 2001a e 2001b) de que se destacam:

- A ocorrência de elevada temperatura de cura do betão fresco, com a dissolução e reprecipitação da etringite formada durante a hidratação normal do cimento;
- A existência de sulfato no agregado, por exemplo, por oxidação da pirite;
- O excesso de gesso na pasta de cimento;
- A alternância de temperaturas elevadas e baixas, como no caso de gelo/degelo.

Relativamente ao ataque por sulfatos de origem interna, é de destacar:

- A formação retardada ou tardia de etringite (*Delayed Ettringite Formation* ou DEF), ou seja, a formação de etringite, algum tempo após o endurecimento, a partir dos produtos de reacção da etringite primária previamente decomposta. A etringite primária forma-se durante a fase de hidratação da pasta de cimento (Johansen et al., 1993; Wigum, 1995) por dissolução do aluminato tricálcico e do gesso e não é nociva para o betão (Divet, 2001a; Collepardi, 2003). A formação diferida de etringite, a etringite tardia, ocorre a longo prazo, em condições específicas relacionadas com o aquecimento excessivo como: a cura com vapor, a betonagem de uma grande massa em estruturas de grande secção, ou a betonagem em época estival. A etringite tardia pode ser expansiva e causar fissuração da pasta de cimento (Wigum, 1995) pela formação de cristais micrométricos na pasta (Taylor et al., 2001). O processo é, no entanto, ainda controverso (Divet, 2001a; Sahu et al., 1998).

- A formação de etringite a partir do processo de alteração de sulfuretos e/ou de sulfatos do betão. A contribuição para a formação de produtos nocivos, como a etringite, por parte dos agregados pode resultar da existência de pirite de dimensões compreendidas entre 1 e 10 μm, que é mais facilmente oxidável (Deloye, 1989). A reacção de oxidação da pirite é a seguinte (Deloye, 1989):

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$$

$$12FeSO_4 + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe_2(SO_4)_3 + 4Fe(OH)_3$$

Os sulfatos não são estáveis para as condições de pH do betão, dando-se a formação de ácido sulfúrico que ataca a portlandite, formando gesso:

$$Fe_2(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3H_2SO_4$$

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 2H_2O$$

Donde resulta a reacção global:

$$2FeS_2 + 15/2\ O_2 + 4Ca(OH)_2 + 7H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 4CaSO_4.2H_2O$$

Por sua vez, o gesso combina-se com os aluminatos para formar etringite secundária, expansiva:

$$9CaSO_4.2H_2O + 9Ca(OH)_2 + 6SiO_2.3Al_2O_3K_2O.3H_2O + 67H_2O \rightarrow$$
$$3(3CaSO_4.3CaOAl_2O_3.32H_2O) + 6SiO_2.K_2O.2H_2O$$

A reacção total é a seguinte:

$$3FeS_2 + 9O_2 + 12Ca(OH)_2 + 2/3[6SiO_23AlO_3K_2O.3H_2O] + 56{,}5H_2O \rightarrow$$
$$3Fe(OH)_3 + 2[3CaSO_4.3CaOAl_2O_3.32H_2O] + 4SiO_22/3K_2O.2H_2O$$

A formação de etringite tardia é acompanhada pela libertação de silício e de potássio, que podem dar origem a gel silico-calco-potássico igualmente expansivo (Deloye, 1989). A conjugação destes dois factos pode ser catastrófica, uma vez que coloca em tracção uma pasta que perdeu parte da sua resistência, por o cálcio necessário à reacção provir da portlandite.

2.2.2. Ataque por sulfatos de origem externa

O ataque por sulfatos de origem externa é um mecanismo em que os iões sulfato de origem externa atacam os componentes da pasta de cimento (Jakobsen e Thaulow, 2000), formando-se gesso e etringite.

O sulfato de origem externa pode ter origem natural, na água do mar e da chuva (Jakobsen e Thaulow, 2000), de solos e rochas ricas em gesso, ou provir de poluição doméstica e industrial e fertilizantes (Divet, 2001a; Skalny et al., 2002). O ataque caracteriza-se pela ocorrência de uma fissuração de distribuição aleatória e abundância de cristais de etringite e, por vezes, de gesso, próximo da superfície do betão (Figura I.5).

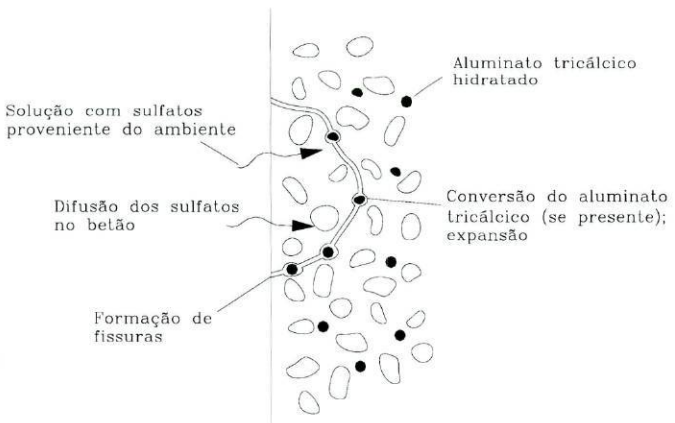


Figura I.5 – Fissuração macroscópica típica do ataque por sulfatos de origem externa (CEB, 1992).

2.2.3. Características microscópicas do ataque por sulfatos

O ataque por sulfatos apresenta manifestações ao microscópio polarizante que permitem, em geral, distinguir o ataque de origem interna daquele que é atribuível ao acesso de sulfatos a partir do exterior (Quadro I.11). A existência de fissuração paralela à superfície e a ocorrência de gesso e etringite são algumas das características que permitem identificar o fenómeno (St John et al., 1998).

Quadro I.11 – Características utilizadas em exame microscópico para distinguir ataque por sulfatos de origem interna e externa (Jakobsen e Thaulow, 2000).

Características típicas	Ataque por sulfatos de origem interna	Ataque por sulfatos de origem externa
Fissuras	Em torno dos agregados. Abertura proporcional à dimensão das partículas.	Fissuras paralelas à superfície. Pode ocorrer gesso.
Gesso	Ausente.	Pode ocorrer em poros, fissuras e substituindo a pasta.
Etringite	Pode estar presente em poros e fissuras.	Pode ocorrer em poros e fissuras.
Taumasite	Ausente.	Pode ocorrer raramente em poros, fissuras e substituindo a pasta.
Brucite	Ausente.	Pode ocorrer raramente em poros e fissuras.
Existência de duas tonalidades	Pode ocorrer.	Pode ou não ocorrer.
Depleção de $Ca(OH)_2$	Ausente.	Pode ocorrer.
Descalcificação de C-S-H*	Ausente.	Pode ocorrer.

* C = CaO; S = SiO_2; H = H_2O.

A etringite pode apresentar hábitos diferentes. É frequente em forma de plaquetas e acículos ou comprimida no contacto entre a pasta e as partículas de agregado (Divet, 2001a). A etringite adapta a sua cristalização ao espaço disponível, pelo que a existência deste mineral livre nas interfaces pasta-agregado pode indicar descolamento preexistente. As análises semiquantitativas ao microscópio electrónico de varrimento permitem verificar que a composição da etringite é constante, excepto quando existe simultaneamente taumasite. Independentemente da idade das obras estudadas, Louarn e

Larive, 1993, verificaram que os produtos cristalizados são mais raros do que os amorfos, sendo os cristalizados apenas 25% do total.

Para além de existir nas interfaces, a etringite pode encontrar-se no interior das partículas de agregado, disseminada na pasta de cimento, em poros e em fissuras do betão (Larive, 1990).

2.2.4. Relação entre ataque por sulfatos, reacção álcali-sílica e expansão do betão

O ataque por sulfatos raramente é o único fenómeno responsável pela deterioração do betão (Mehta, 1992; Taylor et al., 2001), ocorrendo com frequência etringite e gel sílico-alcalino em simultâneo, quando existem agregados reactivos (Pettifer e Nixon, 1980; Johansen et al., 1993; Louarn e Larive, 1993; Lawrence, 1995; Shayan e Ivanusec, 1996; Divet, 2001a).

Não reúne ainda consenso a explicação do fenómeno que origina a expansão por ataque por sulfatos, encontrando-se referências a dois processos possíveis: a expansão uniforme da pasta de cimento e a pressão por crescimento dos cristais de etringite (Sahu et al., 1998). A primeira hipótese poderá explicar a abertura de fissuras nas interfaces pasta-agregado, com cristalização posterior da etringite no espaço assim formado. No betão afectado por ataque por sulfatos de origem interna gera-se um padrão de fissuração típico, em que a pasta expande e tende a separar-se das partículas de agregado. Quando existem condições para o betão expandir em todas as direcções, as fissuras rodeiam totalmente as partículas dos agregados (Figura I.6).

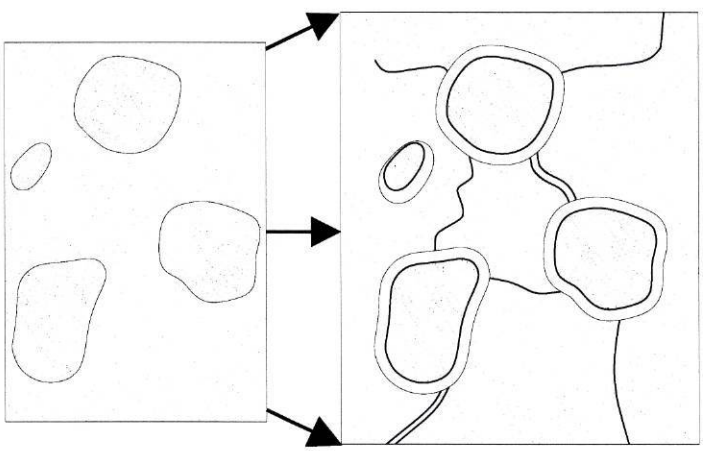


Figura I.6 – Representação esquemática do mecanismo de expansão de uma barra de argamassa devida à ocorrência de DEF. A expansão não uniforme da pasta dá origem a fissuras na pasta e na interface com as partículas de agregado. Formam-se cristais de etringite e portlandite nas fissuras, que não contribuem significativamente para a expansão (Taylor et al., 2001).

Segundo alguns autores (Johansen et al., 1993; Lawrence, 1995; Sahu et al., 1998; Jakobsen e Thaulow, 2000; Hobbs, 2001), existe proporcionalidade entre a abertura das fissuras e o diâmetro das partículas, assumindo que a pasta expande uniforme e isotropicamente. Esta opinião não reúne, contudo, unanimidade, já que outros investigadores contestam esta afirmação. De facto, verifica-se que a espessura destas orlas pode variar em volta de um mesmo agregado, a orla pode ser apenas parcial ou rodear algumas partículas e não outras, ou fazer parte de uma rede de fissuras que atravessa também a pasta de cimento (Diamond, 1996). Assim, a expansão que se verifica no betão que sofreu ataque por sulfatos pode também resultar da cristalização da etringite (Mehta, 1992), cujos cristais crescem numa direcção perpendicular à interface sólido-líquido.

Procurando estabelecer uma relação entre a ocorrência de ataque por sulfatos e reacções álcali-sílica, Shayan e Quick, 1991/92, realizaram ensaios em laboratório com agregados de diferente reactividade e o mesmo cimento. Concluíram que os produtos da reacção álcali-sílica se formam mais cedo do que a etringite secundária, que ocupa as fissuras originadas pelas reacções álcali-sílica, podendo contribuir para a expansão.

A existência dos dois fenómenos levanta dúvidas acerca de qual ocorre em primeiro lugar e aquele que causa danos no betão. A fissuração das partículas de agregado e a sua extensão para a pasta de cimento são características das reacções álcali-sílica, enquanto a formação de fissuras em volta das partículas de agregado é típica de fenómenos relativos ao ataque por sulfatos.

Na perspectiva de alguns investigadores, a etringite preenche total ou parcialmente os poros e fissuras e é considerada não expansiva, uma vez que é uma consequência da expansão verificada e não uma causa. Por outro lado, a expansão e fissuração podem resultar do crescimento dos cristais em fissuras e poros, hipótese defendida por Diamond, 1996, e para a qual Hobbs, 2001, refere um valor para a expansão da pasta de cimento de cerca de 0,3%. Neste processo, é excluída a etringite depositada como revestimento parcial de poros e outros vazios.

2.3. Reacções álcali-agregado

As reacções álcali-agregado são reacções expansivas, nas quais intervêm os iões sódio e potássio presentes na solução intersticial do betão e alguns minerais dos agregados (St. John et al., 1998). Os hidróxidos alcalinos provêm essencialmente do

cimento portland, que tipicamente contém até 1% de álcalis. Por vezes os álcalis podem ainda ter origem em outros constituintes do betão (Sims e Brown, 1998), como será aprofundado mais tarde.

No estado actual do conhecimento, consideram-se três tipos de reacção álcali-agregado, dependendo da composição dos agregados presentes (Hobbs, 1988; Poole, 1992; ACI, 1998; St John et al., 1998):

- Reacções álcali-carbonato;
- Reacções álcali-sílica;
- Reacções álcali-silicato.

2.3.1. Reacções álcali-carbonato

As reacções álcali-carbonato ocorrem entre os álcalis e alguns tipos de calcário dolomítico argiloso por desdolomitização, ou seja, segundo um processo em que a dolomite dá origem a calcite e brucite. Neste processo não há formação de gel expansivo, mas existe expansão devido à absorção de iões hidróxilo pelos minerais de argila. As fissuras e a porosidade da rocha permitem a circulação de água com a consequente expansão da argila (Poole, 1992). Em resultado, dá-se o enfraquecimento da ligação entre o cimento e o agregado e surge microfissuração. Esta reacção tem, em comum com a reacção álcali-sílica, a influência do conteúdo em álcalis e a expansão anormal que origina *map cracking*. As duas reacções diferem sobretudo porque, neste caso, não há formação de gel e as adições são menos eficientes no controlo da reacção.

2.3.2. Reacção álcali-sílica

A reacção álcali-sílica é a mais estudada e mais frequentemente referida na literatura, razão pela qual será dado particular destaque em parágrafo que se segue. Trata-se de uma reacção química entre os hidróxidos alcalinos, libertados durante a hidratação do cimento portland, e formas de sílica reactiva presentes nos agregados. Este fenómeno é atribuído à maior solubilidade das formas de sílica amorfa, desordenada ou fracamente cristalina em soluções de elevado pH, formando-se um gel que absorve água e expande (Concrete Society, 1987; Sims e Brown, 1998), podendo gerar tensões suficientemente elevadas para originar fissuração das partículas de agregado e do betão e causar danos à estrutura (West, 1996).

2.3.3. Reacções álcali-silicato

As reacções álcali-silicato são muito menos frequentes do que as reacções álcali-sílica e diferem destas por a reacção se processar de forma mais lenta. Os minerais reactivos – sílica amorfa e quartzo deformado – estão, neste caso, disseminados (ICOLD, 1991) ou não ocorrem como sílica livre, mas como sílica combinada em filossilicatos. O processo envolve a expansão dos silicatos presentes nas rochas por absorção de água, podendo formar-se um gel expansivo, quando existem álcalis em excesso, ou um gel menos expansivo quando existe cálcio em excesso.

Esta reacção é, por vezes, considerada como uma forma mais complexa da reacção álcali-sílica (Sims e Brown, 1998). Segundo RILEM AAR-1, 2003, os agregados são agrupados em agregados siliciosos de reacção rápida e os de reacção lenta ou tardia, não existindo a designação de reacção álcali-silicato. A expansão, sob o efeito da solução alcalina, poderá estar relacionada com a formação de argilas expansivas, como a clorite proveniente da dissolução dos hidróxidos de ferro e de alumínio, a montmorilonite, a vermiculite ou a ilite (Stievenard-Gireaud, 1987). O produto da reacção é também um gel sílico-alcalino expansivo, capaz de circular na pasta de cimento adjacente, provocando fissuração e por vezes exsudação do gel para a superfície. Quando o gel contém excesso de cálcio, torna-se mais viscoso e menos expansivo.

Atendendo às características que existem em comum entre as reacções álcali-sílica e álcali-silicato, e uma vez que neste trabalho foram estudadas rochas siliciosas consideradas de reacção lenta ou retardada, serão aqui abordadas em pormenor as reacções designadas por álcali-sílica, tomando em consideração os minerais de sílica e os minerais silicatados que podem eventualmente reagir com os álcalis.

Neste contexto, considerando o procedimento mais lógico de uma aplicação prática, será inicialmente apresentada a problemática da reacção do ponto de vista das condições necessárias para a sua ocorrência, abordando em seguida os indícios que conduzem ao diagnóstico da existência de reacções álcali-sílica numa obra de betão.

Capítulo 3. AS REACÇÕES ÁLCALI-SÍLICA

3.1. Condições de ocorrência

A reacção álcali-sílica resulta do ataque dos iões sódio e potássio e dos iões hidróxilo a algumas variedades de sílica. Para a ocorrência de reacções álcali-sílica é necessário que estejam reunidas simultaneamente as seguintes condições (Concrete Society, 1987; Sims, 1987; Stievenard-Gireaud, 1987; Hobbs, 1988; Berra e Bertacchi, 1991; Poole, 1992; Sims e Brown, 1998; ACI, 1998; St John et al., 1998; Michel et al., 2003):

- Existência de humidade suficiente;
- Ocorrência de um elevado teor em álcalis (sódio e potássio);
- Presença de sílica solúvel, dita reactiva.

Se uma destas condições principais não for atingida, não haverá reacção álcali-agregado no betão (Nixon et al., 2004). Devem ainda ser considerados outros factores relativos ao betão, como o tipo e dosagem de cimento, a relação água/cimento, a eventual existência de adjuvantes e adições, a quantidade e granulometria dos agregados e as condições de exposição e a temperatura. No entanto, todas as especificações destinadas a evitar a ocorrência de reacções álcali-sílica são baseadas na exclusão de, pelo menos, uma das três condições principais referidas (CR 1901, 1995).

3.1.1. Humidade

A humidade é um dos factores críticos, e para que ocorra reacção é necessário que a humidade relativa seja superior a um valor que, dependendo dos autores, se encontra entre 75 e 90% (Concrete Society, 1987; BCA, 1992) (Figura I.7). A água necessária para que as reacções se processem pode ter origem na água livre interior do betão, mas também pode ter uma contribuição importante do exterior (LCPC, 1994).

A água desempenha um papel duplo nas reacções álcali-sílica, uma vez que transporta os catiões alcalinos e os iões OH^- e é absorvida pelo gel que pode, em alguns casos, expandir e exercer pressão sobre a pasta de cimento endurecida e os agregados, originando fissuras no betão (Poole, 1992; Berra e Bertacchi, 1991). A maior parte dos betões fica exposta à humidade. Se ocorrer formação de gel em quantidade suficiente, um aumento de humidade pode conduzir a expansão e fissuração. As estruturas mais vulneráveis são: as expostas a ambientes quentes e húmidos, as submetidas a ciclos de

molhagem e secagem (Besem e Demars, 1989) e as superfícies do betão em contacto com o solo saturado (ACI, 1998).

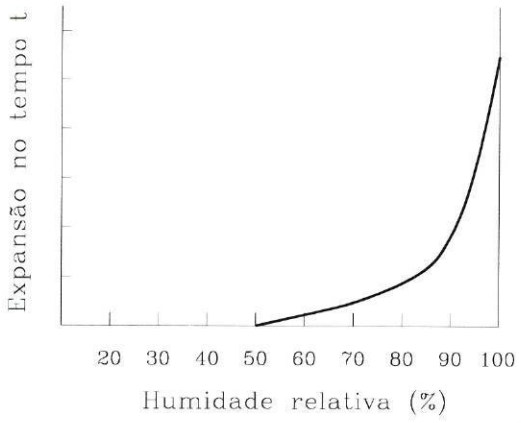


Figura I.7 – Efeito da humidade relativa sobre a expansão do betão devido a reacções álcali-sílica (Poole, 1992).

Em relação às reacções álcali-sílica, o documento da Concrete Society, 1987, classifica as estruturas de retenção de água como particularmente vulneráveis, dado que o betão se encontra frequentemente saturado ou em áreas de elevada humidade. O mesmo é referido no relatório do LCPC, 1994, que divide as estruturas em três classes em função do risco de ocorrência de reacções álcali-sílica, sendo as barragens classificadas na categoria em que o aparecimento de reacções é inadmissível.

Nixon et al., 2004, com vista à definição do nível de precaução a considerar, referem que as barragens estão incluídas no conjunto de estruturas altamente críticas ou de longa duração, nas quais o risco de deterioração por reacções álcali-agregado é considerado inaceitável (Quadro I.12). Esta classificação é atribuída atendendo à natureza da obra, sua função e consequências da deterioração na segurança da estrutura.

As acções químicas e físicas a que o betão está sujeito, de que resultam efeitos não previstos no projecto, estão relacionadas com as condições ambientais, das quais são consideradas cinco classes de exposição: ambiente seco; ambiente húmido; ambiente húmido com gelo e produtos descongelantes; ambiente marítimo e ambiente agressivo.

Relativamente ao risco ambiental, no documento LCPC, 1994, são indicadas quatro classes de exposição. As barragens poderão inserir-se na classe em que a higrometria é superior a 80% ou a estrutura está em contacto com a água. Nixon et al., 2004, referem uma divisão entre: estruturas protegidas de humidade exterior; expostas a humidade exterior; e estruturas expostas a humidade exterior e com factores agravantes (por exemplo, zonas de maré, gelo/degelo, etc.) (Quadro I.13).

Quadro I.12 – Classificação das estruturas quanto ao risco associado a deterioração (Nixon et al., 2004).

Categoria S1	Elementos não resistentes no interior de edifícios; Estruturas temporárias ou com curta vida útil; Elementos facilmente substituíveis; A maior parte dos edifícios correntes.
Categoria S2	A maior parte das estruturas de engenharia civil.
Categoria S3	Estruturas de longa duração ou altamente críticas nas quais o risco de deterioração por reacções álcali-sílica é considerado inadmissível, tais como: - Instalações nucleares; - Barragens; - Túneis; - Pontes ou viadutos excepcionalmente importantes; - Estruturas para retenção de materiais perigosos.

Quadro I.13 – Classes de exposição das estruturas ao ambiente (Nixon et al., 2004).

Classes ambientais	**Exposição do betão**
E1 Protegidas da humidade exterior	Betão no interior de edifícios; Betão exterior protegido da atmosfera, por exemplo, por revestimento.
E2 Expostas à humidade exterior	Betão interior em edifícios onde a humidade é elevada, por exemplo, lavandarias, tanques, piscinas; Betão exposto à atmosfera exterior ou a fundações não agressivas.
E3 Expostas à humidade exterior com factores agravantes	Betão interior ou exterior exposto a sais de degelo; Betão exposto à água do mar ou em zona de maré; Betão exposto a gelo/degelo quando húmido; Betão sujeito a temperaturas elevadas em período prolongado quando húmido.

As classificações encontradas na bibliografia são idênticas. O relatório da BCA, 1992, apresenta uma classificação simplificada quanto ao risco ambiental, admitindo que existe uma contribuição de origem exterior para a quantidade de água exigida para que as reacções se processem (Quadro I.14). Apresenta também exemplos de estruturas para cada categoria de risco ambiental considerada.

Quadro I.14 – Níveis de risco ambiental para que ocorram reacções álcali-sílica (BCA, 1992).

Risco ambiental	Condições de exposição	Exemplo
Baixo	Betão permanentemente protegido da humidade ou com humidade inferior a 85%.	Interior de edifícios.
Médio	Betão humedecido intermitentemente, com elevada humidade (acima de 85%) ou condensação.	Betão exterior protegido ou não exposto às condições atmosféricas.
Elevado	Betão frequentemente ou continuamente humedecido. Betão passível de penetração de cloreto de sódio.	Betão exterior exposto às condições ambientais. Pontes, estruturas marítimas e de retenção de água e betão das fundações.

3.1.2. Existência de álcalis

3.1.2.1. Álcalis no cimento

No betão, os álcalis provêm predominantemente do cimento (Poole, 1992). Os álcalis do cimento têm origem na matéria-prima utilizada no seu fabrico, principalmente calcário, marga, argila, xisto argiloso e ainda do combustível utilizado (carvão) e do sistema de recuperação de calor. Embora, do ponto de vista químico, os álcalis sejam os elementos que ocupam a primeira coluna da tabela periódica (lítio, sódio, potássio, rubídio, césio e frâncio), apenas o sódio e o potássio são denominados na química do cimento por álcalis.

No cimento portland os álcalis estão presentes principalmente sob a forma de sulfatos (Na_2SO_4 – tenardite, K_2SO_4 – arcanite, $(Na,K)_2SO_4$ – sulfato duplo de sódio e potássio e $K_2Ca_2(SO_4)_3$ – langbeinite de cálcio) (Concrete Society, 1987; Stievenard-Gireaud, 1987) e também de silicatos e aluminatos. No entanto, os álcalis podem também provir de outros constituintes e as condições de exposição podem facilitar o seu acesso. Como origem dos álcalis, destacam-se alguns minerais dos agregados, como os feldspatos, a ilite e as micas (Wigum, 1995) e as fontes externas, como o contacto com a água do mar, os químicos utilizados para acelerar o degelo ou a aplicação de água do mar na amassadura. A existência de uma elevada concentração de álcalis provoca o aumento de iões hidróxilo e a subida do pH do meio, facilitando a ocorrência de reacções álcali-sílica (ACI, 1998).

O conteúdo de álcalis do cimento portland é, por convenção, calculado a partir do óxido de sódio equivalente, determinado pela fórmula (Hobbs, 1988; Poole, 1992):

$$Na_2O_{equivalente} = Na_2O + 0{,}658\ (K_2O)$$

na qual o valor de 0,658 é obtido pela razão entre as massas dos dois óxidos. O pH de uma solução no betão em que o cimento tem baixo teor em álcalis varia entre 12,7 e 13,1, e no betão com elevado teor em álcalis entre 13,5 e 13,9 (Hobbs, 1988). Os óxidos de sódio e potássio (Na_2O e K_2O) constituem uma pequena percentagem da ordem de 0,3 a 1,2% da massa do cimento (Taylor, 1997).

Ocorre ataque aos agregados reactivos apenas nos casos em que existe elevada concentração de ião hidróxilo. É geralmente aceite, após o trabalho de Power e Steinour, 1955a, 1955b, e ASTM C 150-02a, 2003, que um conteúdo de $Na_2O_{equivalente}$ inferior a 0,60% no cimento poderá prevenir a ocorrência de reacções (Concrete Society, 1987; Bérubé et al., 2002). Prince e Perami, 1993, referem, no entanto, que a aplicação deste limite não é suficiente para evitar a ocorrência da reacção; e Stievenard-Gireaud, 1987, considera que pode ocorrer reacção mesmo para teores mais baixos de álcalis e recomenda que, sempre que sejam utilizados agregados reactivos, o cimento contenha entre 0,30 e 0,40% de $Na_2O_{equivalente}$ a fim de diminuir o risco de reacção.

O estabelecimento de um nível máximo de álcalis no cimento ignora, no entanto, o facto de que a alcalinidade do betão depende também do conteúdo de cimento na mistura. Quando as outras fontes são excluídas, o conteúdo em álcalis no betão é função do nível de álcalis no cimento e do conteúdo de cimento no betão. O conteúdo em álcalis no betão *(A)*, em massa por unidade de volume, é assim traduzido pela expressão:

$$A = C.a/100$$

em que *a* é o teor em álcalis do cimento, expresso em percentagem por massa, e *C* o conteúdo de cimento no betão, convencionalmente expresso em massa por unidade de volume (kg/m^3) (ICOLD, 1991; West, 1996). Deve, por isso, restringir-se a quantidade total de álcalis na mistura do betão. É sugerido o limite máximo de 3 quilogramas de $Na_2O_{equivalente}$ por metro cúbico de betão, excepto em estruturas vulneráveis. Neste limite estão contabilizados os álcalis do cimento, dos adjuvantes e adições, dos agregados e de outras fontes potenciais (Concrete Society, 1987; BRE Digest 330, 1991). Na Figura I.8 apresenta-se o gráfico que, segundo Oberholster, 1983, correlaciona o teor em álcalis no cimento e no betão, com a respectiva subdivisão de condições quanto à reactividade.

A quantidade de álcalis poderá, no entanto, não ser um critério determinante para o desenvolvimento de reacções álcali-sílica, mas o factor principal parece residir na solubilização do agregado sob o ataque dos iões OH^- (Prince e Perami, 1993).

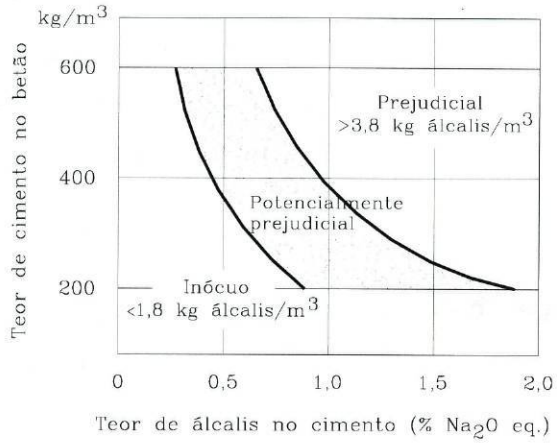


Figura I.8 – Relação entre o teor em álcalis no cimento e no betão (Oberholster, 1983).

3.1.2.2. Contribuição dos agregados para os álcalis

A maior parte das reacções álcali-agregado registadas em estruturas de betão em todo o mundo mostram um cimento com elevado teor em álcalis, ou seja, com mais de 1% de $Na_2O_{equivalente}$ (Wigum, 1995). No entanto, para além dos álcalis do cimento, existem vários trabalhos acerca da possível contribuição dos agregados, em especial de alguns minerais, para o teor total em álcalis no betão.

Van Aardt e Visser, 1977, para explicar este fenómeno, propõem a "teoria da solução" (*solution theory*), segundo a qual o $Ca(OH)_2$ reage com o feldspato dos agregados, libertando KOH e NaOH e/ou silicato de potássio ou sódio, sendo os últimos solúveis em água. Quando os álcalis atingem uma determinada concentração, o silicato de cálcio é substituído por silicatos de potássio ou sódio, concentrando-se o cálcio em volta e dentro do agregado. A partícula de agregado fica rodeada de um gel semilíquido que confere o aspecto envernizado e forma os halos escuros nas partículas de agregado, que se observam por vezes no betão. Aqueles autores concluíram que deve ser encarada com precaução a utilização de rochas feldspáticas que podem libertar álcalis, em especial as que contêm feldspatos alcalinos, como os granitos. Por outro lado, a formação de aluminatos de cálcio hidratados pode ser preocupante por serem fortemente reactivos para formar sulfo-aluminatos de cálcio hidratados, que podem causar expansão e danos ao betão, tendo sido encontrada etringite em fissuras de betão com este tipo de deterioração.

A problemática da eventual contribuição dos agregados para os álcalis do betão foi tratada, essencialmente, a partir da década de 1980, na sequência de alguns trabalhos

realizados principalmente no Canadá, país onde este estudo tem sido particularmente desenvolvido (Durand, 2000).

Assim, num estudo efectuado em betões de barragens no Canadá e mais tarde numa estrutura com agregados constituídos por calcário argiloso contendo ilite, Grattan-Bellew, 1994, verificou que o conteúdo de álcalis no betão era superior ao estimado para o cimento de origem, tendo concluído que teria havido uma contribuição do agregado para os álcalis da solução intersticial. As rochas potencialmente susceptíveis de troca iónica em solução com hidróxido de cálcio são as que contêm micas, minerais de argila, feldspatos e vidro vulcânico. Também Grattan-Bellew e Beaudoin, 1980, analisando o efeito da introdução de flogopite no cimento, concluíram que o potássio solúvel da flogopite aumentava o conteúdo em álcalis da solução intersticial, incrementando a velocidade de reacção com agregados reactivos. A mesma opinião é partilhada por: Stievenard-Gireaud, 1987, relativamente aos feldspatos e às micas presentes nos agregados e por Larive, 1990, que afirma que o consumo de álcalis na reacção álcali-agregado pode ser dez vezes superior ao fornecido pelo cimento. Le Roux, 1991, e Le Roux et al., 1999, explicam aquele fenómeno pela solubilização dos feldspatos, das micas e das argilas dos agregados, embora seja reconhecido que estes minerais não libertam facilmente o sódio e o potássio da sua rede cristalina. Idêntico ponto de vista consta do relatório da BCA, 1992, referindo que os feldspatos intensamente alterados podem ser considerados potenciais fornecedores de álcalis.

Com o objectivo de estudar a contribuição dos agregados para os álcalis da solução, Constantiner e Diamond, 2003, produziram argamassas com cimento pobre em álcalis e agregados contendo feldspato e concluíram que os feldspatos, e provavelmente outros minerais que contêm álcalis, quando envolvidos por pasta de cimento, libertam álcalis para a solução existente nos poros. O processo é dependente do tempo, ou seja, é um fenómeno lento e de longa duração. Este facto tem interesse, tomando em consideração que, na expectativa de evitar a ocorrência de reacções álcali-agregado, são utilizados cimentos com baixo teor em álcalis.

Para determinação da quantidade de álcalis que podem ser libertados pelos agregados, existem actualmente dois métodos principais de ensaio, o ensaio francês e o ensaio canadiano.

O ensaio francês foi implementado pelos investigadores do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. É designado por "Determinação dos álcalis solúveis na água de cal" (LCPC, 1993) e mede os álcalis activos libertados pelo agregado. O ensaio baseia-se na colocação de 500 g de agregado ou mistura granular de dimensão areia num recipiente

em aço inoxidável em contacto com uma solução saturada de hidróxido de cálcio, em ebulição (Figura I.9). Os produtos em suspensão, no final do ensaio, são filtrados, submetidos a acidificação e analisados por absorção atómica, com determinação do teor em sódio e potássio. Os resultados do ensaio mostram que os álcalis activos dos agregados são geralmente inferiores a 1% dos álcalis totais. A contribuição para os álcalis do betão não será superior a 0,2 kg/m^3, o que é relativamente baixo comparado com as outras origens, como o cimento e os adjuvantes (Le Roux et al., 1999).

O ensaio canadiano é apresentado por Bérubé et al., 2000, e Bérubé et al., 2002, e consiste no método de extracção em água quente (*hot water extraction method*) para determinação do conteúdo disponível de álcalis no betão, ou seja, conteúdo solúvel em água, e também no ensaio para determinação da contribuição dos agregados para os álcalis. Alguns agregados ou fases minerais nas partículas de agregado, como os vidros vulcânicos, as areias marinhas não lavadas, os feldspatos alterados, micas, argilas e zeólitos, podem, com o tempo, libertar quantidades significativas de álcalis para a solução porosa existente no betão.

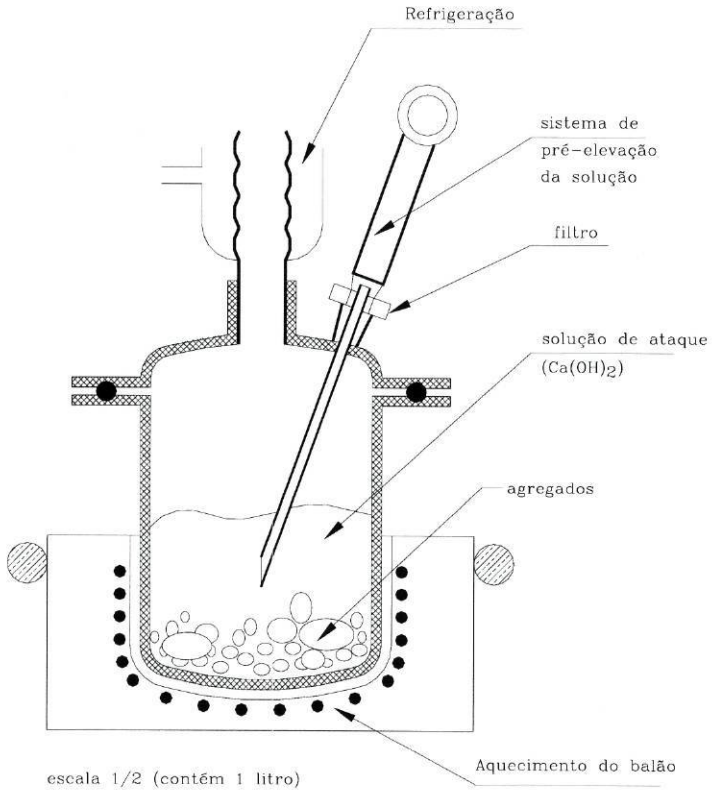


Figura I.9 – Dispositivo para determinação dos álcalis livres segundo a norma francesa LPC Nº 37 (LCPC, 1993).

Este facto poderá explicar a ocorrência de reacções álcali-agregado em estruturas contendo cimento com baixo teor em álcalis. A água, comportando-se como um ácido fraco com iões H^+, pode provocar a alteração dos feldspatos, que se traduz pela libertação de iões K^+, Na^+ e Ca^{2+}. Se a drenagem for boa, estes iões são lixiviados, mas se for média, o potássio combina-se com o silício e o alumínio para formar ilite, e se for fraca podem formar-se outros minerais de argila expansivos, como as esmectites.

O ensaio canadiano para extracção de álcalis dos agregados prevê a utilização de material de granulometria 1,25 a 5 mm, colocado numa garrafa de Nalgene com várias soluções: água destilada; solução saturada de hidróxido de cálcio, incluindo hidróxido de cálcio sólido; solução com hidróxido de potássio; e solução com hidróxido de sódio. A amostra é mantida em rotação durante 578 dias a temperatura de 38ºC. As soluções são analisadas periodicamente por absorção atómica, após acidificação, para determinar os teores em sódio e em potássio.

A partir da análise dos resultados deste ensaio, os autores verificaram que a taxa de libertação de álcalis dos agregados tende a decrescer com o tempo, e que a maior parte dos agregados liberta mais álcalis em soluções alcalinas (de sódio e potássio) do que na solução de hidróxido de cálcio. Sugerem que os agregados podem libertar mais de $1kg/m^3$ de $Na_2O_{equivalente}$, o que sucede em especial para os agregados ricos em feldspato, como os granitos.

O ensaio canadiano apresenta-se como de difícil aplicação, dada a longa duração do mesmo, incompatível com a aplicação do estudo do ponto de vista prático, ou seja, na análise de novos agregados para betão. Nesse aspecto, o método francês, possivelmente mais agressivo, apresenta a vantagem de proporcionar, num curto espaço de tempo, uma avaliação da potencial libertação de álcalis pelos agregados inseridos no meio hiperalcalino do betão.

O ensaio francês, por sua vez, é alvo de críticas por parte dos investigadores canadianos, que o consideram agressivo, dado utilizar uma solução saturada de hidróxido de cálcio, mas, por outro lado, com condições substancialmente diferentes do betão habitual, por não conter hidróxido de cálcio no estado sólido, subestimando os valores de álcalis fornecidos pelos agregados.

3.1.3. Existência de agregados reactivos

3.1.3.1. Generalidades

Um dos requisitos relativamente às características dos agregados para o fabrico de betão é que não sejam reactivos no meio fortemente alcalino a que ficarão expostos. Esta

exigência relaciona-se com o facto de alguns tipos de rochas e minerais poderem reagir com os hidróxidos alcalinos da solução intersticial do betão, e formar um gel expansivo potencialmente nocivo para a estrutura.

A reactividade de um agregado, ou seja, a velocidade com que reage, depende da composição, da origem e da textura da rocha (ACI, 1998), sendo mais influenciada pelas características texturais e microestruturais específicas do que pela composição petrológica e mineralógica.

Desde que as reacções álcali-agregado foram identificadas, pela primeira vez, têm surgido diversas propostas para o agrupamento dos agregados, na tentativa de identificar tipos que sejam tradicionalmente reactivos, com base no seu desempenho em obra (Mielenz, 1946; Silva e Rodrigues, 1993; Le Roux et al., 1999; Especificação LNEC E 415, 1993). Apesar destas classificações serem ainda controversas, existe um conjunto de rochas e minerais considerados, em geral, potencialmente reactivos por conterem formas de sílica reactivas (Quadro I.15).

Os minerais mais citados na literatura como potencialmente reactivos são os minerais de sílica – opala, calcedónia, cristobalite, tridimite, quartzo cripto e microcristalino e quartzo deformado e recristalizado – e também as rochas que contêm quartzo fortemente deformado, como: grauvaques, filitos, xistos, gnaisses, filões de quartzo e arenitos. São ainda consideradas potencialmente reactivas as rochas vítreas ou criptocristalinas, como riólito, andesito, alguns vidros artificiais e também cherte, ardósia e alguns tipos de calcário (Diamond, 1976; Hobbs, 1984; Hobbs, 1988; ICOLD, 1991; BCA, 1992; Especificação LNEC E 415, 1993; ACI, 1998; Neville, 1999; ASTM C 295-98, 2002; Smith e Collis, 2001).

As várias formas de sílica podem, muitas vezes, ser identificadas por exame microscópico, embora esta identificação seja dificultada quando existe quartzo criptocristalino. Têm sido propostos vários métodos para estimar a reactividade potencial de agregados siliciosos, medindo o grau de cristalinidade e os defeitos da malha cristalina. Estes métodos baseiam-se no conceito de energia livre do quartzo, que condiciona a sua solubilidade e a reactividade potencial (Grattan-Bellew, 2001). As formas de sílica identificadas como reactivas têm uma malha cristalina defeituosa ou são vítreas ou amorfas, pelo que a opala, a calcedónia e o jaspe são considerados os polimorfos mais reactivos aos álcalis, verificando-se que a reactividade aumenta com o decréscimo da cristalinidade (Figura I.10). Também a mirmequite, devido à baixa cristalinidade e instabilidade do quartzo, deve ser considerada na avaliação da reactividade potencial (Wigum, 1995).

Quadro I.15 – Minerais e rochas considerados potencialmente reactivos aos álcalis (Mielenz, 1946; Silva e Rodrigues, 1993; Le Roux et al., 1999).

Mielenz, 1946		**Silva e Rodrigues, 1993**		**Le Roux et al., 1999**
Minerais	Rochas	Minerais	Rochas	Rochas
Opala, Calcedónia, Tridimite.	**Siliciosas sedimentares:** Chertes com opala, Chertes com calcedónia, Calcários siliciosos. **Rochas vulcânicas:** Riólitos e tufos rioliticos, Dacitos e tufos daciticos, Andesitos e tufos andesíticos. **Rochas metamórficas:** Filitos. **Rochas mistas:** Rochas que contêm veios, inclusões ou grãos de rochas ou minerais reactivos.	Opala, Calcedónia, Sílex, Cherte, Quartzo tectonizado, Tridimite, Cristobalite, Obsidiana.	Jaspe (opala, cherte, calcedónia). Lidito (opala, cherte, calcedónia). Ftanito (opala, cherte, calcedónia). Diatomito (opala, cherte, calcedónia). Xisto silicioso (>30% quartzo tectonizado) (cherte, sílex). Filito (>30% quartzo tectonizado) (cherte, sílex). Grauvaque (>30% quartzo tectonizado) (cherte, sílex). Corneana (>30% quartzo tectonizado) (cherte, sílex). Quartzito (>30% quartzo tectonizado) (cherte, sílex). Granitóide (>30% quartzo tectonizado) (cherte, sílex). Vulcanitos (riólito, dacito, andesito, basalto). Calcário (siliciosos) (sílex, cherte). Dolomito (siliciosos) (sílex, cherte).	**Magmáticas:** Granitos, Granodioritos, Riólitos, Dacitos, Andesitos, Traquiandesitos, Basaltos, Obsidiana, Tufos vulcânicos, Retinitos. **Metamórficas:** Gnaisses, Micaxistos, Quartzitos, Corneanas. **Sedimentares:** Grés, Quartzitos, Grauvaques, Siltitos, Xistos quartzosos, Ardósia, Sílex, Calcário, Calcário dolomítico, Dolomito.

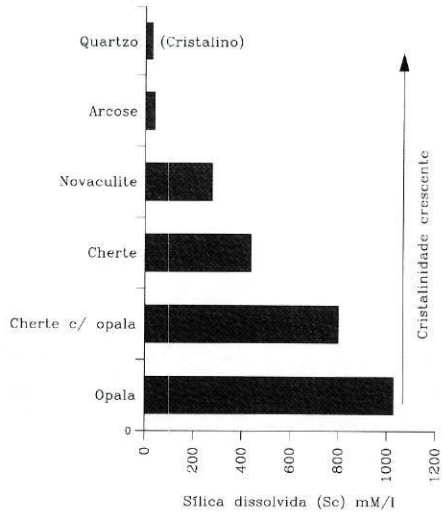


Figura I.10 – Relação entre a reactividade e a cristalinidade (Mielenz et al., 1947).

Não existe uma relação linear entre a proporção de um dado constituinte reactivo, a magnitude da reacção álcali-sílica e a consequente expansão (Sims e Brown, 1998). Para algumas rochas, como os metaquartzitos, a expansão aumenta progressivamente com a proporção de constituintes reactivos no agregado. Já no caso, por exemplo, de existir opala, há uma concentração de constituinte reactivo que conduz à máxima expansão, a qual decresce abruptamente para concentrações mais altas ou mais baixas do mineral. A proporção de sílica reactiva, na quantidade total do agregado, à qual corresponde a máxima expansão, é designada por "conteúdo péssimo" ou "efeito péssimo" (Gillott, 1975; Hobbs, 1988; Besem e Demars, 1989; The Institution of Structural Engineers, 1992; Grattan-Bellew, 2001; Le Roux, 2001; RILEM AAR-1, 2003) (Figura I.11).

Para cada agregado existe um "conteúdo péssimo", ou seja um teor crítico de material reactivo presente num agregado ou mistura de agregados que pode originar uma expansão máxima. Para agregados fortemente reactivos, como os que contêm opala, a percentagem correspondente ao teor péssimo é em geral inferior a 10%, mas, para agregados pouco reactivos, pode atingir os 100% (BRE Digest 330, 1991; Poole, 1992; Shayan, 1992; Taylor, 1997). Quando a proporção de sílica reactiva é superior ao "conteúdo péssimo", a concentração de iões hidróxilos não é suficiente para manter a reacção e a expansão decresce.

Admitindo que a expansão está relacionada com a quantidade de gel produzida pela reacção e com as propriedades do gel, o "conteúdo péssimo" representa a proporção do agregado para a qual ocorre a máxima produção de gel (French, 1980). Neste contexto, a taxa de produção de gel varia com a proporção de partículas reactivas, e o "conteúdo péssimo" corresponde à mistura que apresenta maior taxa de formação de gel.

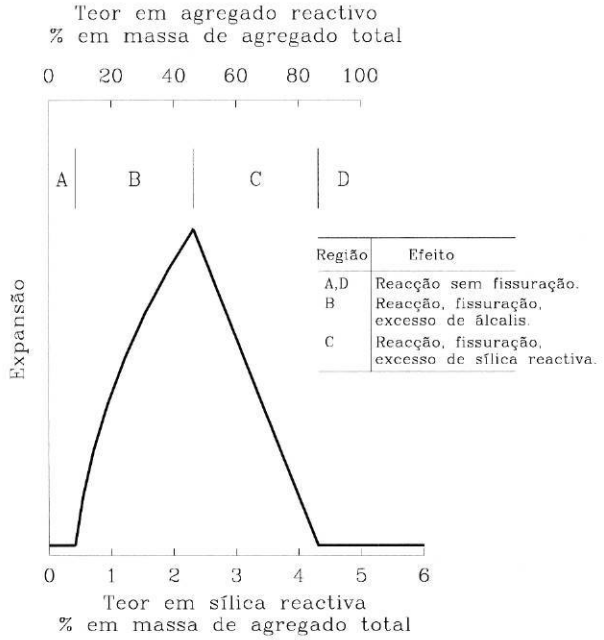


Figura I.11 – "Conteúdo péssimo": a relação água/cimento e agregado/cimento são de 0,4 e 2,75, respectivamente; o teor em álcalis é de 6 kg/m^3 (Hobbs, 1988).

A existência de um "efeito péssimo" significa, ainda, que podem ser construídas obras em betão com agregados compostos por sílica fortemente reactiva sem que surjam desordens devido à reacção com os álcalis (Le Roux, 2001).

Se existe consenso quanto à reactividade dos polimorfos de sílica, é ainda polémica a definição de reactividade de um conjunto de rochas comuns que mostram indícios de deformação.

A observação de lâminas delgadas ao microscópio óptico polarizante permite, em geral, avaliar a percentagem de minerais reactivos. A Concrete Society, 1987, apresenta uma lista de rochas e minerais com baixa probabilidade de reactividade (Quadro I.16) e o relatório BRE Digest 330, 1991, refere um conjunto de rochas com baixa susceptibilidade ao ataque por álcalis: basalto, diorito, dolerito, gabro, gnaisse, granito, calcário, mármore, microgranito, quartzo (quando não intensamente deformado), sienito, traquito, tufito, xisto argiloso e argilito.

Com base na análise petrográfica, pode referir-se também a classificação aplicada na Noruega, onde as rochas são divididas em três categorias, quanto à reactividade aos álcalis, com indicação do tipo de rochas mais comuns pertencentes a cada categoria (Wigum, 1995) (Quadro I.17).

Quadro I.16 – Rochas e minerais com baixa probabilidade de serem reactivos (Concrete Society, 1987).

Andesito	Feldspato[2]	Microgranito
Basalto	Gabro	Quartzo[2,3]
Gesso[1]	Gnaisse	Xisto
Diorito	Granito	Argilito
Dolerito	Calcário	Sienito
Dolomito	Mármore	Traquito
		Tufo

Notas:
1. O gesso está incluído na lista dado que pode ocasionalmente ser um componente menor dos agregados para betão.
2. O feldspato e o quartzo não são rochas mas grãos minerais que ocorrem principalmente nos agregados finos.
3. Não inclui quartzo fortemente deformado nem quartzito.

Quadro I.17 – Classificação norueguesa dos agregados de acordo com a sua reactividade potencial (Wigum, 1995).

Categoria	Classificação	Tipos de rochas
1	Agregados reactivos (com reconhecido comportamento reactivo em obra).	Arenitos, rochas cataclásticas, rochas vulcânicas ácidas, rochas argilosas, grauvaque, outras rochas com quartzo microcristalino.
2	Agregados potencialmente reactivos.	Quartzito de grão fino (0,06 a 0,13 mm), outras rochas contendo quartzo finamente dividido.
3	Agregados inócuos.	Rochas com grão grosseiro ou com pequena quantidade de quartzo, como rochas vulcânicas / gabro / granitos / gnaisses / rochas máficas / calcário puro e outras rochas.

O relatório da RILEM AAR-0, 2003, propõe outra classificação que, com base na análise petrográfica quantitativa, por contagem de pontos ou contagem de grãos, permite incluir os agregados numa das seguintes categorias:

- Classe I – reactividade aos álcalis pouco provável;
- Classe II – potencialmente reactivo ou de reactividade incerta;
- Classe III – reactividade muito provável.

Para agregados novos, ou seja, relativamente aos quais não existe experiência de aplicação em obra, a classe II é frequente, o que leva à realização de ensaios complementares; a classe III é essencialmente limitada a agregados que contenham opala ou sílica criptocristalina. Neste relatório é realçado o facto de não ser correcto

classificar os tipos de rochas como reactivos ou não reactivos em função da génese, podendo haver para um mesmo tipo de rocha variedades reactivas e outras não reactivas, de acordo com a composição mineralógica.

Um outro exemplo de classificação baseada no exame microscópico é a apresentada pelos autores franceses, que distinguem três classes de agregados (Le Roux et al., 1999; Michel et al., 2003; FD P 18-542, 2004):

- Não reactivos (NR): os agregados para betões hidráulicos que, sejam quais forem as condições de utilização, não conduzem a desordens devido a reacções álcali-sílica;
- Potencialmente reactivos (PR): aqueles que são susceptíveis de, em certas condições, originar danos devido a reacções álcali-sílica;
- Potencialmente reactivos ao efeito péssimo (PRP): os agregados que, embora ricos em sílica reactiva, podem ser utilizados sem risco de danos devido a reacções álcali-sílica se satisfizerem certas condições.

Na norma FD P 18-542, 2004, um agregado é considerado não reactivo, com base na análise petrográfica, se um dos seguintes critérios quantitativos for satisfeito:

- Em rochas carbonatadas: se o teor de sílica total é inferior a 4% e não é identificada qualquer concreção siliciosa;
- No caso das rochas siliciosas tipo quartzitos ou grés: se não existe micro-quartzo de recristalização. A sua pesquisa deve ser guiada pela presença de quartzo com extinção ondulante, que lhe está geralmente associado;
- No caso das rochas silicatadas (granito, gnaisse, andesito, basalto, etc.): os indícios de reactividade devem ser procurados na presença de quartzo microcristalino de recristalização e também na existência de fases vítreas ou variedades de sílica como a cristobalite e/ou a tridimite, por vezes em vacúolos.

Existem outros exemplos de classificação dos agregados na literatura sobre o tema. Verifica-se que não existe uma classificação universal quanto à reactividade dos minerais e das rochas. A classificação de um agregado, com base na sua designação petrográfica, apresenta uma variabilidade regional quanto à sua reactividade, de país para país, pelo que, em cada caso, deve ser tomada em consideração a experiência e as recomendações nacionais. Se considerarmos o exemplo da Europa, verifica-se que a situação é de tal modo complexa, e reflecte as diferenças na geologia e no clima, que o CR 1901, 1995, considera não ser realista procurar especificações totalmente harmonizadas para evitar as reacções álcali-sílica, devendo ser apresentados os princípios gerais complementados por especificações nacionais. Neste relatório, são apresentadas resumidamente as normas seguidas em cada país.

Sendo a geologia e a mineralogia universais e sem fronteiras políticas, a primeira abordagem do estudo de um agregado deverá ser feita por um petrógrafo, utilizando um procedimento sistemático, seguido de um exame realizado por um especialista que identifique constituintes reactivos e tenha em atenção a experiência local relativamente ao desempenho das rochas em obra (Sims et al., 2000).

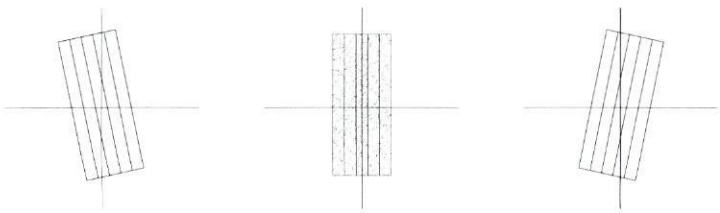
3.1.3.2. Deformação e recristalização em rochas graníticas

Atendendo a que no presente trabalho foram estudados agregados de rochas graníticas, a pesquisa sobre a reactividade potencial debruçou-se essencialmente sobre publicações em que este tipo de rochas é referido. A propósito da variabilidade de critérios e experiência entre países, no relatório RILEM AAR-1, 2001, o granito é considerado potencialmente reactivo quando exibe quartzo fortemente deformado ou microcristalino ou quando contém vénulas de opala ou calcedónia. Esta reactividade é admitida em países como a Argentina, Austrália, Bélgica, Canadá, Hong Kong, Índia, Itália, Roménia, África do Sul e Grã-Bretanha. Não existe no relatório qualquer referência à situação em Portugal.

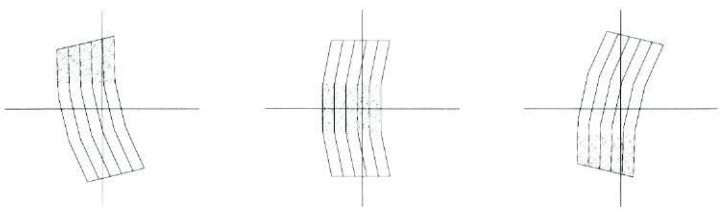
Embora os agregados graníticos sejam considerados, em grande parte das classificações, como inócuos ou com baixa probabilidade de serem reactivos (Concrete Society, 1987), na literatura encontram-se outras referências à reactividade potencial das rochas graníticas, sendo esta relacionada com a ocorrência de deformação nos cristais de quartzo (Gogte, 1973; West, 1991; West, 1994; Michel et al., 2003; Owsiak, 2004).

O quartzo, mineral abundante no granito, é comum apresentar extinção ondulante, o que não constitui, por si só, indicação da existência de deformação na rocha. Se o granito é submetido a tensões tectónicas, a deformação do quartzo intensifica-se e a extinção ondulante acentua-se, enquanto que os planos de clivagem das micas e as maclas dos feldspatos encurvam. Por vezes, observa-se também quartzo microcristalino resultante de recristalização, o que conduz ao aumento da área de contacto entre os grãos de quartzo e a solução intersticial (Michel et al., 2003).

O ângulo de extinção ondulante é uma medida do deslocamento do arranjo óptico na malha cristalina em várias porções de um grão. Diz-se que existe extinção ondulante quando a zona de extinção varia ao longo do cristal, à medida que a platina é rodada, em observação ao microscópio com nicóis cruzados (Wigum, 1995; West, 1996) (Figura I.12).



Grão de quartzo mostrando extinção uniforme



Grão de quartzo mostrando extinção ondulante

Figura I.12 – Diagrama mostrando como os planos cristalográficos encurvados produzem extinção ondulante nos grãos de quartzo (West, 1991).

Designa-se por ângulo de extinção ondulante o ângulo entre a posição de primeira extinção e a posição de sombra quase invisível, lido numa platina graduada quando se faz a rotação da primeira para a segunda posição (Dolar-Mantuani, 1981). É habitual utilizar o método desenvolvido para a medição deste ângulo (Figura I.13), procedendo em quatro fases:

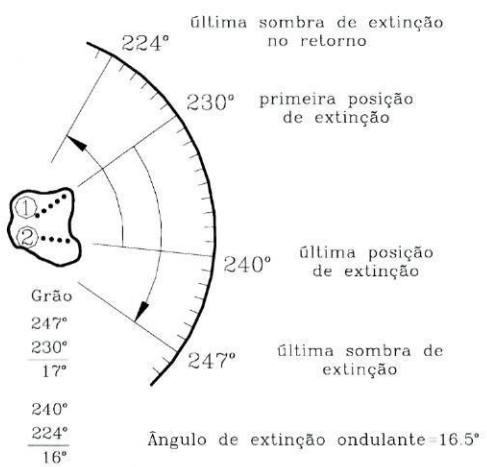


Figura I.13 – Ilustração do procedimento para determinação do ângulo de extinção ondulante (Dolar-Mantuani, 1981).

- Posição A – aparecimento da primeira sombra de extinção

- Posição B – primeira posição de máxima extinção
- Posição C – última posição da máxima extinção
- Posição D – desaparecimento da última sombra de extinção,

sendo o ângulo dado por:

$$[(C-A)+(D-B)]/2$$

Pode também ser utilizado o método mais simples e mais antigo, proposto por De Hills e Corvalán, 1964, em que é medida a posição do primeiro aparecimento e do último desaparecimento da sombra de extinção nos grãos de quartzo.

No que se refere à deformação dos cristais de quartzo, Gogte, 1973, foi o primeiro investigador a sugerir uma relação entre o ângulo de extinção ondulante do quartzo deformado e a reactividade potencial aos álcalis. Concluiu, num estudo envolvendo granitos, charnoquitos e granodioritos, que as rochas que continham 35 a 40% de quartzo com extinção fortemente ondulante, fracturado e granulado, apresentavam forte expansão nos ensaios de reactividade. Nestas rochas, o ângulo de extinção ondulante variava entre 18° e 27° e a plagioclase e a biotite mostravam efeitos da deformação. As rochas com menos de 20% de quartzo deformado, ou em que o quartzo tinha extinção ligeiramente ondulante, mostravam-se inócuas nos ensaios de reactividade. O autor concluiu, assim, que a reactividade potencial destas rochas estava relacionada com a percentagem e efeitos de deformação no quartzo. Também Mullick, 1987 estudou granitos com diferentes graus de deformação, tendo encontrado uma relação entre a deformação e a expansão de provetes de argamassa (Figura I.14).

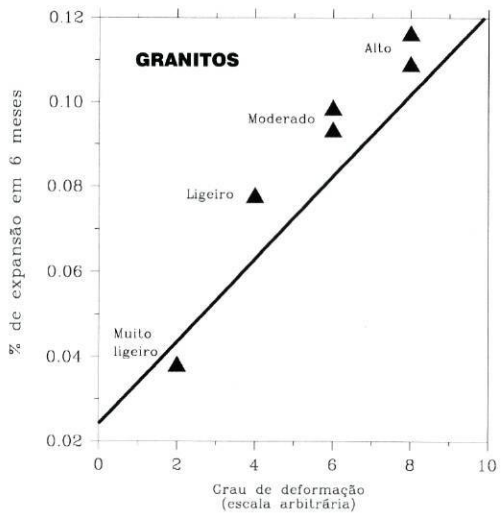


Figura I.14 – Comparação do grau de deformação, em escala arbitrária, com a expansão de barras de argamassa armazenadas a 60°C durante 6 meses (Mullick, 1987).

Durante a década de de 1980 diversas publicações debruçaram-se sobre a possibilidade de existir uma relação entre o grau de deformação dos grãos de quartzo, medida pelo seu ângulo de extinção ondulante, e a reactividade potencial das rochas.

Dolar-Mantuani, 1981, referia que, para além da caracterização do quartzo em termos de tamanho de grão, forma e identificação de inclusões, devia ser medido quantitativamente o ângulo de extinção para avaliação da reactividade. Afirmava que, dos minerais reactivos aos álcalis, o mais difícil de identificar é o quartzo médio a grosseiro presente em filões, quartzitos, quartzarenitos, granitos, granodioritos e gnaisses. Reconhecia, no entanto, que, embora encontrasse nas rochas analisadas uma relação entre o aumento do valor médio do ângulo de extinção e a reactividade das rochas, este critério podia não ser rigoroso, dada a variabilidade do ângulo de extinção ondulante numa mesma lâmina delgada, em função da orientação dos cristais e da subjectividade do método. Concluía que parecia haver indicação de que as rochas que continham quartzo com ângulo de extinção inferior a 15° eram não reactivas, mas que seria necessário aprofundar os conhecimentos para determinar a partir de que valor seriam consideradas reactivas, dando como referência o valor de 25°.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Buck, 1983, refere como critério mínimo para definir um agregado como potencialmente reactivo a existência de quartzo com ângulo de extinção ondulante superior a 15°, quando a percentagem deste quartzo num agregado fino ou grosseiro for superior a 20%.

Em documento publicado pela Concrete Society, 1987, é sugerido que um agregado que contenha mais de 30% de quartzo fortemente deformado seja considerado potencialmente reactivo. No mesmo documento, é definido como quartzo fortemente deformado o quartzo que tem ângulo de extinção ondulante médio de 25°, a partir de medições em, pelo menos, vinte grãos. O mesmo critério quanto à reactividade de rochas e outras substâncias aos álcalis é referido no relatório da ICOLD, 1991. No entanto, a relação entre a ocorrência de extinção fortemente ondulante e a reactividade não foi comprovada.

O método de avaliação da reactividade potencial com base no valor do ângulo de extinção ondulante começou, entretanto, a ser contestado. Este facto deve-se à fraca relação encontrada entre o ângulo de extinção ondulante e a expansibilidade de agregados com quartzo. O valor do ângulo de extinção é afectado por outros factores para além do grau de deformação da malha cristalina e do observador. Há a considerar a orientação dos grãos relativamente aos seus eixos ópticos e o tamanho dos cristais,

obtendo-se valores inferiores do ângulo de extinção em cristais mais pequenos (Grattan-Bellew, 2001).

Assim, Hobbs e Gutteridge, 1979, testaram agregados opalinos e concluíram que, para um determinado teor de agregado reactivo, a expansão aumentava com o decréscimo da dimensão das partículas, aumentando também a fissuração. Diamond e Thaulow, 1974, concluíram também que as argamassas fabricadas com partículas muito finas expandiam rapidamente, enquanto que utilizando partículas reactivas de maior dimensão a expansão era mais lenta e mais prolongada no tempo. Em trabalho desenvolvido sobre granitos e rochas graníticas da Grã-Bretanha, West (1991; 1994) concluiu que o ângulo de extinção não constitui um diagnóstico seguro, mas é apenas indicativo da reactividade de uma rocha, sendo necessário atender também à textura e dimensões dos cristais.

Shayan e Quick, 1991/92, verificaram que os grãos de quartzo microcristalino de um granito utilizado no betão de travessas de caminhos-de-ferro estavam envolvidos em gel, manifestação da sua reactividade; Sahyan, 1993, no estudo que desenvolveu sobre dois granitos australianos em que, para além da análise petrográfica, foram realizados ensaios de reactividade para confirmação dos resultados, chegou a idêntica conclusão.

A ênfase na dimensão dos grãos de quartzo foi sucessivamente implementada e aprofundada nos últimos anos. Designa-se por quartzo microcristalino de recristalização o quartzo de grão muito fino produzido por recristalização (Kerrick e Hooton, 1992), ou os pequenos cristais de quartzo secundário de dimensões geralmente inferiores a 40 μm, de contornos irregulares, que se situam na orla dos cristais de quartzo primários da rocha, conferindo, a estes últimos, limites crenulados (Le Roux et al., 1999), um fenómeno e outro devidos a deformação.

Relativamente a este assunto, merece referência o trabalho desenvolvido por Grattan-Bellew, 1992, que defende ser a dimensão dos grãos de quartzo o factor condicionante da reactividade aos álcalis. A solubilidade do quartzo aumenta significativamente para dimensões do grão inferiores a 100 μm, devido à maior superfície exposta. O quartzo microcristalino será, muito provavelmente, o componente reactivo em rochas que contêm quartzo deformado, como os quartzitos, granitos, gnaisses miloníticos e grauvaques.

O desenvolvimento de extinção ondulante é a manifestação da primeira fase de um processo que, se a tensão for muito elevada, pode levar um grão de quartzo a transformar-se num aglomerado de grãos de quartzo microcristalino (Grattan-Bellew, 1992) (Figura I.15). Assim, o ângulo de extinção ondulante não deve ser o único

parâmetro a ser utilizado para avaliar a reactividade potencial, principalmente em rochas com reacção lenta/retardada; em rochas que sofreram metamorfismo regional, pode ser um indicador de reactividade, uma vez que a extinção fortemente ondulante está quase sempre associada à existência de quartzo microcristalino.

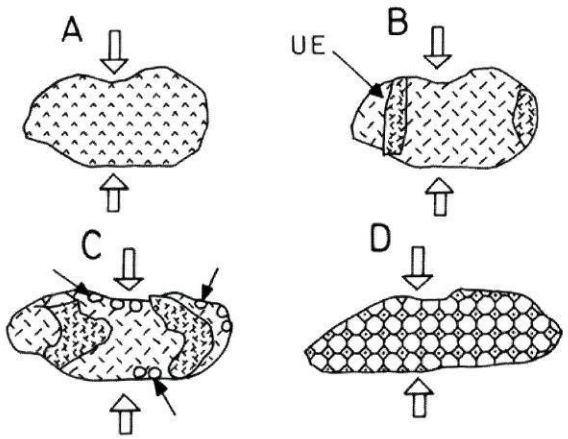


Figura I.15 – Desenvolvimento de extinção ondulante e de subgrãos em resposta à tensão: (a) deslocamentos mínimos; (b) aumento dos deslocamentos e desenvolvimento de subgrãos; (c) recristalização (indicada pelas setas); (d) grão recristalizado para quartzo microcristalino (Grattan-Bellew, 1992).

A mesma opinião é partilhada pelos autores do relatório RILEM AAR-1, 2003, em que se afirma que a extinção ondulante do quartzo sugere a presença de quartzo micro ou criptocristalino, mas a medição do ângulo de extinção ondulante não pode isoladamente ser utilizada para quantificar o grau de reactividade dos agregados. É um método que apresenta grandes variações e limitações, pois depende de diversos factores: é fortemente dependente da experiência do petrógrafo e a orientação do grão relativamente aos eixos ópticos e a dimensão dos cristais influenciam a leitura (Grattan-Bellew, 2001). Não é, por isso, actualmente considerado um parâmetro fiável na avaliação da reactividade potencial de um agregado.

Uma das dificuldades na determinação da reactividade potencial de um agregado por métodos petrográficos é a sua quantificação. Wigum, 1995, no seu trabalho de doutoramento, revê o estudo petrográfico dos agregados na Noruega e propõe um método para quantificar os componentes potencialmente reactivos através da mineralogia e da microestrutura. O exame microestrutural inclui a avaliação de: tamanho dos grãos de quartzo, desenvolvimento de subgrãos, grau de deformação e recristalização. O método proposto tem em atenção a área superficial de cada grão de quartzo, para classes de tamanho definidas, assumindo que tem forma cúbica. A área obtida é multiplicada pela proporção de grãos de quartzo de cada classe granulométrica e as áreas somadas.

Multiplicando a área obtida pela quantidade de quartzo determinada por difracção de raio-X, obtém a área total do quartzo em metros quadrados por unidade de volume. Mais tarde, Wigum et al., 2000, apresentam resultados que demonstram que a redução da dimensão dos grãos de quartzo agrava a reactividade, uma vez que aumenta a área superficial dos grãos disponível para a reacção. Os autores encontraram uma boa correlação entre os resultados obtidos nos ensaios acelerados de reactividade e dois parâmetros de reactividade para o quartzo: a) o inverso da dimensão média dos grãos de quartzo, $1/d_{50}$ (mm^{-1}); b) a área total da superfície dos grãos por unidade de volume (m^2/cm^3) (Figuras I.16 e I.17).

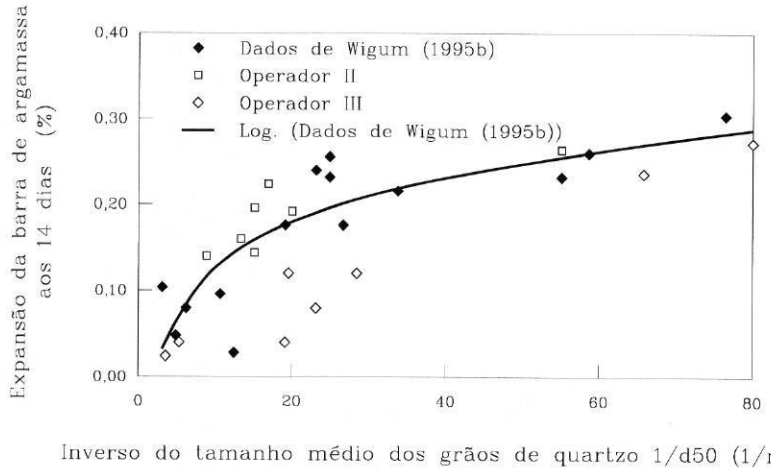


Figura I.16 – Correlação entre o inverso da dimensão média dos grãos de quartzo, $1/d_{50}$ (mm^{-1}), e a expansão média aos 14 dias, para um total de 29 amostras de agregado diferentes, examinadas por três operadores (Wigum et al., 2000).

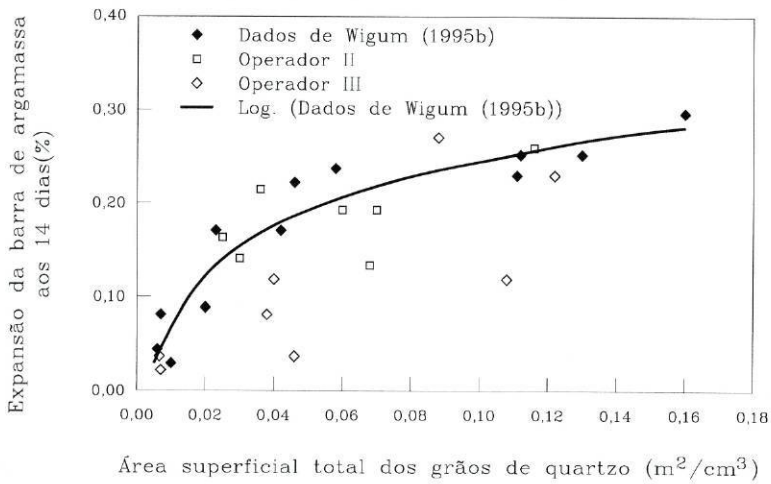


Figura I.17 – Correlação entre a área superficial total dos grãos de quartzo (m^2/cm^3) e a expansão média aos 14 dias, para um total de 29 amostras de agregado diferentes, examinadas por três operadores (Wigum et al., 2000).

Leemann e Holzer, 2003, em ensaios para identificação de minerais reactivos a partir da imersão em solução alcalina de superfícies polidas de agregados, verificaram que os grãos de quartzo eram dissolvidos da periferia para o interior e que os grãos muito deformados se mostravam mais reactivos.

3.1.3.3. Silicatos potencialmente reactivos

O estudo da relação entre a existência de quartzo deformado e microcristalino e a reactividade de algumas rochas comuns permitiu analisar o comportamento de outros minerais potencialmente reactivos.

Existem na literatura trabalhos acerca de minerais, principalmente do grupo dos filossilicatos e feldspatos alterados e deformados, que podem contribuir para o desenvolvimento de reacções álcali-agregado, principalmente do tipo lento/retardado, tradicionalmente designadas reacções álcali-silicato (Concrete Society, 1987; Gillott, 1980; Besem e Demars, 1989; Brouxel, 1993; Shayan, 1993; Wigum, 1995).

Um dos primeiros trabalhos sobre este tema é da autoria de Gillot et al., 1973, que refere a vermiculite e a esmectite como minerais possivelmente relacionados com as reacções com álcalis de carácter lento/retardado. Segundo estes investigadores, estudos de grauvaques, filitos e argilitos da Nova Escócia forneceram evidência de que, nessas rochas, os filossilicatos são, pelo menos parcialmente, responsáveis pela expansão devida a reacções álcali-agregado.

Reacções envolvendo filossilicatos, incluindo vermiculite, clorite, mica e minerais do grupo das argilas, foram referidas, também, em estudos realizados no Canadá e na África do Sul (BCA, 1992).

Kerrick e Hooton, 1992, estudaram rochas de uma pedreira próximo de uma zona de falha e descrevem como manifestações microscópicas da deformação do granito os feldspatos dobrados e fracturados, os grãos de quartzo grosseiros com extinção ondulante e *clusters* de quartzo microcristalino, ou seja, mosaicos de grãos finos de quartzo com bordos suturados, cuja porosidade permitia a penetração da solução alcalina. Referem ainda que a expansão de amostras de argamassa aumentava quando o agregado exibia foliação.

Monteiro et al., 2001, identificaram biotite com orientação preferencial, devido à existência de uma foliação, e os ensaios de expansibilidade indicaram uma relação entre a expansão e a deformação daquele mineral.

Nos trabalhos de Broekmans (1999; 2002), é referido que a dissolução da sílica é incrementada em grãos detríticos pela interacção catalítica de mica detrítica e minerais neogénicos de argila, pois influenciam o pH da solução existente nos poros.

A investigação desenvolvida por Leemann e Holzer, 2003, mostrou que também o feldspato apresenta indícios de dissolução em solução alcalina, assim como a biotite e a clorite, embora o grau de dissolução mostre que a reacção é mais lenta do que no caso do quartzo.

Apesar destas observações, e de acordo com os autores do relatório RILEM, AAR-1, 2003, a indicação de que os filossilicatos, incluindo clorite, vermiculite, mica e minerais do grupo da argila podem participar nas reacções internas do betão, não foi ainda devidamente confirmada.

Conclui-se, do exposto, que não parece correcto classificar uma rocha como reactiva apenas com base na designação petrológica, devendo privilegiar-se, também, uma descrição das características microestruturais e os resultados da experiência de utilização do agregado em obra. A identificação e experiência relativa a constituintes reactivos diferem de país para país; por esta razão, a apreciação final e classificação devem seguir a experiência nacional ou regional e respectivas recomendações e especificações (Wigum, 1995; RILEM AAR-0, 2003).

3.1.4. Ensaios de avaliação da reactividade potencial aos álcalis

3.1.4.1. Generalidades

O modo mais correcto de determinar a reactividade de uma rocha como agregado é a sua apreciação em obra, ou seja, o seu desempenho em betão fabricado e aplicado.

Os ensaios mais comuns para avaliação da reactividade de um agregado ou da combinação agregado-cimento encontram-se normalizados e são discutidos em extensa bibliografia (Grattan-Bellew, 1983; Sims, 1987; Stievenard-Gireaud, 1987; BRE Digest 330, 1991; Wigum, 1995; ACI, 1998; Silva e Reis, 2000; RILEM AAR-0, 2003).

Estes ensaios e técnicas são habitualmente divididos em dois grupos (Grattan-Bellew, 1983; Sims e Brown, 1998):

a) Ensaios para avaliação da reactividade potencial de um agregado:
   - Exame petrográfico dos agregados, ou seja, reconhecimento de espécies potencialmente reactivas por processos visuais;
   - Ensaio químico.
b) Ensaios baseados na expansibilidade de um agregado em argamassas ou no betão:

- Ensaio de expansão da barra de argamassa;
- Ensaio acelerado de expansão da barra de argamassa;
- Ensaio do prisma de betão;
- Ensaio da barra de argamassa em autoclave.

Estes métodos são habitualmente utilizados para distinguir agregados inócuos daqueles que são potencialmente reactivos. Pretendem ser métodos de simples execução, que forneçam resultados fiáveis num curto período de tempo, reflectindo o desempenho real em obra. O primeiro grupo visa o estudo do agregado isoladamente e o segundo a combinação agregado-cimento. São ensaios que se encontram normalizados, existindo algumas variantes em diversos países, de acordo com a experiência desenvolvida. Serão aqui referidos os ensaios normalizados pela ASTM e as normas francesas NF, dado tratar-se dos ensaios mais utilizados no nosso país e aqueles sobre os quais existe mais informação na bibliografia, referindo-se, ainda, algumas das normas portuguesas correspondentes.

Quanto à identificação da ocorrência de reacções álcali-sílica em betão colocado em obra, o método mais utilizado para aplicação *in situ*, nas superfícies expostas da estrutura ou sobre as amostras retiradas por carotagem desta, é baseado na fluorescência do acetato de uranilo.

3.1.4.2. Exame petrográfico dos agregados

O objectivo do exame petrográfico é a identificação, quantificação, classificação e avaliação do grau de alteração dos diferentes tipos de rocha de um agregado a utilizar em estruturas de betão (Wigum, 1995). O exame petrográfico dos agregados e do betão tornou-se, em alguns países, um procedimento rotineiro no projecto e construção de estruturas, em estudos forenses em casos de rotura e na previsão da vida útil sob diferentes ambientes.

O exame petrográfico dos agregados por si só não pode, no entanto, fornecer informação quanto à expansibilidade de um betão, mas apenas prever o comportamento de certos agregados (Wigum, 1995). Para tal é necessário que seja feita a descrição completa das rochas e não apenas atribuir um nome de acordo com a terminologia internacional.

Este exame, realizado geralmente segundo as normas e recomendações ASTM C 294-98, 2002; ASTM C 295-98, 2002; BS 7943, 1999; RILEM AAR-1, 2003; e Especificação LNEC E 415, 1993, consiste na identificação da presença de espécies potencialmente reactivas nos agregados por observação ao microscópio polarizante. As

normas não fornecem, contudo, indicações quanto ao facto das espécies reactivas poderem provocar efectivamente danos por expansão.

A norma ASTM C295-98, 2002, refere que a análise petrográfica deve identificar a existência de constituintes potencialmente reactivos, determiná-los quantitativamente e recomendar ensaios adicionais para confirmar ou não a presença de quantidades significativas de componentes capazes de reagir no betão. Esta norma apresenta uma lista de rochas e minerais potencialmente reactivos. A análise petrográfica engloba, ainda, a aplicação de outras técnicas, como a difracção de raio-X, a microssonda electrónica, o microscópio electrónico de varrimento e técnicas termodinâmicas (Wigum, 1995).

O exame petrográfico permite identificar os minerais prejudiciais, revelar a presença de alteração em alguns minerais e fornecer indicações quanto aos ensaios complementares a utilizar, sendo o grau de pormenorização dependente do tipo de material observado (Sims, 1981).

Em complemento a este método, têm sido referenciadas formas de avaliação semiquantitativa de reactividade potencial com base na determinação do ângulo de extinção ondulante do quartzo (Dolar-Mantuani, 1981; Grattan-Bellew, 1992) ou da presença de quartzo micro e criptocristalino (Wigum, 1995; Broekmans, 2002).

Actualmente o exame petrográfico dos agregados é o método mais seguro para despistagem da reactividade potencial aos álcalis. Trata-se de um método, de aplicação relativamente rápida, que permite avaliar a reactividade potencial de agregados contendo quartzo, particularmente os que provocam reacção lenta/retardada (Grattan-Bellew, 1983). Apresenta como limitação, a dependência da sensibilidade e experiência do petrógrafo.

3.1.4.3. Ensaio químico

O ensaio químico, ou absorciométrico, foi originalmente publicado em 1952 e desenvolvido como um método rápido de diferenciar agregados contendo sílica potencialmente reactiva e não reactiva. É realizado segundo a norma ASTM C 289-94, 2002, e a Especificação LNEC E 159, 1964, e tem por objectivo determinar a reactividade potencial de um agregado. Para tal, é preparada uma fracção de agregado triturado compreendida entre 150 e 300 μm. A amostra é imersa numa solução de 1N de NaOH à temperatura de 80° C durante 24 horas. O objectivo é dissolver a sílica que pode ser reactiva e permitir a reacção com a solução de NaOH. A partir deste ensaio, é traçado um gráfico semilogarítmico de sílica dissolvida *versus* redução da alcalinidade, que distingue

três tipos de agregados: os inócuos, os potencialmente prejudiciais e os prejudiciais (Figura I.18). Se a quantidade de sílica dissolvida ultrapassar 300 milimoles/litro, o agregado é considerado reactivo.

É de notar, como limitação, que a noção de "potencialmente prejudicial" é vaga, não fornece indicação quanto ao potencial de expansão e os resultados podem ser influenciados pelo operador (Grattan-Bellew, 1983), para além de apresentar algumas dificuldades em agregados de reacção lenta/retardada. É um ensaio insensível ao teor péssimo, pelo que pode fornecer a indicação de inócuo para um agregado no teor péssimo e potencialmente prejudicial para o mesmo agregado em que foi excedido esse teor (Sims, 1987). Os resultados do ensaio devem, por isso, ser confirmados por outros ensaios, como a análise petrográfica e o ensaio de barra de argamassa.

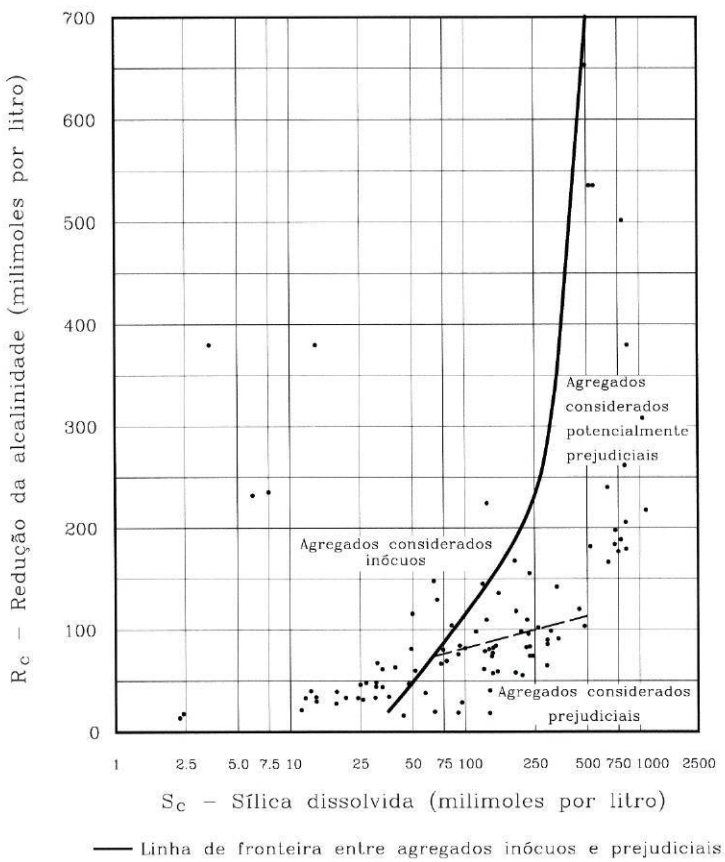


Figura I.18 – Gráfico de identificação da reactividade potencial de um agregado com base no ensaio químico (adaptado de ASTM C 289- 94, 2002).

As vantagens destes métodos são essencialmente a sua rapidez e a possibilidade de ser utilizado com sucesso numa grande variedade de agregados siliciosos, quando associado à análise petrográfica (Grattan-Bellew, 1983). No entanto, conforme referido

por Stievenard-Gireaud, 1987, e Oberholster e Davies, 1986, o ensaio não se mostra apropriado para a determinação preventiva da reactividade de agregados como os grauvaques, argilitos, granitos e quartzitos em meio hiperbásico, dado que pode classificá-los como não reactivos apesar de os mesmos apresentarem em obra danos importantes devido a reacções álcali-sílica.

Por outro lado, é referido, em BRE Digest 330, 1991, que o método não fornece informação quanto aos efeitos de diferentes combinações de agregados e classifica um conjunto de agregados siliciosos como sendo susceptíveis a ataque pelos álcalis, incluindo agregados que foram utilizados durante muitos anos em betão que não evidenciou sinais de reactividade em obra.

3.1.4.4. Ensaio de expansão da barra de argamassa

O ensaio de expansão da barra de argamassa *(mortar bar test)* é o método mais utilizado para determinar se uma combinação cimento-agregado é potencialmente reactiva. Foi publicado pela primeira vez em 1950. É geralmente realizado segundo as normas ASTM C 227-97a, 2002, e NP 1381, 1976, embora diferentes organizações apresentem métodos diferentes de avaliação dos resultados. Neste ensaio, são fabricados quatro provetes de argamassa com agregado reduzido à dimensão de grãos de areia (<5 mm) e cimento rico em álcalis (> 0,60% de $Na_2O_{equivalente}$), que são armazenados em recipientes com 100% de humidade relativa a 38° C de temperatura. Os provetes são retirados periodicamente e o seu comprimento medido para determinação de variações de comprimento.

Uma vantagem deste método é permitir avaliar o comportamento de combinações cimento-agregado, aproximando-se do comportamento em obra, e é considerado um método rigoroso para avaliação da reactividade de agregados siliciosos fortemente reactivos.

Entre as limitações pode referir-se a duração do ensaio, de 6 a 12 meses, o que em muitos casos não é compatível com as exigências das obras (Silva e Reis, 2000). Não é um método adequado para todas as combinações de agregado e pode produzir resultados incorrectos (Ranc et al., 1994; Sims, 1987). Por outro lado, o comportamento da argamassa durante o ensaio pode não ser igual ao do betão fabricado com os mesmos agregados (Grattan-Bellew, 1983; ACI, 1998). Stievenard-Gireaud, 1987, põe ainda em causa os limites considerados como indicativos de expansibilidade aos 3 e 6 meses e considera que o ensaio é demasiado curto para agregados siliciosos com

reactividade lenta. O mesmo é referido em BRE Digest 330, 1991, quanto a agregados como os quartzitos contendo quartzo deformado.

3.1.4.5. Ensaio acelerado da barra de argamassa

Este ensaio é habitualmente realizado segundo a norma ASTM C 1260-94, 2002, e teve a sua origem na África do Sul, pelo que também é conhecido por ensaio NBRI (*National Building Research Institute*), descrito em Oberholster e Davies, 1986, e Davies e Oberholster, 1987. Trata-se fundamentalmente de uma alteração do ensaio anteriormente referido, com idêntica preparação dos provetes, mas condições de exposição diversas. Com o objectivo de acelerar a ocorrência de reacções álcali-sílica, o armazenamento é feito em condições mais severas do que no ensaio tradicional e do que as condições verificadas em obra. Assim, a temperatura de armazenamento é de 80° C e os provetes estão em contacto com uma solução de 1N de NaOH. As medições são realizadas durante um período de 14 dias. Após 16 dias, pode classificar-se a combinação cimento-agregado como não reactiva se a expansão for inferior a 0,10%, potencialmente reactiva para expansões entre 0,10% e 0,20% e reactiva para expansões superiores a 0,20%. Em RILEM TC 106-2 AAR, 2000, é igualmente referido que, para valores entre 0,10 e 0,20%, a menos que exista experiência local, os agregados devem ser considerados potencialmente reactivos. Segundo Silva e Reis, 2000, se ao fim de 14 dias a expansão for superior a 0,10%, é aconselhável prolongar o ensaio até aos 28 dias, classificando o agregado como de reactividade potencialmente duvidosa se apresentar expansão menor que 0,20%.

Este ensaio é considerado adequado para avaliar a reactividade de agregados que produzem reacção lenta ou expansão retardada. Shayan e Quick, 1989, utilizaram agregados australianos em ensaios de reactividade acelerados e concluíram que os produtos formados, nas condições do ensaio acelerado, são semelhantes aos resultantes do ensaio tradicional, embora se formem mais rapidamente, pelo que os processos diferem na velocidade de reacção mas não no mecanismo.

Não simula, contudo, as condições reais do betão em obra. Segundo Grosbois e Fontaine, 2000, o ensaio pode ser considerado restritivo. Quando o agregado excede o limite de expansão, o resultado é considerado inconclusivo, a menos que também o seja pelo método do prisma de betão. O método mostra limitações na avaliação de reactividade de agregados carbonatados, que se revelaram reactivos no método do prisma de betão, concluindo que para este tipo de rochas a reactividade é subestimada pelo ensaio acelerado. Ensaios desenvolvidos sobre milonitos, meta-argilito, metagrauvaque, granito, calcário e vidro de sílica por Wigum, 1995, mostram que não

existe correlação entre a quantidade de gel formada e a expansão medida na barra de argamassa.

3.1.4.6. Ensaio do prisma de betão

Este ensaio é semelhante ao ensaio da barra de argamassa, mas aqui é utilizado um prisma de betão e é adicionado um elemento alcalino à mistura do betão. Foi desenvolvido inicialmente no Canadá, para avaliar a expansibilidade de calcários dolomíticos reactivos que não provocavam expansão significativa no ensaio da barra de argamassa (Grattan-Bellew, 1983). Segundo RILEM AAR-0, 2003, os agregados finos e os grossos são testados numa mistura normalizada ou, preferencialmente, utilizando a mistura planeada para o projecto. É geralmente utilizada a norma ASTM C 1293-01, 2004, que prevê a mistura de 1,25% de $Na_2O_{equivalente}$ na água da mistura e uma relação água-cimento de 0,42 a 0,45. O provete é armazenado a 38° C num recipiente contendo água na parte inferior e com humidade relativa superior a 95%.

O tempo de execução do ensaio, sendo de 12 meses ou mais, pode ser considerado uma limitação. Como principais vantagens, refere-se o facto de a utilização de betão se aproximar mais da realidade do que no caso dos ensaios com argamassa, e de este ensaio ser particularmente indicado para os agregados grossos, principalmente os de reacção lenta com os álcalis. O limite de 0,04% de expansão durante um ano define os agregados potencialmente prejudiciais, mas para estruturas especiais, como grandes barragens, deve ser estabelecido um limite mais baixo (ACI, 1998). Mais recentemente, Grosbois e Fontaine, 2000, desenvolveram estudos para avaliar a reactividade potencial de agregados e concluíram que este método é considerado aquele que melhor representa o comportamento em obra de betão exposto a condições severas.

3.1.4.7. Ensaio da barra de argamassa em autoclave

Trata-se de um ensaio de origem japonesa, de execução muito rápida, que permite obter resultados ao fim de três dias e pode ser aplicado a todos os tipos de agregado.

Este ensaio permite classificar um material relativamente à reactividade aos álcalis como Potencialmente Reactivo (PR) ou Não Reactivo (NR), mas não reconhece os materiais Potencialmente Reactivos ao Efeito Péssimo (PRP).

A norma mais utilizada, no nosso País, para realização deste ensaio é a francesa NF P18-590, 1993. Os provetes de argamassa são fabricados de acordo com a norma ASTM C 227-97a, 2002, utilizando a fracção 0,16 mm - 5,00 mm, granulometria da fracção areia do betão. É utilizada uma relação água/cimento de 0,5, e o conteúdo em álcalis é de 4%, relativamente à massa do cimento, por adição de NaOH à água de mistura. A

reactividade potencial é determinada pela medição de variações dimensionais de provetes de argamassa de 40x40x160 mm^3, mantidos em autoclave durante 5 horas à temperatura de 127° C, com tensão de 0,15 MPa (NF P18-590,1993). A deformação relativa do provete é determinada por leitura do comprimento dos provetes 18 horas após a finalização do ensaio, e tem como base o comprimento inicial de 160 milímetros. O resultado, expresso em percentagem, é a média aritmética da deformação dos três provetes.

O critério de não reactividade é definido pela expansão inferior a 15% para a média dos resultados dos três provetes. Silva e Reis, 2000, referem como principal vantagem deste ensaio o curto tempo de execução, que é de uma semana, e como principal limitação o facto de não mostrar tendências de evolução no comportamento dos agregados.

3.2. Mecanismos da reacção álcali-sílica

Para melhor compreensão dos mecanismos envolvidos neste processo de degradação, apresentam-se em seguida as principais teorias para explicação da reacção álcali-sílica.

A reacção álcali-sílica pode ser representada, de forma simplificada, pelas equações (French, 1980; West, 1996):

$$SiO_2 + 2NaOH + H_2O \rightarrow Na_2SiO_3.2H_2O \text{ (gel sílico-sódico)}$$

$$SiO_2 + 2KOH + H_2O \rightarrow K_2SiO_3.2H_2O \text{ (gel sílico-potássico)}$$

As primeiras análises da composição química do gel resultaram do estudo de exsudações por Idorn na década de 1960. Nestas análises, apenas acidentalmente foi identificado cálcio em baixa percentagem e, daí, ter sido dado ao produto analisado o nome de gel sílico-alcalino. A explicação do mecanismo subjacente à reacção tem sido alvo de discussão e, ao longo do tempo, têm surgido versões diversas que pretendem explicar parcial ou totalmente os mecanismos envolvidos.

As primeiras explicações teóricas da reacção datam de meados do século XX e foram expostas por Powers e Steinour (1955a; 1955b), que fizeram uma revisão bibliográfica e apresentaram a sua interpretação sobre o assunto. A unidade estrutural básica da sílica (SiO_2) é um ião Si^{4+} rodeado por quatro iões oxigénio O^{2-}, com disposição em tetraedro. As partículas de sílica são compostas de tetraedros que estão ligados entre si pelos seus vértices, sendo cada vértice ocupado por um oxigénio, que é comum a dois

tetraedros. Nas formas cristalinas, os tetraedros estão ligados para formar uma rede tridimensional orientada, enquanto nas formas amorfas é formada uma rede aleatória, com estrutura interna desordenada. Na superfície dos cristais, o tetraedro não fica completo e as cargas negativas do oxigénio e positivas do silício não são compensadas. Na presença de água, o ião H^+ combina-se com o O^{2-} e o ião hidróxilo OH^- combina-se com o Si^{4+}, completando assim o tetraedro. O resultado é uma superfície com grupos OH. O ião hidrogénio ligado ao oxigénio tem uma ligação mais débil do que o grupo OH. Assim, a ionização no meio aquoso liberta algum hidrogénio, produzindo iões H^+ livres, e a superfície das partículas de sílica torna-se um ácido fraco. Os mesmos investigadores referem que a reactividade da sílica é determinada pelo número de ligações siloxano (-Si-O-Si) livres, relacionado com desordens da rede cristalina. O ataque dos álcalis e do cálcio à sílica origina complexos com cálcio, sílica e álcalis que são não expansivos se o equilíbrio químico for atingido. Ocorre expansão se for formado um complexo sílico-alcalino que não esteja em equilíbrio com o cálcio. A existência deste complexo é anómala devido à ocorrência de hidróxido de cálcio no cimento, o que em condições de equilíbrio daria origem a um complexo com cálcio, álcalis e sílica. A persistência do composto sílico-alcalino é justificada devido à baixa solubilidade do hidróxido de cálcio em solução alcalina.

Dent Glasser e Kataoka, 1981, sugerem também uma explicação para o mecanismo da reacção álcali-sílica. Na sua opinião, a sílica com malha cristalina vulnerável, permite a penetração de iões hidróxilo e sódio no seu interior, conduzindo à rotura das ligações dos grupos silanol (-Si-OH) por ataque do hidróxilo. A presença de grupos carregados negativamente e de iões sódio positivos estabelece uma pressão de embebição, causando a expansão da sílica e a progressão do processo. Nesta descrição a reacção decorre sem a intervenção do cálcio. A Figura I.19 simula o ataque dos álcalis à sílica.

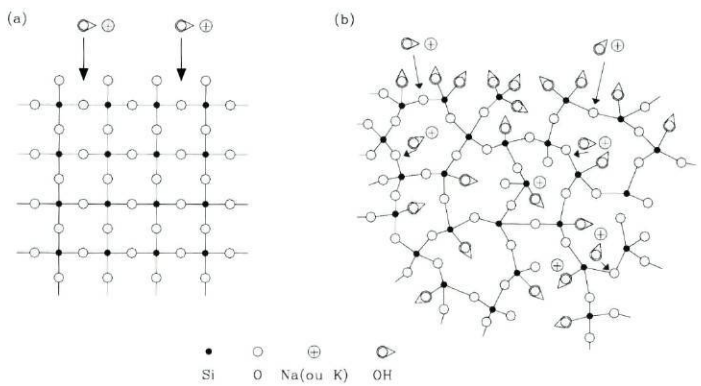


Figura I.19 – Ataque dos álcalis sobre (a) sílica cristalina e (b) sílica hidratada pobremente cristalina (representação esquemática) (Dent Glasser e Kataoka, 1981).

Os mesmos autores referem posteriormente (Dent Glasser e Kataoka, 1982) que os silicatos em solução reagem com o cálcio para formar silicatos de cálcio hidratados, reduzindo imediatamente o ião cálcio na solução devido à absorção pela sílica.

Chatterji et al., 1986, estudaram o mecanismo pelo qual o NaCl e o $Ca(OH)_2$ afectam a reacção e Chatterji et al., 1988, apresentam uma proposta de mecanismo para as reacções álcali-sílica. Sugerem que, na presença de hidróxido de cálcio, os iões alcalinos e os iões hidroxilo penetram os grãos de sílica reactiva libertando Ca^{2+} e Cl^- para a solução (Figura I.20).

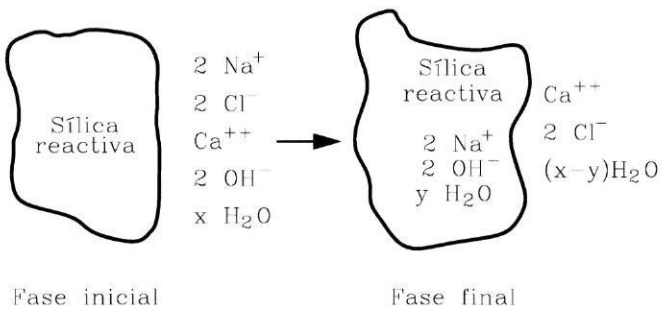


Figura I.20 - Reacção hipotética com a sílica reactiva (Chatterji et al., 1986).

A velocidade a que se processa a reacção é tanto maior quanto mais elevada a concentração de sais alcalinos e de hidróxido de cálcio. O ataque de OH^- às partículas de sílica causa rotura da estrutura e é acompanhado pela penetração de iões Na^+, K^+ e Ca^{2+}, libertando parte da sílica que pode migrar dentro do grão ou para o exterior deste. Ocorre expansão quando a quantidade de material que entra no grão é superior à quantidade de sílica que sai da partícula reactiva. A penetração dos iões sódio e potássio num grão reactivo é determinada pela dimensão dos seus iões hidratados, sendo a velocidade de penetração dos iões potássio superior à dos iões sódio. Devido à sua dimensão, os iões cálcio terão uma velocidade de penetração inferior, que decresce em resultado da formação de silicatos de cálcio hidratados. Assim, o $Ca(OH)_2$ promove a penetração de Na^+, Ca^{2+}, OH^- e H_2O nos grãos reactivos e dificulta a difusão dos iões silicato a partir dos grãos reactivos.

Wang e Gillot, 1991, desenvolveram uma hipótese para a reacção, em quatro etapas:

1- Reacção inicial do grão de sílica;
2- Ataque de OH^- aos grupos siloxano (-Si-O-Si);
3- Troca iónica de Na^+ e K^+ por protões dos grupos silanol na superfície da sílica, e formação de um complexo sílico-alcalino expansivo;

4- Troca de Ca^{2+} por iões alcalinos no complexo sílico-alcalino, com formação de um complexo calco-sílico-alcalino não expansivo. Apesar de este complexo não ser expansivo, resulta na libertação de iões alcalinos que ficam disponíveis para substituir protões dos grupos silanol internos e produzir gel sílico-alcalino expansivo.

O facto de existirem mais iões alcalinos do que cálcio em difusão para os locais de reacção é atribuído à maior solubilidade de NaOH e KOH relativamente ao $Ca(OH)_2$ e à menor dimensão dos raios hidráulicos do Na^+ e do K^+, o que tende a aumentar a velocidade de difusão destes iões. Após a formação do complexo sílico-alcalino expansivo, há maior facilidade de difusão do ião Ca^{2+}, que troca com Na^+ e K^+. A libertação dos últimos provoca a troca progressiva com os protões do grupo silanol, que foram originados pelo ataque às ligações Si-O-Si no interior dos grãos de sílica. Em resultado, há um zonamento de diferentes composições em volta da partícula reactiva.

Em trabalho desenvolvido por Broekmans, 1999, acerca dos mecanismos de reacção, são apresentadas as condições de solubilidade da sílica. A solubilidade é diferente para os diferentes polimorfos (Heaney et al., 1994) (Figura I.21), e quanto menor a actividade, menor a solubilidade. Para pH elevado, a superfície da sílica fica carregada negativamente e atrai iões positivos da solução intersticial. Refere a formação de iões a partir da solubilização da sílica segundo as seguintes reacções:

$SiO_2 + 2H_2O = H_3SiO_4^- + H^+$ para pH > 9;

$H_3SiO_4^- = H_2SiO_4^{2-} + H^+$ para pH >10;

$H_2SiO_4^{2-} = HSiO_4^{3-} + H^+$ para pH > 11;

$HSiO_4^{3-} = SiO_4^{4-} + H^+$ para pH > 12.

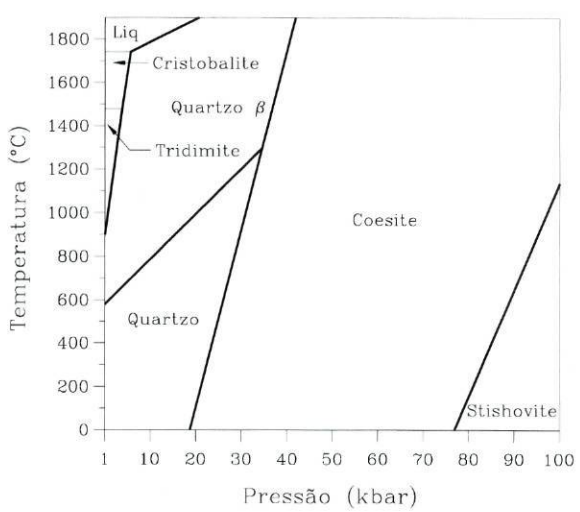


Figura I.21 – Condições de estabilidade dos polimorfos de sílica (Heaney et al., 1994).

Esta sequência de reacções pode ocorrer nas condições presentes no betão.

Relativamente à relação entre o pH do meio e a solubilidade da sílica, Prince et al., 2000, estudaram o paralelismo entre os mecanismos que conduzem à alteração natural do granito e aqueles que levam à ocorrência de reacções álcali-agregado. O gráfico de evolução da solubilidade de algumas substâncias em função do pH (Figura I.22) (Longhnan, 1969) mostra que a sílica é pouco solúvel para pH menor ou igual a 10, mas extremamente solúvel para valores mais elevados, tal como sucede no ambiente fortemente alcalino do betão. Por outro lado, a alumina é altamente solúvel em ambiente ácido (pH<4) ou muito alcalino (pH>11), sendo pouco solúvel para o pH da água natural (4<pH<10).

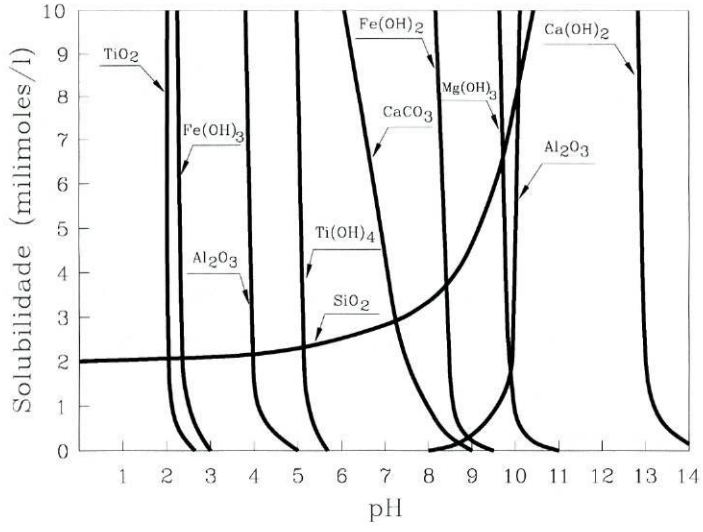


Figura I.22 – Relação entre a solubilidade de algumas substâncias e o pH da solução (Longhnan, 1969).

3.3. O hidróxido de cálcio na reacção álcali-sílica

Tem sido discutido, por vários autores, o papel do hidróxido de cálcio nas reacções álcali-sílica e sua relação com o carácter expansivo dos compostos formados. Chatterji, 1979, refere a presença de hidróxido de cálcio como condição necessária para a fendilhação da estrutura de betão com cimento portland devido à reacção álcali-sílica, justificando deste modo a observação de betão sem indícios de reacções álcali-sílica em pavimentos de estradas, apesar de conterem quantidades significativas de sais alcalinos.

Larive, 1990, afirma que o hidróxido de cálcio é necessário para a difusão dos iões alcalinos e formação do gel. Pelo facto de impedir a migração do silício, o cálcio leva a que os produtos de reacção se formem em torno dos agregados.

A este propósito, Knudsen e Thaulow, 1975, referem um zonamento na composição do gel. O gel próximo do local da reacção e à superfície do betão mostra baixo conteúdo em cálcio e o gel afastado do grão de agregado e que se encontra nas fissuras tem conteúdo crescente de CaO, até cerca de 20%. Este enriquecimento em cálcio foi atribuído à idade do gel, devido a uma exposição mais longa ao cálcio da pasta de cimento.

Também no trabalho realizado por Bérubé e Fournier, 1986, é referido o zonamento da composição do gel, que se mostra mais cálcico junto à pasta de cimento do que no interior das fissuras dos agregados, onde é mais rico em silício e potássio e mais cristalino.

O mesmo é referido por Wang e Gillot, 1991, relativamente à composição do gel em torno das partículas de agregado. A concentração de Ca^{2+} deverá ser máxima na parte mais exterior da orla de reacção e decrescer para o interior, porque a troca de Ca^{2+} por álcalis é dificultada pela sua baixa velocidade de difusão (Figura I.23). Este facto é também corroborado por Wigum, 1995; Thaulow et al., 1996; Diamond, 2000, admitindo que a composição do gel pode estar relacionada com a localização física deste e provavelmente com a sua idade (Quadro I.18) (Figura I.24).

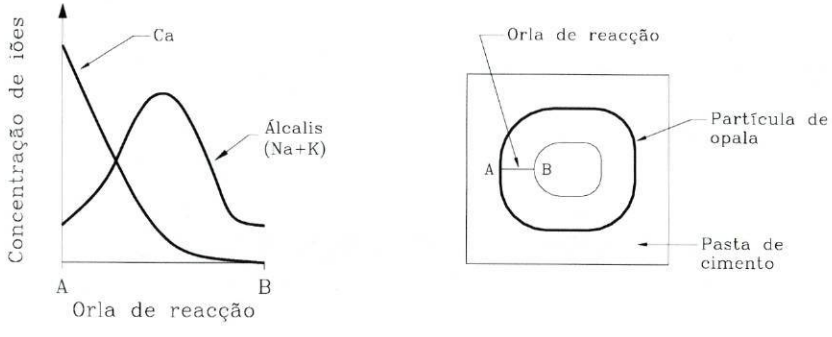


Figura I.23 – Zonamento da composição do gel sílico-alcalino na orla de uma partícula de opala do agregado (Wang e Gillott, 1991).

Wang e Gillot, 1991, verificaram também que a presença do hidróxido de cálcio tem duas funções: funciona como *buffer* para manter o pH elevado, isto é, manter a concentração de iões hidróxilo elevada na solução, e o Ca^{2+} pode trocar com os iões alcalinos, libertando-os para a solução e, assim, promover a formação de um complexo sílico-alcalino que é expansivo.

Quadro I.18 – Composição química média de gel límpido e cristalino (incluindo oxigénio e elementos traço) (Thaulow et al., 1996).

	Gel em fissuras na pasta (%)	Gel em poros (%)	Gel cristalino nos agregados (%)
Si	24,49	21,72	26,06
Na	2,64	2,49	1,63
K	3,93	4,41	4,66
Ca	7,54	12,30	5,66
Mg	0,52	0,50	0,08
Al	0,91	0,91	0,08
S	0,49	0,42	0,06
Fe	0,45	0,40	0,19
O	60,68	58,40	61,58

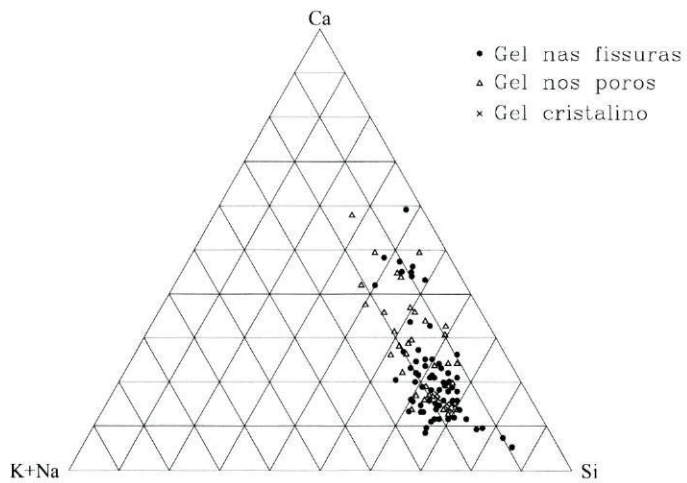


Figura I.24 – Diagrama triangular (Si-Ca-K+Na) mostrando a composição de gel em fissuras e em poros e de gel cristalino em fissuras nos agregados (percentagem atómica excluindo água, oxigénio e elementos traço) (Thaulow et al., 1996).

A relação entre a composição do gel e a expansibilidade não é ainda clara. Segundo experiências de Helmuth e Stark, 1992, não deverá existir expansão se o conteúdo de CaO for superior a 53% e o de SiO_2 inferior a 40%, numa base anidra. Em trabalhos desenvolvidos por Kawamura et al., 1998, relativamente a ensaios de expansibilidade com solução de NaOH, o aumento do conteúdo em álcalis no gel leva a uma diminuição da expansibilidade, pelo que concluíram que é necessário hidróxido de cálcio para a formação de gel expansivo. Na Figura I.25 encontram-se diagramas triangulares da composição dos produtos analisados por estes autores.

A diminuição da expansibilidade com o aumento de álcalis é defendida por Thomas, 1998, referindo que se forma, na ausência de hidróxido de cálcio, um gel sílico-alcalino extremamente fluido e facilmente acomodado pela pasta de cimento. Por outro lado,

Kurtis et al., 1998, afirmam que o gel formado pela reacção da sílica com os álcalis tende a embeber água e expandir e que a reacção com o cálcio forma silicatos de cálcio hidratados não expansivos.

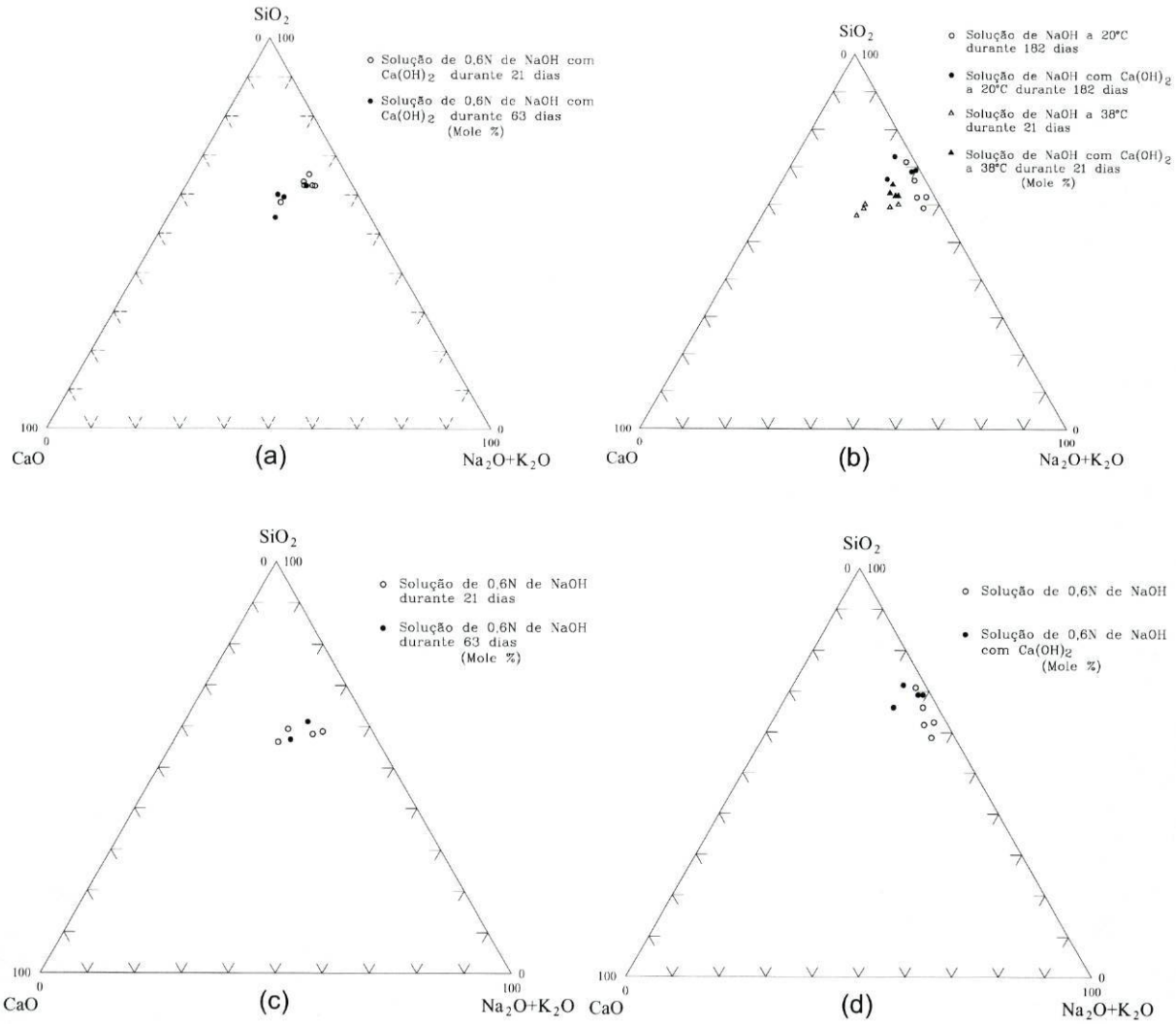


Figura I.25 – Diagramas triangulares de gel sílico-alcalino em vários grãos de agregado reactivo em: (a) argamassas imersas em solução de 0,6 N de NaOH, com $Ca(OH)_2$, para 21 e 63 dias, a 38°C; (b) solução de 0,6 N de NaOH, com e sem $Ca(OH)_2$, para 182 dias, a 20°C, e 21 dias, a 38°C; (c) argamassas imersas em solução de 0,6N de NaOH para 21 e 63 dias, a 38°C; (d) argamassas imersas em solução de NaOH para 182 dias, a 20°C (Kawamura et al., 1998).

Diamond, 2000, refere a variada composição química do gel essencialmente no que respeita ao conteúdo em cálcio. Defende a existência de duas fases, tendo a fase rica em cálcio fraca capacidade de expansão e sendo a fase expansiva composta essencialmente por potássio ou sódio e silício e um baixo conteúdo em cálcio.

Por outro lado, Rivard et al., 2000, não encontraram relação entre a quantidade de gel identificada petrograficamente e a expansão verificada. Reconhecem, no entanto, que o gel pode ter sido lixiviado durante o armazenamento e preparação das amostras. Afirmam que são a porosidade do betão e o grau de fissuração os factores que influenciam o nível de expansão. O gel que se forma em poros e fissuras exerce pequena pressão, excepto numa fase inicial, em que contribui para a progressão das fissuras já formadas.

A composição do gel é variável segundo SHRP, 1994, e tal como discutido pelos diferentes autores. Bérubé e Fournier, 1986, referem a variação de composição do gel, que pode conter entre 28 e 68% de SiO_2, 0,1 a 60% de CaO, 0,4 a 19% de K_2O e 0 a 20% de Na_2O.

Helmuth e Stark, 1992, propõem um modelo em que o gel é uma mistura de duas fases de composição bem definida: um gel sílico-alcalino hidratado e um silicato de cálcio hidratado, pobremente cristalino, contendo um baixo teor em álcalis e percentagem variável de água. A composição das duas fases, não considerando a existência de água, é de 17% de (Na_2O+K_2O), 83% de SiO_2 para o silicato alcalino hidratado e aproximadamente 6,6% de (Na_2O+K_2O), 52,6% de CaO e 40% de SiO_2 para o silicato de cálcio hidratado.

Brouxel, 1993, em betão envelhecido em condições naturais, obteve uma composição para o gel que variava de 27 a 95% de SiO_2, 0 a 3% de Na_2O, 0,5 a 21% de K_2O e 3 a 66% de CaO, sendo o teor em cálcio sempre superior ao de álcalis.

Thaulow et al., 1996, afirmam que a composição do gel será de 53 a 63% de silício, 20 a 30% de cálcio e cerca de 15% de álcalis, mantendo uma relação constante de 70:15:15.

Em análises à microssonda electrónica, Chatterji e Thaulow, 2000, verificaram que o gel pode conter até 50% de álcalis e 15 a 20% de cálcio.

Na Figura I.26 pode observar-se a composição do gel, em diagramas triangulares, obtida por Kawamura et al., 2001.

Nestes compostos estão sempre presentes o silício, que predomina, e os álcalis. A presença de sódio ou potássio está também relacionada com a composição do cimento aplicado, se é mais rico num ou noutro elemento. Não deve ser ainda ignorada a possível contribuição dos agregados para os álcalis, cuja natureza condiciona necessariamente o elemento que poderá estar presente no gel. O cálcio surge em muitos dos casos expostos na bibliografia, mas a sua proporção parece estar relacionada com o percurso do gel dentro do betão.

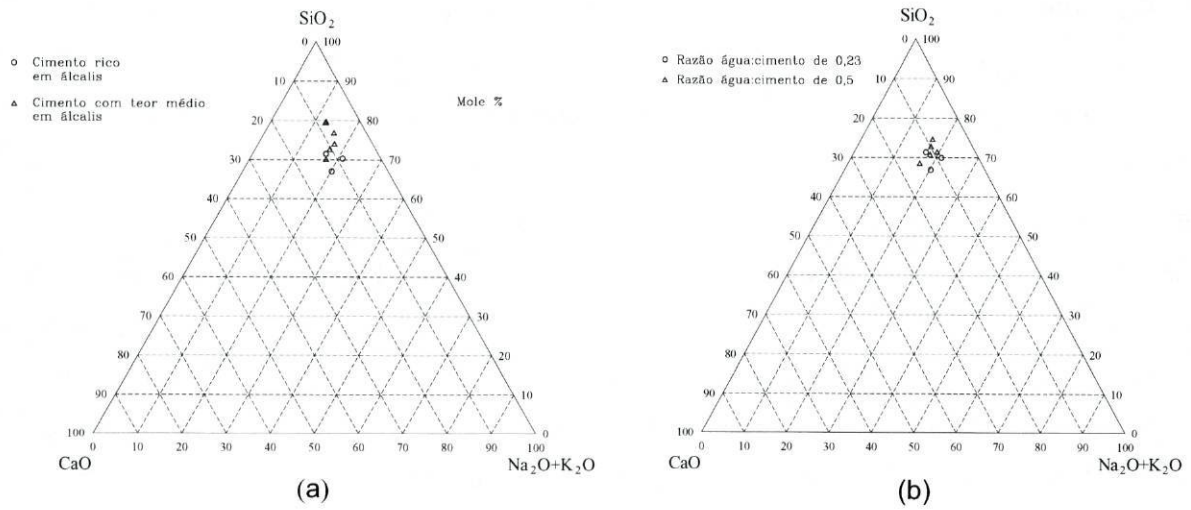


Figura I.26 – Diagramas triangulares de geles sílico-alcalinos em partículas de agregado reactivo, em argamassas com 56 dias: (a) com razão água/cimento de 0,23; (b) com cimento rico em álcalis (Kawamura et al., 2001).

Destes resultados conclui-se que não existe uma composição uniforme do gel sílico-alcalino, nem quanto aos elementos químicos que o constituem, nem no que respeita as suas percentagens e proporções relativas.

Capítulo 4. DIAGNÓSTICO DAS REACÇÕES ÁLCALI-SÍLICA

4.1. Generalidades

A identificação da existência no betão de reacções álcali-sílica é feita tanto por inspecção visual das superfícies expostas *in situ* como por observação e análise de amostras e lâminas delgadas em laboratório.

Segundo o relatório da BCA, 1992, quando se inicia o estudo do betão de uma obra, todos os mecanismos que podem originar deterioração devem ser considerados, e não deve ser excluída qualquer causa até que a investigação mostre que esta não pode ter contribuído para a deterioração.

A investigação *in situ* não pode, por si só, confirmar ou excluir a presença de reacções álcali-sílica, sendo necessário realizar amostragem e ensaios antes de fazer a interpretação definitiva. O objectivo da investigação *in situ* é verificar se a estrutura exibe manifestações de danos causados por reacções álcali-sílica ou por outros mecanismos de deterioração.

Os principais indícios de reacção álcali-sílica numa estrutura são a fissuração (BRE Digest 330, 1991; LCPC, 1994), a expansão da estrutura, a presença de eflorescências e exsudações e os *pop-outs*, embora nenhum destes indícios seja exclusivo deste tipo de reacções, pois pode ter causas muito diversas (BCA, 1992). Os dados detectados por inspecção macroscópica devem, por esta razão, ser confirmados pela análise das amostras em laboratório.

Por exame microscópico podem ser detectadas microfissuras e halos de descoloração nas partículas de agregado (ACI, 1998) e a existência de gel sílico-alcalino ou de halos de reacção em volta dos agregados reactivos, com ausência de portlandite. De acordo com Sims, 1987, a existência de gel sílico-alcalino é uma característica diagnóstica de reacção álcali-sílica, mas a existência de agregados potencialmente reactivos apresentando descoloração, fracturação interna ou halos de reacção constituem características apenas indicativas, uma vez que estes aspectos podem ter outras causas. Apresentam-se de seguida as principais características do betão que permitem detectar a presença de reacções álcali-sílica no betão deteriorado.

4.2. Inspecção das estruturas *in situ*

4.2.1. Fissuração e abertura das fissuras

A fissuração ocorre sempre que as tensões de tracção no betão excedem a sua capacidade resistente. Embora uma das manifestações de reacções álcali-sílica seja a existência de fissuras, estas podem ter outras origens relacionadas com as cargas exercidas sobre a estrutura ou com variações de volume diferenciais no betão ou ser uma consequência de factores resultantes, por exemplo, da corrosão das armaduras, da ocorrência de gelo/degelo ou do ataque por sulfatos (BCA, 1992; ACI, 1998).

Por vezes é considerado que o maior dano causado pelas reacções álcali-agregado não é a expansão, mas a fissuração e perda de integridade resultantes da expansão. Por outro lado, a fissuração localizada não acompanha necessariamente a expansão devida a reacções álcali-sílica (Diamond e Thaulow, 1974). A fissuração pode, pois, ser justificada pela ocorrência de reacções álcali-sílica se este facto for confirmado por outros métodos, dos quais se destaca a análise petrográfica (BRE Digest 330, 1991). A fissuração típica das reacções álcali-sílica é designada por *craquelé* ou *map cracking* porque forma um padrão em polígonos, com traçado errático, de malha densa e frequentemente hierarquizada, semelhante aos limites que se encontram nos mapas (Figura I.27) (BRE Digest 330, 1991; CEB, 1992).

A abertura das fissuras aumenta com o avanço da reacção, podendo atingir alguns milímetros (Le Roux et al., 1999; LCPC 1999). A sua distribuição no betão não é uniforme e, por vezes, reflecte a geometria dos elementos de betão e a disposição das armaduras (BRE Digest 330, 1991; Taylor, 1997). As fissuras, que se localizam geralmente nos primeiros 25 a 50 mm superficiais (Hobbs, 1988; Idorn et al., 1992), podem atingir maiores profundidades em estruturas maciças (LCPC, 1994). Para além de constituírem uma manifestação das reacções álcali-sílica, as fissuras contribuem para acelerar os efeitos ambientais e para a redução da resistência do betão.

Ao longo destas fissuras, pode por vezes ser observada uma cor mais escura ou uma descoloração do betão, em especial quando existe humidade, o que constitui também um indício de ocorrência de reacções álcali-sílica (BCA, 1992; Le Roux et al., 1999; LCPC, 1999).

A abertura das fissuras pode evoluir de 0,5 mm/ano e pode atingir 10 milímetros em casos graves, parâmetro importante na avaliação da urgência da intervenção (Larive, 1990).

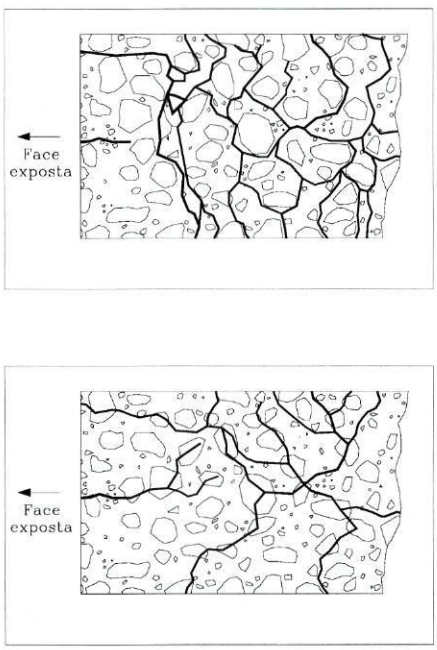


Figura I.27 – Fissuração macroscópica devida a reacções álcali-sílica (BCA, 1992), em representação esquemática de um corte numa carote de betão.

4.2.2. Expansão da estrutura

Quando a reacção se desenvolve em vários locais da estrutura, pode ocorrer expansão generalizada. A expansão diferencial origina fissuras entre a zona que expande e a que não é afectada. Sendo a expansão do betão provocada pela expansão do gel, depende da disponibilidade de água para absorção pelo gel.

A formação de produtos expansivos no interior do betão e a evolução da fissuração nas partículas de agregado e na pasta de cimento que as rodeia podem ter efeitos à escala macroscópica numa estrutura (Idorn et al., 1992). As expansões detectadas podem ser centimétricas.

Em ensaios com provetes retirados de estruturas e submetidos a condições de humidade controladas, a expansão atingiu 3 mm/m em casos graves de reacção álcali-sílica (The Institution of Structural Engineers, 1992), sendo tipicamente de 0,2 mm/m. Em obras em que existe um volume maciço de betão, as tensões provocadas pela expansão podem atingir valores que poderão encontrar-se entre 3 e 10 MPa (Larive, 1990; Poole, 1992; Rendell et al., 2002), embora esta afirmação não reúna o consenso dos investigadores. A evolução da expansão é importante para a determinação da velocidade de degradação do betão (Larive, 1990). Em casos extremos, podem verificar-se movimentos e deformação da estrutura.

4.2.3. Exsudações e eflorescências

As exsudações de gel sílico-alcalino não são frequentes e testemunham a existência de água em quantidade suficiente para permitir o seu transporte até à superfície (St John et al., 1998). O gel exsudado é inicialmente transparente, mas, por carbonatação em contacto com o ar, dá lugar a um depósito branco. As análises químicas destas exsudações e depósitos indicam que são compostos principalmente por sílica e álcalis, frequentemente com quantidades variáveis de cálcio (Gillot, 1975). É de notar que, embora as exsudações permitam identificar a existência de gel, não significam ocorrência de expansão significativa que possa causar danos à estrutura.

As eflorescências resultam do transporte de humidade através do betão e evaporação à superfície, na qual os sais são depositados por precipitação a partir da solução saturada (Jakobsen e Thaulow, 2000). Em certas condições, é usual formar-se calcite, brucite (hidróxido de magnésio) ou gesso e também trona, podendo esta estar eventualmente associada a reacções álcali-sílica.

4.2.4. *Pop-outs*

Os *pop-outs* são pequenas crateras de forma cónica, de 10 a 20 milímetros de diâmetro, que surgem devido à expansão de partículas de agregado ou de gel próximo da superfície exposta do betão, sendo visível o agregado ou um produto esbranquiçado na base do *pop-out* (LCPC, 1999) (Figura. I.28). Podem dever-se a reacções álcali-sílica, mas também podem ser originados pela acção do gelo em partículas porosas saturadas de água (Berra e Bertacchi, 1991; ACI, 1998), pelo que a caracterização das partículas de agregado ou a existência de gel são factores a considerar para a determinação da causa do fenómeno (BCA, 1992).

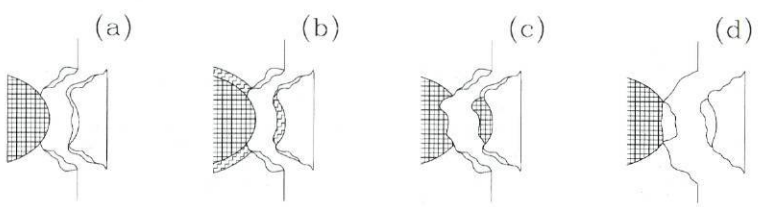


Figura I.28 – Esquema de formação de *pop-out* devido a reacção álcali-sílica (Idorn, 1967).

Pode ainda ocorrer, embora seja um fenómeno raro, a escamação do betão em camadas, nas superfícies expostas.

4.3. Estudo em laboratório

4.3.1. Caracterização macroscópica

O estudo de amostras em laboratório permite identificar um conjunto de características consistentes entre si, mas não diagnósticas se consideradas individualmente; que incluem a observação de manchas de humidade na superfície dos tarolos de sondagem, de fissuração, de fracturação das partículas de agregado e escurecimento da pasta de cimento em torno destas ou dos poros (BCA, 1992).

Quando as amostras são transportadas para o laboratório, e antes de serem serradas para a preparação de lâminas e realização de ensaios, é necessário proceder à análise dos tarolos e fazer a respectiva descrição. As principais características são anotadas numa ficha que deve incluir toda a informação recolhida, de acordo com a norma ASTM C 856-04, 2004 (Anexo A).

A análise macroscópica deve ser feita através da inspecção visual dos tarolos serrados longitudinalmente (Jepsen e Christensen, 1989). Esta observação fornece informação quanto à homogeneidade e constituintes do betão e, por vezes, quanto à existência de reacções secundárias.

4.3.2. Análise petrográfica

O diagnóstico da ocorrência de reacções álcali-sílica não pode cingir-se à observação macroscópica do betão, mas deve também basear-se em outras técnicas, como a análise petrográfica, com recurso a métodos microscópicos, complementando a descrição sistemática do betão à vista desarmada (Jensen e Sibbick, 2001; RILEM AAR-1, 2003). O exame microscópico do betão é provavelmente o único meio de identificação inequívoca da ocorrência de reacções álcali-sílica (Sims, 1987).

Em relação às reacções álcali-sílica, as três características principais a observar em lâmina delgada são a fissuração, a presença de gel sílico-alcalino e os indícios de reacção nas partículas de agregado (Figura I.29). Para uma identificação inequívoca da existência de reacções, aquelas três características devem estar presentes (Sims, 1987; BRE Digest 330, 1991; St John et al., 1998).

Ao microscópio, as fissuras atravessam ou contornam as partículas de agregados ou, por vezes, irradiam das mesmas (Gillot, 1975; Hobbs, 1988) (Figura I.30). Existe frequentemente gel em fissuras e poros e, por vezes, é possível observar orlas de reacção nas partículas de agregado. Estas orlas mais escuras, situadas na interface pasta de cimento-agregado, são compostas por gel amorfo que dá lugar a orlas mais

claras, para o interior das partículas de agregado, constituídas por gel criptocristalino (Jensen, 1993).

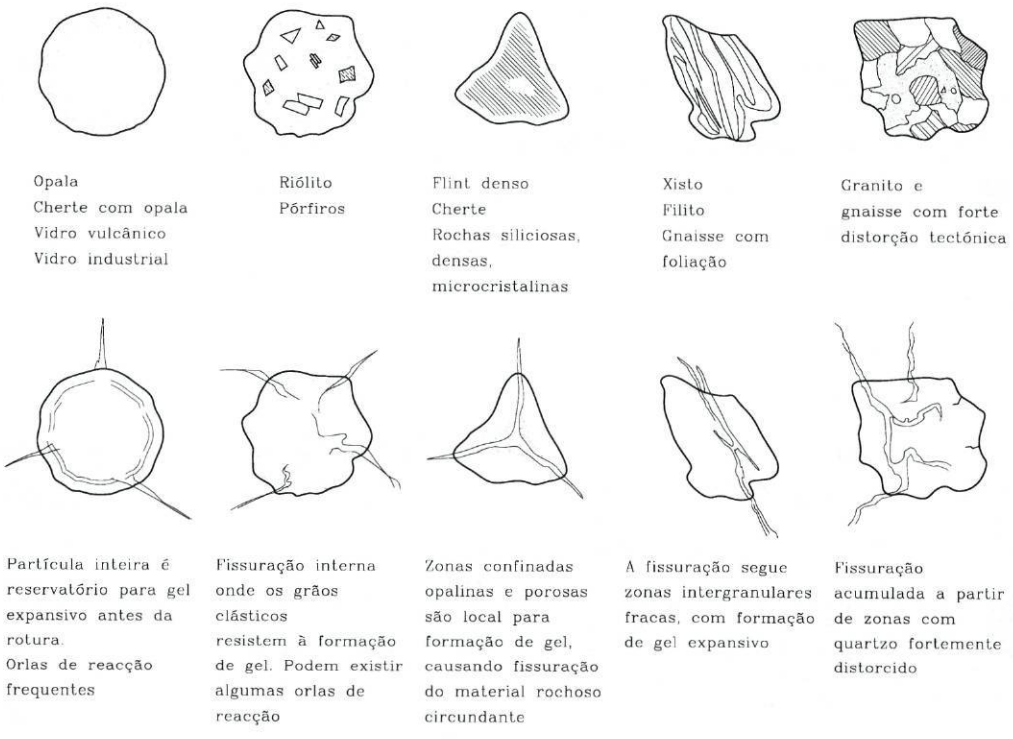


Figura I.29 – Esquemas da textura, morfologia e composição dos tipos de rocha potencialmente reactivos. Características da microfissuração no interior e irradiando das partículas siliciosas de diferente mineralogia e morfologia, quando afectadas por reacções álcali-sílica expansivas (Idorn et al., 1992).

Para a descrição sistemática das lâminas de betão, pode seguir-se a recomendação da norma ASTM C856-04, 2004 (Anexo A).

4.3.3. Ensaio de fluorescência do acetato de uranilo

Existem alguns métodos de coloração utilizados para uma rápida detecção de gel sílico-alcalino no betão. No entanto, estes métodos não são ainda utilizados de forma generalizada para um diagnóstico, uma vez que permitem identificar gel em obras nas quais a ocorrência de reacções álcali-agregado não causou danos significativos. Estes métodos têm ainda a desvantagem de utilizar reagentes potencialmente perigosos para a saúde (BCA, 1992).

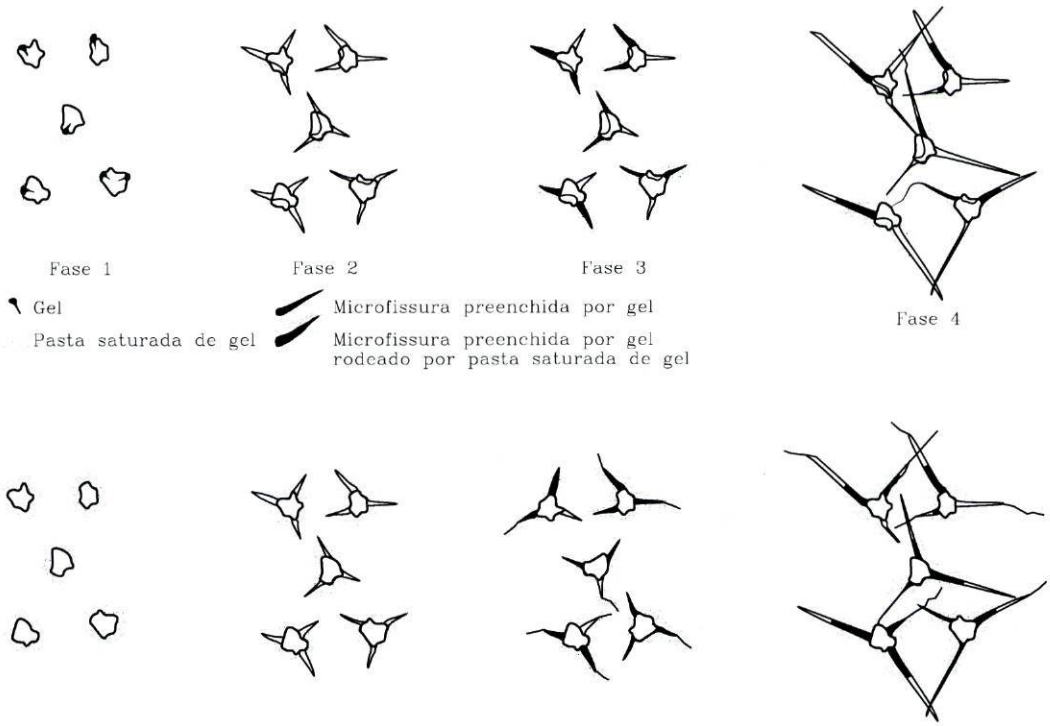


Figura. I.30 – Modelo teórico do modo como a fissuração pode ser induzida pela ocorrência de reacções álcali-sílica (Hobbs, 1988).

Um dos métodos mais comuns é o ensaio de fluorescência do acetato de uranilo. É um método que foi desenvolvido em finais da década de 1980 (Natesaiyer e Hover, 1988; 1989) e consta do anexo à norma ASTM C 856-04,2004. Baseia-se no facto de alguns catiões, como o UO_2^{++}, poderem substituir, no gel sílico-alcalino, os iões Na^+, K^+ ou Ca^{2+} e fluorescerem sob luz ultravioleta.

O método consiste, em princípio, em aplicar uma solução de acetato de uranilo a uma superfície de fractura fresca do betão e observar a fluorescência com luz ultravioleta, com lâmpadas especialmente concebidas para o efeito. O método tem algumas limitações e deve ser usado em conjunto com outros métodos, como a análise petrográfica.

Exige também equipamento próprio de protecção da pele e dos olhos e iluminação especial para visualização da fluorescência da substância aplicada. Este método pode ser utilizado *in situ*, com equipamento que produza uma zona escura, ou em laboratório, sobre amostras de betão em fragmentos ou em tarolos resultantes da furação à rotação.

Capítulo 5. SITUAÇÃO EM PORTUGAL

No nosso País as características físicas e químicas de um agregado para betão devem estar em conformidade com as exigências estipuladas na Especificação LNEC E 373, 1993 (Quadro I.19).

Verifica-se que a análise petrográfica está contemplada nesta norma como um dos ensaios a efectuar para avaliação da qualidade de um agregado. A análise deve ser feita de acordo com a Especificação LNEC E 415, 1993, em que, à semelhança de normas existentes noutros países, está incluída a designação e descrição das rochas mais utilizadas como agregados. Nesta especificação, encontra-se uma relação dos minerais e rochas considerados potencialmente reactivos (Quadro I.20). Merece destaque o facto de na mesma especificação estar definido quartzo cataclástico como "quartzo que esteve sujeito a esforços elevados que lhe provocaram deformação da malha cristalina e/ou partição microcristalina". Quanto às características microscópicas, o ângulo de extinção ondulante permite o agrupamento nos seguintes escalões:

- 0 a 15° – fraca extinção ondulante,
- 15 a 25° – moderada extinção ondulante,
- 25 a 35° – forte extinção ondulante.

O relatório CR 1901, 1995, refere que em Portugal, tal como na Suiça e em Espanha, foram identificados poucos casos de estruturas com danos atribuíveis a reacções álcali-sílica. Foram diagnosticados alguns casos em barragens antigas, no pavimento de um aeroporto e no betão de um viaduto. A sílica potencialmente reactiva está presente, em Portugal, essencialmente no quartzo deformado associado a granitos, granodioritos, quartzitos, gnaisses e metapelitos. A calcedónia e o cherte aparecem associados em geral a formações xistosas e quartzíticas e a areias aluviais. Neste relatório é ainda referida a sílica microcristalina (*flint*), que ocorre nos calcários compactos do Jurássico Superior e Cretácico, e o cherte em rochas vulcânicas.

A observação da Carta Geológica de Portugal fornece à partida indicações globais sobre a distribuição das formações geológicas potencialmente reactivas aos álcalis. Estas formações predominam essencialmente nas regiões do Minho, Trás-os-Montes, Beira Alta e Alentejo.

Quadro I.19 – Características e verificação da conformidade dos inertes (Especificação LNEC E 373, 1993).

Característica		**Documento normativo**	**Valor a satisfazer**
Resistência mecânica [1] dos inertes grossos medida através de	- resistência à compressão ou	NP 1040	≥ 50 MPa
	- resistência ao esmagamento ou	NP 1039	≤ 45%
	- desgaste Los Angeles [2]	E 237	≤ 50%
	- degradação pelo sulfato de sódio ou de magnésio [3]	NP 1378	SO_4Na: perdas peso < 10% SO_4Mg: perdas peso <15% ao fim de 5 ciclos de ensaio
Absorção de água [1] e massa volúmica	- dos inertes grossos	NP 581	absorção ≤ 5,0%
	- de areias	NP 954	absorção ≤ 5,0%
Quantidade de partículas ou materiais prejudiciais	- de matéria orgânica	NP 85	não prejudicial
	- de partículas muito finas e matéria solúvel	NP 86	areia natural ≤ 3,0% areia britada ≤ 10,0% godo ≤ 2,0% brita ≤ 3,0%
	- de partículas de argila	E 196	≤ 2,0% de massa do ligante
	- de partículas friáveis	NP 1380	areia ≤ 1,0% godo ou brita ≤ 0,25%
	- de partículas moles	E 222	godo ou brita ≤ 5,0%
	- de partículas leves [1] [3]	NP 953	areias ≤ 0,5% godos ou britas ≤ 1,0%
Índice volúmico		E 223	godo ≥ 0,12 brita ≥ 0,15
Reactividade potencial com os álcalis do cimento	Processo absorciométrico	E 159	negativo
	Processo da barra de argamassa	NP 1381	extensão ≤ $1,0x10^{-3}$ ao fim de 6 meses
	Análise petrográfica [4]	E 415	negativo
Reactividade com os sulfatos [5]		E 251	provete de argamassa: - ausência de fendilhamento - extensão < $5,0x10^{-3}$ provete de rocha: - extensão < $1,0x10^{-3}$ ao fim de 6 meses
Teor de cloretos		E 253	[6]
Teor de sulfuretos		NP 2107	[7]
Teor de sulfatos		NP 2106	
Teor de álcalis		NP 1382	
Análise granulométrica		NP 1379	
Baridade		NP 955	[8]
Teor de água total		NP 956	[9]
		NP 957	[10]

[1] Os valores exigidos por esta característica não se aplicam aos inertes leves.
[2] O desgaste de Los Angeles não é em princípio significativo para inertes calcários.

(3) Os ensaios de degradação pelo sulfato de sódio ou de magnésio e de quantificação das partículas leves são exigidos quando o betão está sujeito a ambientes em que a temperatura pode atingir, com frequência, valores inferiores a -5ºC ou se pretendem obter betões de elevada resistência à penetração de cloretos.
(4) Na Especificação LNEC E 415 indicam-se os minerais e rochas com formas de sílica potencialmente reactivas ou fornecedoras de álcalis.
(5) O ensaio de reactividade com os sulfatos é exigido quando os betões ficam em contacto com a água do mar ou com águas ou solos que contenham sulfatos em teores iguais ou superiores aos da água do mar e quando os inertes exibem feldspatos.
(6) O teor de cloretos dos inertes deve ser somado ao teor de cloretos dos outros constituintes do betão de forma que o teor por massa de cimento seja inferior a 1%, 0,4% e 0,2% no caso do betão simples, armado e pré-esforçado, respectivamente.
(7) O teor de sulfuretos, sulfatos e álcalis dos inertes deve ser somado aos correspondentes teores determinados nos outros componentes do betão (com excepção do cimento) e o valor final não deve exceder as seguintes percentagens referidas à massa do cimento e das adições:

Cimento	Sulfuretos (expresso em S)	Sulfatos (expresso em SO_3)	Álcalis* (expresso em Na_2O)
Tipo I	0,2	0,5	0,6
Tipo II	0,0	0,5	0,6
Tipo III	0,0	1,0	-
Tipo IV	0,2	2,0	-

* Esta determinação será dispensável se os inertes satisfizerem as exigências do quadro I.19 no que respeita à reactividade potencial com os álcalis do cimento.

(8) A classificação dos inertes em classes granulométricas é feita na Especificação LNEC E 355.
(9) A baridade é usada para definir ou controlar a composição do betão.
(10) O teor de água é usado parra corrigir, quando necessário, a água de amassadura.

Quadro I.20 – Rochas e minerais com formas de sílica potencialmente reactivas (QT – quartzo tectonizado) (Especificação LNEC E 415, 1993).

Minerais	Rochas
Opala	Jaspe
Opala CT (cristobalite, tridimite)	Lidito
Obsidiana	Ftanito
Sílex	Diatomito
Cherte	Xisto silicioso
Calcedónia	Filito – com QT, cherte ou sílex
Quartzo tectonizado (QT)	Grauvaque – com QT, cherte ou sílex
	Corneana – com QT, cherte ou sílex
	Quartzito – com QT, cherte ou sílex
	Granitóides com QT
	Vulcanitos (riólito, dacito, andesito, basalto)
	Calcário com sílex e cherte
	Dolomito com sílex ou cherte

Silva, 1992, na sua tese de doutoramento, faz um zonamento de Portugal Continental. Considera que as rochas ígneas predominantes pertencem às famílias dos granitos e dos gabros e ocupam cerca de 30% do território. Às rochas plutónicas intermédias a ácidas (granito calco-alcalino, granodiorito, sienito), gnaisse e granulito

atribui um de grau de alterabilidade reduzida e às rochas plutónicas ácidas (granito alcalino e hiperalcalino) um grau de muito pequena alterabilidade. O mesmo autor cria mapas de zonamento com base na potencialidade das rochas para originarem reacções álcali-agregado nos betões. O zonamento baseia-se na existência de sílica potencialmente reactiva nas rochas e também na percentagem da área ocupada por essas rochas.

Quanto à presença de álcalis, na Especificação LNEC E 415, 1993, está considerada uma relação de minerais e rochas potencialmente fornecedores de álcalis, que podem participar nas reacções álcali-sílica (Quadro I.21).

Quadro I.21 – Rochas e minerais potencialmente fornecedores de álcalis (Especificação LNEC E 415, 1993).

Minerais	Rochas
Sanidina (K) Ortoclase (K) Microclina (K) Leucite (K) Micas (K) Albite (Na) Oligoclase (Na) Nefelina (Na) Sodalite (Na)	Granitóides Sieníticas Traquíticas Corneânicas feldspáticas Leptiníticas Arcósicas Grauvacóides

O estudo desenvolvido por Silva, 1992, indica que existe no nosso País uma maior concentração de rochas potencialmente fornecedoras de álcalis nas regiões do Minho, Douro Litoral, Beira Alta e Baixo Alentejo e refere ainda que é de prever que a maior contribuição de álcalis provenha de rochas da família dos granitos.

Como *case studies* em Portugal, encontram-se na bibliografia sobre o assunto referências a barragens em betão com agregados siliciosos – quartzitos, granitos alcalinos, xistos e grauvaques (CR 1901, 1995) - nomeadamente:

- Alto Ceira (Reis et al., 1996), terminada em 1949;
- Santa Luzia (Gomes et al., 2004), terminada em 1942;
- Pracana, terminada em 1951 (Neiva et al., 1995);
- Caia, concluída em 1967;
- Roxo, concluída em 1968;
- Cabril (Silva, 1992; Reis et al., 1996), concluída em 1954, com granitos alcalinos.

São ainda conhecidos outros exemplos de obras em betão com indícios de reacção álcali-agregado:

- O pavimento do aeroporto de Santa Maria (Reis et al., 1996), nos Açores, construído com agregados vulcânicos;
- O Viaduto Duarte Pacheco, em Lisboa, construído com agregados calcários nos quais existe sílica reactiva dispersa (Appleton e Costa, 2001);
- A Ponte da Figueira da Foz e viadutos de acesso (Rito e Appleton, 2000).

PARTE II

APRESENTAÇÃO DOS CASOS DE OBRA

Capítulo 1. BARRAGEM DO CABRIL

Pretende-se, neste capítulo, fazer a apresentação da Barragem do Cabril e seu enquadramento. Faz-se uma resenha histórica dos documentos, publicados sobre este aproveitamento hidroeléctrico, nomeadamente alguns artigos técnicos apresentados ao longo dos anos nos Congressos Internacionais de Grandes Barragens. Uma grande parte destes trabalhos têm carácter geral, ou seja, não se debruçam especificamente sobre um caso de obra mas sobre várias situações simultaneamente. A grande maioria de textos sobre a barragem do Cabril é de carácter confidencial e mostrou-se totalmente infrutífera a pesquisa de alguns documentos que seriam de grande interesse neste trabalho, como, por exemplo, os relativos à origem e processamento dos agregados, à composição do cimento, à composição global do betão e à composição dos materiais de injecção aplicados nos trabalhos de reparação. Os dados aqui apresentados resultam da consulta dos elementos disponíveis, incluindo brochuras publicadas à época da inauguração do aproveitamento.

1.1. Generalidades

A barragem do Cabril foi construída para fins hidroeléctricos nos primeiros anos da década de 1950 no Rio Zêzere, junto a Pedrógão Grande (Figura II.1.1).

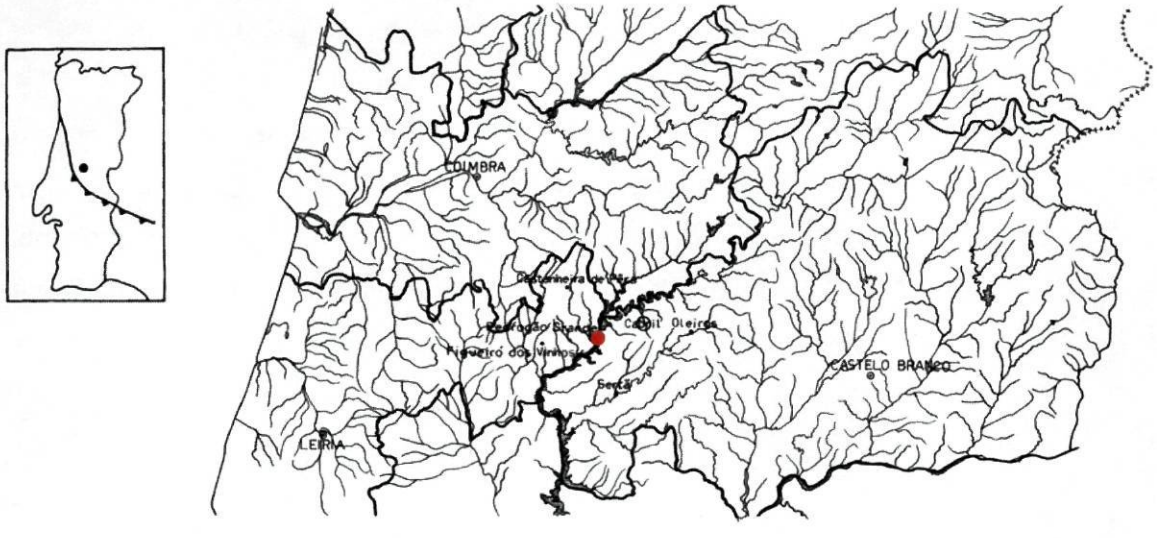
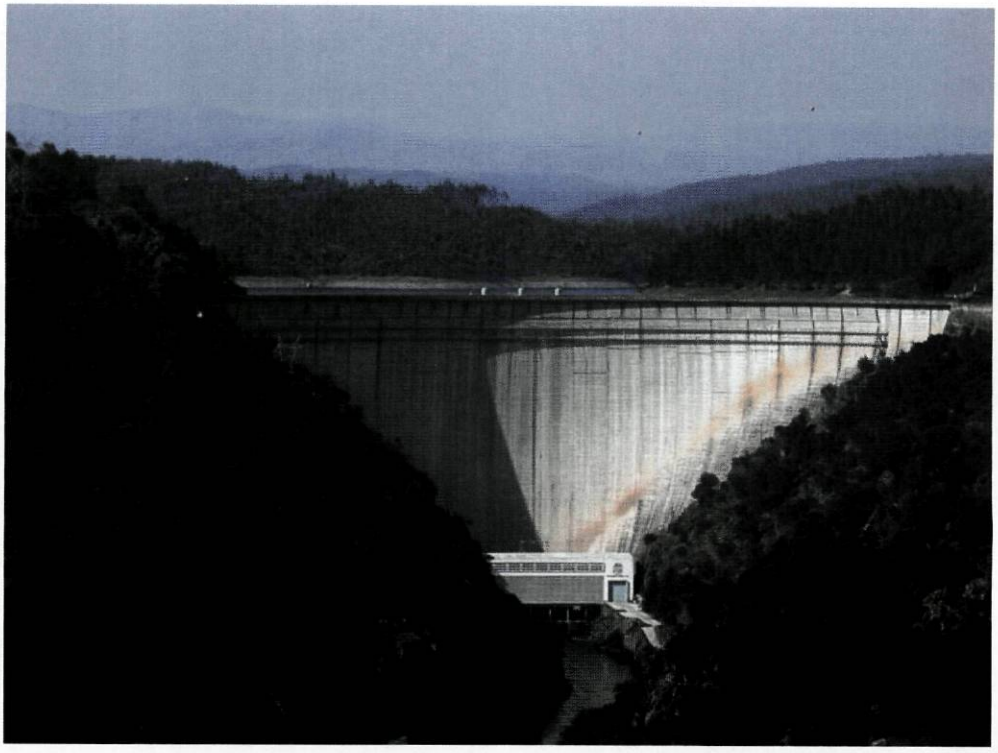


Figura II.1.1 – Localização da barragem do Cabril (adaptado de PNCOLD, 1992).

Trata-se da mais alta barragem portuguesa construída em betão, do tipo abóbada de dupla curvatura (Fotografia II.1.1), com 136 metros de altura máxima, 290 metros de desenvolvimento do coroamento e $360x10^3$ m^3 de volume de betão (PNCOLD, 1992).

A albufeira da barragem abrange uma área de $20.230x10^3$ m^2, tem 53 quilómetros de comprimento e capacidade bruta de $719x10^6$ m^3. A central, situada no pé de jusante da barragem, está equipada com dois grupos com capacidade instalada de 97 MW.



Fotografia II.1.1 – Imagem da barragem do Cabril, vista para Norte.

O corpo da barragem inclui quatro galerias horizontais e uma galeria de drenagem que acompanha a inserção da barragem, em ambas as margens e no fundo do vale, com acesso às galerias horizontais e ao paramento de jusante (Figura II.1.2). O custo global do aproveitamento, estimado na época, foi de cerca de quinhentos mil contos (Diário de Lisboa, 31 de Julho de 1954).

1.2. Descrição

A construção decorreu entre Setembro de 1952 e Dezembro de 1953, segundo a sequência apresentada na Figura II.1.3 (Teles, 1985). O empreendimento foi inaugurado a 31 de Julho de 1954.

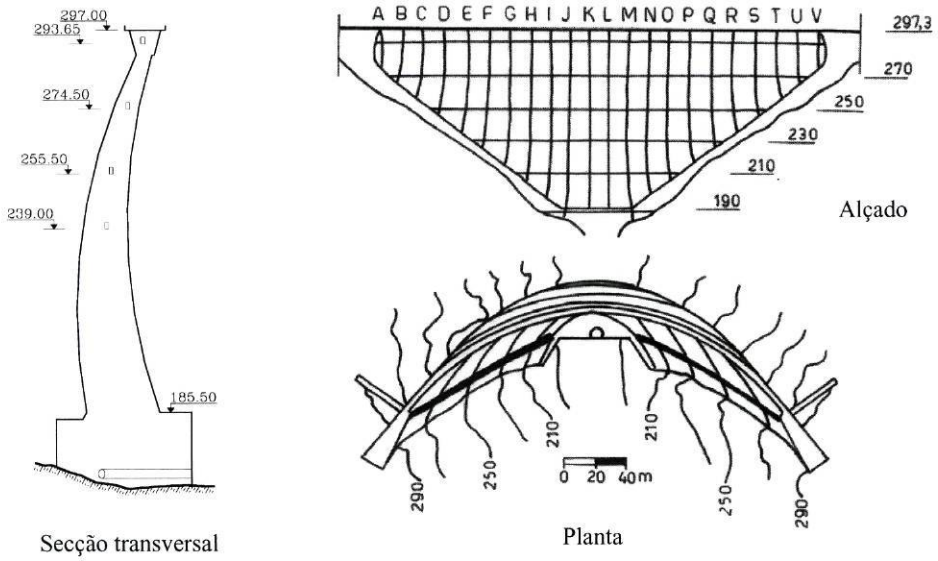


Figura II.1.2 – Representação esquemática em planta, corte e alçado da barragem do Cabril (adaptado de Rocha et al., 1959).

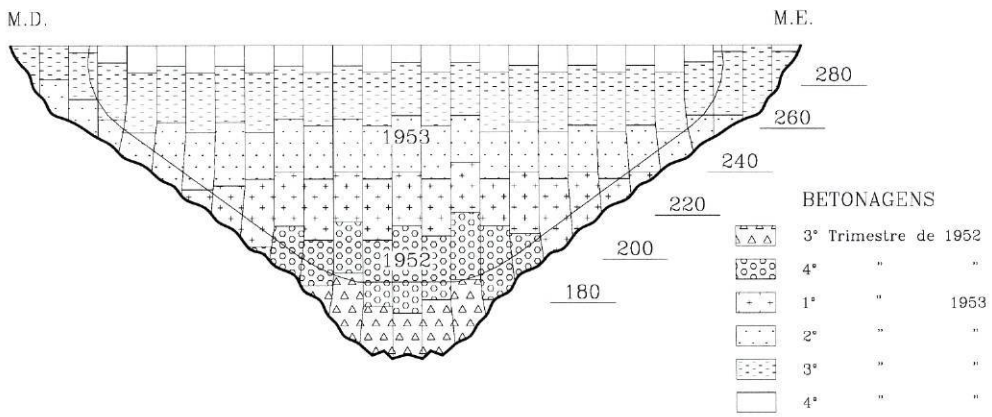


Figura II.1.3 – Faseamento da betonagem da barragem do Cabril (Teles, 1985).

Durante a construção ocorreram algumas alterações ao projecto inicial. A decisão de construir sobre o coroamento o tabuleiro para a estrada EN 238 (Pedrógão Grande – Pedrógão Pequeno) condicionou a forma da zona superior, com a consequente alteração da altura e da espessura do coroamento (WGPNCOLD, 1991).

A barragem foi monitorizada em duas fases. O sistema de observação, ou seja, o conjunto de dispositivos instalados para medição das grandezas relativas às acções, às propriedades dos materiais e às respostas das estruturas e suas fundações (definição actual, segundo a Portaria 847/93), colocado em 1952, consistia em (Xerez e Lamas, 1958; Rocha e Silveira, 1964; Xerez, 1970; Teles, 1985):

- Extensómetros tipo Carlson, para medição de extensões;
- Pares termoeléctricos, para medição das temperaturas;
- Alongâmetros à superfície e medidores de juntas Carlson, embebidos no betão, para medição de aberturas e deslizamento de juntas;
- Clinómetro, para medição de deslocamentos angulares;
- Pêndulos, para medição de deslocamentos relativos;
- Método geodésico e alinhamentos, para medição de deslocamentos absolutos;
- Nivelamentos de precisão, para medição de deslocamentos verticais.
- Mais tarde foram também colocados:
- Medidores de humidade, para medição do estado higrométrico;
- Medidores de juntas, nas fendas mais importantes, para caracterização do movimento de fissuras;
- Fotoclinógrafo, para registo de rotações;
- Cinco fios-de-prumo invertidos.

No paramento de jusante surgiram fissuras durante o primeiro enchimento da albufeira, predominando as horizontais ao longo das juntas de betonagem, a níveis próximos da cota 280 metros, 10 a 20 metros abaixo da cota do coroamento. Em 1960-61 realizaram-se trabalhos de tratamento das juntas de contracção e também da fundação (Silva, 1992). No início da década de 1980, ocorreram trabalhos de reparação no corpo da barragem com injecção de resinas epoxídicas (Rodur 510 e 600) para tratamento das fissuras (Silva, 1992) e foram introduzidos novos sistemas de observação:

- Três fios-de-prumo invertidos;
- Oito extensómetros de fundação do tipo *rockmeter.*

Os deslocamentos verificados ao longo do tempo, principalmente no fecho do arco do coroamento, foram inicialmente relacionados com a fissuração observada. A evolução dos deslocamentos verticais era, no entanto, fraca. Os deslocamentos horizontais progrediram inicialmente no sentido de jusante, mas, a partir da década de 1980, verificou-se a inversão do sentido dos deslocamentos, desenvolvendo-se então para montante. Por essa altura, as variações dos deslocamentos verticais tiveram um incremento considerável (Reis et al., 1996). A inspecção do interior das galerias revelou a existência de exsudações e impregnações semelhantes a geles sílico-alcalinos (Silva, 1992). De acordo com este autor e com trabalhos desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Reis et al., 1996), a deterioração do betão terá resultado da ocorrência de reacções álcali-sílica, de tipo lento/retardado, reacções dos sulfatos com a

alumina, ambos resultantes da alteração do agregado, e reacções dos sulfatos com os silicatos de cálcio hidratados da pasta de cimento.

1.3. Geomorfologia

No local onde foi construída a barragem, que se situa nas Cartas Topográficas à escala 1:25.000, números 276 e 277, do Instituto Geográfico do Exército, o vale é encaixado, com orientação geral NNE-SSW, com a margem esquerda mais abrupta e de cotas mais elevadas do que a margem direita (Fotografia II.1.2). A jusante da barragem é visível a morfologia acidentada que caracteriza a zona, com escassos terrenos agrícolas nas encostas do vale encaixado onde corre o rio Zêzere, e intensa vegetação constituída por árvores e arbustos. Devido à alteração do granito e das suas diaclases, que condicionaram a evolução geomorfológica das encostas, observam-se blocos de rocha soltos, alternando com saibro granítico, o que origina a topografia irregular do local. Ocorrem, por vezes, escorregamentos de pequenos volumes de terreno constituídos por solo de vertente.

1.4. Geologia

O local onde foi construída a barragem e a pedreira de onde foram extraídos os agregados para o betão enquadram-se na Zona Centro-Ibérica, num maciço granítico que instruiu formações do Xisto-grauváquico (Figura II.1.4). Não existe ainda cartografia geológica à escala 1:50.000 da área.

O maciço granítico faz parte do alinhamento Casais-Pedrogão Grande, referido por Ferreira et al., 1987, e está situado nas imediações da sutura que separa a Zona Centro Ibérica da Zona de Ossa Morena. É classificado como um granitóide pré-orogénico, com idade compreendida entre 482 e 582 Ma.

De acordo com a Carta Neotectónica à escala 1:1.000.000 (Cabral e Ribeiro, 1989), o local da barragem situa-se um pouco a Este da sutura Porto-Tomar, não existindo no local indicação da ocorrência de falhas activas. Estão, no entanto, cartografadas duas falhas activas nas proximidades, ambas com orientação NE-SW, sendo, a que ocorre a Norte, uma "falha certa de inclinação desconhecida" e, a que ocorre a Sul, uma "falha provável, também de inclinação desconhecida".

No maciço granítico, que aflora numa área de cerca de 4,5 quilómetros quadrados, predomina um granito de duas micas, leucocrático, de grão médio a grosseiro, localmente porfiróide e com matriz de granularidade média (Pereira, 1987) encaixado no seio de rochas greso-pelíticas que metamorfiza (Pereira, 1984a). As auréolas de metamorfismo de contacto são caracterizadas por porfiroblastos de cordierite, andaluzite e biotite.



Fotografia II.1.2 – Fotografia aérea digital do local da barragem do Cabril e da pedreira (Instituto Geográfico do Exército, sem escala).

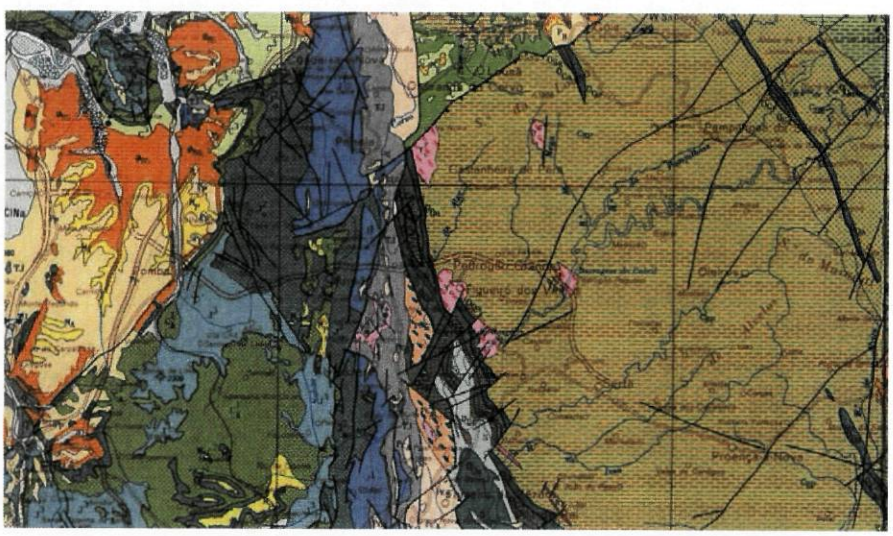
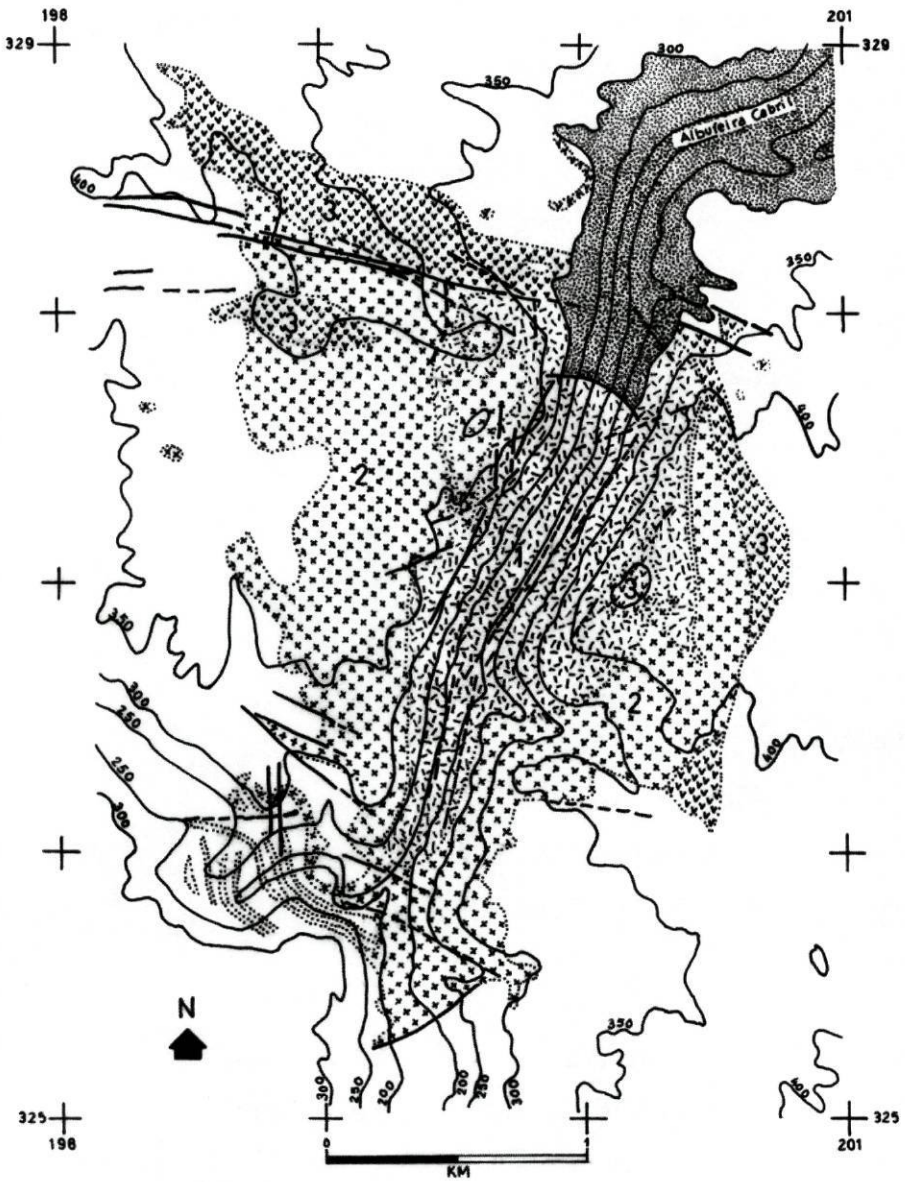


Figura II.1.4 – Excerto da carta geológica do local da barragem (Carta Geológica de Portugal, 1992, Escala 1:500.000, Folha Norte).

Este maciço não homogéneo foi designado por "Maciço Granítico de Pedrógão Grande" e cartografado por Pereira, 1987. Este autor refere que se observa uma diferenciação nítida desde as zonas mais baixas do vale para as de cota mais elevada, sendo a fácies de bordadura caracterizada pelo desaparecimento da biotite e da clorite e permanência da moscovite (Pereira, 1984a). Distingue três tipos de granito (Figura II.1.5):

- O granito da Ponte do Pedrógão;
- O granito de Pedrógão Grande;
- O granito da Senhora da Confiança.



1 – Granito da Ponte do Pedrogão; 2 – Granito de Pedrógão Grande;
3 – Granito da Sra. da Confiança

Figura II.1.5 – Cartografia do "maciço granítico de Pedrógão Grande" (Pereira, 1987).

O granito da Ponte do Pedrógão, que se observa na parte interior do plutonito, é um granito de grão médio a grosseiro, de duas micas, levemente orientado, que apresenta indícios de deformação nos cristais de quartzo e de moscovite. A biotite encontra-se cloritizada.

O granito de Pedrógão Grande é um granito de grão médio, essencialmente moscovítico, que mostra também deformação dos cristais de quartzo e moscovite. Nos dois granitos são frequentes os cristais de turmalina.

O granito da Senhora da Confiança é um granito de grão fino, aplítico, cartografado na margem direita e às cotas mais altas da margem esquerda do rio Zêzere.

O maciço de fundação da barragem terá sido estudado inicialmente na década de 1940, embora não tenha sido possível localizar o relatório respectivo. Foi feito o reconhecimento geológico mais tarde, nas décadas de 1970 e 1980, quando da preparação dos trabalhos de reparação, de que resultou o relatório de Neiva, 1981, acompanhado de levantamento geológico (Figura II.1.6).

O maciço de fundação da barragem é constituído por granito grosseiro de duas micas, predominantemente moscovítico, por vezes com tendência porfiróide, com megacristais de feldspato. A montante da barragem pode observar-se o contacto com o Xisto-Grauváquico. O granito é em geral muito diaclasado, sendo as famílias dominantes verticais e subverticais, sem preenchimento (Neiva, 1981):

- N-S a N17°E; vertical;
- N50°-70°E; 75°SE a vertical;
- N20°-55°W; 40°-85°SW;
- N75°-85°W; 40°-80°NNE;
- N50°-75°W; 10°-35°NE;
- N20°-30°W; 67°-75°ENE.

Existem, ainda, com menor representatividade, diaclases sub-horizontais.

O maciço é cortado por falhas agrupadas em cinco famílias subverticais, com preenchimento por milonito, argila, quartzo, por vezes brechóide, e veio estreito de dolerito (Neiva, 1981):

- N12°-28°E; 76°ESE a vertical a 70°WNW, com caixas de 0,01-1,28 m;
- N35°-50°E; 80°SE a vertical, com caixas de 0,02-0,80 m;
- N60°-80°E; 67°-83°SE, com caixas de 0,05-5,16 m;
- N40°-55°W; 80°SW a vertical a 78°NE, com caixas de 0,05-0,33 m;
- N20°-28°W; 70°WSW a vertical, com caixas de 0,01-0,10 m.

Ocorrem filões aplíticos e aplito-pegmatíticos com orientações NE-SW e NNW-SSE, com pendor próximo da vertical, e filões de quartzo com orientação NNE-SSW.

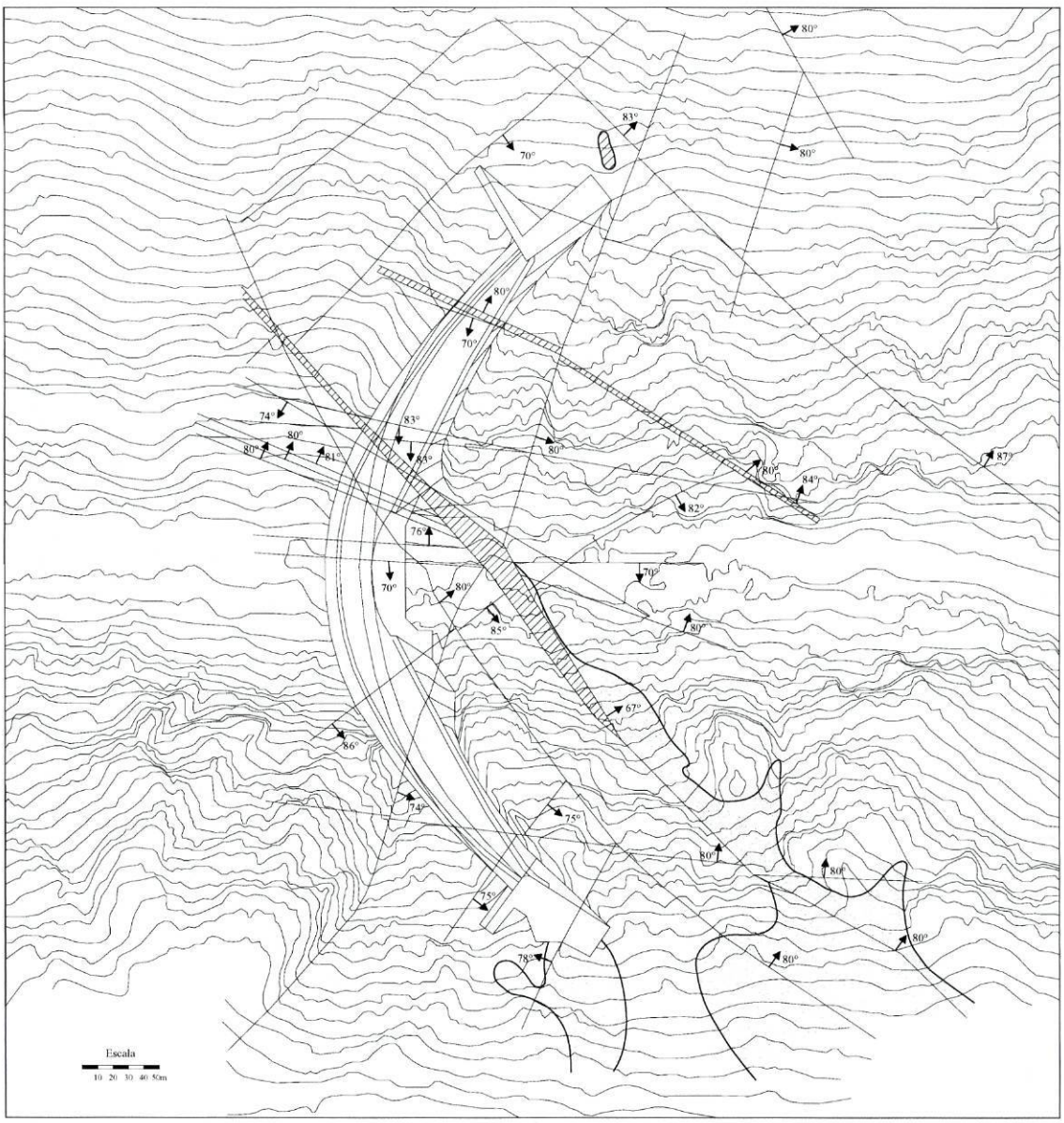


Figura II.1.6 – Planta geológica do maciço de fundação da barragem do Cabril (Neiva, 1981).

O maciço de fundação é cortado pela falha "Caco da Massa", que se prolonga para jusante na margem direita, numa direcção aproximadamente paralela à inserção da

barragem. Apresenta espessura de zona conturbada, variando entre alguns centímetros e mais de 10 metros (WGPNCOLD, 1985).

1.5. Agregados

Não foi possível consultar qualquer documento referente ao estudo geológico do local da pedreira, que se situa a curta distância da barragem e a Este desta, acima da cota 383 metros.

A selecção dos agregados foi feita tendo em atenção o ambiente no qual se insere o betão da obra, em especial a agressividade da água (Nunes e Machado, 1961). Os agregados foram obtidos por britagem do granito explorado na pedreira, sobre o qual foram realizados ensaios que permitiram verificar que as características mecânicas eram satisfatórias. Atendendo ao facto de existir na época pouca experiência com agregados britados, foram feitos ensaios no estaleiro para testar a melhor granulometria a aplicar. De acordo com a descrição existente numa brochura da época, a instalação de britagem tinha capacidade de "produção máxima de 200 toneladas/hora e era constituída por três máquinas: uma britadeira giratória primária de grande abertura e duas britadeiras giratórias cónicas, constituindo o secundário e o terciário, de maxilas intermutáveis". O agregado utilizado tinha granulometria descontínua e dividia-se em duas classes – a areia e o agregado grosso, este com dimensão entre 75 e 150 milímetros. O betão era constituído por argamassa, na qual foi incluído um introdutor de ar, e agregados grossos (Nunes e Machado, 1961). Foram também utilizadas granulometrias contínuas para tirar melhor partido das centrais de britagem (Nunes e Lobo, 1955) (Quadro II.1.1).

Quadro II.1.1 – Composição granulométrica dos agregados aplicados na barragem do Cabril (dimensão máxima D) obtidos por britagem do granito. Betão com introdutor de ar (Nunes e Machado, 1961).

Classes (mm)	**Betão com granulometria descontínua (%) Betão em massa indefinida (barragem) (D = 150 mm)**	
75-150 10-19	75 25	
	100	80
1,2 – 4,8 0,15 – 1,2 0 – 0,15	40 a 50 40 a 55 5 a 10	
	100	20
		100

1.6. Cimento

De acordo com um artigo publicado sobre a obra, "o cimento foi transportado da fábrica Liz, por estrada, em contentores de 4 toneladas cada...", e "trabalhou-se com reduzidas percentagens de areia e com baixas relações água/cimento, graças à inclusão de um produto introdutor de ar, o "Darex"..." (Xerez, 1954), para diminuir a segregação das partículas grossas e facilitar o deslocamento horizontal do betão durante a vibração (Nunes e Lobo, 1955).

São referidos em Nunes e Machado, 1961, as seguintes percentagens para os componentes do betão:

- Silicato tricálcico – 37%;
- Silicato bicálcico – 29%;
- Aluminato tricálcico – 12%.

1.7. Propriedades mecânicas do betão

Os betões utilizados têm composição média de 1:0,59:1,89:7,51 (cimento:água:areia:brita) (Silveira, 1961), com duas dosagens de cimento: 220 kg/m^3 e 250 kg/m^3. As propriedades mecânicas do betão, nomeadamente a resistência à compressão e a deformabilidade, foram determinadas durante a construção da barragem sobre prismas de 200x200x600 mm de betão crivado e cubos de 200 milímetros de aresta, aos 28, 90 e 365 dias (Teles, 1985). Os valores obtidos para o módulo de elasticidade foram de 18,3 GPa para a dosagem de 220 kg/m^3 e 22,1 GPa para a dosagem de 250 kg/m^3, aos 365 dias. Em Rocha et al., 1959, é referido que o módulo de elasticidade, medido em ensaios sobre espécies de betão da barragem, variava de ponto para ponto entre 21,2 e 25,0 GPa. A resistência à rotura por compressão, para a dosagem de 250 kg/m^3, foi de 29,8 MPa (Nunes e Machado, 1961). Após os trabalhos de reparação que decorreram na década de 1980, foram realizados ensaios de compressão simples sobre cilindros do betão com 150 milímetros de diâmetro, tendo-se obtido, para o módulo de elasticidade, o valor médio de 20,7 GPa.

É também referido, na bibliografia (Xerez, 1954), que "o problema da elevação da temperatura da massa de betão não pôde ser combatido com o emprego de betão especial, por não ter sido possível obter as características convenientes a este tipo de cimento. Procurou-se, em compensação e durante o período de elevadas temperaturas

ambientais, reduzir as temperaturas de colocação do betão com o emprego de gelo, em substituição de parte da água de amassadura, e também aumentar o intervalo de tempo entre as camadas de betonagem para valores de 7 dias".

Capítulo 2. BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO

Pretende-se fazer o enquadramento possível da Barragem do Alto Rabagão com base na escassa bibliografia encontrada sobre este aproveitamento. Tal como no caso da barragem do Cabril, a maior parte dos documentos ainda existentes tem carácter confidencial. Não foi possível encontrar elementos relativos à origem e processamento dos agregados para betão, à composição do cimento e à composição global do betão. Os dados aqui apresentados resultam da consulta dos elementos disponíveis, incluindo brochuras publicadas à época da inauguração do empreendimento.

2.1. Generalidades

A barragem do Alto Rabagão foi construída na década de 1960, no Rio Rabagão, junto à povoação de Pisões, a cerca de 20 km de Montalegre, para fins hidroeléctricos (Figura II.2.1).

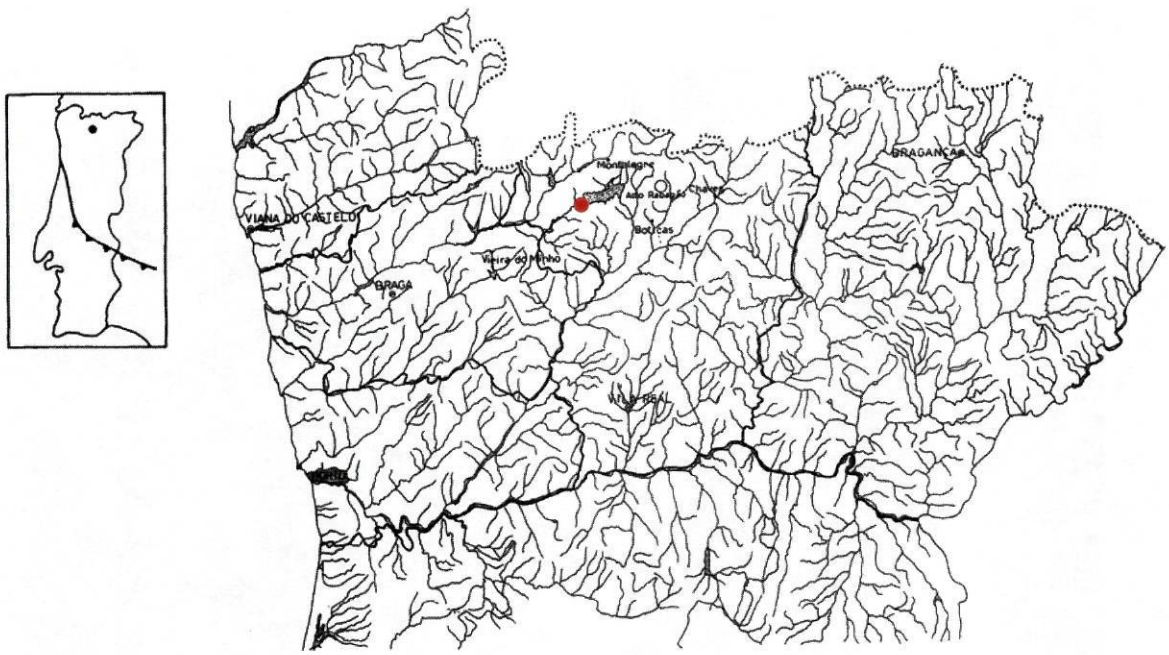


Figura II.2.1 – Localização da barragem do Alto Rabagão (adaptado de PNCOLD, 1992).

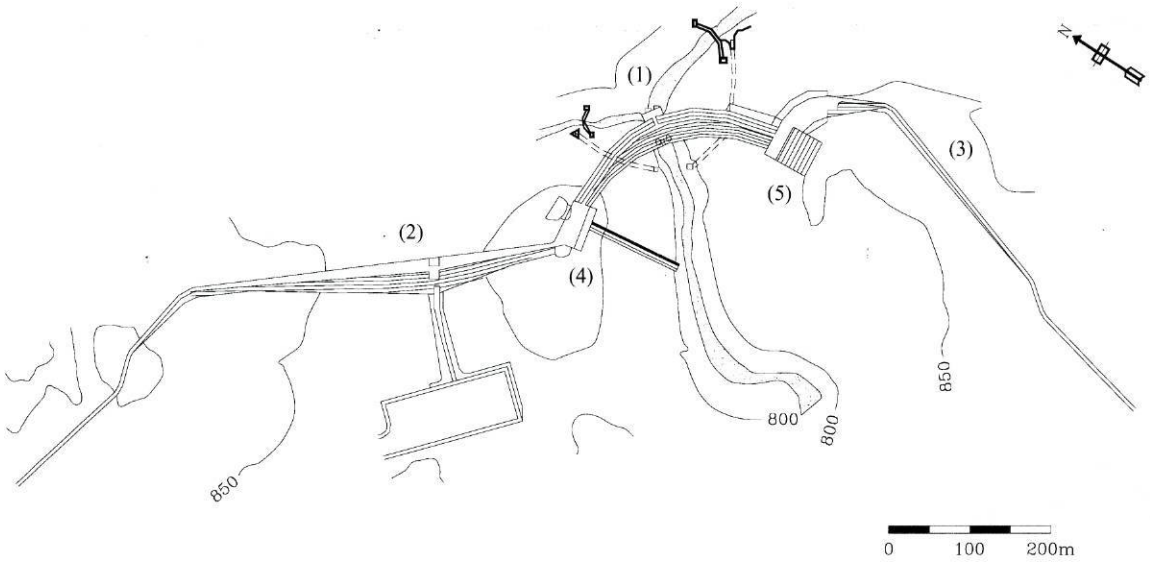
Foi o primeiro aproveitamento concebido no País com o objectivo principal de fazer a regularização interanual, dotado de equipamento de bombagem destinado a elevar para a sua albufeira água da albufeira da barragem de Venda Nova, imediatamente a jusante. Trata-se de uma barragem em betão, com uma secção central em abóbada parabólica

assimétrica, sobre o vale do Rabagão, e encontros artificiais em gravidade, e ainda duas zonas laterais de perfil gravidade. Estas duas zonas têm espessura variável no coroamento, paramento de montante vertical e fecham os vales secundários de um lado e de outro da abóbada central (Neves et al., 1964). A estrutura tem 94 metros de altura máxima, 1897 metros de extensão do coroamento e 1117×10^3 m^3 de volume de betão (PNCOLD, 1992). Sobre o coroamento foi construído o tabuleiro para uma Estrada Municipal que dá acesso, a partir da EN 103, às povoações de Negrões e Morgade, na margem esquerda no Rio Rabagão. A albufeira abrange área de 22×10^6 m^2, tem mais de 10 quilómetros de extensão e capacidade bruta de 569×10^6 m^3. A central, subterrânea, situada a 130 metros de profundidade, dispõe de dois grupos com capacidade instalada de 72 MW (Fotografia II.2.1). O custo global do aproveitamento foi estimado, a preços de 1965, em um milhão e meio de contos.



Fotografia II.2.1 – Imagem da barragem do Alto Rabagão, vista para Este.

Nos diferentes trechos do corpo da barragem encontram-se galerias de drenagem, com ramais a montante e jusante nas zonas em gravidade. Na zona em cúpula, para além da galeria de drenagem, existem três galerias horizontais (Figura II.2.2).



(1) Barragem abóbada; (2) Gravidade direita; (3) Gravidade esquerda; (4) Encontro direito; (5) Encontro esquerdo.

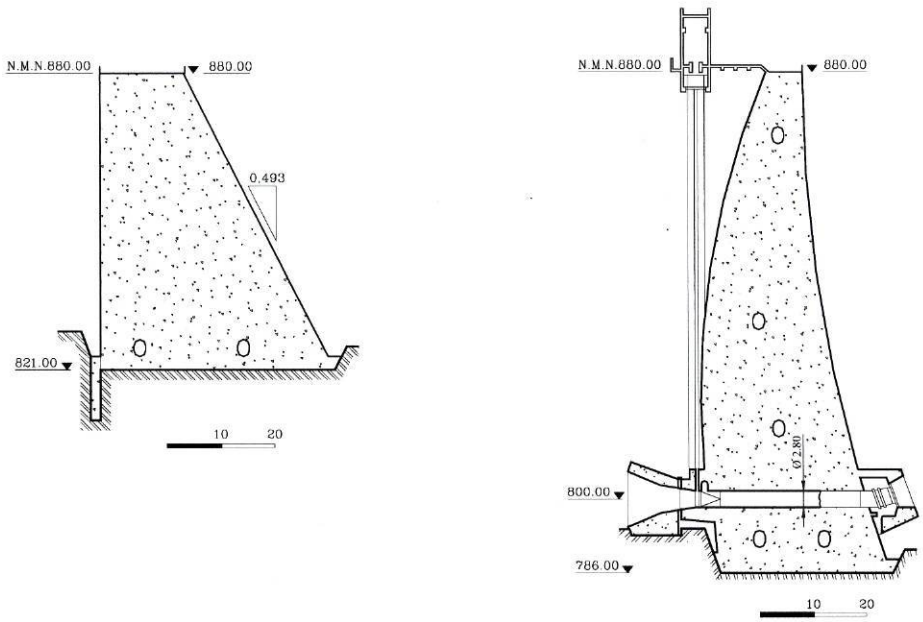


Figura II.2.2 – Representação esquemática da planta e secções transversais dos trechos em gravidade e abóbada da barragem do Alto Rabagão.

2.2. Descrição

A construção decorreu entre 1958 e 1965 (Rocha et al., 1967a). Devido à elevada deformabilidade do maciço de fundação, particularmente na margem esquerda, para além de um cuidadoso projecto da estrutura, foi necessário colocar um sistema de observação para controlo do comportamento da barragem, em especial durante o

primeiro enchimento da albufeira, que decorreu entre Dezembro de 1963 e Março de 1966 (Rocha e Silveira, 1964; Rocha et al., 1967b). O sistema de observação era composto por:

- Pilares de estacionamento;
- Alvos de pontaria no paramento de jusante;
- Base geodésica;
- Marcas de nivelamento;
- Fios-de-prumo direitos e invertidos;
- Clinómetros;
- Extensómetros de fundação;
- Extensómetros no betão;
- Extensómetros nos encontros;
- Medidores de juntas tipo Carlson;
- Termómetros de resistência no betão, na rocha e no ar;
- Medidores de pressão de água nos poros com aparelhos de tipo Carlson;
- Tele-higrómetros eléctricos;
- Tensómetros Carlson;
- Piezómetros.

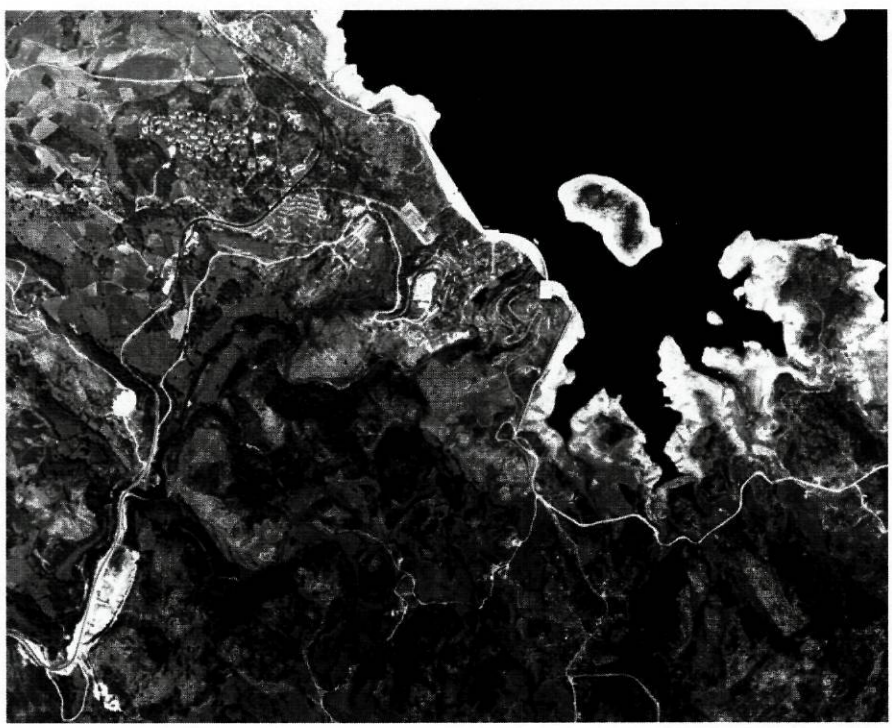
2.3. Geomorfologia

No local onde foi construída a barragem, que se encontra nas Cartas Topográficas à escala 1:25.000 números 32 e 45 do Instituto Geográfico do Exército, o vale é largo, de características senis, no qual o rio Rabagão escavou um vale de orientação geral NE-SW a ENE-WSW (Neiva, 1958). O vale é aproximadamente simétrico e encaixado no local da barragem, por erosão vertical do rio Rabagão (Fotografia II.2.2).

Às cotas mais altas, o granito encontra-se alterado, com aspectos de caulinização e arenização, e nas encostas são raros os afloramentos pouco alterados. A vegetação é constituída por arbustos e espécies rasteiras.

2.4. Geologia

O local em que foi construída a barragem enquadra-se na Zona Galiza Média-Trás-os-Montes, num maciço predominantemente granítico, em que o contacto com formações metassedimentares paleozóicas se situa a Nordeste. Este maciço está cartografado na Carta Geológica de Portugal, 1982, à escala 1:50.000, Folha 6-A – Montalegre (Figura II.2.3), como um granito de grão médio a grosseiro de duas micas, sintectónico, e identificado em Ferreira et al., 1987, como um granito sinorogénico de duas micas, sin a tardi F_3, com registo dos efeitos da terceira fase de deformação.



Fotografia II.2.2 – Fotografia aérea digital do local da barragem do Alto Rabagão e pedreira (Instituto Geográfico do Exército, sem escala).

De acordo com a Carta Neotectónica à escala 1:1.000.000 (Cabral e Ribeiro, 1989), o local da barragem situa-se numa área em que predominam as falhas de orientação ENE-WSW e, a Este, falhas de orientação predominante NE-SW. Próximo da barragem, a Noroeste, existe um falha "de inclinação desconhecida, com componente de movimentação vertical".

O granito de Pisões, que constitui o maciço de fundação e a pedreira, foi estudado por vários autores relativamente à petrografia (Neiva, 1958, 1959d; Noronha, 1983;

Noronha e Ribeiro, 1983) e quanto à caracterização de diferentes graus de alteração (Neiva et al., 1965).

Segundo Neiva, 1958 e Neiva et al., 1965, o granito de grão médio a grosseiro, de duas micas, mostra megacristais de feldspato, e pode observar-se orientação das micas, o que confere à rocha um certo aspecto gnaíssico.

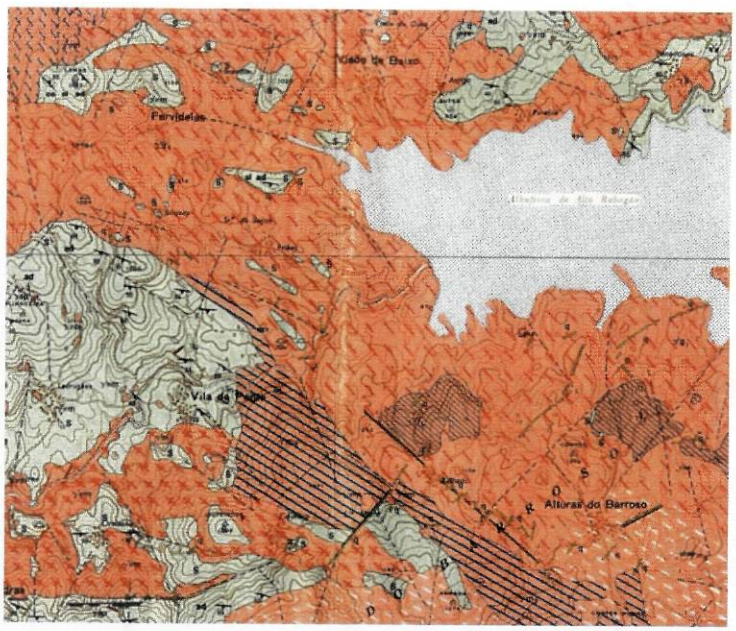


Figura II.2.3 – Excerto da carta geológica do local da barragem, à escala 1:50.000 (Carta Geológica de Portugal, 1982, Folha 6-A Montalegre).

Foi feita a cartografia geológica do local da barragem (Neiva, 1958). O granito apresenta-se diaclasado segundo as seguintes famílias predominantes:

- N32°-53°W; vertical, por vezes com pendor 30°-65°NE e 43°-55°SW;
- N38°-60°E; vertical, por vezes com pendor 55°-90°SE;
- Uma família sub-horizontal.

O maciço é cortado também por filões pegmatíticos graníticos de atitude N24°-48°E; 53°-60°SE e veios de quartzo com a mesma direcção e verticais ou pendendo 75°NW.

Relativamente às falhas existentes no local, há a considerar as seguintes atitudes predominantes:

- N-S a N20°E; 70°E a vertical;
- N30°-50°E; 60°-85°SE a vertical;
- N50°-72°W; 70°NE a vertical;
- N32°-38°W; vertical.

O maciço é caracterizado por várias zonas de alteração intensa e profunda, o que pode ser atribuído às numerosas falhas geológicas existentes no local. A secção em gravidade na margem direita assenta quase totalmente em granito muito alterado e deformável, com xenólitos de xisto. Para melhorar as características de resistência mecânica do maciço, foram executadas injecções de consolidação com calda de cimento. Antes da injecção, as fissuras da rocha foram lavadas com água sob pressão e ar comprimido a partir dos furos de sondagem e foi utilizada uma solução de bicarbonato de sódio para favorecer a expulsão da argila que se encontrava nas fissuras. O tratamento foi efectuado após a colocação do betão e quando a altura da barragem se encontrava entre 10 e 20 metros, de forma a evitar o fecho das diaclases devido ao peso da obra. Para este maciço foram determinados os módulos de deformabilidade, tendo-se encontrado um valor de 20,0 GPa para o apoio da margem direita, 6,6 GPa para o fundo do vale e um valor mínimo de 1,0 GPa para a margem esquerda (Weyermann, 1970; Silveira et al., 1991), valor considerado muito baixo para a fundação de uma grande barragem em abóbada. Estas condições da fundação conduziram a um extenso programa de prospecção e reconhecimento do maciço rochoso (Rocha et al., 1967a).

2.5. Agregados

Foram estudados dois locais possíveis para extracção de agregados, ambos constituídos por granito, situados junto à estrada nacional EN 103 (Neiva 1959a, 1959b, 1959c). O local mais próximo da obra apresentava granito alterado a muito alterado (Neiva, 1959a). Foram realizados ensaios de compressão e tracção, por flexão, de argamassas fabricadas com este agregado. Destes ensaios resultou a selecção do local mais próximo, dado que os ensaios mecânicos forneceram valores semelhantes para os dois locais (Neves et al., 1964). O granito da pedreira é "de grão grosseiro, biotítico, por vezes com cristais de feldspato individualizados como fenocristais (...). Encontra-se à superfície um tanto alterado, melhorando em profundidade. Está bastante diaclasado." (Neiva, 1959a).

Os agregados foram obtidos por britagem, com granulometria diversa, de forma a constituir agregado grosso e fino. A dimensão máxima dos agregados foi de 200 milímetros ou, por vezes, um pouco maior. A curva granulométrica média do betão com uma dosagem de cimento de 200 kg/m^3 encontra-se no Quadro II.2.1.

A granulometria da areia foi mantida com regularidade e a percentagem de elementos inferiores a 0,15 milímetros raramente ultrapassou 6% do peso da areia.

Quadro II.2.1 – Granulometria média do betão de 200 kg/m^3 (Neves et al., 1964).

Classes (mm)	Percentagem (%)	
	Individual	Acumulada
75 - 200	34	34
30 - 75	25	59
15 - 30	12	71
5 - 15	9	80
0 - 5	20	100

2.6. Cimento

A informação existente sobre a origem do cimento é muito vaga, sabendo-se apenas que terá sido fornecido pela empresa SECIL. A dosagem de cimento no betão utilizado na zona em abóbada foi de 220 kg/m^3, 200 kg/m^3 e, finalmente, 180 kg/m^3 (Neves et al., 1964).

2.7. Propriedades mecânicas do betão

Os valores de resistência média do betão à compressão, medida em provetes cúbicos de 200 milímetros de aresta, moldados com betão crivado, encontram-se no Quadro II.2.2.

Quadro II.2.2 – Resistência à compressão do betão (adaptado de Neves et al., 1964).

Dosagem (kg/m^3)	Tensão de rotura (MPa)	
	28 dias	90 dias
220	24,8	30,7
200	22,1	27,3
180	19,0	24,8

Não foram localizados documentos referentes à determinação do módulo de elasticidade do betão, dado que os elementos a que se teve acesso se restringem aos artigos publicados sobre o aproveitamento hidroeléctrico.

PARTE III

TRABALHO EXPERIMENTAL

PARTE III.1

BARRAGEM DO CABRIL

Capítulo 1. OBJECTIVOS

Face ao exposto na Parte I, a principal aplicação da Geologia ao estudo do betão refere-se à caracterização dos agregados e à identificação da ocorrência de reacções internas expansivas no betão, na medida em que condicionam a durabilidade das estruturas. Foi este o objectivo do trabalho experimental desenvolvido, com aplicação em especial das técnicas de petrografia, domínio do conhecimento que constitui uma importante mais valia no âmbito dos materiais de construção.

A análise petrográfica foi realizada com recurso às técnicas disponíveis para identificação e caracterização dos minerais e textura das rochas, nomeadamente:

– Lupa binocular modelo Zeiss Stemi SV11, com Plan Apochromat S1,0X e ampliação entre 0,6 e 6,6X, existente no Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (DG-FCUP).

– Microscópio óptico de polarização, com luz transmitida e reflectida, modelo Nikon Eclipse E 400 POL, com diversas objectivas, de referências LU Plan 5x/0.15 POL ∞/0 EPI, 10x/0.30 POL ∞/0 EPI, 20x/0.45 POL ∞/0 EPI e 50x/0.80 POL ∞/0 EPI, existente no DG-FCUP.

– Microscópio electrónico de varrimento (MEV) modelo JEOL JSM-6301F, equipado com um espectrómetro de dispersão de energia (EDS) NORAN-VOYAGER, que se encontra no Centro de Estudo de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP). Para tornar a superfície das amostras condutora e evitar fenómenos de carga, foi feita a metalização através de um metalizador. O metalizador é composto por uma campânula ligada, por um lado, à bomba que assegura o vácuo e, por outro, a uma garrafa de gás que permite a injecção de árgon. O varrimento de árgon extrai, de uma pastilha de ouro ou de filamentos de carbono, as partículas que devem depositar-se na superfície da amostra. As lâminas foram revestidas a carbono e as amostras tridimensionais a ouro no equipamento JEOL JFC 1100. A voltagem utilizada ao MEV foi de 15 kV para uma distância de trabalho de 15 milímetros. O período de aquisição de dados para microanálise foi de 60 segundos e o tempo morto de aproximadamente 30 por cento. A dimensão da mancha para obtenção de análises semiquantitativas, sem aplicação de padrão, variou com a ampliação utilizada. O método de análise envolve o bombardeamento da amostra, sob vácuo, por electrões primários a alta velocidade. Os electrões secundários, reflectidos, são transformados por um detector num sinal eléctrico,

que depende do número atómico do material analisado, da densidade da amostra e da energia dos electrões primários, que é estabelecida.

- Microssonda electrónica, existente no Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI), em S. Mamede de Infesta, modelo Cameca Camebax. As análises foram realizadas a 15 kV, com corrente de 20 mA. Cada elemento foi registado durante 20 segundos;

- Microssonda RAMAN, modelo Labram Dilor-Jobin Yvon-Spex, existente no DG-FCUP. Esta microssonda está equipada com um laser vermelho de He-Ne de 20 mW, cuja radiação excitante é de λ=632,8 nm.

Considerando que, para que ocorram reacções álcali-sílica, é necessário que se verifiquem, simultaneamente, a existência de humidade, a presença de agregados potencialmente reactivos e a disponibilidade de álcalis, estes foram os aspectos abordados em primeiro lugar, desenvolvendo-se seguidamente o estudo que pode conduzir ao diagnóstico das reacções álcali-sílica.

Os três factores serão apresentados pela ordem que se encontra acima, tratando-se com especial relevo o estudo dos agregados. É feito o enquadramento da estrutura quanto à exposição ao meio ambiente, de acordo com a classificação do relatório da BCA, 1992, e atendendo às particularidades da barragem, procurando identificar as condições que poderão conduzir à existência de humidade em quantidade suficiente para que ocorram reacções álcali-sílica. A disponibilidade de álcalis no betão é também abordada, dentro do possível, em capítulo separado.

Capítulo 2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS

2.1. Enquadramento

Foi feito o estudo petrográfico das rochas aflorantes na pedreira explorada para a construção da Barragem do Cabril, com vista à identificação de minerais potencialmente reactivos, por conterem formas de sílica consideradas reactivas, ou por serem possíveis fornecedores de álcalis. A análise petrográfica destes granitos é mais pormenorizada do que é habitual no estudo de um agregado para betão, de acordo com o pormenor que pareceu adequado para perfeito enquadramento do problema. Com base nos resultados da análise realizada e dos ensaios efectuados, procurou-se avaliar a adequabilidade destes granitos como agregados e prever o seu comportamento em obra.

A pedreira de onde foram extraídos os agregados para a obra situa-se a Este da barragem, acima da cota 383. Foram produzidos neste local os agregados grossos e finos a utilizar no betão, tendo a exploração sido abandonada no final da obra (Fotografia III.1.1).

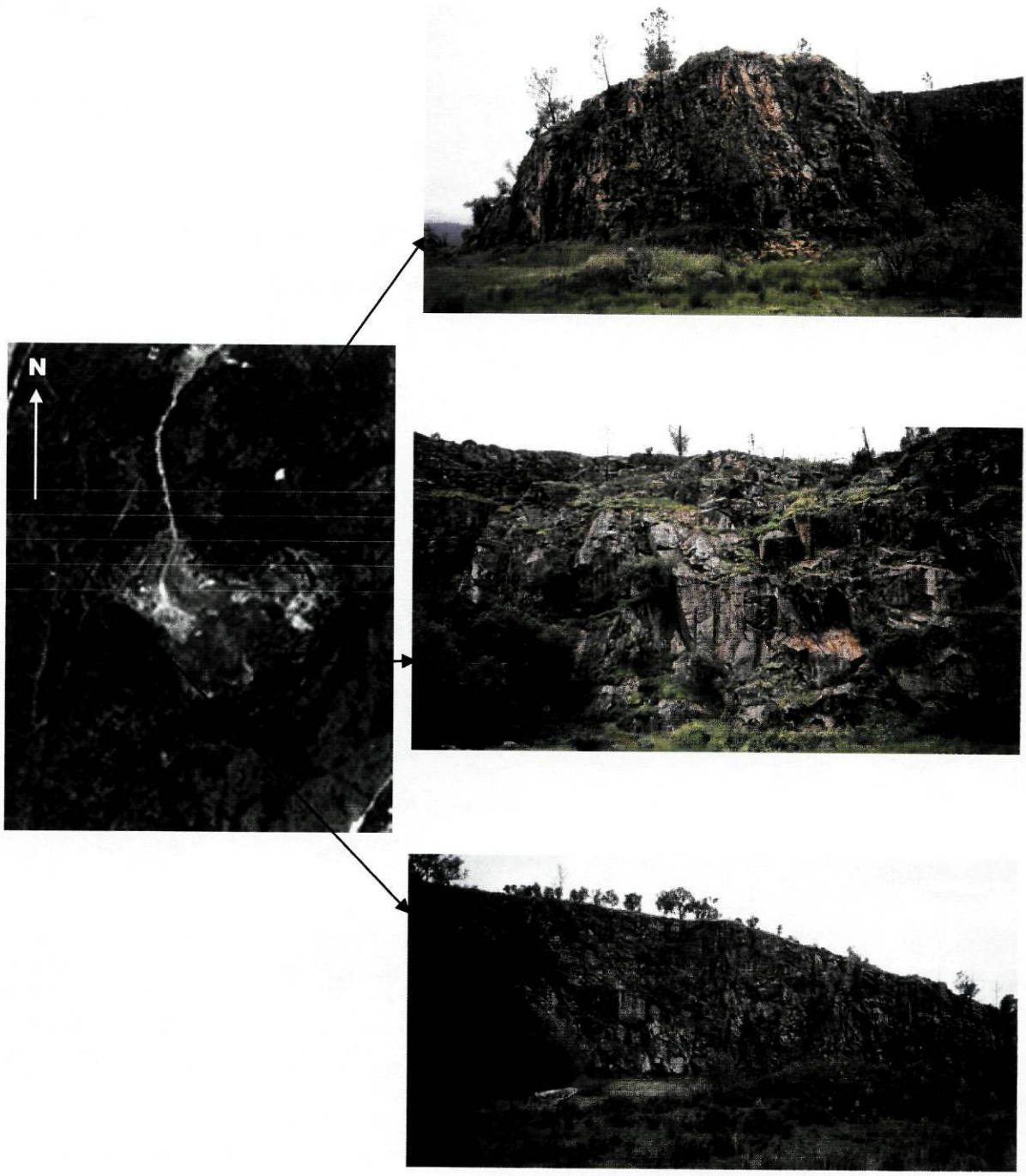
A pedreira foi escavada em três frentes, nas quais se observa um maciço granítico cortado por diaclases medianamente afastadas a afastadas (F_3 a F_2) (ISRM, 1981), ou seja, em que o espaçamento predominante se encontra entre 200 e 600 mm, podendo atingir os dois metros.

Quanto à avaliação do estado de alteração da rocha, a observação foi dificultada pelo facto de as superfícies se encontrarem expostas às intempéries há várias dezenas de anos. A análise mais cuidada permitiu verificar que a rocha está, em geral, ligeiramente alterada (W_2) a sã (W_1) e apenas localmente alterada (W_3) (ISRM, 1981), sendo a alteração mais evidente na face norte de escavação.

No local foi identificada uma falha, aproximadamente paralela à frente principal da pedreira, de atitude N40ºE; 60ºSE, que apresenta uma faixa conturbada com cerca de um metro de espessura. Foi também observado um filão aplítico de atitude N50ºE; 74ºSE. As duas estruturas apresentam uma atitude semelhante à de uma das principais famílias de diaclases referidas em Neiva, 1981 (N50º-70ºE; 75ºSE a vertical).

A observação do local da pedreira, que se insere no Granito da Ponte do Pedrógão cartografado em Pereira, 1987, revelou uma variação macroscópica da textura da rocha, sendo possível definir dois tipos de granito que terão sido explorados para produção do agregado:

- O granito que se designou por "Cabril Norte" é um granito de grão médio a grosseiro, essencialmente moscovítico. A designação aqui adoptada decorre do facto deste granito ter sido identificado na frente Norte e Nordeste da pedreira.
- O granito "Cabril Sul", de grão médio, de duas micas que foi identificado na frente Sul e Sudeste da pedreira.



Fotografia III.1.1. – Pedreira, actualmente abandonada, de onde foram retirados os agregados para a construção da barragem do Cabril: (a) Fotografia aérea digital do local (sem escala); (b) frente de escavação Norte; (c) frente de escavação Este; (c) frente de escavação Sudoeste (Novembro de 2002).

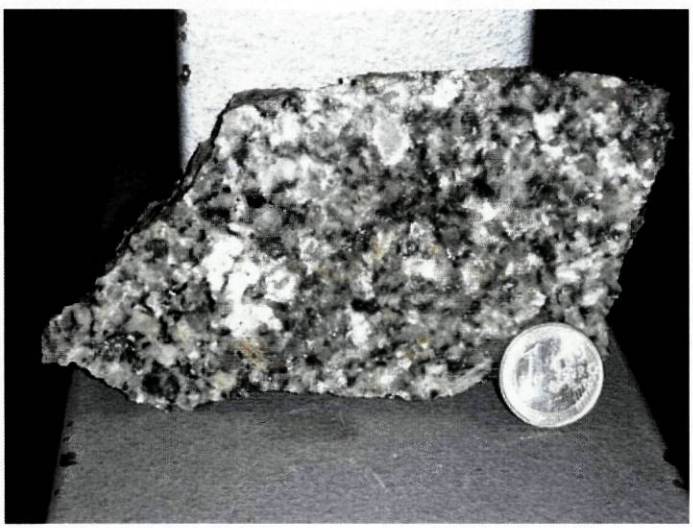
2.2. Análise petrográfica dos granitos da pedreira

Foram preparadas lâminas delgadas polidas dos dois tipos de granito referidos, para caracterização da textura das rochas e identificação dos principais minerais que as constituem.

Com o objectivo de detectar a presença de componentes potencialmente reactivos aos álcalis, analisaram-se as características texturais dos grãos de quartzo, destacando-se os indícios de deformação, como a ocorrência de extinção ondulante e a presença de quartzo microcristalino. Foi também analisada a deformação registada em cristais de outros minerais e prestada particular atenção à presença de minerais de alteração que, de algum modo, possam participar nas reacções álcali-agregado.

2.2.1. Granito de "Cabril Norte"

Trata-se de uma granito leucocrata, de grão médio a grosseiro, predominantemente moscovítico, que se apresenta ligeiramente alterado a alterado em algumas porções da pedreira (Fotografia III.1.2.).



Fotografia III.1.2 – Aspecto do granito "Cabril Norte" em amostra de mão.

A textura microscópica desta rocha é hipautomórfica granular, por vezes com tendência porfiróide, devido à existência de cristais de feldspato potássico e de plagioclase mais desenvolvidos. Os cristais apresentam, com frequência, bordos irregulares e suturados, com excepção da moscovite e da plagioclase que têm algumas faces euédricas. Ocorrem, com frequência, pequenos cristais de moscovite nos espaços

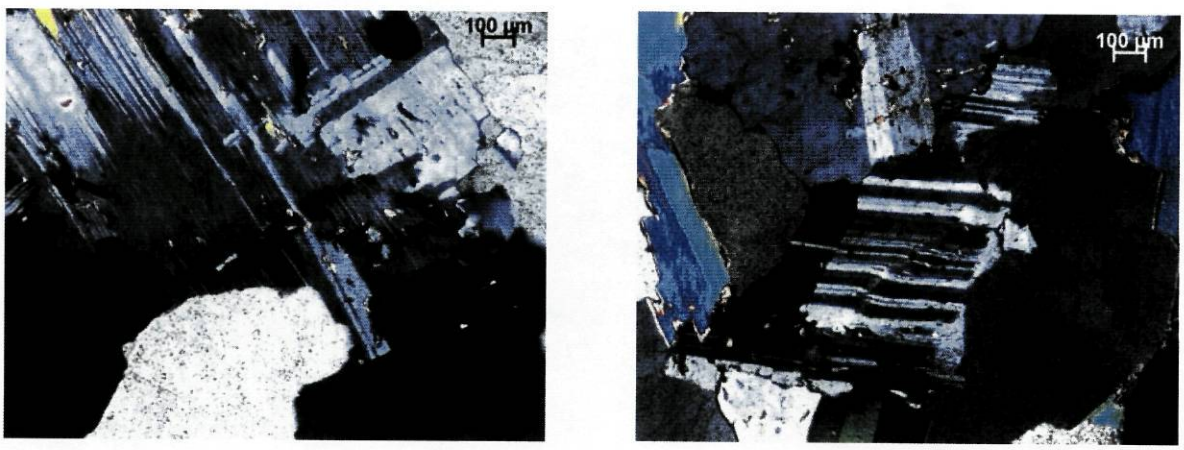
intersticiais dos grãos de feldspato. O feldspato potássico apresenta carácter poecilítico, em especial quando se encontra associado a cristais de plagioclase.

A rocha é constituída, predominantemente, por feldspato potássico, plagioclase, quartzo, moscovite, turmalina, clorite, esfena, apatite e zircão.

A plagioclase apresenta-se sob duas formas distintas:

- Em cristais de pequena dimensão, com maclas segundo a lei da albite bem definidas, que ocorrem em agregados de cristais de orientação aleatória. Trata-se de uma plagioclase sódica (albite-oligoclase), que apresenta cristais anédricos e, raramente, subédricos. Nestes cristais foi possível medir o ângulo de extinção simétrica, que varia entre 8º e 15º.

- Em cristais desenvolvidos, anédricos, de bordos corroídos ou poecilíticos, com numerosas inclusões de moscovite e com alteração mais intensa, mostrando sericitização. Trata-se de albite, com maclas segundo a lei da albite mais espessas e com ângulo de extinção simétrica médio de 18º. Os cristais mais desenvolvidos apresentam frequentemente bordos corroídos pelos cristais de quartzo e, também, de feldspato potássico. É uma plagioclase mais antiga, que mostra alteração para sericite. É possível identificar na plagioclase indícios de deformação, com fracturas, ondulação dos planos de macla e formação de *kinks* (Fotografia III.1.3). Ao longo dos planos de macla e das clivagens existem frequentes cristais de moscovite microcristalina, que se observa também nos bordos entre a plagioclase e os outros minerais, com orientação aleatória e, por vezes, com textura em roseta.

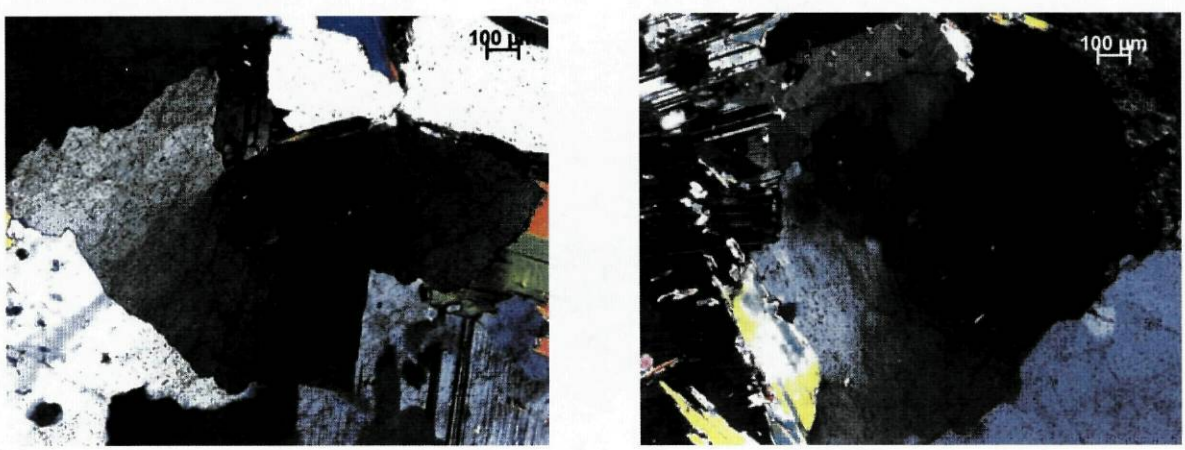


Fotografia III.1.3 – "Cabril Norte": indícios de deformação registados nos planos de macla da plagioclase (NX).

O feldspato potássico dominante é a ortoclase, ocorrendo, raramente, microclina. Apresenta-se em cristais bem desenvolvidos, anédricos e alongados, nos quais é visível

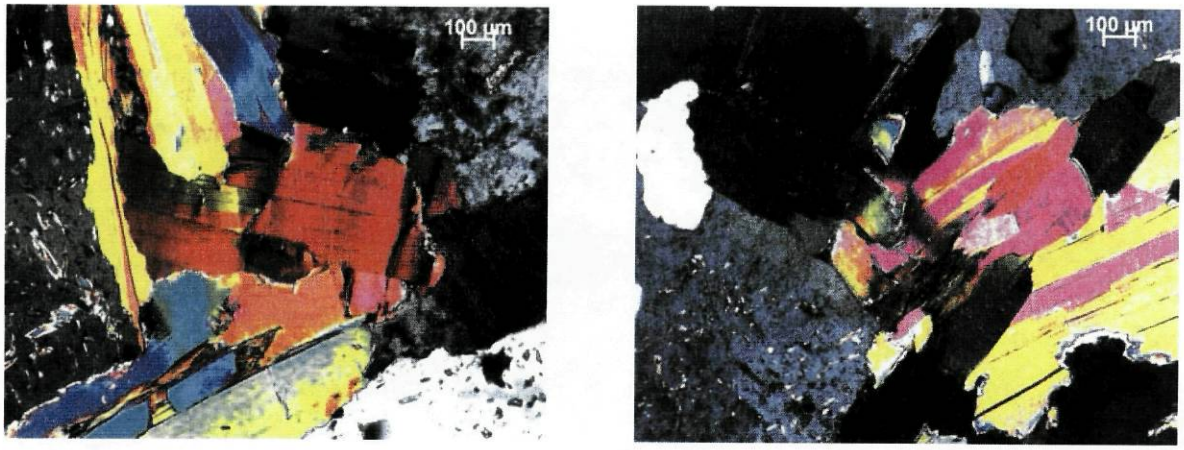
o aspecto de caulinização que indicia alteração. Mostra, por vezes, extinção ondulante e observa-se com frequência a macla de Carlsbad. Os processos de albitização são frequentes e numerosas as inclusões de quartzo e moscovite. O feldspato apresenta-se, em conjunto com o quartzo, a "corroer" os cristais mais desenvolvidos da plagioclase, com carácter poecilítico, formando "manchas" que, por vezes, cortam os planos de macla da albite. Verifica-se, no entanto, continuidade nas várias porções dos cristais "corroídos" de plagioclase.

O quartzo ocorre em cristais anédricos de dimensão variável, de bordos por vezes suturados. Apresenta-se em inclusões de formas subédricas nos cristais de feldspato potássico de tendência porfiróide, e também, mais raramente, em associações mirmequíticas com a plagioclase. As características dos cristais de quartzo mereceram particular atenção, dado tratar-se de um mineral potencialmente reactivo aos álcalis. Alguns cristais apresentam-se fracturados e mostram frequentemente extinção ondulante (Fotografia III.1.4). Embora os cristais de quartzo apresentem indícios de deformação, não foi identificada, na análise microscópica, a presença de quartzo microcristalino.



Fotografia III.1.4 – "Cabril Norte": extinção ondulante dos cristais de quartzo (NX).

A moscovite apresenta-se em cristais tabulares bem desenvolvidos, por vezes subédricos, sem orientação preferencial visível em amostra de mão ou ao microscópio. Mostra ligeira coloração e pleocroísmo, em verde muito pálido. São visíveis as manifestações de deformação, observando-se ondulação dos planos de clivagem (Fotografia III.1.5). Surge também em abundantes inclusões nos cristais de feldspato, adquirindo uma textura em roseta ou arborescente, de orientação aleatória, posterior aos feldspatos e à albitização e, provavelmente, hidrotermal. Nas clivagens, planos de macla e bordos dos cristais de feldspato, ocorre sob a forma microcristalina. É muito mais abundante do que a biotite e aparece, por vezes, associada à clorite.



Fotografia III.1.5 – "Cabril Norte": aspectos da deformação dos cristais de moscovite (NX).

A clorite é pouco abundante e resulta da alteração da biotite. Apresenta-se em cristais anédricos, em geral com bordos mal definidos. Tem cor verde esbatida e as clivagens são pouco nítidas. Ocorre sempre junto aos cristais de moscovite, e tem associados pequenos cristais de esfena e halos pleocróicos (Fotografia III.1.6). Foi ainda observada clorite com textura vermicular e baixa birrefringência, formando pequenos agregados, provavelmente de origem hidrotermal.

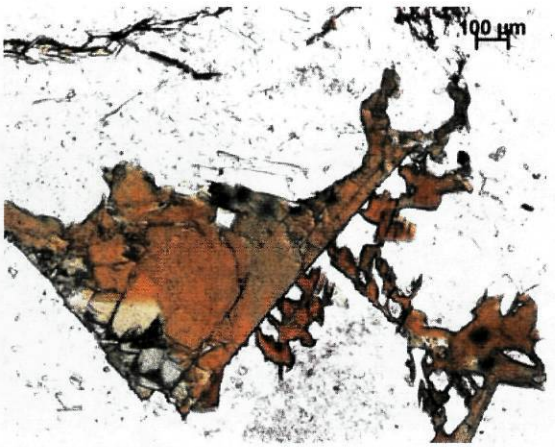


Fotografia III.1.6 – "Cabril Norte": aspecto dos cristais de clorite, frequentemente associados à moscovite (N//).

A biotite é rara e está frequentemente alterada para clorite. É visível, por vezes, junto aos cristais de clorite, mantendo as clivagens, a cor castanha e os halos pleocróicos das inclusões de zircão.

A turmalina é frequente e tem cor castanho-esverdeada, pleocroísmo entre castanho e verde pálido e formas euédricas a subédricas. Ocorre de forma geral em cristais ou bandas alongados, sobre o contacto entre outros minerais, como o quartzo e o feldspato.

Contém por vezes cristais de zircão, estes com halos de tom verde forte na turmalina (Fotografia III.1.7).



Fotografia III.1.7 – "Cabril Norte": aspectos dos cristais de turmalina, sobrepondo-se ao contacto entre outros minerais (N//).

Os cristais de apatite são diminutos, euédricos, e apresentam-se em inclusões no quartzo, na clorite e, por vezes, na turmalina.

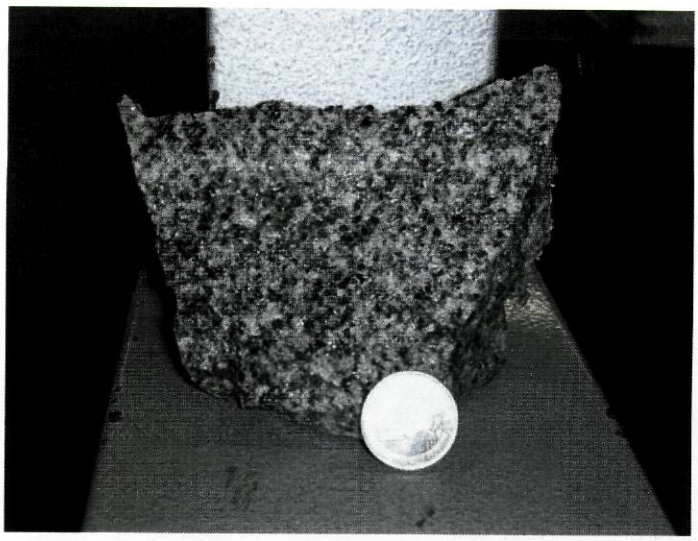
A esfena surge em agregados de pequenos cristais de cor castanha e relevo elevado, em geral alongados e euédricos, acompanhando as lamelas de clorite e, raramente, associados à moscovite. É possível distinguir maclas polissintéticas nos cristais de esfena.

2.2.2. Granito de "Cabril Sul"

É um granito leucocrata de grão médio a fino, de duas micas, mostrando-se ligeiramente alterado nas superfícies expostas da pedreira.

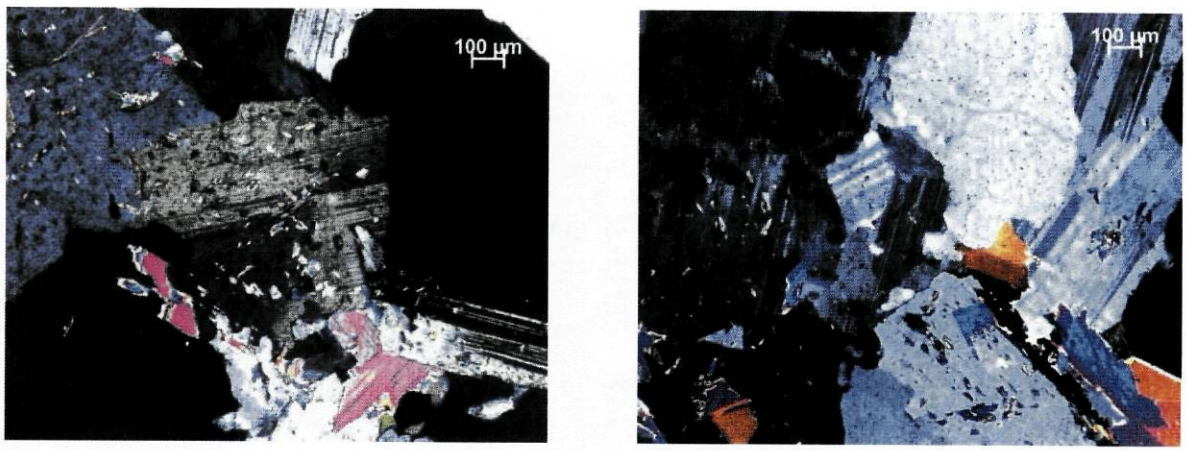
A análise macroscópica revela um granito de grão mais fino do que o granito de "Cabril Norte", de cor um pouco mais escura e muito compacto (Fotografia III.1.8). Apresenta forte resistência à fragmentação com martelo e fractura segundo lascas, dando origem a pedaços achatados. É uma rocha que produz uma grande quantidade de finos, quando introduzida no moinho de maxilas para redução à fracção areia, e as partículas de maior dimensão são em geral alongadas e achatadas.

Nas lâminas delgadas produzidas para exame microscópico foi observada uma textura hipautomórfica granular, com alteração ligeira dos cristais de feldspato. Os minerais identificados são o feldspato potássico, a plagioclase, o quartzo, a biotite, a moscovite, a turmalina, a apatite, a esfena, a pirite e a calcite.

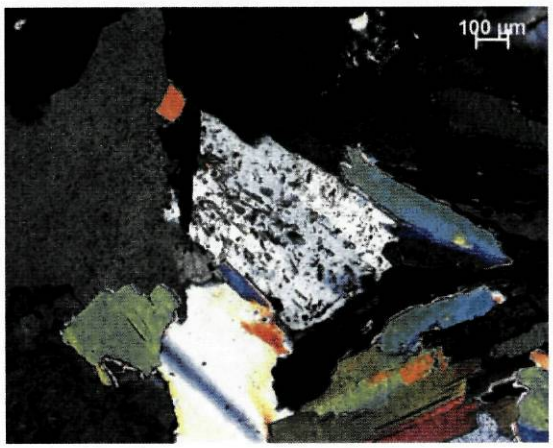


Fotografia III.1.8 – Aspecto do granito "Cabril Sul" em amostra de mão.

Tal como no granito de "Cabril Norte", a plagioclase apresenta cristais de menores dimensões, sãos e com maclas polissintéticas bem definidas, constituídos por albite-oligoclase, com ângulo de extinção simétrica médio de 11º. Existem outros cristais mais desenvolvidos e alterados, de faces mal definidas e carácter poecilítico, em que apenas se percebe a existência das maclas da albite. Esta plagioclase é provavelmente mais antiga, tem composição mais cálcica e mostra, por vezes, indícios de saussuritização, com formação de zoizite, albite, calcite, sericite e quartzo. Encontra-se, também, invadida e com bordos corroídos pela albite e pelo feldspato potássico (Fotografia III.1.9). Nos cristais existem abundantes inclusões diminutas de moscovite (Fotografia III.1.10). Não foi observada deformação dos cristais de plagioclase.



Fotografia III.1.9 – "Cabril Sul": aspectos dos cristais de plagioclase (NX).



Fotografia III.1.10 – "Cabril Sul": aspecto dos cristais de ortoclase (NX).

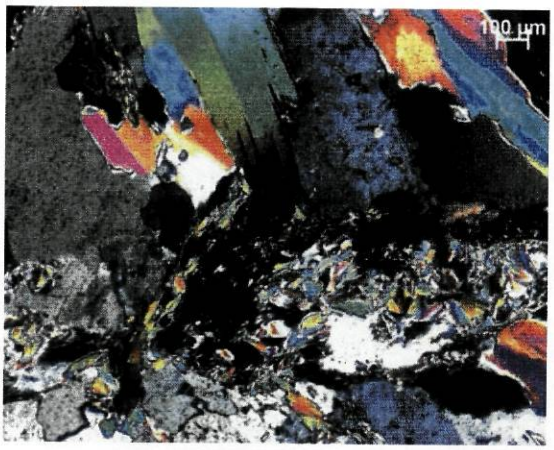
A ortoclase, menos frequente do que a plagioclase, é, por vezes, também poecilítica. São frequentes os processos de albitização, o que confere, por vezes, aspecto corroído aos bordos do feldspato potássico. São visíveis maclas de Carlsbad. Raramente existe microclina. Os cristais mostram alteração, estando parcialmente caulinizados.

O quartzo forma cristais anédricos de dimensão variável, aparentando ter originado corrosão nos cristais de feldspato e, em particular, da plagioclase mais cálcica. Apresenta extinção ondulante e bordos suturados, denotando deformação. Não foi identificado quartzo microcristalino.

Relativamente à moscovite, predominam os cristais subédricos alongados, tabulares, bem conservados. Existem também pequenos cristais que se sobrepõem à plagioclase e ao feldspato potássico, sendo mais recentes do que estes e, provavelmente, de origem hidrotermal (Fotografia III.1.11).

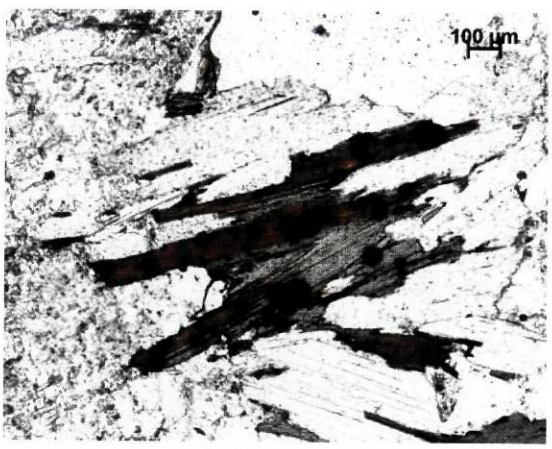
Os cristais de biotite são frequentes. As secções basais têm cor alaranjada. Existem numerosos cristais ligeiramente pleocróicos, em que as clivagens não são visíveis. Abundam as inclusões de zircão, com halos pleocróicos característicos. Existem também alguns cristais com clivagens nítidas, de cor castanha, a maior parte cloritizados e com esfena associada (Fotografia III.1.12).

São frequentes os cristais de turmalina de cor castanha-esverdeada, subédricos, com formas alongadas, ocupando os interstícios entre os cristais de feldspato e entre estes e os de quartzo. Foram observados raros cristais aciculares de turmalina, de cor azul intenso e fortemente pleocróica, que ocorre sobre os cristais de feldspato potássico. A turmalina está em geral associada à moscovite e à biotite, que substitui, e apresenta frequentes halos devido à existência de inclusões de zircão.



Fotografia III.1.11 – "Cabril Sul": aspectos dos cristais de moscovite (NX).





Fotografia III.1.12 – "Cabril Sul": aspectos dos cristais de biotite e de clorite (N//).

Neste granito foram observados cristais de calcite, com orlas castanho-avermelhadas, provavelmente resultantes da alteração da plagioclase mais antiga, de composição mais cálcica (Fotografia III.1.13). É frequente encontrar a calcite associada a sericite ou moscovite. A identificação destes cristais levantou algumas dúvidas, pelo que foi obtido o espectro de microssonda RAMAN (Figura III.1.1), que confirmou tratar-se de calcite.

A esfena existe em agregados de pequenos cristais, associada à clorite. A clorite é menos abundante do que no granito de "Cabril Norte" e surge em substituição da biotite.

Existem ainda alguns pequenos cristais de pirite, em geral subédricos.

Foi encontrado um mineral de cor azul forte em agregados pulverulentos em blocos soltos do granito da pedreira. A sua identificação petrográfica foi completada com a obtenção de espectros de microssonda RAMAN e EDS (Figura III.1.2) e pela observação

ao microscópio electrónico de varrimento (Fotografia III.1.14), que confirma tratar-se de um fosfato de ferro e magnésio.



Fotografia III.1.13 – "Cabril Sul": aspectos de saussurização da plagioclase mais antiga, com formação de zoizite, calcite, sericite, albite e quartzo (N// e NX).

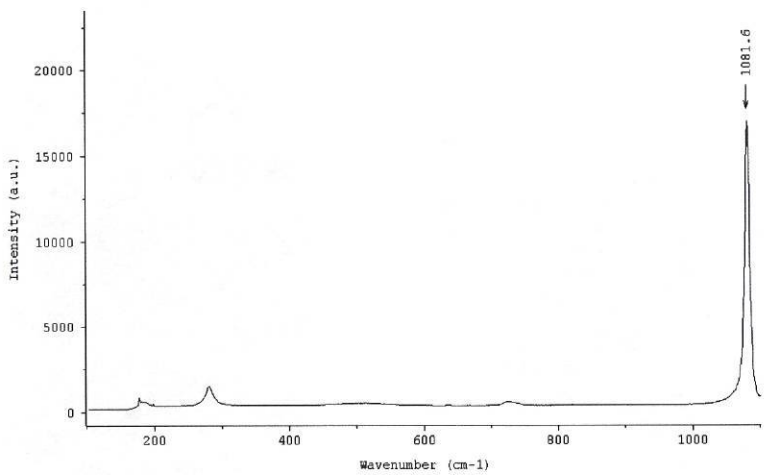


Figura III.1.1 – Espectro de microssonda RAMAN da calcite identificada como alteração da plagioclase mais antiga do granito de "Cabril Sul".

A existência de fosfatos no maciço granítico de Pedrógão Grande e nos metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico encaixante foram já referidos por Pereira, 1984a, 1984b e 1987. O fosfato observado por este autor tem cor azul ou azul esverdeado, ocorre disperso em pequenos cristais ou em agregados e foi identificado ao raio-X como pertencendo à série lazulite ($MgAl_2(PO_4)_2(OH)_2$) - scorzalite ($FeAl_2(PO_4)_2(OH)_2$) (Pereira, 1984a), o que está de acordo com a composição química qualitativa e com o espectro acima apresentado. Este fosfato poderá resultar da remobilização dos fosfatos existentes no Complexo Xisto-Grauváquico, presentes sob a

forma de fluorapatite (Pereira, 1984b), ou estar relacionado com a alteração hidrotermal dos granitos.

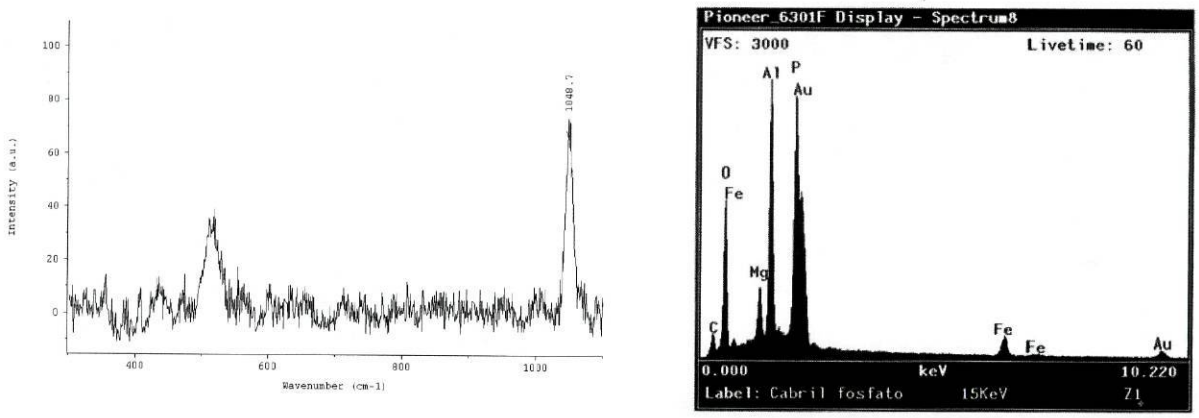
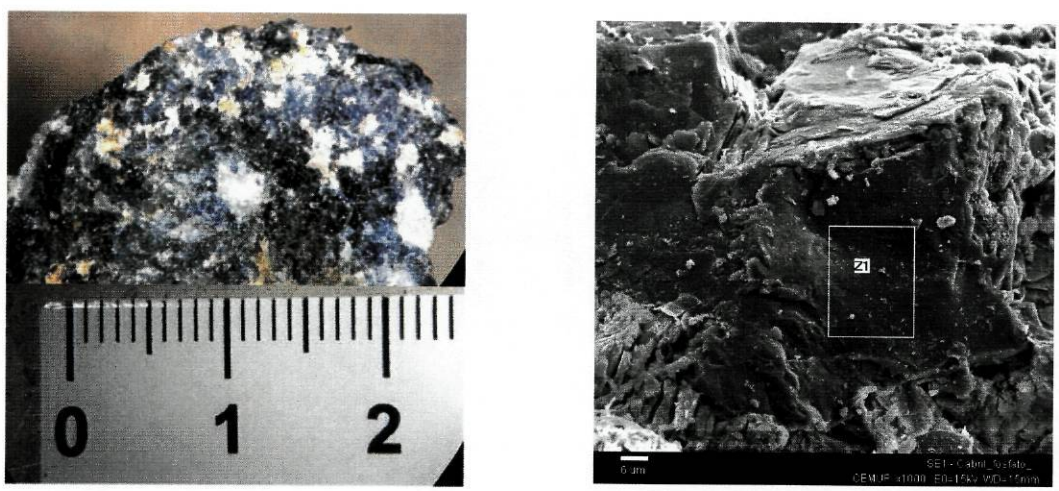


Figura III.1.2 – Espectros RAMAN e EDS do fosfato presente no granito.



Fotografia III.1.14 – Imagem à lupa binocular (escala em centímetros) e ao MEV do fosfato existente no granito. O espectro EDS da Figura III.1.2 corresponde à zona indicada como Z1.

2.2.3. Características mais importantes como agregado

Os granitos atrás descritos apresentam indícios de deformação. Embora pouco evidente, existe uma orientação preferencial dos minerais, em especial dos minerais filitosos e das plagioclases. Este aspecto é referido em Pereira, 1987, que indica, para os granitos que constituem o plutonito, a ocorrência de moscovite em folhetos "discretamente orientados" e "segundo orientações privilegiadas" e conclui que "a reunião destes elementos parece induzir um ambiente estrutural marcado acentuadamente pela deformação hercínica mais marcada pela terceira fase".

A orientação parece condicionar o modo de fractura do granito de "Cabril Sul", que dá origem a fragmentos em geral achatados e alongados. Encontram-se indícios de deformação em "Cabril Norte", impressos nos cristais de plagioclase e de moscovite que apresentam, respectivamente, planos de macla e clivagens encurvados, por vezes com formação de *kinks*. Esta deformação, em condições de baixa temperatura, marca também os cristais de quartzo, que apresentam fracturas e extinção ondulante.

Para a medição do ângulo de extinção foi utilizada a rotação da platina acoplada ao microscópio óptico polarizante de luz transmitida. Registaram-se as posições do primeiro aparecimento e do último desaparecimento da sombra de extinção nos grãos de quartzo, de acordo com o método divulgado por De Hills e Corvalán, 1964. Não pareceu essencial aplicar o método mais complexo desenvolvido por Dolar-Mantuani, 1981, atendendo à subjectividade da medição deste ângulo, já realçada pela autora como desvantagem do método. Além disso, há a considerar que, nos últimos anos, a avaliação da reactividade dos minerais de sílica por métodos petrográficos é baseada essencialmente na identificação de partículas de quartzo amorfo, micro ou criptocristalino, conforme discutido Parte I, tendo a avaliação do ângulo de extinção ondulante caído em desuso. Não obstante estas condicionantes, e atendendo ao facto de que o valor do ângulo de extinção ondulante constitui um parâmetro que traduz a deformação registada nestas rochas, foram medidos os ângulos em vários grãos de quartzo, obtendo-se os valores que se encontram na Figura III.1.3 e no Quadro III.1.1. Neste quadro estão indicados os valores mínimo, médio e máximo do ângulo de extinção para cada tipo de granito. Verifica-se que o quartzo apresenta, em média, segundo a Especificação LNEC E 415, 1993, um ângulo de extinção fraco (0 a 15º), sendo moderado para os valores máximos (15 a 25º).

Os intervalos correspondentes aos valores entre 0 e 4º têm uma percentagem nula de leituras, dado terem sido estudados apenas os grãos com extinção ondulante nítida. Verifica-se que, nos dois tipos de granito, a percentagem mais elevada de leituras se encontra no intervalo de 8 a 10º. Este predomínio é bem marcado no granito de "Cabril Sul" e mais disperso no caso de "Cabril Norte", com percentagens relativamente elevadas também nos intervalos de 6 a 8º e de 14 a 16º.

Nos granitos da pedreira, apesar dos indícios de deformação, não se identificaram grãos microcristalinos. É de notar, no entanto, que os grãos de quartzo apresentam bordos suturados, o que, devido ao aumento da área superficial disponível para reacção, pode contribuir para a reactividade destas rochas como agregado (Wigum, 1995; Broekmans, 2002).

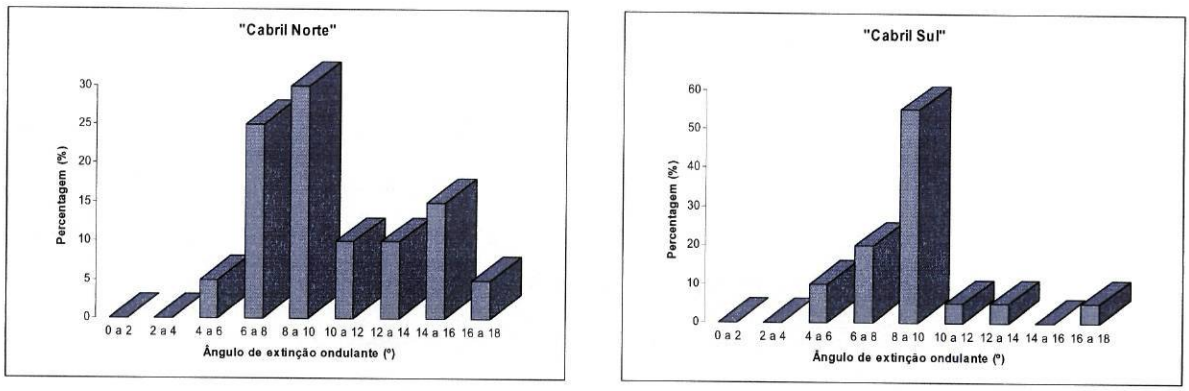


Figura III.1.3 – Histogramas dos valores de ângulo de extinção ondulante dos cristais de quartzo dos granitos estudados petrograficamente.

Quadro III.1.1 – Valores médios, mínimos e máximos do ângulo de extinção ondulante do quartzo, com a classificação correspondente, segundo a Especificação LNEC E 415, 1993.

	Valor médio (°)	Valor Mín. e Máx. (°)	Descrição (E 415, 1993)
Granito de "Cabril Norte"	11	6-17	Extinção fraca a moderada
Granito de "Cabril Sul"	9	6-17	Extinção fraca a moderada

Se for tomada em consideração a possível ocorrência de reacções álcali-silicato, destaca-se o facto destes granitos conterem minerais passíveis de participação numa reacção lenta/retardada, como a moscovite deformada ou microcristalina, os feldspatos deformados e alterados e a mirmequite.

Estes granitos são ricos em mica, especialmente moscovite. De acordo com a literatura sobre o fabrico do betão, os minerais filitosos na fracção areia do agregado podem condicionar a sua trabalhabilidade, quantidade de água de amassadura e apresentar uma orientação preferencial na colocação e cura do betão, ou seja, podem influenciar as características mecânicas deste. Foi já referido que o granito de "Cabril Sul" dá origem, por britagem, a partículas achatadas e a uma grande quantidade de finos, o que pode afectar também a sua aplicação como agregado. Este fenómeno não se regista quanto ao granito de "Cabril Norte", dada a estrutura menos anisotrópica deste granito. Não foram localizados, no entanto, dados relativos à construção, pelo que não são conhecidas eventuais dificuldades na colocação e cura do mesmo.

2.3. Características químicas

Foi feita a análise química global de amostras dos dois tipos de granito identificados na pedreira, acima designados por "Cabril Norte" e "Cabril Sul". A análise foi realizada no laboratório do *Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques* (CRPG) em Vandoeuvre-lès-Nancy, em França. As análises foram realizadas por espectrometria de emissão-plasma, ICP-AES para os elementos maiores e menores e ICP-MS para os elementos vestigiais, incluindo terras raras. A precisão das análises é de 5% para os elementos maiores e de 10% para os menores.

As análises químicas, elementos menores e terras raras dos granitos são apresentadas no Quadro III.1.2.

Na composição destes granitos realça-se a percentagem relativamente elevada de fósforo, o que não permite a aplicação da mesonorma de Barth (Barth, 1958), dada a não existência de cálcio suficiente para a normalização como apatite e, em consequência, como anortite. Este facto, já referido em Pereira, 1987, deve-se à presença de fosfatos, em cristais de cor azul, além de apatite, observados macroscopicamente em alguns pedaços soltos de granito existentes no local da pedreira.

Os granitos do Cabril são fortemente peraluminosos com o quociente molecular A/CNK de 1,27 e 1,40 para o granito de "Cabril Norte" e "Cabril Sul", respectivamente. São estaníferos, com teores de Sn de 21 e 28 ppm (Quadro III.1.2) e muito diferenciados (Figura III.1.4). O granito de "Cabril Sul" projecta-se fora de qualquer campo na Figura III.1.4, mas próximo da área dos granitos muito diferenciados, devido ao seu teor elevado de Sr, que é comum em fosfatos, de origem hidrotermal.

Nos perfis de terras raras normalizados para condritos verifica-se que os granitos estão enriquecidos em terras raras leves (LREE) em relação às terras raras pesadas (HREE), uma vez que La_N/Lu_N é de 4,4, e possuem anomalias negativas de Eu, observando-se a mais acentuada no granito de "Cabril Sul".

Como os perfis de terras raras se cortam nas LREE e HREE, (Figura III.1.5), os granitos não serão cogenéticos e terão derivado de magmas distintos. O granito de "Cabril Norte" é mais evoluído, pois é mais rico em Si, K e mais pobre em Mg, Ti, Sr, Zr e Ba do que o granito de "Cabril Sul" (Quadro III.1.2).

Quadro III.1.2 – Análises químicas em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm, dos granitos da pedreira do Cabril.

	Cabril Norte	Cabril Sul
SiO_2	73,19	70,98
Al_2O_3	14,86	15,86
Fe_2O_3	1,49	2,34
MnO	*	*
MgO	0,17	0,31
CaO	0,50	0,50
Na_2O	3,95	3,87
K_2O	4,00	3,76
TiO_2	0,08	0,14
P_2O_5	0,46	0,53
PF	1,06	1,47
Total	**99,76**	**99,76**
A/CNK	**1,27**	**1,40**

As	5,6324	7,6263
Ba	34,2691	46,8710
Be	*	*
Bi	1,4741	2,4456
Cd	0,4621	0,5601
Co	0,8856	1,5029
Cr	56,5554	57,4419
Cs	27,4267	30,6160
Cu	*	*
Ga	24,0972	27,9596
Ge	2,8183	3,3603
Hf	1,7988	2,1601
In	0,2353	0,3240
Mo	0,7967	0,9420
Nb	13,2189	17,8895
Ni	6,6735	9,1981
Pb	10,5743	8,8451
Rb	303,0179	345,8227
Sb	*	0,1041
Sn	21,0604	27,6963
Sr	31,0474	139,5624
Ta	2,6069	3,9055
Th	2,6192	3,4501
U	11,396	11,5222
V	6,0159	8,7864
W	3,0993	3,7475
Y	9,6179	12,6153
Zn	60,9306	97,8120
Zr	51,4008	61,3033
La	5,7934	7,5493
Ce	13,2436	17,3531
Pr	1,6242	2,1324
Nd	5,9871	8,6173
Sm	1,9553	2,4086
Eu	0,0831	0,0321
Gd	1,8655	2,3783
Tb	0,3167	0,4000
Dy	1,7397	2,2166
Ho	0,2868	0,3840
Er	0,8438	0,9912
Tm	0,1298	0,1491
Yb	0,9110	1,2909
Lu	0,1316	0,1703

Mol. A/CNK = $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$; * Inferior ao limite de detecção.

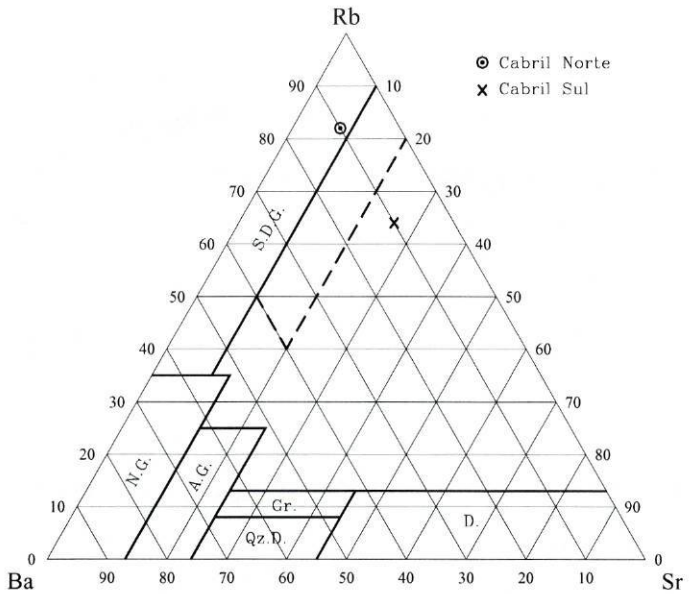


Figura III.1.4 – Projecção dos granitos do Cabril no diagrama Rb-Ba-Sr (El Bouseily e El Sokkary, 1975, com extensão do campo S.D.G. de Biste, 1979). Campos: D – diorito, Qz.D – quartzo-diorito, Gr – granodiorito, N.G. – granito normal, S.D.G – granitos muito diferenciados.

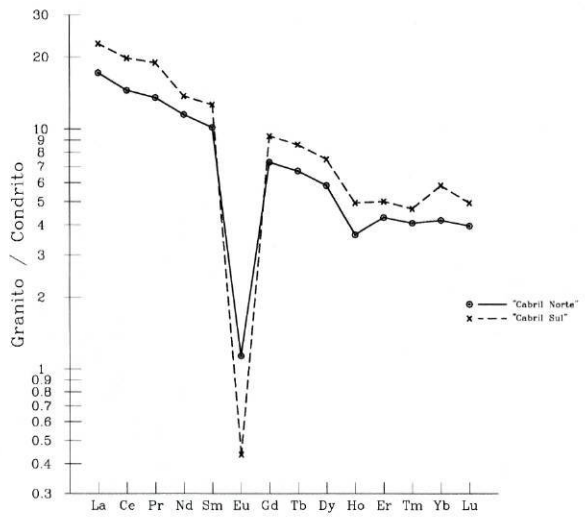


Figura III.1.5 – Perfis de terras raras normalizados para condritos dos granitos do Cabril. Dados de condritos de Haskin et al., 1968.

2.4. Características físicas e mecânicas

Foram realizados ensaios de compressão uniaxial dos dois tipos de granito da pedreira, segundo a NP EN 1926, 2000. Estes ensaios foram feitos no Laboratório de

Ensaio de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), numa prensa Form Test Sneider, D 7940 Riedlingen, tipo SWP 5000 UM 1.

A preparação dos provetes revelou algumas dificuldades devido às pequenas dimensões dos blocos de rocha, obtidos por fragmentação, com marreta, dos granitos da pedreira. Sempre que possível, foram cortados com caroteadora cilindros de rocha de 73 milímetros de diâmetro e igual altura (±5 mm). Nos casos em que a espessura dos blocos não permitia obter esta altura, foi necessário cortar cubos de menores dimensões, com um mínimo de 50±5 milímetros de lado, de acordo com a norma NP EN 1926, 2000. Este foi o caso das amostras do granito de "Cabril Sul", em que, como já referido, a fracturação dá origem a fragmentos em geral achatados e alongados. No Quadro III.1.3 encontra-se informação acerca do valor da resistência à compressão obtido para cada provete.

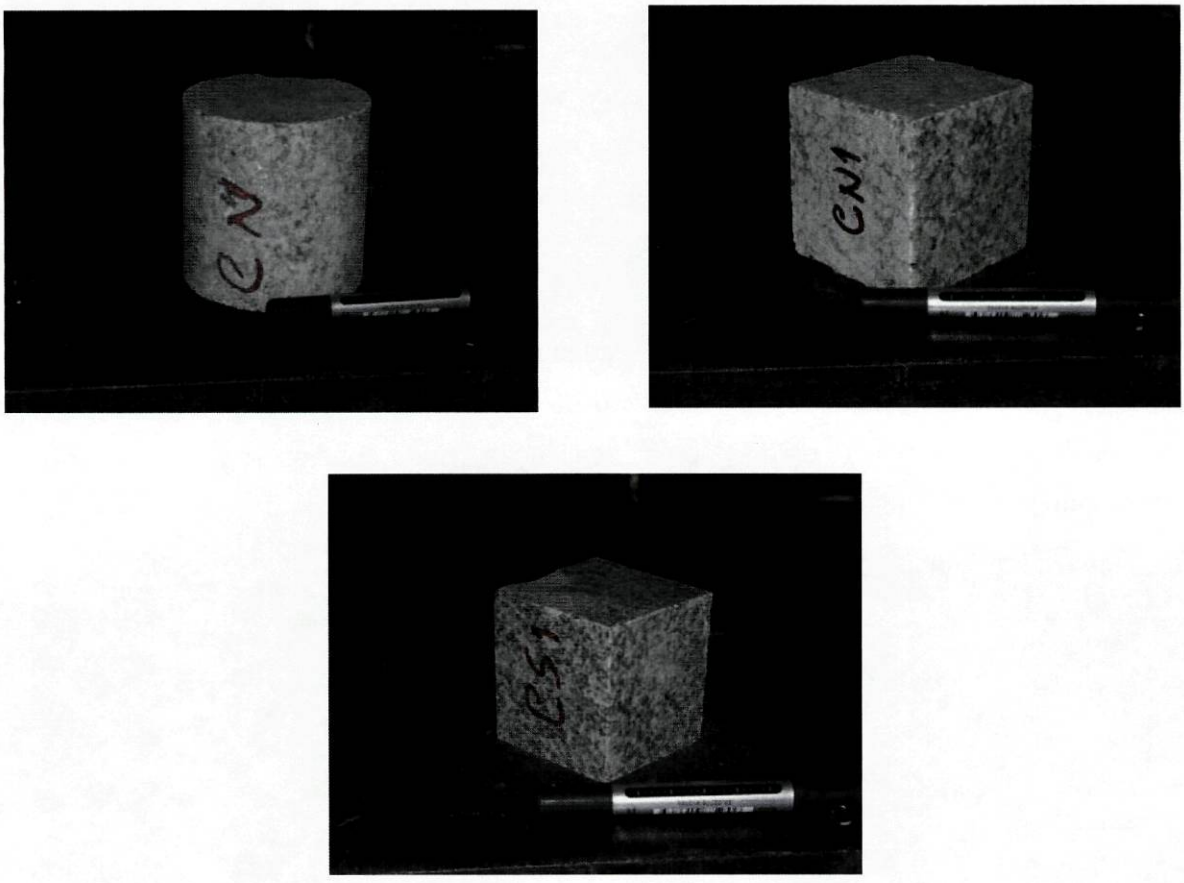
Quadro III.1.3 – Ensaios de compressão uniaxial das rochas.

Provete	Altura (mm)	Secção (mm^2)	Força (kN)	Tensão (MPa)
"Cabril Norte"				
Cilindro				
CN1	75	4185	600	143
Cubos				
CN1	65	3900	630	162
CN2	55	2350	300	128
CN3	55	2491	320	129
CN4	51	3025	220	73
"Cabril Sul"				
Cubos				
CS1	53	2500	280	112
CS2	50	1932	320	166

Nas Fotografias III.1.15 e III.1.16 encontram-se imagens dos provetes antes e após a realização dos ensaios. Verifica-se que a rotura ocorre, para o "Cabril Norte", inicialmente segundo fissuras paralelas à direcção de aplicação da força, propagando-se, depois, em toda a amostra, segundo figuras de rotura que fazem um ângulo ligeiramente inferior a 45º com a direcção de aplicação da força.

Verificou-se, durante a preparação dos provetes, que o granito de "Cabril Sul" apresentava maior resistência ao corte. A rotura dos provetes respectivos mostrou um comportamento frágil, não ocorrendo a fissuração inicial observada no granito de "Cabril Norte". A rotura ocorreu repentinamente segundo fissuras paralelas à direcção de aplicação da força.

Em qualquer dos ensaios, os resultados obtidos são satisfatórios para utilização dos dois granitos como agregado, dado apresentarem valores superiores aos esperados para o betão e, atendendo à Especificação LNEC E 373, 1993 (Quadro I.19), ultrapassarem largamente, em média, o valor de 50 MPa requerido.



Fotografia III.1.15 – Imagens dos provetes cilíndricos e cúbicos preparados para os ensaios de compressão uniaxial dos granitos de "Cabril Norte" e "Cabril Sul".

Em comparação com os valores apresentados no Quadro I.10, os resultados são inferiores ao considerado na literatura como valor médio para as rochas graníticas (Neville, 1999). Este autor refere que os ensaios de compressão uniaxial de provetes de rocha são por vezes afectados pela presença de planos de menor resistência, que podem não ser relevantes quando a rocha é britada à dimensão necessária para aplicação no betão. Os resultados mais desfavoráveis podem também ter sido influenciados pela irregularidade pontual de algumas faces dos cubos, devido às limitações impostas pela dimensão dos blocos de rocha disponíveis. Existe um resultado com valor particularmente baixo para o granito de "Cabril Norte", embora não seja possível

relacionar directamente este resultado com as características do provete. Não deverá ser, contudo, estranho ao facto de o granito apresentar uma foliação.

2.5. Ensaios de reactividade aos álcalis

Após a análise petrográfica dos dois tipos de granito existentes na pedreira, foram feitos alguns dos ensaios mais comuns para avaliação da reactividade de cada uma das rochas aos álcalis. A selecção dos ensaios a realizar teve limitações financeiras e funcionais, dado que em Portugal estes ensaios apenas são feitos no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Foram tomados em consideração o tempo e o investimento necessários à encomenda de equipamentos, assim como a necessidade de existir um técnico com experiência neste tipo de ensaios para obtenção de maior rigor nos resultados, tendo-se optado pela realização dos ensaios em laboratórios credenciados, de acordo com a disponibilidade de cada um.







Fotografia III.1.16 – Imagens dos provetes após a realização dos ensaios de compressão uniaxial dos granitos de "Cabril Norte" e "Cabril Sul".

2.5.1. Ensaio acelerado da barra de argamassa

As amostras foram preparadas no laboratório do DG-FCUP e os ensaios realizados, segundo a norma ASTM C1260-94, 2002, no Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos do LNEC, que amavelmente se disponibilizou a realizar estes ensaios.

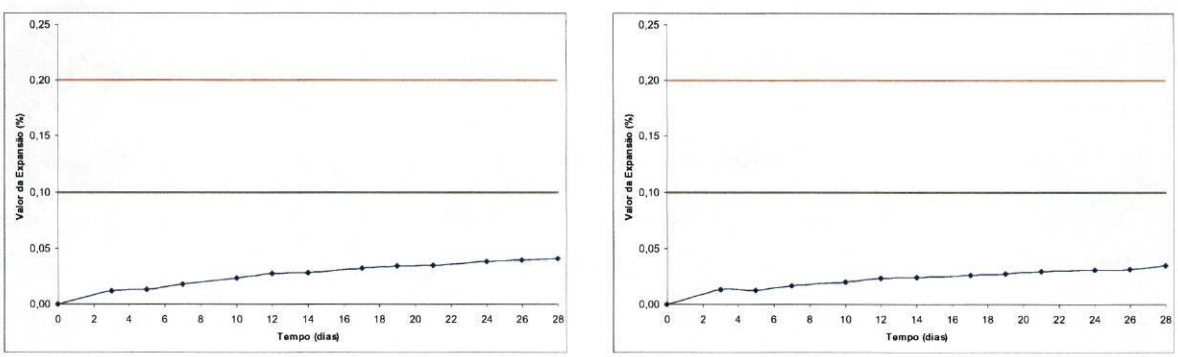
Os blocos de rocha colhidos na pedreira foram fragmentados com martelo e passados no moinho de maxilas, de modo a obter uma amostra com a distribuição granulométrica que se encontra no Quadro III.1.4, para um total de 990 gramas de material.

Foi utilizado cimento Tipo I, 42,5R da Cimpor Alhandra, com 0,19% de Na_2O e 1,02% de K_2O, ou seja, 0,86% de $Na_2O_{equivalente}$. As barras de argamassa tinham dimensão 25x25x285 mm^3.

Quadro III.1.4 – Distribuição da percentagem em massa das partículas segundo a granulometria, para o ensaio ASTM C1260-94, 2002.

Classes granulométricas Peneiro/malha	Percentagem de massa (%)	Peso (grama)
nº 4 a nº 8 (2,36 – 4,75 mm)	10	99,0
nº 8 a nº 16 (1,25 – 2,36 mm)	25	247,5
nº 16 a nº 30 (0,600 – 1,25 mm)	25	247,5
nº 30 a nº 50 (0,300 – 0,600 mm)	25	247,5
nº 50 a nº 100 (0,150 – 0,300 mm)	15	148,5

Os resultados encontram-se na Figura III.1.6. Estes granitos apresentaram uma expansão mais acentuada no início do ensaio, com maior declive da curva de expansão, que depois estabilizou.



"Cabril Norte" "Cabril Sul"

Figura III.1.6 – Resultados dos ensaios ASTM C 1260-94, 2002, dos dois tipos de granito identificados na pedreira.

Obteve-se, aos 14 dias, um valor de 0,03% de expansibilidade para o granito de "Cabril Norte" e 0,02% para o granito de "Cabril Sul". Atendendo aos limites estabelecidos pela norma, estes dois tipos de granito são considerados inócuos para o betão, uma vez que apresentam um valor de expansão inferior a 0,10%. Para confirmação dos resultados, o ensaio foi prolongado até aos 28 dias, mas o valor final de expansão manteve-se baixo. À mesma conclusão haviam chegado Silva e Reis, 2000, quando ensaiaram o que designaram por "Granito de Pedrógão", colhido na mesma pedreira.

Há, no entanto, a considerar as limitações do ensaio, tal como referido na Parte I deste trabalho. Na própria norma é apresentado um caso contraditório, quando é referido que os gnaisses graníticos e os metabasaltos americanos foram considerados nocivos quando aplicados em obra, apesar de fornecerem expansões no ensaio inferiores a 0,10% aos 16 dias. Por esta razão, a investigação quanto à reactividade deve ter em atenção, sempre que possível, o comportamento em obra, antes de uma nova utilização do agregado.

Os provetes de argamassa utilizados nestes ensaios foram examinados petrograficamente para identificação de eventuais produtos de neoformação. Segundo Davies e Oberholster, 1988, os produtos que se encontram em estruturas de betão deterioradas são semelhantes aos observados no interior dos provetes submetidos ao ensaio acelerado, uma vez que este ensaio apenas acelera, mas não altera, as condições de formação do gel.

A análise à vista desarmada revelou a existência de um fino revestimento de cor branca, mais denso nas faces superiores dos provetes. Este facto deve-se à concentração de álcalis por migração interna da água de evaporação, enquanto que nas restantes faces o meio aquoso opõe-se à formação do gel (Nixon et al., 1979; Stievenard-Gireaud, 1987). Foi possível observar pequenos poros, com um fino revestimento branco. Este material foi raspado das superfícies com um canivete e colocado em suporte próprio para exame ao MEV.

As imagens recolhidas das amostras dos produtos exsudados revelam uma estrutura espongiforme muito semelhante à divulgada por Davies e Oberholster, 1988, de gel existente em soluções de NaOH onde estavam mergulhados prismas submetidos ao ensaio sul-africano NBRI. Aquele gel era composto por uma mistura de gel e silicatos de cálcio hidratados amorfos. Também Sahyan e Quick, 1989, encontraram produtos parcialmente cristalinos, cristais em roseta, gel amorfo e carbonato de cálcio, em ensaios acelerados de argamassa fabricadas com agregados reactivos. Nestes produtos, verificaram que o gel é percursor dos cristais, que se formam a partir do gel.

No caso do betão do Cabril, os produtos observados são também compostos por silicatos de cálcio com algum alumínio, sódio (Figura III.1.7 e Fotografia III.1.17) e, por vezes, potássio. A forma e composição deste gel são idênticas no caso dos provetes produzidos com areia dos granitos "Cabril Norte" e "Cabril Sul". Os produtos formam cristais lamelares que se apresentam em rosetas. Identificaram-se também alguns romboedros de carbonato de cálcio (Fotografia III.1.18).

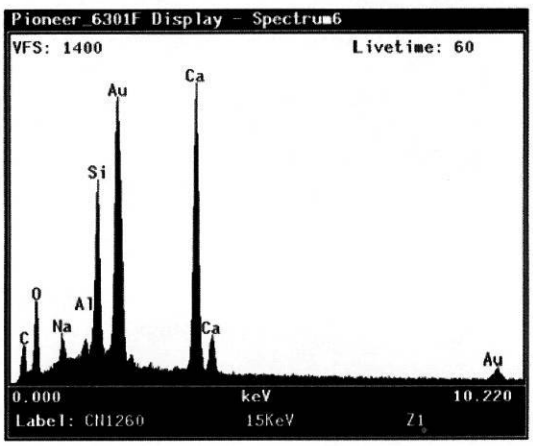
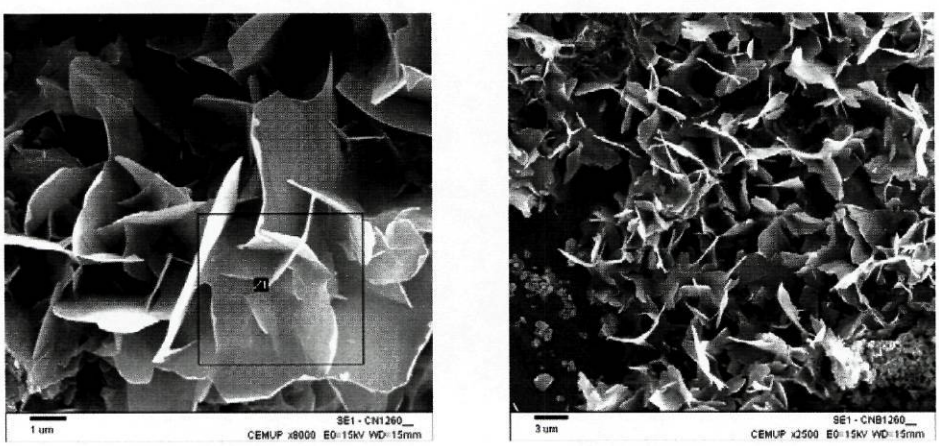


Figura III.1.7 – Espectro EDS dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002.

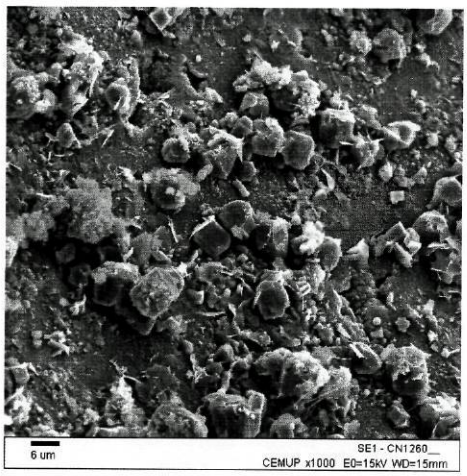


Fotografia III.1.17 – Imagens ao MEV dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002 (a análise da Figura III.1.7 corresponde a Z1).

Os provetes foram depois serrados transversalmente para produção de lâminas delgadas polidas.

As lâminas mostram partículas angulosas e irregulares de dimensão areia. Nas argamassas em que foi utilizado o granito de "Cabril Sul", verifica-se que existem, com frequência, partículas de minerais opacos, correspondentes a sulfuretos (pirite), em grãos

monominerálicos ou em associação com quartzo, em geral alterados para óxidos e hidróxidos de ferro.



Fotografia III.1.18 – Aspecto dos romboedros de carbonato de cálcio existentes na superfície dos provetes de argamassa.

Não se observaram fissuras na pasta de cimento nem nas partículas de rocha. As interfaces pasta de cimento-agregado estão fechadas e não foram detectadas orlas de reacção.

Os poros têm pequena dimensão e não foi observado preenchimento nem ao microscópio óptico nem ao MEV.

Admitindo que o ensaio acelerado traduz as reacções que ocorrem no betão, pode afirmar-se que não foram detectados indícios de ocorrência da reacção, exceptuando a formação de material exsudado de composição semelhante à encontrada por outros autores.

2.5.2. Ensaio químico

As amostras foram preparadas no laboratório do DG-FCUP e os ensaios realizados segundo a norma ASTM C 289-94, 2002, no Laboratório de Química do mesmo Departamento.

Para a redução das amostras à dimensão necessária para a execução do ensaio, os pedaços de rocha colhidos na pedreira foram fragmentados e depois reduzidos à dimensão apropriada utilizando o moinho de maxilas. Usaram-se os peneiros de referência ASTM nº 50 e 100, com malha de 0,300 e 0,150 milímetros, respectivamente. A amostra, com cerca de 300 gramas, usada no ensaio corresponde à fracção passada no peneiro nº 50 e retida no peneiro nº 100. Foram realizados três ensaios, utilizando cerca de 25 gramas de material em cada um.

Trata-se de um ensaio muito rápido e de execução relativamente simples, mas que apresenta grandes limitações, dado que pode fornecer falsos resultados negativos, ou seja, pode indicar não reactividade para rochas que se mostram efectivamente reactivas em obra.

Os resultados obtidos encontram-se no gráfico da Figura III.1.8. Verifica-se que os dois granitos são classificados como inócuos, dado que se apresentam à esquerda da linha de fronteira entre os agregados inócuos e os prejudiciais.

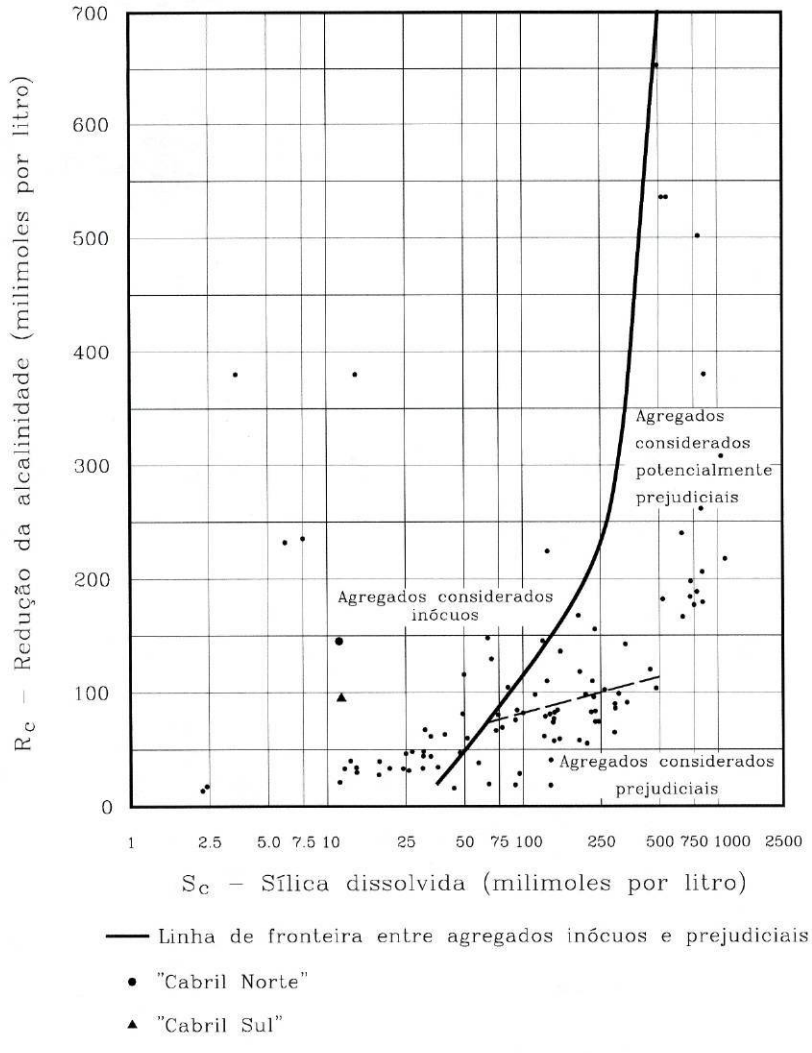


Figura III.1.8 – Resultados dos ensaios ASTM C 289-94, 2002 relativos aos granitos de "Cabril Norte" e "Cabril Sul".

2.5.3. Ensaio da barra de argamassa em autoclave

O ensaio foi realizado nos laboratórios do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, em Paris, segundo a norma NF P18-590, 1993.

Os agregados para fabrico das argamassas para a execução do ensaio foram preparados no laboratório do Departamento de Engenharia de Minas da FEUP, de acordo com o especificado na norma, de forma a obter uma curva granulométrica com a distribuição indicada no Quadro III.1.5, para uma quantidade mínima de 1,5 quilogramas.

Obtiveram-se, para as duas amostras de granito, os seguintes resultados:

- "Cabril Norte" – expansão de 0,056%
- "Cabril Sul" – expansão de 0,055%.

Quadro III.1.5 – Distribuição de massa das partículas de agregado a utilizar no ensaio NF P18-590, 1993.

Classes granulométricas Malha	Percentagem de massa (%)	Peso (grama)
2,500 – 5,000 mm	30	450,0
1,250 – 2,500 mm	25	375,0
0,630 – 1,250 mm	25	375,0
0,315 – 0,630 mm	10	150,0
0,160 – 0,315 mm	10	150,0

De acordo com o estipulado pela norma, a deformação relativa de cada amostra não ultrapassou ± 15% da dimensão inicial em ambos os casos, pelo que os granitos são considerados Não Reactivos.

2.6. Conclusões

A partir dos resultados da análise petrográfica dos granitos que afloram na pedreira pode concluir-se que estão presentes duas fácies que diferem um pouco em composição e textura. São granitos sãos a ligeiramente alterados para os quais se fez o estudo petrográfico com o objectivo de avaliar a existência de formas de sílica potencialmente reactivas, um dos três factores necessários para que ocorram reacções álcali-sílica no betão.

Verifica-se que os dois tipos de granito apresentam ligeiros indícios de deformação, mais evidentes no caso do granito de "Cabril Sul". Este granito tem grão mais fino e mostra uma leve orientação, mais evidente quando se produzem fragmentos por fracturação, que são em geral alongados e pouco espessos.

A forma das partículas resultantes da britagem está patente nas lâminas produzidas a partir dos provetes de argamassa. Predominam as partículas alongadas e angulosas,

ou seja, com baixa esfericidade e pouco roladas. Verifica-se que entre as partículas mais finas existe uma percentagem relativamente elevada de micas, essencialmente moscovite.

A análise petrográfica dos granitos indica que estão presentes cristais de quartzo com extinção ondulante, embora com baixo valor do ângulo de extinção. Não se observaram grãos microcristalinos de quartzo. Os restantes minerais mostram também deformação a baixa temperatura, com destaque para as plagioclases e a moscovite com planos de macla e clivagem dobrados e fracturados. Existem indícios de alteração hidrotermal dos granitos, com cloritização parcial das micas, albitização e sericitização das plagioclases e ocorrência de fosfatos. A alteração é mais nítida nos bordos dos cristais de feldspato e nas fracturas que cortam os cristais e apresentam por vezes depósitos de óxidos. A pirite mostra-se frequentemente alterada para óxidos e hidróxidos de ferro. Considerando o gráfico de Mielenz et al., 1947, (Figura I.10) e o quadro de estabilidade do quartzo apresentado por Heavey et al., 1994, (Figura I.21), o quartzo que ocorre nos granitos será um quartzo cristalino, estável às condições de pressão e temperatura que se verificam no betão, e apresenta baixa solubilidade.

De acordo com a Especificação LNEC E 415, 1993, poderá dizer-se que estão presentes nestes granitos minerais potencialmente reactivos aos álcalis:

- o quartzo tectonizado;
- o feldspato e as micas, como possíveis fornecedores de álcalis.

Relativamente ao quartzo tectonizado, refira-se que o valor do ângulo de extinção ondulante é muito baixo (inferior a 25º), critério que, como referido, está a cair em desuso e a ser substituído pelo da existência de quartzo microcristalino. Como no presente caso não ocorre quartzo microcristalino, conclui-se que não estão presentes formas de sílica potencialmente reactivas. Haverá, no entanto, a considerar os silicatos ligeiramente alterados, dobrados e fracturados como sendo passíveis de reacção lenta/retardada.

Todos os ensaios realizados para determinação da reactividade aos álcalis dão indicação de que as rochas são não reactivas, incluindo o ensaio acelerado da barra de argamassa, recomendado para agregados que podem originar reacções lentas/retardadas.

De acordo com Mullick, 1987 (Figura I.14), o granito ligeiramente deformado dá origem a uma expansão relativamente baixa, mas a existência de deformação pode justificar a eventualidade de reactividade de rochas como o granito. Relativamente a este assunto, convém relembrar que, segundo os autores que são referidos no Quadro I.15, apenas Le Roux et al., 1999, consideram o granito como potencialmente reactivo. Wigum,

1995, defende a posição dos autores nórdicos (Quadro I.17), que referem o granito como agregado inócuo aos álcalis.

Com base nestes dados, pode dizer-se que os agregados provenientes da pedreira podem ser considerados não reactivos, ou seja, dificilmente constituirão a origem do silício necessário para que ocorram reacções álcali-agregado.

Capítulo 3. EXPOSIÇÃO DA BARRAGEM AO AMBIENTE

Sendo a humidade um dos três factores necessários para que ocorram reacções álcali-agregado, tem interesse considerar as condições de exposição da estrutura ao ambiente, relacionado quer com a água das chuvas, quer com as características da água da albufeira e com a circulação de fluidos no maciço rochoso de fundação.

Conforme foi referido na Parte I, as barragens são consideradas estruturas da categoria S3, para as quais o risco de deterioração por reacções álcali sílica é inadmissível (Quadro I.12). Quanto às condições ambientais prejudiciais ao betão, estas diferem com o tipo de fenómeno considerado. Atendendo ao caso de uma barragem, o relatório da BCA, 1992, (Quadro I.14) quanto aos níveis de risco ambiental para que ocorram reacções álcali-sílica, considera um risco elevado, dado que se trata de uma estrutura exposta às condições ambientais e que tem como função a retenção de água.

A barragem do Cabril situa-se numa zona montanhosa, com elevada amplitude térmica diária e anual. A água da albufeira tem características dissolventes, uma vez que se situa numa área geográfica pouco poluída e própria de cabeceira de vale.

Relativamente às características ambientais, Silva, 1992, apresenta no seu trabalho os principais índices relativos à água e temperatura atmosférica para as barragens portuguesas. Assim, é referido que o índice de agressividade da água da albufeira da Barragem do Cabril corresponde a uma água medianamente agressiva. O pH da água da albufeira e da chuva tem um valor compreendido entre 6 e 8 e corresponde a "águas equilibradas, mas podem ter capacidade dissolvente desde que o TSD (total de sais dissolvidos) seja baixo". O total de sais dissolvidos é igual ou inferior a 100 mg/l, correspondendo a águas com elevado poder dissolvente e com elevado potencial agressivo. A temperatura média anual é de 14,7º C e a amplitude média anual da temperatura média do ar no local da obra é de 15,0º C.

Quanto aos fluidos do maciço de fundação, os trabalhos de tratamento de fundação realizados nesta barragem terão impedido a circulação de água próximo do betão de fundação, evitando eventuais problemas relacionados com subpressões ou alteração química.

O conhecimento que existe relativamente ao maciço rochoso indica que não existirão iões agressivos como, por exemplo, os sulfatos, susceptíveis de causar importantes danos à estrutura.

Capítulo 4. DISPONIBILIDADE DE ÁLCALIS DO BETÃO

Analisadas as características relativas aos agregados e à exposição ambiental, faz-se agora uma referência ao último factor necessário para que ocorram reacções envolvendo os agregados. Assim, mostrou-se interessante conhecer a composição original do cimento utilizado no fabrico do betão da barragem de forma a conhecer o teor de álcalis no cimento e no betão e desta forma poder avaliar a probabilidade de ocorrência de reacções. A pesquisa bibliográfica foi, no entanto, infrutífera.

Foram feitas várias tentativas de análise da pasta de cimento hidratada, tendo em vista avaliar o teor de álcalis:

– Observação ao microscópio electrónico de varrimento e análise em EDS. Realizaram-se análises a diversas lâminas delgadas, tendo-se verificado que o teor de álcalis era baixo. A título de exemplo, apresentam-se o espectro EDS e a microfotografia ao MEV (Figura III.1.9) (Fotografia III.1.19) relativas a um local analisado na pasta de cimento.

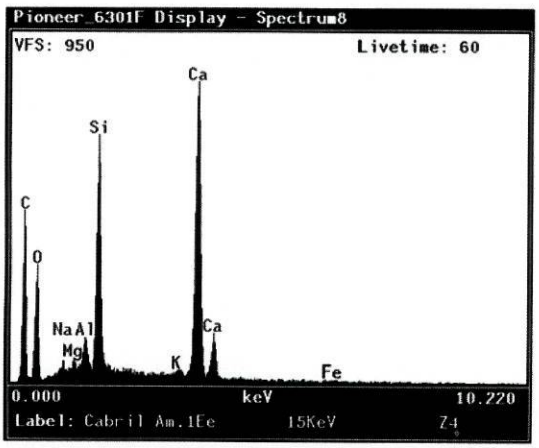
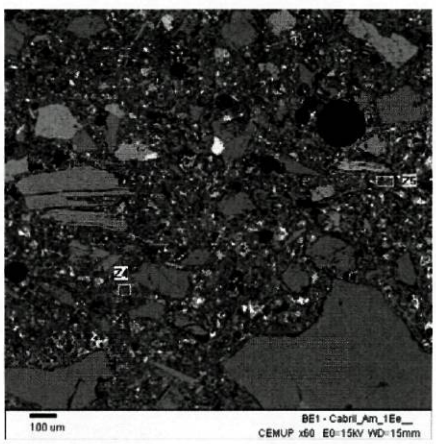


Figura III.1.9 – Espectro EDS da pasta de cimento. Uma percentagem significativa de carbono pode dever-se à impregnação da lâmina por araldite.

– Microssonda RAMAN, para obtenção de espectros da pasta (Figura III.1.10). Este espectro mostra que a pasta contém, predominantemente, silicatos de cálcio hidratados.

– Microssonda electrónica para obtenção de dados analíticos em diferentes lâminas e em vários pontos de uma mesma lâmina; os resultados encontram-se no Quadro III.1.6. A obtenção dos dados foi dificultada pelo facto de a pasta de cimento apresentar uma resistência ao desgaste consideravelmente inferior à do granito, durante o polimento das lâminas, pelo que a superfície, nas porções correspondentes à pasta, nem sempre se

encontrava perfeitamente polida. Esta razão é provavelmente a causa da existência de uma análise com total inferior a 50%. Os resultados das análises revelam um material rico em cálcio e com baixa percentagem de sílicio. Em menor percentagem estão o alumínio, os álcalis, o enxofre e o ferro. Os totais mais elevados rondam os 70%, indicando que os compostos presentes deverão possuir um teor relativamente elevado de água.



Fotografia III.1.19 – Imagem ao MEV de um aspecto geral da pasta de cimento (análise EDS na Figura III.1.9).

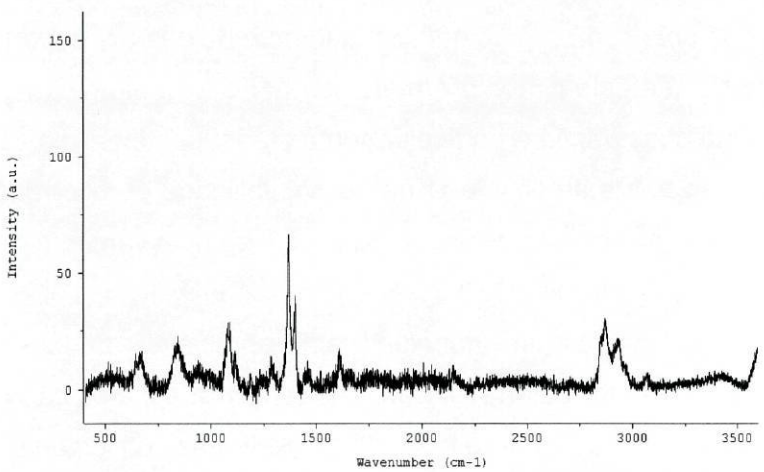


Figura III.1.10 – Espectro da pasta de cimento obtido à microssonda RAMAN.

– Análise química total, tal como é habitualmente realizada para rochas. Com esta finalidade, foram retiradas manualmente as partículas de agregado grosso e areia existentes nos pedaços do betão dos tarolos. O material fino assim separado foi depois triturado no moinho, até adquirir a granulometria adequada à análise. A análise química foi realizada nos *Activation Laboratories Ltd*, (ACTILABS), no Canadá, utilizando o

método de fusão ICP de metaborato/tetraborato de lítio e ICP/MS para os elementos traço. O limite de detecção é de 0,01% para os elementos maiores e de 0,001% para MnO e TiO_2. A composição química obtida encontra-se no Quadro III.1.7.

Quadro III.1.6 – Composição da pasta de cimento obtida em microssonda electrónica (valores em percentagem).

	C - 1P								C - 3P		C - 4P	
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 5		Ponto 6	
	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%
O	28,83	0	25,99	0	23,28	0	17,36	0	22,7	0	27,71	0
Na	0,43	0,58	0,33	0,45	0,4	0,54	0,19	0,26	0,05	0,07	0,03	0,05
Mg	0,86	1,42	1,56	2,59	0,23	0,38	0,81	1,35	1,83	3,03	3,16	5,25
Al	3,72	7,04	8,11	15,32	1,39	2,62	0,69	1,3	4,75	8,98	7,64	14,44
Si	11,71	25,05	5,08	10,87	9,39	20,09	6,33	13,53	4,38	9,38	5,87	12,55
P	0,02	0,05	0,06	0,15	0,06	0,15	0	0	0,19	0,44	0,17	0,38
S	0,3	0,76	0,32	0,81	0,26	0,64	0,21	0,52	0,4	1,01	0,51	1,28
K	0,52	0,63	0,4	0,49	0,65	0,78	0,08	0,1	0,07	0,08	0,08	0,1
Ca	26,53	37,12	26,74	37,41	25,74	36,02	21,42	29,98	24,17	33,82	24,84	34,76
Ti	0,08	0,14	0,19	0,31	0,04	0,07	0	0	0,5	0,84	0,21	0,36
Mn	0,08	0,11	0	0	0,03	0,04	0	0	0,09	0,12	0	0
Fe	0,69	0,89	1,38	1,77	0,5	0,64	0,19	0,25	4,85	6,23	3,75	4,83
Ba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**73,77**	**73,79**	**70,16**	**70,17**	**61,97**	**61,97**	**47,28**	**47,29**	**63,98**	**64**	**73,97**	**74**

Atendendo à impossibilidade de assegurar que todas as partículas de agregado fino foram retiradas do produto final, sobretudo as lamelas mais finas de micas dispersas na pasta de cimento e os grãos de quartzo e feldspato de menores dimensões, admite-se que tenha sido obtida uma composição química diferente da que era esperada.

Assim, verifica-se que este cimento é mais rico em silício, alumínio e álcalis do que seria expectável. Esta observação é particularmente preocupante para o caso dos álcalis, dado constituir um parâmetro a considerar na susceptibilidade de ocorrência de reacção álcali-agregado. O valor encontrado na análise é relativamente elevado, com $Na_2O_{equivalente}$ de 2,96% ($Na_2O_{eq}=Na_2O+0,658K_2O$).

Este facto poderia apenas ter um significado apreciável se fosse conhecida a composição inicial do cimento, obtendo-se por subtracção a contribuição dos agregados para os álcalis da solução (Grattan-Bellew, 2001). Refira-se, no entanto, que segundo Silva e Reis, 2000, os cimentos produzidos em Portugal nos anos de 1950 e 1960 continham baixos teores de álcalis, atingindo ocasionalmente o valor de 0,80% de $Na_2O_{equivalente}$. Atendendo a esta informação, parece mais plausível o valor obtido por microssonda electrónica, que é de 0,56%, inferior ao máximo de 0,60% aconselhado para diminuir o risco de ocorrência de reacções álcali-agregado.

Também o SiO_2 tem um valor muito elevado relativamente à composição média que foi apresentada na Parte I, ponto 1.2.1, e, em consequência, o CaO é substancialmente

Quadro III.1.7 – Análise química em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm da pasta de cimento do betão da barragem do Cabril.

	Cimento
SiO_2	37,96
Al_2O_3	9,56
Fe_2O_3	2,41
MnO	0,029
MgO	0,94
CaO	25,84
Na_2O	1,86
K_2O	1,67
TiO_2	0,181
P_2O_5	0,29
PF	18,20
Total	**98,94**
Ag	*
As	37,00
Ba	68,00
Bi	1,20
Ce	18,00
Co	*
Cr	*
Cs	9,60
Cu	92,00
Ga	12,00
Ge	1,00
Hf	1,80
In	*
Mo	*
Nb	8
Ni	*
Pb	14,00
Rb	127,00
Sb	0,60
Sn	10,00
Sr	294,00
Ta	1,50
Th	3,10
U	9,80
V	19,00
W	1,00
Y	12,00
Zn	363,00
Zr	50,00
La	11,00
Pr	2,35
Nd	9,30
Sm	2,10
Eu	0,35
Gd	2,20
Tb	0,40
Dy	2,00
Ho	0,40
Er	1,00
Tl	0,90
Tm	0,15
Yb	1,00
Lu	0,16

* Inferior ao limite de detecção.

inferior aos valores médios admitidos na bibliografia. Considera-se que, apesar da escassez de dados sobre a composição do cimento à época, será de considerar que a composição aqui encontrada pode ter sido fortemente influenciada pela existência de pequenos cristais de feldspato e micas, que não foi possível separar da pasta de cimento. O fósforo está também presente, embora em quantidade relativa inferior à encontrada nas rochas utilizadas como agregado.

Os resultados obtidos por microssonda electrónica parecem ser de mais confiança do que a análise química, que terá sido influenciada pela preparação de amostra, com deficiente separação manual das partículas de agregado.

Capítulo 5. AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO BETÃO

5.1. Objectivos

Discutidos os três factores que condicionam a ocorrência de reacções álcali-sílica, apresenta-se, em seguida, o estudo efectuado sobre o betão. Este estudo teve por objectivo a identificação de indícios da eventual ocorrência de reacções álcali-sílica, área em que a petrografia desempenha um papel importante. Utilizaram-se as técnicas de inspecção *in situ* e os testes de laboratório que permitem fazer o diagnóstico das causas de deterioração do betão, relacionadas com a composição dos agregados (BCA, 1992).

A análise do betão baseou-se nos seguintes pressupostos:

- A verificação do comportamento do agregado em obra é o método mais seguro de avaliar a sua reactividade;
- Os dados publicados acerca da Barragem do Cabril indicam a ocorrência de expansão da estrutura. A expansão de uma estrutura pode ter diversas origens, sendo a reacção álcali-agregado um dos processos possíveis.

O exame do betão foi inicialmente realizado *in situ* e, depois, em laboratório, sobre amostras retiradas de locais seleccionados durante a inspecção da estrutura. O estudo em laboratório baseou-se essencialmente nas técnicas de petrografia, que foram aplicadas a fragmentos e lâminas de betão e a amostras dos produtos exsudados, colhidos no decurso do trabalho *in situ*.

Como conclusão estabelece-se uma comparação entre o comportamento dos agregados previsto a partir das suas características, as condições de exposição da estrutura, a composição do cimento e as peculiaridades encontradas no betão, tecendo considerações acerca das capacidades e limitações dos métodos aplicados para caracterização do granito como agregado.

5.2. Estudo do betão. Inspecção *in situ* e amostragem

O exame do betão da estrutura foi realizado com o objectivo de detectar e identificar possíveis indícios de deterioração relacionada com a aplicação dos agregados estudados.

Foi feita a inspecção visual das galerias do interior da barragem para avaliação do estado de conservação do betão. A inspecção ocorreu em Maio de 2001, Julho e Novembro de 2002 e em Abril e Dezembro de 2003.

Em todas as visitas foram inspeccionadas as quatro galerias horizontais de visita, às cotas 293,65, denominada galeria de coroamento, 274,50, 255,50 e 239,00, e toda a galeria geral de drenagem, ao longo dos dois encontros e no fundo do vale. As galerias são locais privilegiados para inspecção visual, uma vez que permitem a observação directa do betão no interior do corpo da estrutura. O acesso foi sempre realizado pela galeria de acesso à galeria de coroamento, situada na margem esquerda.

A observação das galerias conduziu a:

- Registo de ocorrência de manchas de humidade nas paredes das galerias;
- Colheita de amostras de eflorescências e exsudações nos tectos e/ou paredes das galerias;
- Selecção de locais para colheita de amostras de betão para estudo em laboratório.

O betão observado nas galerias tem aspecto são e compacto. Apenas nos tramos iniciais das galerias de acesso à galeria de coroamento e em zonas muito limitadas da galeria de drenagem, foram observadas manchas de humidade nas paredes e no tecto, com eflorescências.

Nas galerias de acesso e na galeria de coroamento, foram detectadas exsudações e escamação do betão em trechos muito limitados.

As restantes galerias horizontais e a galeria que se encontra no fundo do vale apresentam um betão totalmente seco e são. Existem escorrências de carbonato de cálcio localizadas em áreas restritas junto aos drenos.

Os furos para colheita de amostras de betão localizaram-se essencialmente nos locais em que existiam exsudações. Foram, ainda, retiradas amostras em zonas sãs para comparação das características do betão.

No Quadro III.1.8 encontra-se uma síntese dos aspectos referentes à localização, comprimento de furação e ângulo de inclinação dos furos com o plano vertical. Na Figura III.1.11 apresenta-se, em alçado, a localização dos furos realizados nas galerias horizontais e na galeria de drenagem.

Devido a limitações de utilização da máquina de furação, relacionadas com a posição do motor e o arrefecimento das brocas por água, não foi possível realizar furos na vertical a partir do tecto das galerias, ou seja, de baixo para cima, tendo-se optado por realizar a furação no local mais próximo possível do pretendido, com a inclinação máxima permitida pelo equipamento.

Quadro III.1.8 – Designação, localização, comprimento de furação e ângulo de inclinação, medido relativamente ao plano vertical, dos furos para amostragem do betão da barragem do Cabril.

Furo	Local	Comprimento (mm)	Inclinação (º)
Furo 1 1-2001	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME	900	90
Furo 2 2-2001	Próximo da junta do muro-ala, na galeria de acesso à galeria de coroamento, ME	600	90
Furo 3 3-2001	Galeria de coroamento, bloco S-T, jusante	600	90
Furo 4 1EME-2003	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME, jusante	400	40
Furo 5 V1E-2003	Galeria de coroamento, jusante	280	86
Furo 6 QR-2003	Galeria de coroamento, bloco Q-R, jusante	355	34
Furo 7 1ED-2003	Galeria de acesso à galeria de coroamento, MD	350	54
Furo 8 F255-2003	Galeria à cota 255,5, bloco O-P, montante	430	90
Furo 9 PQe-2003	Galeria de drenagem, ME, bloco P-Q, montante	145	90
Furo 10 GFd-2003	Galeria de drenagem, MD, bloco F-G, montante	225	90
Furo 11 LKd-2003	Galeria de drenagem, bloco K-L, fundo, jusante	260	90

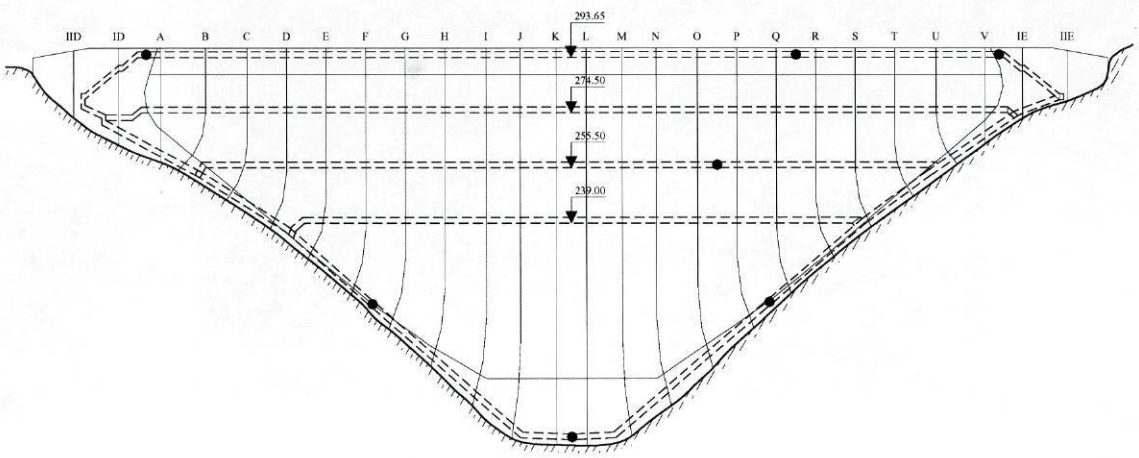


Figura III.1.11 – Alçado da barragem do Cabril com indicação da localização dos furos para colheita de amostras de betão. Não estão representados os furos realizados nas galerias de acesso à galeria de coroamento.

5.2.1. Fissuração

Não foram detectadas fissuras do tipo *map cracking* nas galerias, uma das manifestações típicas, embora não exclusivas, das reacções álcali-sílica. Foram observadas algumas fissuras finas, irregulares, predominantemente horizontais, na

galeria de coroamento. Dado o acompanhamento permanente da obra por parte das entidades competentes, estas fissuras encontram-se assinaladas a giz.

Não se identificaram, em qualquer dos locais inspeccionados, fissuras formando polígonos ou marcadas por coloração mais intensa ou vestígios de humidade, pelo que se admitiu não serem positivamente indicativas da ocorrência de reacções internas no betão, nomeadamente reacções álcali-agregado.

5.2.2. *Pop-outs*

Foi observada, na galeria de acesso à galeria de coroamento, na margem esquerda, uma cavidade cónica com cerca de 20 mm de diâmetro e poucos milímetros de profundidade, com a superfície revestida por material pulverulento de cor castanha. Situa-se junto a um local onde se regista escamação do betão (Fotografia III.1.20).

Na galeria de coroamento, no bloco N-O, foi detectada também uma cavidade cónica de 60 mm de diâmetro, expondo cimento em desagregação. Foram retiradas amostras dos materiais de revestimento das cavidades para análise em laboratório.



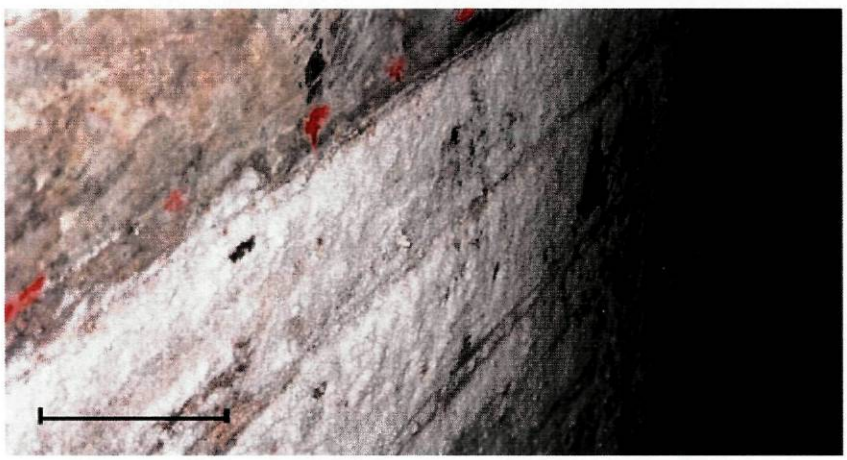
Fotografia III.1.20 – Pequenos *pop-outs* observados no interior da galeria de coroamento.

5.2.3. Eflorescências e exsudações

Como foi referido, as galerias de acesso à galeria de coroamento nos dois encontros apresentam localmente manchas de humidade. Estas manchas são marcadas pela existência de abundantes eflorescências de cor branca, com aparência aveludada (*fluffy*), mais abundantes na parte inferior (meia altura) das paredes (Fotografia III.1.21). Estas

eflorescências estão também presentes em pequenos tufos esporádicos de cristais brancos, de hábito acicular, na galeria de drenagem.

Na galeria de coroamento e, principalmente, nas galerias de acesso em ambas as margens, encontraram-se pontualmente exsudações, formando pequenas estalactites a partir do tecto, escorrências lineares ao longo das paredes, de cor branca, e outras de morfologia globular e cor amarelada. Um grande número destas exsudações situa-se sobre finas fissuras horizontais e outras coincidem com as juntas de cofragem e de betonagem. Estas descontinuidades parecem constituir caminho preferencial para a circulação de fluidos, que aí atingem o exterior.



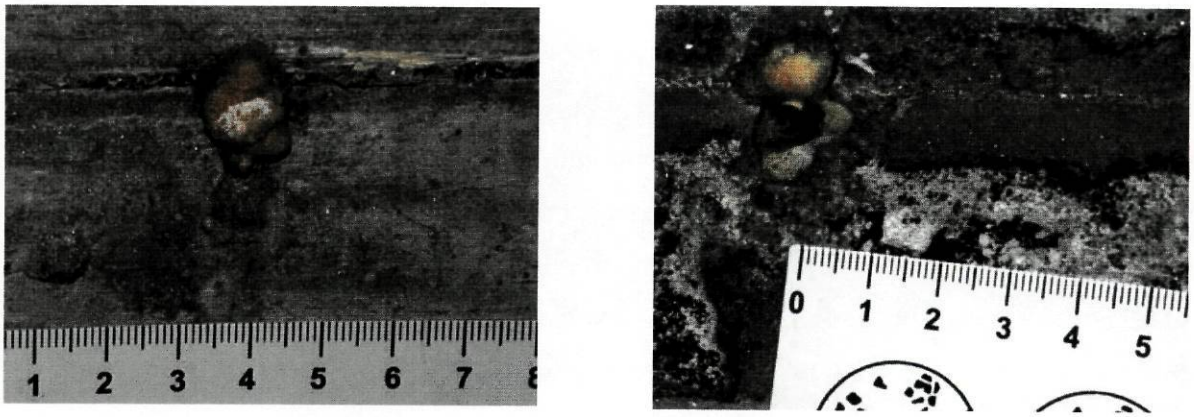
Fotografia III.1.21 – Eflorescências de cor branca que se encontram predominantemente nas galerias de acesso à galeria de coroamento em ambas as margens.
A barra corresponde a cerca de 150 milímetros.

Foram colhidas amostras das exsudações, que apresentavam características e viscosidades distintas:

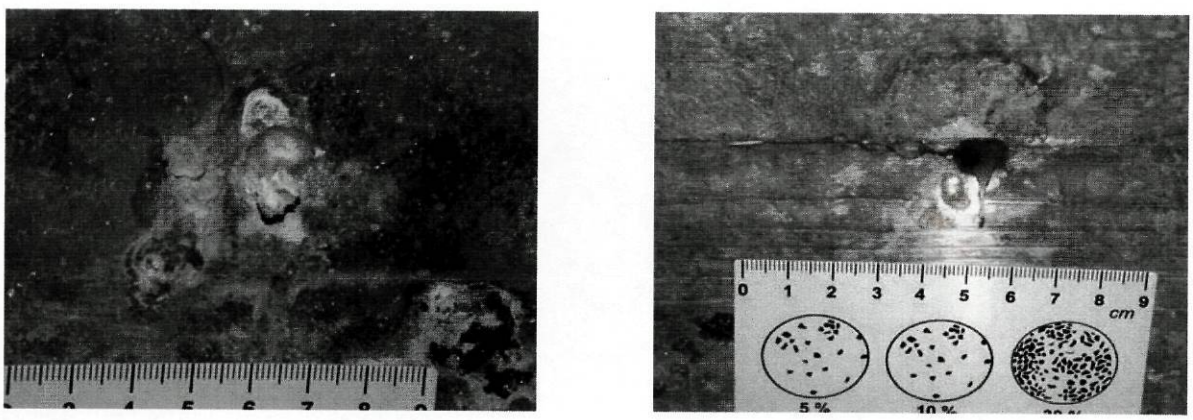
- Exsudações endurecidas, sólidas e com forte aderência às paredes da galeria, em geral com tom amarelado (Fotografia III.1.22);
- Exsudações translúcidas, que formam gotículas de aparência viscosa e apresentam aspecto leitoso nas zonas sólidas. Estas foram facilmente removidas das paredes da galeria (Fotografia III.1.23).

Nas restantes galerias existem algumas escorrências de cor branca e aspecto sacaróide, em forma de estalactites e também de estalagmites, de dimensões centimétricas, que se localizam junto aos drenos (Fotografia III.1.24).

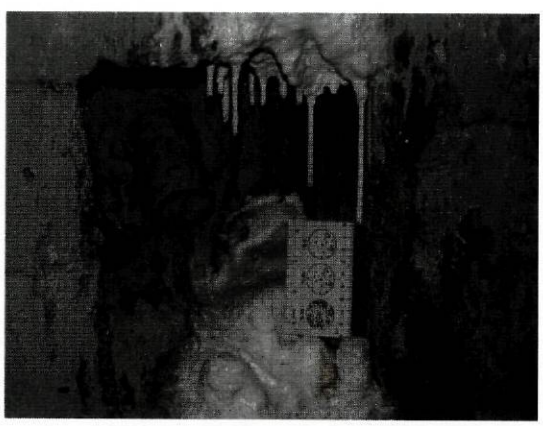
As amostras colhidas foram guardadas em frascos de material plástico, fechados e devidamente rotulados, e posteriormente preparadas em laboratório para observação ao microscópio electrónico de varrimento (MEV/EDS).



Fotografia III.1.22 – Exsudações endurecidas, sólidas e com forte aderência às paredes da galeria, em geral com tom amarelado (escala em centímetros).



Fotografia III.1.23 – Exsudações translúcidas, que formam gotículas de aparência viscosa e apresentam aspecto leitoso nas zonas sólidas (escala em centímetros).



Fotografia III.1.24 – Escorrências de cor branca e aspecto sacaróide, em forma de estalactites e estalagmites. Localizam-se junto aos drenos da galeria à cota 255,50 (escala da direita em centímetros).

5.3. Caracterização e composição das eflorescências e exsudações

As amostras foram preparadas por colagem com araldite a pequenos suportes cilíndricos metálicos, com cerca de 6 milímetros de diâmetro e 10 milímetros de altura, e conservadas em caixas fechadas. Foram revestidas a ouro antes da sua observação ao MEV.

A observação das eflorescências e exsudações e a análise semiquantitativa da sua composição conduziram ao agrupamento dos materiais identificados, de acordo com as suas características morfológicas e químicas. No Quadro III.1.9 encontra-se informação acerca da localização de cada amostra e seu aspecto macroscópico, conforme avaliado na inspecção *in situ* antes da sua colheita, e a composição em termos de elementos detectados na análise EDS. O primeiro algarismo da numeração corresponde à ordem cronológica das campanhas de inspecção e o segundo algarismo ao número de ordem da colheita em cada campanha.

As amostras foram agrupadas, de acordo com a morfologia macroscópica, em:

- Eflorescências – estão normalmente associadas às manchas de humidade das paredes das galerias. Localizam-se nas paredes mais próximas da fundação nas galerias de acesso à galeria de coroamento, ou seja, na parede esquerda, na margem esquerda, e na parede direita, na margem direita. Nestes locais, formam revestimentos contínuos na metade inferior das paredes; são brancas e aveludadas, com relevo.
- Exsudações – ocorrem isoladas nas galerias de acesso à galeria de coroamento e esporadicamente ao longo desta, predominantemente próximo do encontro esquerdo, na metade superior das paredes e no tecto. Em geral coincidem com juntas ou fissuras horizontais.
- Estalactites – foram assim identificadas as exsudações da galeria à cota 255,50 que surgem junto aos drenos e formam longas estalactites e estalagmites.
- Outros – produtos que não se identificam com os anteriores, dos quais foi feita colheita para averiguação da composição.

5.3.1. Eflorescências

Verifica-se que as eflorescências são essencialmente constituídas por cristais ricos em sódio. Estes cristais apresentam hábito acicular, lamelar ou tabular (Fotografia III.1.25) e, por vezes, formam partículas microscópicas globulares (Anexo C).

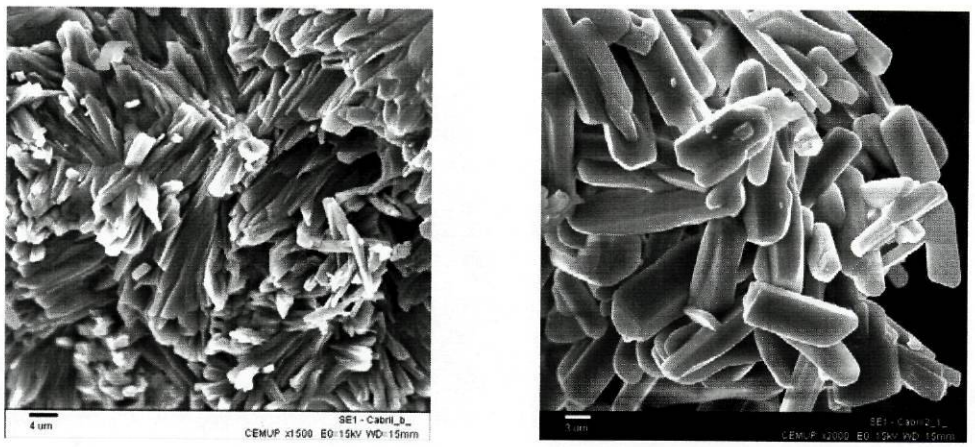
Quadro III.1.9 – Localização e características das amostras de eflorescências, exsudações e estalactites colhidas nas visitas de inspecção.

Nº da amostra	Local de colheita	Descrição	Composição
Eflorescências			
1.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Eflorescência.	Na (cristais), K, S, Na (base botrioidal).
1.2	Início da galeria de drenagem, MD, cota 272,00	Eflorescência.	Na (cristais), Si, K, Na (base amorfa).
1.3	Início da galeria de drenagem, MD, cota 272,00	Eflorescência.	Na (globular+cristais).
2.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Eflorescência branca, numa área extensa.	Na (cristais prismáticos), Si, K, Na (base amorfa).
2.2	Galeria de drenagem, MD, cota 272,00.	Eflorescência.	Na (cristais esqueléticos), Si, Al, Na, K (base amorfa), Si, Na, K (base gelatinosa sobre cristais de $CaCO_3$).
3.1	Galeria de drenagem, MD, topo.	Eflorescência branca, com pouco relevo.	Na (cristais tabulares), K, S, Na (zona semi-cristalina).
3.2	Galeria de drenagem, MD, cota 275,50.	Eflorescências brancas, aveludadas, sobre cimento recente.	S, Ca (cristais lamelares), Na, S (material esquelético).
5.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Eflorescência branca, *fluffy*.	Na, Al, Ca, Si, K (cristais), K, S, Na, Al, Si (semi-cristalina), Ca, Si, K, Al, Mg, Na, Fe (vacuolar).
5.2	Galeria de acesso à galeria de coroamento, MD.	Eflorescência branca, pulverulenta.	Na, Al (cristais tabulares).
5.3	Galeria de acesso à galeria de coroamento, MD.	Eflorescência amarelada, aveludada.	Na (globular).
Exsudações			
1.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, MD.	Exsudação.	Si, S, K, Na (amorfo), Si, Na, K(amorfo,compacto), Na (cristais aciculares), Si, Ca, K, Al, Na, Mg (semicristalino).
1.2	Galeria de coroamento.	Exsudação amarelada.	Si, K, Na (base amorfa), Na (cristais).
2.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação cristalina, branca.	Si, Na, K (amorfo), Na, Si, K (cristais), Na (cristais aciculares).
2.2	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação amarelada, com cristais aciculares.	Na, Si, K (cristais), Si, K, Na (base gelatinosa), Na, Ca, Si (cristal).
2.3	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação alongada, com gota translúcida.	Si, Na, K (base gelatinosa), Na, Si, K (cristais).
2.4	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação alongada, gelatinosa, acinzentada.	Na, Si, K (cristais), Si, K, Na (base amorfa ou vacuolar).
2.5	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação branca, em estalactite.	Si, K, Na (base amorfa), Na, Si, K (cristais lamelares).

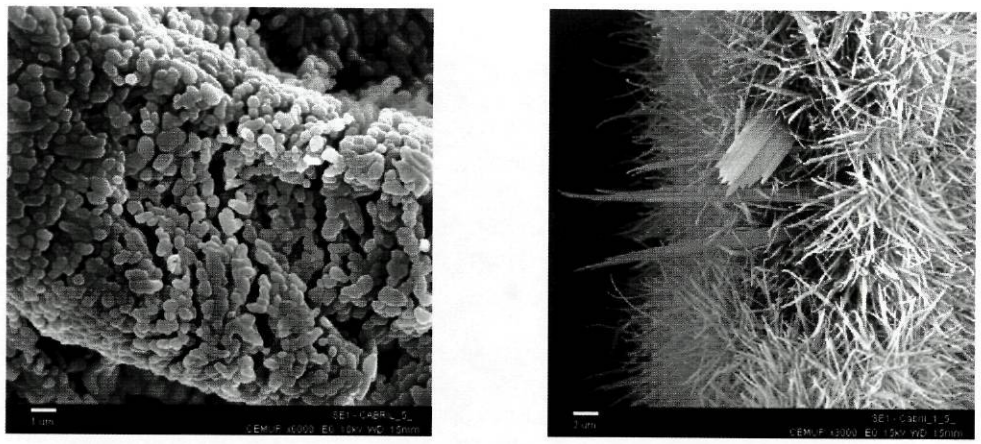
2.6	Galeria de acesso à galeria de coroamento, MD.	Exsudação branca, com gota translúcida.	Na, Si, K (cristais), Si, K, Na (base gelatinosa).
2.7	Galeria de acesso à galeria de drenagem, MD.	Exsudação branca, com base translúcida.	Si, K, Na (base amorfa), Na, Si, K (crist. lamelares).
2.8	Galeria à cota 255,50, junta P.	Exsudação amarelada, globular.	Si, K, Na (base amorfa), Na (cristais prismáticos).
3.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação branca.	Si, K, Na (área amorfa ou vacuolar), Na, Si (zona semicristalina).
3.2	Galeria de acesso à galeria de coroamento, MD.	Exsudação.	Si, K, Na (base amorfa), K, S, Na, Si (cristais).
3.3	Galeria à cota 274,50.	Exsudação branca, em estalactite, com zona translúcida.	Si, K, Na (base amorfa), Na, Si (cristais lamelares).
3.4	Galeria de drenagem, cota 195,00 m, MD, bloco O-P.	Exsudação de cor branca em tubo metálico (dreno).	Al, Na, K (cristais em harmónio).
4.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação branca, com zona viscosa e translúcida.	Si, Na, K (base amorfa), Na, Si, K (cristais).
4.2	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação branca, com zona viscosa e translúcida.	Na, K, Si (base gelatinosa), Na (cristais lamelares).
4.3	Galeria de coroamento, bloco V1E.	Exsudação branca, com zona viscosa e translúcida.	Si, Na, K (base amorfa), Na, Si, K (película sobre a base).
4.4	Galeria de coroamento, bloco Q-R.	Exsudação branca, com zona viscosa e translúcida.	Si, K, Na (base amorfa ou vacuolar), Na, Si, K (cristais lamelares).
4.5	Galeria de coroamento, bloco Q-R.	Exsudação branca, com zona viscosa e translúcida.	Si, K, Na (base amorfa ou gelatinosa), Na, Si, K (cristais lamelares).
5.1	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação compacta, amarelada.	Si, K, Na (base amorfa ou esquelética).
5.2	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação compacta, amarelada.	Si, K, Na (base amorfa ou vacuolar).
5.3	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação com zona viscosa, translúcida.	Si, K, Na (base amorfa), Si, Na, K (cristais).
5.4	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação branca, compacta.	Si, K, Na (base amorfa ou botrioidal), Na, Si (cristais tabulares).
5.5	Galeria de acesso à galeria de coroamento, ME.	Exsudação branca, compacta, com zona translúcida.	Si, K, Na (base amorfa), Na, Si, K (semicristalino).
5.6	Galeria de coroamento, bloco Q-R.	Exsudação viscosa e translúcida.	Si, K, Na (base amorfa), Na, Si, Al, K (semicristalina).
Estalactites			
2.1	Galeria 255.50, junto a dreno.	Estalactites longas, brancas.	Ca (cristais).
3.1	Galeria 255.50, junto a dreno.	Estalactites e estalagmites brancas.	Ca, Sr (cristais), Na (cristais aciculares).
4.1	Galeria 255.50, junto a dreno.	Estalactites e estalagmites brancas.	Ca (romboedros).
5.1	Galeria 255.50, junto a dreno.	Estalactites e estalagmites brancas.	Ca (romboedros).

Outros			
2.1	Galeria de drenagem, ME, cota 187,00, parede de montante.	Fuligem negra, aveludada, em escorrência de água.	Al, Si, Mn, K, Mg, Na, Ca (semicristalino).

A observação das amostras em momentos diferentes, com intervalo de cerca de um ano, mostrou que as partículas evoluem em contacto com o ar, mesmo quando conservadas em caixas fechadas ou no exsicador, desenvolvendo-se numerosos cristais aciculares sobre os cristais tabulares ou globulares (Fotografia III.1.26).



Fotografia III.1.25 – Forma dos cristais ricos em sódio presentes nas eflorescências.



Fotografia III.1.26 – Evolução dos materiais inicialmente globulares, com crescimento de agulhas ricas em sódio. As imagens, obtidas com intervalo de cerca de um ano, pertencem à mesma amostra.

A natureza destes cristais levantou algumas dúvidas, pelo facto de as análises em EDS serem semiquantitativas e não ser possível quantificar os elementos mais leves como o hidrogénio e o carbono. Perante a suspeita de se tratar de um carbonato ou de um hidróxido de sódio, surgiu a necessidade de realizar ensaios complementares. A

execução de ensaios de difracção de raio-X, no Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos do LNEC, permitiu esclarecer que se trata de trona, $Na_3H(CO_3)_2.2H_2O$ (Figura III.1.12). A trona é caracterizada por se apresentar fibrosa, maciça ou colunar. Ao microscópio óptico é incolor, com relevo moderado a baixo e forte birrefringência. Dadas as dimensões das amostras e a sua solubilidade em água, não foram preparadas lâminas delgadas deste material.

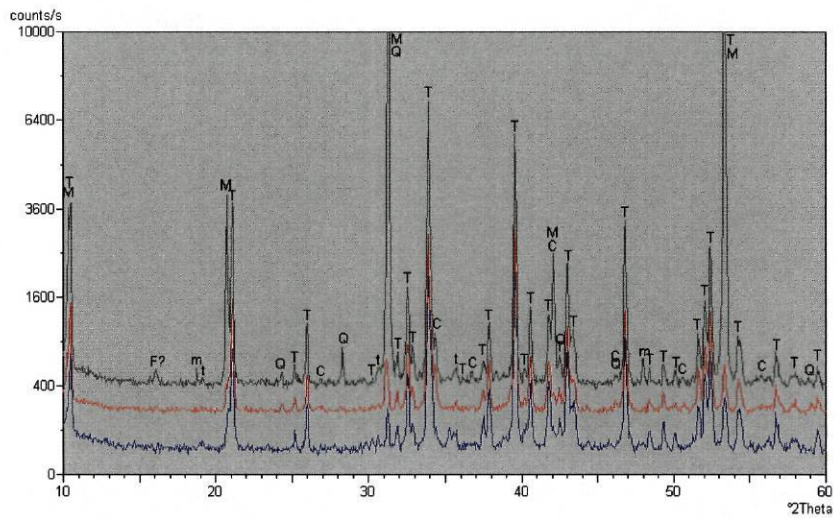


Figura III.1.12 – Registos difractométricos de três amostras de eflorescências. Notação: M – Mica (moscovite); m – riscas beta de M; T – Trona, $Na_3H(CO_3)_2.2H_2O$, t – riscas beta de T; F – Feldspato (albite?); Q – Quartzo; C – Calcite (análise realizada no LNEC).

As eflorescências estão presentes essencialmente nas galerias de acesso à galeria de coroamento e, nestas, predominam nas paredes que se encontram junto da fundação. Este facto pode estar na origem das manchas de humidade que coincidem com as eflorescências. A drenagem do maciço de fundação pode induzir a penetração de água no betão e posterior evaporação nas paredes das galerias, originando os depósitos de cor branca observados, fenómeno semelhante ao relatado por Nixon et al., 1979. O mesmo processo deverá estar na origem das manchas esporádicas de eflorescências nas paredes de montante da galeria de drenagem, em ambos os encontros.

5.3.2. Exsudações

No Quadro III.1.9, pode verificar-se que foram colhidas amostras de exsudações em todas as visitas de inspecção das galerias. Ao longo do tempo, verificou-se um aumento na quantidade de exsudações encontradas, relativamente à primeira visita, em que foram observadas apenas raras exsudações globulares, de cor amarela, totalmente sólidas. Nas campanhas seguintes, principalmente nas mais recentes, as exsudações de cor branca e

aspecto leitoso são as mais abundantes, algumas formando pequenas estalactites com zonas viscosas e translúcidas e aparência gelatinosa.

A análise, em EDS, das amostras colhidas mostrou a predominância de produtos formados por silício, com pequenas percentagens de potássio e sódio (Figura III.1.13), composição que deverá corresponder a gel sílico-alcalino (Fotografia III.1.27).

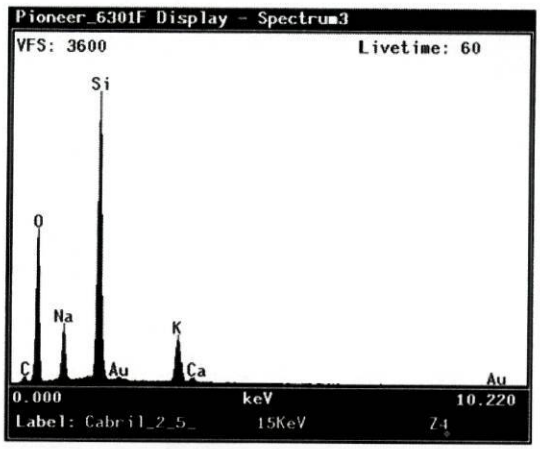
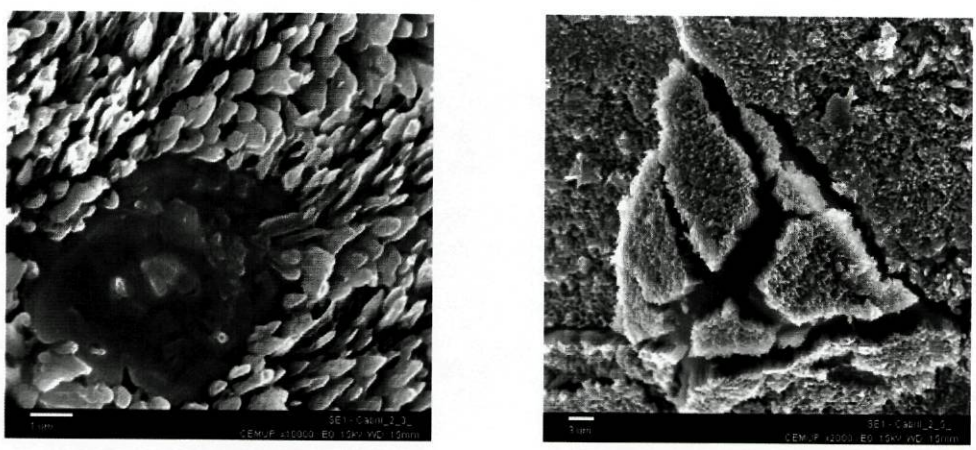


Figura III.1.13 – Espectro típico da composição do gel que forma as exsudações.

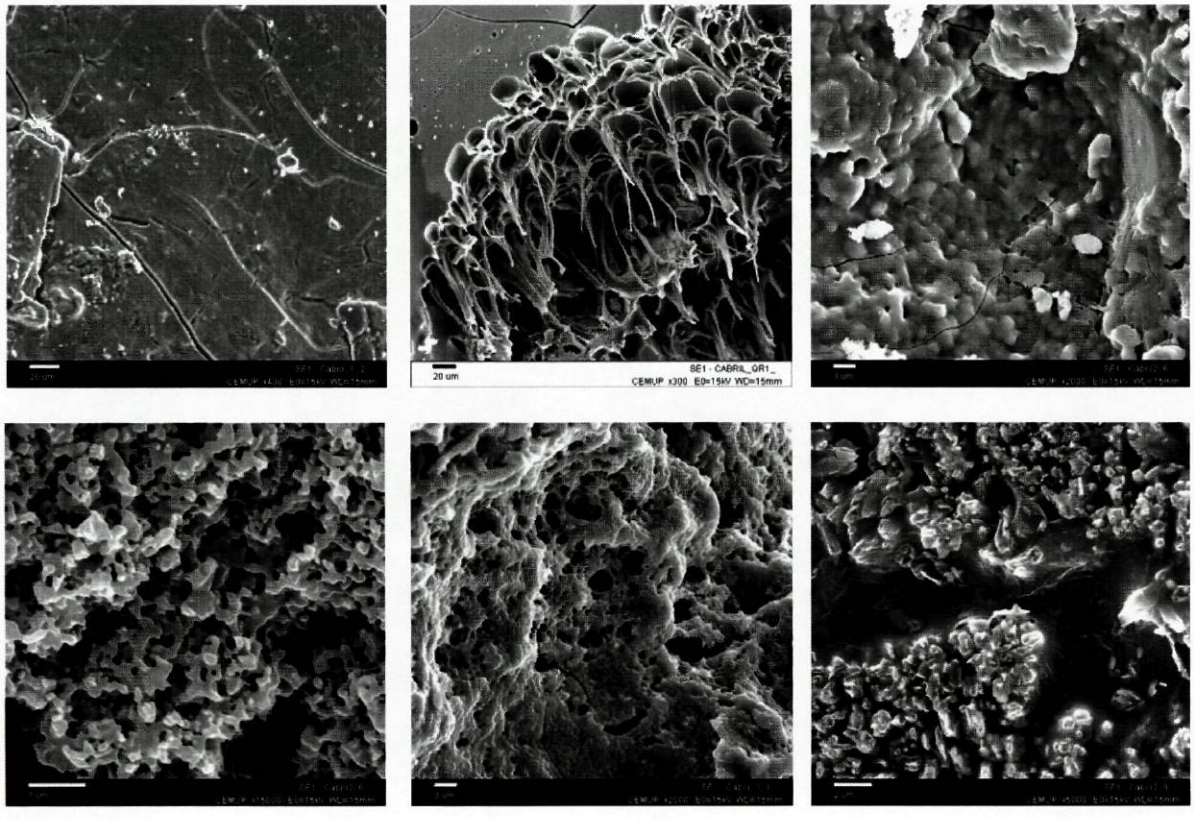


Fotografia III.1.27 – Aspecto predominante do gel sílico-alcalino que constitui as exsudações. Na imagem da direita a zona de aparência gelatinosa foi analisada em EDS (espectro na Figura III.1.13).

Macroscopicamente o gel é descrito como sendo transparente e resinoso, com viscosidade variável; quanto mais incolor e gelatinosa for a exsudação, maior a probabilidade de se tratar de gel sílico-alcalino (BRE Digest 330, 1991). A sua aparência é alterada por exposição ao ar, tornando-se branco e endurecido, com fissuras de dessecação semelhantes às da argila seca (Diamond, 2000). Este é o aspecto apresentado pelas exsudações colhidas nas galerias. As observadas na primeira inspecção estavam endurecidas e amareladas; as colhidas nas últimas visitas, que

estiveram durante um menor período de tempo expostas ao ar, são gelatinosas ou leitosas, viscosas.

O aspecto deste produto ao MEV é bastante variável, conforme apresentado no Anexo C. A morfologia mais frequente, que se observa em baixa ampliação, corresponde a um material amorfo e de superfícies lisas, com fractura concoidal. Quando observado em maior ampliação, apresenta textura esquelética, esponjosa, porosa, vacuolar e, por vezes, botrióide (Fotografia III.1.28), para composição idêntica, tal como referido em Bérubé e Fournier, 1986; Shayan, 1989; Shayan e Quick, 1989; Louarn e Larive, 1993. Segundo o trabalho de Helmut e Stark, 1992, o gel esponjoso tem um conteúdo em álcalis superior ao do gel maciço.



Fotografia III.1.28 – Texturas observadas no gel sílico-alcalino das exsudações: gel com textura lisa, formando filamentos, vacuolar, botrióide, esquelética ou com carácter viscoso.

Sobre o gel existem frequentemente cristais aciculares, prismáticos ou lamelares de uma substância rica em sódio.

Atendendo à morfologia observada e à composição obtida por EDS, pensa-se que deverá corresponder também a trona (Figura III.1.14 e Fotografia III.1.29). Dada a dimensão destes cristais nas exsudações, não foi possível utilizar outros métodos para confirmação da composição.

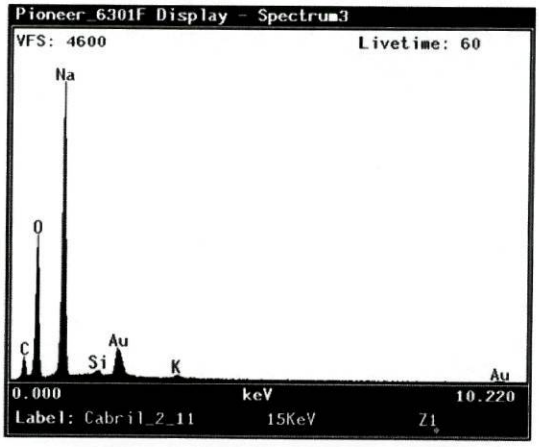


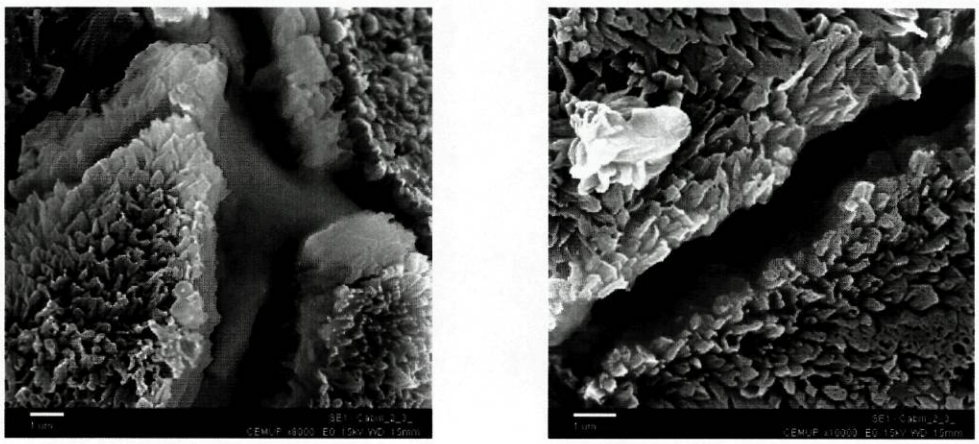
Figura III.1.14 – Espectro EDS dos cristais tabulares que se encontram sobre as superfícies de gel maciço, amorfo. São constituídas essencialmente por sódio, admitindo-se que possam corresponder a trona.



Fotografia III.1.29 – Cristais de um mineral rico em sódio, que poderá corresponder a trona. A composição é idêntica em todos os casos (análise na Figura III.1.14).

Uma evolução idêntica é referida por Stievenard-Gireaud, 1987, que afirma que os geles siliciosos são mais viscosos do que os ricos em sódio e que, quando o gel sílico-alcalino perde água, ocorre um rearranjo da estrutura com formação de pequenos cristais numa pasta amorfa. Também Larive, 1990, afirma que os produtos cristalizados podem corresponder ao termo de uma evolução do gel amorfo, uma vez que o gel terá tendência a organizar-se de forma a atingir um estado de energia mínimo. O exame das exsudações ao MEV revelou a evolução do gel, quando viscoso, sob a acção do vácuo. A observação de quatro das amostras de exsudações (2.2, 2.3, 2.6 e 2.7) mostrou uma superfície sólida constituída por cristais tabulares ricos em sódio, que se desenvolviam perpendicularmente à base. Em alguns locais esta crosta sólida estava fracturada, permitindo visualizar o material subjacente, de aparência viscosa (Fotografia III.1.30). No caso das amostras 2.6 e 2.7, este material apresentava-se ainda viscoso e fluía durante o

ensaio, pressionando a cobertura cristalina. A análise, em EDS, revelou que o gel não continha o revestimento a ouro que havia sido efectuado antes da observação. As amostras foram conservadas em exsicador, revestidas de novo a ouro e observadas ao fim de três meses.



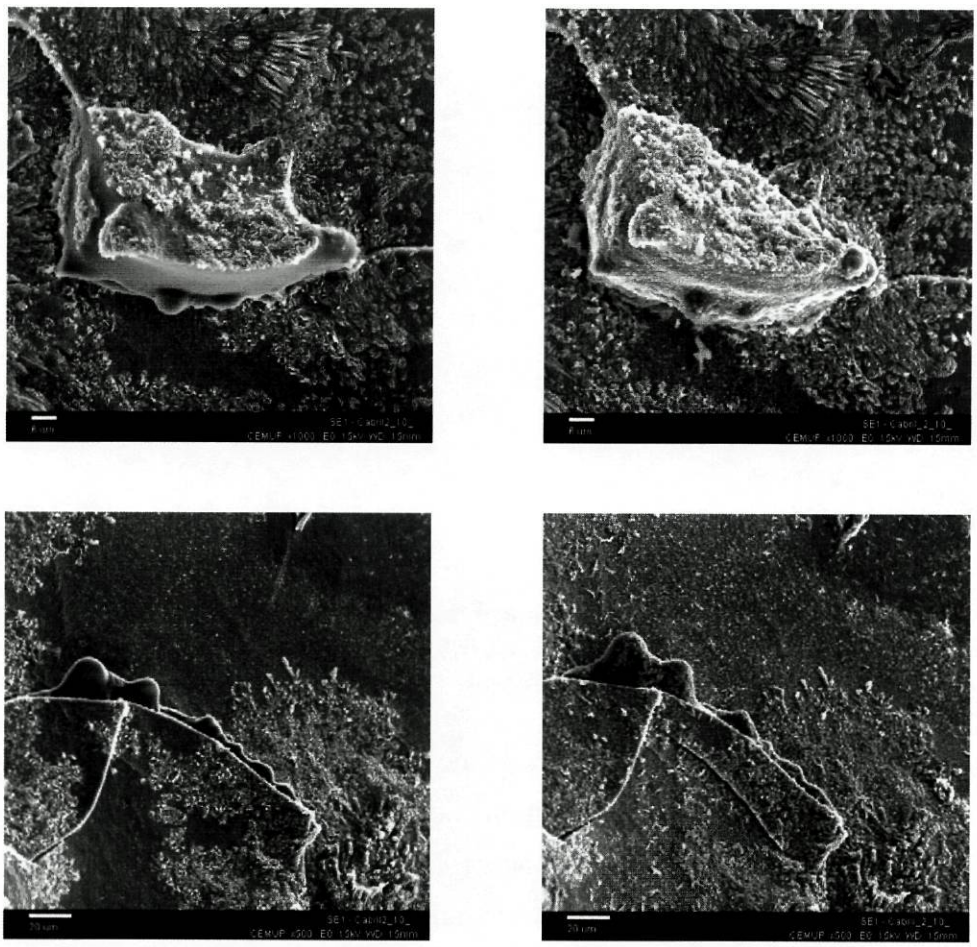
Fotografia III.1.30 – Aspecto de algumas exsudações em que a superfície sólida, constituída por cristais ricos em sódio, está fissurada, permitindo visualizar o material subjacente, de aparência viscosa.

Verificou-se uma evolução das amostras, que consistiu na abertura de mais fissuras na crosta cristalina e maior volume de material exsudado através das fissuras. O gel não mostrava já o aspecto gelatinoso e liso observado da primeira vez, mas continha alguns cristais ricos em sódio, crescendo sobre ele em lamelas longas e finas, paralelas à superfície do gel (Fotografia III.1.31).

Esta variação de textura poderá corresponder à evolução do gel sílico-alcalino quando exposto ao ar. Na bibliografia encontram-se referências à carbonatação do gel ao fim de algum tempo em contacto com a atmosfera e, por isso, as normas e relatórios que se debruçam sobre a colheita de amostras (BCA, 1992) frisam a necessidade de protecção imediata destas, sempre que há suspeitas de reacção álcali-agregado, para que o produto resultante da reacção possa ser analisado antes de sofrer alteração. Este facto contribui para reforçar a ideia de que os cristais formados sobre o gel correspondem a trona, uma vez que este mineral é um carbonato hidratado que contém sódio, presente inicialmente no gel. O sódio poderá libertar-se da estrutura do gel, formando o carbonato, por contacto com a atmosfera.

Este facto parece ter uma consequência imediata relacionada com a origem das eflorescências. A formação de eflorescências constituídas por trona e a sua associação com as manchas de humidade nas paredes pode indiciar condições propícias à formação

de gel ou condições em que o gel exsudado nas zonas mais húmidas é alterado, à superfície, para trona.



(a) (b)

Fotografia III.1.31 – Aspectos da evolução de uma amostra que continha gel viscoso, quando observada, em momentos diferentes, com intervalo de três meses: (a) imagens obtidas durante a primeira observação; (b) imagens do gel em observação após três meses.

A existência nas exsudações de produtos de textura diferente é também referida em Silva, 1992, com indicação de que as estruturas cristalinas apresentam maior teor em sódio do que as amorfas. O autor apresenta as composições de cada uma das estruturas, atribuindo à estrutura amorfa a composição de $4Na_2O.K_2O.8SiO_2.xH_2O$ e à estrutura cristalina $5{,}5Na_2O.K_2O.12SiO_2.xH_2O$ ou $16Na_2O.K_2O.13SiO_2.xH_2O$.

As análises EDS sugerem que os cristais ricos em sódio observados têm uma composição mais simples do que referida por aquele autor, ou seja, mais próxima da trona.

A composição do gel e dos cristais são também idênticas às encontradas por Jakobsen et al., 1993, em gotículas formadas em lâminas delgadas sobre partículas de

agregado reactivo e sobre o gel existente em fissuras e poros. Os autores concluíram que as gotículas se formam por exposição das lâminas ao ar e representam a fase líquida em equilíbrio com o gel formado pela reacção álcali-sílica.

Para apreciação da composição do gel amorfo ou vacuolar foram trabalhadas as análises semiquantitativas obtidas em EDS e realizados os cálculos apresentados por Knudsen e Thaulow, 1975, relativamente a análises sem padrão. Atendendo a que o gel sílico-alcalino poderá conter silício, sódio, potássio e cálcio, foram considerados apenas os óxidos respectivos, por combinação com o oxigénio, em base anidra. A soma foi normalizada para cem por cento, de modo a utilizar diagramas triangulares (Figura III.1.15).

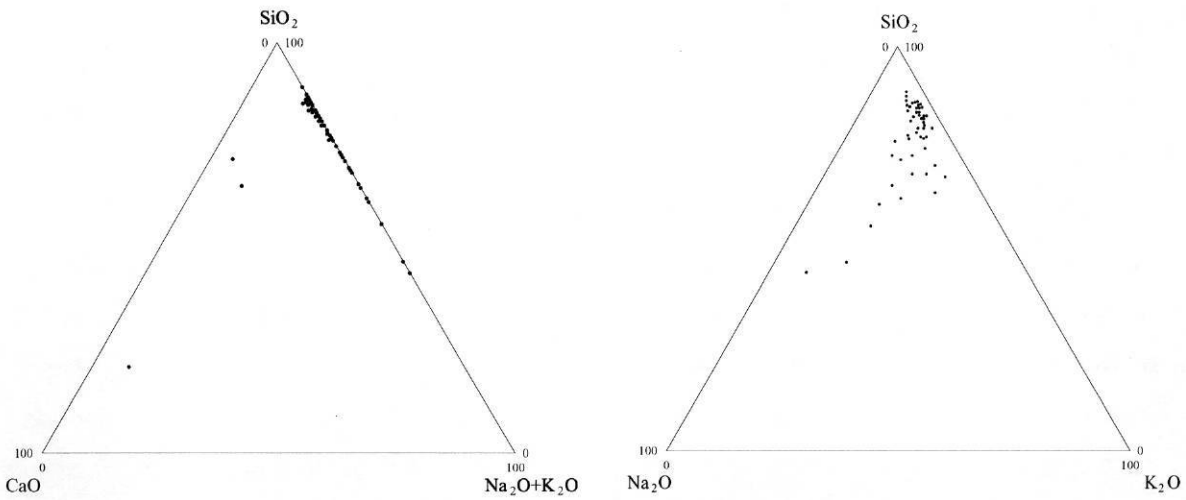


Figura III.1.15 – Composição do gel existente nas exsudações, analisado por EDS.

No primeiro diagrama, um dos vértices corresponde à soma de Na_2O+K_2O e os outros a SiO_2 e CaO. Verifica-se um predomínio do silício e uma percentagem de cálcio geralmente nula, o que pode ser explicado pela inferior velocidade de difusão do cálcio relativamente aos álcalis, devido ao seu maior raio iónico. De facto, apenas três amostras revelaram a presença do cálcio nas exsudações. Quanto à observação macroscópica e localização, não se encontra justificação para a existência de cálcio naquelas três amostras, que apresentam características idênticas às restantes exsudações.

Os resultados das análises foram também colocados no diagrama SiO_2-Na_2O-K_2O, excluindo as análises que revelaram a presença de cálcio. Neste diagrama é evidente o forte predomínio de SiO_2 relativamente aos álcalis, verificando-se, no entanto, alguma dispersão de valores no que se refere essencialmente ao teor de Na_2O.

A composição encontrada é semelhante à apresentada na Parte I e à determinada por Brouxel, 1993, que, em análises ao MEV/EDXA, obteve para o gel uma composição com grande intervalo de valores. O SiO_2 variava entre 27 e 95%, o Na_2O entre 0 e 3%, o K_2O entre 0,5 e 21% e o CaO entre 3 a 66%. Afirma, no entanto, que o conteúdo em CaO é sempre superior ao de álcalis, o que não se verifica no caso do Cabril.

De acordo com o anteriormente referido para a composição do gel, este deverá enriquecer em cálcio quando se desloca ao longo da pasta de cimento (Knudsen e Thaulow, 1975; Brouxel, 1993; Wigum, 1995; Thaulow et al., 1996; Diamond, 2000; Kawamura et al., 2001). No caso da Barragem do Cabril não ocorre cálcio, o que, à partida, se revela curioso. A ausência de cálcio sugere que o trajecto dentro da pasta de cimento terá sido muito curto e rápido, mantendo-se a composição livre de cálcio, provavelmente devido à maior dimensão do ião Ca^{2+} hidratado.

Por esta razão, conclui-se que a reacção álcali-sílica é, neste caso, superficial e poderá estar relacionada com partículas de agregado próximas da parede interior da galeria, ou seja, situadas junto à face do betão.

Tal como foi referido para as eflorescências, as exsudações apresentam uma distribuição heterogénea e localizada no corpo da barragem. A sua presença na galeria de coroamento e respectivos acessos em ambas as margens leva a crer que nestes locais haverá humidade e facilidade de circulação dos fluidos mais acentuada do que nas galerias a cotas mais baixas. Seria, no entanto, de admitir maior prevalência de reacções na zona que se encontra entre os níveis anuais máximo e mínimo da albufeira ou na zona permanentemente submersa, mais propícias à existência de reacções internas no betão, dado representarem um agravamento das condições ambientais adversas.

Excluindo a hipótese de o betão aplicado na zona que corresponde à galeria de coroamento e cotas superiores ter características diferentes do restante betão, a razão pela qual apenas se encontra gel àquelas cotas não parece fácil de justificar. No entanto, é sabido que o corpo da barragem tem mostrado expansão e que se verificou, após a construção, a abertura de fissuras de origem estrutural nas cotas mais altas, em resultado da alteração ao projecto inicial e da construção do tabuleiro rodoviário.

As fissuras então detectadas, essencialmente horizontais, foram alvo de tratamento por injecção de resinas no início dos anos 1980, o que não solucionou o problema, tendo-se verificado abertura de novas fissuras no betão após o enchimento da albufeira. A existência de fissuras poderá facilitar a saturação do betão nesta zona, facto essencial à presença de reacções álcali-agregado, o que pode explicar a ausência de exsudações nas galerias situadas a cotas mais baixas. Apesar das pesquisas nesse sentido, não foi

possível conhecer a composição da resina injectada nas operações de tratamento da estrutura, pelo que não foi relacionada a sua composição com a encontrada nas exsudações.

5.3.3. Estalactites

Relativamente às amostras de estalactites, verificou-se que são constituídas por carbonato de cálcio cristalizado, essencialmente sob a forma de romboedros (Figura III.1.16) (Fotografia III.1.32). No Anexo C encontram-se outras imagens destes cristais. Nestes carbonatos, uma das análises revelou a presença de estrôncio, que poderá ter sido lixiviado da pasta de cimento ou, eventualmente, das plagioclases existentes nos agregados, uma vez que este elemento substitui, por vezes, o cálcio.

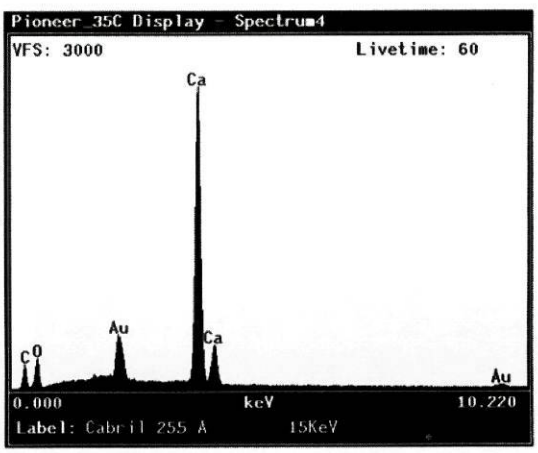
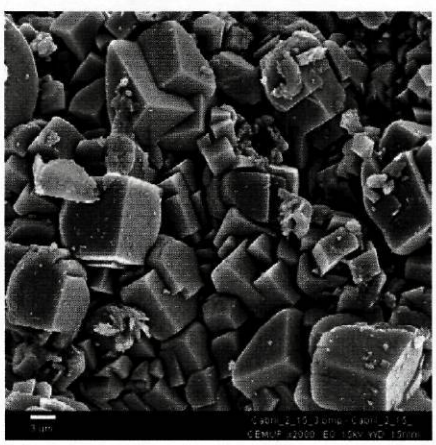


Figura III.1.16 – Espectro EDS das estalactites existentes na galeria à cota 255,50.



Fotografia III.1.32 – Cristais de carbonato de cálcio presentes nas estalactites da galeria à cota 255,50 (análise na Figura III.1.16).

5.3.4. Outros produtos

Durante a inspecção foi detectado um produto de cor negra e aspecto aveludado proveniente do dreno situado à cota 187,00 na parede de montante da galeria de drenagem, na margem esquerda. Acompanha a escorrência de água na galeria e fixa-se sobre uma película de carbonato de cálcio num pequeno reservatório de cimento, com a forma de um tanque, que existe no local. Atendendo à sua composição (Figura III.1.17) (Fotografia III.1.33) e ao local onde ocorre, este produto poderá corresponder a água infiltrada no maciço rochoso de fundação e que, atingindo o betão, é encaminhada pelos drenos.

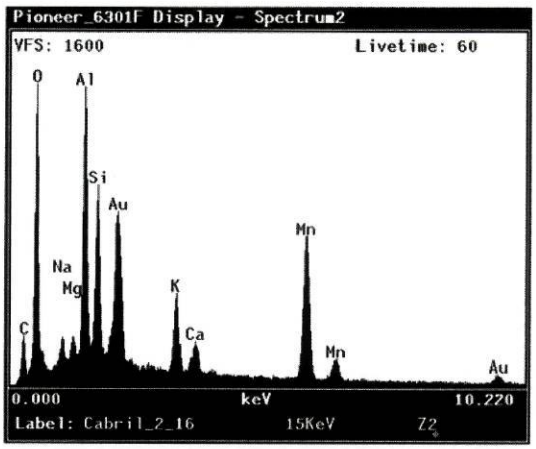
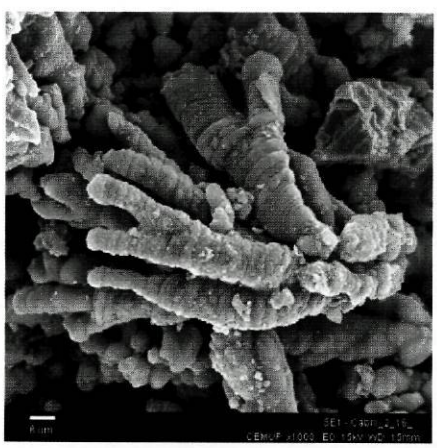


Figura III.1.17 – Espectro, EDS, correspondente ao produto de cor negra presente na água de escorrência da galeria de drenagem, na margem esquerda.



Fotografia III.1.33 – Imagem, obtida ao MEV, do produto de cor negra presente na água de escorrência da galeria de drenagem, na margem esquerda.

A ocorrência de produtos deste tipo foi referida por Silva, 1992, que indica que os depósitos acastanhados ou negros resultam da precipitação do ferro e do manganésio

transportados em solução pelas águas drenadas. Os depósitos apresentam cor negra se o ambiente geoquímico gerado na água à saída dos drenos for redutor.

Apesar dos numerosos drenos existentes ao longo da galeria de drenagem em ambas as margens, este é o único local onde se encontrou este tipo de depósito, pelo que concluímos que corresponderá a uma mineralização contendo manganésio localizada no maciço de fundação.

5.4. Estudo do betão. Trabalho experimental em laboratório

Para a colheita de amostras de betão foi utilizado um equipamento ligeiro de furação à rotação com coroa de diamante, com brocas de 100 milímetros de diâmetro exterior. A máquina é da marca Milwaukee, modelo 4094-5 com 230 W de potência e velocidade de rotação de 450 ciclos/minuto, com arrefecimento por circulação de água. O equipamento foi cuidadosamente fixado à face de furação, para evitar introdução de fracturas durante a operação. A máquina de furação permite retirar carotes com cerca de 400 milímetros de comprimento, dimensão máxima do amostrador, e até 900 milímetros, com a adaptação de alongas.

O estudo em laboratório compreendeu várias etapas. Utilizou-se como orientação o relatório elaborado pela BCA, 1992, de acordo com a seguinte sequência:

- Análise macroscópica dos tarolos;
- Análise de pedaços de betão dos tarolos à lupa binocular;
- Preparação de pequenas esquírolas do betão, para análise ao MEV/EDS;
- Selecção de locais, ao longo dos tarolos, para execução de lâminas delgadas polidas;
- Exame petrográfico das lâminas de betão à lupa binocular e ao microscópio óptico polarizante;
- Observação ao MEV das lâminas delgadas e análise EDS, sempre que surgiram dúvidas na identificação dos materiais presentes;
- Exame de algumas lâminas à microssonda electrónica, para determinação da composição dos materiais observados;
- Exame ao MEV/EDS de fragmentos de betão.

Alguns trechos dos tarolos foram seleccionados, logo de início, para realização de ensaios de compressão uniaxial, não tendo sido produzidas lâminas delgadas dos provetes submetidos a ensaio.

5.4.1. Descrição macroscópica

Os tarolos obtidos por furação foram analisados macroscopicamente segundo a norma ASTM C 856-04, 2004 através do estudo das características que constam dos quadros no Anexo A.

O betão é compacto e duro, não é facilmente fracturado com martelo, não é friável, não apresenta fissuração ou indícios de desagregação. Os tarolos foram retirados em peças únicas, até onde o equipamento permitia, ou em fragmentos de dimensão igual à do amostrador, quando se mostrava necessária a utilização da alonga. Estes tarolos não fracturaram em resultado da extracção nem do manuseamento (Fotografia III.1.34).

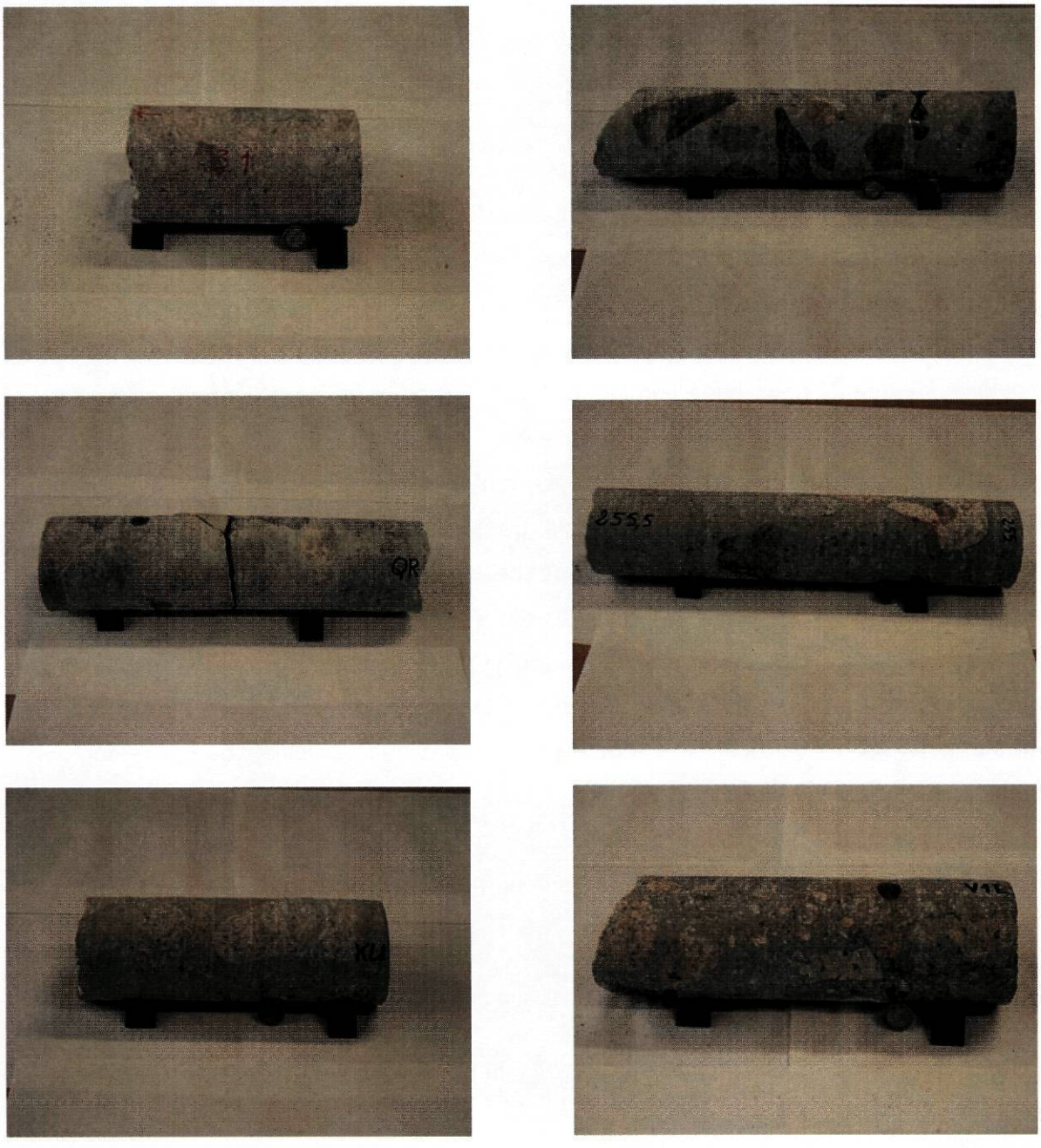
A pasta de cimento apresenta em todos os tarolos uma coloração cinzenta clara, compacta e uniforme, em geral sem fissuras.

Os agregados apresentam-se em duas dimensões – os grossos e a fracção areia –, ocorrendo raramente granulometrias intermédias.

Os agregados grossos, abundantes, que, de acordo com o referido em Xerez, 1954, podem atingir 150 milímetros segundo a direcção de maior dimensão, são predominantemente graníticos e distribuem-se homogeneamente no seio do cimento. De acordo com a BS 812: Part 102, 1989, as partículas têm superfície irregular, de textura rugosa a cristalina (Quadro I.6). Revelam baixa esfericidade, e são angulosas a muito angulosas (Krumbein e Sloss, 1966, e Powers, 1953, (Figura I.4)). Existem, ainda, partículas de rocha metamórfica de cor castanha, que apresentam baixa esfericidade e são roladas a bem roladas, e que se supõe poderão corresponder a seixos colhidos no fundo do vale; existem também partículas de material quartzoso de origem filoniana. Segundo Pereira, 1987, a auréola metamórfica mostra uma zonografia da biotite bem marcada que deverá estar associada a "uma massa plutónica não aflorante que parece estar relacionada com a deformação hercínica". Algumas das partículas de natureza metamórfica poderão pertencer a esta auréola.

Os agregados finos visíveis em amostra de mão são muito angulosos e alongados e têm baixa esfericidade. Apresentam distribuição homogénea no betão.

Observaram-se raras orlas escuras em torno de agregados rolados e também aspecto resinoso em algumas das partículas de granito de dimensões intermédias, da ordem dos 50 milímetros segundo o máximo comprimento. Este aspecto resinoso nas partículas de granito, que aparentavam conservar humidade após a furação, foi observado nos tarolos retirados em V1E, 1DE e 1EME. Foram, por esta razão, produzidas lâminas delgadas destes locais para observação microscópica.



Fotografia III.1.34 – Imagens de tarolos de betão retirados da barragem do Cabril. O betão mostra-se compacto e são. As superfícies de fractura correspondem aos limites de furação do amostrador.

Localmente, foram encontradas fissuras finas no contacto pasta de cimento-agregado, sem preenchimento, como é o caso da carote retirada na galeria à cota 255,50, junto ao dreno.

São visíveis alguns poros de pequeno diâmetro, que podem atingir 5 milímetros, dispersos homogeneamente na pasta. Estes poros são mais frequentes no tarolo retirado do Furo 3, na galeria de acesso à galeria de coroamento, na margem esquerda. Alguns

poros apresentam-se parcialmente preenchidos por um produto branco, de aspecto sacaróide. Para identificação destes produtos de preenchimento, foram analisados ao MEV/EDS pequenos fragmentos de betão.

5.4.2. Propriedades mecânicas

Foram já referidos na Parte II os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do betão realizados quando da construção e após os trabalhos de tratamento que ocorreram na década de 1980.

Com o objectivo de estabelecer comparação com os resultados obtidos anteriormente e avaliar a eventual degradação do betão, foram serrados alguns trechos dos tarolos de betão para realização de ensaios de compressão uniaxial.

Os ensaios foram realizados segundo a norma NP EN 12390-3, 2003, no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais do Instituto Superior Técnico (IST) sobre cilindros obtidos por corte das carotes de betão. O diâmetro dos cilindros é de 94 milímetros e a altura é cerca de duas vezes o diâmetro, conforme indicado no Quadro III.1.10 (NP EN 12390-1, 2003. Atendendo à grande dimensão máxima das partículas de agregado, não foi possível cumprir as indicações desta norma relativamente à relação entre a dimensão do diâmetro do provete e a dimensão das partículas, que deve ser, pelo menos, de três vezes e meia.

Os tarolos foram cortados e rectificados de modo a garantir que as superfícies onde era aplicada a carga eram paralelas entre si e normais ao eixo do provete.

Quadro III.1.10 – Características dos provetes ensaiados à compressão uniaxial.
A inclinação é relativa ao plano vertical.

Furo	Inclinação (º)	Profundidade do provete no furo (mm)	Comprimento do provete (mm)
Furo 1 1.3-2001	90	770	178
Furo 2 2.2-2001	90	470	181
Furo 3 3.1-2001	90	95	165
Furo 4 1EE-2003	40	110	178
Furo 7 1ED-2003	54	120	163
Furo 8 F255,5-2003	90	130	183
Furo 11 LK-2003	90	50	181

Utilizou-se uma prensa Instron, modelo 1343. Nos casos em que a força aplicada excedeu os 250 kN, foi necessário recorrer à prensa ToniPack, modelo 3000. Utilizou-se um sistema automático de aquisição contínua de dados da força aplicada e do deslocamento respectivo.

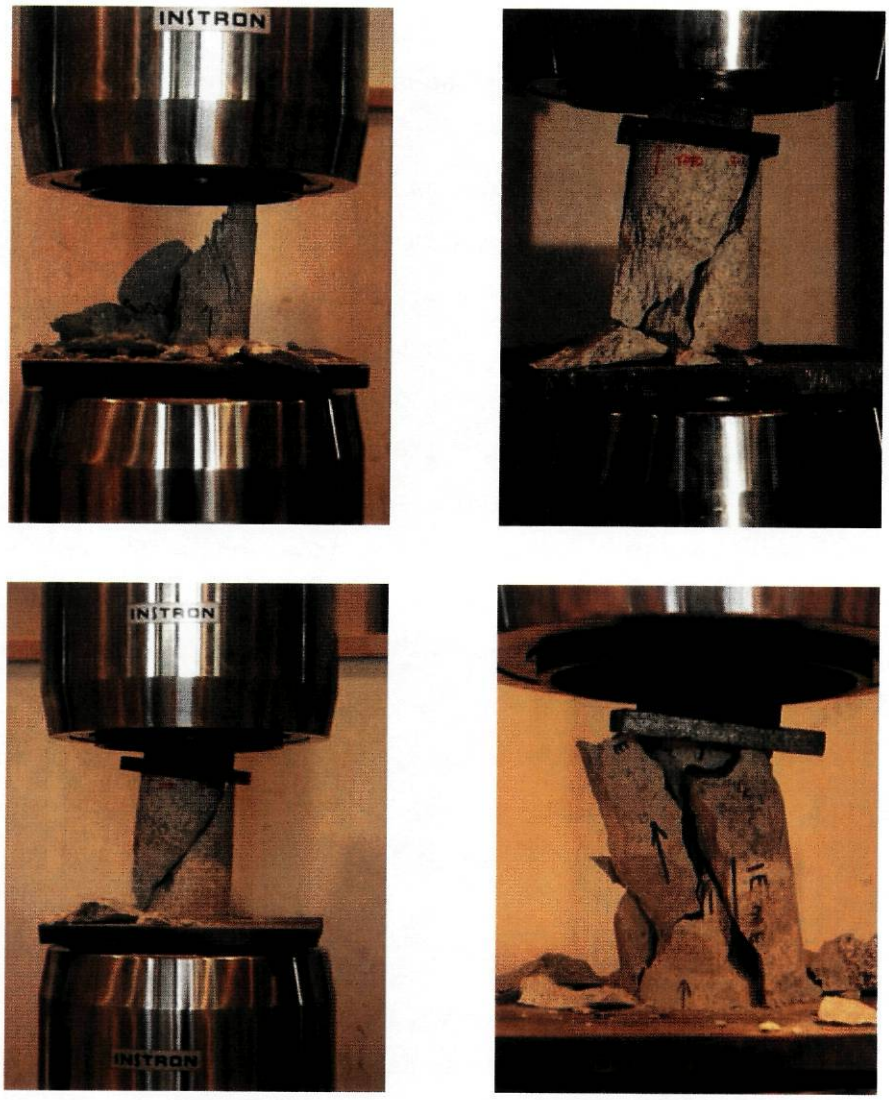
A evolução da figura de rotura dos provetes é diferente para os dois equipamentos, dado que no primeiro caso é mantida a aplicação da força mesmo após rotura, enquanto que, na segunda máquina, a força cessa logo que existe cedência dos provetes. No último caso, não é tão evidente a forma como se processa a rotura do provete.

As superfícies resultantes da rotura por compressão não mostraram um padrão uniforme (Fotografia III.1.35), mas ocorreram predominantemente pelo contacto entre a pasta de cimento e as partículas de agregado de maior dimensão. No primeiro equipamento verificaram-se superfícies de rotura fazendo cerca de 45º com a direcção de aplicação da força, enquanto que, na segunda máquina, como a força cessava logo que se formavam as primeiras fissuras nos provetes, estas são predominantemente paralelas à direcção de aplicação da força de compressão e ao eixo dos provetes.

A análise das figuras de rotura mostrou comportamentos diversos para os provetes:

- Existe rotura pela interface entre as partículas de agregado grosso e a pasta de cimento em três casos (carotes 1.3, 1EE e 2.2). No caso da carote 2.2 verificou-se uma inflexão da curva tensão-deformação que pode atribuir-se a irregularidades ou ligeiro desfasamento das superfícies, em princípio paralelas, onde foi aplicada a força. Dos fragmentos da carote 1EE foi retirado um pedaço que continha uma partícula de origem sedimentar, cortada durante o ensaio, e que apresentava uma orla escura, possivelmente de reacção.
- A superfície de rotura atravessa partículas de agregado grosso em dois casos: carote 255,5, que apresenta granito alterado, e 3.1, com granito aparentemente são, mas friável.
- Nos casos em que se atingiu resistência à rotura mais elevada, a rotura ocorreu em superfícies paralelas ao eixo dos provetes e à direcção de aplicação da força (carotes 1ED e KL).

Para o cálculo da tensão e da deformação foram consideradas, em cada provete, as medidas do diâmetro e da altura. Com base nestes elementos, foram construídos os gráficos apresentados na Figura III.1.18.



Fotografia III.1.35 – Imagens dos provetes de betão após realização dos ensaios de compressão uniaxial (os provetes têm 94 milímetros de diâmetro).

Os gráficos tensão-deformação foram elaborados utilizando a mesma escala para todos os provetes, com o objectivo de permitir fazer a análise comparativa.

As curvas tensão-deformação mostram, de uma maneira geral, um declive idêntico, fazendo prever um valor de módulo de elasticidade aproximadamente constante. Os valores de resistência à rotura variam entre 18 e 39 MPa. O valor anormalmente baixo, de 18 MPa, verificou-se para o provete em que a rotura ocorreu pela partícula de granito mais friável. Os provetes nos quais a rotura ocorreu pelo contacto pasta de cimento-agregado apresentam valor de resistência próximo de 25 MPa. Os valores mais elevados verificaram-se nos casos em que as superfícies de rotura atravessaram pasta de cimento

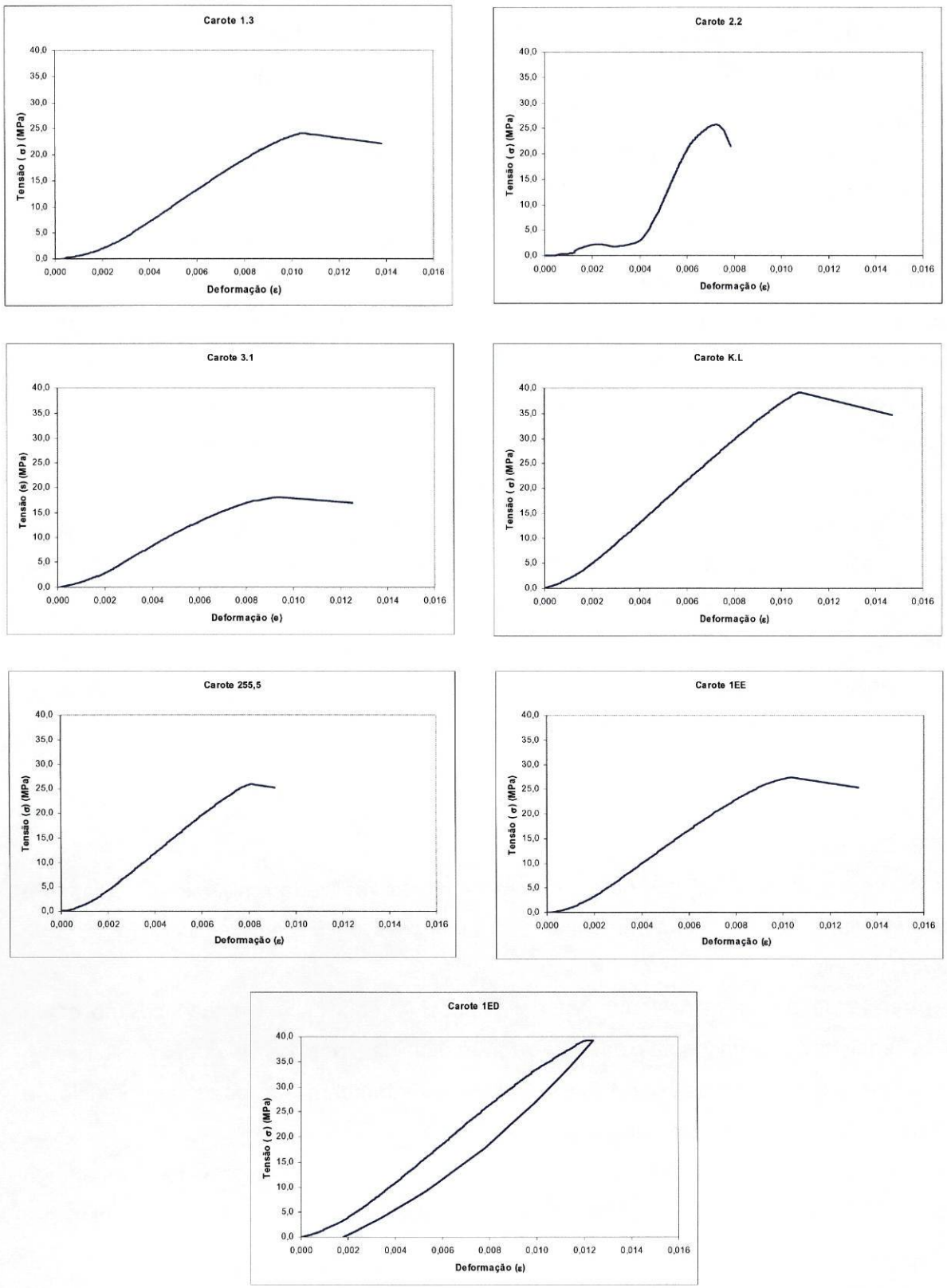


Figura III.1.18 – Gráficos tensão-deformação dos provetes de betão submetidos a compressão uniaxial.

e partículas de granito são, que, como apresentado anteriormente, têm valores de resistência à compressão substancialmente superiores aos do betão.

O valor médio é de 29 MPa, com desvio padrão de 7,8 MPa. Este valor é idêntico ao de 29,8 MPa referido em Nunes e Machado, 1961, pelo que pode concluir-se que não existe decréscimo significativo do valor desta característica mecânica do betão.

O efeito das reacções álcali-sílica sobre a resistência à compressão do betão é tratado por vários autores que concluem que este parâmetro decresce com o aumento de expansão (Hobbs, 1988; Swamy e Al-Asali, 1988a; 1988b; Nishibayashi et al., 1992) e é uma função do tempo (Marzouk e Langdon, 2003). O decréscimo é, no entanto, pouco acentuado (Stievenard-Gireaud, 1987), sobretudo para betão contendo agregados de baixa reactividade. O ensaio de compressão uniaxial é, por isso, pouco adequado para avaliar a deterioração do betão devida a reacções álcali-agregado (Skalny et al., 2002).

Os trabalhos divulgados referem, ainda, que as propriedades físicas mais afectadas p ela existência de reacções álcali-sílica são a resistência à tracção e o módulo de elasticidade (BRE Digest 330, 1991; Swamy e Al-Asali, 1988a; Larive, 1990; Swamy, 1992). A percentagem de redução dos valores destes parâmetros não reúne, contudo, consenso entre os investigadores e as referências mostram grande dispersão de valores.

A análise dos resultados obtidos deve ter em conta que os provetes ensaiados deveriam ter um diâmetro muito superior, uma vez que a máxima dimensão dos agregados é de cerca de 150 milímetros.

5.4.3. Exame petrográfico

A análise petrográfica dos betões da barragem foi realizada em lâminas delgadas e em lâminas delgadas polidas, seguindo as indicações da Especificação LNEC E 388, 1993.

Atendendo a que se pretende estudar a possível ocorrência de reacções no betão envolvendo os agregados, as amostras foram colhidas nos locais que apresentavam evidências de degradação, como as exsudações, e também em locais sem indício de deterioração, que foram tomados como referência.

Foram preparadas 44 lâminas, distribuídas regularmente ao longo dos furos e também em locais específicos identificados, na análise macroscópica, como sendo de interesse por apresentarem:

- Abertura no contacto do agregado com a pasta de cimento;
- Manchas ou orlas de humidade nos agregados;
- Poros com preenchimento.

Produziram-se também lâminas nos locais em que foram observados agregados de rocha metamórfica ou proveniente de filões, conforme referido, com o objectivo de estabelecer uma comparação de comportamento relativamente às partículas graníticas.

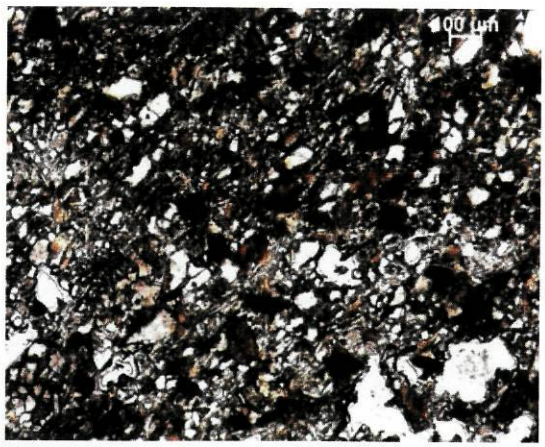
É de realçar, no entanto, que o exame petrográfico levanta questões relativas à representatividade das amostras e lâminas, uma vez que estas têm localização e dimensão limitadas quando comparadas com os grandes volumes de betão das obras de que são extraídas, como é o caso das barragens. Relativamente à detecção de indícios de reacções álcali-sílica, esta análise pode ser ainda mais enganosa, dada a heterogeneidade quanto à distribuição e intensidade do fenómeno no corpo das estruturas. Por esta razão, parece pouco adequado quantificar, por exemplo, a extensão e abertura das fissuras, sendo mais importante assinalar a sua presença e características como localização, padrão e preenchimento.

Como foi referido, existem agregados grossos de grandes dimensões e agregados finos de dimensão areia, sendo pouco significativas as granulometrias intermédias. Raramente foram detectadas partículas correspondentes à dimensão seixo. Serão expostas, em seguida, as características das partículas de agregado e da pasta de cimento e as particularidades detectadas no betão como a fissuração e os poros.

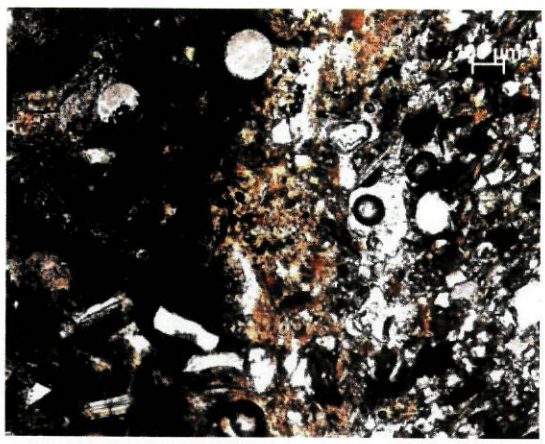
5.4.3.1. Agregados grossos

Os agregados grossos são predominantemente constituídos por partículas de granito de textura variada. Existem também partículas de grandes dimensões, com diâmetros que atingem os 100 milímetros, de cor escura e textura orientada, constituídas predominantemente por biotite, quartzo, moscovite e clorite (Fotografia III.1.36). São partículas com foliação pouco evidente, que têm bordos bem rolados, o que indicia uma origem diferente da das partículas graníticas. São, provavelmente, calhaus rolados de rocha metamórfica, colhidas no leito do rio, e também aproveitados, em pequena quantidade, para a preparação do betão.

Verifica-se que, numa destas partículas, o contacto com a pasta de cimento surge de forma difusa, parecendo existir minerais do agregado no seio da pasta de cimento, numa orla de cerca de 5 milímetros de largura (Fotografia III.1.37). Esta orla é visível macroscopicamente, embora seja pouco nítida, uma vez que a coloração dos minerais presentes no agregado, de grão muito fino, é semelhante à da pasta de cimento, a essa escala. A orla, que indica a existência de uma reacção, não se encontra nos contactos entre a pasta de cimento e as partículas de granito, os quais se apresentam sempre bem definidos e sem orla de reacção.



Fotografia III.1.36 – Partícula de rocha metamórfica constituída por biotite, quartzo, moscovite e clorite (N//).



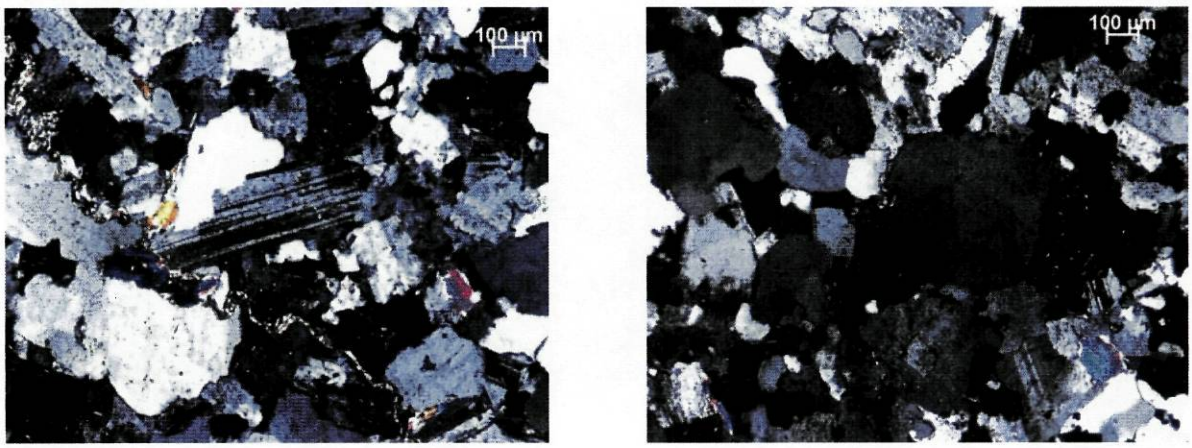
Fotografia III.1.37 – Orla difusa entre partícula de rocha metamórfica e a pasta de cimento (N//).

Encontram-se ainda algumas partículas de cor escura e textura ligeiramente orientada, constituídas predominantemente por turmalina e contendo também quartzo e moscovite. Estas partículas poderão ter origem em filões existentes no maciço granítico.

Entre as partículas de agregado, encontram-se os dois tipos de granito que afloram na pedreira, "Cabril Norte" e "Cabril Sul", com frequência aproximadamente igual. Estão também presentes dois outros tipos de granito, não identificados na pedreira: um granito de grão fino, que mostra ligeira alteração, e um granito com intensa deformação, este também com apreciável frequência.

O granito de grão fino é idêntico a um granito que aflora a cotas superiores à pedreira e que é designado por Pereira, 1987, por Granito da Senhora da Confiança.

Trata-se de um granito de grão fino, compacto, por vezes caulinizado, de aspecto aplítico (Fotografia III.1.38).



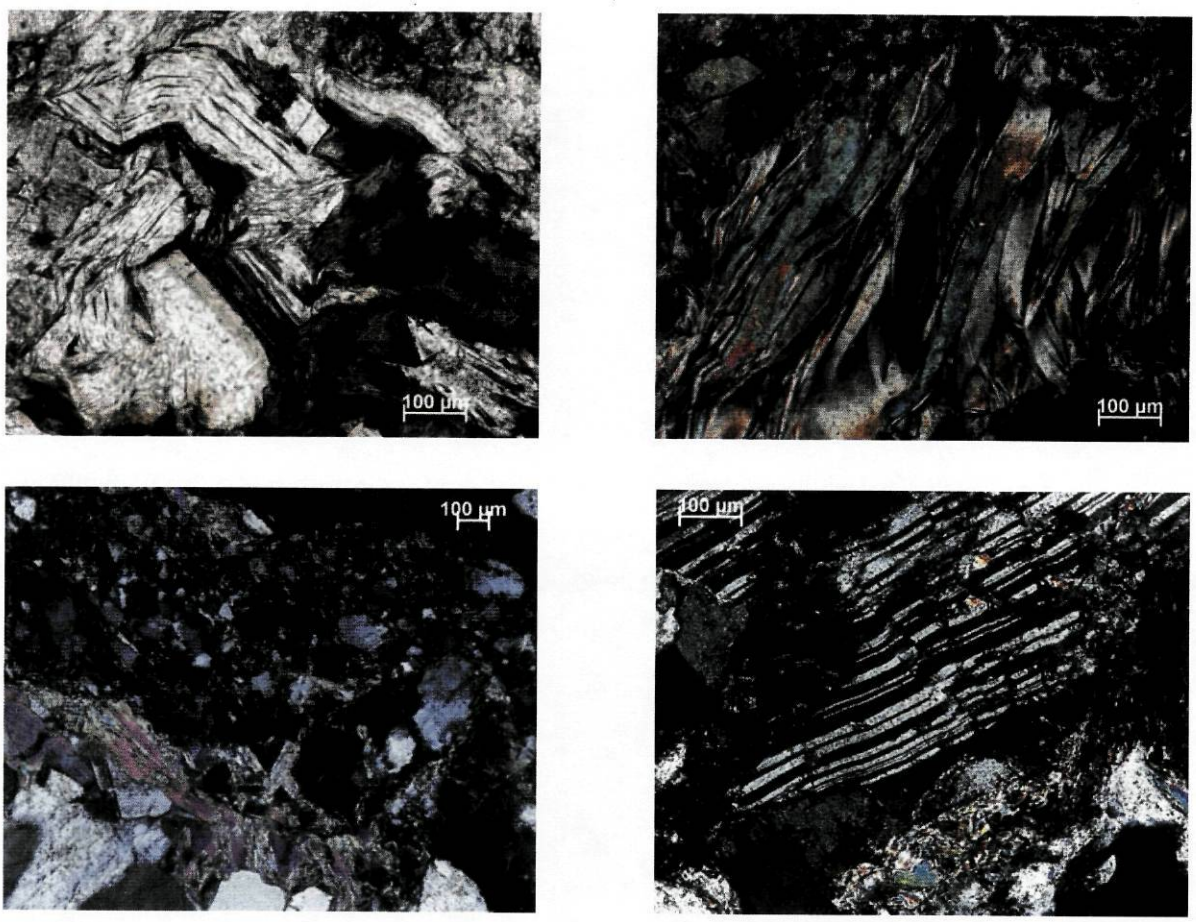
Fotografia III.1.38 – Aspectos da textura e da extinção ondulante dos cristais de quartzo do "Granito da Sra. da Confiança" (NX).

Ao microscópio mostra algumas variações de textura. Localmente o grão é mais fino e os bordos dos cristais mais irregulares e suturados, denotando deformação. A rocha é composta por feldspato potássico, plagioclase, quartzo, moscovite, turmalina, esfena, apatite e mais um fosfato, além deste. A plagioclase é abundante e ocorre em duas gerações. Os cristais de menor dimensão são subédricos, apresentam-se sãos e com maclas nítidas da albite. Os cristais de maior dimensão são anédricos, por vezes com textura poecilítica. Por vezes observa-se textura gráfica de intercrescimentos com o quartzo. O feldspato potássico mostra em geral ligeira caulinização. O quartzo apresenta cristais anédricos com extinção ondulante fraca. Com frequência, os cristais têm bordos irregulares e suturados.

A moscovite é pouco frequente e apresenta-se em pequenos cristais alongados, anédricos. A turmalina tem carácter diferente do observado nos dois tipos de granito já referidos, mostrando-se quase incolor ou com cor muito esbatida, azulada, esverdeada ou amarelada, com pleocroísmo fraco. Os cristais são, por vezes, euédricos e zonados. Foi observado um fosfato em cristais diminutos, com cor azul-esverdeada intensa, com forte pleocroísmo e clivagens nítidas, com textura em roseta formada por aglomerados de cristais aciculares.

A rocha que mostra intensa deformação não foi identificada na pedreira nem na zona envolvente. Tem composição mineralógica idêntica à de um granito, com ortoclase, plagioclase, quartzo, moscovite, clorite e sericite abundante. Apresenta indícios de deformação e, por vezes, textura cataclástica. A moscovite ocorre com distribuição aleatória, os planos de clivagem estão fortemente dobrados e têm bordos frequentemente intrincados. O quartzo mostra forte extinção ondulante, bordos suturados, e existem raras

bandas de quartzo microcristalino. Também os cristais de plagioclase mostram deformação com comportamento frágil, com os planos de macla dobrados e fracturados (Fotografia III.1.39).

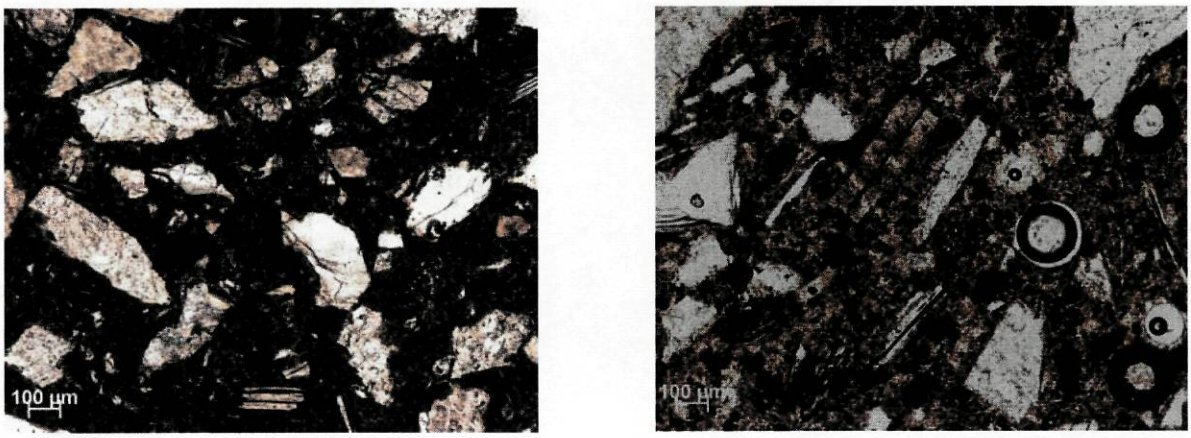


Fotografia III.1.39 – Rocha de composição granítica e textura cataclástica, presente nas partículas de agregado grosso. Pode observar-se deformação dos cristais de moscovite e clorite (N//), a existência de uma banda constituída por pequenos cristais de quartzo (quartzo microcristalino) e a deformação dos cristais de plagioclase (NX).

A presença desta rocha despertou bastante interesse, dado que apresenta algumas características petrográficas que, segundo a literatura, a aproximam das rochas potencialmente reactivas. Assim, a existência de quartzo microcristalino associado aos cristais de quartzo com extinção ondulante é um factor de reactividade (Grattan-Bellew, 1992), se bem que, neste caso, a sua ocorrência seja muito pontual. Se forem considerados os minerais silicatados como potenciadores de reacções lentas/retardadas, essa característica é, neste caso, agravada pela existência de fracturação e deformação dos cristais de mica e feldspato.

5.4.3.2. Agregados finos

As partículas que constituem os agregados finos apresentam superfícies com textura em geral rugosa a cristalina (Quadro I.6), são muito angulosas e de baixa esfericidade (Figura I.4), com formas frequentemente alongadas e pontiagudas (Fotografia III.1.40), o que confirma a sua proveniência a partir da britagem do granito da pedreira e, em particular, do granito de "Cabril Sul".



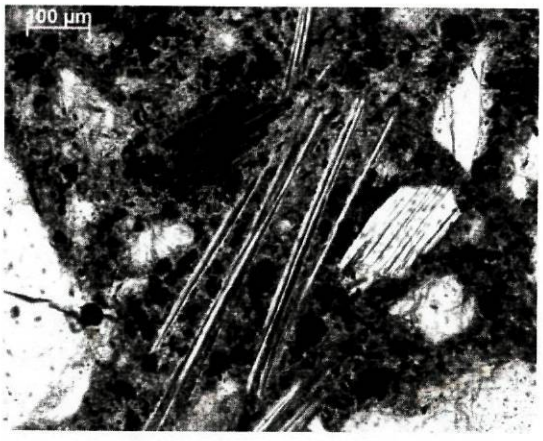
Fotografia III.1.40 – Forma das partículas. As partículas de agregados finos são muito angulosas e de baixa esfericidade, de formas frequentemente alongadas e pontiagudas (N//).

Existem partículas de moscovite, quartzo, plagioclase, ortoclase, turmalina, biotite, clorite, pirite e fragmentos de rocha granítica. Foi possível também identificar, com menor frequência, fragmentos de rochas metamórficas e grãos de quartzito. Estes fragmentos deverão ter sido retirados de outra fonte diversa da pedreira, não sendo de excluir os sedimentos do próprio leito do rio; são, no entanto, pouco abundantes relativamente ao total de agregados finos.

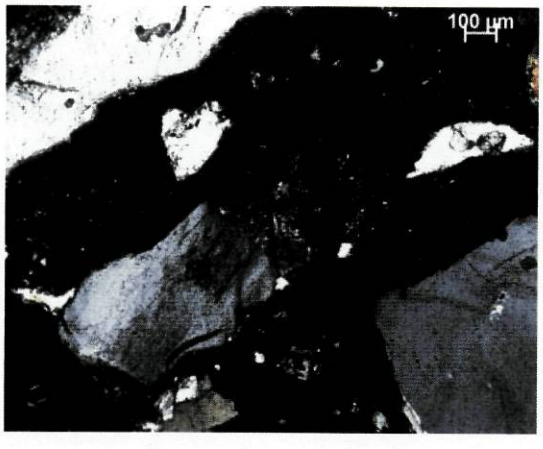
A moscovite, muito frequente, apresenta-se em cristais lamelares pouco espessos e longos, por vezes dobrados. Em alguns casos é visível a orientação preferencial destes cristais paralelamente às partículas de agregado grosso (Fotografia III.1.41).

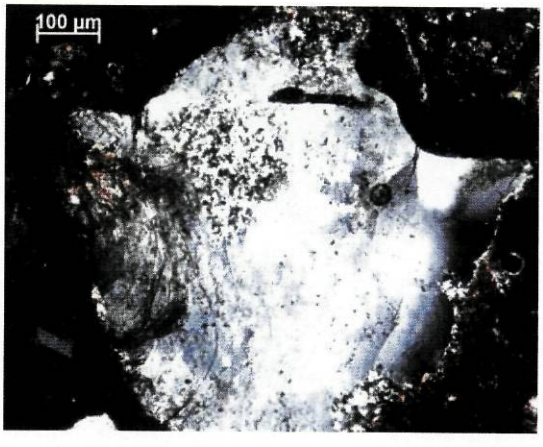
As partículas de ortoclase e plagioclase apresentam, por vezes, formas euédricas a subédricas, prismáticas ou tabulares, aproximadamente equidimensionais. Mostram-se, em geral, pouco alteradas.

O quartzo está presente em grãos de formas muito irregulares, frequentemente alongados, muito angulosos. Existem numerosos grãos policristalinos e monocristalinos com extinção ondulante (Fotografia III.1.42). São também comuns os grãos de quartzo mostrando recristalização.



Fotografia III.1.41 – Orientação preferencial das partículas de moscovite (N//).





Fotografia III.1.42 – Aspectos das partículas de quartzo, que apresentam extinção ondulante (NX).

A turmalina forma grãos pequenos, subédricos, por vezes zonados, de tom castanho ou verde acastanhado, relativamente frequentes.

A biotite é menos frequente do que a moscovite, mas apresenta também cristais longos, por vezes deformados, com clivagens em geral nítidas. Mostra forte pleocroísmo, que facilita a sua identificação.

Os cristais de clorite apresentam por vezes uma textura vermicular ou formando esferulitos. A sua identificação foi confirmada com base em dados de microssonda electrónica e cálculos com base em 28 (O), por não haver voláteis determinados, que indicou tratar-se de ripidolite (Quadro III.1.11) (Figura III.1.19).

Partículas que foram consideradas de origem metassedimentar apresentam uma matriz em geral de cor acastanhada pela presença de óxidos de ferro, rodeando cristais de feldspato e de quartzo microcristalino. Estas partículas têm também sericite abundante (Fotografia III.1.43).

Quadro III.1.11 – Dados obtidos à microssonda electrónica relativos à composição da clorite vermicular existente nos agregados (valores em percentagem).

	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Média
SiO_2	22,86	23,46	22,73	23,02
TiO_2	0,04	0,06	0,09	0,06
Al_2O_3	21,66	22,3	21,37	21,80
FeO	37,79	37,99	38,61	38,13
MnO	0,41	0,42	0,28	0,37
MgO	4,40	4,33	3,64	4,12
CaO	0,03	0,01	0,04	0,03
Na_2O	0,02	-	0,01	0,01
K_2O	-	0,05	0,02	0,02
Total	87,21	88,68	86,80	87,56

De acordo com o observado nos materiais preparados para os ensaios acelerados da barra de argamassa, os opacos que existem entre as partículas finas de agregado no betão, e que estão frequentemente oxidados, deverão provir essencialmente do granito "Cabril Sul".

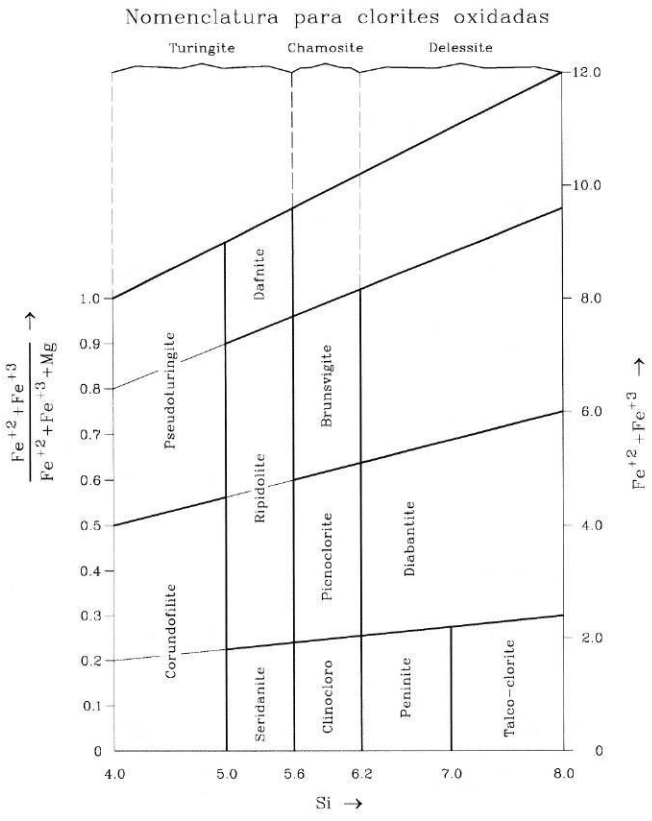
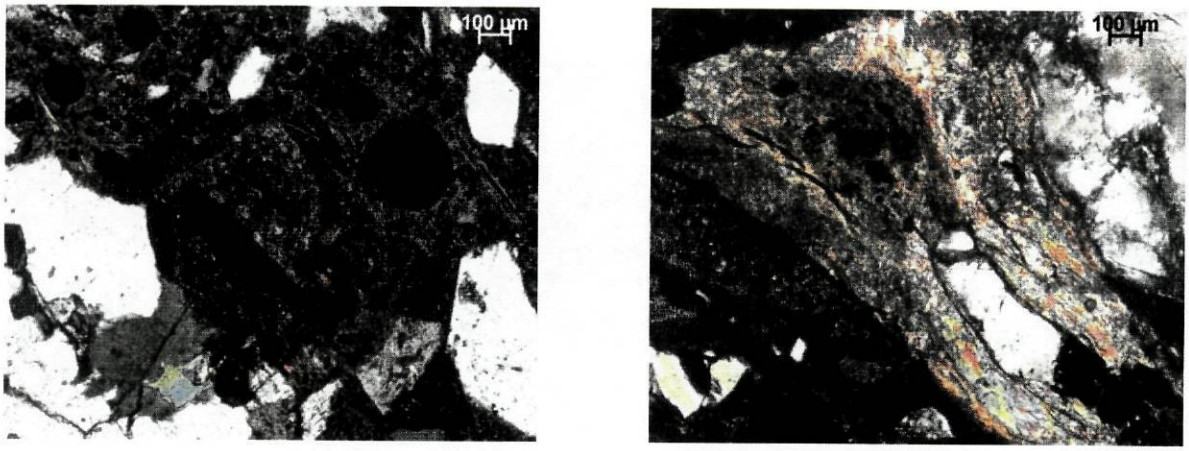


Figura III.1.19 – Nomenclatura das ortoclorites e clorites oxidadas (Hey, 1954).



Fotografia III.1.43 – Partículas de agregado de origem provavelmente metassedimentar, mostrando uma matriz sericitizada (NX).

5.4.3.3. Pasta de cimento

De acordo com publicações da época "... o cimento foi transportado da Fábrica Liz por estrada, em contentores de 4 toneladas cada..." e "trabalhou-se com reduzidas percentagens de areia e com baixas razões água/cimento, graças à utilização de um produto introdutor de ar, o "Darex"..." (Xerez, 1954).

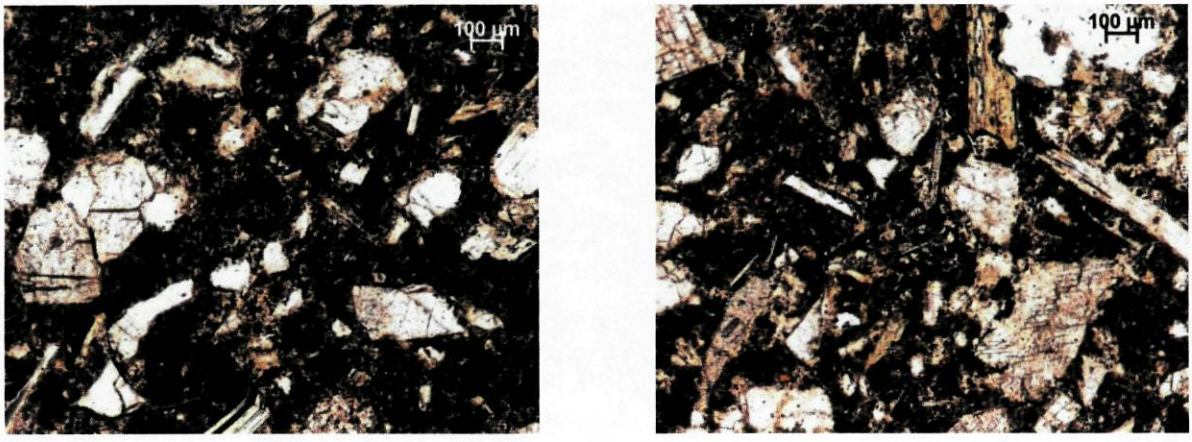
Embora o objectivo do presente trabalho fosse a caracterização das rochas e o seu desempenho como agregado, a análise petrográfica da pasta de cimento mostrou-se de interesse na perspectiva de identificar eventuais substâncias de neoformação. Não é feita, no entanto, a descrição exaustiva da pasta de cimento, nem a determinação da razão água/cimento e detecção de cristais não hidratados do clínquer ou de materiais da classe dos aditivos e adições, operações possíveis com utilização da petrografia. A análise restringe-se à observação de indícios de deterioração, resultantes da interacção com os agregados.

A pasta de cimento, que mostra, em exame macroscópico, coloração cinzenta clara homogénea, apresenta-se heterogénea ao microscópio, por vezes com cor castanha mais escura junto aos agregados grossos (Fotografia III.1.44). Em nicóis cruzados a pasta é muito escura ou mesmo isotrópica. A sua coloração é, no entanto, dependente da espessura da lâmina, mostrando um tom mais claro nos locais em que a lâmina é mais fina.

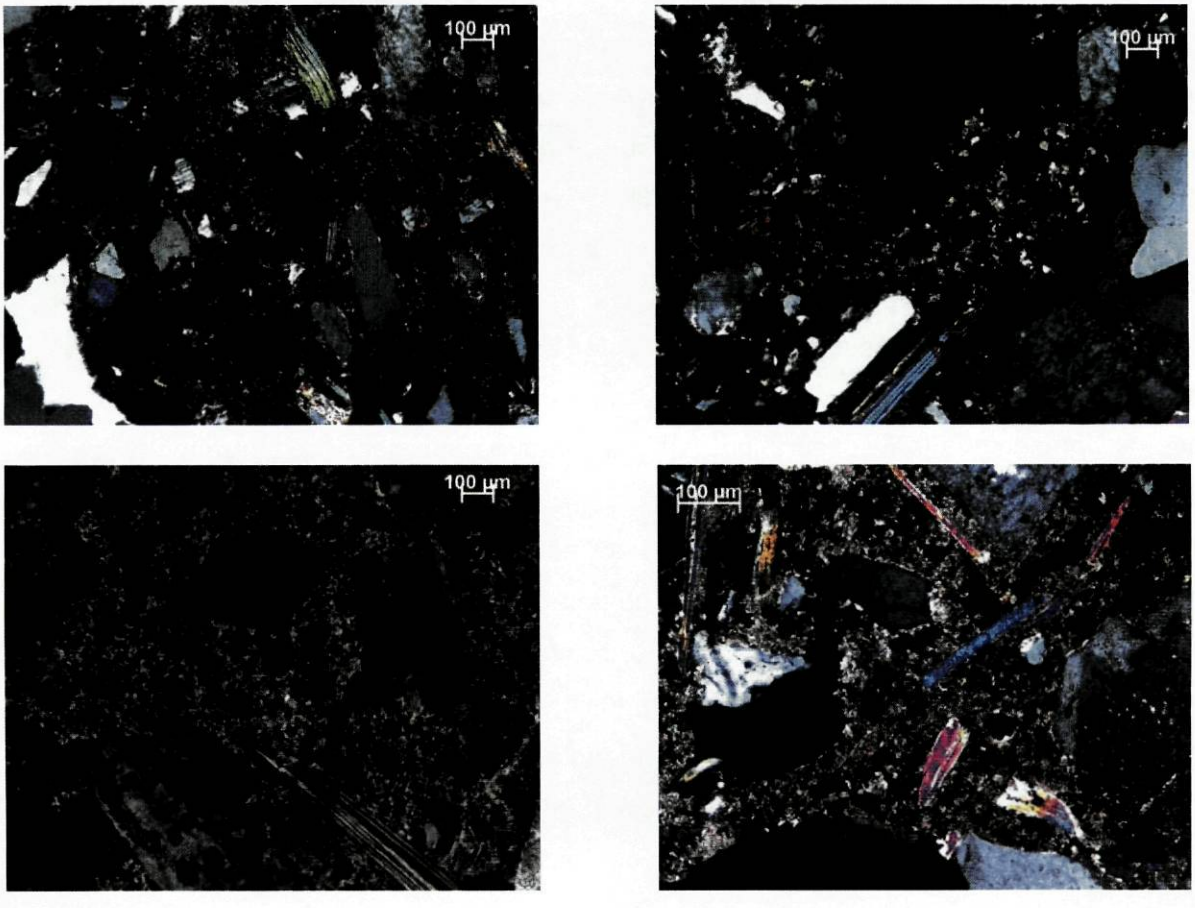
Foram observados, na pasta, cristais diminutos de carbonato de cálcio, mostrando a elevada birrefringência característica (Fotografia III.1.45).

Estes cristais, em geral submicroscópicos, conferem à pasta de cimento uma coloração dourada em nicóis cruzados, mais densa nos trechos dos tarolos mais próximos da superfície de furação e junto aos poros e às partículas de agregado grosso.

As suas características microscópicas permitem comparar estes cristais com a calcite em pipocas (*popcorn calcite deposition*) referida por Sibbick e Crammond, 2003, que surge no betão degradado que apresenta superfície friável ou em escamação. A coloração dourada da pasta em nicóis cruzados é atribuída à carbonatação do betão.



Fotografia III.1.44 – Aspectos da pasta de cimento em luz natural (N//). A pasta tem tonalidade acastanhada heterogénea, por vezes mais escura junto às partículas de agregado.



Fotografia III.1.45 – Imagens da pasta de cimento (NX) mostrando indícios de carbonatação. Observam-se cristais de carbonato de cálcio, que conferem à pasta o aspecto dourado característico deste fenómeno.

A carbonatação consiste na formação de carbonato de cálcio por reacção do dióxido de carbono atmosférico, que penetra nos poros do betão, com o hidróxido de cálcio do cimento, podendo ocorrer outras reacções tais como a decomposição da sílica e alumina hidratados e a produção de óxidos de ferro (Lea, 1998). Normalmente a carbonatação afecta apenas uma camada fina, mas em betão mais poroso pode atingir as dezenas de milímetros de espessura. Esta reacção conduz ao decréscimo do pH da solução intersticial, o que causa a destruição da camada de óxidos de ferro (película passiva) que protege as armaduras da corrosão (Power e Hammersley, 1978). A profundidade atingida pela carbonatação depende da razão água/cimento, da porosidade do betão e do ambiente a que fica exposto. É um fenómeno de grande interesse no estudo da degradação das armaduras, por conduzir à corrosão das mesmas, assunto que não está contemplado no presente trabalho.

Quanto à existência de uma variação de tonalidade da pasta junto das partículas de agregado, é referida por Chatterji et al., 1986, e relacionada com a ausência de $Ca(OH)_2$ cristalino em volta das partículas de agregado reactivo. Este facto é atribuído à dissolução do hidróxido de cálcio, seguida pela difusão dos iões de cálcio nos grãos reactivos, e à difusão de sílica a partir das partículas de agregado, a qual reage com o $Ca(OH)_2$ para formar silicatos de cálcio hidratados. A difusão de Si^{4+} a partir do grão reactivo é dificultada se existir um excesso de $Ca(OH)_2$ na pasta circundante, conduzindo à criação de forças expansivas por penetração de álcalis na partícula de agregado. Esta variação de tonalidade pode, por esta razão, constituir um indício da ocorrência de reacções álcali-sílica.

A observação da pasta de cimento ao MEV focalizou-se em zonas seleccionadas durante o exame ao microscópio óptico. Foram feitas análises EDS à pasta nos locais em que se apresentava mais escura junto às partículas de agregado, comparando-a com as zonas mais afastadas e mais claras.

Na Figura III.1.20 e na Fotografia III.1.46 encontra-se um exemplo dos aspectos observados na pasta. Na zona mais próxima do agregado, junto a um cristal de feldspato, a pasta parece mais densa ao microscópio, coincidindo com uma composição, em EDS, mais rica em silício e álcalis e também com fósforo. Na porção de pasta mais afastada do agregado, estes elementos decrescem e aumenta abruptamente o conteúdo em carbono, o que pode ser explicado pela maior porosidade da pasta neste local, retendo uma maior quantidade de resina de preparação da lâmina. O teor em cálcio mantém-se aproximadamente constante.

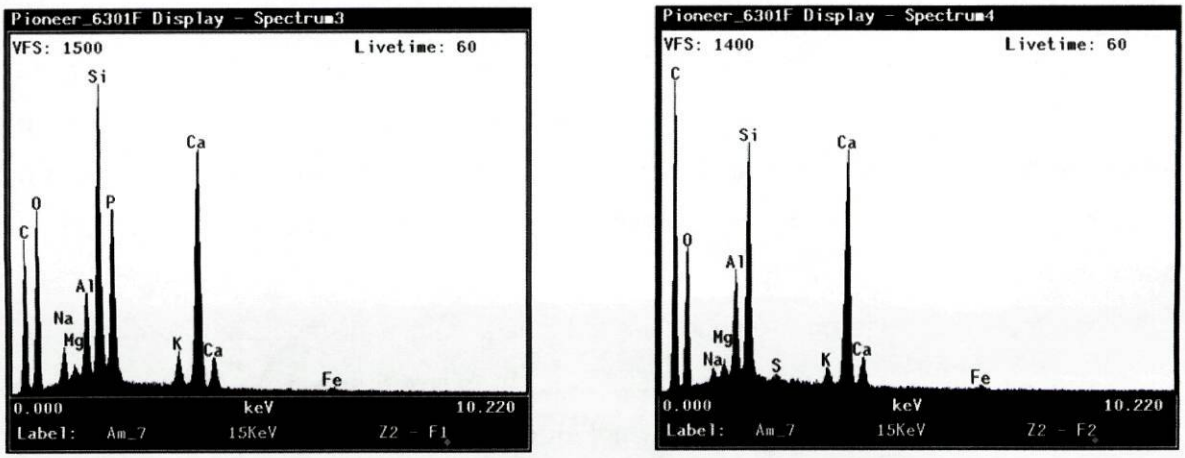
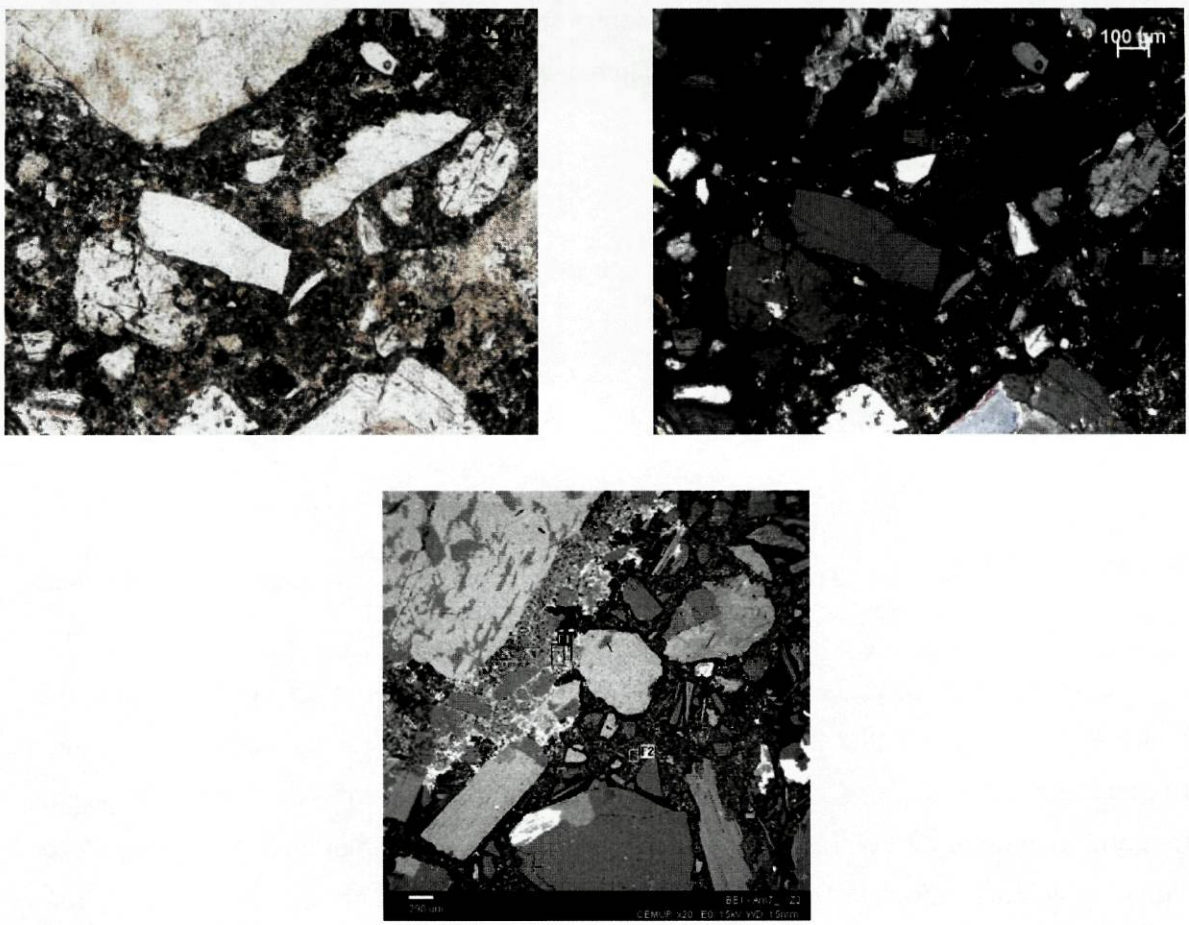


Figura III.1.20 – Espectros, EDS, correspondentes à composição da pasta de cimento observada em lâminas delgadas polidas. A análise F2 mostra um decréscimo de silício e álcalis relativamente a F1.



Fotografia III.1.46 – Aspecto da coloração da pasta de cimento em N//, NX e ao MEV. Na imagem, ao MEV, estão indicadas as duas zonas (F1 e F2) analisadas em EDS (Figura III.1.20). A pasta junto ao agregado grosso é mais escura tanto em N// como em NX e mais densa ao MEV.

O enriquecimento da pasta em silício e álcalis junto à partícula de agregado parece constituir um indício da existência de reacção entre o agregado e os fluidos intersticiais do

betão. A realização de análises EDS permitiu detectar o fósforo com frequência na pasta de cimento ou em orlas de cor escura nos agregados. Ocorre em geral associado ao cálcio. Embora os agregados contenham fosfatos, as situações em que se encontra o elemento e a sua presença na pasta levam a admitir que poderá ter sido utilizado para o fabrico do betão um aditivo que contivesse fósforo, não obstante a sua aplicação não fosse corrente à época da construção da barragem.

A confirmação da diferente composição da pasta com a distância ao agregado foi realizada também pela obtenção de espectros à microssonda RAMAN, nas áreas correspondentes às análises MEV/EDS da Figura III.1.20. Os dois espectros obtidos mostram picos diferentes, que caracterizam substâncias também diversas (Figura III.1.21). Foi detectado o pico relativo à presença de fósforo no caso em que a pasta se encontra mais próxima da partícula de agregado, confirmando a análise EDS. Este pico não é observado para a pasta que se encontra mais afastada do agregado, que deverá conter predominantemente silicatos de cálcio hidratados.

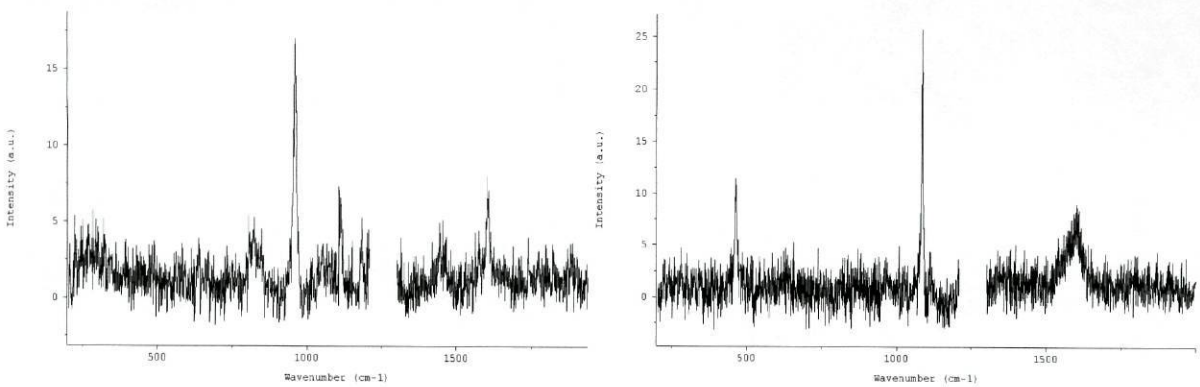
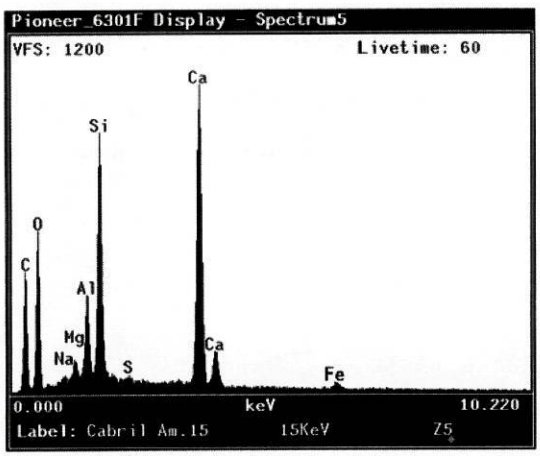


Figura III.1.21 – Espectros da pasta de cimento obtidos em microssonda RAMAN nos locais em que se realizaram análises EDS (Figura III.1.20).

Esta variação de composição nem sempre se verifica, no entanto, conforme pode ser confirmado pela Figura III.1.22 e Fotografia III.1.47. A situação mais frequente é aquela em que a composição da pasta é aproximadamente constante em toda a área observada, independentemente da coloração ao microscópio óptico ou da distância relativamente às partículas de agregado. Verifica-se, no entanto, neste caso, um enriquecimento em álcalis e alumínio na pasta situada a maior distância do agregado.



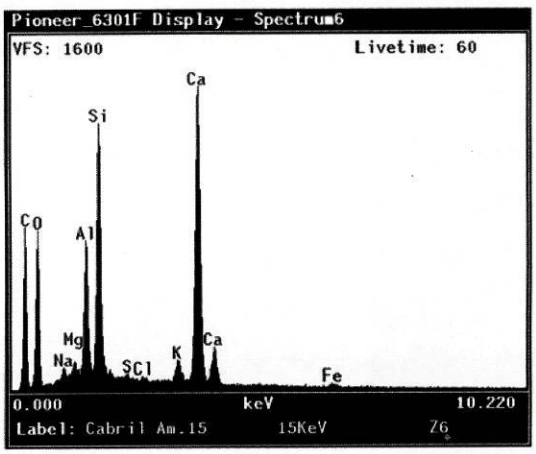
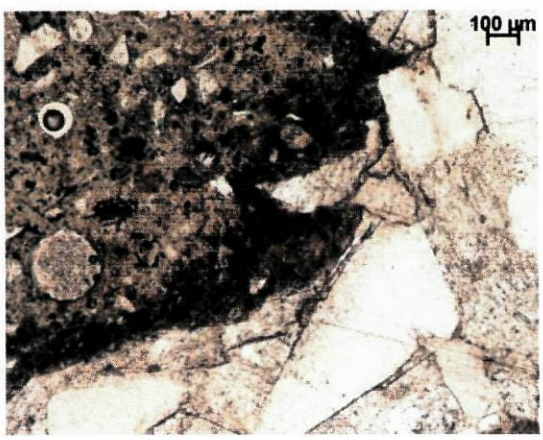
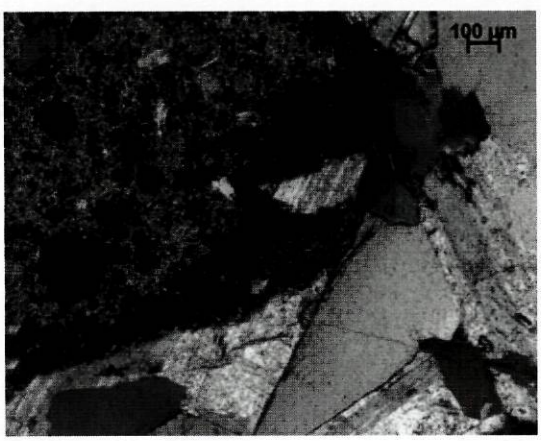
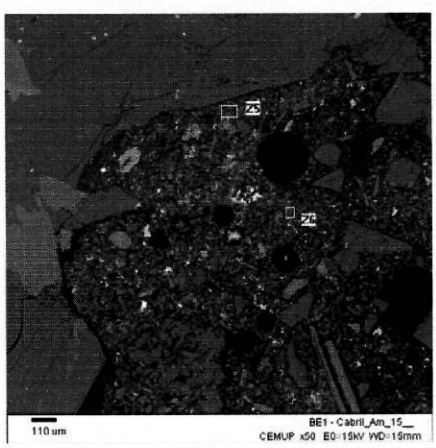


Figura III.1.22 – Espectros, EDS, correspondentes à composição da pasta de cimento observada em lâminas delgadas polidas. As análises são idênticas quanto aos teores de silício e cálcio, variando as percentagens de álcalis e alumínio.







Fotografia III.1.47 – Aspecto da coloração da pasta de cimento em N//, NX e ao MEV. Na imagem, ao MEV, estão indicadas as duas zonas (Z5 e Z6) analisadas em EDS (Figura III.1.22). Ao MEV há uma ligeira distinção de densidade da pasta, mas não é evidente, neste caso, o enriquecimento em sílica e álcalis junto ao agregado.

5.4.3.4. Fissuras

Na observação microscópica não foram identificados padrões de fissuração em *map cracking*. O contacto entre os agregados finos e a pasta de cimento não apresenta abertura. Foram, no entanto, detectadas algumas fissuras, em geral sem preenchimento, nas seguintes situações:

- No contacto entre os agregados grossos e a pasta;
- No seio da pasta;
- Atravessando as partículas do agregado grosso e, raramente, do fino.

Deverá ser considerado, no entanto, o facto de poderem ocorrer fissuras relacionadas com o manuseamento dos provetes e produção das lâminas delgadas.

Por apresentarem características diversas, estas fissuras serão tratadas separadamente.

5.4.3.4.1. Fissuras na interface pasta de cimento-agregado

Estas fissuras são, em geral, descontínuas, ou seja, não contornam totalmente as partículas. Têm largura irregular e contêm resina (Fotografia III.1.48). São mais frequentes no contacto entre a pasta de cimento e as partículas de rocha de natureza metamórfica ou filoniana, do que junto às partículas de natureza granítica, provavelmente em resultado da textura superficial mais lisa daquelas partículas.



Fotografia III.1.48 – Aspecto da fissuração existente entre as partículas de agregado grosso (granito) e a pasta de cimento (N//). Localmente, esta fissura atinge 200 µm de largura.

No contacto entre uma partícula de granito e a pasta de cimento, numa lâmina localizada no topo inicial do tarolo, ou seja, no topo correspondente à parede da galeria verifica-se que não existe uma fissura nítida ao microscópio óptico mas uma faixa limitada de um produto que foi identificado em EDS (Figura III.1.23) (Fotografia III.1.49). A

composição encontrada, com silício, alumínio e álcalis (F1), pode corresponder à composição do gel sílico-alcalino. O produto mostra indícios de cristalização, com textura fibrosa de orientação aleatória, quando observado ao MEV. No caso analisado, a zona exterior (F2) não é cristalina e apresenta uma composição mais próxima da pasta de cimento, mais rica em cálcio e mais pobre em álcalis.

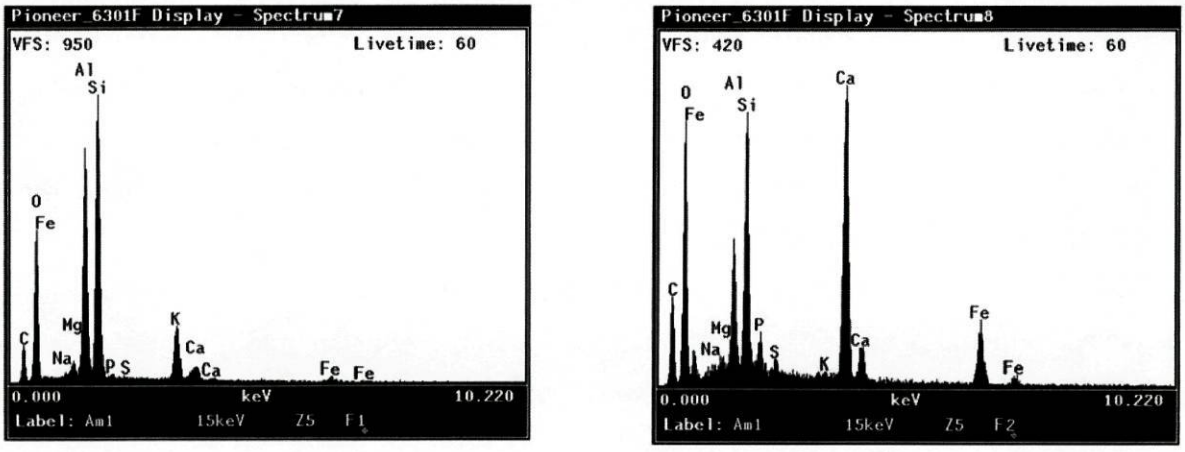
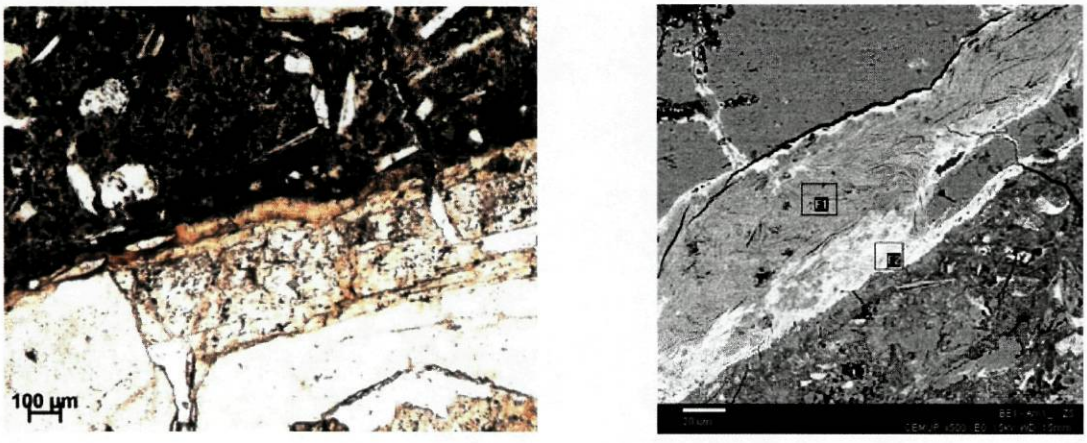


Figura III.1.23 – Espectros, EDS, correspondentes à composição do material de preenchimento de um contacto entre a pasta de cimento e uma partícula granítica de agregado grosso.



Fotografia III.1.49 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV da interface pasta de cimento-agregado e da faixa de material analisado em EDS (análises F1 e F2 correspondentes aos espectros da Figura III.1.23). Verifica-se o enriquecimento em cálcio e o decréscimo de álcalis da orla mais próxima do agregado para a orla junto à pasta de cimento.

O gel em lâmina delgada é tipicamente incolor, com fracturas concoidais de retracção semelhantes às da argila e índice de refracção médio de 1,45-1,51 (Diamond, 2000). É opticamente isotrópico, embora possa exibir ligeira birrefringência (St John et al., 1998). O gel é normalmente de fácil identificação, mas em betões antigos tem características mais variadas. Pode estar presente em fissuras e poros ou substituir, parcial ou totalmente, as

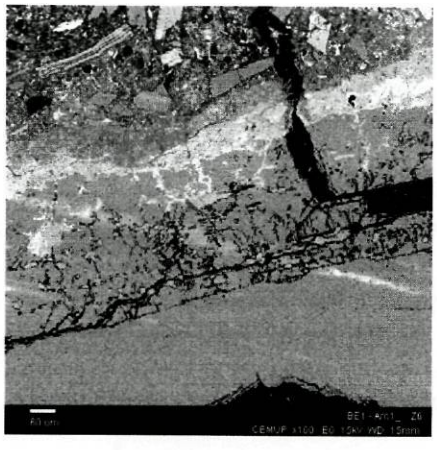
partículas de agregado, ocorrer em orlas em volta das partículas ou mesmo na pasta (St John et al., 1998). O gel é geralmente amorfo, quando analisado ao raio-X.

A orla analisada pode corresponder a um produto de reacção álcali-agregado, dado que apresenta composição variável quando se caminha do agregado para a pasta e mostra uma textura diferente tanto da que existe na rocha como da que caracteriza a pasta de cimento. Zonamento idêntico foi referido por Davies e Oberholster, 1988, que identificaram gel cristalizado formando rosetas em fissuras no contacto pasta de cimento-agregado, do lado do agregado, e gel maciço junto à pasta de cimento. French, 1991, refere também a formação de rosetas e cristais em resultado da desidratação do gel e Louarn e Larive, 1993, referem produtos semiorganizados e cristalinos surgindo em rosetas, lamelas ou cristais aciculares.

Esta interface prolonga-se por uma fissura aberta e sem preenchimento. Perpendicularmente a esta orla, existe uma fissura sem preenchimento que atravessa a partícula de agregado grosso e se estende pela pasta de cimento.

5.4.3.4.2. Fissuras no seio da pasta de cimento

São, em geral, fissuras finas e pouco extensas. Ocorrem, raramente, em continuidade em relação às fissuras que atravessam as partículas de agregado (Fotografia III.1.50) ou correspondem ao prolongamento, na pasta, de fissuras existentes na interface pasta de cimento-agregado.



Fotografia III.1.50 – Imagem, ao MEV, de fissura sem preenchimento que atravessa uma partícula de agregado grosso e se prolonga pela pasta de cimento.

Estas fissuras apresentam-se por vezes preenchidas por cristais alongados, incolores, aciculares ou fibrosos, crescendo perpendicularmente às paredes da fissura, ou com orientação aleatória. A análise EDS mostrou tratar-se de etringite (Figura III.1.24)

(Fotografia III.1.51). Este material está também presente, localmente, na pasta de cimento (Fotografia III.1.52).

A etringite, que adapta a sua cristalização ao espaço disponível e necessita de grande quantidade de água para a sua formação, cristaliza sob a forma de cristais incolores prismáticos ou aciculares, com espessura de pouco micrómetros (French, 1991). Os cristais têm birrefringência baixa a moderada e um baixo índice de refracção (Skalny et al., 2002). A sua identificação microscópica é relativamente fácil, quando preenche poros, e mais difícil nos casos em que existe disseminada na pasta de cimento. Ao MEV, mostra-se por vezes semi-cristalina, com agulhas de formas irregulares, entrelaçadas.

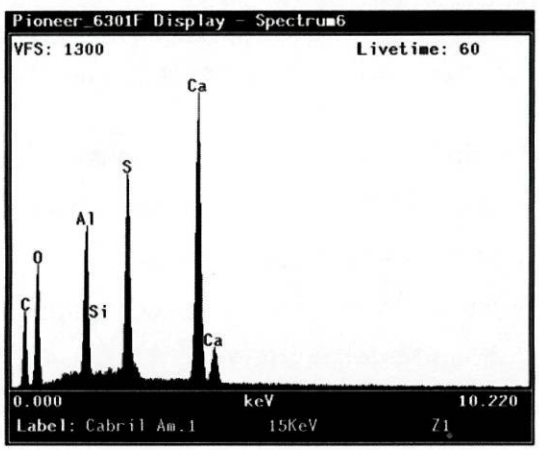
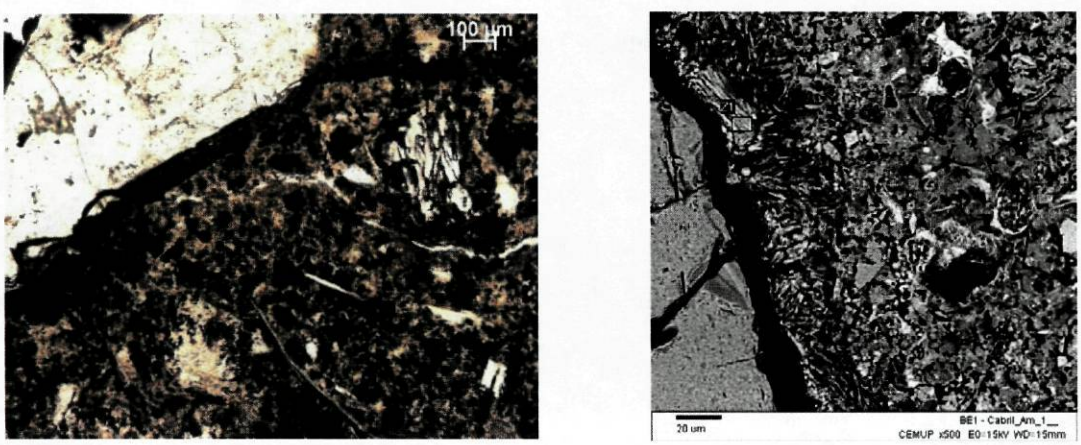
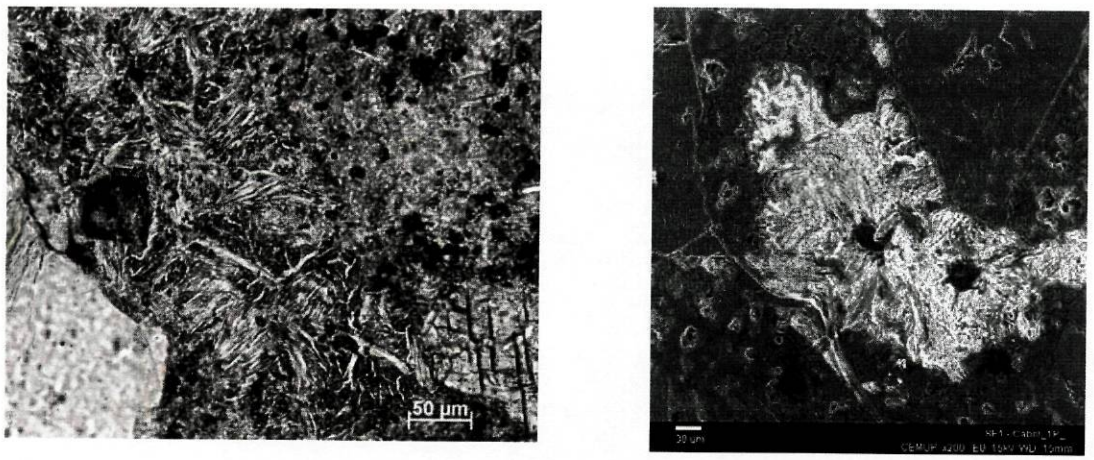


Figura III.1.24 – Espectro EDS da etringite que preenche uma fissura que atravessa a pasta de cimento.



Fotografia III.1.51 – Fissura preenchida por etringite observada ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, no contacto entre a pasta de cimento e o agregado grosso, prolongando-se para a pasta de cimento (espectro na Figura III.1.24).



Fotografia III.1.52 – Etringite existente na pasta de cimento, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, exibindo cristais aciculares de orientação aleatória.

A etringite secundária pode apresentar formas variadas (Louarn e Larive, 1993): cristais aciculares bem individualizados, designada etringite livre; plaquetas, nas quais os cristais são mais curtos e estão agrupados; orientada, quando os cristais crescem paralelamente ou perpendicularmente às superfícies; comprimida, nos casos em que os cristais estão soldados e formam camadas finas; e etringite maciça, quando não tem cristais e é semelhante ao gel. A etringite em plaquetas e a comprimida ocorrem com mais frequência nas interfaces pasta de cimento-agregado.

No caso observado, a etringite parece ocupar parcial ou totalmente as fissuras, tirando partido do espaço disponível. Não se encontram ramificações das fissuras que estão totalmente preenchidas, nem fissuras associadas à etringite presente na pasta de cimento. Pelas razões apontadas, conclui-se que a etringite não será, neste caso, uma possível causa de expansão, mas ocupa espaços livres resultantes de outros processos de deterioração que ocorrem junto à superfície do betão exposta à atmosfera.

A etringite foi ainda identificada localmente na pasta em associação com cristais de pirite alterada, existente nas partículas de agregado fino e grosso. O hábito da pirite intervém na cinética da reacção de oxidação, que é mais lenta no caso de cristais maciços do que na designada pirite framboesa, constituída por cubos microscópicos ou indivíduos mal cristalizados e aglomerados em esferóides (Divet, 2001a). Por outro lado, a extracção dos agregados com explosivos provoca microfissuras que fazem decrescer a resistência química das rochas e favorecem a penetração dos fluidos e a consequente alteração. No betão, a oxidação da pirite é condicionada pela concentração de iões OH^- da solução intersticial, ou seja, para um pH de 13,7 a velocidade de oxidação pode ser 50 vezes superior ao seu valor inicial (Divet e Davy, 1996). A oxidação da pirite é por vezes

associada à ocorrência de reacções álcali-sílica (Divet, 2001a), que originam fissuras e facilitam o acesso de água e oxigénio à pirite.

No caso dos agregados finos, verifica-se que a etringite ocupa por vezes pequenos espaços na pasta adjacente aos cristais de pirite e a sua origem pode atribuir-se a uma reacção localizada de ataque por sulfato, de origem interna. Também não devem, neste caso, ser atribuídos danos à estrutura em resultado do ataque por sulfatos, uma vez que não existem outros indícios de deterioração associados.

5.4.3.4.3. Fissuras que atravessam as partículas de agregado grosso

São fissuras de largura variável, pouco frequentes, que atravessam partículas de agregado grosso e, raramente, de agregado fino.

Apresentam-se, em geral, preenchidas apenas pela resina de preparação das lâminas. Em algumas fissuras foi encontrado material de preenchimento com composição variável:

– Composição semelhante à do gel, mas contendo alumínio (Figura III.1.25). Este material pode, também, corresponder a um produto de neoformação semelhante ao gel sílico-alcalino (Fotografia III.1.53) conforme referido por vários autores (French, 1980; Bérubé e Fournier, 1986; Larive, 1990; Louarn e Larive, 1993; Broekmans, 1999). A análise EDS da partícula de agregado onde se encontra a fissura mostrou tratar-se de albite (Si-Al-Na). O preenchimento da fissura é rico em alumínio, que pode provir do agregado, e contém potássio e cálcio, que terão sido transportados pelo fluido intersticial do betão.

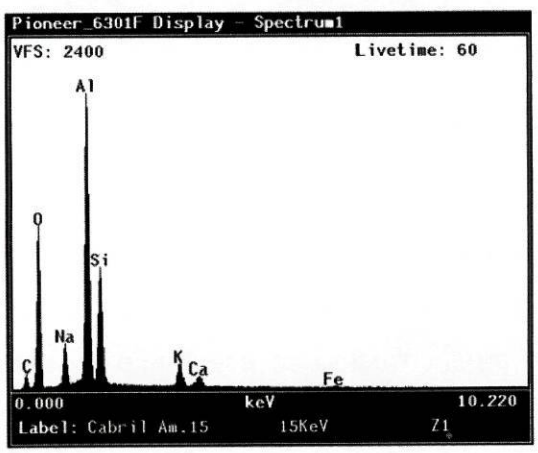
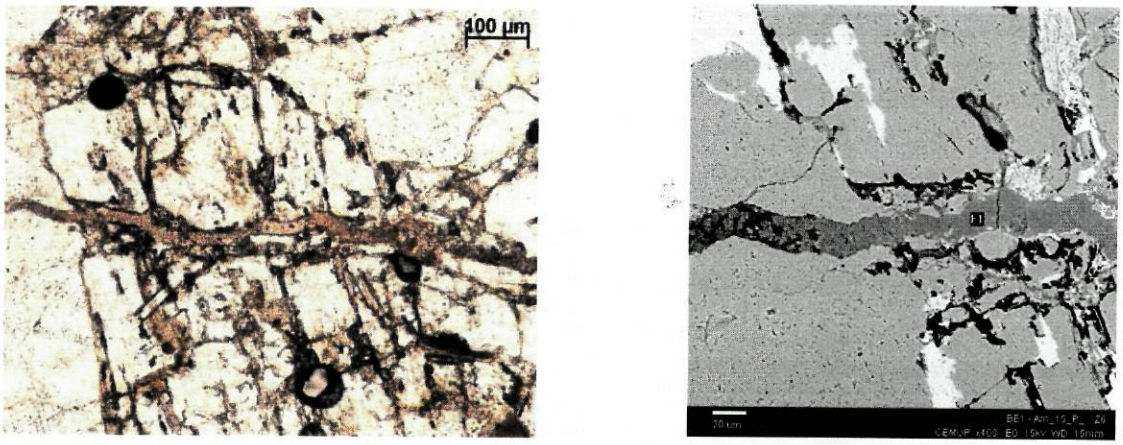


Figura III.1.25 – Espectro EDS correspondente à composição do material de preenchimento da fissura que atravessa uma partícula de agregado grosso.



Fotografia III.1.53 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV da fissura e material de preenchimento analisado em EDS (análise Z1).

– Composição semelhante à do gel sílico-alcalino, contendo cálcio (Figura III.1.26 e Fotografia III.1.54). Esta é a composição mais frequentemente referida na literatura, conforme foi apresentado na Parte I.

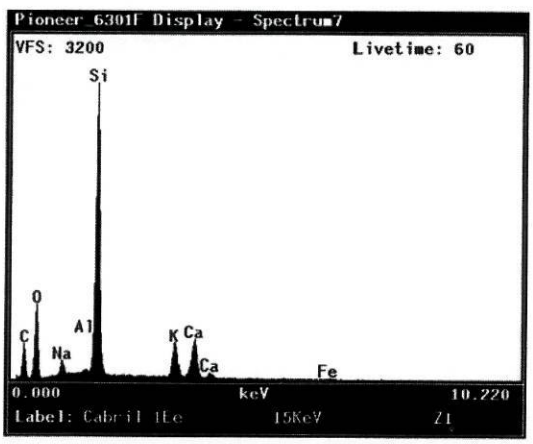
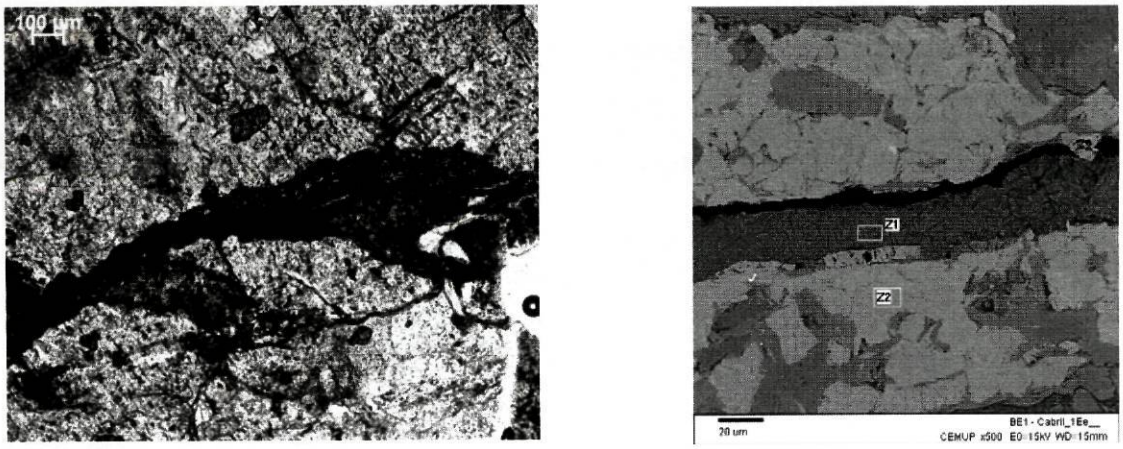


Figura III.1.26 – Espectro EDS correspondente à composição do material de preenchimento da fissura que atravessa uma partícula de agregado grosso.

Esta fissura atravessa uma partícula de granito que contém clorite, que se verificou, em análise EDS, ser composta por Al-Si-Fe-Mg; prolonga-se pela interface pasta de cimento-agregado, formando aí uma orla de maior espessura. Na zona mais próxima do contacto com a pasta, o preenchimento apresenta composição um pouco diferente (Figura III.1.27 e Fotografia III.1.55). Verifica-se um aumento significativo de cálcio e o aparecimento de alumínio. Este reconhecimento vai de encontro à afirmação de vários autores quanto à variação da composição do gel em função do seu percurso no betão, conforme já referido. O gel que se encontra mais próximo do limite do grão de agregado

está mais fissurado, é menos cristalino e apresenta maior teor em cálcio proveniente da pasta de cimento.



Fotografia III.1.54 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV da fissura e material de preenchimento analisado em EDS (análise Z1). O gel mostra uma textura semicristalina.

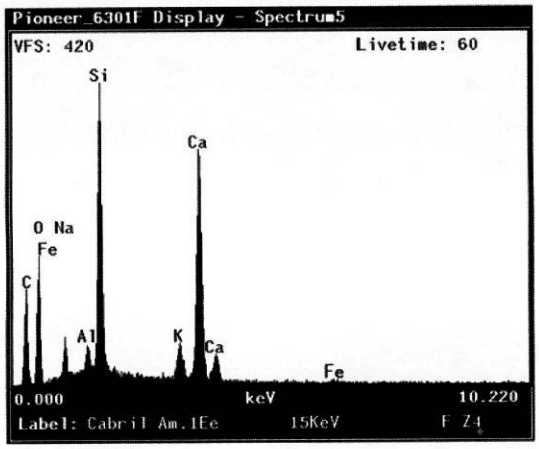
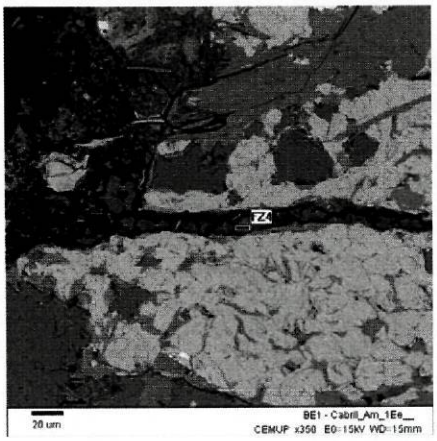


Figura III.1.27 – Espectro EDS correspondente ao material de preenchimento da fissura no agregado, próximo do contacto com a pasta de cimento.



Fotografia III.1.55 – Fissura com preenchimento que atravessa uma partícula de granito e que se prolonga para o exterior da partícula, na interface pasta de cimento-agregado (análise F Z4 da Figura III.1.27).

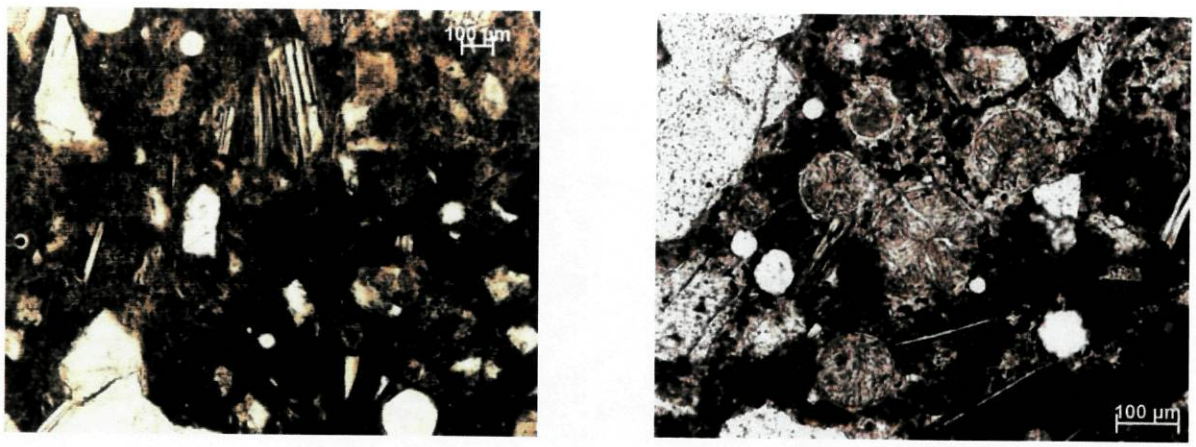
Segundo Thaulow et al., 1996, não existem produtos cristalinos em contacto com o cimento, mas apenas nas fissuras do agregado, e, segundo Larive, 1990, a fase amorfa é mais rica em cálcio do que a fase cristalina, conforme se verificou neste caso. Também Jensen, 1993 refere produtos criptocristalinos nas fissuras dos agregados e gel amorfo nas fissuras que se prolongam para a pasta de cimento.

5.4.3.5. Poros

A distribuição dos poros é ligeiramente heterogénea em todo o corpo da barragem, o que poderá estar relacionado com pequenas alterações da composição do betão durante o seu fabrico.

Verifica-se, nos tarolos retirados da galeria de acesso à galeria de coroamento, na margem esquerda, que existem menos poros do que no betão da galeria de coroamento. Os poros são também abundantes nos restantes furos realizados no corpo da barragem, incluindo os executados na galeria de drenagem.

Os poros são circulares, com diâmetro da ordem dos 50 a 100 μm (Fotografia III.1.56). Encontram-se, esporadicamente, poros de forma irregular e de maiores dimensões (milimétricos). À escala da lâmina delgada, a distribuição dos poros é homogénea na pasta.



Fotografia III.1.56 – Aspectos dos poros observados nas lâminas delgadas do betão. Alguns poros apresentam preenchimento, parcial ou total, por etringite.

Não se verifica qualquer relação entre a localização dos poros e as partículas de agregado grosso. Alguns poros contêm preenchimento, parcial ou total, por etringite, que é mais abundante no tarolo extraído da galeria à cota 255,50, próximo do dreno que exibe exsudações de carbonato de cálcio. Foi obtido o espectro RAMAN da etringite e também o espectro em EDS (Figura III.1.28) (Fotografia III.1.57).

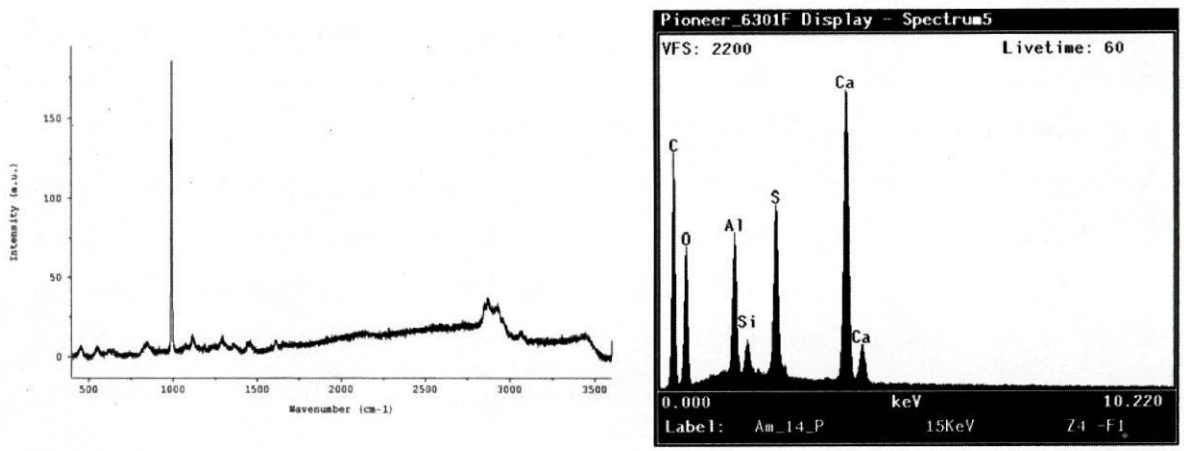
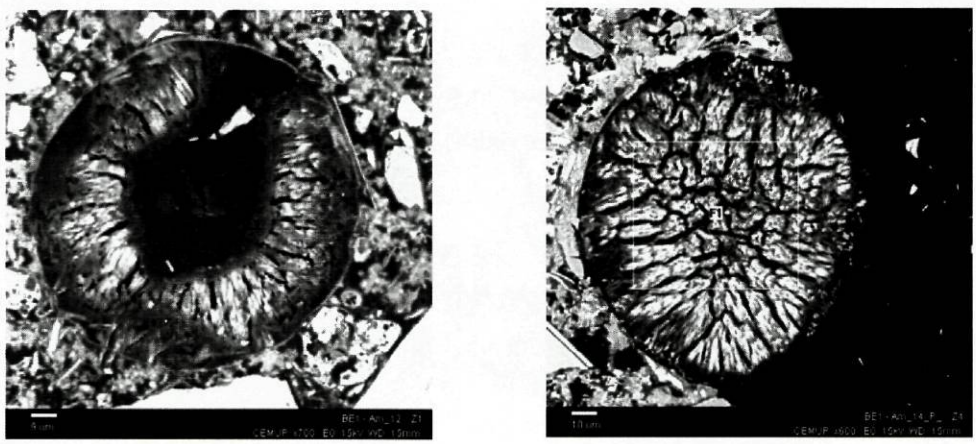


Figura III.1.28 – Espectros, RAMAN e EDS, correspondentes à etringite que preenche, parcial ou totalmente, os poros do betão.



Fotografia III.1.57 – Imagens, obtidas ao MEV, da etringite que preenche os poros. Na imagem da esquerda a etringite preenche parcialmente o poro e os cristais crescem perpendicularmente à parede do mesmo. Na imagem da direita (análise EDS - Z1 na Figura III.1.28), os cristais estão entrelaçados, apresentam um desenvolvimento desorganizado e é possível observar fissuras de retracção.

A composição deste material de preenchimento, em EDS, indica a presença de silício, não incluída na fórmula química da etringite. Este facto suscitou dúvidas, dado que, segundo a literatura sobre o assunto e apresentada na Parte I, a etringite tem composição constante mas pode ocorrer em simultâneo com a taumasite ($[Ca_3Si(OH)_6.12H_2O](CO_3)(SO_4)$) (St John et al., 1998) ou com gel sílico-alcalino.

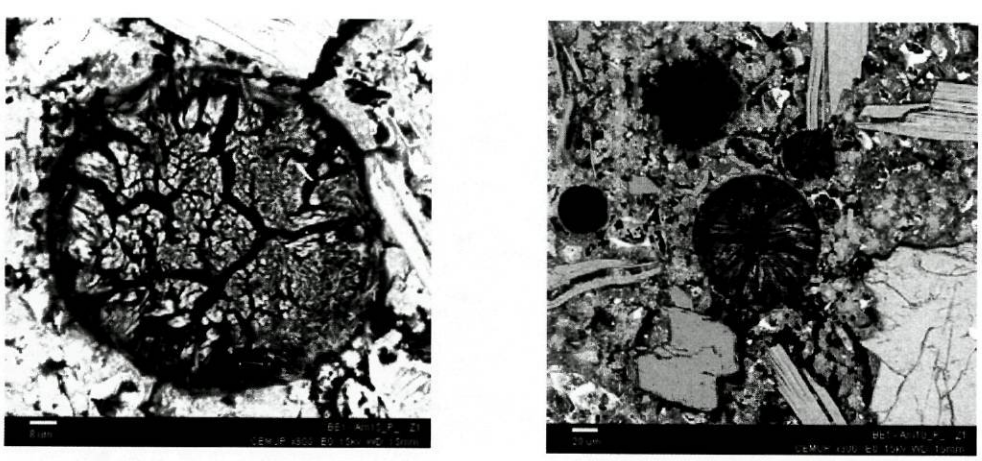
A deterioração com taumasite ocorre em ambiente frio e húmido e pode resultar da combinação do ataque por sulfatos com a carbonatação do betão (Taylor, 1997), essencialmente nos betões de fundação. Este mineral cristaliza em massas compactas brancas ou incolores, com brilho vítreo (Sibbick et al., 2003). É microscopicamente semelhante à etringite, com Al^{3+} substituído por Si^{4+} e tem um grupo SO_4 e um grupo CO_3.

Forma cristais prismáticos ou aciculares hexagonais (Skalny et al., 2002). A birrefringência é mais elevada do que a da etringite, podendo assumir cores de branca-creme a laranja em nicóis cruzados. Esta distinção entre os dois minerais é, no entanto, dificultada devido à pequena dimensão dos cristais.

A etringite é a forma estável, relativamente ao sulfo-aluminato monocálcico, abaixo dos 60ºC (St John et al., 1998). Pode formar-se durante a hidratação do betão, não sendo neste caso prejudicial, ou, posteriormente, devido ao ataque por sulfatos. A etringite designada secundária pode estar associada à formação de gel, existindo simultaneamente ou substituindo-o (French, 1991), e pode originar fissuração e expansão do betão.

A ocorrência simultânea nesta análise de álcalis leva a concluir que pode estar presente nestes poros uma associação entre a formação de etringite e de gel sílico-alcalino. Atendendo à dimensão dos picos correspondentes aos diferentes elementos químicos, o gel parece existir aqui em pequena proporção relativamente à etringite, que eventualmente o terá substituído. No caso estudado, não foi detectado qualquer outro material de preenchimento, para além da etringite, nem ao microscópio óptico nem ao MEV.

Encontraram-se raras fissuras que partem dos poros e se prolongam pela pasta que os rodeia, como se pode ver na Fotografia III.1.58. São finas e não mostram preenchimento.



Fotografia III.1.58 – Imagens, obtidas ao MEV, de poros preenchidos por etringite, aos quais estão associadas fissuras finas na pasta de cimento, sem preenchimento.

Estas fissuras ocorrem associadas a poros totalmente preenchidos, permitindo concluir que podem resultar da formação da etringite no interior dos poros, uma vez que se trata de um mineral que expande por absorção de água. Tratar-se-á, provavelmente,

de etringite secundária, formada após a hidratação do cimento, por circulação de fluido intersticial que contém enxofre. Para além do enxofre que é introduzido no fabrico do cimento, em geral sob a forma de gesso, não será de excluir a eventual contribuição dos agregados.

Foram observados pequenos cristais de sulfuretos, predominantemente pirite, tanto nas partículas de agregado grosso como fino. No último caso, são partículas monominerálicas. Em ambos os casos, os cristais mostram indícios de alteração para óxidos e hidróxidos de ferro.

5.4.3.6. Análise de amostras de betão ao MEV

Para observação ao MEV/EDS, foram preparados pequenos fragmentos de betão colados com araldite a suportes cilíndricos metálicos, com 25 milímetros de diâmetro e 5 milímetros de altura. As amostras foram revestidas a ouro.

Por apresentarem características diferentes, serão referidos separadamente os resultados do estudo de fragmentos retirados das carotes de betão e os fragmentos colhidos nas galerias, nos locais em que se observava escamação da superfície.

5.4.3.6.1. Fragmentos do betão das carotes

Foram estudados fragmentos de betão, serrados dos topos dos tarolos, nos locais em que o betão apresentava, macroscopicamente, alguns poros com preenchimentos parciais de cor branca. Nestes poros foram identificados cristais de etringite, de hábito acicular, crescendo perpendicularmente às paredes dos poros. (Figura III.1.29 e Fotografia III.1.59).

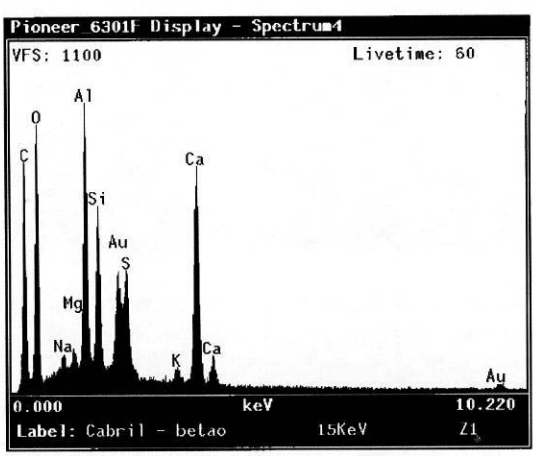
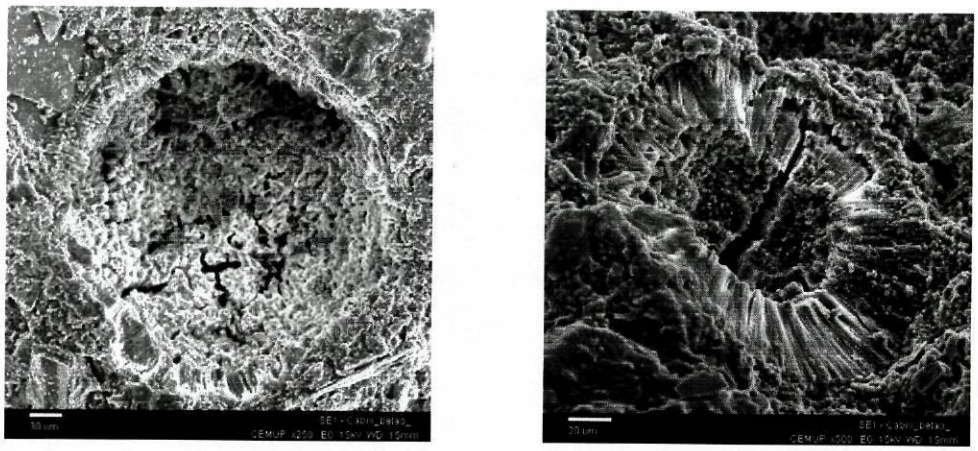


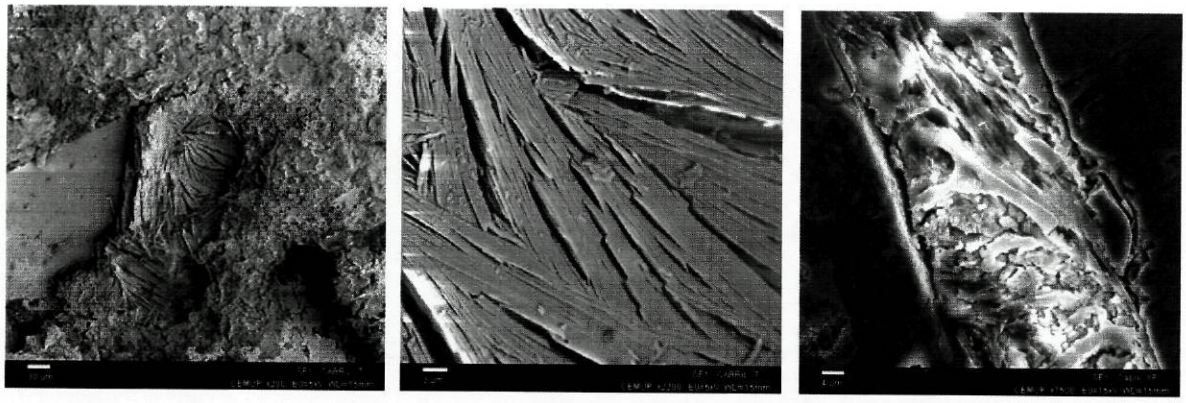
Figura III.1.29 – Espectro, EDS, correspondente à etringite que preenche parcialmente os poros do betão.



Fotografia III.1.59 – Aspectos dos cristais de etringite em poros existentes no betão. A imagem da esquerda mostra fissuras de retracção, e a da direita uma fissura que atravessa o preenchimento, mas não se propaga à pasta adjacente.

Verifica-se que, para além da composição típica da etringite, existe um conteúdo relativamente elevado de silício e uma pequena percentagem de álcalis, o que leva a crer que coexistem gel sílico-alcalino e etringite. Não é visível, no entanto, gel na imagem e não se observaram microfissuras na pasta relacionadas com estes poros.

Foi ainda observada etringite orientada, muito localizada, em agulhas soldadas entre si formando camadas finas na interface pasta de cimento-agregado (Fotografia III.1.60). Este tipo de etringite secundária, que tem carácter expansivo, é designado por etringite comprimida ou mal cristalizada (Larive, 1990; Louarn e Larive, 1993; Divet, 2001a, 2001b).



Fotografia III.1.60 – Imagens, ao MEV, de etringite comprimida observada nos fragmentos de betão no contacto pasta de cimento-agregado. A imagem da direita mostra o mesmo tipo de etringite em lâmina delgada.

Nestas amostras foram identificados cristais de quartzo pertencentes às partículas de agregado fino. A superfície dos grãos de quartzo apresenta, localmente, aspectos de corrosão ou dissolução, em que, sobre a superfície lisa dos cristais, surgem filamentos de

orientação aleatória. A dissolução da sílica pode ocorrer quando é exposta a soluções alcalinas, como sucede no betão. Foram feitas análises dos filamentos sobre o cristal original, em EDS, que confirmaram tratar-se de sílica, com uma pequena percentagem de cálcio e sódio (Figura III.1.30 e Fotografia III.1.61). A ocorrência de cálcio parece confirmar a existência de reacção, embora fosse expectável a existência de um maior teor de álcalis provenientes da solução sílico-alcalina.

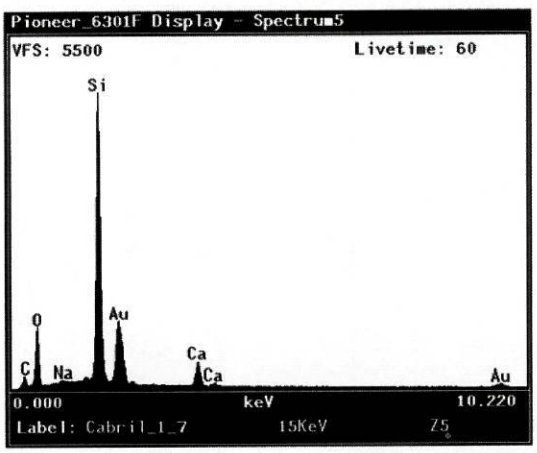
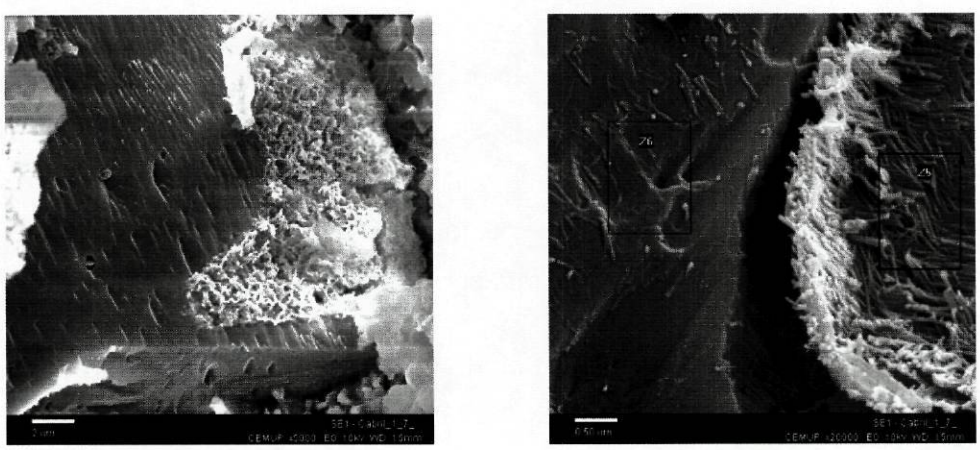


Figura III.1.30 – Espectro, EDS, correspondente aos filamentos que se encontram sobre um cristal de quartzo.



Fotografia III.1.61 – Aspectos da corrosão dos grãos de quartzo pertencentes aos agregados finos. Na imagem da direita encontra-se uma pequena percentagem de cálcio, para além do silício predominante (espectro da Figura III.1.30).

5.4.3.6.2. Amostras do betão em escamação nas paredes das galerias

Alguns fragmentos pertencentes às amostras dos locais em que se verificava escamação do betão foram também examinados. Os fragmentos, que foram partidos à mão, apresentavam um carácter pulverulento, com material solto, muito fino, de cor acastanhada, ferruginosa. A observação ao MEV, que foi dificultada pela existência de

numerosas partículas soltas, permitiu identificar alguns dos materiais que constituem, habitualmente, o cimento.

Estas amostras permitiram observar partículas pertencentes à pasta de cimento, que se revelou ser predominantemente constituída por silício e cálcio, por vezes com alumínio e álcalis (Figura III.1.31). Conforme referido na Parte I, os silicatos de cálcio hidratados são abundantes no betão e esta foi a composição mais frequentemente encontrada.

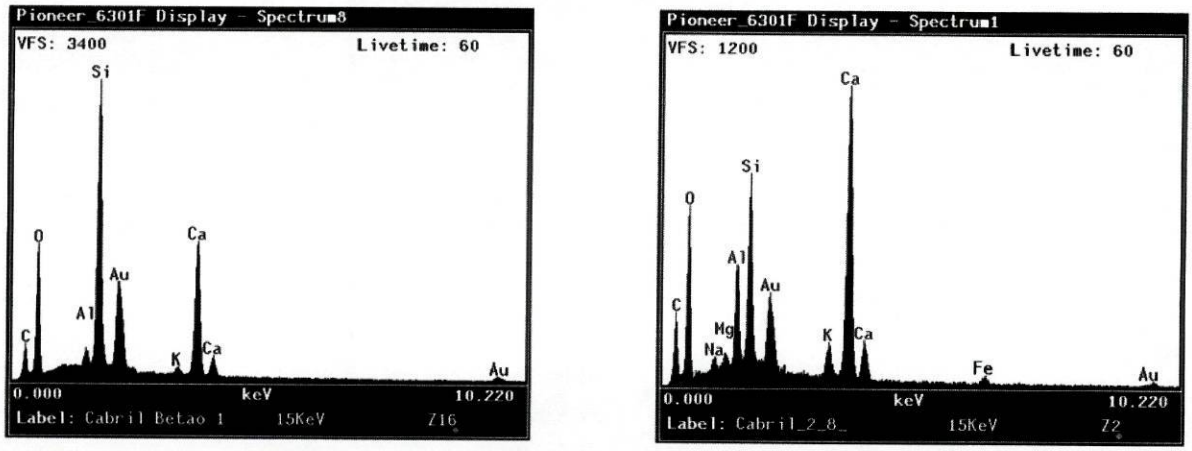
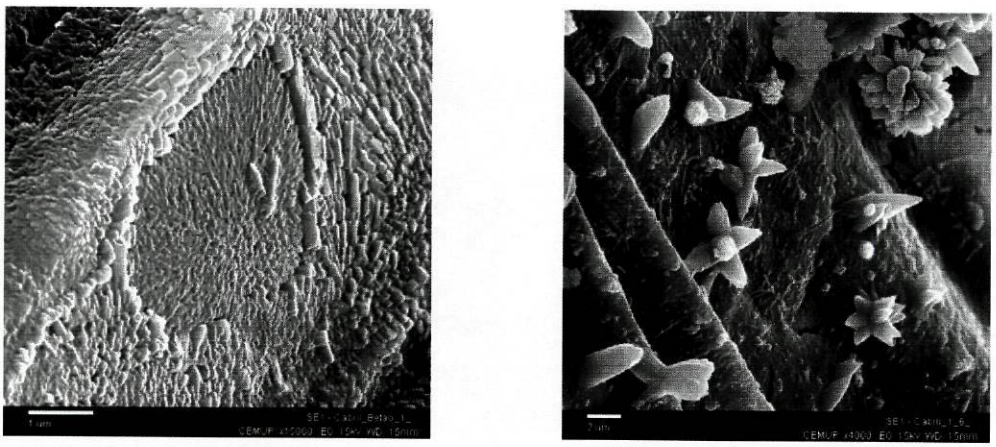


Figura III.1.31 – Espectros, EDS, correspondentes à pasta de cimento nas amostras de betão.

Foram identificadas partículas de agregado fino, essencialmente de quartzo e de feldspato. Foram também encontrados cristais de carbonato de cálcio com hábitos diversos (Fotografia III.1.62). O carbonato de cálcio é muito frequente nestas amostras e forma um revestimento sobre a pasta de cimento. Poderá resultar da reacção superficial entre a pasta de cimento e a atmosfera, com a consequente carbonatação.



Fotografia III.1.62 – Aspectos dos cristais de carbonato de cálcio que se encontram à superfície dos fragmentos de betão.

Analisaram-se raros cristais de sulfato de potássio que deverão corresponder a arcanite (K_2SO_4) (Figura III.1.32) (Fotografia III.1.63), um dos sulfatos presentes no clínquer. A arcanite cristaliza segundo o sistema ortorrômbico bipiramidal e tem dureza próxima do gesso. Surge aqui em cristais alongados de aspecto corroído ou dissolvido, sobre os quais existem pequenos cristais de carbonato de cálcio.

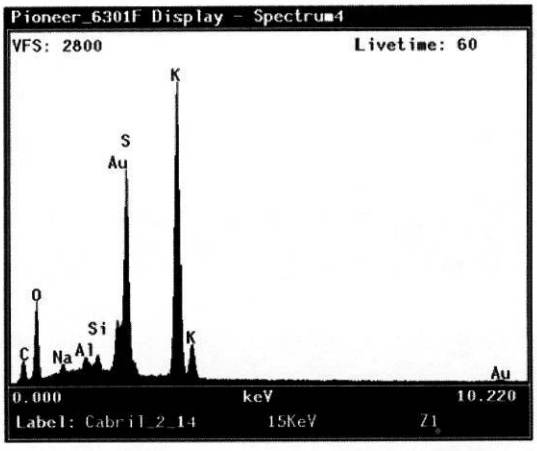
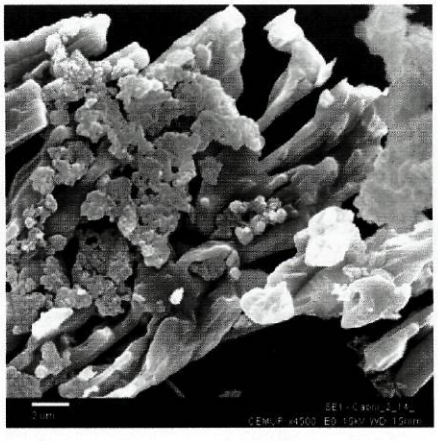


Figura III.1.32 – Espectro, EDS, correspondente aos cristais de arcanite.



Fotografia III.1.63 – Cristais de arcanite, de hábito tabular, existentes em amostra do betão em escamação.

Entre os cristais que se encontram na superfície dos fragmentos de betão, foi observada também aptitalite ($K_3Na(SO_4)_2$) (Figura III.1.33) (Fotografia III.1.64), que cristaliza no sistema trigonal-hexagonal e tem a dureza da calcite. A aptitalite natural tem fractura concoidal e apresenta-se em geral maciça.

Foram também observados raros cristais de portlandite ($Ca(OH)_2$), mineral abundante na pasta de cimento, nos poros e ao longo de fracturas. A portlandite é caracterizada por ocorrer em placas ou prismas hexagonais (Fotografia III.1.65). Ao microscópio óptico é

branca ou incolor e tem relevo próximo do bálsamo (St John et al., 1998), embora a sua observação seja dificultada pela pequena dimensão dos cristais no betão.

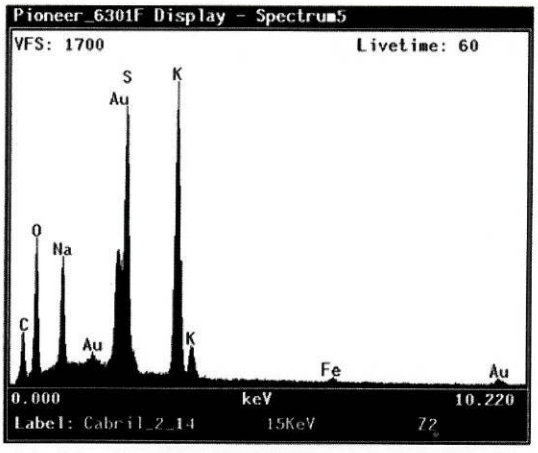
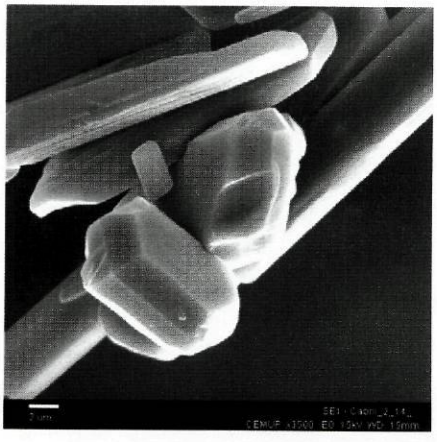
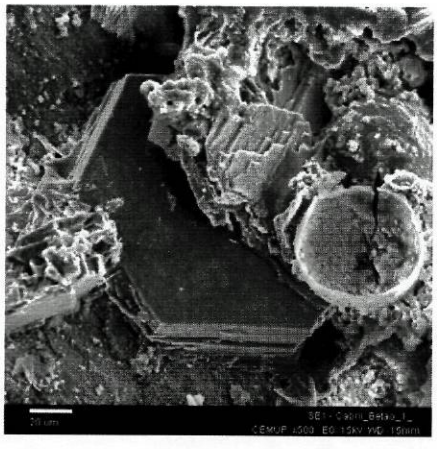


Figura III.1.33 – Espectro, EDS, dos cristais de aptitalite.



Fotografia III.1.64 – Aspecto dos cristais de aptitalite presentes nas amostras de betão, nos locais em que ocorre escamação.



Fotografia III.1.65 – Cristal de portlandite disposto paralelamente à superfície de contacto pasta de cimento-agregado. Observa-se também um poro com um fino revestimento de etringite.

Nestes fragmentos de betão, procuraram-se vestígios de gel sílico-alcalino, que poderia estar na origem da escamação localizada do betão. Foi encontrado gel, que cobria a superfície de uma das amostras, mostrando a textura distintiva (Figura III.1.34) (Fotografia III.1.66).

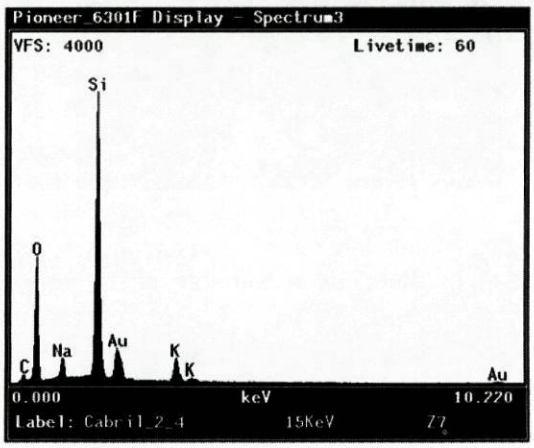
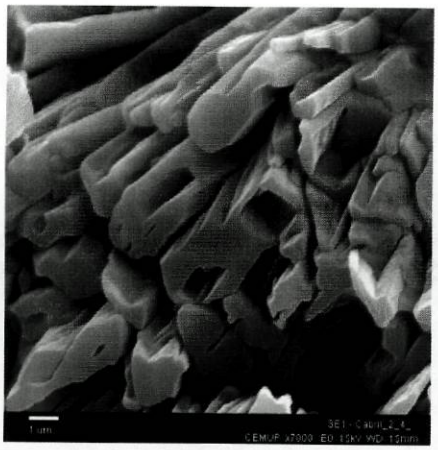


Figura III.1.34 – Espectro, EDS, do gel sílico-alcalino presente em amostras de betão, em que predomina o silício, com pequenos teores em sódio e potássio.



Fotografia III.1.66 – Textura do gel sílico-alcalino na amostra de betão, com fissuras de retracção características resultantes da perda de água.

Tal como descrito em Diamond, 2000, quando observado ao MEV em baixa ampliação, o gel apresenta uma superfície suave com fissuras características. Na superfície, foram observados cristais tabulares ricos em sódio (Fotografia III.1.67), que podem ter resultado da evolução do gel em contacto com a atmosfera. Estes cristais são semelhantes aos encontrados por Jensen, 1993, em betão com indícios de reacções álcali-sílica e, pela composição e morfologia, parecem idênticos aos cristais de trona referidos anteriormente.



Fotografia III.1.67 – Aspecto dos cristais tabulares, ricos em sódio, que existem na superfície de algumas amostras de betão e, essencialmente, sobre o gel sílico-alcalino.

5.5. Conclusões

Atendendo ao objecto de estudo do presente trabalho, ou seja, a caracterização de granito como agregado, procurou-se neste capítulo analisar o possível efeito da utilização dos granitos sobre a durabilidade da estrutura.

Neste contexto, a análise das amostras do betão, *in situ* e em laboratório, permitiu tecer algumas considerações acerca dos indícios de deterioração do betão da barragem do Cabril exclusivamente relacionados com a utilização daquele tipo de agregados, ou seja, devidos a eventuais reacções álcali-agregado. Procuraram-se manifestações que permitissem fazer o diagnóstico destas reacções, estabelecendo eventuais relações de causa-efeito.

A inspecção *in situ* realizou-se nas galerias interiores da estrutura. Nas paredes de betão destas galerias, os indícios de deterioração identificados são constituídos por eflorescências, exsudações, escamação pontual do betão e raros *pop-outs*.

Apesar de se encontrarem referências em artigos científicos, acerca da barragem do Cabril, sobre a ocorrência de expansão da estrutura, nas galerias não se detectaram fissuras em *map cracking*, características da ocorrência de reacções álcali-agregado.

Foram colhidas amostras de eflorescências, exsudações e betão e utilizadas técnicas de petrografia para o seu estudo em laboratório.

As eflorescências mostraram uma composição rica em sódio, que se comprovou corresponder a cristais de trona. Coincidem com zonas de humidade nas paredes mais próximas do maciço rochoso de fundação; poderão dever-se ao maior afluxo de água nestes locais e consequente evaporação ao atingir a superfície do betão. A formação de cristais resultará da carbonatação por exposição à atmosfera. Processo semelhante é

relatado na bibliografia em ensaios de expansibilidade realizados com soluções ricas em álcalis.

As exsudações apresentam-se viscosas, quando recentes, e sólidas quando mais antigas. Na composição semiquantitativa, determinada ao MEV/EDS, predomina o silício e existem baixos teores de sódio e potássio. O cálcio foi encontrado em casos raros.

Atendendo aos elementos publicados sobre este assunto, pensa-se que a reacção álcali-sílica, que está na origem do gel, é, neste caso, muito superficial e está relacionada com partículas de agregado próximas da parede interior do betão. A observação das amostras de exsudações em dois momentos diferentes permitiu concluir que existe uma evolução do gel quando exposto ao ar. Sobre a matriz viscosa formam-se, com o tempo, cristais ricos em sódio, que corresponderão a trona. Esta evolução deverá estar relacionada com a carbonatação superficial do gel.

As amostras de betão, retiradas por furação à rotação, não mostram fissuras macroscópicas nem degradação da resistência à compressão uniaxial do betão.

Nas lâminas delgadas foram examinadas as partículas de agregado fino e grosso. Foram identificados dois tipos de granito que não estão presentes na pedreira. Uma destas rochas mostra indícios de deformação e quartzo microcristalino, característica que revela potencial reactividade aos álcalis. Existem ainda outras partículas de rochas metamórficas e filonianas, que poderão provir do leito do rio. Algumas mostram orlas difusas no contacto com a pasta de cimento, o que não sucede com as partículas graníticas.

Não se observa fissuração em *map cracking* a nível microscópico. Existem raras fissuras, muito finas. As fissuras que existem nas interfaces pasta de cimento-agregado são geralmente superficiais, ou seja, surgem nos primeiros centímetros de furação das carotes. Apresentam, por vezes, preenchimento parcial por etringite e, por vezes, existe nas interfaces etringite comprimida.

Observou-se uma única orla de gel semicristalino no contacto pasta de cimento-agregado, que apresenta variação de composição e textura à medida que se caminha da partícula de agregado para a pasta de cimento.

Algumas das fissuras que atravessam as partículas de agregado grosso contêm produtos de composição próxima do gel sílico-alcalino. Este gel apresenta uma estrutura semicristalina quando no seio dos agregados e é amorfo junto da pasta de cimento. A composição mostra também uma ligeira variação, enriquecendo em cálcio quando se encontra mais próximo do cimento.

A análise da pasta de cimento ao MEV/EDS teve em atenção a diferença de tonalidade junto a algumas partículas de agregado, observada ao microscópio de polarização, podendo dever-se a depleção de $Ca(OH)_2$ nestas zonas. Concluiu-se que a pasta apresenta, por vezes, um teor mais elevado de silício e menor de cálcio junto a essas partículas do que na restante pasta, mas esta variação não foi confirmada por outras análises.

Os poros observados nas lâminas delgadas apresentam por vezes preenchimento total ou parcial de etringite, que, em alguns casos, atendendo à composição encontrada, parece coexistir com gel sílico-alcalino. Não existe fissuração importante relacionada com a presença destes produtos nos poros.

Capítulo 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A BARRAGEM DO CABRIL

Foram estudados os três factores que podem estar na origem da ocorrência de reacções álcali-agregado. Atendendo ao tema do presente trabalho, a disponibilidade de sílica reactiva foi o principal factor analisado.

O estudo petrográfico das rochas graníticas que foram utilizadas como agregado permitiu conhecer as características dos cristais de quartzo quanto à deformação. De acordo com os últimos desenvolvimentos nesta área, os granitos da pedreira não são potencialmente reactivos aos álcalis por não apresentarem quartzo microcristalino. Esta conclusão foi confirmada pelos resultados dos diferentes ensaios de reactividade executados, que indicam um agregado não reactivo.

Se bem que esta conclusão seja verdadeira para as rochas da pedreira, há a considerar que se detectaram no betão partículas de rocha de fácies diferente. Com efeito, estão presentes no betão partículas centimétricas de composição granítica mas que mostram forte deformação e quartzo microcristalino. Esta rocha, que não foi identificada na pedreira, pode ter sido explorada outrora de uma orla exterior do batólito, actualmente inexistente. A orla seria constituída por um granito mais antigo do que os dos afloramentos estudados e explorados, de idade provavelmente pré-câmbrica, e que poderá corresponder ao granito orientado, cartografado neste local nas cartas geológicas mais antigas à escala 1:500.000. Devido à inexistência de amostras, não foram realizados para este granito ensaios de reactividade aos álcalis. A análise petrográfica permite, no entanto, concluir que poderá tratar-se de uma rocha potencialmente reactiva.

As condições de exposição ambiental mostram a existência de um risco elevado de ocorrência de reacções, dado o contacto permanente com a água da albufeira. Os métodos aplicados para avaliação da percentagem de álcalis na pasta de cimento não merecem total confiança, dada a possível contaminação por pequenas partículas de agregado. O resultado obtido por análise química mostra um teor em álcalis muito elevado que, a corresponder ao teor inicialmente existente no cimento, representaria um risco importante de reactividade.

A estrutura foi inspeccionada para detecção dos indícios que permitiriam fazer o diagnóstico de reacções álcali-sílica. A inspecção revelou a existência de gel sílico-alcalino exsudado do betão, em especial ao longo de fissuras horizontais na galeria de coroamento e seus acessos. O gel é constituído por silício, com pequenas percentagens

de álcalis. Em alguns locais existe trona, que poderá provir também da evolução deste gel por carbonatação à superfície.

Esta reacção, que se pensa ser superficial, não causou fissuração nem decréscimo da resistência à compressão uniaxial do betão. No entanto, é sabido que pode ocorrer expansão da estrutura sem que exista fissuração e que a resistência à compressão não é significativamente afectada pela ocorrência de reacções álcali-sílica.

A ocorrência de gel nas exsudações levanta uma questão há muito abordada pelos especialistas, que se prende com a aplicabilidade dos ensaios de reactividade actualmente conhecidos a rochas como o granito, que, a reagir com os álcalis, se enquadra nas reacções lentas/retardadas. Efectivamente, são indicadas, na bibliografia sobre os principais ensaios actualmente utilizados, as desvantagens dos métodos e alguns resultados controversos, em que as rochas consideradas não reactivas se mostram em obra reactivas.

Por outro lado, a análise petrográfica com base na Especificação LNEC E 415, 1993, mostra-se muito conservativa ao considerar potencialmente reactivos os agregados que contêm quartzo tectonizado, sem estabelecer um limite a partir do qual o ângulo de extinção ondulante traduz a reactividade deste mineral. A utilização do critério da Especificação LNEC E-415, 1993, conduz à conclusão de que os granitos colhidos na pedreira podem ser reactivos porque contêm quartzo tectonizado, embora em baixo grau, e minerais potencialmente fornecedores de álcalis, como sucede com qualquer rocha granítica. No entanto, de acordo com os elementos mais recentes, deverá ser considerado reactivo o quartzo microcristalino e as formas amorfas de sílica, que não estão presentes nestes granitos.

Por outro lado, tomando como referência algumas das normas existentes noutros países, verifica-se que as rochas graníticas são classificadas, em geral, como não reactivas. Existem, no entanto, alguns trabalhos de investigação publicados que referem o inverso.

Ao analisar o betão da barragem do Cabril, os indícios da ocorrência de reacções álcali-sílica são pouco frequentes e pouco consistentes. Existem exsudações apenas na galeria de coroamento e seus acessos, mas não está associada a fissuração ou diferente coloração do betão. As restantes galerias não mostram indícios de deterioração.

À escala microscópica, apenas se observou um produto que se considera corresponder a gel sílico-alcalino em duas fissuras e numa interface pasta de cimento-agregado. Não se observaram fissuras resultantes de expansão, nem orlas de reacção nas partículas de agregado ou gel preenchendo os poros.

A etringite, que ocorre em alguns poros, fissuras e no seio da pasta de cimento parece aproveitar os espaços disponíveis para cristalizar. Pensa-se, no entanto, que pontualmente possa ter ocorrido ataque por sulfatos de origem interna relacionado com a existência de pirite alterada entre as partículas de agregado fino. Tratar-se-á, neste caso, de etringite secundária. Encontraram-se raras fissuras de expansão relacionadas com alguns poros preenchidos por etringite.

A existência de reacções álcali-sílica parece confinada à superfície do betão, uma vez que no gel das exsudações não foi detectado cálcio, que existiria se o gel tivesse feito percurso pela pasta de cimento. O gel que está presente à superfície deverá provir de partículas de agregado situadas junto à superfície interior do betão, que serão, então, reactivas, ou resultar de uma reacção rápida. Quando a reacção é acelerada o cálcio, devido ao maior raio iónico e, consequentemente, menor velocidade de difusão, não atinge o local da reacção, formando-se um gel sílico-alcalino sem cálcio (Brouxel, 1993).

O facto mais difícil de explicar é o das exsudações se localizarem apenas na galeria de coroamento e seus acessos. Uma das hipóteses poderá estar relacionada com a composição da resina epoxídica injectada para tratamento das fissuras. Uma outra hipótese, que parece também possível, é o facto de que, no início deste trabalho, as manifestações desta reacção eram incipientes e têm vindo a agravar-se muito significativamente, o que fará supor que fenómenos desta natureza poderão ocorrer no futuro próximo noutras galerias. Há ainda a considerar a existência de fissuras às cotas mais elevadas, conforme referido, que podem facilitar o acesso da água ao interior do betão.

As eflorescências existem nas paredes mais próximas do maciço de fundação, devido a infiltração de humidade nesses locais. Estas eflorescências têm a particularidade de conter cristais ricos em sódio que são semelhantes aos observados sobre o gel viscoso, após exposição ao ar. Este facto parece constituir uma demonstração da evolução do gel, tal como referido na literatura, que sofre carbonatação quando exposto à atmosfera.

PARTE III.2

BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO

Capítulo 1. OBJECTIVOS

À semelhança do exposto relativamente à Barragem do Cabril, serão aqui apresentados os resultados experimentais do estudo desenvolvido sobre a Barragem do Alto Rabagão. Este estudo tem como objectivo principal a discussão das condições que podem conduzir à ocorrência de reacções que envolvem o agregado utilizado no betão, nomeadamente as reacções álcali-sílica, e a avaliação dos indícios que poderão permitir fazer o diagnóstico destas reacções.

A sequência será idêntica à anteriormente apresentada, considerando as particularidades deste caso:

- Caracterização dos agregados utilizados no fabrico do betão, com ênfase na identificação de espécies potencialmente reactivas;
- Enquadramento da estrutura quanto à exposição ao meio ambiente;
- Determinação da disponibilidade de álcalis no betão;
- Estudo do betão com vista à identificação de indícios que poderão conduzir ao diagnóstico da presença de reacções álcali-agregado.

Capítulo 2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS

2.1. Enquadramento

Foi feito o estudo petrográfico da rocha existente na pedreira explorada para a construção da Barragem do Alto Rabagão, com vista à identificação de espécies potencialmente reactivas, quer por conterem formas de sílica consideradas reactivas, quer por serem possíveis fornecedoras de álcalis. Com base nos resultados do estudo desenvolvido, discute-se a adequabilidade desta rocha como agregado e faz-se uma previsão do seu comportamento em obra.

O local explorado para produção dos agregados para o fabrico do betão situa-se junto à estrada Chaves - Braga (EN 103) (Neiva, 1959a, 1959b, 1959c), cerca de 5 km a jusante do local da barragem e a Sul da povoação de Viade de Baixo. A pedreira encontra-se actualmente em exploração, segundo uma frente de orientação predominante NE-SW (Fotografia III.2.1).

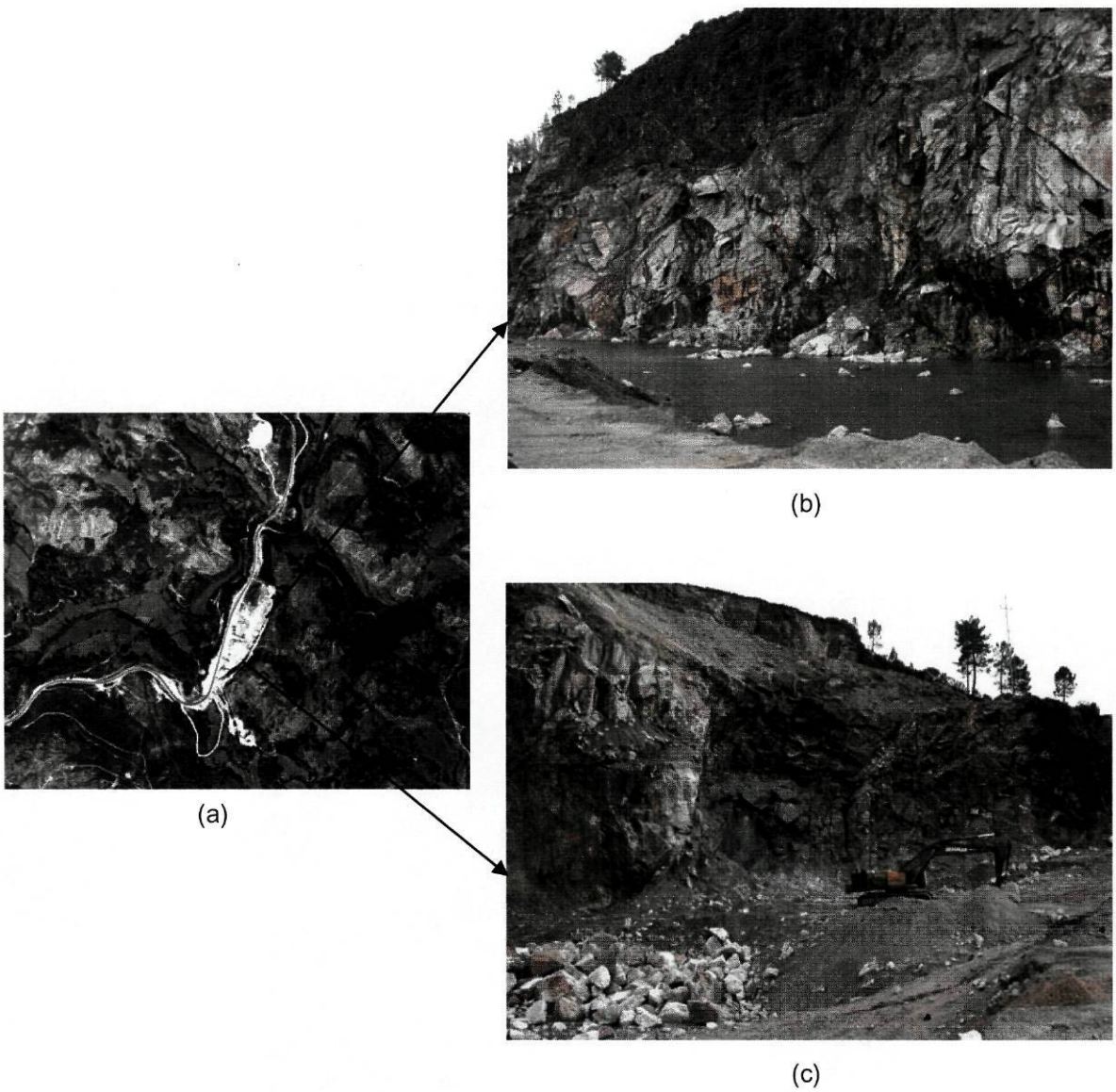
É possível observar zonas em que o maciço se apresenta são (W_1) em profundidade, em especial no extremo Sudoeste, e massas de granito ligeiramente alterado (W_2) (ISRM, 1981). O granito está alterado (W_3) próximo da superfície, numa espessura que se desenvolve paralelamente à topografia da encosta. A altura da frente actualmente em exploração decresce de Sudoeste para Nordeste. As principais famílias de diaclases mostram espaçamentos de 200 a 600 milímetros (F_3), e até cerca de dois metros (F_2) (ISRM, 1981) no limite mais a Sudoeste, onde o granito está são. À superfície observam-se algumas dezenas de centímetros de solo vegetal, sobre o qual existe vegetação predominantemente rasteira.

O local foi estudado por Neiva, 1959a. Foi identificado um granito de grão médio a grosseiro de duas micas, por vezes com cristais de feldspato individualizados como fenocristais. É referido que os minerais do granito, em especial as micas, mostram orientação. São as seguintes as famílias de diaclases predominantes:

- N32°-53°W; vertical;
- N38°-60°E; vertical;
- Horizontal.

Existem, ainda, com menor frequência:

- N60°-82°W; vertical;
- N7°-12°E; 75°-90°ESE.



(a)

(b)

(c)

Fotografia III.2.1 – Pedreira de onde foram retirados os agregados para a construção da barragem do Alto Rabagão e que se mantém em laboração: (a) Fotografia aérea digital do local (sem escala); (b) frente de escavação Este, vista para Nordeste; (c) frente de escavação Este, vista para Sudoeste (Março de 2002).

2.2. O granito da pedreira de Pisões

2.2.1. Análise petrográfica

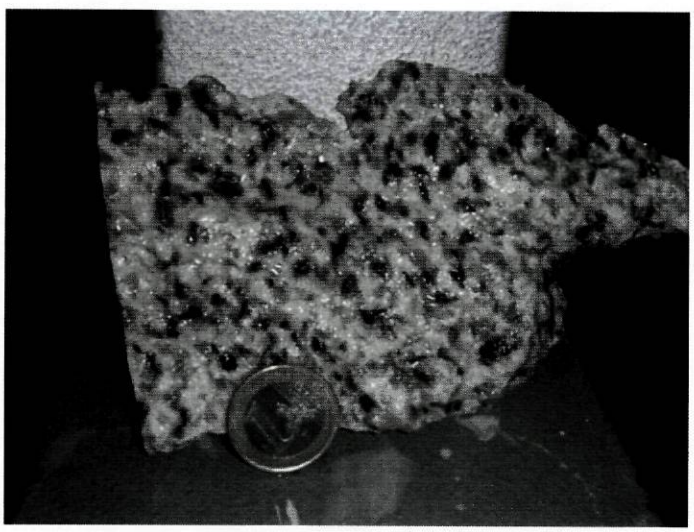
Para caracterização da textura e composição mineralógica do granito foram produzidas várias lâminas delgadas. Esta análise teve ainda como objectivo identificar a presença de espécies potencialmente reactivas, com base nos indícios de deformação

nos minerais. Foi prestada particular atenção à presença de minerais de alteração que, de algum modo, possam participar em reacções álcali-agregado.

A análise petrográfica foi realizada com recurso às técnicas e equipamentos já referidos:

- Lupa binocular;
- Microscópio óptico de polarização, com luz transmitida e reflectida;
- Microscópio electrónico de varrimento;
- Microssonda electrónica;
- Microssonda RAMAN.

As amostras colhidas na pedreira mostram um granito de grão médio a grosseiro, com fenocristais de feldspato de pequena dimensão (Fotografia III.2.2). Nas amostras de granito mais alterado os cristais de feldspato apresentam cor amarelada ou acastanhada, sem brilho, devido a impregnação por óxidos de ferro exsudados da biotite (Neiva et al., 1965). Nestas amostras são também bem visíveis os cristais de mica, alguns de cor escura, com orlas acastanhadas.



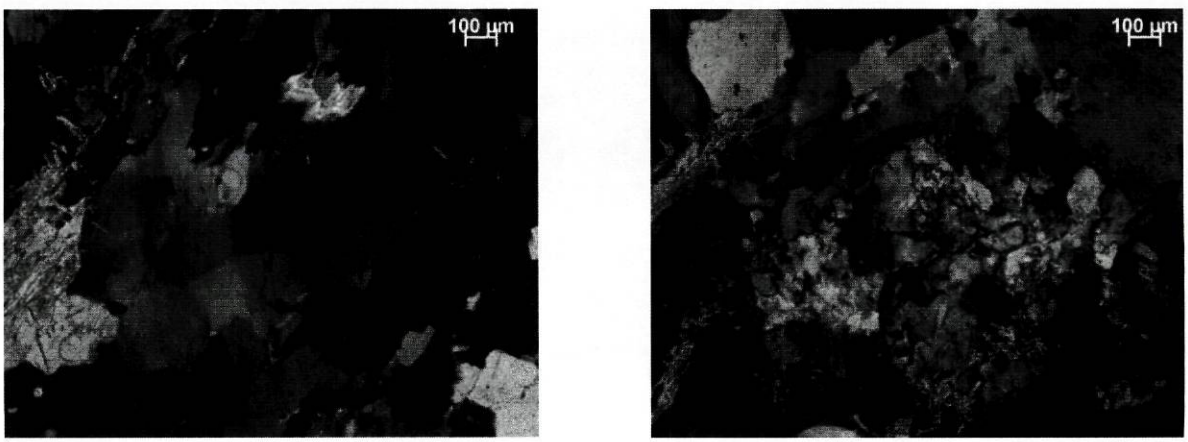
Fotografia III.2.2 – Aspecto do granito da pedreira de Pisões em amostra de mão.

Segundo Neiva, 1958 e Neiva et al., 1965, a textura, inicialmente hipautomórfica-granular, é cataclástica de tendência gnaíssica devido a deformação tectónica.

A observação ao microscópio óptico de polarização revela uma rocha de textura hipautomórfica-granular, por vezes com aspectos de textura cataclástica. Os cristais apresentam com frequência bordos suturados, com excepção da plagioclase, das micas e da silimanite que formam por vezes cristais subédricos.

O granito é constituído por quartzo, microclina, ortoclase, plagioclase, moscovite, biotite e clorite. Existem, ainda, silimanite, apatite, esfena, zircão e rútilo. Nas lâminas observadas a orientação das micas referida na bibliografia não é evidente, tendo-se identificado apenas um esboço de orientação.

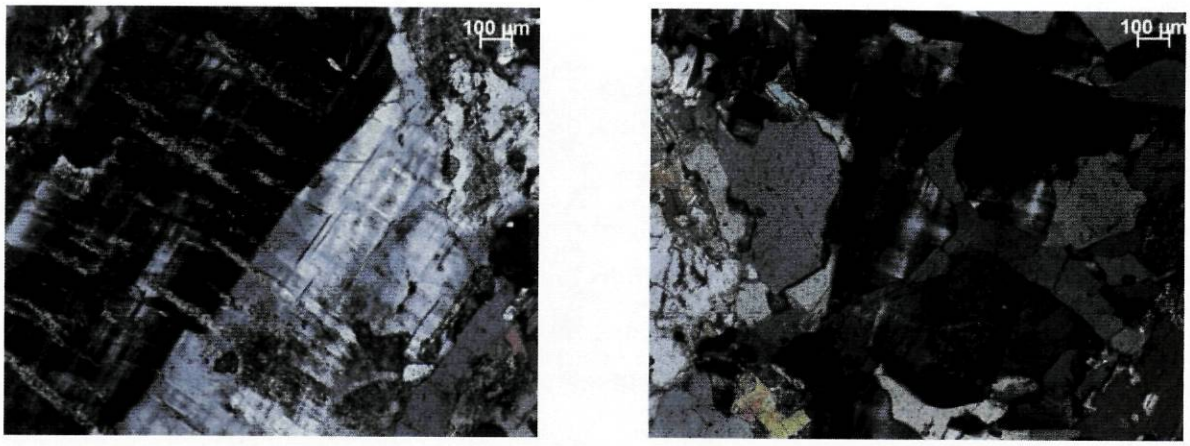
O quartzo ocorre em cristais anédricos, com limites suturados e frequentemente com extinção ondulante, como havia sido referido em Neiva et al., 1965. Apresenta-se em cristais desenvolvidos e frequentes e também na matriz, em cristais de pequena dimensão, com limites poligonais e textura cataclástica semelhante à do quartzo de recristalização (Fotografia III.2.3), denotando deformação. Apresenta inclusões de apatite e rútilo e também frequentes inclusões fluidas.



Fotografia III.2.3 – Quartzo com extinção ondulante e quartzo em pequenos cristais, com textura cataclástica (NX).

A microclina, também anédrica, apresenta o aspecto maclado típico em xadrez. Ocorre em cristais desenvolvidos e tem, por vezes, extinção ondulante. Mostra-se albitizada e por vezes, forma pertites (Fotografia III.2.4). Contém inclusões de quartzo, plagioclase, moscovite e apatite. Pode verificar-se, nos casos em que existe alteração, a existência de caulinização e sericitização, também referida por Neiva et al., 1965. Os bordos dos cristais são marcados por moscovitização, com moscovite microcristalina de orientação aleatória.

A ortoclase forma por vezes fenocristais anédricos e alongados. Os cristais alongados que mostram macla de Carlsbad têm tendência a ser mais desenvolvidos e subédricos. É menos abundante do que a microclina e mostra-se mais caulinizada. Verifica-se com frequência a existência de extinção ondulante deste mineral. Os bordos são marcados pela existência de pequenos cristais de moscovite.

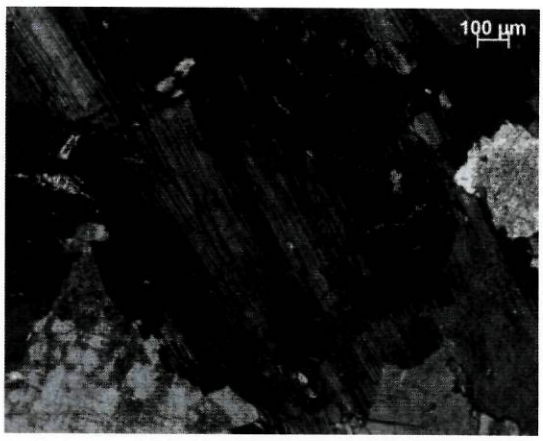


Fotografia III.2.4 – Aspectos dos cristais de feldspato potássico que mostram, por vezes, macla de Carlsbad (NX).

A plagioclase é em geral subédrica e exibe predominantemente maclas da albite. Apresenta-se em duas gerações:

- Os cristais menos desenvolvidos, que surgem em inclusão na ortoclase;

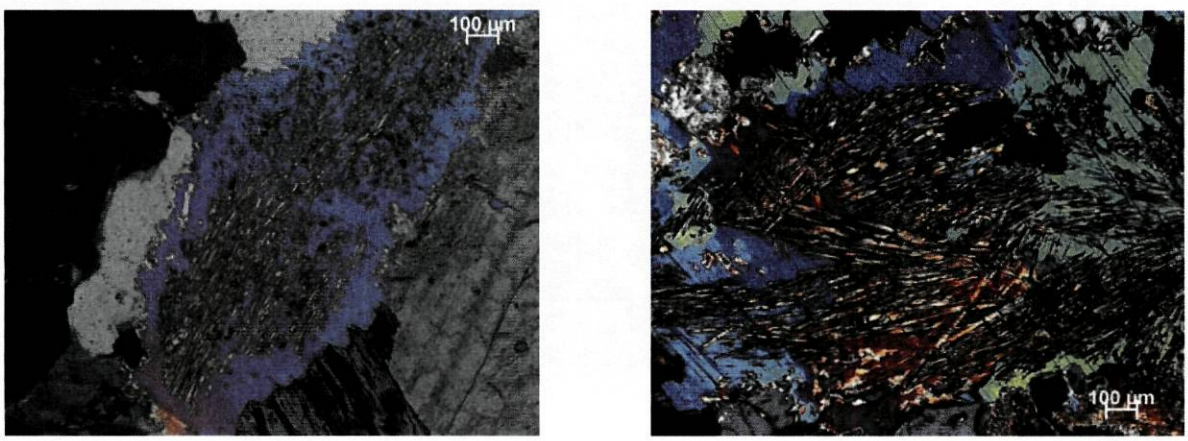
- Os mais desenvolvidos (Fotografia III.2.5), em que são frequentes as inclusões de biotite, moscovite, quartzo e apatite, também referidas em Neiva et al., 1965. São visíveis os indícios de moscovitização no interior dos cristais, com numerosas palhetas de moscovite de pequena dimensão e orientação aleatória, e também nos bordos. A composição da plagioclase foi determinada com base na medição do ângulo de extinção, tendo-se concluído que se trata de albite (9º).



Fotografia III.2.5 – Aspecto dos cristais de plagioclase (NX).

A moscovite apresenta-se subédrica, por vezes em intercrescimento com a biotite. São frequentes as inclusões de silimanite que parecem formar *kinks*, provavelmente em resposta à intensa deformação sofrida pela rocha (Fotografia III.2.6). Existem alguns

cristais com bordos esfarripados, também devido à compressão (Neiva, 1959d). Existem cristais de moscovite deformados e outros com textura poecilítica, formando intercrescimentos com a ortoclase e a microclina. Cristais de moscovite de menores dimensões contornam os cristais de quartzo e feldspato nas amostras com alteração mais evidente. Nestas situações, os cristais mostram uma textura em roseta de orientação aleatória, por vezes com distribuição arborescente. Por vezes observa-se também a existência de moscovite nas orlas dos outros minerais.

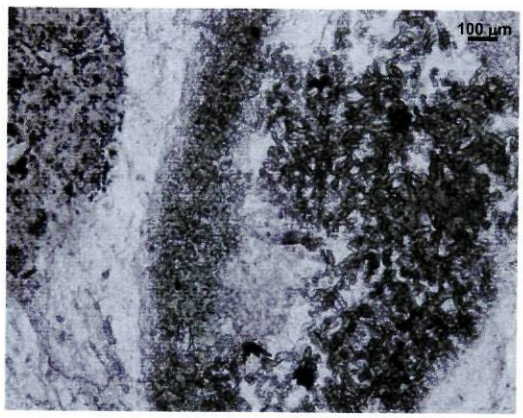


Fotografia III.2.6 – Moscovite com inclusões de fibrolite orientada (NX).

A biotite, em cristais subédricos, apresenta frequentemente um tom laranja, sem pleocroísmo, notando-se com dificuldade as clivagens nestes cristais. Existem também cristais alongados com forte pleocroísmo e clivagens. O pleocroísmo parece ser menos nítido à medida que o grau de alteração do granito é mais intenso.

A clorite resulta da alteração da biotite, principalmente ao longo das clivagens, e ocorre em pequena quantidade. É do tipo penina, com tom verde esbatido geralmente pouco pleocróico. Contém inclusões de zircão, esfena e rútilo, este em agulhas de dimensão diminuta mas muito numerosas. Também ocorre, por vezes, uma clorite com textura vermicular (Fotografia III.2.7) que foi analisada à microssonda electrónica, tendo-se concluído tratar-se de brunsvigite (Quadro III.2.1) (Figura III.1.19), com base na composição calculada para 28 (O), por não haver voláteis determinados. Ocorre frequentemente associada a quartzo microcristalino.

A silimanite é do tipo fibrolite. É muito frequente e surge em inclusões predominantemente na moscovite, mas também nos feldspatos, formando *clusters* de cristais prismáticos a aciculares, de pequena secção.



Fotografia III.2.7 – Clorite com textura vermicular (N//). Ocorre frequentemente associada a quartzo microcristalino.

Quadro III.2.1 – Composição da clorite vermicular existente no granito da pedreira de Pisões, a partir de dados obtidos à microssonda electrónica (valores em percentagem).

	Análise 1	Análise 2	Média
SiO_2	26,16	25,59	25,88
TiO_2	-	0,05	0,03
Al_2O_3	19,36	18,13	18,75
FeO	29,47	31,63	30,55
MnO	0,54	0,27	0,41
MgO	10,53	9,43	9,98
CaO	0,26	0,31	0,29
Na_2O	0,03	0,02	0,03
K_2O	0,04	0,15	0,10
Total	86,38	85,58	86,02

Existem ainda inclusões de apatite e topázio, essencialmente nos feldspatos e no quartzo. Os cristais de apatite são em geral euédricos, de pequena dimensão. O topázio apresenta-se em pequenos cristais aciculares mais frequentes como inclusões nos cristais de quartzo.

A esfena ocorre em cristais euédricos, em geral associados às agulhas de rútilo nos cristais de clorite e de minerais opacos.

Na rocha mais alterada, é possível observar hidróxidos de ferro ao longo das clivagens dos minerais e, por vezes, nos bordos, em especial nos cristais de feldspato.

2.2.2. Características mais importantes como agregado

O granito da pedreira de Pisões mostra indícios de deformação. Existe uma orientação preferencial dos minerais, pouco nítida, em especial dos minerais filitosos e da plagioclase, que por vezes formam cristais alongados.

Os indícios de deformação encontram-se impressos nos cristais de quartzo, com extinção ondulante, de plagioclase e de moscovite que apresentam, respectivamente, planos de macla e clivagens distorcidos. Nas moscovites, as inclusões de silimanite são testemunho da tensão a que a rocha esteve submetida, dispondo-se frequentemente em *kinks*.

O ângulo de extinção ondulante do quartzo, como parâmetro que reflecte a deformação, foi medido de acordo com o método referido por De Hills e Corválan, 1964. Verifica-se que o quartzo apresenta, em média, um ângulo de extinção fraco (0 a 15º), segundo a Especificação LNEC E 415, 1993, (Figura III.2.1) (Quadro III.2.2).

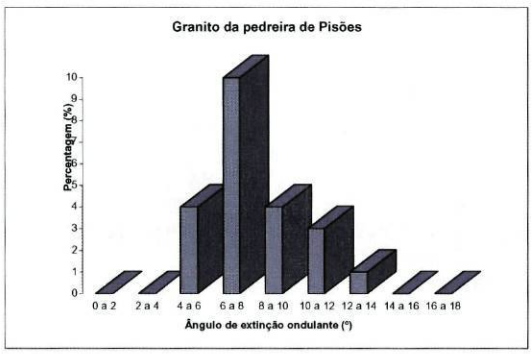


Figura III.2.1 – Histograma dos valores do ângulo de extinção ondulante dos cristais de quartzo do granito da pedreira de Pisões.

Quadro III.2.2 – Valor médio, mínimo e máximo do ângulo de extinção ondulante do quartzo, com a classificação correspondente, segundo a Especificação LNEC E 415, 1993.

	Valor médio	**Valor Min. e Max.**	**Descrição (E 415, 1993)**
Granito da pedreira de Pisões	8,5	5º- 14º	Extinção fraca

Os intervalos correspondentes aos valores de 0 a 2º e de 2 a 4º têm uma percentagem nula de leituras, por terem sido analisados apenas os grãos com extinção ondulante nítida. A percentagem mais elevada de leituras encontra-se no intervalo entre 6 e 8º e foram observados alguns cristais com 12 a 14º de ângulo de extinção.

Este granito apresenta também pequenos cristais de quartzo em mosaico, com bordos suturados, que poderão ser identificados como quartzo microcristalino. A pequena dimensão dos cristais e a textura superficial irregular levam ao aumento da área disponível para reacção, podendo contribuir para a reactividade do agregado. Estes cristais estão por vezes associados a aglomerados de pequenos cristais de clorite vermicular e sericite.

Atendendo a que os granitos podem dar origem a reacções lentas/retardadas do tipo álcali-silicato, foram identificados nesta rocha silicatos que podem participar na reacção, como a moscovite deformada ou microcristalina e os feldspatos alterados.

De acordo com Neiva, 1959c, previa-se que os agregados, obtidos por britagem do granito, fossem constituídos por elementos achatados nos maiores calibres e regulares nos de calibre médio. As partículas de dimensão areia seriam achatadas, regulares e alongadas.

2.3. Características químicas

A análise química global do granito foi realizada nos *Activation Laboratories Ltd*, (ACTLABS), no Canadá, utilizando o método de fusão ICP de metaborato/tetraborato de lítio e ICP/MS para os elementos traço.

A análise química, elementos menores e terras raras do granito é apresentada no (Quadro III.2.3). No quadro encontra-se, também, a composição que consta em Neiva et al., 1965, para o granito de Pisões.

A composição normativa foi obtida a partir da aplicação da norma C.I.P.W. (Quadro III.2.4).

O granito da pedreira de Pisões é peraluminoso com o quociente molecular A/CNK de 1,14. É muito diferenciado (Figura III.2.2), projectando-se na área destes granitos.

No perfil de terras raras normalizado para condritos verifica-se que está enriquecido em terras raras leves (LREE) em relação às terras raras pesadas (HREE), uma vez que La_N/Lu_N é de 4,8, e possui uma forte anomalia negativa de Eu (Figura III.2.3).

2.4. Características físicas e mecânicas

A resistência à compressão do granito da pedreira de Pisões foi determinada em ensaios à compressão uniaxial executados no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção da FEUP no equipamento referido anteriormente (Parte III.1), segundo a NP EN 1926, 2000.

A preparação dos provetes foi facilitada pelo facto de os blocos apresentarem dimensões adequadas, uma vez que a pedreira se encontra em laboração e foi possível colher maiores blocos de rocha. Foram preparados três cilindros e três cubos. No Quadro

Quadro III.2.3 – Análise química em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm, do granito da pedreira de Pisões.

	Granito da pedreira	Granito de Pisões (1)
SiO_2	74,51	72,93
Al_2O_3	14.44	15,32
Fe_2O_3	1.06	0,15
MnO	0,025	vest.
MgO	0.09	-
CaO	0.79	0,64
Na_2O	4,05	3,80
K_2O	4,21	5,00
TiO_2	0.065	vest.
P_2O_5	0.55	0,41
LOI	0,61	0,95
Total %	**100,40**	**99,20**
A/CNK	**1,14**	**1,19**

Ag	*		
As	*		
Ba	17		
Bi	1,5		
Ce	18,4		
Co	*		
Cr	*		
Cs	8,1		
Cu	33		
Ga	25		
Ge	2		
Hf	2,8		
In	*		
Mo	*		
Nb	15		
Ni	20		
Pb	14		
Rb	374		
Sb	*		
Sn	8		
Sr	12		
Ta	1,4		
Th	6,5		
U	45,7		
V	*		
W	1		
Y	19		
Zn	85		
Zr	64		
La	8,1		
Pr	2,21		
Nd	8,2		
Sm	2,6		
Eu	0,06		
Gd	2,7		
Tb	0,6		
Dy	3,3		
Ho	0.5		
Er	1,4		
Tl	1,9		
Tm	0,20		
Yb	1,3		
Lu	0,17		

* Inferior ao limite de detecção; (1) Neiva et al., 1965.

III.2.5 encontra-se informação acerca do valor da resistência à compressão obtido para os seis provetes.

Quadro III.2.4 – Aplicação da norma CIPW para determinação da composição normativa do granito da pedreira de Pisões.

	Granito da pedreira de Pisões (%)
Quartzo	33,80
Ortoclase	24,88
Albite	34,27
Anortite	0,33
Corindo	3,10
Hiperstena Fe	1,68
Hiperstena Mg	0,22
Ilmenite	0,13
Apatite	1,25

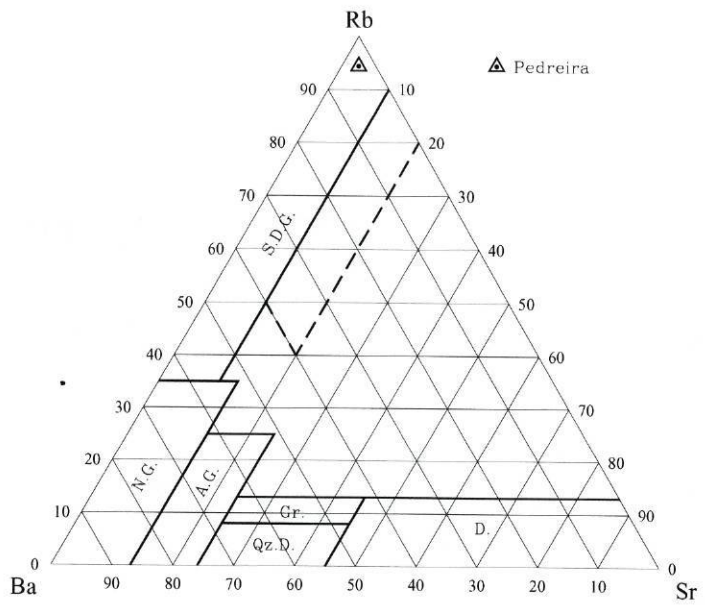


Figura III.2.2 – Projecção do granito da pedreira de Pisões no diagrama Rb-Ba-Sr (de El Bouseily e El Sokkary, 1975, com extensão do campo S.D.G. de Biste, 1979). Campos: D – diorito, Qz.D – quartzo-diorito, Gr – granodiorito, N.G. – granito normal, S.D.G – granitos muito diferenciados.

Nas Fotografias III.2.8 e III.2.9 encontram-se imagens de alguns dos provetes antes e após a realização dos ensaios. Verifica-se que as amostras revelam, quando cortadas, uma orientação dos minerais filitosos, que é mais evidente no cubo AR2 e nos três cilindros.

No cilindro designado AR1 a orientação dos minerais encontra-se aproximadamente paralela ao eixo do cilindro. Em AR2 a orientação preferencial apresenta um ângulo inferior a 45º com o eixo do cilindro, o que também se verifica para o cubo com a mesma

designação. Relativamente ao cilindro AR3, os minerais filitosos formam um ângulo superior a 45º com o eixo do provete. Quanto aos provetes de forma cúbica, AR1 tem minerais orientados distribuídos, aproximadamente, na normal à direcção de compressão. No cubo AR3 o ângulo entre o plano de orientação preferencial dos minerais e a direcção de compressão é superior a 45º.

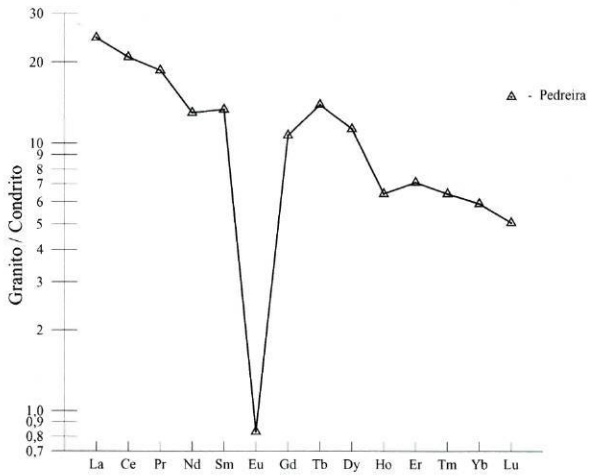
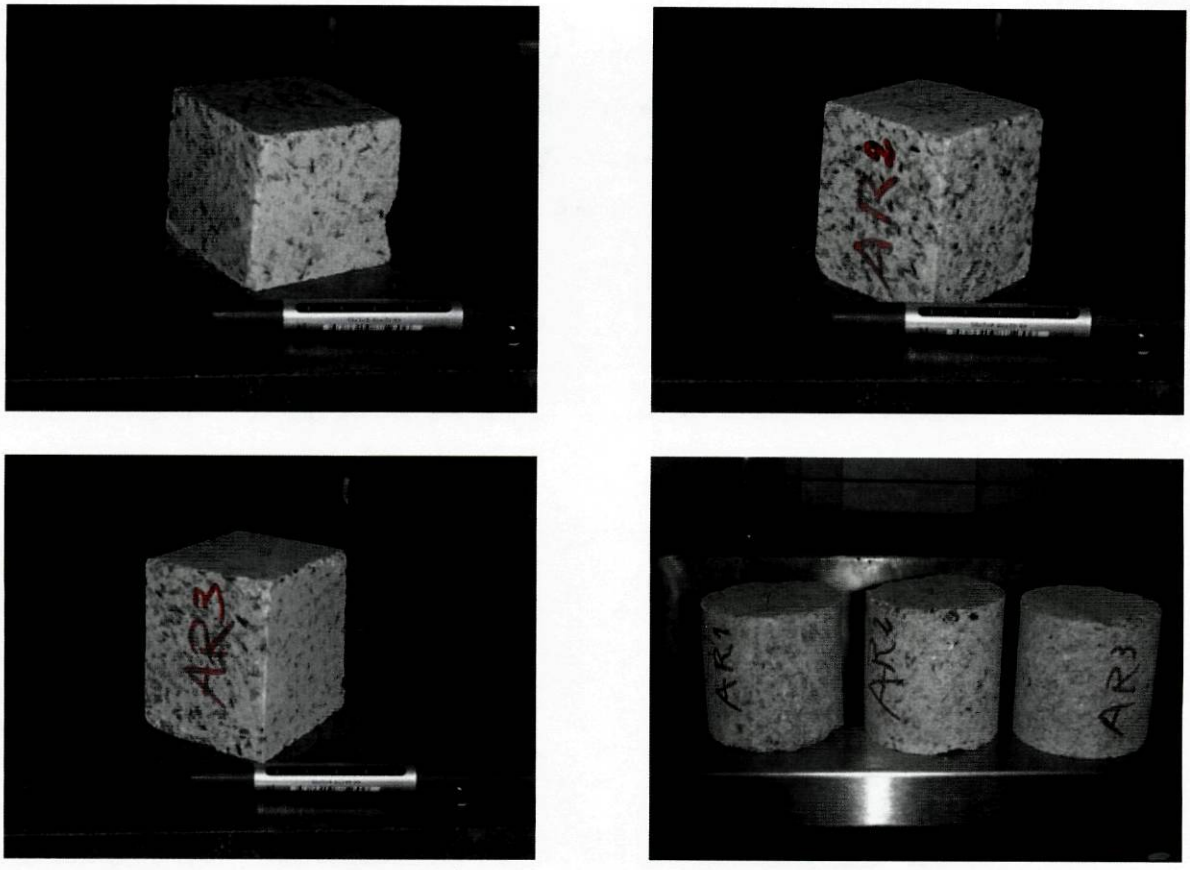


Figura III.2.3 – Perfil de terras raras normalizado para condritos do granito da pedreira de Pisões. Dados de condritos de Haskin et al., 1968.

Quadro III.2.5 – Ensaios de compressão uniaxial do granito da pedreira de Pisões.

Provete	Altura (mm)	Secção (mm^2)	Força (kN)	Tensão (MPa)
Cilindros				
AR1	73	4185	590	141
AR2	73	4185	370	88
AR3	73	4185	660	158
Cubos				
AR1	51	3360	400	119
AR2	57	2448	180	74
AR3	63	3068	380	124

Os valores de resistência à compressão mais baixos foram obtidos nos ensaios dos provetes cilíndrico e cúbico de referência AR2, o que poderá ser atribuído à orientação desfavorável dos planos de orientação preferencial, conforme referido em Brown et al., 1977. Estes foram os provetes que mais se desagregaram em resultado dos ensaios, conforme pode ser observado na Fotografia III.2.9 (c). Nos provetes em que os minerais orientados faziam um ângulo superior a 45º com a direcção de aplicação da força, os provetes apresentaram fissuras com orientação mais próxima da aplicação da força.

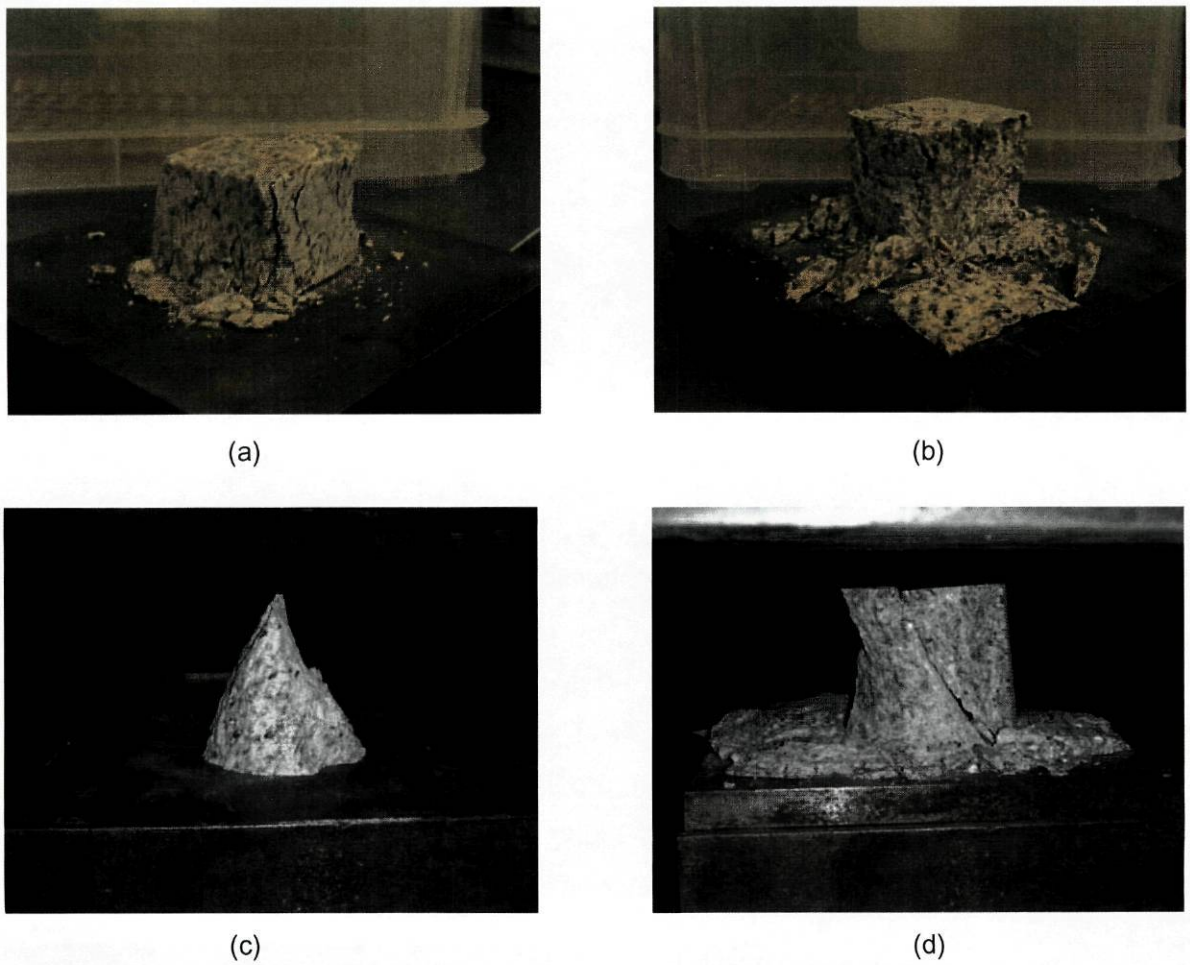


Fotografia III.2.8 – Imagens dos provetes cúbicos e cilíndricos preparados para os ensaios de compressão uniaxial do granito da pedreira de Pisões.

Relativamente à resistência à compressão desta rocha, pode dizer-se que os valores encontrados são superiores aos esperados para o betão e aceitáveis segundo a Especificação LNEC E 373, 1993 (Quadro I.19). No entanto, os valores obtidos são inferiores ao valor apresentado em Neville, 1999 (Quadro I.10), como valor médio da resistência à compressão de granitos, o que em alguns casos é devido ao ângulo desfavorável verificado entre a orientação dos minerais principais e a direcção de aplicação da força.

2.5. Ensaios de reactividade aos álcalis

Os ensaios de reactividade aos álcalis foram executados em simultâneo com os apresentados para a Barragem do Cabril, segundo os procedimentos e nos laboratórios já referidos.



Fotografia III.2.9 – Imagens dos provetes após a realização dos ensaios de compressão uniaxial do granito da pedreira de Pisões: (a) cubo AR1; (b) cubo AR3; (c) cilindro AR2; (d) cilindro AR3.

2.5.1. Ensaio acelerado da barra de argamassa

A amostra foi preparada no laboratório do DG-FCUP. Os blocos de rocha colhidos na pedreira foram fragmentados com martelo e tratados no moinho de maxilas, de modo a obter uma amostra com a distribuição granulométrica que se encontra no Quadro III.1.4, para um total de 990 gramas de material.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos do LNEC segundo a norma ASTM C1260-94, 2002.

Foi utilizado cimento tipo I, 42,5R da Cimpor Alhandra, com 0,19% de Na_2O e 1,02% de K_2O, ou seja, 0,86% de $Na_2O_{equivalente}$. As barras de argamassa tinham dimensão 25x25x285 mm^3.

O resultado encontra-se na Figura III.2.4. O granito apresenta uma expansão nula nos dois primeiros dias, evoluindo, depois, de forma lenta e aproximadamente constante. A expansão aos 14 dias é de 0,03% e aos 28 dias de 0,06%, situando-se sempre abaixo do valor de 0,10% apresentado na norma para agregados potencialmente reactivos.

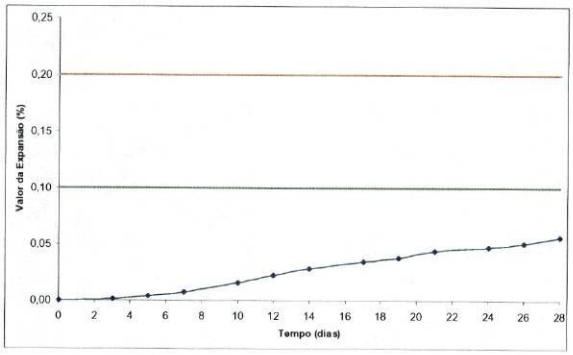
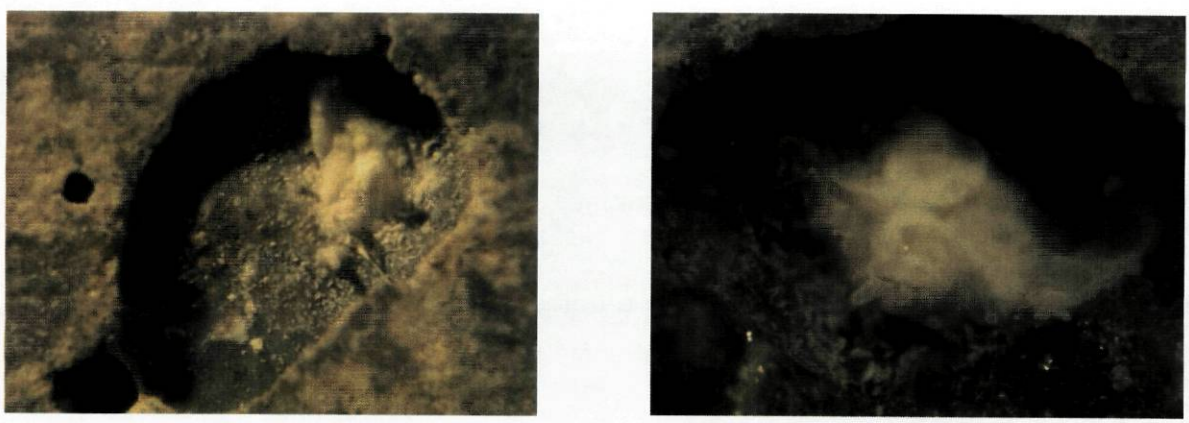


Figura III.2.4 – Resultado do ensaio ASTM C 1260-94, 2002, para o granito da pedreira de Pisões.

Os provetes de argamassa utilizados nestes ensaios foram examinados petrograficamente para identificação de eventuais produtos de neoformação.

A análise à vista desarmada revelou a existência de um fino revestimento de cor branca, mais denso nas faces superiores dos provetes, por evaporação da água e deposição de álcalis, facilitada nesta face (Nixon et al., 1979; Stievenard-Gireaud, 1987). Foi possível observar pequenos poros, com um fino revestimento branco. Os poros são milimétricos (1-3 mm) e foram examinados à lupa binocular (Fotografia III.2.10). Verifica-se que existem cristais de cor branca no interior destes poros.



Fotografia III.2.10 – Aspectos do preenchimento parcial dos poros em observação à lupa binocular.

Os produtos existentes na face superior do provete foram retirados com um canivete e colados a um suporte metálico para observação ao MEV/EDS.

As imagens realizadas sobre estes materiais mostram uma estrutura formada por rosetas de cristais lamelares (Figura III.2.5) (Fotografia III.2.11) e uma superfície semicristalina de formas pouco definidas. A composição semiquantitativa obtida por EDS

mostra que este produto cristalino contém essencialmente silício, cálcio, sódio e uma pequena quantidade de alumínio, aproximando-se do gel referido na literatura.

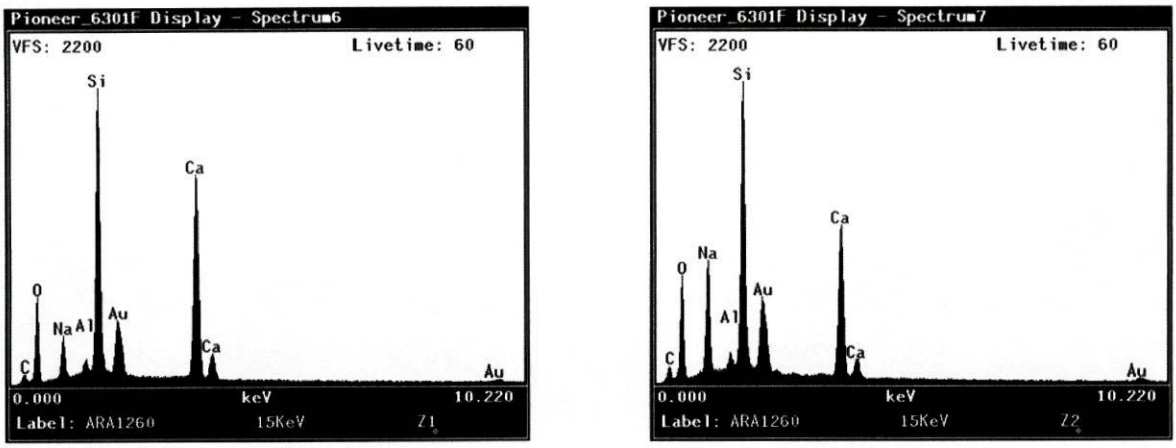
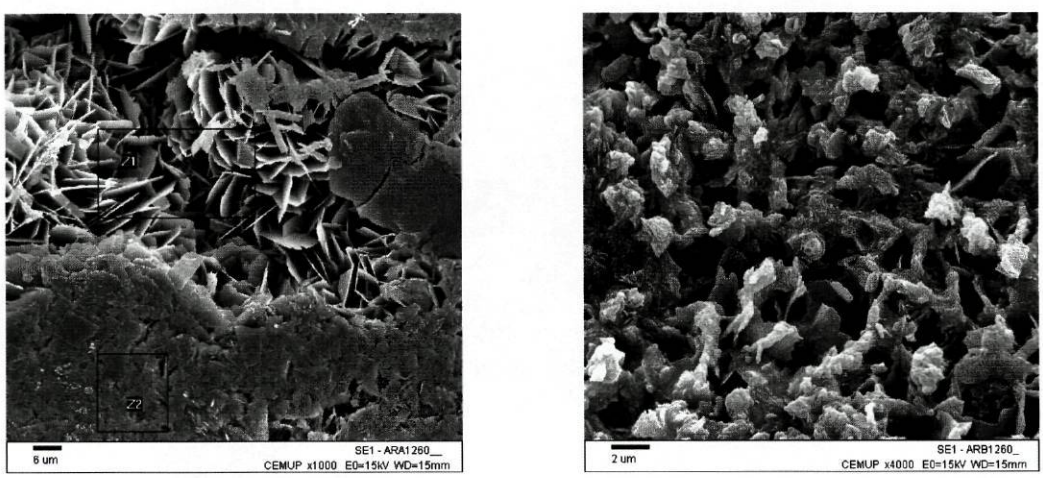
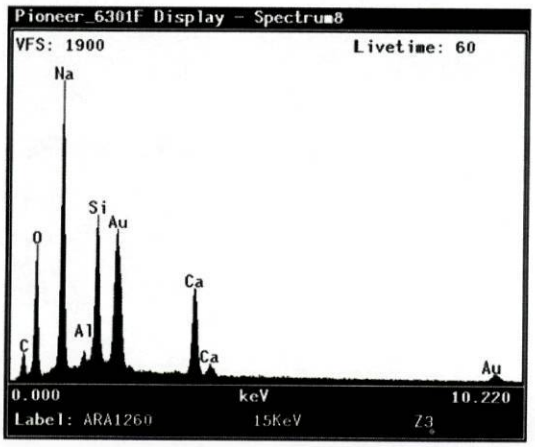


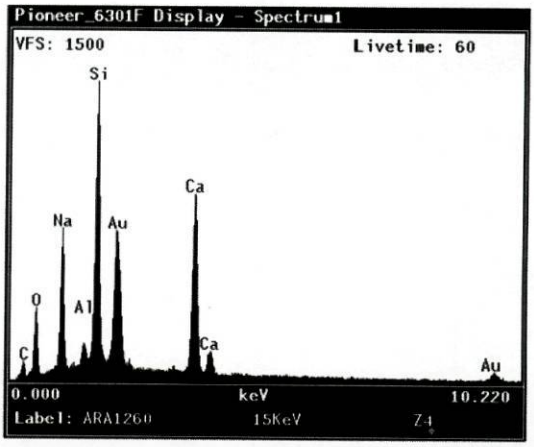
Figura III.2.5 – Espectros EDS dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002.



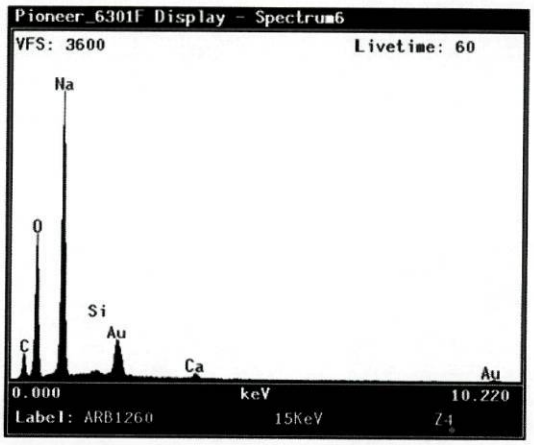
Fotografia III.2.11 – Imagens dos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C 1260-94, 2002. As zonas assinaladas com Z1 e Z2 correspondem aos espectros da Figura III.2.5.

Para além deste gel, existem cristais prismáticos de um composto em que predomina o sódio (Figura III.2.6 e Fotografia III.2.12). Estes cristais apresentam hábito semelhante ao encontrado em exsudações da Barragem do Cabril, pelo que se admite que corresponda a trona. Esta evolução pode ser distinguida nos dois espectros apresentados e nas zonas designadas por Z3 e Z4 na Fotografia III.2.12 (a). Em Z3, os cristais estão já individualizados da superfície amorfa subjacente, o sódio é o principal elemento, enquanto que em Z4 predomina o silício.



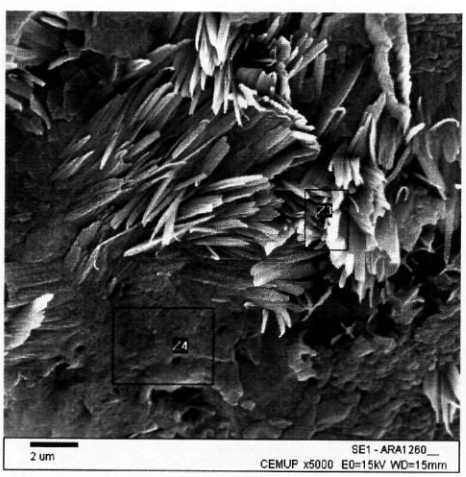


(a)

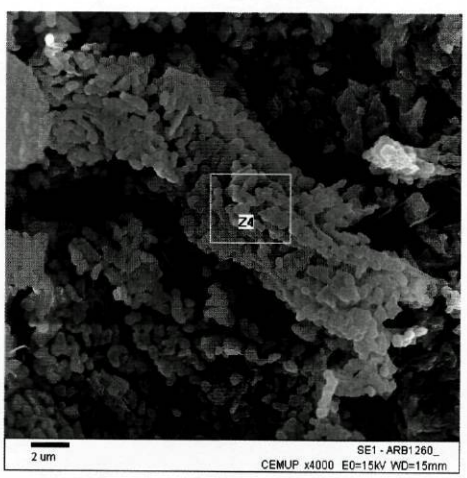


(b)

Figura III.2.6 – Espectros EDS dos cristais ricos em sódio presentes nos produtos exsudados dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C1260-94, 2002.



(a)



(b)

Fotografia III.2.12 – Aspecto dos cristais ricos em sódio existentes na superfície dos provetes de argamassa do ensaio ASTM C1260-94, 2002. Os espectros correspondentes às zonas assinaladas encontram-se na Figura III.2.6 (a) e (b).

Os provetes foram depois serrados transversalmente para produção de lâminas delgadas polidas.

O exame petrográfico permitiu observar, nas lâminas delgadas, partículas angulosas e irregulares, por vezes alongadas, de dimensão areia. A pasta é castanha e homogénea.

Não são visíveis fissuras microscópicas na pasta de cimento ou nas partículas de agregado. As interfaces pasta de cimento-agregado estão fechadas e não foram detectadas orlas de reacção.

Os poros são circulares, de pequena dimensão, e foi observado preenchimento apenas em dois poros de uma das três lâminas (Figura III.2.7) (Fotografia III.2.13).

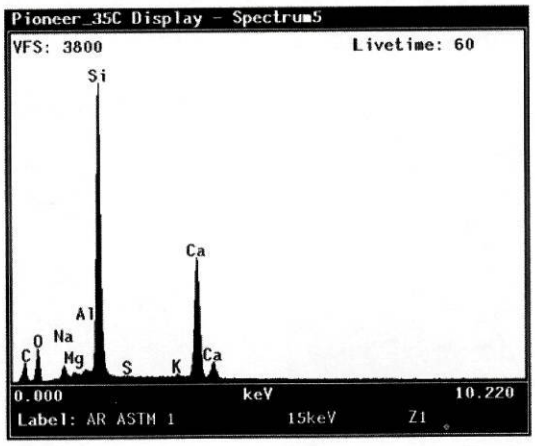


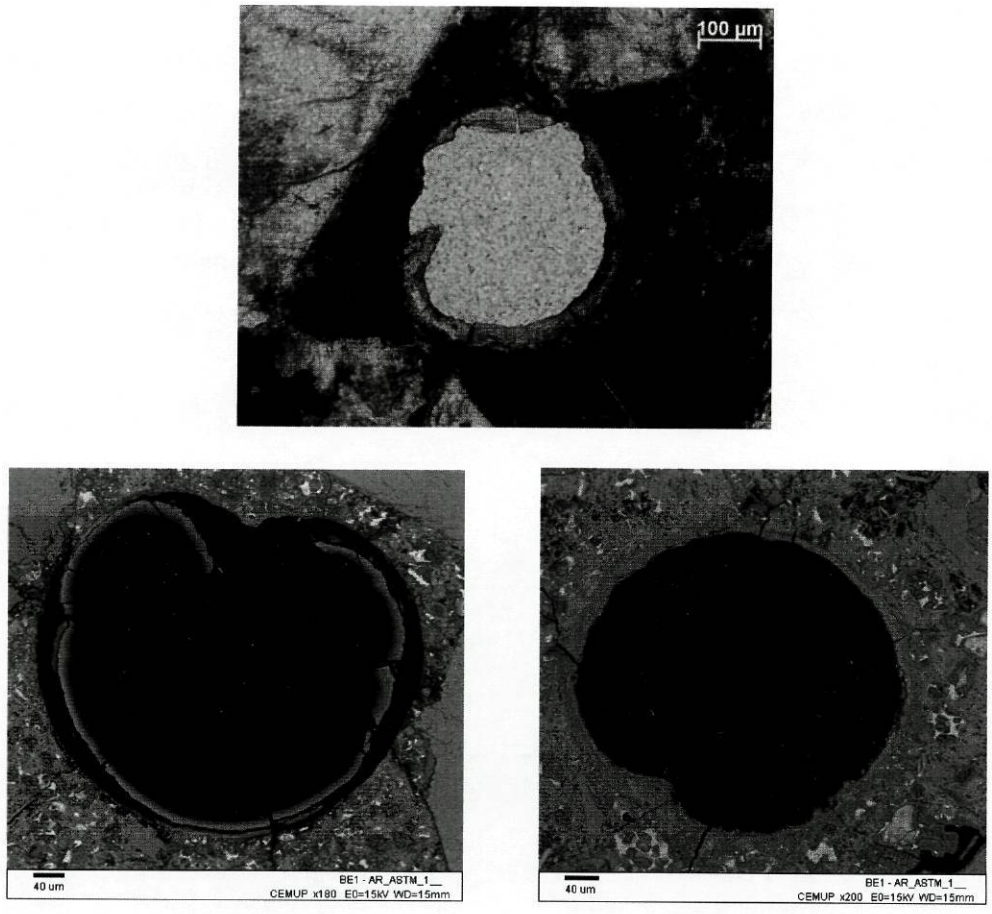
Figura III.2.7 – Espectro EDS do material que preenche parcialmente dois dos poros dos provetes de argamassa utilizados no ensaio ASTM C1260-94, 2002.

Estes poros mostram ao microscópio óptico um produto que reveste as paredes do poro, numa orla delgada. Ao MEV, verifica-se que este material se encontra destacado da parede num dos casos e aderente no outro poro.

A análise semiquantitativa em EDS mostra a existência de gel constituído por silício, cálcio e uma pequena percentagem de álcalis. Foi possível observar finas fissuras que atravessam este gel e se propagam para a pasta adjacente, provavelmente em resultado de dessecação, uma vez que o preenchimento dos poros por gel é parcial. A retracção deverá estar também na origem do descolamento do gel relativamente às paredes do poro, verificado num dos casos.

O preenchimento dos poros e os produtos de exsudação encontrados no exterior dos provetes constituem indícios de existência de gel sílico-alcalino em resultado da exposição do agregado às condições adversas extremas, existentes no ensaio ASTM C 1260-94, 2002, ou seja, em que o agregado é inserido numa pasta de cimento rica em álcalis e a mistura submetida a elevada temperatura. No entanto, se forem considerados

os resultados do ensaio quanto à expansibilidade, não poderá considerar-se o agregado reactivo.



Fotografia III.2.13 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV das lâminas produzidas a partir dos provetes de argamassa submetidos ao ensaio ASTM C1260-94, 2002. Foi detectado preenchimento parcial em dois poros. A composição deste produto encontra-se no espectro da Figura III.2.7.

2.5.2. Ensaio químico

As amostras foram preparadas no laboratório do DG-FCUP e os ensaios realizados segundo a norma ASTM C 289-94, 2002, no Laboratório de Química do mesmo Departamento, em simultâneo com os ensaios realizados para o caso da barragem do Cabril.

O resultado obtido encontra-se na Figura III.2.8. Neste ensaio o granito é considerado inócuo, dado que o resultado se situa à esquerda da linha de fronteira que separa os agregados inócuos dos prejudiciais. Tal como referido anteriormente, os resultados deste ensaio devem ser tomados com alguma precaução e devem ser confirmados com outros métodos de avaliação da reactividade potencial.

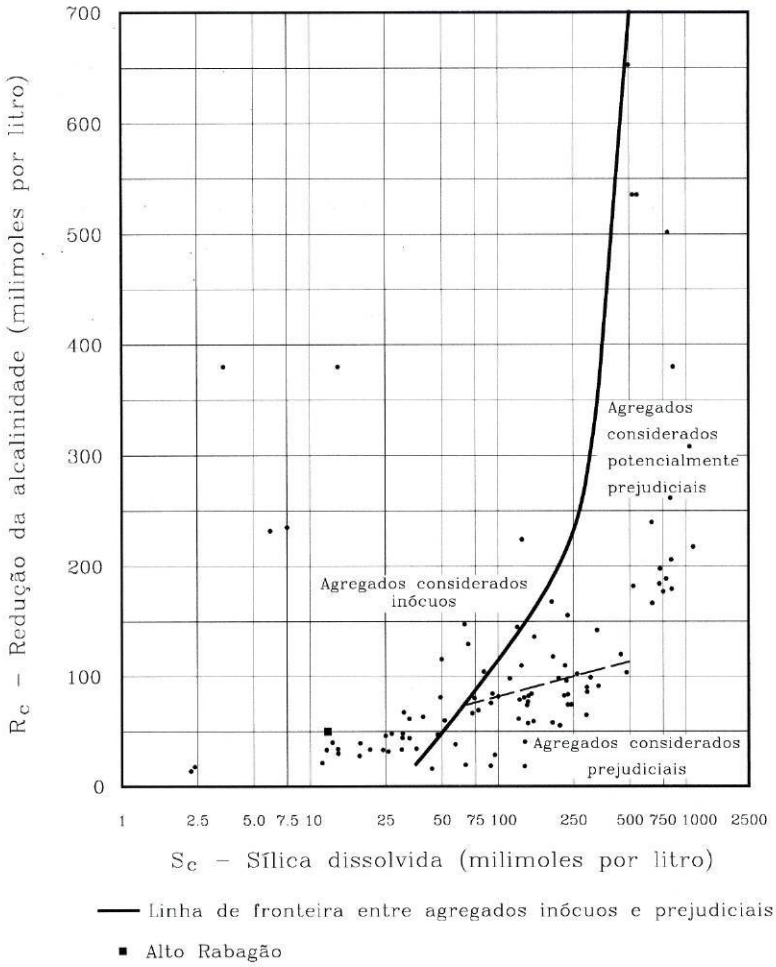


Figura III.2.8 – Resultado do ensaio ASTM C 289-94, 2002, executado sobre o granito da pedreira de Pisões.

2.5.3. Ensaio da barra de argamassa em autoclave

As amostras para execução deste ensaio foram preparadas no laboratório do Departamento de Engenharia de Minas da FEUP e o ensaio realizado no LCPC, em Paris, segundo a norma NF P 18-590, 1993.

Obteve-se para o granito da pedreira de Pisões o valor de 0,067% de expansão o que, de acordo com o estipulado pela norma, significa que o granito é classificado como Não Reactivo por apresentar uma deformação média relativa inferior a ± 15% da dimensão inicial.

2.6. Conclusões

O exame petrográfico do granito da pedreira de Pisões, realizado sobre amostras retiradas da pedreira, ainda em exploração, teve por objectivo a caracterização da rocha

como agregado, com destaque para a detecção de espécies potencialmente reactivas aos álcalis.

Na pedreira é possível observar, na zona mais baixa da frente de escavação, granito são, passando a ligeiramente alterado a alterado mais próximo da superfície do terreno.

Os agregados foram obtidos por britagem do granito da pedreira, o que está patente na forma angulosa e na textura rugosa das partículas. Entre os agregados de dimensão areia existe mica abundante.

O granito é orientado e a orientação aparece esboçada nos provetes cortados para execução dos ensaios de compressão uniaxial.

Atendendo a que o granito é de grão médio a grosseiro, esta orientação não é tão nítida em observação microscópica das lâminas delgadas. Verifica-se, no entanto, que a rocha mostra indícios de deformação como extinção ondulante dos grãos de quartzo e existência de quartzo microcristalino. Existe também uma ligeira deformação com encurvamento dos cristais de moscovite e orientação dos cristais de fibrolite presentes em inclusões na moscovite. É possível observar, por vezes, em zonas limitadas, uma textura cataclástica.

A presença de clorite a substituir as micas e a albitização e sericitização dos feldspatos mostram a existência de alteração hidrotermal. A alteração é visível nas orlas e clivagens destes cristais, que são marcados por moscovite microcristalina e, por vezes, por depósitos de óxidos e hidróxidos de ferro.

De acordo com Mullick, 1987, (Figura I.4), um granito com deformação moderada pode induzir expansão de cerca de 10% ao fim de seis meses, ou seja, mostra reactividade potencial. Quanto à cristalinidade do quartzo, deverá corresponder a uma baixa solubilidade (Mielenz et al., 1947, Figura I.10).

Segundo Wigum et al., 2000, e RILEM AAR-1, 2003, a existência de quartzo microcristalino poderá contribuir para a reactividade do agregado, dado que aumenta a área superficial dos grãos disponível para a reacção. Também os bordos suturados, encontrados nos cristais do granito da pedreira, podem, pela mesma razão, aumentar a reactividade potencial.

Considerando a Especificação LNEC E 415, 1993, estão presentes no granito minerais potencialmente reactivos aos álcalis:

- O quartzo tectonizado, com bordos suturados e extinção ondulante;
- O feldspato e as micas, como possíveis fornecedores de álcalis.

O ângulo de extinção ondulante dos cristais de quartzo é fraco (inferior a 25º). É, no entanto, mais importante a textura microcristalina visível em algumas porções das

lâminas delgadas observadas. Há ainda a considerar os silicatos com indícios de alteração e deformação como susceptíveis de reacção lenta/retardada.

Os ensaios de avaliação de reactividade potencial aos álcalis forneceram resultados que permitem classificar o granito como "Não Reactivo", individualmente ou inserido em argamassa enriquecida em álcalis.

Atendendo às limitações dos ensaios de reactividade, será de realçar o resultado da análise petrográfica e prever uma potencial reactividade, embora a existência de textura cataclástica seja relativamente restrita nas lâminas examinadas.

A reactividade deverá ser confirmada pela análise das características actuais do betão e pela detecção de indícios de reacção álcali-sílica, método mais correcto de avaliar o desempenho do agregado em obra.

Capítulo 3. EXPOSIÇÃO DA BARRAGEM AO AMBIENTE

O enquadramento da estrutura de acordo o relatório da BCA, 1992, permite concluir que o risco ambiental para a ocorrência de reacções álcali-sílica na barragem do Alto Rabagão é elevado, uma vez que é uma estrutura que tem por finalidade a retenção de água e que se encontra exposta às condições ambientais.

A barragem situa-se numa zona montanhosa em que não é conhecida poluição em resultado de indústria no local. A temperatura média anual é relativamente baixa, bem como a amplitude térmica anual.

Segundo Silva, 1992, o índice de agressividade da água da albufeira da barragem do Alto Rabagão corresponde a "águas medianamente agressivas". O pH da água da albufeira tem valor compreendido entre 6 e 8 e corresponde ao de "águas equilibradas mas que podem ter capacidade dissolvente desde que o total de sais dissolvidos seja baixo"; o total de sais dissolvidos é igual ou inferior a 100 mg/l, correspondendo a "águas com elevado poder dissolvente e com elevado potencial agressivo". O pH da água da albufeira e da água da chuva é igual ou inferior a 6, o que significa que são "águas com elevado potencial agressivo para os materiais". A temperatura média anual é de 11,8º C e a amplitude média anual de variação da temperatura média do ar no local da obra é de 6,8º C.

Quanto à água da albufeira, Neiva, 1987, refere que é de muito baixa mineralização, própria da cabeceira do vale. Por comparação com as análises desta água, conclui que as análises da água dos drenos mostram ligeiro ataque da água infiltrada da albufeira ao cimento das injecções, às rochas de fundação e ao betão, que se acentua na água dos drenos das galerias de jusante. Na maioria dos drenos encontram-se, à saída, óxidos hidratados e hidróxido de ferro, coloidais, amorfos. A calcite é pouco frequente e ocorre em alguns drenos da barragem abóbada. Encontra-se acessoriamente hidróxido de alumínio, coloidal, amorfo.

Conclui-se que a água da albufeira e a água que circula no maciço rochoso de fundação não contêm sulfatos ou cloretos, que poderiam induzir deterioração química do betão, sendo águas que podem apresentar poder dissolvente e agressivo para o betão dada a sua baixa mineralização.

Capítulo 4. DISPONIBILIDADE DE ÁLCALIS NO BETÃO

Com o objectivo de avaliar a disponibilidade de álcalis para a eventual ocorrência de reacções álcali-sílica, e na impossibilidade de conhecer a composição original do cimento utilizado, que terá sido fornecido pela empresa SECIL, foram feitas análises da pasta de cimento que se encontra nas carotes de betão.

Esta análise foi efectuada através de:

– Microscópio electrónico de varrimento e análise em EDS (Figura III.2.9 e Fotografia III.2.14). A realização de análises semiquantitativas por EDS mostrou que a pasta é constituída essencialmente por cálcio e silício, com pequenos teores de alumínio, magnésio, sódio, potássio, enxofre e ferro.

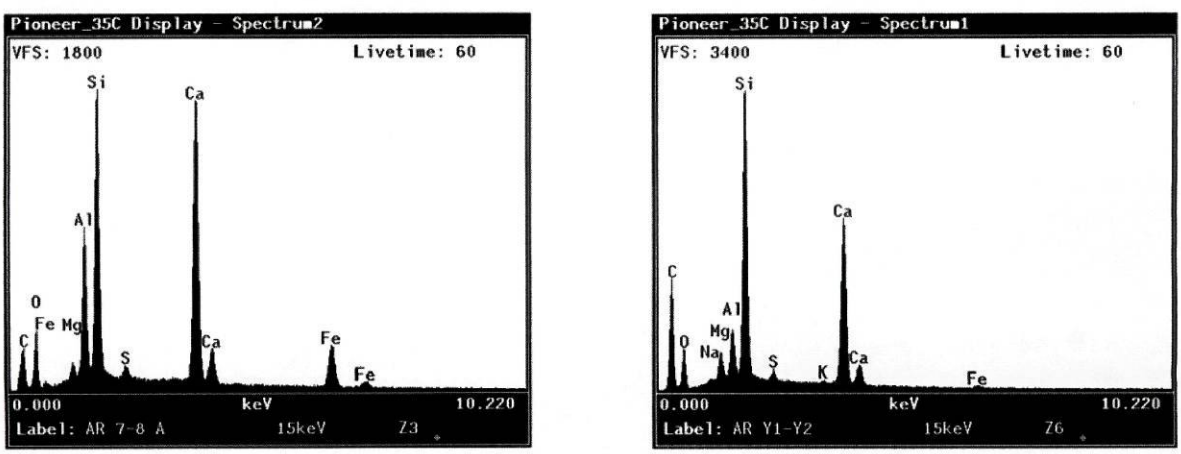
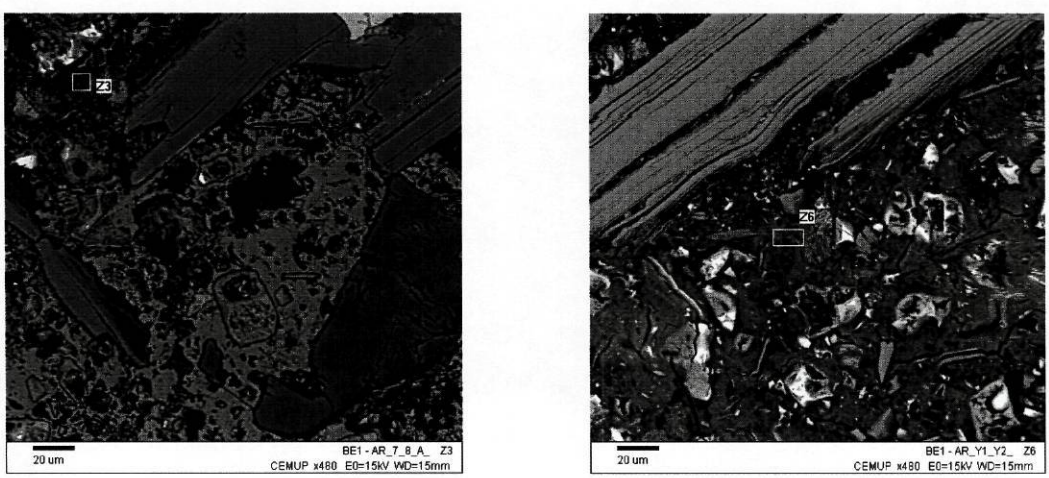


Figura III.2.9 – Espectros, EDS, da pasta de cimento. Predominam o silício e o cálcio.



Fotografia III.2.14 – Imagens, ao MEV, da pasta de cimento (análise EDS de Z3 e Z6 na Figura III.2.9).

– Microssonda RAMAN, para obtenção de espectros da pasta (Figura III.2.10). Estes espectros apresentam dois aspectos principais, sendo um mais próximo dos carbonatos, que corresponde a pasta carbonatada, e outro semelhante ao obtido para alguns feldspatos, predominantemente silicatos e aluminatos de cálcio, composição típica da pasta de cimento.

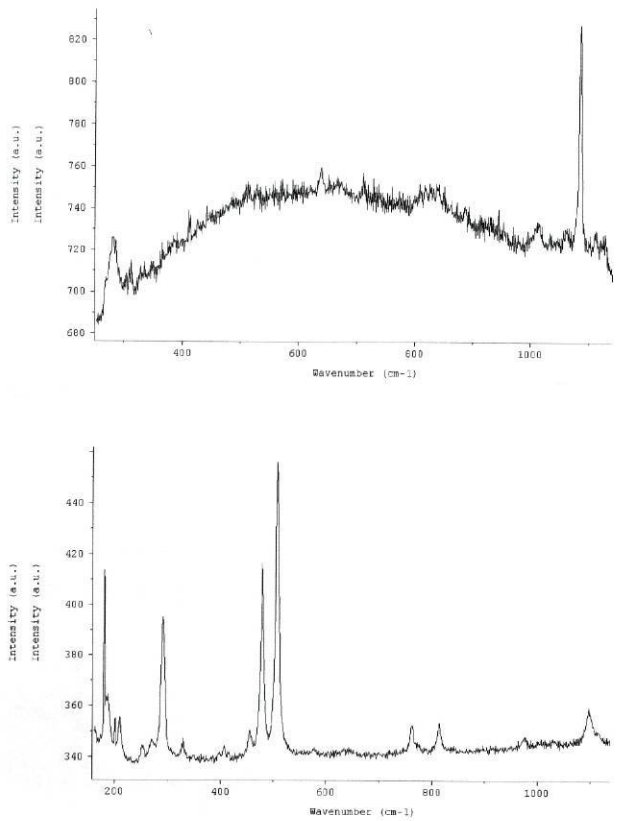


Figura III.2.10 – Espectros da pasta de cimento obtidos em microssonda RAMAN. Foram produzidos vários espectros, obtendo-se os dois tipos que se apresentam como exemplo.

– Microssonda electrónica. Os resultados das análises em diferentes lâminas e pontos de uma mesma lâmina encontram-se no Quadro III.2.6. Verifica-se que existe um número considerável de análises com um total baixo, o que se deve essencialmente à irregularidade da superfície das lâminas nos locais em que existe pasta de cimento, que apresenta um comportamento ao polimento diferente do da rocha e minerais que constituem o agregado. Os resultados das análises revelam que a pasta é rica em cálcio e tem percentagem variável de sílicio, mais baixa do que a de cálcio, conforme previsto. Em dois casos, o silício excede o cálcio, o que poderá significar que a análise foi realizada junto a partículas siliciosas de agregado, o que poderá ter afectado o resultado da análise.

Em menor percentagem estão o alumínio e os álcalis, o enxofre e o ferro. Os totais não excedem os 80%, indicando que os compostos presentes deverão possuir um teor relativamente elevado de água, para além das questões relacionadas com as dificuldades de análise por deficiente polimento das lâminas.

Quadro III.2.6 – Composição da pasta de cimento obtida em microssonda electrónica (valores em percentagem).

	AR - 6P						AR - 3P		AR - 5P					
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 4		Ponto 5		Ponto 6	
	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%
O	19,99	0	18,61	0	24,63	0	14,79	0	24,55	0	27,86	0	25,58	0
Na	0,2	0,28	0,2	0,26	0,5	0,67	0,02	0,03	0,16	0,22	2,35	3,16	0,09	0,12
Mg	0,51	0,84	0,75	1,24	0,48	0,79	1	1,66	0,27	0,45	0,06	0,1	0,37	0,61
Al	0,78	1,46	0,52	0,98	2,27	4,3	2,43	4,59	1,06	2,01	3,71	7,01	1,26	2,39
Si	3,02	6,45	2,89	6,18	10,26	21,96	6,34	13,56	10,37	22,19	16,4	35,08	11,4	24,39
P	0,05	0,11	0,06	0,13	0,01	0,02	0,02	0,04	0	0	0,03	0,07	0	0
S	0,39	0,98	0,23	0,57	0,17	0,43	0,16	0,41	0,07	0,18	0,33	0,83	0,59	1,48
K	0,69	0,83	0,34	0,4	1,64	1,98	0,03	0,03	0,34	0,4	0,08	0,09	0,13	0,16
Ca	35,67	49,91	34,25	47,92	24,02	33,6	9,69	13,56	28,4	39,74	11,08	15,5	25,21	35,27
Ti	0,06	0,09	0,03	0,06	0,06	0,11	0,13	0,22	0,07	0,12	0	0	0,05	0,08
Mn	0,07	0,09	0	0	0	0,01	0,03	0,04	0	0	0	0	0,11	0,15
Fe	1,29	1,66	0,38	0,49	0,64	0,83	1,73	2,23	0	0	0,15	0,19	0,53	0,68
Ba	0,06	0,07	0,06	0,07	0,04	0,05	0,01	0,01	0	0	0	0	0,01	0,01
Total	**62,78**	**62,77**	**58,32**	**58,3**	**64,72**	**64,75**	**36,38**	**36,38**	**65,29**	**65,31**	**62,05**	**62,03**	**65,33**	**65,34**

	AR - 7P											
	Ponto 7		Ponto 8		Ponto 9		Ponto 10		Ponto 11		Ponto 12	
	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%	W%	Ox%
O	11,5	0	17,53	0	12,15	0	29,5	0	35,09	0	30,58	0
Na	0,08	0,11	0,11	0,15	0,1	0,13	0,43	0,59	0,15	0,2	0,24	0,32
Mg	0,4	0,67	0,39	0,64	1,47	2,44	0,49	0,81	0,65	1,07	0,73	1,21
Al	1,46	2,77	3,05	5,77	2,65	5,01	1,98	3,74	1,57	2,97	2,03	3,84
Si	5,61	12	6,74	14,42	3,38	7,24	15,52	33,19	21,96	46,99	15,02	32,13
P	0	0	0,04	0,09	0,04	0,09	0,01	0,02	0,01	0,03	0,05	0,12
S	0,25	0,63	0,53	1,33	0,26	0,64	0,09	0,24	0,08	0,21	0,26	0,65
K	0,12	0,15	0,34	0,4	0,04	0,05	0,2	0,24	0,18	0,22	0,14	0,17
Ca	7,36	10,3	13,55	18,95	9,66	13,51	22,96	32,12	19,53	27,32	24,98	34,95
Ti	0,05	0,08	0,09	0,16	0,14	0,23	0,03	0,04	0,04	0,07	0,17	0,28
Mn	0,05	0,06	0	0,01	0	0,01	0,09	0,11	0	0	0,07	0,09
Fe	0,43	0,55	1,57	2,03	1,88	2,42	0,65	0,84	0,65	0,84	1,75	2,25
Ba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**27,31**	**27,32**	**43,94**	**43,95**	**31,77**	**31,77**	**71,95**	**71,94**	**79,91**	**79,92**	**76,02**	**76,01**

– Análise química total do cimento, realizada segundo a metodologia seguida para rochas. À semelhança do descrito para as carotes da barragem do Cabril, separaram-se manualmente as partículas de agregado da pasta de cimento que foi depois moída à dimensão adequada para análise. Este método tem limitações, uma vez que não é garantida a exclusão de todas as partículas de areia fina que fazem parte do betão. A análise química foi realizada nos *Activation Laboratories Ltd*, (ACTLABS), no Canadá, segundo os métodos referidos anteriormente. A composição química obtida encontra-se no Quadro III.2.7.

Verifica-se que o cimento tem uma elevada percentagem de SiO_2, que é predominante. Também os álcalis apresentam uma percentagem elevada, com

Quadro III.2.7 – Análise química em percentagem e elementos menores e terras raras em ppm da pasta de cimento do betão da barragem do Alto Rabagão.

	Cimento
SiO_2	41,37
Al_2O_3	9,27
Fe_2O_3	2,03
MnO	0,03
MgO	0,87
CaO	24,15
Na_2O	1,67
K_2O	2,43
TiO_2	0,18
P_2O_5	0,29
PF	17,02
Total	**99,31**

Ag	*
As	13,00
Ba	158,00
Bi	1,50
Ce	26,30
Co	15,00
Cr	*
Cs	9,80
Cu	62,00
Ga	14,00
Ge	13,00
Hf	2,40
In	*
Mo	*
Nb	8,00
Ni	*
Pb	15,00
Rb	142,00
Sb	*
Sn	8,00
Sr	141,00
Ta	1,10
Th	6,10
U	8,30
V	17,00
W	1,00
Y	9,00
Zn	102,00
Zr	76,00
La	12,70
Pr	3,10
Nd	11,90
Sm	2,90
Eu	0,40
Gd	2,60
Tb	0,40
Dy	2,10
Ho	0,30
Er	0,80
Tl	1,10
Tm	0,10
Yb	0,70
Lu	0,10

* Inferior ao limite de detecção.

$Na_2O_{equivalente}$ de 3,27% ($Na_2O_{eq}=Na_2O+0,658K_2O$), o que constitui um valor relativamente elevado quanto à ocorrência de reacções com os agregados. Este facto poderia ser interessante caso fosse conhecida a composição inicial do cimento, revelando assim a possível contribuição dos agregados para os álcalis.

A comparação dos resultados da análise química com os da obtida por microssonda, permite concluir que existem diferenças substanciais nas proporções dos óxidos determinados. O silício, o alumínio e os álcalis apresentam percentagens superiores às obtidas por microssonda e às previstas para o cimento. O cálcio é, em consequência, substancialmente inferior aos valores médios admitidos na bibliografia. Esta diferença, quanto à percentagem dos principais óxidos que constituem o cimento, não deverá ser alheia à possível existência de pequenas partículas de agregado, essencialmente quartzo, feldspato e micas no cimento que foi moído para análise. Este processo é mais simples do que o utilizado por alguns autores para individualizar as partículas de agregado (Haugen et. al, 2003), que se baseia no aquecimento e arrefecimento bruscos e sucessivos das amostras, de forma a desintegrar o betão por variação de temperatura, antes da utilização do martelo para libertar as partículas de rocha. A eliminação do cimento é, neste caso, produzida por lavagem do material numa solução ácida. Este método, que apresenta bons resultados na individualização das partículas de agregado, não parece o mais indicado para proceder à análise do cimento.

Por esta razão, e apesar das limitações indicadas, será mais adequado o valor obtido na microssonda electrónica. Consideraram-se os valores médios de Na_2O e K_2O, excluindo as análises dos pontos 3 e 5, que apresentam valores anormalmente elevados e que deverão coincidir com partículas de clínquer. O valor obtido para $Na_2O_{equivalente}$ é de 0,44%, inferior ao 0,60%, limite máximo de álcalis a considerar para evitar a ocorrência de reacções álcali-sílica.

Capítulo 5. AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO BETÃO

5.1. Objectivos

Com base nos procedimentos indicados no documento da BCA, 1992, acerca do diagnóstico da ocorrência de reacções álcali-sílica, foram aplicadas as técnicas disponíveis, necessárias à avaliação das características do betão. Utilizou-se essencialmente a inspecção *in situ*, para identificação macroscópica dos indícios de deterioração, e os métodos de petrografia para o estudo microscópico dos materiais presentes.

Atendendo aos factores que condicionam a ocorrência de reacções álcali-sílica, ou seja, as características do agregado, a composição do betão e as condições de exposição ambiental, pretende-se, neste capítulo, confrontar as previsões com base nestes factores com os eventuais indícios de reacção detectados na obra.

5.2. Estudo do betão. Inspecção *in situ* e amostragem

Foi feita a inspecção das galerias para levantamento das características do betão e reconhecimento de eventuais manifestações de deterioração. As galerias são locais preferenciais para inspecção do betão, uma vez que permitem o acesso directo ao interior da estrutura.

O exame das paredes das galerias ocorreu em Março de 2002, Novembro de 2003 e Dezembro de 2004. Nestas deslocações foram inspeccionadas as galerias de visita horizontais existentes na abóbada, às cotas 865,15, 829,76 e 809,15, e a galeria de drenagem na abóbada e nas duas estruturas em gravidade, direita e esquerda, tendo sido vistos os ramais de montante e jusante. Foram também inspeccionadas as galerias dos encontros direito e esquerdo da abóbada e o exterior do encontro esquerdo.

A inspecção das superfícies de betão conduziu a:

- Registo da ocorrência de manchas de humidade nas paredes das galerias;
- Visualização de pequenas cavidades no betão e recolha de amostras de material de revestimento;
- Colheita de amostras de eflorescências e exsudações nos tectos e/ou paredes das galerias;

- Selecção de locais para colheita de amostras de betão para estudo em laboratório.

O betão no interior das galerias apresenta-se são e compacto. Foram observadas algumas zonas com manchas de humidade, em especial nas galerias de montante. Estas manchas traduzem-se, por vezes, em numerosas gotículas de água no tecto e na parte superior das paredes, como foi possível observar durante a inspecção realizada em Novembro de 2003.

Foi observada também humidade, que se manifesta pelo aparecimento de uma tonalidade mais escura das paredes, nos locais em que as juntas Y1 e Y2 intersectam as galerias de fundo do encontro esquerdo da abóbada.

As galerias às cotas 829,76 e 809,15 encontram-se secas e sem manifestações de deterioração do betão.

No encontro direito, no acesso à galeria de coroamento da abóbada, foram detectadas fissuras finas, essencialmente horizontais, entre as juntas X3 e X4.

Foram detectadas, em vários locais das galerias e em especial nos tectos, pequenas cavidades de superfície cónica, que podem corresponder a *pop-outs*.

Na galeria de drenagem da abóbada foram observadas algumas escorrências e estalactites de carbonato de cálcio, coincidindo com juntas de betonagem horizontais e verticais. Encontram-se, esporadicamente, escorrências de carbonato de cálcio por vezes nas paredes das galerias e, principalmente, junto aos drenos.

Na gravidade direita foram registadas e colhidas amostras de algumas, raras, exsudações observadas no tecto e paredes.

Os furos para colheita de amostras de betão localizaram-se essencialmente nos locais em que existiam exsudações e cavidades. Foram, ainda, retiradas amostras em zonas sãs para comparação das características do betão.

No Quadro III.2.8 encontra-se uma síntese dos aspectos referentes à localização, comprimento de furação e ângulo de inclinação dos furos com o plano vertical. Na Figura III.2.11 apresentam-se os alçados da abóbada e da gravidade direita, com a localização dos furos realizados nas galerias. Em planta, apresentam-se as galerias da abóbada, à cota 865,15, incluindo os encontros (Figura III.2.12), com indicação dos locais amostrados.

5.2.1. Fissuração

Apesar de a fissuração não ser um indício exclusivo da ocorrência de reacções álcali-agregado, normalmente ocorre também associada a estas reacções, pelo que a sua detecção e caracterização foram consideradas durante as visitas de inspecção.

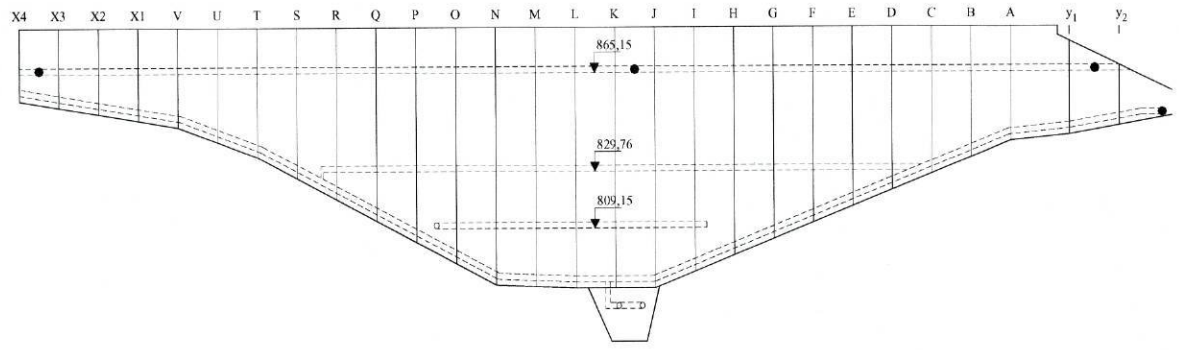
Não foram detectadas fissuras nas paredes das galerias de drenagem das estruturas em gravidade, direita e esquerda, que apresentem padrão em *map cracking*. Nestas galerias foram examinados os ramais de montante e de jusante.

Quadro III.2.8 – Designação, localização, comprimento de furação e ângulo de inclinação, medido relativamente ao plano vertical, dos furos para amostragem do betão da barragem do Alto Rabagão.

Furo	Local	Comprimento (mm)	Inclinação (º)
Furo 1 Bloco 15-16	Gravidade, MD, galeria de fundação, ramal de montante; furo para montante.	900	90
Furo 2 Bloco 6-7	Gravidade, MD, galeria de fundação, ramal de montante; furo para montante.	720	90
Furo 3 Bloco 7-8	Gravidade, MD, galeria de fundação, ramal de montante; furo para montante.	750	90
Furo 4 Bloco 10-11	Gravidade, MD, galeria de fundação, ramal de montante; furo para montante.	600	90
Furo 5 Bloco J-K	Abóbada, galeria de coroamento; furo para jusante.	720	90
Furo 6 Bloco Y1-Y2	Abóbada, galeria de coroamento; furo para jusante.	730	90
Furo 7 Bloco X3-X4	Abóbada, acesso à galeria de coroamento, junto a fissuração; furo para montante.	490	90
Furo 8 GFE 2	Abóbada, encontro esquerdo GFE 2; furo para jusante.	250	90
Furo 9 Exterior bloco Y1-Y2	Abóbada, encontro esquerdo, parede exterior do paramento de jusante.	250	90

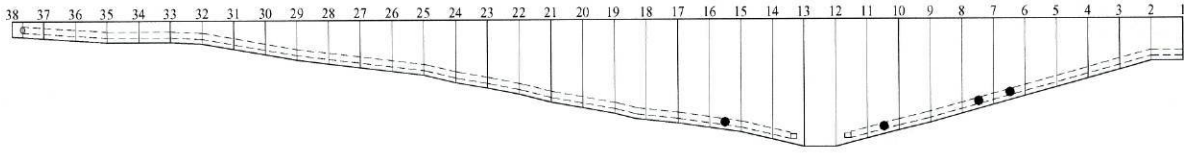
No acesso às galerias da abóbada por jusante, existem fissuras finas, irregulares, assinaladas a giz pelas entidades que acompanham a observação da estrutura, na galeria do encontro direito, no bloco X3-X4. São essencialmente fissuras horizontais, na superfície da parede de montante da galeria, com ramificações curtas. Não existe, no entanto, variação de coloração do betão relacionada com estas fissuras nem qualquer outra manifestação de deterioração no local. O mesmo tipo de fissuração foi observado no bloco 10-11 da gravidade direita. Não se considerou que esta fissuração correspondesse a *map cracking*.

Na metade superior da parede da galeria do encontro esquerdo (GFE2) existem finas fissuras, fechadas, com padrão em *map cracking*, assinaladas por uma descoloração (Fotografia III.2.15). Neste local foi feita carotagem para estudo do betão, que permitiu verificar que a fissuração é um fenómeno superficial, não ultrapassando o milímetro de profundidade.



(a)

ALÇADO JUSANTE



(b)

Figura III.2.11 – Alçados da barragem do Alto Rabagão com indicação da localização dos furos para colheita de amostras de betão: (a) na abóbada; (b) na gravidade direita.

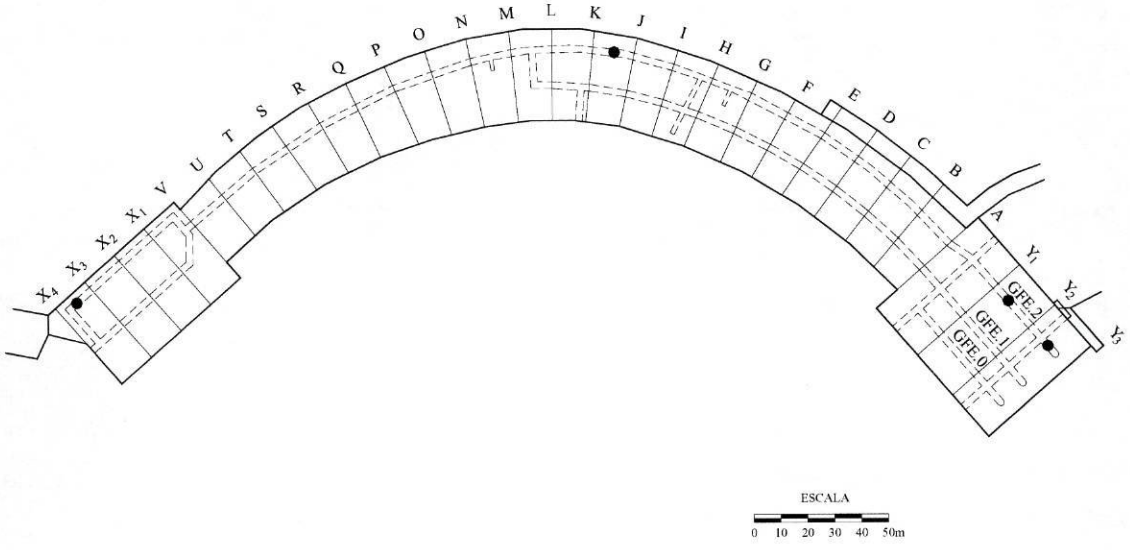
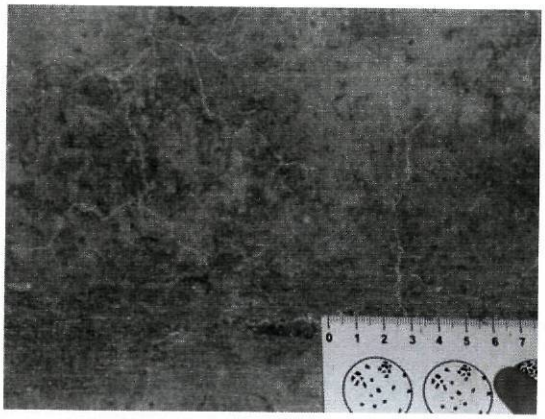
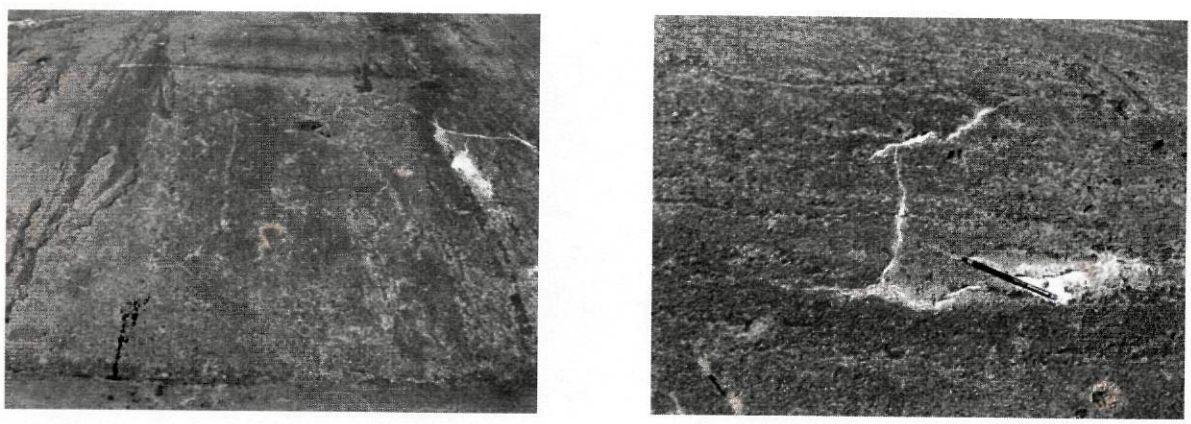


Figura III.2.12 – Planta da abóbada do Alto Rabagão à cota 865,15 com indicação das galerias e localização dos furos para colheita de amostras de betão.



Fotografia III.2.15 – Fissuras, com padrão em *map cracking*, existentes na GFE2 (encontro esquerdo da abóbada). As fissuras, que estão fechadas, são assinaladas por uma descoloração do betão.

Foram também observadas fissuras com distribuição poligonal na rampa exterior do encontro esquerdo, a jusante. Estas fissuras têm uma abertura por vezes milimétrica (1-2 mm). São assinaladas por existência de humidade, ligeira descoloração do betão, que mostra um tom amarelado, e ocorrência de exsudações esbranquiçadas que correspondem a carbonato de cálcio (Fotografia III.2.16).



Fotografia III.2.16 – Fissuras com padrão em *map-cracking* existentes na parede exterior do encontro esquerdo da abóbada. As fissuras têm, por vezes, exsudações de carbonato de cálcio.

Com o objectivo de examinar o comportamento destas fissuras em profundidade, foi realizada furação por carotagem nesta parede, entre as juntas Y1 e Y2. Verifica-se, na carote, que as fissuras são normais à superfície exposta e atingem 5 milímetros de profundidade. Foi possível também observar uma cavidade irregular, alongada, com cerca de 10x40 mm^2, situada na pasta de cimento, a cerca de 10 milímetros de profundidade (Fotografia III.2.17). Esta cavidade prolonga-se, depois, segundo uma fissura fina e irregular, provavelmente resultante de defeitos de betonagem.

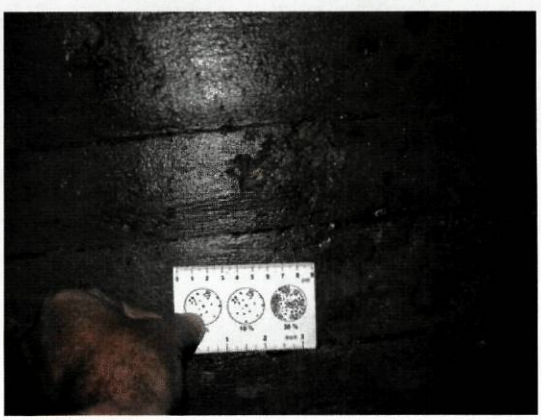




Fotografia III.2.17 – Imagens da carote retirada da parede exterior do encontro esquerdo da abóbada. A carote tem 94 milímetros de diâmetro. É possível observar as fissuras superficiais, com exsudação, e a cavidade interior.

5.2.2. *Pop-outs*

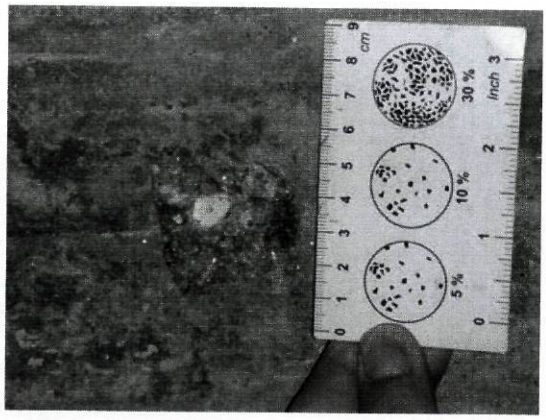
Foram observadas em vários locais da barragem pequenas cavidades que podem corresponder a *pop-outs*. A maior parte destas cavidades é superficial, com cerca de 5 milímetros de profundidade (Fotografia III.2.18).



Fotografia III.2.18 – Imagem de três pequenas cavidades no betão da gravidade direita.

Destacam-se, na abóbada, locais em que existem cavidades de maior dimensão:

- A galeria GFE1. Foi colhido o cone em betão, com cerca de 60 milímetros de diâmetro na base, que preenchia uma cavidade e que estava prestes a destacar-se do tecto. Existe uma outra cavidade, de 40 milímetros, no fundo desta galeria (Fotografia III.2.19).



Fotografia III.2.19 – *Pop-out* existente na galeria GFE1 da abóbada.

- No bloco P-Q, na galeria de cota 865,15, com cerca de 150 milímetros de diâmetro, do qual se colheu material de revestimento para análise;

- No bloco J-K, cavidade com cerca de 50 milímetros de diâmetro, na galeria à cota 865,15. Neste local foi executada furação para colheita de amostra de betão.

Observaram-se também cavidades nas paredes da galeria de drenagem na gravidade direita:

- No bloco 5-6, de pequeno diâmetro (20 milímetros);

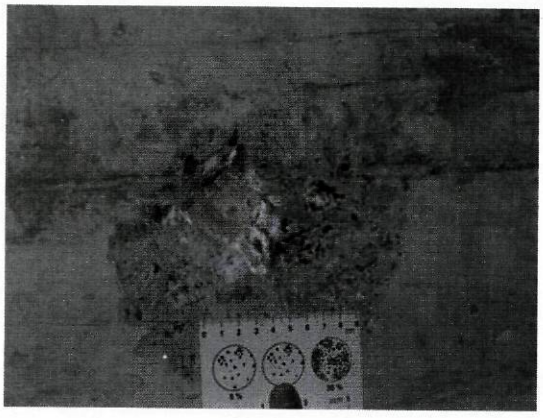
- No bloco 13-14, mostrando revestimento por material em desintegração;

- No bloco 20-21, duas cavidades com 20 milímetros e 25 milímetros de diâmetro na base. Foram colhidas amostras do material de revestimento para exame em laboratório.

As cavidades são raras na gravidade esquerda:

- Foi colhida amostra de material pulverulento existente em cavidade com cerca de 180 milímetros de diâmetro, no bloco 68-69 (Fotografia III.2.20), que mostrava também um produto branco com fendas de retracção;

- Existe uma outra cavidade com cerca de 60 milímetros de diâmetro no bloco 69-70.



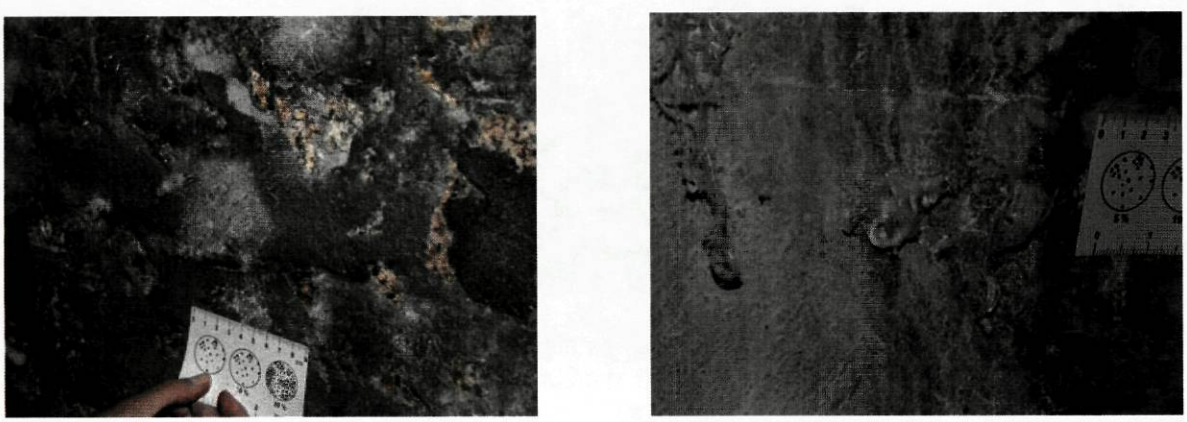
Fotografia III.2.20 – Cavidade de grande diâmetro no bloco 68-69 da gravidade esquerda, que deverá corresponder a um *pop-out*.

De modo geral estas cavidades mostram um produto de revestimento de cor branca, leitosa, que se concentra essencialmente junto do vértice. Foram colhidas amostras deste produto em vários *pop-outs*, para exame em laboratório. Apenas num dos casos foi possível colher o cone em destaque na cavidade respectiva, conforme referido, que foi também analisado.

5.2.3. Eflorescências e exsudações

De um modo geral o betão encontra-se são e existem raras eflorescências e exsudações. No encontro esquerdo da abóbada, ocorre uma maior concentração de eflorescências em áreas limitadas. Estas áreas coincidem com os locais em que as juntas Y1 e Y2 intersectam as galerias. Estas juntas são alargadas, com geometria irregular e largura de cerca de um metro. O betão que as constitui é composto por partículas de agregado, frequentemente alterado, com pequena percentagem de argamassa, o que lhe confere um aspecto que recorda a alvenaria. A parede apresenta-se humedecida nestes locais, provavelmente em resultado das características do betão.

Foram colhidas amostras destas eflorescências, que apresentam finos filamentos, alongados, por vezes translúcidos, de cor branca (Fotografia III.2.21). As eflorescências são constituídas essencialmente por sódio, tal como sucedia na barragem do Cabril, e têm morfologia que permite concluir tratar-se de trona.

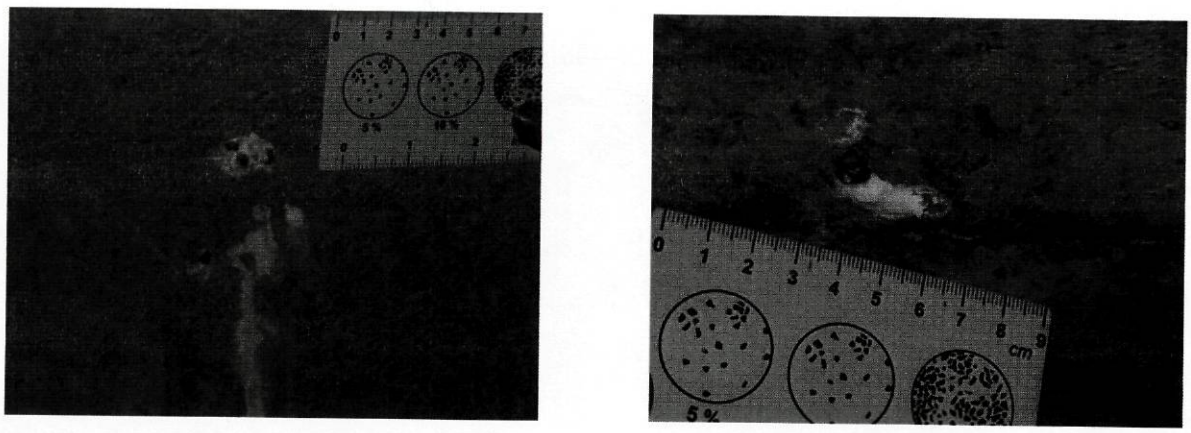


Fotografia III.2.21 – Imagens das eflorescências em filamentos translúcidos e longos que existem nas juntas Y1 e Y2 do encontro esquerdo da abóbada. Escala em centímetros.

Existem ainda eflorescências brancas, com aspecto aveludado a pulverulento, localizadas nos blocos 25-26, 32-33 e 35-36 da gravidade direita.

As exsudações ocorrem isoladas, dispersas no tecto da galeria de montante da gravidade direita. Trata-se de pequenas saliências, em geral globulares ou formando escorrências, de cor branca ou acinzentada (Fotografia III.1.22). Estão enrijecidas e têm forte aderência à parede de betão. São mais frequentes entre as juntas 14 a 16 e 27 a

32. No bloco 27-28, a exsudação mostra uma zona translúcida semelhante a gel sílico-alcalino. Foram colhidas amostras para exame em laboratório.



Fotografia III.2.22 – Aspectos das exsudações existentes nas galerias da gravidade direita. Escala em centímetros.

Em algumas das juntas de betonagem verticais e horizontais existem escorrências de cor branca, por vezes com tom azulado, e aspecto sacaróide, em forma de estalactites, de dimensões centimétricas (Fotografia III.2.23). Foram colhidas amostras para análise.



Fotografia III.2.23 – Aspecto da humidade e das estalactites existentes nas juntas de betonagem na galeria de montante da gravidade direita.

As amostras do material de revestimento das cavidades, eflorescências, exsudações e estalactites foram guardadas em frascos de material plástico, fechados e rotulados e posteriormente preparadas em laboratório para observação ao MEV/EDS.

5.3. Caracterização e composição de *pop-outs*, eflorescências e exsudações

A inspecção *in situ* permitiu detectar manifestações de deterioração do betão que podem corresponder a indícios de ocorrência de reacções álcali-sílica. Para averiguar a

existência destas reacções, foi necessário determinar em laboratório a composição dos produtos amostrados.

As amostras colhidas durante as visitas de inspecção foram preparadas para observação ao MEV, de modo semelhante ao descrito para as amostras da barragem do Cabril.

Em função do aspecto macroscópico apresentado, da morfologia observada ao MEV e dos resultados das análises químicas semiquantitativas realizadas em EDS, os produtos foram agrupados conforme apresentado no Quadro III.2.9. A letra maiúscula inicial identifica o local de colheita (A, abóbada; G, gravidade) e a numeração a ordem da colheita. Neste quadro encontra-se também informação acerca do local da colheita de cada amostra. Os produtos identificados foram classificados em:

- *Pop-outs* – cavidades existentes no betão, das quais se destacaram cones. Foram analisados os produtos que revestem as cavidades;

- Eflorescências – de cor branca, com aspecto pulverulento, aveludado ou em filamentos;

- Exsudações – são globulares ou em forma de escorrência e predominam as de cor branca a amarelada, raramente com gotículas viscosas;

- Estalactites – foram assim identificadas as escorrências alongadas, brancas ou azuladas, de aspecto sacaróide. Coincidem com zonas em que existe humidade, associadas a juntas de betonagem.

5.3.1. *Pop-outs*

Foram estudados essencialmente os produtos que revestem as cavidades resultantes de prováveis *pop-outs* e que foram retirados com uma espátula e guardados em recipientes de plástico, rotulados. Num dos casos – no bloco J-K da abóbada - foi retirado o betão adjacente a esta cavidade para exame em lâmina delgada.

Na Fotografia III.2.24 mostra-se o aspecto da cavidade do bloco J-K, que foi recuperada pela furação de uma carote de betão. Mostra revestimento por um produto branco-amarelado, compacto.

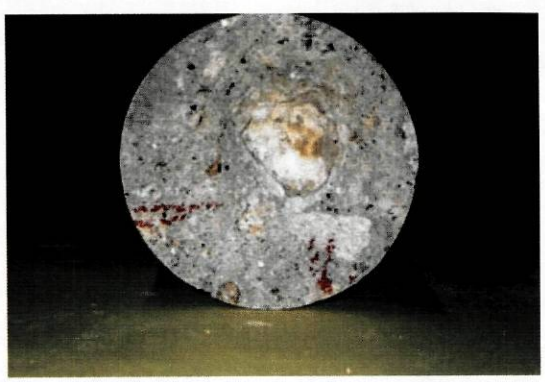
A carote de betão contendo esta cavidade (carote J-K) foi serrada longitudinalmente, de forma a produzir uma lâmina delgada que permitisse identificar a natureza do agregado relacionado com este fenómeno. A observação da lâmina delgada ao microscópio óptico permitiu visualizar um gel amorfo de cor amarelada a acastanhada, isotrópico em nicóis cruzados, semelhante ao descrito em St John et al., 1998. Este gel envolve ainda pequenas partículas de quartzo, que parece substituir. A lâmina foi

Quadro III.2.9 - Localização e características das amostras de *pop-outs*, eflorescências, exsudações e estalactites colhidas nas visitas de inspecção.

Nº da amostra	Local de colheita	Descrição	Composição
		Pop-outs	
A6	Abóbada; bloco J-K.	Cavidade de 50 mm de diâmetro; material de revestimento.	Ca (cristais), Si, Na, K (amorfo), Si, Ca, Al, Na, K (semicristalino), Si, K, Ca, Na (semicristalino).
A9	Abóbada; galeria GFE1.	Cone em betão destacado do tecto.	Si, Na, K (gel) ± Al, ± Ca.
G6	GD; bloco 5-6.	Material de revestimento de pequena cavidade.	Ca (cristais), Ca,Si, Al, K, Na, Mg (amorfo).
G9	GD; bloco 20-21.	Material desagregado em cavidade.	Ca (cristais), Ca, Si, K, Mg, Al, Na (rosetas), Si, Al, K (semicristalino).
G19	GE; bloco 68-69.	Produto branco com fissuras de retracção e material desagregado em cavidade.	Si, K, Na (gel com fissuras).
		Eflorescências	
A2	Abóbada; galeria de coroamento; junta Y1.	Filamentos de cor branca, translúcidos.	Na (cristais), Ca (cristais), Na, Ca (cristais), K (semicristalino).
A3	Abóbada; galeria de coroamento; junta Y1.	Filamentos de cor branca, translúcidos.	Na (globular).
A8	Abóbada; galeria de coroamento; junta Y1.	Filamentos de cor branca, translúcidos.	Na (globular).
G10	GD; bloco 25-26.	Eflorescência branca, aveludada.	Na (globular).
G15	GD; bloco 32-33.	Eflorescência branca, aveludada.	Na (globular).
G16	GD; bloco 35-36.	Eflorescência branca, pulverulenta.	Na, S (textura esquelética).
		Exsudações	
A1	Abóbada; junta O.	Pequena escorrência junto a fissuras finas.	Na (cristais), Ca (cristais).
A5	Abóbada; galeria de drenagem, junta F.	Escorrência de cor branca.	Ca (cristais), Na, Ca (cristais aciculares).
G1	GD; galeria de fundação; bloco 19-20.	Escorrência de tom amarelado.	Na (cristais), Si, K, Na (gel), Al, Si, K, Na (amorfo).
G2	GD; galeria de fundação; bloco 21-22.	Escorrência de tom amarelado.	Ca (cristais), Al, Si, K, Na (semicristalino).

G3	GD; galeria de fundação; bloco 15-16.	Escorrência de cor branca.	Ca, Si, Al, Mg, Na, K (cristais), Si, Ca, Al, K (amorfo).
G4	GD; galeria de fundação; bloco 15-16.	Escorrência de cor cinzenta.	Na (cristais), Ca (cristais), Si, Ca, Al, Na, K (semicristalino). Si, Ca, Al, Na, K (cristais).
G5	GD; junta 13.	Escorrência alongada, branca.	Na (cristais), Si, Al, K, Na (cristais), Si, Al, K, Na (amorfo).
G11	GD; bloco 27-28.	Gotícula branca com zona translúcida.	Si, K, Na (gel amorfo).
G14	GD; bloco 31-32.	Exsudação globular, compacta.	Ca (cristais), Ca, Si, Al, K, Na, Mg (amorfo).
G18	GD; bloco 9-10.	Exsudação acinzentada.	Ca, Si, Al, Na, K (amorfo).
Estalactites			
A4	Abóbada; galeria de drenagem.	Estalactites extensas de cor azulada.	Ca (cristais).
A11	Abóbada; bloco X1.	Estalactites extensas de cor azulada.	Ca (cristais).
G8	GD; bloco 14-15.	Escorrência branca, extensa.	Ca (cristais).
G12	GD; bloco 28-29.	Estalactite longa, branca.	Ca (semicristalino), Si, K, Ca, Na, Al (amorfo).
G13	GD; bloco 29-30.	Gotícula com 5 mm de diâmetro.	Ca (cristais).

examinada ao MEV/EDS para identificação da textura e composição do gel (Figura III.2.13) (Fotografia III.2.25). Não foi observado gel na pasta de cimento nem fissuras nesta.



Fotografia III.2.24 – Aspecto da cavidade existente no bloco J-K, contida em carote de betão (o tarolo tem 94 milímetros de diâmetro).

Foi obtida composição idêntica na análise do gel raspado da superfície do *pop-out*. Verificou-se que esse produto era constituído essencialmente por silício, sódio e potássio,

formando uma superfície lisa de material amorfo. Sobre este material estão esboçados numerosos cristais de carbonato de cálcio (Figura III.2.14) (Fotografia III.2.26). Na mesma amostra, o gel contém, em algumas zonas, cálcio, mantendo, no entanto, a aparência amorfa e lisa.

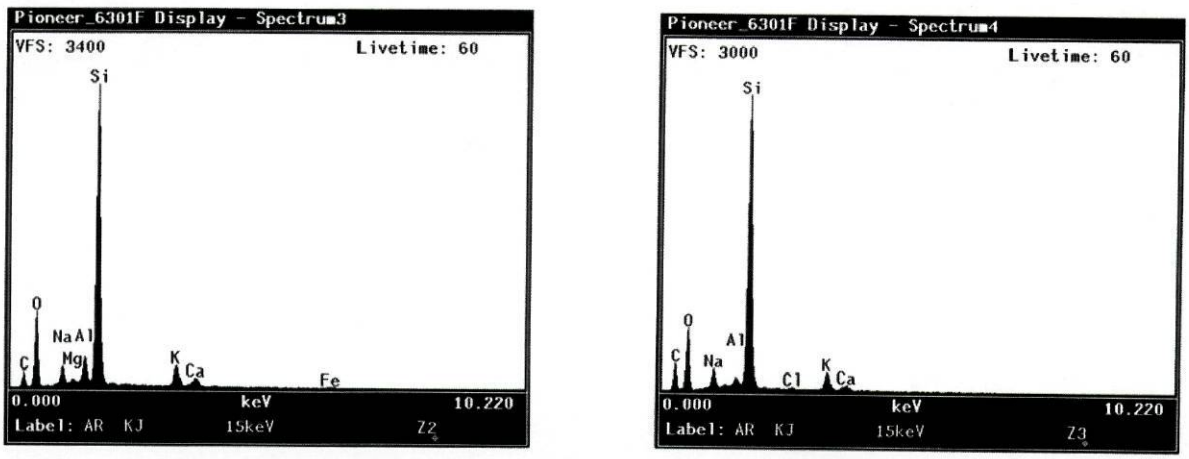
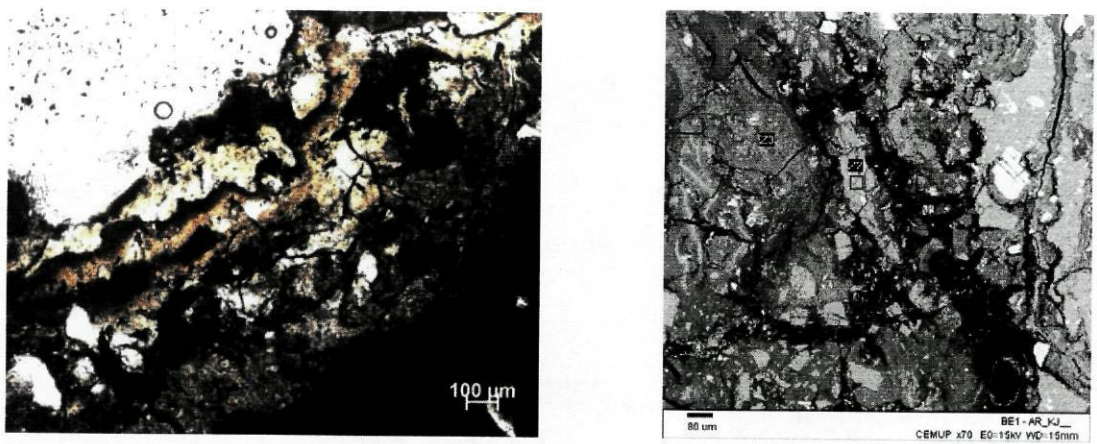


Figura III.2.13 – Espectros EDS do gel existente na cavidade do bloco J-K da abóbada, observado em lâmina delgada.



Fotografia III.2.25 – Gel existente na cavidade do bloco J-K., ao microscópio óptico (N//) e ao MEV. O gel, com fissuras de retracção características, envolve partículas de quartzo. As zonas indicadas como Z2 e Z3 correspondem aos espectros da Figura III.2.13.

A presença de cálcio, de acordo com a literatura sobre o assunto, indica o percurso do gel através da pasta de cimento. A formação de cristais de carbonato de cálcio sobre o gel poderá resultar de uma segregação deste, que mantém uma superfície totalmente amorfa. Os cristais em desenvolvimento correspondem a um estado de menor energia. Neste caso, atendendo ao maior raio iónico do ião cálcio relativamente aos álcalis, este é o primeiro a libertar-se do gel, quando em contacto com a atmosfera. O gel contém, ao

contrário do verificado para a barragem do Cabril, cálcio em quantidade suficiente para formar os cristais que se individualizam.

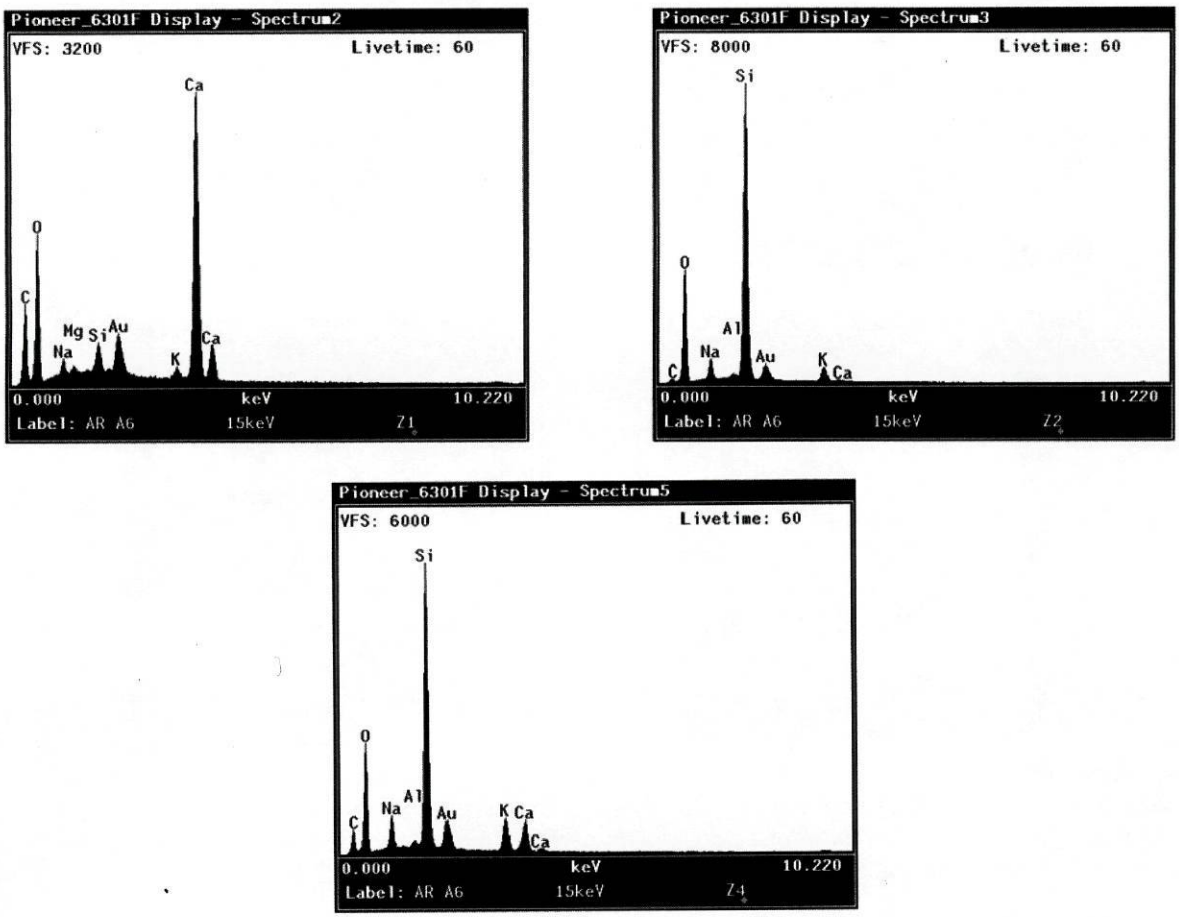
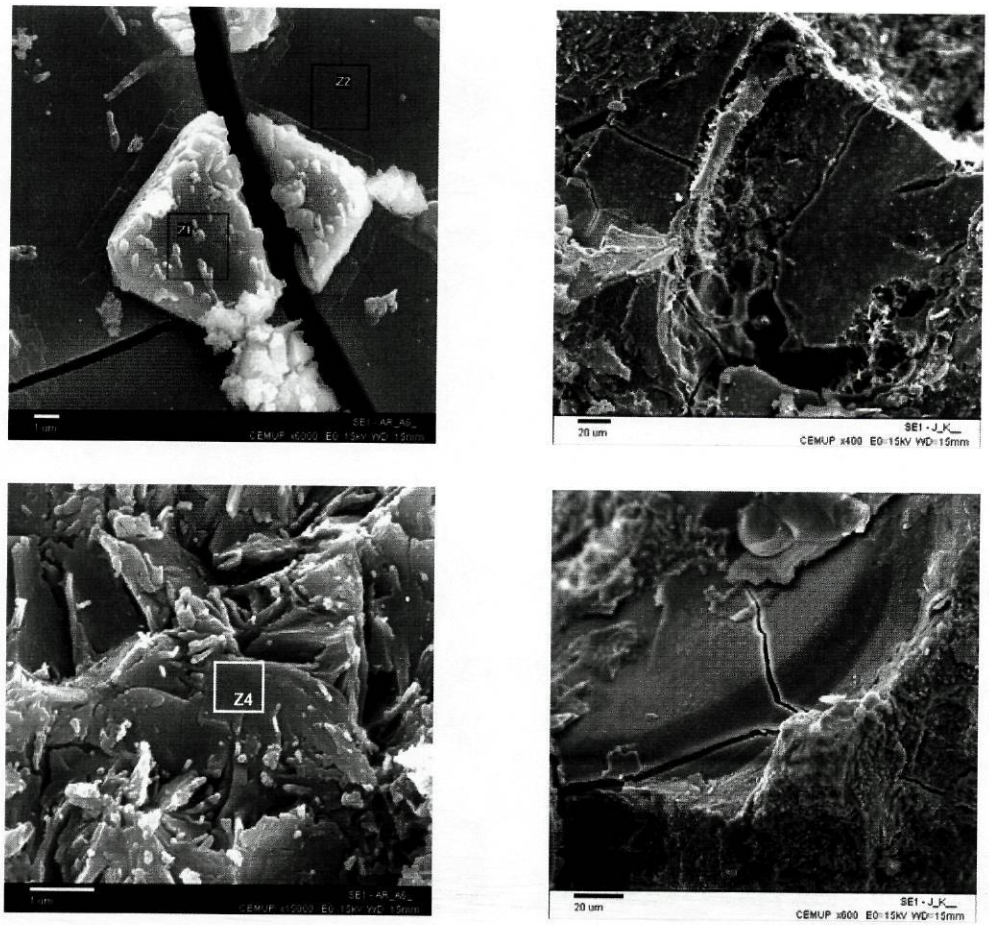


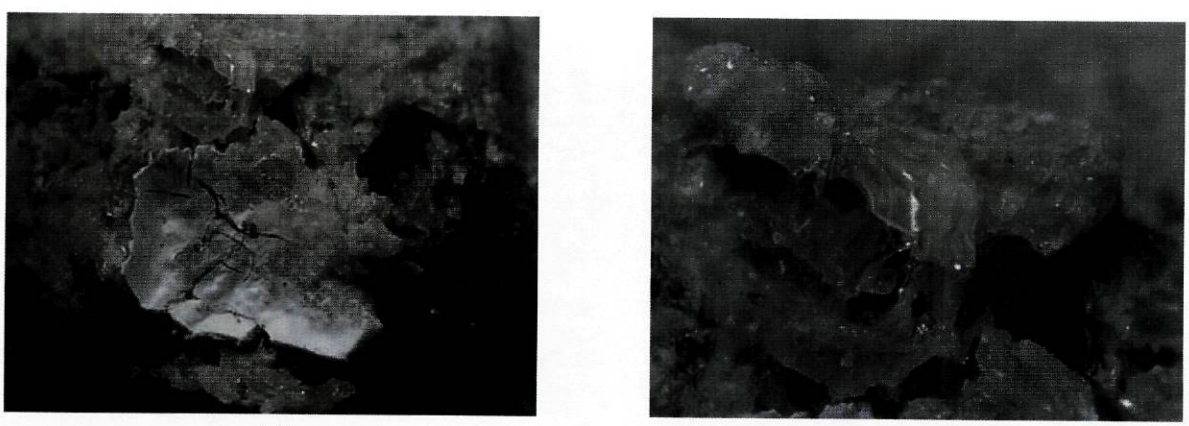
Figura III.2.14 – Espectros EDS dos produtos presentes no revestimento da cavidade observada no bloco J-K da abóbada. Predomina o gel sílico-alcalino, sobre o qual se desenvolvem cristais de carbonato de cálcio (Z1).

Um cone de betão retirado da cavidade existente na galeria GFE1, no encontro esquerdo da abóbada, permitiu também observar uma substância translúcida, gelatinosa, que se encontrava no vértice do cone, sobre um material liso, de cor branca, com fissuras de retracção (Fotografia III.2.27). Este produto apresenta características macroscópicas que o identificam com gel.

Este gel mostra, também ao microscópio, a morfologia típica e as fissuras de retracção referidas na literatura como identificativas do gel sílico-alcalino. A composição semiquantitativa, obtida em EDS, e a textura do gel são apresentadas nas Figura III.2.15 e Fotografia III.2.28. É possível observar, em geral, um gel amorfo, com superfície lisa e fissurada, e, noutros pontos, um gel de estrutura cavernosa. A composição é idêntica para os dois casos, com elevada percentagem de silício e baixos teores em álcalis.



Fotografia III.2.26 – Imagens, ao MEV, do produto que constitui o revestimento da cavidade observada no bloco J-K da abóbada. O gel sílico-alcalino apresenta-se amorfo, liso e com fissuras de retracção. Sobre o gel formam-se cristais de carbonato de cálcio. A composição das zonas assinaladas encontra-se nos espectros da Figura III.2.15.



(a) (b)

Fotografia III.2.27 – Imagens à lupa binocular: (a) do produto de cor branca existente no topo do *pop-out* que se destacou do tecto da galeria GFE1 (ampliação de 0,6X); (b) do material translúcido e gelatinoso, mais superficial (ampliação de 1,6X).

O cone de betão foi serrado longitudinalmente para produção de uma lâmina delgada polida. O exame microscópico revela a presença de uma rocha de matriz siliciosa micro a criptocristalina, que apresenta cristais de quartzo, feldspato e micas, com orientação dos

minerais filitosos (Fotografia III.2.29). Esta rocha, que não foi identificada na pedreira, está em contacto com a pasta de cimento (Fotografia III.2.30) e tudo indica tratar-se de uma rocha metassedimentar. A interface é bem definida e encontra-se fechada.

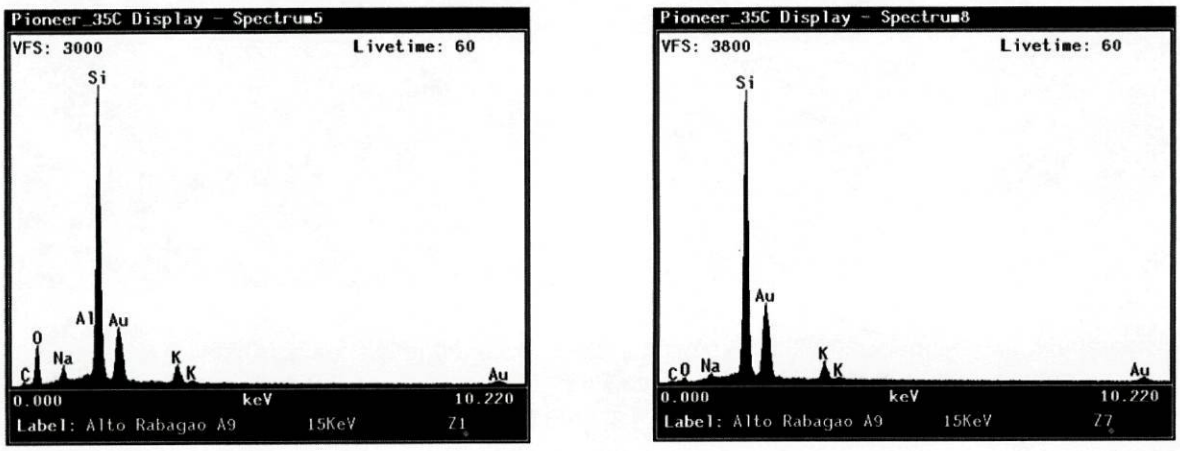
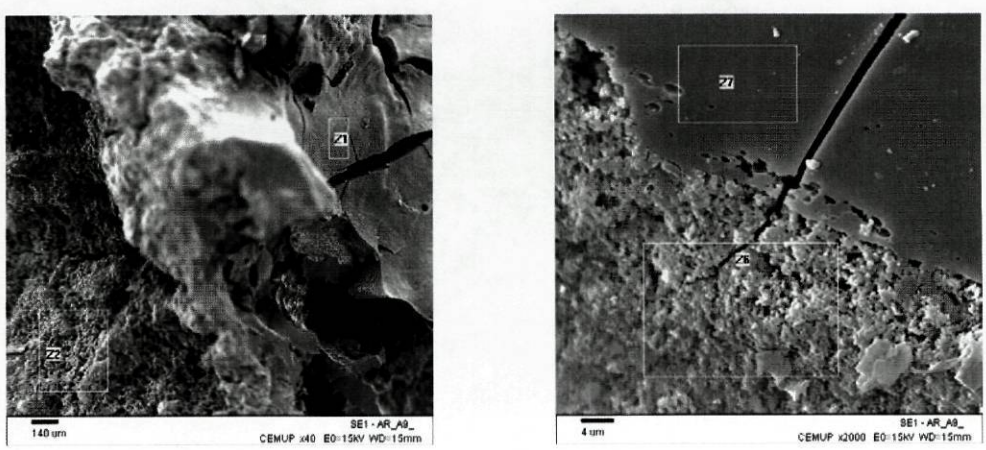
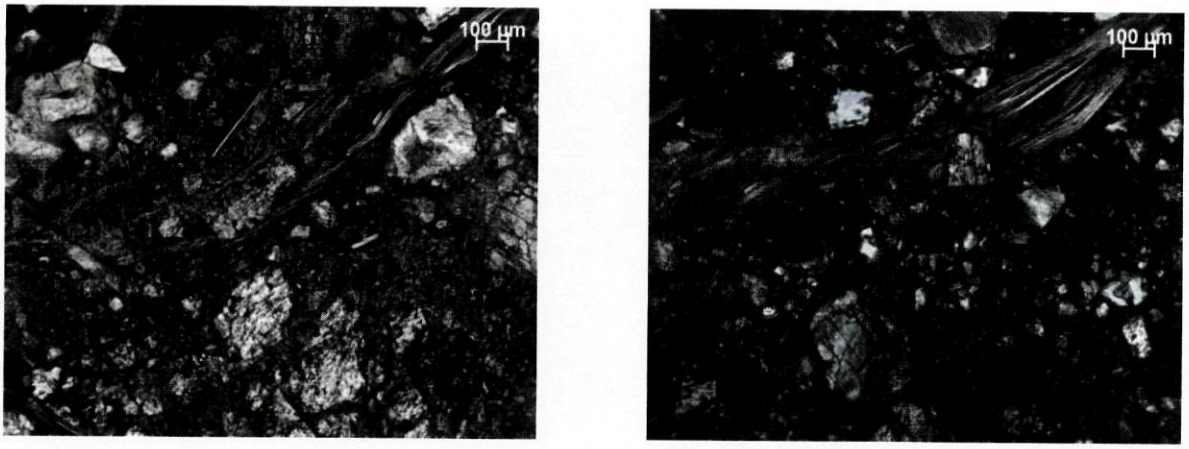


Figura III.2.15 – Espectros EDS do gel encontrado no *pop-out* da galeria GFE1.

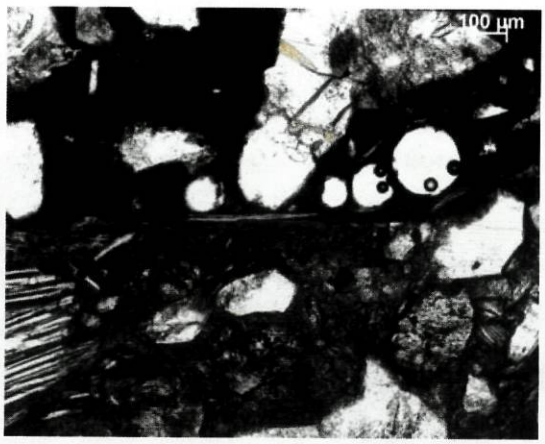


Fotografia III.2.28 – Imagens obtidas ao MEV do gel presente no vértice do *pop-out* da galeria GFE1. Predomina a estrutura cavernosa e a superfície lisa e com fissuras. Nas imagens estão indicadas as zonas que correspondem aos espectros da Figura III.2.15.

Não foi detectada fissuração, orlas de reacção ou existência de gel na interface. Na rocha existem algumas fissuras aproximadamente paralelas às micas, que, genericamente, não apresentam preenchimento. No entanto, observou-se ao microscópio óptico uma fissura com um preenchimento de tom ferruginoso, que foi observada ao MEV/EDS. Esta fissura apresenta um preenchimento constituído por gel sílico-alcalino, com alumínio (Figura III.2.16) (Fotografia III.2.31).



Fotografia III.2.29 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N// e NX) da partícula de rocha que está na origem do *pop-out* existente na galeria GFE1. As duas imagens correspondem a locais diferentes da lâmina delgada.



Fotografia III.2.30 – Imagem, obtida ao microscópio óptico (N//), da interface da rocha com a pasta de cimento.

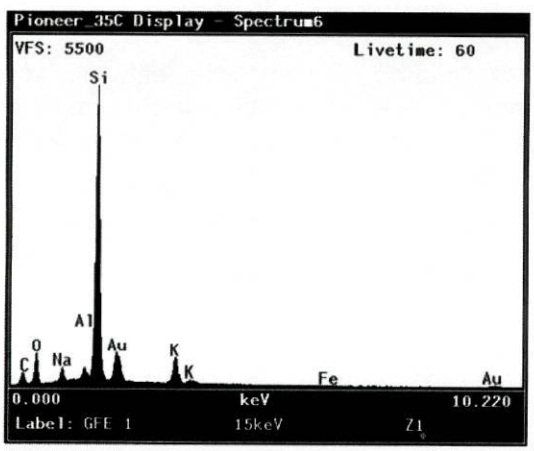
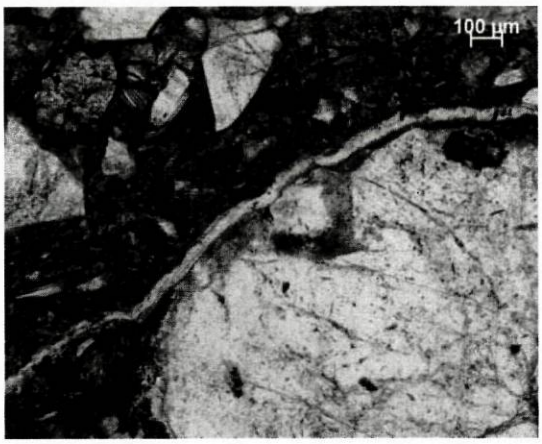


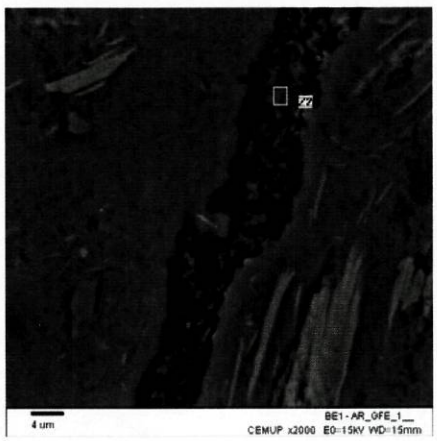
Figura III.2.16 – Espectro EDS do material de preenchimento da fissura que se encontra na rocha de matriz micro a criptocristalina.



(a)



(b)



(c)

Fotografia III.2.31 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) e ao MEV de fissuras que atravessam a partícula de rocha que está na origem do *pop-out* observado na galeria GFE1 do encontro esquerdo: (a) fissura sem preenchimento; (b) e (c) fissura com preenchimento de tom ferruginoso, analisado ao MEV/EDS (Figura III.2.16).

Próximo deste *pop-out*, no fundo da galeria GFE 1, foi detectada outra cavidade da qual foi colhida amostra do revestimento para análise. Existe também gel sílico-alcalino, com textura diversa, predominando o aspecto viscoso, por vezes semicristalino, e a textura esquelética (Figura III.2.17) (Fotografia III.2.32) sobre a qual existem cristais ricos em sódio.

Os produtos colhidos em outras cavidades mostram, para além de gel sílico-alcalino, uma variedade de elementos que provêm do cimento. Estes materiais mostram-se predominantemente semicristalinos, mas existem também cristais lamelares que formam rosetas, semelhantes às descritas anteriormente, constituídas por silício e cálcio (Figura III.2.18) (Fotografia III.2.33), em produtos exsudados dos provetes de argamassa utilizados nos ensaios de reactividade.

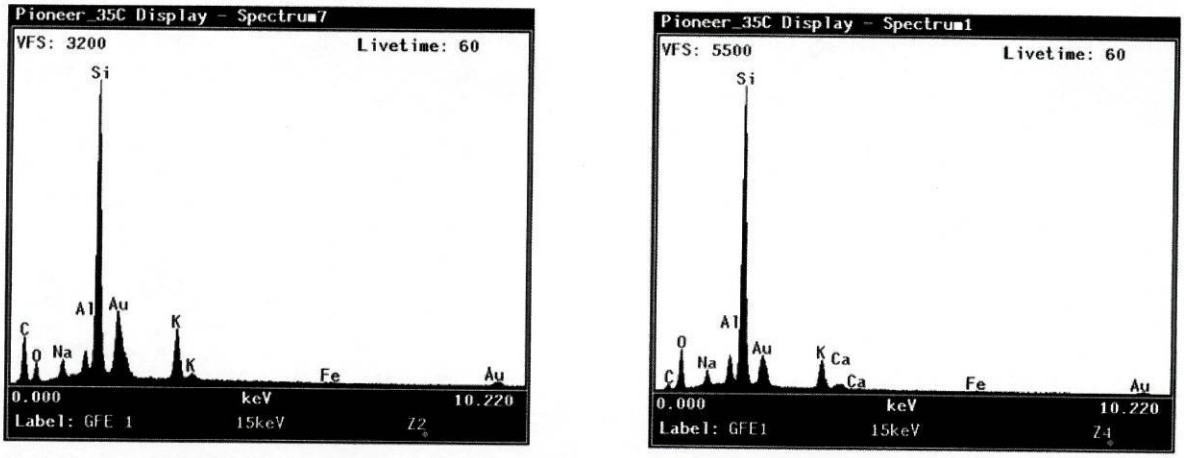
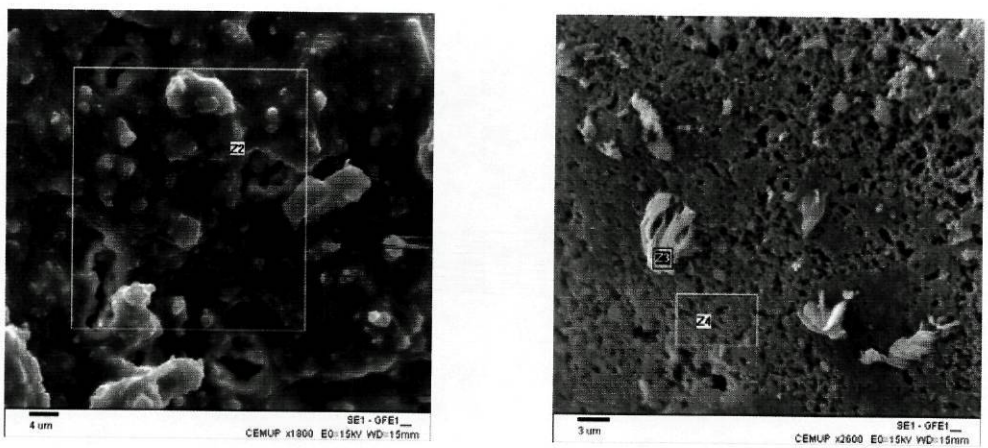


Figura III.2.17 – Espectros EDS do material de preenchimento de um *pop-out* existente na galeria GFE 1.



Fotografia III.2.32 – Imagens ao MEV do gel que existe em cavidade detectada no topo da galeria GFE1. Pode observar-se um carácter viscoso e uma textura esquelética. Sobre o gel crescem cristais ricos em sódio. Na Figura III.2.17 encontram-se os espectros EDS do gel.

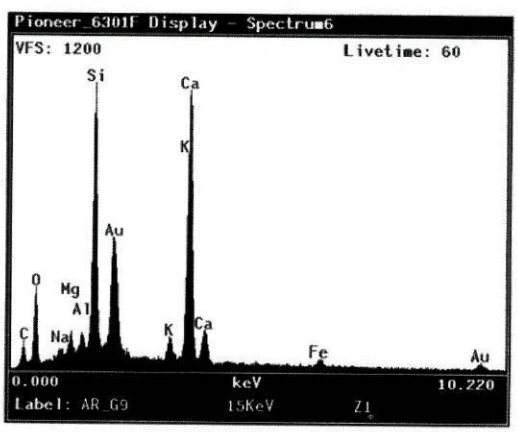
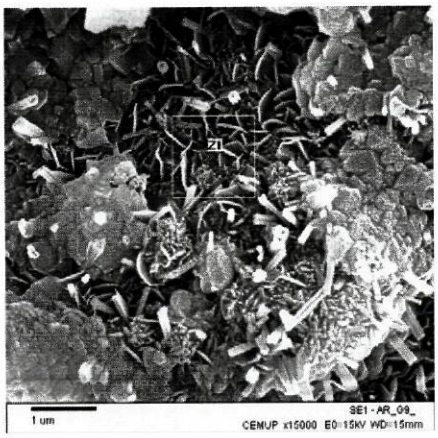


Figura III.2.18 – Espectro EDS dos produtos com textura em roseta encontrados nos *pop-outs*.



Fotografia III.2.33 – Imagem ao MEV dos produtos com estrutura em roseta compostos essencialmente por silício e cálcio, existentes nos *pop-outs* (espectro da Figura III.2.18).

5.3.2. Eflorescências

As eflorescências são essencialmente formadas por cristais aciculares, tabulares ou globulares ricos em sódio, por vezes formando *clusters* (Figura III.2.19) (Fotografia III.2.34). São semelhantes aos que se encontraram na barragem do Cabril e correspondem, também, a trona.

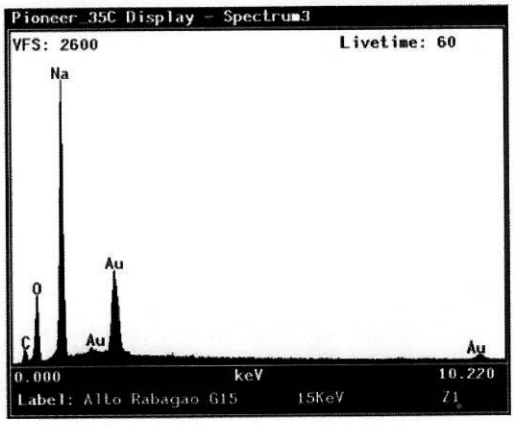
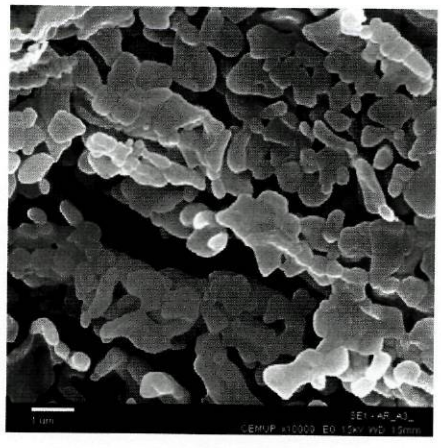


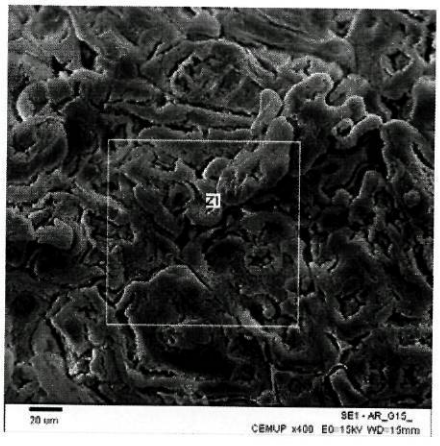
Figura III.2.19 – Espectro EDS dos produtos ricos em sódio que existem nas eflorescências.

Estas eflorescências são pouco abundantes em toda a barragem. Existem, no entanto, com grande abundância nas juntas alargadas Y1 e Y2. Os cristais, que macroscopicamente são aciculares, concentram-se sobre as finas películas de argamassa, provavelmente em resultado da reacção desta com o granito ou por evaporação da humidade na superfície interior do betão.

Tal como referido para a barragem do Cabril, a existência de humidade nos locais em que as eflorescências são abundantes e o facto de surgirem cristais de sódio sobre o gel sílico-alcalino, alerta para o facto de estes cristais poderem corresponder a um estádio de

evolução do gel que, de acordo com vários autores, sofre carbonatação quando em contacto com a atmosfera. As eflorescências estão presentes na face interna do betão, ou seja, na parede da galeria. Uma vez que a humidade tem origem externa, existe a tendência para, no interior mais seco, evaporar e depositar o sódio que adquiriu a partir do fluido intersticial do betão. Refira-se, no entanto, que as eflorescências não têm o carácter compacto e enrijecido que se observa por vezes no gel carbonatado das exsudações.





Fotografia III.1.34 – Forma dos cristais ricos em sódio presentes nas eflorescências da barragem do Alto Rabagão. São frequentes os cristais globulares, formando *clusters*.

5.3.3. Exsudações

As exsudações ocorrem esporadicamente no betão, isoladas. Em geral, as paredes onde existem não apresentam indícios de humidade.

Apresentam textura e composição variável. Em algumas das amostras existe gel sílico-alcalino, amorfo, compacto, exibindo por vezes a textura lisa, característica, com fendas de retracção. Estão presentes também produtos de composição idêntica, mas de textura diversa, desde uma aparência viscosa até uma textura semicristalina, esquelética. Na composição destes produtos encontra-se, em alguns casos, para além de silício, que predomina, sódio e potássio, também cálcio e alumínio (Figura III.2.20) (Fotografia III.2.35). O alumínio não está presente no gel com superfície lisa e carácter amorfo.

Foram identificados outros materiais associados directa ou indirectamente com o gel. Os cristais de trona, tal como sucedia na barragem do Cabril, ocorrem sobre o gel amorfo ou rompendo a sua superfície (Fotografia III.2.36). Estão directamente relacionados com o gel subjacente. Mais uma vez, esta sequência dos dois produtos parece indicar a existência de relação entre os aspectos texturais e composicionais e a evolução do gel por dessecação.

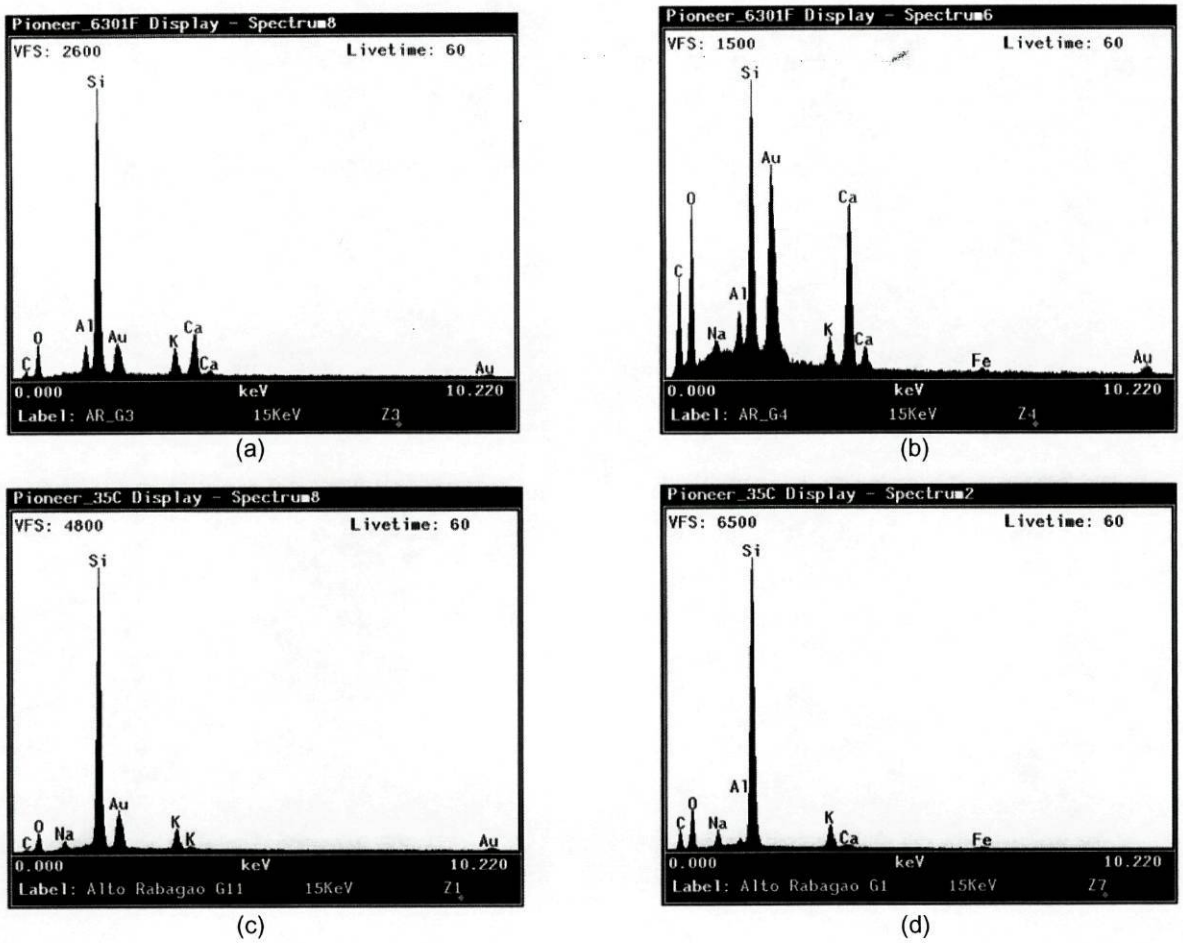
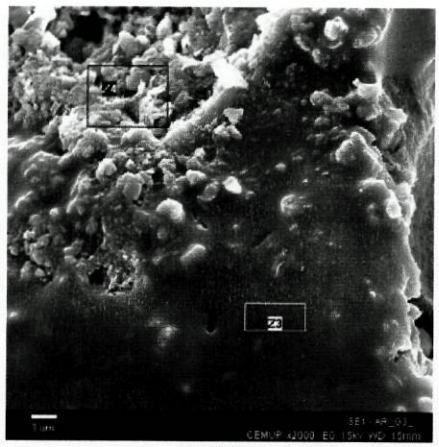
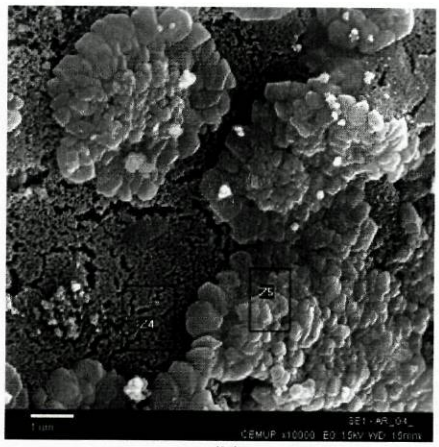


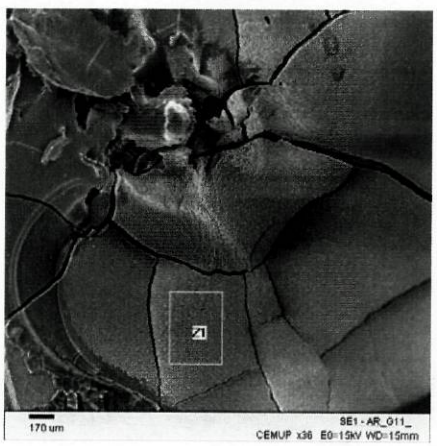
Figura III.2.20 – Espectros EDS do gel existente nas exsudações. No gel encontra-se, por vezes, cálcio e alumínio.

Nas exsudações observaram-se, ainda, romboedros de carbonato de cálcio, que surge em agregados cristalinos, maciços. Estão relacionados espacialmente com o gel sílico-alcalino (Fotografia III.2.37), sobre o qual ocorrem, podendo indicar que inicialmente o gel poderia conter cálcio, que terá exsudado à superfície e carbonatado por exposição atmosférica.

A composição aproximada do gel foi projectada em diagrama triangular, seguindo os cálculos apresentados por Knudsen e Thaulow, 1975, já referidos. Para além das análises de exsudações, foram considerados alguns resultados encontrados nos *pop-outs*. Atendendo a que nos produtos analisados predomina o silício, com álcalis e, por vezes, cálcio, foram consideradas as análises semiquantitativas correspondentes, em termos de óxidos, obtidas por EDS. A soma dos quatro óxidos foi normalizada para cem por cento em base anidra, para projecção em diagrama triangular (Figura III.2.21). Foram consideradas separadamente as análises que incluem cálcio das que contêm apenas álcalis e silício.


(a)


(b)

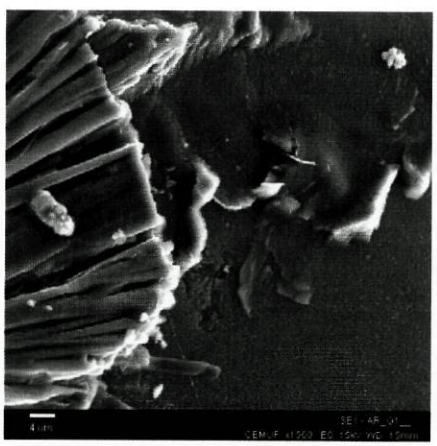


(c)



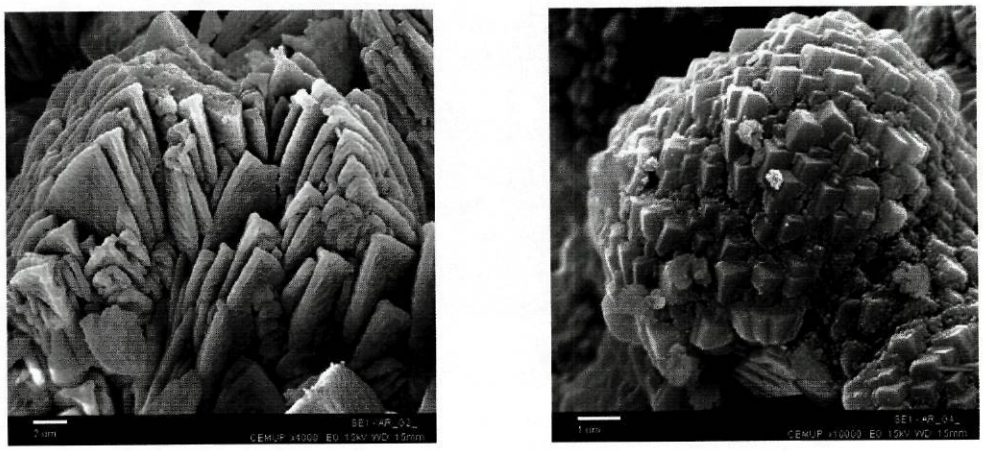
(d)

Fotografia III.2.35 – Imagens do gel existente nas exsudações da barragem do Alto Rabagão: (a) gel viscoso; (b) com textura porosa, esquelética; (c) e (d) gel com superfície lisa e fissuras de retracção. As imagens estão referenciadas com as letras (a), (b), (c) e (d) para indicação da correspondência com os espectros da Figura III.2.20. As zonas compostas por gel, representadas nas imagens, estão referidas nos espectros respectivos.





Fotografia III.2.36 – Imagens dos cristais de trona que estão espacialmente relacionados com o gel amorfo.



Fotografia III.2.37 – Imagens, ao MEV, de cristais de carbonato de cálcio que existem nas exsudações.

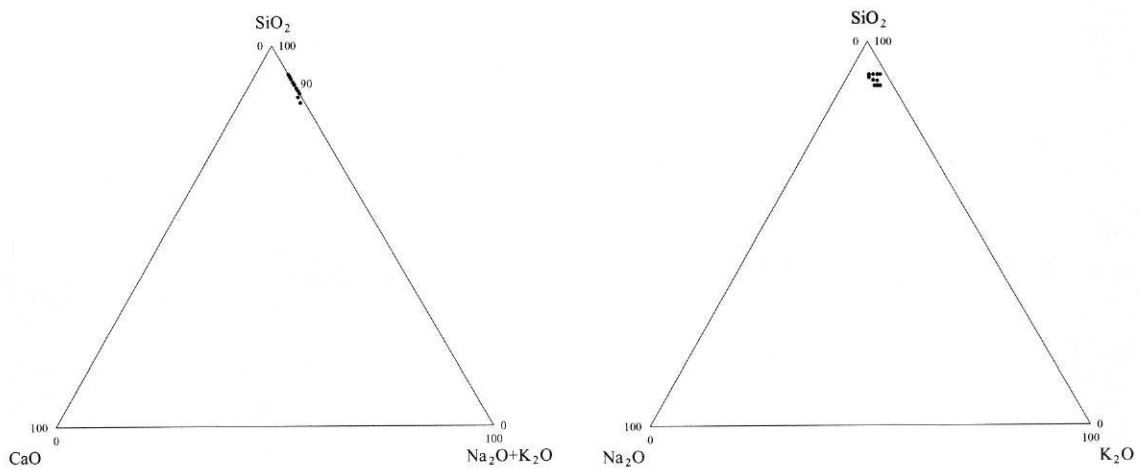


Figura III.2.21 – Diagramas triangulares correspondentes à composição do gel existente nas exsudações e *pop-outs*, analisado por EDS. Nestes diagramas não estão incluídas as análises dos produtos que continham alumínio.

No primeiro gráfico, as percentagens dos óxidos de sódio e de potássio apresentam-se adicionadas num vértice e o CaO surge individualizado. A observação do gráfico permite concluir que o teor em cálcio é sempre muito baixo ou nulo.

No segundo gráfico, os vértices correspondem a Na_2O, K_2O e SiO_2. Verifica-se que predomina o silício e existem percentagens relativamente baixas tanto de sódio como de potássio, sendo menor o conteúdo deste último. Neste diagrama não foram projectadas as análises das amostras que contêm cálcio.

Verificou-se que, no gel analisado no *pop-out* da galeria GFE1, subjacente ao gel viscoso e translúcido que formava o topo do cone, existe por vezes alumínio e, mais raramente, ferro, que podem ter origem em partículas de pasta de cimento aderentes ao

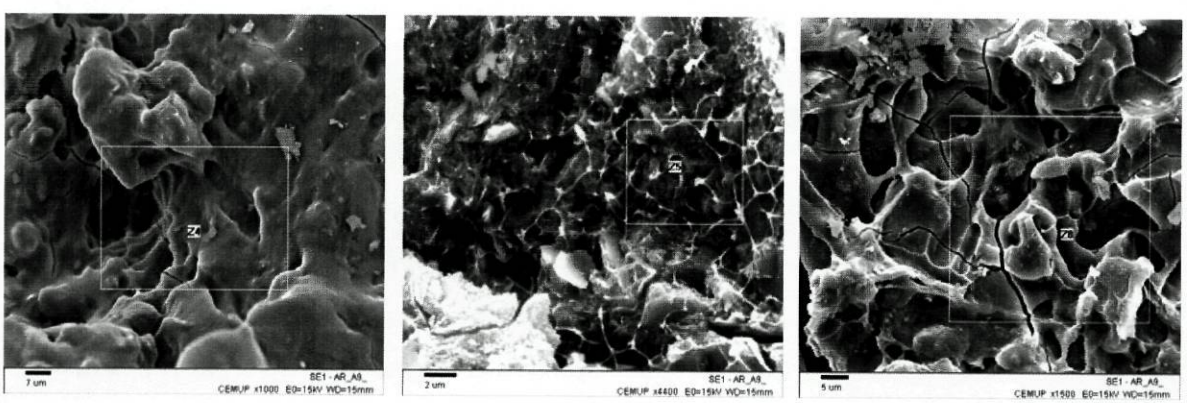
gel. A composição deste gel não foi considerada nos diagramas ternários, encontrando-se listada no Quadro III.2.10.

Nos locais em que se detectou alumínio predomina o carácter esponjoso e a superfície cavernosa, com fissuração (Fotografia III.2.38).

Quadro III.2.10 – Composição semiquantitativa, em base anidra, obtida por EDS do gel que contém alumínio (valores em percentagem).

	AR A9 Z2	AR A9 Z4	AR A9 Z5	AR A9 Z8	AR G12 Z1	AR GFE1 Z1	AR GFE1 Z2
Al_2O_3	3,16	6,07	1,23	4,49	6,43	2,35	4,12
SiO_2	78,64	81,03	94,36	82,06	27,18	82,18	66,04
SO_3	0,93	0	0,07	0	2,8	0,27	9,31
K_2O	7,08	7,4	1,95	7,43	18,07	8,85	13,36
Na_2O	3,07	2,41	1,22	2,94	13,84	4,26	4,49
FeO	2,27	1,8	0	1,27	1,92	1,12	1,43
CaO	4,72	0,18	0,01	1,56	26,63	0,77	0,74
P_2O_5	0	0,21	0,43	0	1,89	0,04	0,32
MgO	0,14	0,03	0,18	0,12	0	0,17	0,13
TiO_2	0	0,86	0,55	0,14	1,23	0	0,06
Total	100,01	99,99	100,00	100,01	99,99	100,01	100,00

	AR JK Z1	AR JK Z3	AR JK L Z2	AR JK L Z3	AR Ext Z1	AR ext Z3	AR ext Z4
Al_2O_3	1,68	11,37	5,36	1,67	1,29	4,28	1,75
SiO_2	79,01	71,14	77,36	83,4	70,82	45,72	74,03
SO_3	2,39	0,07	0,42	0,26	0,46	0,73	0,31
K_2O	6,62	8,76	6,37	5,75	0,25	1,57	3,53
Na_2O	5,12	3,3	4,72	5,79	14,48	2,21	1,02
FeO	2,46	2	0,97	0,33	0	1,26	0,84
CaO	2,35	3,31	3,35	2,09	8,65	43,35	18,06
P_2O_5	0	0	0,74	0,22	0,19	0	0,13
MgO	0,29	0,03	0,34	0,23	3,52	0,63	0,19
TiO_2	0,08	0,01	0,37	0,37	0,32	0,02	0,09
Total	100,00	99,99	100,00	100,11	99,98	99,77	99,95



Fotografia III.2.38 – Imagens, ao MEV, do gel que contém alumínio presente no cone retirado do *pop-out*. A textura é semelhante à observada em gel sílico-alcalino de outras amostras. As zonas assinaladas estão indicadas a sombreado no Quadro III.2.10.

A comparação dos diagramas triangulares com as análises que se encontram na literatura, permite concluir que, também neste caso, existe em geral uma percentagem de cálcio baixa, como se verificava no betão da barragem do Cabril. Sendo assim, o gel deverá ter um percurso rápido e curto na pasta de cimento, não adquirindo o cálcio. Esta hipótese parece plausível para o caso dos *pop-outs*, atendendo a que são originados pela reacção de uma partícula de agregado que se encontra próxima da parede exposta e que, por expansão, origina a escamação do betão a partir do vértice de um cone. A reacção será, por esta razão, circunscrita à interface da partícula reactiva com a pasta de cimento, formando o revestimento esbranquiçado que se encontrou nas crateras.

Poderá traduzir também uma reacção superficial no caso das exsudações, dado que nos locais em que ocorrem não existe qualquer outra manifestação de deterioração.

5.3.4. Estalactites

As estalactites, que se localizam nos tectos das galerias, coincidem em geral com juntas de betonagem. Formam escorrências de cor branca e textura sacaróide, que mostraram ser constituídas essencialmente por carbonato de cálcio. Resultam da lixiviação do betão e ocorrem em locais onde a circulação de água é facilitada, como é o caso das juntas.

Apesar de macroscopicamente se distinguirem as estalactites de cor branca de outras que existem na abóbada e que tem uma tonalidade azulada, a análise química semi-quantitativa mostrou uma composição uniforme, de carbonato de cálcio, para todas as amostras. Não foi detectado, por EDS, qualquer outro elemento que pudesse explicar a ocorrência da coloração referida.

5.4. Estudo do betão. Trabalho experimental em laboratório

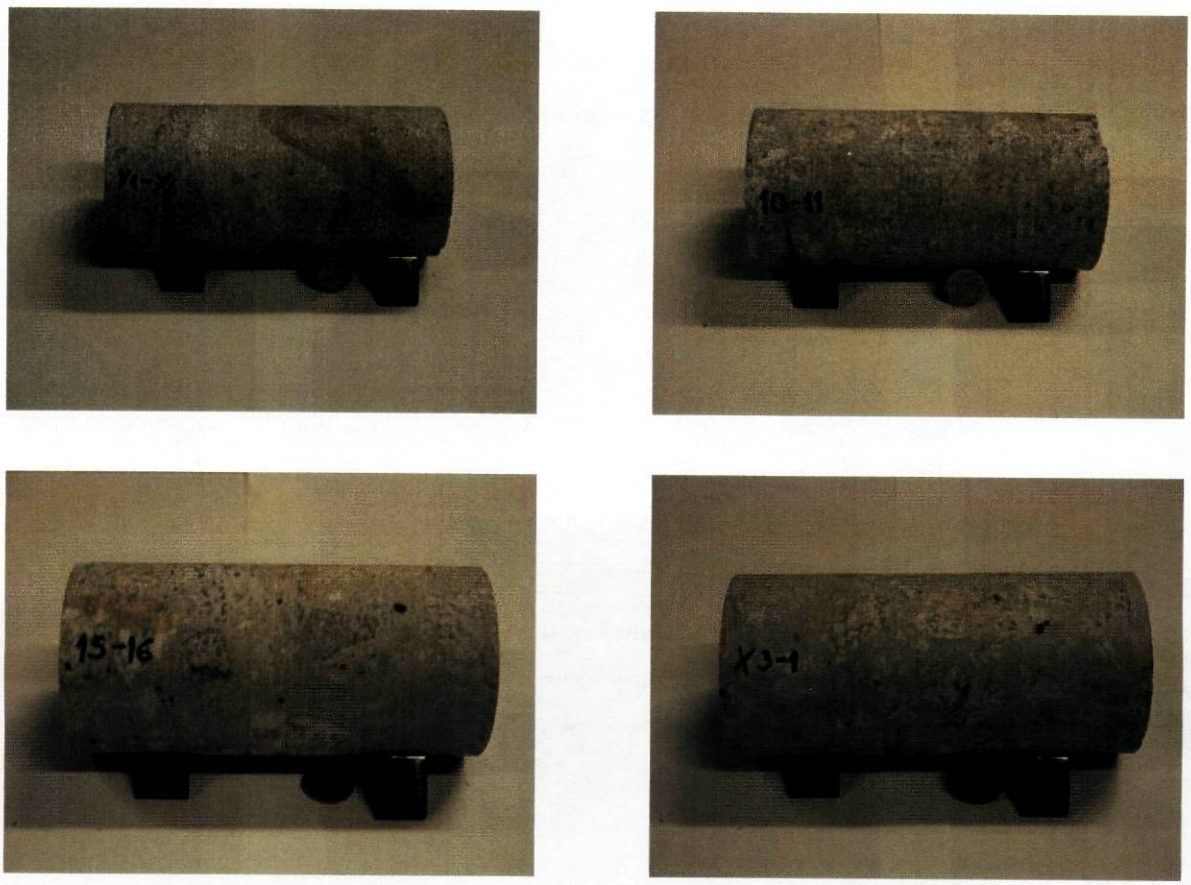
Para o estudo do betão em laboratório, seguiram-se as indicações do relatório da BCA, 1992. As amostras foram retiradas por carotagem, utilizando o equipamento já anteriormente referido, etiquetadas e devidamente armazenadas. Os locais para realização de amostragem do betão foram definidos em função da ocorrência de fissuração, cavidades, eflorescências e exsudações nas superfícies do betão.

A selecção dos locais para realização de lâminas delgadas foi feita após a análise macroscópica dos tarolos, sistematicamente ao longo das carotes, e em locais que apresentavam características relevantes.

5.4.1. Caracterização macroscópica

Os tarolos foram retirados com comprimento máximo de 900 milímetros. As fracturas existentes coincidem com o comprimento do amostrador (300 milímetros) e devem-se apenas à operação de furação. Não se fracturaram em resultado do manuseamento.

O betão apresenta-se são e compacto. Não é facilmente fracturado com martelo, não se desagrega nem mostra fissuração (Fotografia III.2.39).



Fotografia III.2.39 – Imagens dos tarolos de betão retirados da barragem do Alto Rabagão. O betão mostra-se compacto e são. Os troços das carotes fotografados foram serrados para preparação dos provetes para ensaios à compressão uniaxial.

A pasta de cimento tem uma coloração uniforme, em cinzento claro. Encontraram-se raras fissuras finas no contacto pasta de cimento-agregado, sem preenchimento.

Os agregados predominantes são de grande dimensão (até 200 milímetros segundo a maior dimensão), de natureza granítica, existindo também partículas de dimensão centimétrica, próxima do seixo, e a fracção areia. As partículas de agregado têm distribuição uniforme no betão.

É possível observar partículas de granito são e, também, com frequência, grãos de granito amarelado, alterado.

A superfície das partículas é irregular de textura cristalina (BS 812: Part 102, 1989, Quadro I.6).

De acordo com a classificação de Krumbein e Sloss, 1966, e Powers, 1953 (Figura I.4), as partículas são sub-roladas a subangulares, de baixa esfericidade. Algumas são alongadas, o que poderá ser atribuído à incipiente orientação dos minerais.

Os agregados de dimensão intermédia e os finos visíveis em amostra de mão são angulosos e de baixa esfericidade, por vezes alongados. Apresentam distribuição homogénea no betão.

Não se observaram orlas escuras em torno das partículas de agregado nem manchas de humidade ao longo dos tarolos.

São visíveis poros de pequeno diâmetro, que podem atingir 5 milímetros, dispersos homogeneamente na pasta. Alguns poros apresentam-se parcialmente preenchidos por finas películas de um produto branco, que por vezes forma cristais diminutos. Para identificação destes produtos de preenchimento, foram analisados, ao MEV, pequenos fragmentos de betão.

5.4.2. Propriedades mecânicas

Com o objectivo de avaliar a possível degradação das características mecânicas do betão ao longo do tempo, foram preparados provetes para realização de ensaios de compressão uniaxial.

Os ensaios foram realizados, segundo a norma NP EN 12390-3, 2003, no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais do IST, sobre cilindros obtidos por corte dos tarolos de betão, preparados para que a altura dos cilindros fosse aproximadamente dupla do diâmetro (NP EN 12390-1, 2003) (Quadro III.2.11). O equipamento utilizado foi já referido no capítulo correspondente sobre a barragem do Cabril. Relativamente às indicações da norma, deve referir-se que o diâmetro do provete deveria ser aproximadamente três vezes e meia a dimensão máxima das partículas, o que dificilmente seria aplicável neste caso, dada a grande dimensão máxima das partículas de agregado grosso.

As superfícies de rotura não apresentam um padrão uniforme nos diferentes provetes (Fotografia III.2.40).

A rotura ocorreu, em quase todos os provetes, pela interface entre a pasta de cimento e as partículas de agregado grosso. Em alguns casos houve destaque das partículas de maior dimensão que se apresentavam na zona periférica dos provetes, o

que sublinha a menor resistência da interface pasta de cimento-agregado relativamente à pasta de cimento.

Quadro III.2.11 – Características dos provetes ensaiados à compressão uniaxial. O ângulo de inclinação é medido entre o eixo da carote e o plano vertical.

Furo	Inclinação (º)	Profundidade do provete (mm)	Comprimento do provete (mm)
Furo 1 Bloco 15-16	90	210	180
Furo 4 Bloco 7-8	90	320	184
Furo 5 Bloco 10-11	90	240	181
Furo 6 Bloco J-K	90	150	184
Furo 7 Bloco Y1-Y2	90	130	180
Furo 8 Bloco X3-X4	90	200	186

Exceptuam-se os provetes dos blocos: Y1-Y2, que colapsou atravessando uma partícula de granito alterado, e X3-X4, que não continha partículas de agregado grosso e apresentou fissuras aproximadamente paralelas ao eixo do provete.

O cálculo da resistência à rotura foi efectuado tendo em consideração as dimensões de cada provete, ou seja, o seu diâmetro e altura. Com base nestes elementos, foram construídos os gráficos que se apresentam na Figura III.2.22.

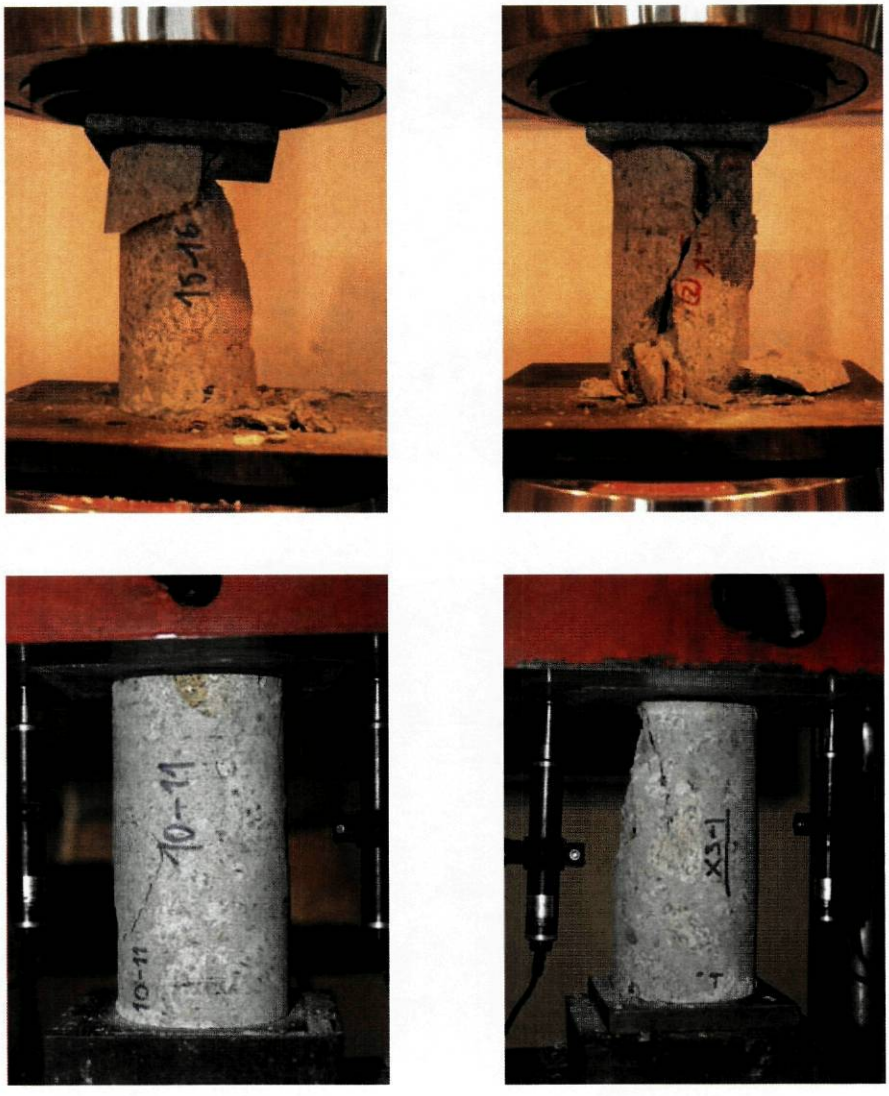
Os gráficos tensão-deformação foram elaborados utilizando a mesma escala para todos os provetes, com o objectivo de permitir uma análise comparativa.

As curvas tensão-deformação mostram, em geral, um declive idêntico, fazendo prever um valor de módulo de elasticidade aproximadamente constante para os ensaios.

Os valores de resistência à compressão variam entre 20 e 30 MPa. Os provetes em que a rotura ocorreu atravessando partículas de granito ou em que não estão presentes partículas de agregado grosso apresentam os valores mais elevados de resistência à compressão, relativamente àqueles em que a rotura ocorreu pela interface pasta de cimento-agregado.

O valor médio é de 27,0 MPa, com desvio padrão de 3,8 MPa. Este valor é igual ao apresentado em Neves et al., 1964, para a dosagem de 200 kg/m^3 aos 90 dias. Conclui-se, por isso, que não existe decréscimo significativo do valor da resistência à compressão do betão. Refira-se, no entanto, que as interfaces pasta de cimento-agregado mostraram

ser as zonas de menor resistência deste betão e que as figuras de rotura foram, em vários casos, condicionadas pela presença de partículas de agregado grosso.



Fotografia III.2.40 – Imagens dos provetes de betão após realização dos ensaios de compressão uniaxial. Alguns provetes necessitaram de aplicação de uma força superior a 250 kN, para o que foi utilizado o equipamento ToniPack, modelo 3000 (os provetes têm 94 milímetros de diâmetro).

5.4.3. Exame petrográfico

Para o exame microscópico do betão da barragem foram produzidas lâminas delgadas polidas e seguida, em geral, a Especificação LNEC E 388, 1993.

Este exame teve, como principal objectivo, a detecção de indícios microscópicos de degradação do betão relacionados com a aplicação do granito da pedreira de Pisões. As amostras de betão foram colhidas nos locais em que se observaram manifestações de

deterioração do betão *in situ*, que poderiam estar relacionadas com a ocorrência de reacções álcali-agregado.

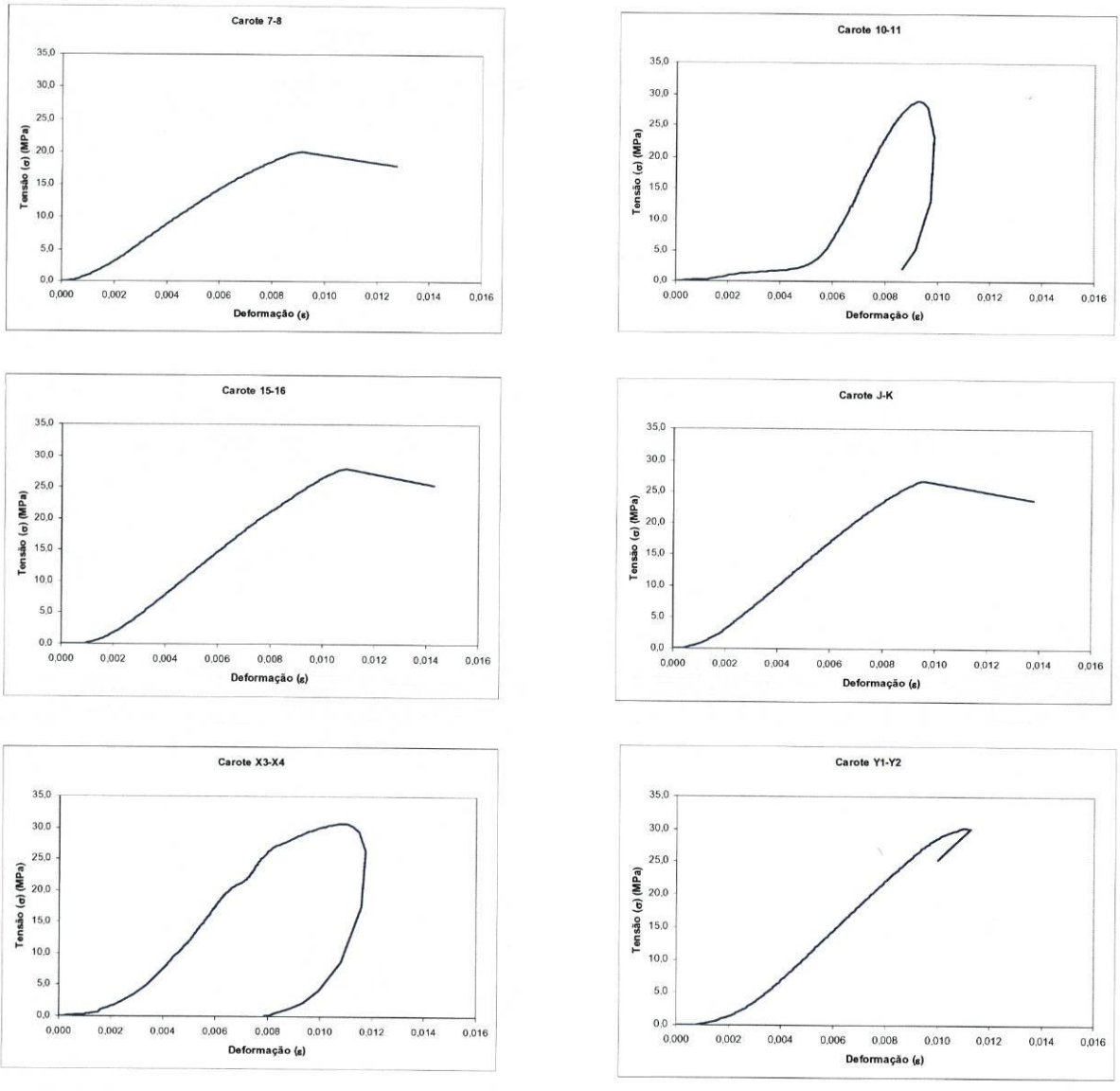


Figura III.2.22 – Gráficos tensão-deformação dos provetes de betão submetidos a compressão uniaxial.

As lâminas foram distribuídas regularmente ao longo das carotes e, algumas, em locais específicos, por apresentarem fissuras na interface pasta de cimento-agregado ou poros com preenchimento.

A análise efectuada teve carácter qualitativo, conforme referido anteriormente, dada a dimensão das lâminas relativamente à dimensão das carotes e destas em relação ao volume de betão.

As partículas de agregado grosso, de grande dimensão, são predominantes, existindo também partículas de dimensão seixo e areia.

As partículas observadas no betão são muito angulosas, em especial as de dimensão areia, evidenciando a sua origem por britagem do granito. As partículas de dimensão seixo mostram-se alongadas e são também angulosas. Esta característica do agregado, em conjunto com a abundância de cristais de mica, pode ter condicionado a dosagem de água e a colocação do betão. Não existem, no entanto, elementos na bibliografia que permitam avaliar este factor.

Descrevem-se, nas secções seguintes, as características do agregado, da pasta de cimento e dos produtos de preenchimento dos poros e das fissuras.

5.4.3.1. Agregados grossos

As partículas de agregado grosso são constituídas por granito, embora com textura variada.

Predomina o granito da pedreira de Pisões, com as características já referidas. Existem ainda partículas de granito de fácies ligeiramente diferente: um granito de grão médio, um granito de grão grosseiro e granito com textura cataclástica.

O granito de grão médio e o granito de grão grosseiro têm composição idêntica ao granito da pedreira de Pisões e apresentam-se, por vezes, alterados.

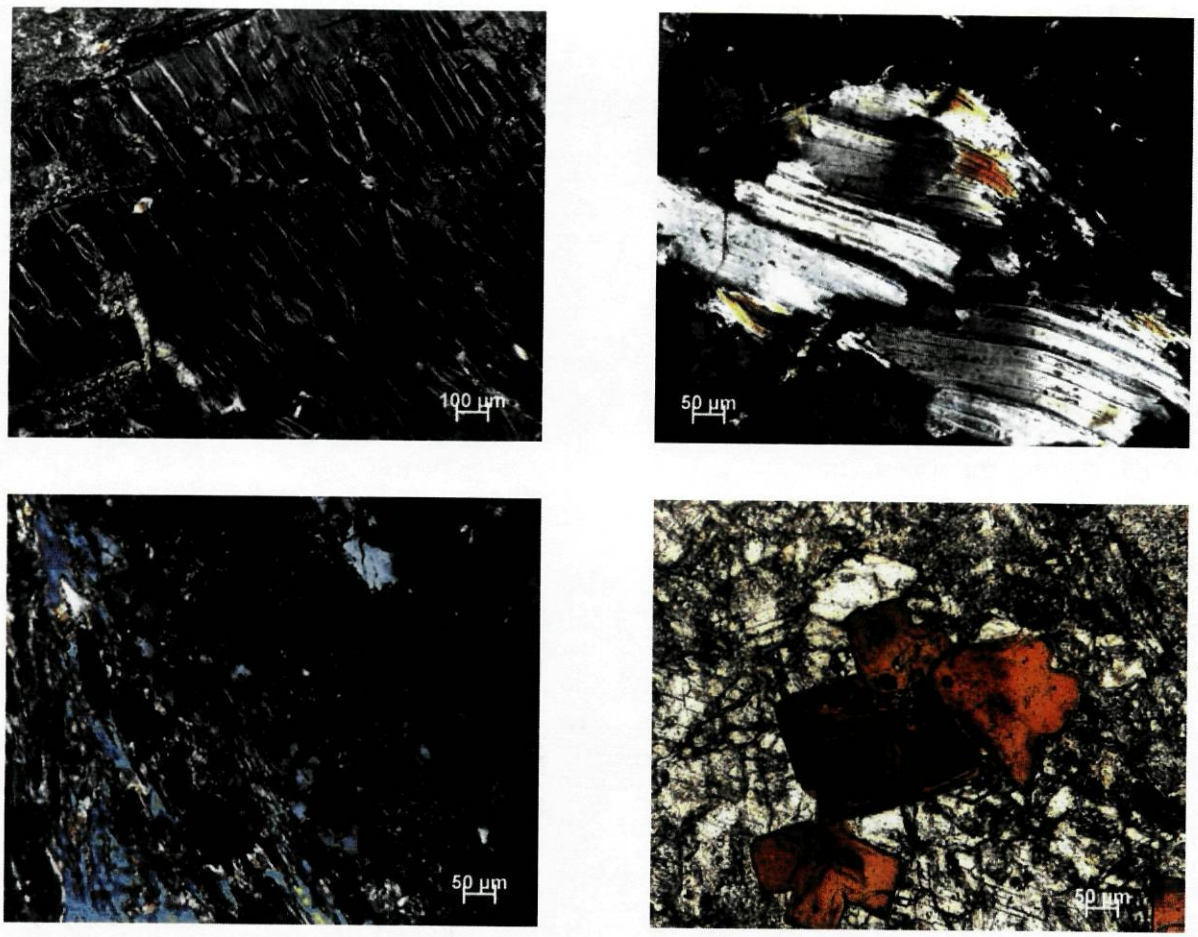
O granito com textura cataclástica é composto por quartzo, ortoclase, plagioclase, moscovite e pirite (Fotografia III.2.41). Os cristais de quartzo têm bordos suturados e extinção ondulante, com ângulo médio de 14º. A moscovite está deformada, com planos de clivagem encurvados.

A pirite mostra cristais agrupados, em geral alterados para limonite. A rocha está alterada e mostra fracturas frequentes. Em alguns trechos a interface pasta de cimento-agregado é difusa, o que pode indicar uma reacção do agregado com os fluidos intersticiais do betão.

5.4.3.2. Agregados intermédios

Correspondem a partículas de dimensão próxima do seixo, que são parcialmente intersectadas pelas lâminas produzidas. São constituídas predominantemente pelo granito da pedreira de Pisões, com pequenas variações de textura, que é, por vezes, um pouco mais grosseira. Existem partículas de granito são e outras de granito alterado, caracterizadas pela intensa caulinização do feldspato potássico e sericitização da plagioclase. No granito alterado, a moscovitização é mais forte. São frequentes os cristais

de moscovite microcristalina, que se encontram predominantemente nos bordos dos cristais de quartzo e feldspato.



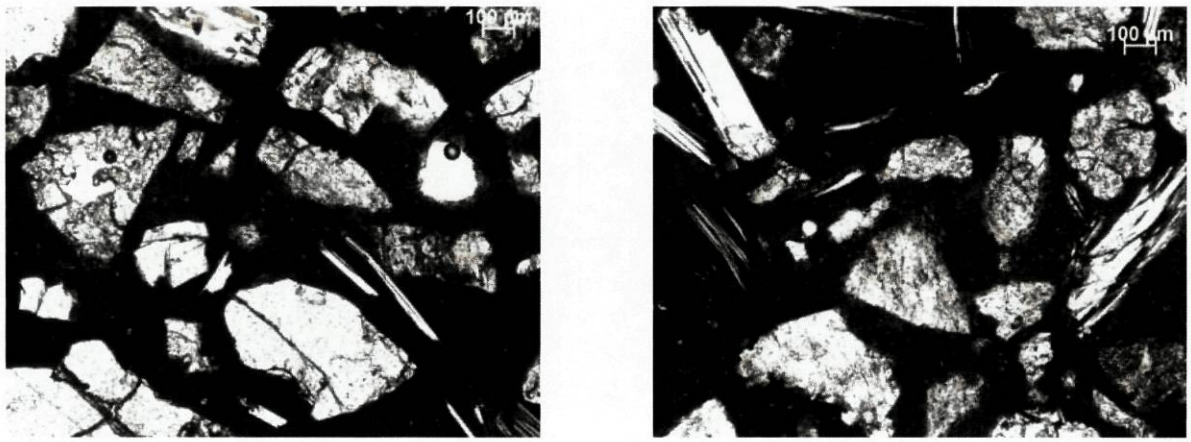
Fotografia III.2.41 – Aspectos de um granito com textura cataclástica presente nas partículas de agregado grosso.

5.4.3.3. Agregados finos

As partículas de agregado fino apresentam um módulo de finura superior à das partículas do betão da barragem do Cabril. Têm uma distribuição homogénea no betão. A superfície das partículas que formam os agregados finos é rugosa a cristalina. As partículas são angulares a subangulares, de baixa esfericidade, por vezes alongadas (Fotografia III.2.42), em resultado da britagem do granito da pedreira de Pisões.

Podem observar-se partículas de quartzo, ortoclase, microclina, plagioclase, moscovite, biotite, clorite, raros fragmentos de granito, apatite e minerais opacos.

Os grãos de quartzo têm forma irregular e pontiaguda. Estão presentes grãos monocristalinos e também policristalinos, alguns de quartzo de recristalização, com pequenos cristais de bordos suturados. Os grãos monocristalinos exibem frequentemente extinção ondulante e fracturação.



Fotografia III.2.42 – Forma das partículas de agregado fino. As partículas são rugosas, angulares a subangulares, de baixa esfericidade.

As partículas de ortoclase mostram sericitização, por vezes intensa. São também irregulares e pontiagudas.

As partículas de microclina identificam-se pela maclagem típica e estão também sericitizadas. Apresentam, por vezes, formas subédricas.

A plagioclase é pouco frequente. A forma de alguns grãos é subédrica mas, em geral, existem grãos angulosos e alongados.

A moscovite forma partículas longas e pouco espessas, lamelares, por vezes com orientação preferencial em relação a outras partículas de agregado. Os cristais mostram, em alguns casos, deformação, com encurvamento dos planos de clivagem. Encontram-se frequentes inclusões de fibrolite na moscovite.

A biotite é menos abundante do que a moscovite. Surge em lamelas mais curtas e mais espessas do que as de moscovite. Tem frequentes inclusões de zircão e de rútilo.

A clorite, do tipo penina, surge por vezes substituindo a biotite. É pouco frequente e mostra uma cor verde acastanhada.

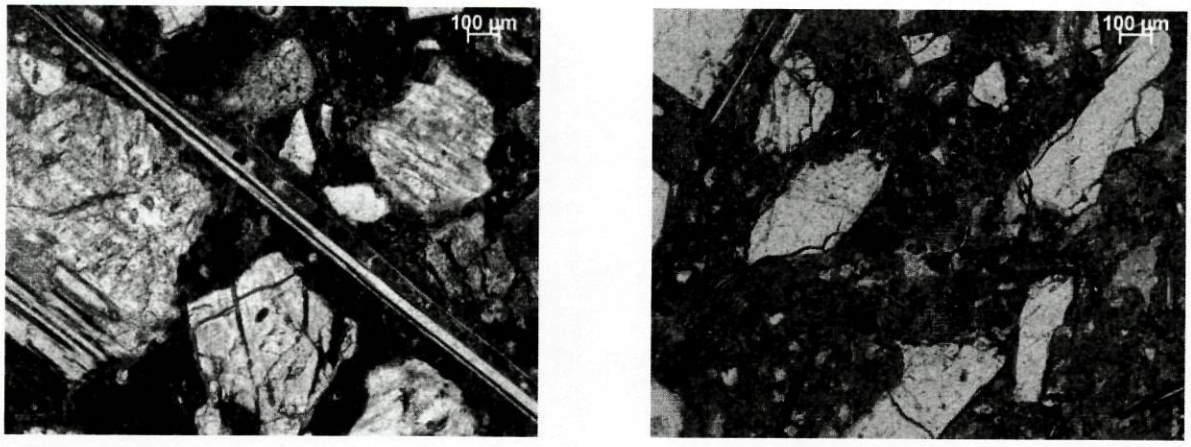
Os fragmentos de rocha granítica são normalmente constituídos por quartzo e feldspato ou feldspato e moscovite, com formas irregulares e superfície rugosa.

Os grãos monominerálicos de apatite e de minerais opacos são raros. Encontram-se, com mais frequência, como inclusões nos outros minerais.

5.4.3.4. Pasta de cimento

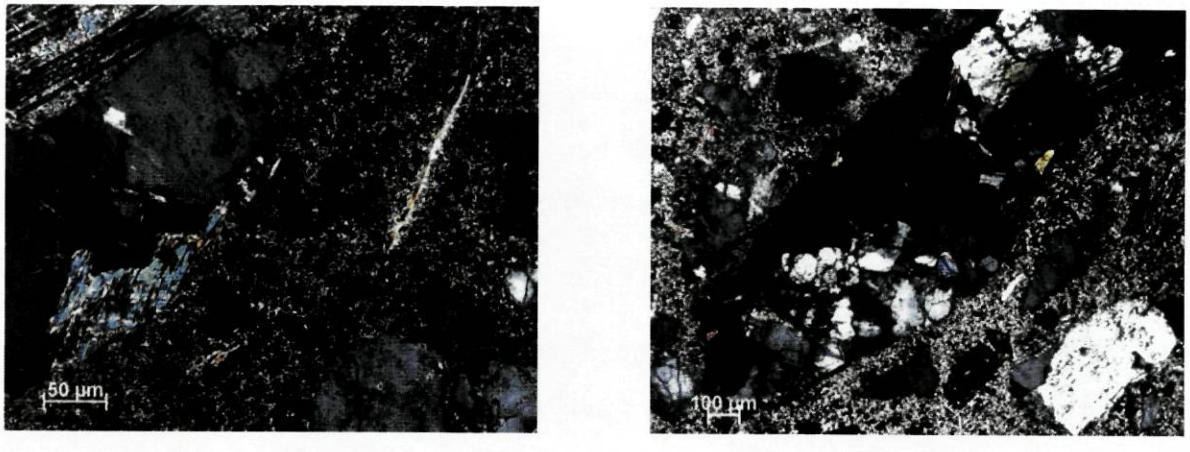
Ao microscópio a pasta de cimento mostra, em luz natural, uma cor castanha, heterogénea (Fotografia III.2.43). Foi detectada, por vezes, tonalidade mais escura junto a partículas de agregado fino e grosso. Em luz polarizada a pasta é castanha escura a

isotrópica. Verifica-se, no entanto, que a tonalidade é dependente da espessura da lâmina, sendo mais clara e irregular nas lâminas de espessura um pouco inferior.



Fotografia III.2.43 – Aspectos da pasta de cimento em luz natural (N//). A pasta tem tonalidade acastanhada heterogénea, por vezes mais escura junto às partículas de agregado.

Em algumas lâminas são visíveis, em nicóis cruzados, cristais de carbonato de cálcio na pasta de cimento, em especial junto aos poros e nas orlas das partículas de agregado. O seu aspecto é semelhante ao da calcite "em pipocas" (Sibbick e Crammond, 2003), já descrita, que revela a ocorrência de carbonatação do betão (Fotografia III.2.44), com o aspecto dourado característico, em luz polarizada.



Fotografia III.2.44 – Aspectos da carbonatação da pasta de cimento com a tonalidade dourada devida à existência de pequenos cristais de calcite "em pipocas".

Atendendo ao referido por Chatterji et al., 1986, quanto ao escurecimento da pasta relacionado com o empobrecimento em hidróxido de cálcio devido à sua dissolução ou à ocorrência de reacções álcali-sílica, foram feitas análises em EDS de diferentes zonas da pasta, com o objectivo de verificar se existe variação de composição. Seleccionaram-se

ao microscópio óptico locais para análise, que foram posteriormente visualizados ao MEV e analisados por EDS.

No local apresentado na Figura III.2.23 e Fotografia III.2.45, verifica-se que existe aumento de densidade da pasta da zona assinalada por F4 para F5. O teor em cálcio mantém-se idêntico nas duas zonas, mas verifica-se um forte aumento em silício e diminuição em alumínio. Este facto pode dever-se à existência de uma zona com maior concentração de partículas de aluminato de cálcio e outra com maior concentração em silicatos de cálcio na pasta de cimento, mas pode também relacionar-se com a proximidade relativamente à partícula de agregado. Aceitando a segunda hipótese, o enriquecimento em silício estaria de acordo com as referências na bibliografia à presença de reacção, sendo o silício proveniente do agregado.

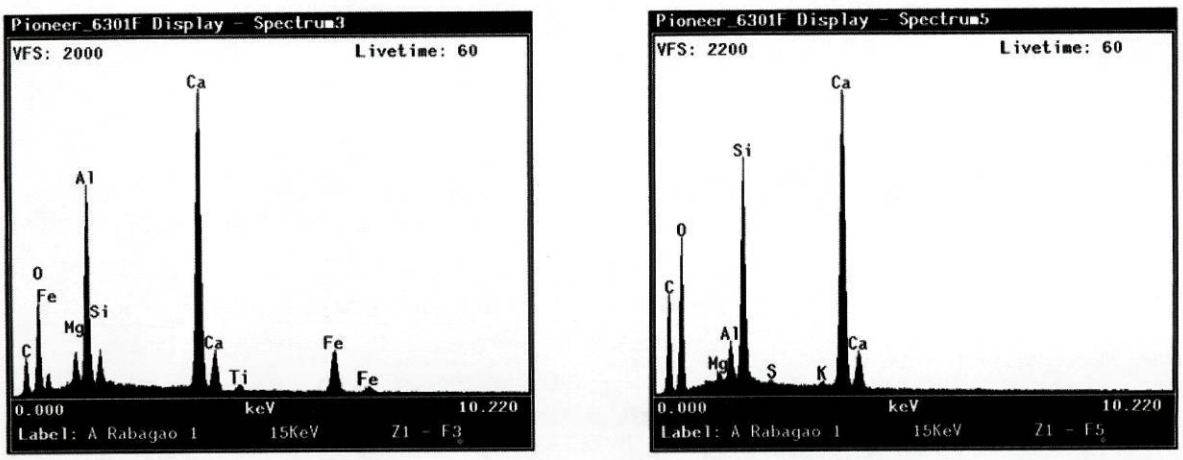
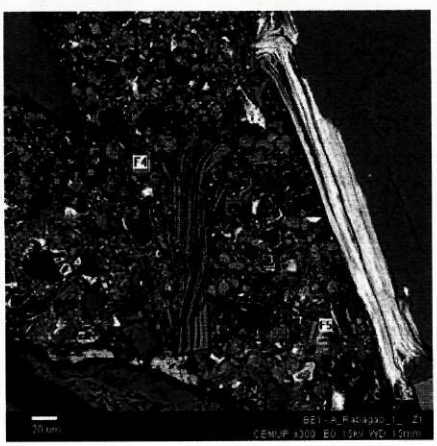


Figura III.2.23 – Espectros EDS correspondentes a dois locais da pasta de cimento.



Fotografia III.2.45 – Imagem, ao MEV, de um local em que se observou escurecimento da pasta de cimento junto a partículas de agregado.

A primeira hipótese parece, no entanto, mais aceitável, uma vez que a pasta se mostra muito heterogénea no local em que foi feita a análise F4 e que a análise neste

local foi dificultada pela existência de araldite, que ocupa os espaços mais escuros em volta do local estudado. O ponto identificado por F4 poderá, por isso, corresponder a uma partícula da pasta de cimento.

Foi testado um outro local em que se observou escurecimento da pasta junto ao agregado (Figura III.2.24) (Fotografia III.2.46). Nesta zona, para além dum aumento significativo de carbono, não se verificou alteração da composição, na qual predomina o silício e o cálcio, mantendo-se a proporção para as duas zonas analisadas.

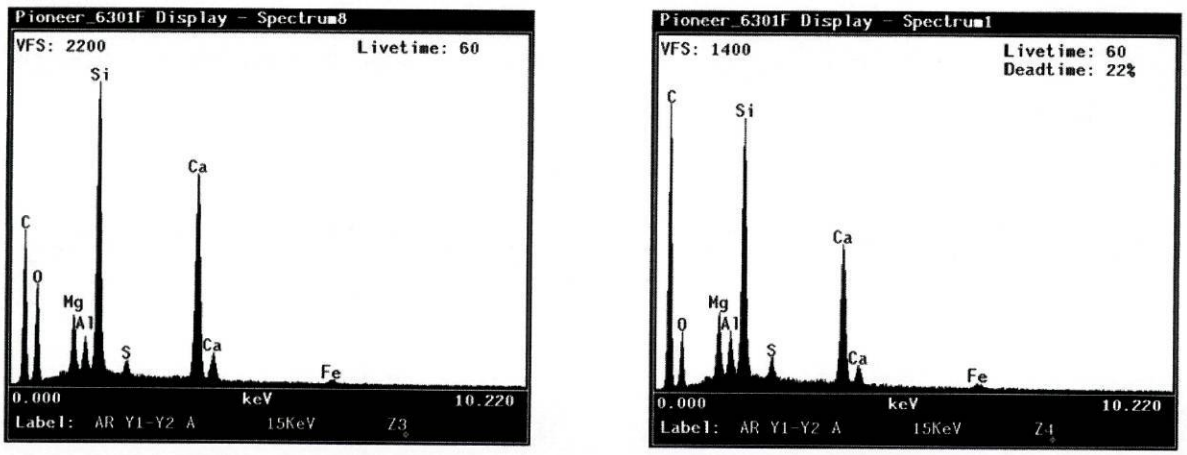
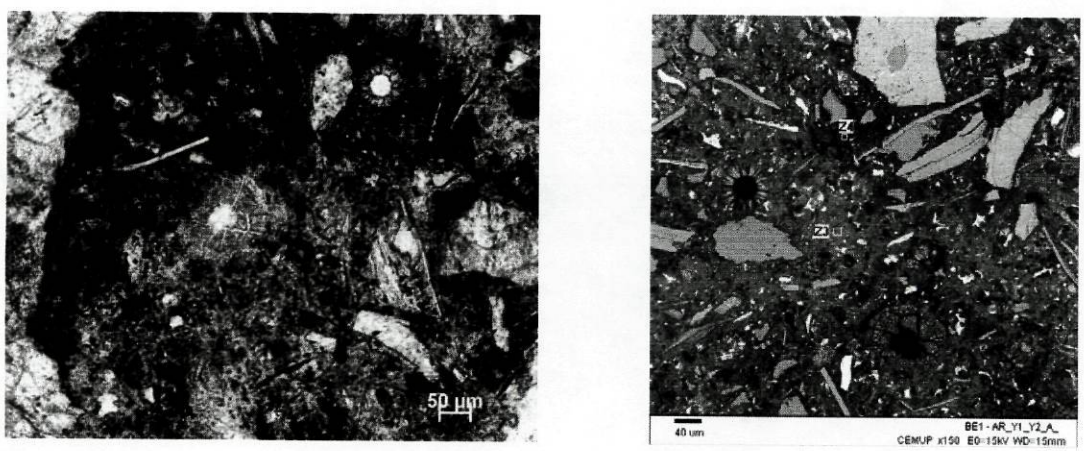


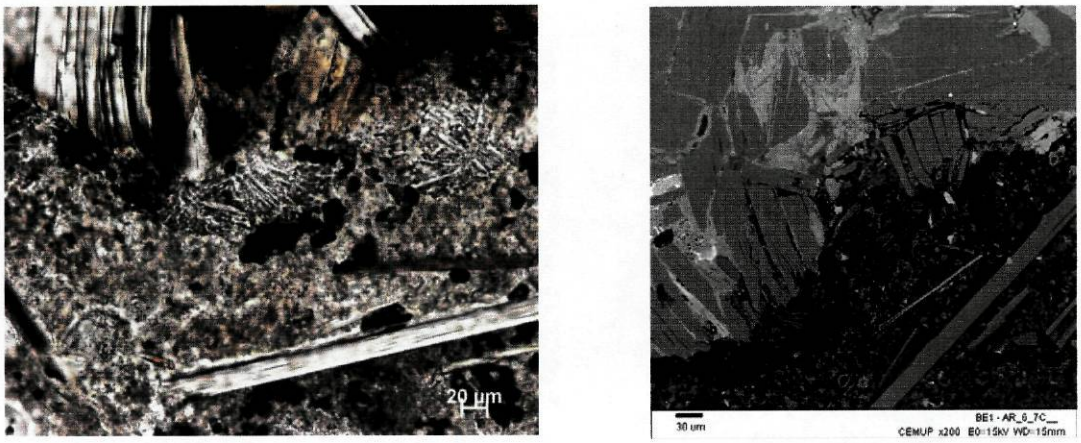
Figura III.2.24 – Espectros EDS correspondentes a dois locais da pasta de cimento com tonalidade diferente.



Fotografia III.2.46 – Imagens, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, de um local em que se observou escurecimento da pasta de cimento junto a partículas de agregado (análises Z3 e Z4 nos espectros da Figura III.2.24).

Encontraram-se, no seio da pasta de cimento, raros cristais aciculares de orientação aleatória de etringite (Fotografia III.2.47). Neste caso a etringite surge na vizinhança muito próxima de uma partícula de agregado com alteração e óxidos de ferro, com a qual pode estar geneticamente relacionada, ou seja, o enxofre necessário para a formação da

etringite pode ter origem na partícula de agregado por alteração do sulfureto de ferro (pirite).



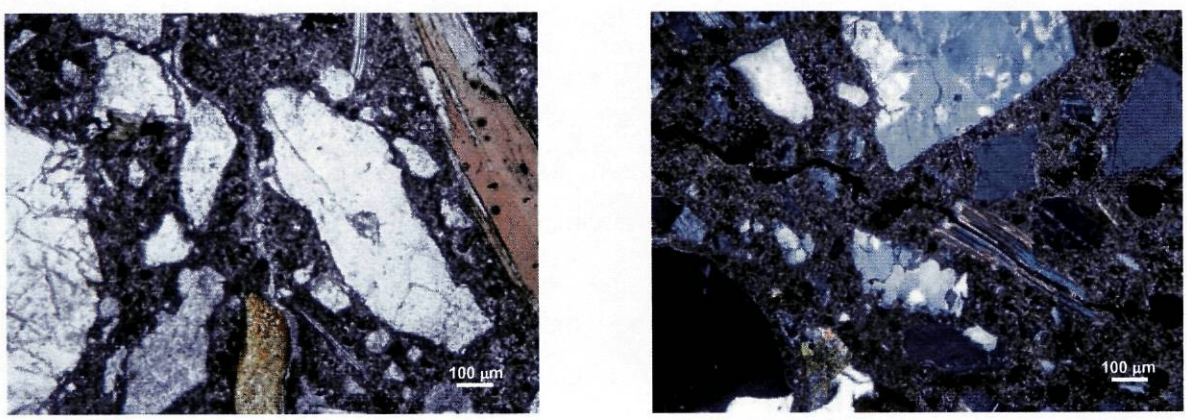
Fotografia III.2.47 – Aspecto, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, dos cristais de etringite presentes na pasta de cimento, relacionados com partícula de agregado.

5.4.3.5. Fissuras

5.4.3.5.1. Fissuras na interface pasta de cimento-agregado e atravessando a pasta

Conforme referido, são raras as fissuras na interface pasta de cimento-partículas de agregado. São fissuras que não contornam totalmente as partículas, ou seja, são descontínuas. Não foi encontrado preenchimento nestas fissuras.

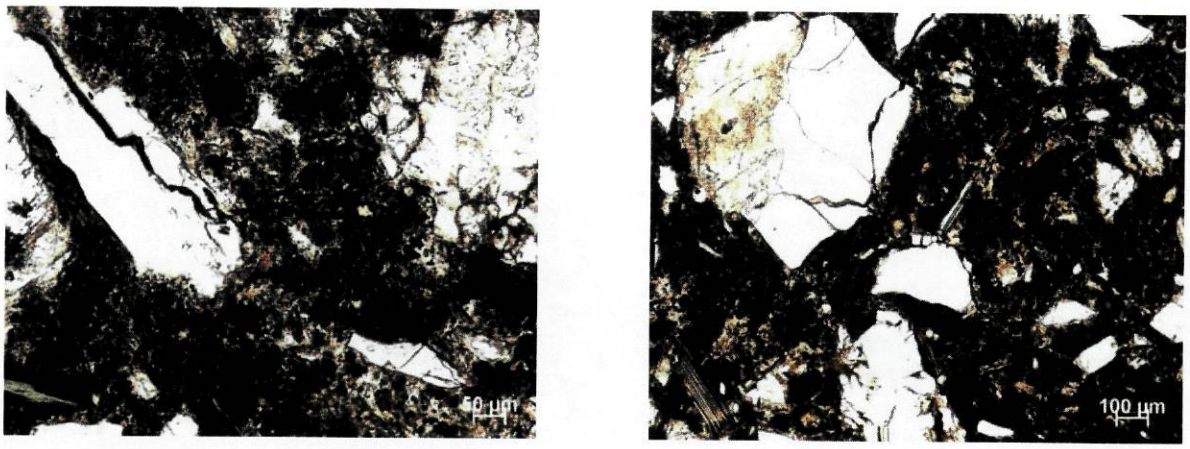
Existem raras fissuras, pouco extensas, na pasta de cimento. São fissuras irregulares, que por vezes atravessam partículas de agregado fino (Fotografia III.2.48). Não foi detectado qualquer produto de preenchimento nestas fissuras.



Fotografia III.2.48 – Imagens, ao microscópio óptico (N// e NX), de fissuras existentes na pasta de cimento e que, por vezes, atravessam partículas de agregado fino. Não contêm preenchimento.

A observação de uma lâmina produzida a partir da carote retirada da rampa exterior do encontro esquerdo, que mostrava fissuração macroscópica, permitiu visualizar a

existência de *map cracking* à escala microscópica (Fotografia III.2.49). São fissuras que atravessam partículas de agregado fino e irradiam para a pasta de cimento adjacente. Não apresentam preenchimento.



Fotografia III.2.49 – Imagens obtidas ao microscópio óptico (N//) da microfissuração do betão da rampa exterior do encontro esquerdo.

5.4.3.5.2. Fissuras que atravessam as partículas de agregado

Existem raras fissuras atravessando as partículas de agregado grosso. Estão preenchidas, em quase toda a extensão, por resina de preparação das lâminas. Foi, no entanto, encontrado pontualmente preenchimento, que foi observado ao MEV e analisado por EDS.

Em um dos raros casos em que foi detectado preenchimento, este é descontínuo e apresenta composição variável (Figura III.2.25) (Fotografia III.2.50). O material amorfo contém uma percentagem relativamente elevada de fósforo e cálcio, que poderá ter origem na apatite existente no granito, e mais baixa de silício e alumínio. O produto adjacente tem carácter fibroso e apresenta silício, cálcio e elevado teor de alumínio. Esta composição parece indicar que a fissura deveria estar presente na partícula de agregado, devido à operação de britagem, permitindo a circulação dos fluidos intersticiais, antes da presa do betão.

Existem outras fissuras muito finas, que mostram preenchimento de composição próxima da pasta de cimento (Figura III.2.26) (Fotografia III.2.51), que foram, provavelmente preenchidas antes da presa do betão. No caso analisado, a fissura atravessa uma partícula de albite e não se prolonga pela pasta. Mostra uma percentagem elevada de cálcio, que deverá ter origem na pasta de cimento.

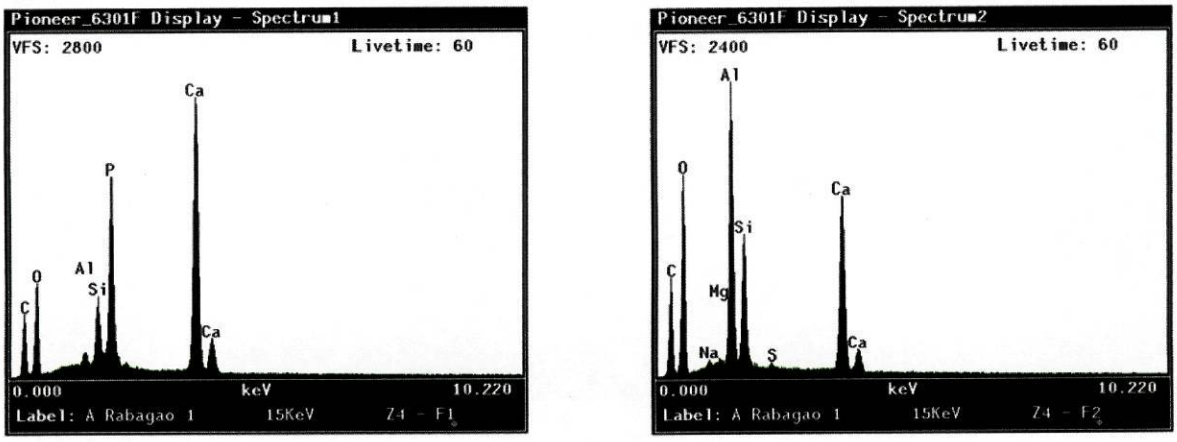
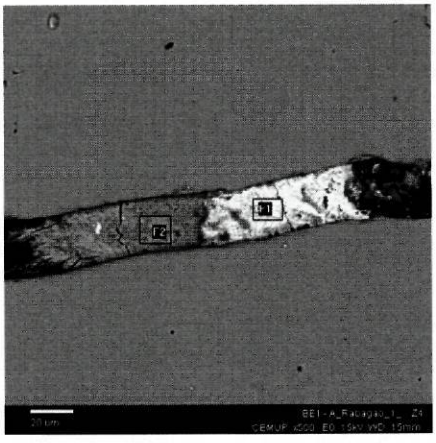


Figura III.2.25 – Espectros EDS dos produtos que preenchem uma fissura em partícula de agregado grosso.



Fotografia III.2.50 – Imagem, obtida ao MEV, da fissura que atravessa o agregado e é preenchida por um material de textura e composição variáveis. Os espectros EDS de F1 e F2 encontram-se na Figura III.2.25.

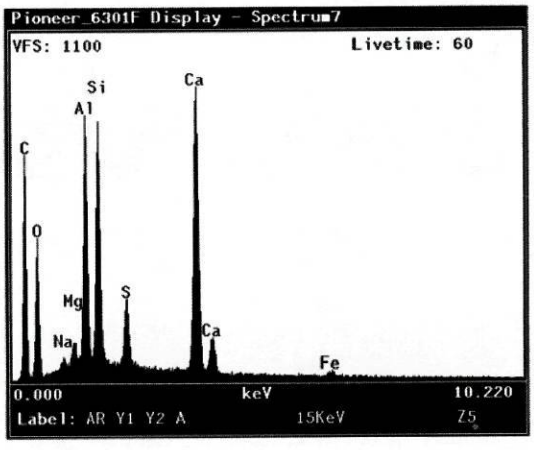
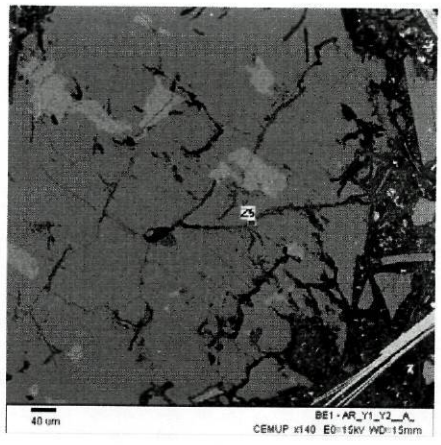


Figura III.2.26 – Espectro EDS do produto de preenchimento de uma fissura que atravessa o agregado grosso.



Fotografia III.2.51 – Imagem obtida ao MEV de fissura que atravessa o agregado e é preenchida por um material de composição semelhante ao da pasta de cimento. A fissura não se prolonga para a pasta de cimento.

Encontrou-se também preenchimento de uma fissura em grão de quartzo policristalino que constitui uma partícula de agregado fino. Esta fissura ocorre no limite de dois cristais e apresenta em luz natural um tom amarelado. A análise semiquantitativa em EDS permitiu verificar que no preenchimento existem, além de silício, pequenas percentagens de cálcio, ferro, alumínio e fósforo, que poderão resultar do ataque do fluido intersticial do betão (Figura III.2.27 e Fotografia III.2.52).

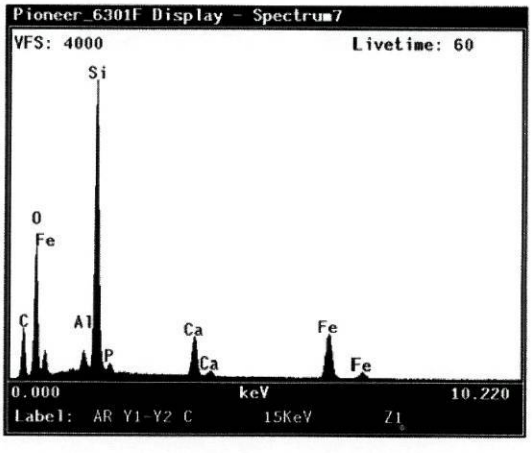
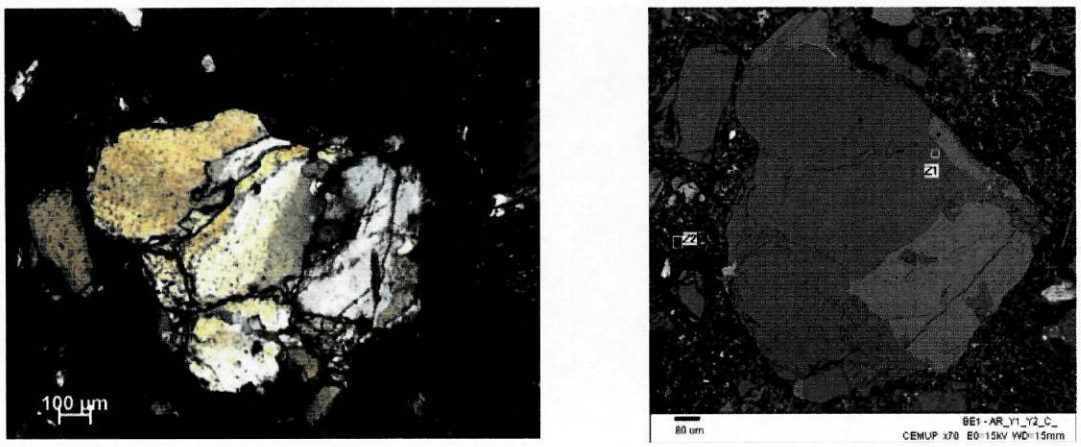


Figura III.2.27 – Espectro EDS do material de preenchimento da fissura que existe entre os limites dos cristais de quartzo.

Numa outra fissura (Figura III.2.28) (Fotografia III.2.53) que atravessa um cristal de ortoclase, encontrou-se um material fibroso, composto por alumínio e silício e pequenas percentagens de potássio e ferro. A estrutura fibrosa é semelhante à observada na Fotografia III.2.49. Este produto pode provir da pasta de cimento ou ter uma contribuição importante do mineral que atravessa, por dissolução do silício e do alumínio.



Fotografia III.2.52 – Imagens, ao microscópio óptico (NX) e ao MEV, de uma partícula de quartzo que constitui o agregado fino e apresenta coloração amarelada nos bordos dos cristais.

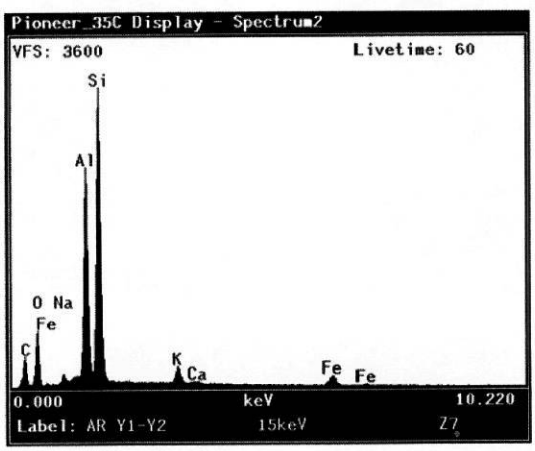
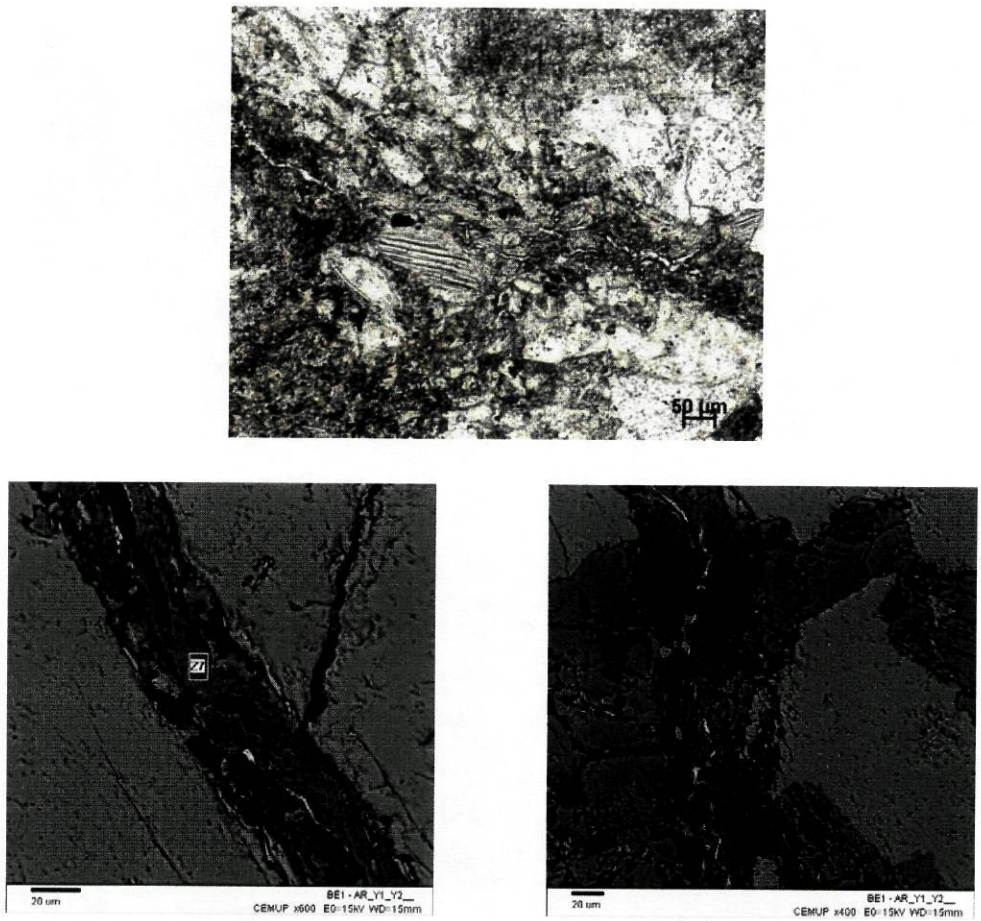


Figura III.2.28 – Espectro EDS do material que preenche a fissura que atravessa o agregado (cristal de ortoclase).

Composição semelhante, relativamente ao silício e ao alumínio, foi detectada em outros locais das lâminas examinadas. É o caso de uma orla num grão de feldspato de dimensão areia, no contacto com a pasta de cimento (Figura III.2.29) (Fotografia III.2.54).

A composição desta orla (Al-Si) deverá estar relacionada com as condições de pH do meio. De acordo com a representação da Figura I.22, verifica-se que a solubilidade de SiO_2 e de Al_2O_3 é máxima para pH de cerca de 10, depositando para valores inferiores e superiores. A solubilização destes óxidos, a partir dos agregados, indica que estará presente uma solução intersticial de pH próximo de 10. No entanto, quando em contacto com a pasta de cimento, o pH deverá ser de novo mais elevado, conduzindo à deposição dos óxidos. Orlas constituídas por alumínio e silício existem ainda noutros casos, no contacto com a pasta de cimento.



Fotografia III.2.53 – Imagens, ao microscópio óptico e ao MEV, da fissura que atravessa o agregado e é preenchida por um material de textura fibrosa.

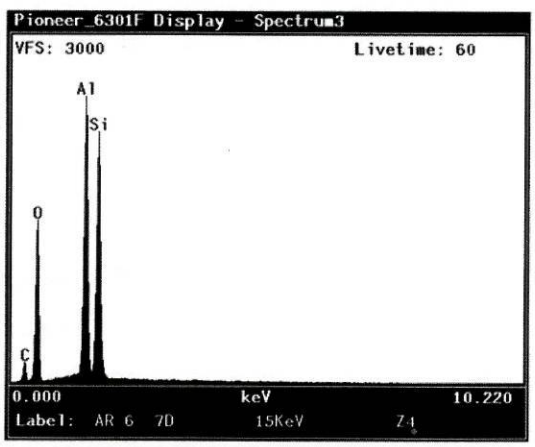
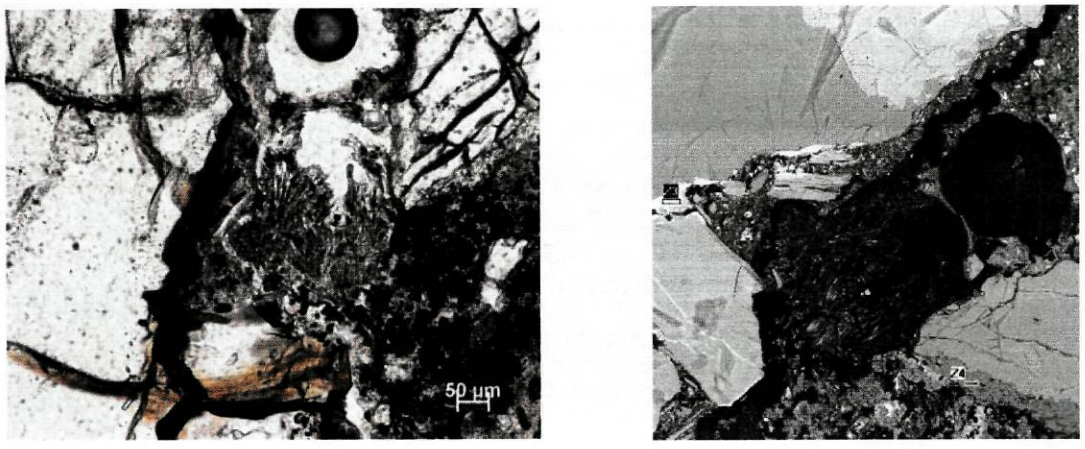


Figura III.2.29 – Espectro EDS do material que forma uma orla num grão de feldspato de dimensão areia.

Na imagem são visíveis dois poros, estando um destes preenchido parcialmente por etringite. Existe também uma fissura que atravessa a pasta, sem preenchimento.



Fotografia III.2.54 – Imagens, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, de uma orla composta por silício e alumínio, no contacto de um grão de feldspato com a pasta de cimento (Z4).

5.4.3.6. Poros

Os poros são em geral circulares e de pequenas dimensões, com distribuição homogénea na pasta de cimento. Não se verifica qualquer associação entre a disposição dos poros e a localização das partículas de agregado.

Os poros não apresentam, de forma geral, preenchimento. No entanto, alguns poros mais pequenos estão totalmente preenchidos por um mineral que se apresenta fibroso, com cristais de orientação aleatória e fissuras de retracção. Em outros poros, existem cristais aciculares que os preenchem parcialmente e crescem perpendicularmente às paredes. Em ambos os casos, a observação ao MEV e análise EDS mostraram tratar-se de etringite (Figura III.2.30) (Fotografia III.2.55).

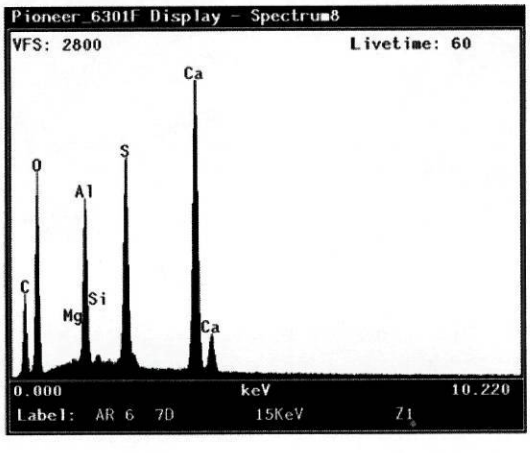
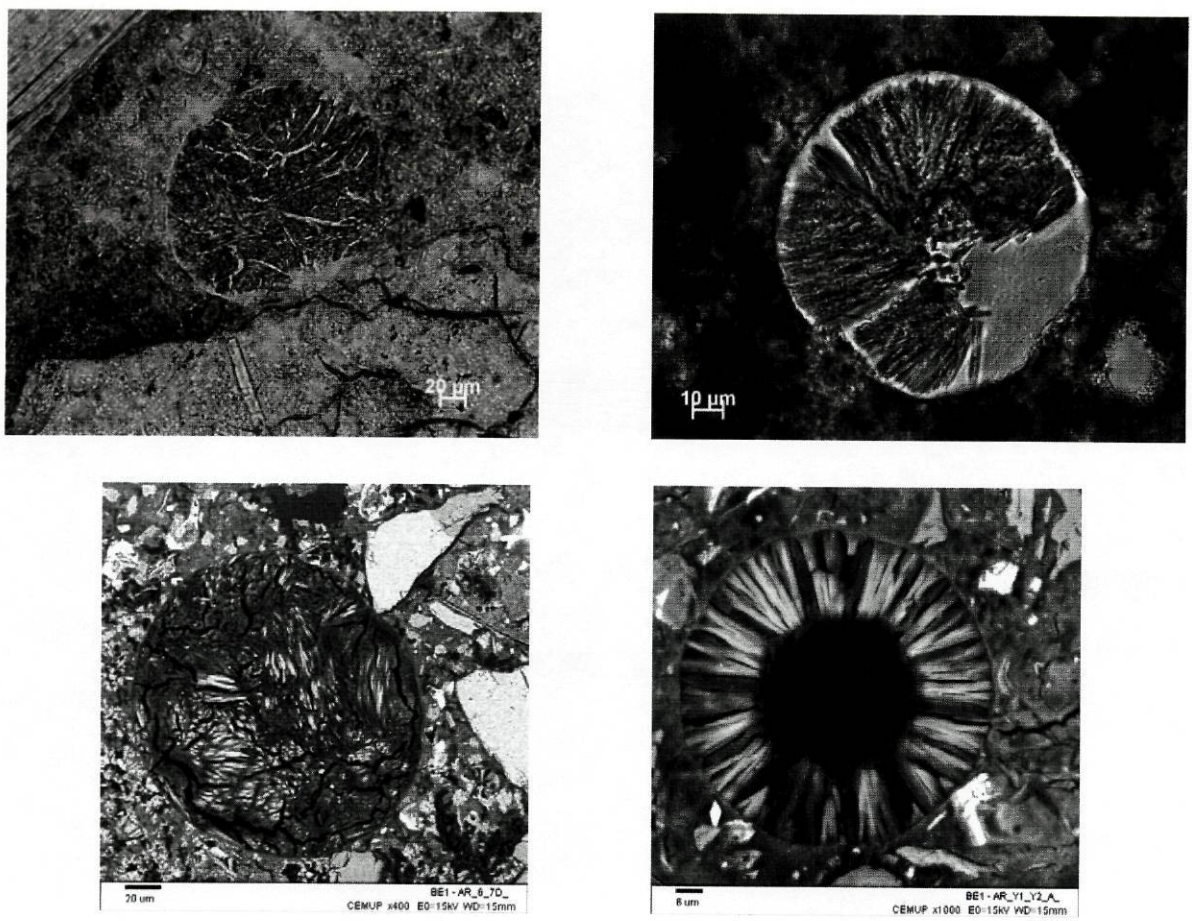


Figura III.2.30 – Espectro, EDS, dos cristais de etringite que preenchem total ou parcialmente os poros do betão.

Foram feitas análises dos cristais em várias lâminas e verificou-se que nem sempre a composição encontrada correspondia à composição bem definida da etringite. É o caso

apresentado nas Figura III.2.31 e Fotografia III.2.56, em que se encontram silício e vestígios de sódio, em cristais semelhantes aos acima apresentados, que preenchem totalmente o poro. Neste caso, poderá admitir-se a ocorrência simultânea de gel sílico-alcalino, atendendo ao elevado conteúdo em silício e à presença de sódio, que não existe na taumasite. Neste caso, a presença de etringite deverá estar associada à ocorrência de reacções álcali-sílica, que a precedem no tempo. Existe uma fissuração fina que parte deste poro preenchido e que deverá ter origem na expansão do produto no interior do mesmo, por absorção de água, uma vez que tanto a etringite como o gel são expansivos por hidratação.



Fotografia III.2.55 – Imagens dos cristais de etringite, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV. A análise EDS mostrou composição idêntica para os dois casos, embora a forma e distribuição dos cristais sejam diferentes.

A coexistência de gel sílico-alcalino e etringite foi confirmada na lâmina correspondente ao betão da rampa exterior do encontro esquerdo da abóbada. Os cristais de etringite, que se encontram próximo das paredes dos poros, apresentam aqui formas mais alongadas. O interior dos poros mostrou um preenchimento que se verificou ser constituído por gel amorfo (Figura III.2.32) (Fotografia III.2.57). O mesmo tipo de

preenchimento foi encontrado em outros poros da mesma lâmina, indicando que neste local poderão ter ocorrido reacções álcali-sílica mais disseminadas, o que estará relacionado com a fissuração mais intensa neste local e a exposição a condições exteriores, mais severas.

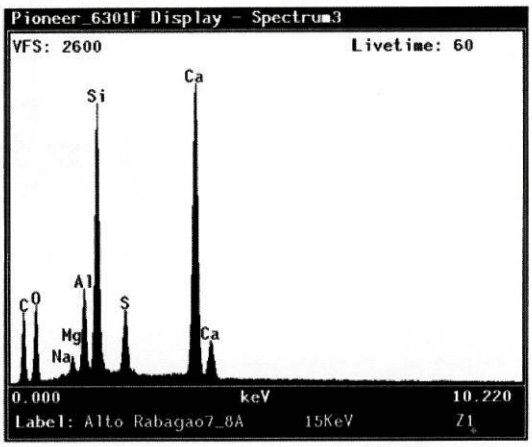
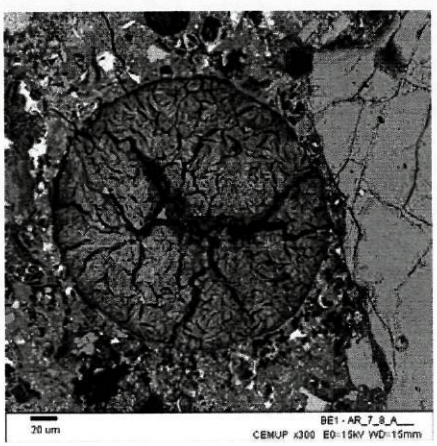


Figura III.2.31 – Espectro EDS dos cristais que preenchem totalmente os poros do betão e que poderão conter gel sílico-alcalino, para além de etringite.



Fotografia III.2.56 – Aspecto dos cristais de etringite que preenchem um poro do betão e que coexistem, possivelmente, com gel sílico-alcalino. Observam-se finas fissuras na pasta, em volta do poro.

5.4.3.7. Análise de amostras de betão ao MEV

Foram retirados pequenos fragmentos das carotes de betão para observação ao MEV e análise EDS dos produtos encontrados.

Os fragmentos foram obtidos, por corte, nos locais em que se distinguiam macroscopicamente poros com preenchimento.

As amostras foram colocadas sobre pequenos suportes cilíndricos e coladas com araldite para permitir a análise. Foram revestidas a ouro.

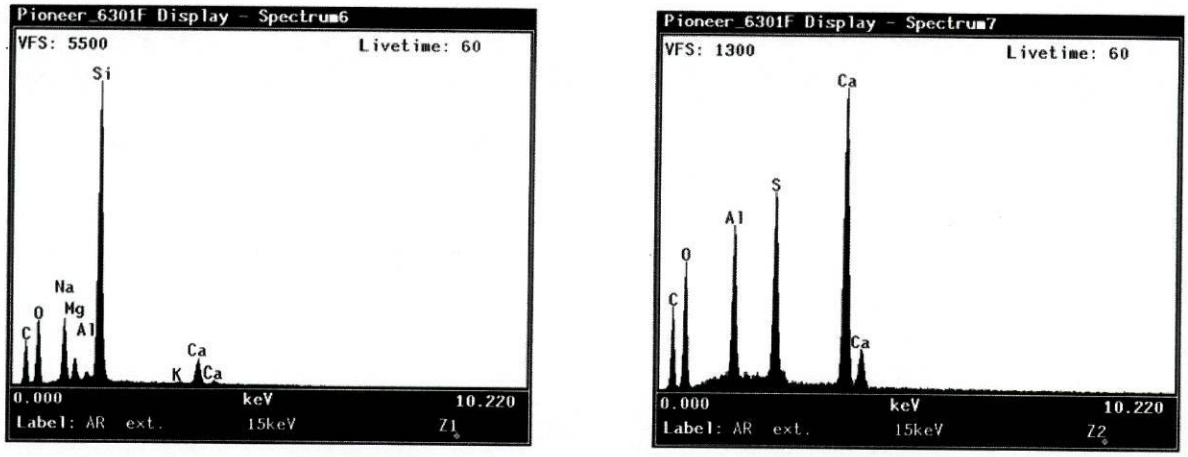
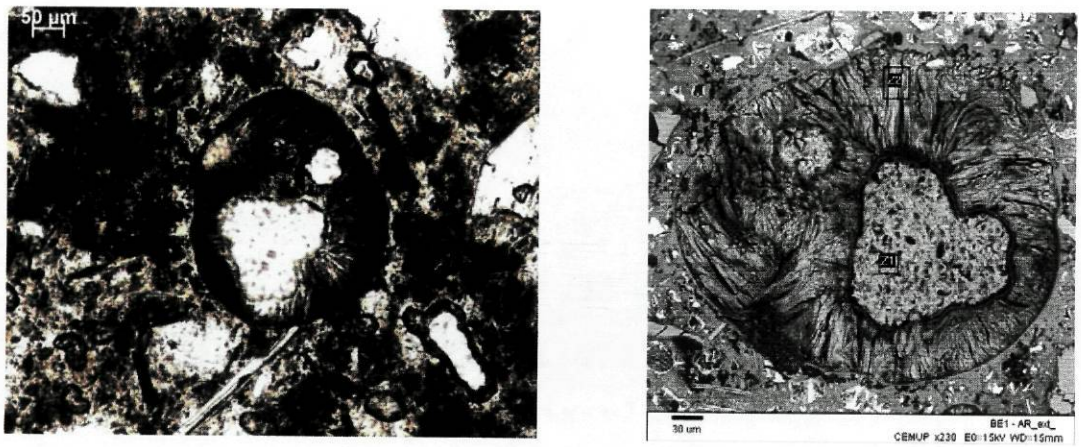


Figura III.2.32 – Espectros EDS do gel e dos cristais de etringite existentes em poro do betão. A análise foi realizada sobre a lâmina delgada da carote retirada da rampa exterior do encontro esquerdo.



Fotografia III.2.57 – Aspecto, ao microscópio óptico (N//) e ao MEV, dos cristais de etringite que preenchem parcialmente um poro, envolvendo gel sílico-alcalino. A composição semiquantitativa encontra-se na Figura III.2.32.

Observaram-se vários poros com preenchimento parcial por cristais aciculares de etringite (Figura III.2.33) (Fotografia III.2.58).

Estes cristais têm hábito um pouco diferente do encontrado no betão da barragem do Cabril. Não ocorrem de cristais aciculares ou tabulares agrupados, mas agulhas longas, individualizadas, e, por vezes, de orientação aleatória.

Os poros, que estão preenchidos quase na totalidade, mostram uma lacuna entre os cristais de etringite e a parede do poro, o que poderá dever-se à ocorrência de dessecação da etringite após cristalização. O aspecto encontrado nestes poros difere do que predomina nos poros observados nas lâminas delgadas, que pareciam ter cristais fibrosos entrelaçados ou cristais predominantemente perpendiculares à parede dos poros.

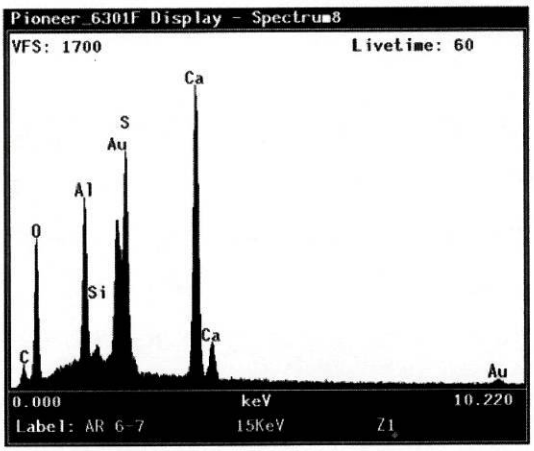
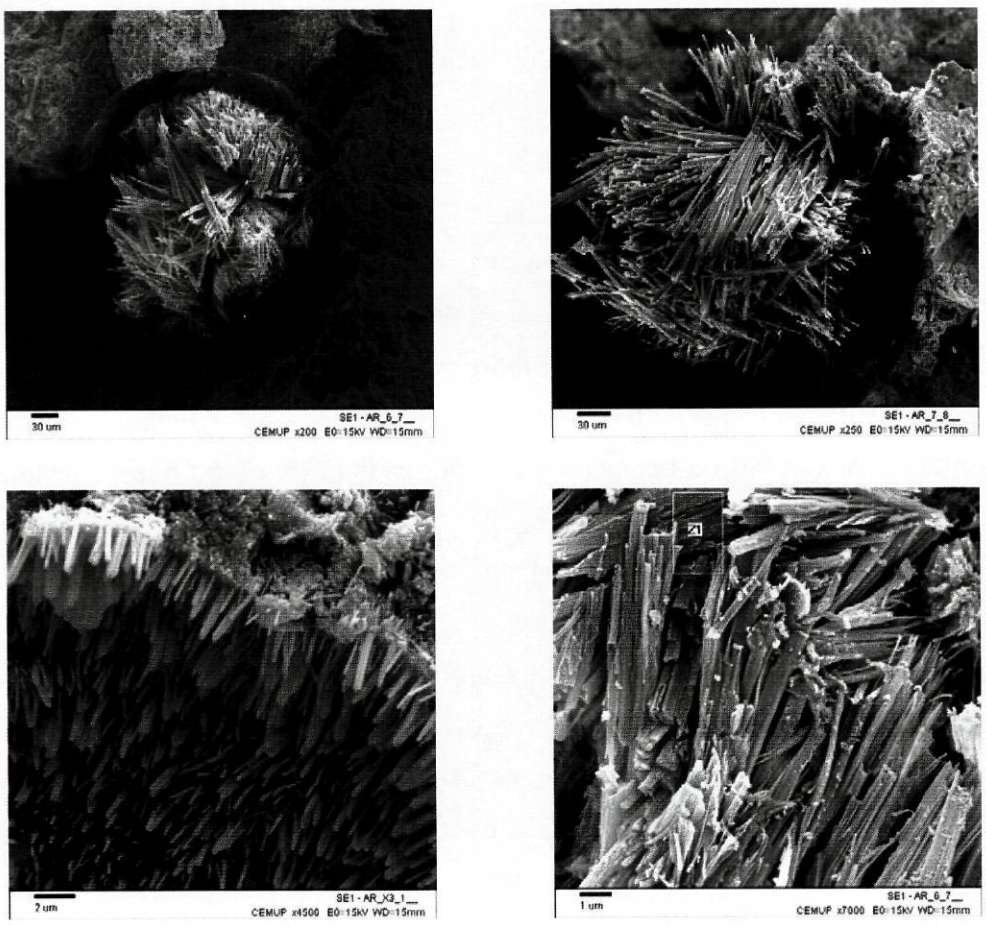


Figura III.2.33 – Espectro EDS correspondente a cristais de etringite que preenchem parcialmente alguns poros do betão.



Fotografia III.2.58 – Imagens, ao MEV, de cristais aciculares de etringite que se encontram nos poros do betão. Por vezes existem vazios entre os cristais e a parede dos poros, o que poderá ser atribuído a dessecação da etringite.

5.5. Conclusões

A barragem do Alto Rabagão apresenta três trechos de características estruturais diferentes – dois em gravidade e um em abóbada – contendo um conjunto de galerias que foram inspeccionadas para averiguação do estado de conservação do betão.

Procuraram-se manifestações de degradação que pudessem estar relacionadas com a aplicação do granito da pedreira de Pisões como agregado, para avaliar, em obra, o comportamento desta rocha.

Conforme referido anteriormente, a metodologia adoptada incluiu a observação de superfícies de betão expostas, a colheita de amostras de produtos exsudados e a análise petrográfica do betão, a partir de amostras colhidas por carotagem.

A inspecção permitiu observar alguns indícios de degradação do betão. A manifestação mais relevante é relativa à ocorrência de cavidades cónicas do tipo *pop-out*, em especial na galeria à cota 865,15, no encontro esquerdo do trecho em abóbada e localmente na gravidade esquerda.

A galeria de drenagem da gravidade direita mostra, no ramal de montante, raras exsudações esbranquiçadas ou acinzentadas.

As eflorescências concentram-se fundamentalmente sobre as juntas alargadas Y1 e Y2 do encontro esquerdo, onde o betão aparenta uma qualidade inferior, com menor conteúdo em argamassa e blocos frequentes de granito alterado. Existem em zonas de humidade mais intensa, dada a aparente maior porosidade do betão que constitui estas juntas.

Existem também algumas escorrências de carbonato de cálcio que coincidem, em geral, com juntas verticais e horizontais.

No encontro esquerdo, foi detectada uma área restrita em que existe fissuração em *map cracking*, tanto na parede interior de uma das galerias, como na parede exterior do bloco. Enquanto a parede interior contém fissuras superficiais, na parede exterior as fissuras prolongam-se em profundidade para pequenas cavernas alongadas e mostram escorrências superficiais de carbonato de cálcio.

Os produtos relacionados com os *pop-outs* foram analisados, tendo-se concluído que, em geral, está presente gel sílico-alcalino, por vezes com cálcio e alumínio. Nos dois casos em que foi realizado o estudo do betão adjacente aos *pop-outs*, identificaram-se partículas de uma rocha de matriz siliciosa, contendo sílica micro a criptocristalina. A realização de análises semiquantitativas parece indicar uma relação entre a existência de *pop-outs* e a ocorrência de reacções álcali-sílica localizadas, relacionadas com a

presença destas partículas de dimensão areia grossa, potencialmente reactivas. O alumínio poderá provir quer da pasta de cimento quer dos agregados, dada a abundância de alumino-silicatos na rocha. A existência de alumínio parece conduzir à conclusão que poderá ocorrer neste caso uma reacção lenta/retardada do tipo álcali-silicato.

As exsudações apresentam-se sólidas e fortemente aderentes ao betão. Mostram, em análise semi-quantitativa, gel sílico-alcalino, em que predomina o silício e os álcalis têm baixo teor. Por vezes contém também cálcio, em quantidades muito pequenas. Existem com frequência pequenos cristais de cálcio ou sódio associados, crescendo sobre o gel amorfo. A presença de cálcio neste gel sugere que deverá ter havido um percurso do gel ao longo da pasta, adquirindo o cálcio desta. Por exposição à atmosfera, o sódio e o cálcio tendem a carbonatar e a formar os cristais observados sobre o gel.

A análise petrográfica do betão permitiu confirmar que o agregado provém, predominantemente, do granito da pedreira de Pisões. Este granito forma os agregados finos e grossos e apresenta-se em partículas de formas angulosas e textura rugosa a cristalina. Os contactos com a pasta de cimento estão, em geral, fechados e mostram boa aderência. Foram detectados raros fragmentos de granitos de grão ligeiramente mais fino e mais grosseiro do que o do granito da pedreira de Pisões. Por vezes é visível a orientação dos minerais, embora incipiente. Os feldspatos encontram-se, com frequência, ligeiramente alterados a alterados.

Os agregados finos são provenientes do granito e apresentam abundantes grãos monominerálicos, em especial de feldspato e de moscovite, esta em cristais tabulares alongados.

São muito raras as fissuras que atravessam a pasta de cimento ou as partículas de agregado. Destas fissuras, destacam-se dois casos em que foi identificado ao MEV/EDS material de preenchimento constituído por gel sílico-alcalino semicristalino. Um produto com idêntica composição foi detectado em fissura que atravessa a rocha adjacente ao *pop-out* referido.

A pasta de cimento mostra-se acastanhada e com tonalidade heterogénea. Foram feitas análises em diferentes porções da pasta, incluindo zonas mais próximas de partículas de agregado, em que a pasta se mostrava mais densa e escura. Estas análises apresentaram resultado variável. Num dos casos, regista-se um aumento na proporção de silício, o que pode indiciar a presença de reacções álcali-sílica com enriquecimento em silício em volta da partícula reactiva. Em outros casos, as análises não parecem apresentar qualquer relação com eventuais reacções internas no betão, sendo os resultados inconclusivos.

Os poros apresentam uma distribuição homogénea em todas as carotes de betão. Ao microscópio verificou-se que alguns destes poros contêm preenchimento parcial ou total por etringite. Predominam os cristais de carácter vermicular, não sendo evidente o crescimento perpendicular às paredes dos poros, que ocorre em poucos casos. São frequentes os cristais de orientação aleatória, que preenchem totalmente os poros, como pôde ser confirmado por análise de pequenos fragmentos de betão retirados das carotes. A orientação desordenada dos cristais e o descolamento relativamente às paredes dos poros são, nestas amostras, mais evidentes.

A composição encontrada nem sempre corresponde à da etringite, pelo que poderá existir simultaneamente taumasite ou gel sílico-alcalino. A presença de álcalis, embora em percentagem muito baixa, parece indicar tratar-se de gel, levantando a questão da eventual relação entre o ataque por sulfatos e a reacção álcali-sílica discutida na Parte I.

Este facto é mais evidente no betão retirado da rampa exterior do encontro esquerdo, no qual foi possível identificar gel sílico-alcalino amorfo em poros, rodeado por cristais de etringite.

Capítulo 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO

Dos três factores necessários para que ocorram reacções álcali-sílica mereceu destaque no trabalho experimental acerca da barragem de Alto Rabagão, à semelhança do realizado para a barragem do Cabril, o estudo dos agregados e eventual identificação de formas de sílica potencialmente reactiva.

A rocha da pedreira foi analisada macroscópica e microscopicamente. Trata-se do granito cartografado na folha 1:50.000 como granito de Pisões e referido na bibliografia sobre a zona como apresentando uma textura orientada e, por vezes, cataclástica. A observação macroscópica permitiu distinguir uma orientação incipiente dos principais minerais que formam a rocha. No exame microscópico foi detectado quartzo com extinção ondulante e bordos suturados e, em zonas restritas, quartzo microcristalino de recristalização. A presença de quartzo microcristalino permite caracterizar, do ponto de vista petrográfico, o granito como potencialmente reactivo. Verifica-se, no entanto, que esta conclusão não é corroborada pelos ensaios de reactividade potencial aos álcalis realizados com esta rocha, que forneceram em todos os casos a indicação de não reactividade para o granito da pedreira de Pisões. Realça-se, mais uma vez, o facto de, nas normas para realização dos ensaios, ser referido que os resultados devem ser confirmados por outro método, como a análise petrográfica.

O estudo microscópico do betão da barragem forneceu informação adicional sobre o agregado utilizado no fabrico do betão. Detectaram-se algumas partículas de granito de grão um pouco mais fino, de granito com indícios de tectonização e ainda partículas de uma rocha que se caracteriza pela matriz siliciosa criptocristalina e pela fracturação dos cristais. A última, que forma grãos de 20-30 milímetros e apresenta características que permitem identificá-la como potencialmente reactiva, não foi encontrada na pedreira e, por essa razão, não foi submetida a ensaios de avaliação da reactividade potencial.

O segundo factor a considerar refere-se à exposição ambiental da estrutura. Tratando-se de uma estrutura construída com o objectivo de reter água, a exposição à humidade é elevada, e também o risco a considerar quanto à ocorrência de reacções álcali-sílica. Esta exposição é mais marcada no betão exposto à superfície e, por isso, são encontrados vestígios de *map cracking* na parede exterior de jusante do encontro esquerdo. O betão das galerias, sendo um betão interior sem exposição directa ao ambiente, mostra-se bem conservado e, apenas pontualmente, existem manifestações de deterioração.

O teor de álcalis original do cimento não é conhecido e as tentativas para a sua determinação não são seguras, dado não ser garantida a separação total das partículas de agregado de dimensão areia relativamente à pasta de cimento. O resultado obtido por análise química clássica é, assim, muito elevado, e não deverá corresponder ao teor real inicial. Se assim fosse, a quantidade de álcalis produziria uma forte reacção, desde que houvesse sílica reactiva disponível.

Face às condições expostas, e admitindo que o teor em álcalis seria substancialmente inferior ao determinado na análise química, e mais próximo do valor obtido por microssonda, procurou-se analisar o comportamento do betão em obra, no que respeita à aplicação do agregado estudado.

Com este objectivo, foi feita a inspecção da estrutura para detecção de indícios de deterioração e colhidas amostras para exame em laboratório. As principais manifestações *in situ* são constituídas pela ocorrência de cavidades cónicas, que se identificaram como *pop-outs*, pela presença de exsudações e de *map cracking*, este em áreas limitadas.

O exame microscópico permitiu caracterizar o gel sílico-alcalino presente nos *pop-outs* e nas exsudações do ponto de vista da morfologia, textura e composição química semiquantitativa. O gel é constituído por silício e tem pequenas percentagens de sódio e potássio. Em alguns casos foram também detectados cálcio e alumínio.

A observação das carotes e das lâminas delgadas do betão permite deduzir que a existência de gel é um fenómeno superficial, dado que não foram encontrados indícios de gel no interior do betão, excepto raramente em fissuras que atravessam partículas de agregado e no betão da rampa exterior do encontro esquerdo. Por outro lado, os *pop-outs*, fenómeno também superficial, parecem estar associados a partículas de rocha siliciosa microcristalina considerada potencialmente reactiva, de acordo com as normas aceites em vários países. A presença de cálcio traduz um percurso do gel através da pasta de cimento. Este elemento liberta-se à superfície e sofre carbonatação, como pode ser verificado pelos cristais ricos em cálcio que se formam sobre o gel. A presença de alumínio poderá também ser devida a este percurso na pasta de cimento, mas alerta para uma outra hipótese relacionada com a ocorrência de reacções álcali-silicato, mais prováveis em rochas graníticas.

A existência de reacções não parece ter afectado a resistência à compressão uniaxial do betão, que apresenta valores elevados.

A presença de gel, traduzindo a ocorrência de reacções álcali-sílica ou álcali-silicato, põe em evidência as limitações dos ensaios de reactividade actualmente utilizados. A

petrografia é o método preferencial para avaliação da reactividade potencial das rochas e, além disso, a sua aplicação é essencial no estudo de betão do qual não foi acompanhado o fabrico ou restam dúvidas quanto aos agregados utilizados. Verifica-se, à semelhança da barragem do Cabril, que os indícios de reacção são mais frequentes nas cotas mais elevadas da estrutura.

O exame da barragem do Alto Rabagão revela que a presença de manifestações de deterioração atribuíveis a reacções álcali-agregado é, actualmente, pontual. Apesar de ter sido, em princípio, utilizado agregado com a mesma proveniência nos três trechos que constituem a barragem, verifica-se que as exsudações existem essencialmente na gravidade direita, enquanto os *pop-outs* estão visíveis na galeria à cota 865,15 da abóbada, no encontro esquerdo e em dois blocos da gravidade esquerda.

As eflorescências são pouco frequentes e situam-se sobre juntas alargadas, nas quais o betão está mais húmido e apresenta características diversas da restante estrutura. A presença de cristais ricos em sódio, que deverão corresponder a trona, dada a sua composição e hábito, pode estar relacionada com a evolução do gel sílico-alcalino e, dada a sua densidade, eventualmente camuflar a presença de exsudações.

A etringite surge esporadicamente em poros e raramente em fissuras. Parece aproveitar o espaço livre para cristalizar, dado que se detectaram raras fissuras resultantes do desenvolvimento dos cristais. Deverá tratar-se de etringite secundária.

Conclui-se, do exposto, que as reacções são localizadas, superficiais e deverão estar associadas à ocorrência pontual de partículas de agregado potencialmente reactivo. As variações texturais do agregado podem justificar que a reacção não seja alargada no espaço e que esteja cingida à ocorrência de quartzo microcristalino, pouco comum no granito, ou da rocha de matriz microcristalina, não identificada na pedreira.

PARTE IV

DISCUSSÃO

PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No presente trabalho procurou fazer-se uma análise do estado actual do conhecimento sobre as reacções álcali-agregado e as características dos agregados que podem condicionar o comportamento do betão.

Esta análise segue-se a uma primeira parte introdutória em que se entendeu ser interessante fazer uma apresentação breve acerca de:

- Principais características do betão;
- Propriedades das rochas e seu interesse como agregados para betão.

Fez-se, de seguida, uma referência aos principais mecanismos de deterioração do betão e às reacções que podem ocorrer entre a pasta de cimento e as partículas de agregado, relacionadas com a natureza destas.

Mereceram destaque as manifestações de deterioração que podem ser consideradas no diagnóstico das reacções álcali-agregado.

Procurou-se sublinhar o papel da petrografia e das técnicas petrográficas na caracterização do betão, em especial na identificação de indícios de reacção.

O trabalho experimental foi desenvolvido em duas vertentes principais:

- A caracterização de rochas como agregado;
- A detecção de manifestações de reacção em betões nos quais foram aplicadas as rochas estudadas.

Este trabalho visou comparar as características petrográficas, consideradas actualmente de maior interesse na avaliação de um agregado, com o comportamento efectivo em obra. Com este objectivo, foram estudadas duas estruturas, construídas há algumas dezenas de anos, procurando, em cada uma, encontrar indícios de deterioração que se relacionassem com o comportamento das rochas utilizadas como agregado. Não foram contempladas outras causas de deterioração, nem foi dada atenção especial ao comportamento estrutural das obras, relacionado com outros factores que eventualmente possam causar danos.

Atendeu-se ao facto de se tratar de uma tese no âmbito da Geologia, não trabalhando em pormenor nem o que se refere aos mecanismos químicos das reacções, normalmente discutidos por especialistas nessa área da ciência, nem às consequências estruturais, avaliadas tradicionalmente por aqueles que dominam os temas de Engenharia Civil.

A recolha bibliográfica efectuada permitiu verificar que o tema "reacções álcali-agregado" está longe de ser esgotado e continua a ser de grande interesse e de intervenção multidisciplinar.

Não existe um mecanismo de reacção universalmente aceite, conforme apresentado na Parte I, páginas 63 a 67. Apesar da extensa bibliografia sobre o assunto, não há ainda consenso quanto às características de uma rocha que condicionam a sua reactividade. Por esta razão, cada caso é um caso e não existe uma listagem que tipifique uma determinada rocha, a partir do conhecimento da sua origem ou da designação petrográfica tradicionalmente atribuída, quanto à sua reactividade. Também os ensaios de laboratório de avaliação da reactividade têm limitações conhecidas, em especial para as rochas que se considera poderem produzir reacções lentas/retardadas no seio do betão.

Não obstante os indícios a considerar no diagnóstico das reacções estejam, em linhas gerais, bem definidos, não pode ser afirmado, do ponto de vista da petrografia, que a identificação ao microscópio óptico do gel resultante de reacções álcali-sílica seja inequívoca, para além de que a reacção pode estar presente sem que o gel seja evidente, e pode ocorrer gel sem que tal signifique a existência de danos na estrutura.

A composição do gel é variável, tanto em termos dos elementos que podem estar presentes como das respectivas proporções, o que levanta uma outra questão: não existe uma fórmula estequiométrica para a composição do gel, designado sílico-alcalino.

Considerando estas diferentes fontes de incerteza, no trabalho desenvolvido atendeu-se às variáveis que poderiam ser avaliadas. O estudo foi realizado em paralelo para os dois casos de obra, com vista à possível comparação de resultados.

Assim, a primeira fase consistiu na caracterização das rochas aplicadas como agregado. Foi utilizado, nos dois casos, o granito. Esta rocha é considerada em vários países como inócua, quanto à reactividade. No entanto, são numerosos os casos referidos de reactividade atribuída a granitos, e a rocha é classificada como reactiva em outros países (Parte I, página 48).

Conforme é afirmado na literatura sobre o assunto, não existe uma relação entre a designação da rocha e a sua reactividade, pelo que o estudo de um agregado deve ser desenvolvido localmente, em função das características particulares da rocha, ou seja, a condicionante regional parece ser de grande importância.

Considerando os granitos retirados das pedreiras exploradas para a construção das barragens do Cabril e do Alto Rabagão, a análise petrográfica debruçou-se predominantemente na detecção de:

- Existência de formas de sílica amorfas, o que, à partida, era pouco provável. A reactividade da sílica amorfa e a decrescente reactividade com a evolução da cristalinidade reúnem, por ora, as opiniões dos especialistas (página 44).

- Presença de cristais de quartzo exibindo extinção ondulante, hipótese defendida essencialmente durante a década de 1980 e início de 1990. A extinção ondulante nos cristais de quartzo dos granitos não é um fenómeno anómalo, pelo que se mostrou de interesse quantificar o valor do ângulo respectivo. Neste aspecto, as normas mais utilizadas são ambíguas, uma vez que não referem o ângulo mínimo a partir do qual os cristais devem ser considerados potencialmente reactivos. Os valores mais referidos na bibliografia, que não assumem o estatuto de norma, encontram-se entre 15 e 25º (páginas 51).

- Ocorrência de quartzo microcristalino, tese já antiga, mas com mais realce a partir de meados da década de 1990 (páginas 51 a 55). Neste contexto, o quartzo com extinção ondulante é indicado como referência, dado que frequentemente está relacionado com a presença de quartzo micro ou criptocristalino.

- Existência de silicatos potencialmente reactivos. Embora alguns filossilicatos tenham sido referidos como potencialmente reactivos, a sua participação em reacções álcali-silicato não está confirmada (página 55 e 56). Haverá a considerar, no entanto, a possível contribuição, para os álcalis do betão, dos feldspatos alterados, debatida por vários autores a partir de análises aos álcalis no cimento em momentos diferentes da vida das estruturas (páginas 38 a 41).

O estudo petrográfico dos granitos existentes na pedreira da barragem do Cabril permitiu identificar cristais de quartzo com extinção ondulante, com ângulo de grau baixo a moderado, inferior ao admitido como mínimo para ser considerado que existe reactividade. Não foi detectado quartzo microcristalino.

A análise do betão da barragem do Cabril ao microscópio permitiu, no entanto, identificar partículas de agregado diversas das rochas encontradas na pedreira. Existem algumas partículas de granito com fortes indícios de deformação e quartzo microcristalino, em zonas limitadas, associado a moscovite microcristalina e clorite vermicular.

As rochas da pedreira foram ensaiadas para avaliação da reactividade aos álcalis. Os ensaios realizados confirmaram as conclusões da petrografia quanto à classificação dos agregados da pedreira como "Não Reactivos". As rochas, diferentes das que existem na pedreira, mas que estão presentes no betão, não foram ensaiados para determinação da reactividade potencial por inexistência de amostras. Como conclusão, poderá dizer-se que não é esperada reactividade dos agregados, considerando as rochas da pedreira. O exame petrográfico das partículas presentes no betão alerta, no entanto, para a eventual reactividade, em especial do granito deformado.

Este facto conduz, no entanto, à questão da existência de um teor péssimo, conforme referido na Parte I (página 44 e 45). Com efeito, a reactividade de um agregado depende não só das suas características mas também da percentagem relativa das formas reactivas no agregado. No caso de formas de sílica amorfas ou pobremente cristalinas, como apresentado na Figura I.10 e no Quadro I.15, pode ocorrer reacção mesmo para percentagens muito baixas dos minerais, enquanto que, para outras espécies, esta percentagem deverá ser relativamente elevada.

No caso dos agregados aplicados na barragem do Cabril, esta questão não tem resposta fácil, dado que se observaram, no total das lâminas, apenas algumas partículas contendo quartzo microcristalino e, principalmente, pode ser erróneo assumir que as lâminas examinadas são representativas do volume de betão que constitui a estrutura.

Partindo do princípio que essa representatividade se verifica, as partículas que contêm quartzo microcristalino correspondem a cerca de 7% das partículas de agregado grosso observadas. Nestas partículas, o quartzo microcristalino ocupa menos de 10% de cada partícula, pelo que se obtém uma percentagem substancialmente inferior à assumida como limite para que o agregado seja considerado reactivo. Este é apenas um dos factores a considerar.

Quanto à humidade, condição necessária para que ocorram reacções internas no betão, a natureza da estrutura, ou seja, o objectivo da sua construção, conduz-nos de imediato à assumpção de um risco elevado – é uma estrutura em contacto permanente com um grande volume de água contido na albufeira. A localização da obra, no entanto, parece indicar que não existe uma exposição próxima a agentes químicos prejudiciais para o betão.

Relativamente ao terceiro factor – a disponibilidade de álcalis – existe uma dificuldade inerente de avaliação, relacionada com a ausência de dados quanto à composição do cimento aplicado e às limitações dos métodos utilizados na avaliação da situação actual.

Neste contexto, por ausência de formas de sílica reactiva ou existência em muito pequena percentagem, não será de esperar que ocorram reacções álcali-sílica no betão da barragem do Cabril.

A inspecção realizada nas galerias mostra, contudo, indícios macroscópicos pontuais de deterioração: a ocorrência de exsudações. Na bibliografia, é ainda referido um outro indício – a expansão da estrutura – que pode ter origens diversas.

As exsudações são limitadas no espaço. Encontram-se essencialmente na galeria de cota mais elevada e seus acessos, zona da estrutura onde o fenómeno secagem-molhagem poderá ser, talvez, mais acentuado. Há a acrescentar o facto de ter sido às

cotas mais altas que se verificou, após o enchimento, a ocorrência de fissuração de origem estrutural. O exame petrográfico dos materiais exsudados indica a presença de gel sílico-alcalino, embora com ausência de cálcio, referido em muitos dos trabalhos publicados sobre reacções álcali-sílica (página 68 a 72). O betão foi tratado por injecção de resinas epoxídicas, de composição não conhecida em pormenor. Não se descarta totalmente a possibilidade destas exsudações poderem, de algum modo, estar relacionadas com as injecções executadas há duas dezenas de anos.

A considerar a ocorrência de reacções álcali-sílica superficiais, há que compreender a inexistência de cálcio.

A produção de lâminas delgadas foi executada com uma distribuição regular ao longo dos tarolos de betão, com excepção de algumas lâminas seleccionadas em locais específicos por apresentarem partículas de agregado não graníticas ou poros com preenchimento. Não foi detectado gel sílico-alcalino nas lâminas, havendo apenas a suspeita de que poderá coexistir, em casos pontuais, com a etringite identificada em alguns poros do betão. Nesse caso, as exsudações constituem um fenómeno superficial, que ocorre nas cotas mais elevadas da barragem, devido à infiltração de água no betão e sua sequente evaporação nas paredes das galerias, ou seja, em superfícies expostas no interior da estrutura. Esta infiltração é, obviamente, mais forte nos encontros da barragem, por contacto com os fluidos que circulam na fundação, sendo, nestes locais, que existe maior concentração de exsudações e também de manchas de humidade com eflorescências.

O estudo da barragem do Cabril mostrou também um fenómeno curioso, que se considera poder estar relacionado com a evolução natural de um gel sílico-alcalino. O facto de algumas amostras de gel evoluírem para superfícies amorfas, sobre as quais crescem cristais de trona, em confrontação com referências bibliográficas sobre a carbonatação do gel, quando exposto à superfície, alertam para a possível relação do gel com a ocorrência de eflorescências de trona em paredes exibindo manchas de humidade. Por outro lado, compreende-se, conforme é indicado na Figura I.22, que a sílica seja solúvel para as condições de pH existentes no betão. A sílica é atacada pela solução intersticial que contém iões alcalinos e hidróxilo, que quebram a estrutura do SiO_2. O cálcio, com maior raio iónico do que os iões alcalinos, participa posteriormente na reacção, substituindo os álcalis. No entanto, esta substituição poderá não ocorrer se o percurso do gel na pasta de cimento for curto ou rápido. Supõe-se que é este o processo que se verifica no betão da barragem do Cabril. Assim, a formação de gel será pontual, relacionada com raras partículas que contêm quartzo microcristalino e a sua migração até

à superfície do betão forçada pela circulação de fluidos que se infiltram no betão e evaporam nas superfícies interiores. O fenómeno molhagem-secagem será mais intenso às cotas mais elevadas e no contacto dos encontros com o maciço de fundação, local mais próximo da superfície, onde as descontinuidades do granito deverão ser mais frequentes e encontrar-se mais abertas. Este facto poderá explicar a concentração das exsudações a estas cotas. Se a circulação dos fluidos no interior do betão é ou não facilitada pelas fissuras estruturais já injectadas, desconhecemos.

A existência de etringite cinge-se ao preenchimento de alguns poros, raras fissuras e ocorrência esporádica na pasta que, pelas suas características, não deverá acarretar danos para a estrutura. Exceptua-se a etringite comprimida, detectada numa interface pasta de cimento-agregado, e a que surge associada, pontualmente, a partículas de pirite do agregado, e que deverá ser diferida. Atendendo a que a composição da etringite está bem definida (página 25), a existência nos espectros obtidos por EDS de silício e, por vezes, de álcalis, parece indicar que existe simultaneamente gel. De acordo com a tendência encontrada na literatura sobre o assunto, as reacções álcali-sílica causam expansão por formação de gel. A formação de etringite será posterior, ocupando o espaço livre criado pela expansão. A formação de gel parece mais plausível, neste caso, do que a coexistência com taumasite, dada a presença de álcalis.

No caso da barragem do Alto Rabagão, estudos anteriores sobre o granito de Pisões referem ligeira orientação dos minerais, revelando deformação, factor referido na bibliografia como possivelmente relacionado com a reactividade dos agregados e consequente expansão das argamassas, conforme exposto na Figura I.14. Esta orientação preferencial foi confirmada pela observação macroscópica das amostras colhidas na pedreira, quando cortadas em cilindros e cubos para realização de ensaios à compressão uniaxial. A análise microscópica mostrou indícios de deformação nos cristais de quartzo, que apresentam extinção ondulante e bordos suturados e, por vezes, quartzo microcristalino em baixa percentagem (inferior a 5%) no total de lâminas examinadas. Os cristais de quartzo microcristalino estão por vezes, também neste caso, associados a moscovite microcristalina e clorite vermicular. O exame do betão da barragem revelou ainda a presença de partículas, raras, de granito fortemente deformado e de partículas siliciosas de matriz micro a criptocristalina.

A informação obtida pelo estudo da rocha da pedreira fornece, do ponto de vista petrográfico, indicação de reactividade potencial, devido à presença de quartzo microcristalino. Não foi identificada qualquer variedade de sílica amorfa, e o quartzo

microcristalino representa uma baixa percentagem do agregado, que se considera substancialmente inferior ao mínimo a atingir para que ocorra "efeito péssimo".

Os resultados de avaliação de reactividade potencial aos álcalis forneceram resultados negativos. Levanta-se, aqui, a questão da sensibilidade destes ensaios quando aplicados a rochas que contêm quartzo microcristalino e não quartzo amorfo. Atendendo às críticas repetidamente encontradas na bibliografia e à experiência relativamente ao granito da pedreira de Pisões, os ensaios actualmente utilizados parecem não ser adequados para este tipo de rochas, pelo que os seus resultados devem ser considerados com reserva e complementados com a análise petrográfica.

Quanto à exposição ambiental, repete-se o referido para a barragem do Cabril. O risco de ocorrência de reacções álcali-sílica é considerado elevado, dado que se trata de uma estrutura em permanente contacto com a água e exposta às intempéries.

A percentagem de álcalis no betão, no momento da construção, é desconhecida. O método manual utilizado na separação do cimento para análise química não apresentou resultados fiáveis, pelo que deverá ser aperfeiçoado.

A inspecção à estrutura revelou raros indícios, dispersos, de deterioração. Existe fissuração em áreas limitadas do encontro esquerdo da abóbada. Observaram-se exsudações na galeria da gravidade direita. Encontraram-se cavidades em vários locais, em especial na galeria de cota mais elevada da abóbada e da gravidade esquerda. Interpretaram-se estas cavidades como correspondendo a *pop-outs* e colheram-se amostras de betão para caracterização das partículas que os teriam causado. Identificaram-se, nos dois casos amostrados, partículas de dimensão de areia grossa, com matriz siliciosa micro a criptocristalina. Em todas as lâminas estudadas, estas foram as únicas partículas identificadas deste tipo de rocha, pelo que se deduz que deverá corresponder a uma percentagem muito baixa do total de agregado aplicado. Esta rocha é, no entanto, potencialmente reactiva e a sílica presente pode conter formas amorfas.

A existência de *pop-outs* às cotas mais altas parece indicar que, nesta zona, os ciclos molhagem-secagem têm consequências mais severas. O topo da galeria GFE1, no encontro esquerdo, em que existem várias pequenas cavidades, situa-se sob uma porção de betão cuja superfície exterior, em rampa, está fissurada, segundo um padrão em *map cracking*. A água infiltrada a partir do exterior pode facilitar, neste local, a ocorrência de reacção com aquelas partículas potencialmente reactivas, desde que existam álcalis em quantidade suficiente. A falta de informação sobre a quantidade de álcalis e a dosagem do cimento no betão impedem a aplicação do gráfico da Figura I.8, quanto ao teor máximo de álcalis no betão.

A composição obtida para o gel é próxima, em alguns casos, da encontrada na barragem do Cabril. Verifica-se, pela comparação dos diagramas triangulares do gel identificado em cada caso, que no Alto Rabagão o gel é mais pobre em álcalis, mantendo a baixa percentagem de cálcio. O diagrama SiO_2-Na_2O-K_2O mostra que este gel é mais rico em sílicio do que o da barragem do Cabril e que a percentagem de potássio é sempre mais elevada do que a de sódio, tal como verificado nas análises de Thaulow et al., 1996 (Quadro I.18).

Em alguns casos de *pop-outs*, encontrou-se também alumínio nas análises semiquantitativas de gel. O alumínio poderá ter origem na pasta de cimento ou nas partículas de agregado, de minerais silicatos, que foram atacados pelos fluidos intersticiais. A solubilização ocorre para pH entre 4 e 5 e de 8 a 10 (Figura I.22), depositando para valores diferentes destes.

Os dados das análises semiquantitativas do gel, obtidas ao MEV para os dois casos estudados, foram projectados em diagramas triangulares. Esta projecção (Figura IV.1) permite estabelecer comparação com os resultados dos diferentes autores (Figuras I.24, I.25 e I.26).

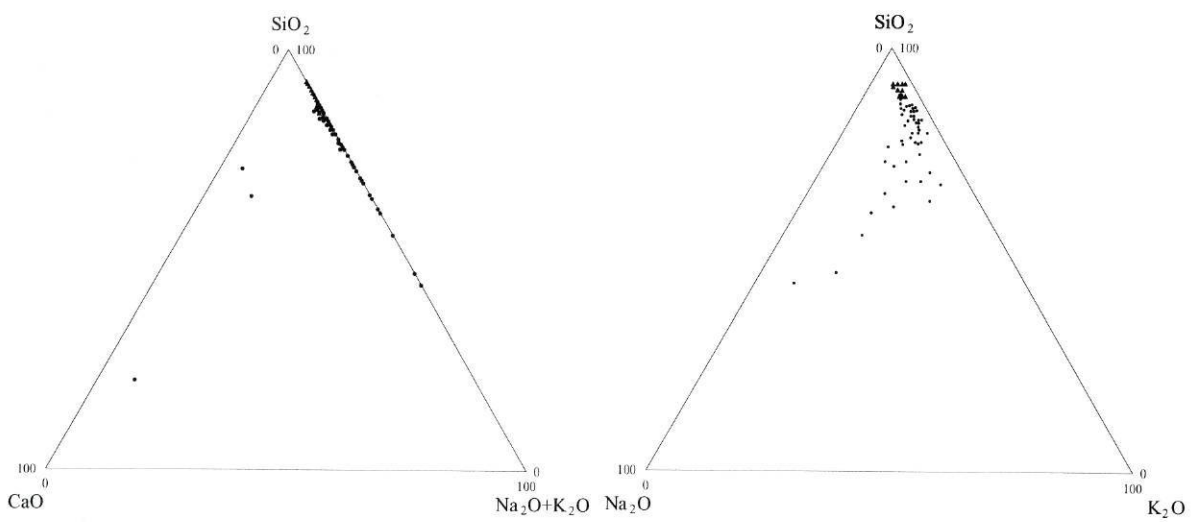


Figura IV.1 – Diagramas triangulares correspondentes às análises de gel sílico-alcalino encontrado em amostras de exsudações e *pop-outs* colhidas nas barragens do Cabril e do Alto Rabagão.

Os conteúdos em cálcio são, tanto no Cabril como no Alto Rabagão, substancialmente inferiores aos encontrados na bibliografia, sendo, em consequência, superiores os teores em silício. As percentagens de álcalis são ligeiramente inferiores às determinadas por outros investigadores e mais baixas no Alto Rabagão. O potássio é, em ambos os casos, mais abundante do que o sódio, o que deverá estar relacionado com o

teor original no cimento, uma vez que, em ambos os betões, os granitos são mais ricos em plagioclase sódica do que em feldspato potássico.

O diagrama mostra que se obteve um maior número de análises de gel na barragem do Cabril do que na do Alto Rabagão, ou seja, os indícios de deterioração são mais abundantes na primeira do que na segunda. Este facto contradiz as expectativas relativamente às características dos agregados, dado que a presença de quartzo microcristalino no granito da pedreira de Pisões permite suspeitar de potencial reactividade, quando avaliada por métodos petrográficos, o que não sucede quanto aos granitos identificados na pedreira do Cabril. A frequência de exsudações na galeria de coroamento da barragem do Cabril poderá, por esta razão, estar associada à existência de humidade mais elevada, possivelmente relacionada com a fissuração, já tratada por injecções.

Macroscopicamente os produtos analisados mostravam-se em geral brancos, por vezes amarelados e enrijecidos. Os produtos encontrados nos *pop-outs* na barragem do Alto Rabagão, que ocupam macroscopicamente uma área superior à das exsudações da barragem do Cabril, mostram também cor branca e fissuras de retracção e, quando recentes, têm carácter translúcido e viscoso. Os aspectos referidos conferem com as descrições existentes na bibliografia. Os produtos mais antigos, como as exsudações observadas e colhidas na primeira deslocação a cada uma das barragens, são mais opacos e endurecidos, enquanto que, nas últimas visitas, foi possível colher exsudações mostrando gotículas viscosas e pouco aderentes às paredes de betão. No *pop-out* acabado de destacar do tecto da GFE1, este aspecto também se verificava. Nas cavidades mais antigas, o produto de revestimento apresentava cor amarelada e carácter compacto, de acordo com o referido na Parte I quanto à carbonatação do gel por exposição à atmosfera.

Não obstante as variações de composição do gel, a morfologia deste ao microscópio electrónico de varrimento, nos dois casos estudados, é semelhante e apresenta características idênticas às encontradas na bibliografia. Ocorre, predominantemente:

- gel amorfo, maciço, frequentemente com fissuras de retracção;
- gel com carácter viscoso, sólido, em película fina, cobrindo materiais semicristalinos;
- gel de textura esquelética ou cavernosa, porosa.

Sobre estes produtos, existem, com mais frequência na barragem do Cabril, cristais de trona, aciculares ou tabulares, que parecem resultar de uma segregação do próprio gel. A evolução registada, ao longo do tempo, na formação destes cristais parece confirmar esta dedução (Figura III.1.30).

Foram ainda encontrados produtos constituídos essencialmente por cálcio e silício, que se apresentam em cristais lamelares ou tabulares, formando rosetas. Estes produtos foram identificados essencialmente como exsudações nos provetes de argamassa submetidos a ensaios de reactividade segundo a norma ASTM C1260-94, 2002, e têm textura semelhante à referida por outros investigadores.

A análise de todos estes produtos ao MEV/EDS revelou-se da maior importância para a sua identificação, uma vez que, dadas as dimensões das amostras colhidas nas exsudações e *pop-outs*, não seria possível aplicar outra tecnologia.

Efectivamente, apesar do elevado custo deste método, a análise EDS, com ou sem padrão, é a principal técnica de petrografia aplicada à caracterização do gel sílico-alcalino e aquela sobre a qual há mais dados publicados.

A identificação microscópica em lâmina delgada poderá ser tipificada quanto à localização possível do gel e suas características gerais, no caso de não ser importante determinar a composição, como sucede, em geral, nos trabalhos práticos de diagnóstico das causas de deterioração do betão.

Por outro lado, uma das principais preocupações dos técnicos/investigadores envolvidos nestes trabalhos, e mais vocacionados para o desempenho da estrutura em consequência da ocorrência de reacções álcali-agregado, é a quantificação da reacção por métodos petrográficos, a única que se afigura possível. Este objectivo depara-se, contudo, com um conjunto de limitações que se relacionam com a representatividade das lâminas estudadas e com o facto de poder existir gel sem que tal se traduza em expansão ou danos para a estrutura.

Sabendo que as reacções se distribuem de forma heterogénea nas estruturas, tanto a nível da superfície visível como para o interior do betão, colocam-se duas opções:

- As amostras colhidas no betão podem concentrar-se nas zonas em que, macroscopicamente, se identificaram danos. Se esta opção parece ser a ideal, a sua extrapolação para o total do betão da estrutura deverá fornecer uma informação por excesso.

- As amostras são colhidas de forma sistemática ao longo da estrutura, independentemente da localização dos indícios de deterioração. Esta hipótese parece mais correcta em termos médios, mas pode ser insuficiente para a caracterização das áreas mais danificadas.

A quantificação da reacção afigura-se, assim, um obstáculo de difícil transposição, para o qual uma solução de compromisso parece o melhor caminho a seguir.

A nível microscópico, surgem alguns problemas de ordem prática, sobre os quais se encontram raras informações na bibliografia. A observação petrográfica é intrinsecamente subjectiva, pelo que é importante quantificá-la nos parâmetros possíveis. A quantificação de poros e fissuras em lâmina delgada é facilitada se forem utilizados métodos de análise de imagem e resinas fluorescentes. Tendo em consideração a escala das lâminas delgadas face à dimensão das obras, parece, no entanto, mais importante referir a localização dos indícios de deterioração e caracterizar os produtos formados. A análise petrográfica deve ser sempre executada por um petrógrafo, com conhecimentos acerca da composição do betão e possíveis causas de deterioração.

A petrografia tem aplicação no estudo do betão, para além da identificação de agregados e indícios de reacção. A composição do cimento, a caracterização de adjuvantes e a determinação da razão água/cimento constituem outras aplicações dos métodos de petrografia, com base em lâminas-tipo fabricadas para o efeito. Surge, assim, mais uma vez a importância da multidisciplinaridade deste tema e a necessidade de uma colaboração estreita entre os técnicos/investigadores das diferentes áreas.

Face ao exposto, o trabalho desenvolvido apresenta-se como o princípio de um projecto de investigação muito vasto e aliciante, que se deseja seja implementado. A recolha bibliográfica permitiu reconhecer que a aplicação da petrografia aos materiais de construção e, em particular, ao betão, está muito pouco desenvolvida em Portugal e que existe um número reduzido de geólogos a trabalhar nesta área. Este facto poderá ser atribuído ao pequeno número de casos de degradação de estruturas de betão no nosso país e, provavelmente, a que algumas entidades responsáveis pelas principais obras de engenharia não estão, ainda, sensibilizadas para o fenómeno. Exceptua-se a EDP, que tem dedicado atenção a estes processos nas suas obras e que possui relatórios que abordam esta problemática.

No presente trabalho, estudaram-se granitos em dois casos de obra e atendeu-se essencialmente à possibilidade de ocorrência de reacções álcali-sílica. No entanto, a actividade pode e, pensa-se, deve, estender-se a outros campos de actuação.

As rochas graníticas foram aplicadas até hoje num grande número de importantes obras, que deveriam ser analisadas na perspectiva de avaliar a existência de indícios de degradação. Mas não só os granitos devem merecer atenção. Outras rochas frequentemente utilizadas como agregados, como os calcários e as areias, devem também ser estudadas, assim como algumas rochas vulcânicas, aplicadas essencialmente nas ilhas açoreanas e madeirenses. O estudo das rochas não deve limitar-se à apreciação actual da situação das obras em que foram utilizadas, mas parece

interessante criar uma base de dados acerca das características das rochas actualmente em exploração, do ponto de vista da sua potencial reactividade, para utilização futura.

Quanto aos tipos de obra, haverá a considerar barragens, pontes, viadutos, travessas de caminho de ferro, centrais de produção de energia, estruturas marítimas e pavimentos rodoviários, entre outros casos em que tem havido utilização massiva de betão.

Relativamente ao tipo de reacção a considerar, referiram-se as reacções álcali-sílica e álcali-silicato, mas há também as reacções álcali-carbonato, o ataque por sulfatos de origem interna ou externa e o ataque por ácido como casos em que a petrografia pode ter uma aplicação de grande interesse.

Para além destes factores mais relacionados com as partículas de agregado, a colaboração do petrógrafo pode ser solicitada para apreciação das características da pasta de cimento.

Trata-se de três variáveis que podem ser combinadas para fornecer um vasto número de aplicações possíveis da petrografia e, de um modo geral, da Geologia, ao principal material de construção dos séculos XX e XXI.

Por outro lado, sendo uma ciência multidisciplinar, deve ser fomentado o desenvolvimento de ensaios para avaliação da reactividade, em especial ensaios que sejam mais adequados ao tipo de rochas mais utilizadas em Portugal. Para este desenvolvimento, convirá considerar a necessidade de equipamentos e técnicos que, com crescente experiência, imprimam o rigor que se impõe à obtenção de bons resultados.

Assim, parece premente desenvolver em Portugal um estudo das estruturas de betão, desde que as entidades proprietárias das obras o permitam e que existam geólogos com apetência para esta área do conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI, 1998, "State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity", Reported by ACI Committee 221, American Concrete Institute, Michigan, 31 p.

Appleton, J., Costa, A., 2001, "Caso de estudo: Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa", Seminário sobre Degradação de Estruturas por Reacções Expansivas de Origem Interna, LNEC, Lisboa.

ASTM C 150-02a, 2003, "Standard specification for portland cement", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 7 p.

ASTM C 227-97a, 2002, "Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (Mortar-bar method)", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 5 p.

ASTM C 289-94, 2002, "Standard test method for potential alkali –silica reactivity of aggregates (Chemical method)", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 7 p.

ASTM C 294-98, 2002, "Standard descriptive nomenclature for constituents of natural mineral aggregates", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 7 p.

ASTM C 295-98, 2002, "Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 8 p.

ASTM, C 856-04, 2004, "Standard practice for petrographic examination of hardened concrete", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 17 p.

ASTM, C 1260-94, 2002, "Standard test method for potential alkali-aggregates (Mortar-Bar Method)", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 4 p.

ASTM, C 1293-01, 2004, "Standard test method for determination of length change due to alkali-silica reaction", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 6 p.

Barth, T.F.W., 1958, "Principles of classification and norm calculations of metamorphic rocks", Journal of Geology, Vol. 67 (2): 135-152.

BCA, 1992, "The diagnosis of alkali-silica reaction. Report of a working party", British Cement Association Publication 45.042, 44 p.

Berra, M., Bertacchi, P., 1991, "Alkali-aggregate reaction in concrete dams", Water Power and Dam Construction, Vol. 43 (4): 12-16.

Bérubé, M.A., Fournier, B., 1986, "Les produits de la réaction alcalis-silice dans le béton : étude de cas de la région de Québec", The Canadian Mineralogist, Vol. 24 (Part 2) : 271-288.

Bérubé, M.A., Duchesne, J., Dorion, J.F., Rivet, M., 2002, "Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity", Cement and Concrete Research, Vol. 32 (8): 1215-1227.

Bérubé, M.A., Frenette, J, Rivest, M., Vézina, D., 2000, "Measurement of the alkali content of concrete using hot-water extraction", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 159-168.

Besem, P.H., Demars, P., 1989, "Reactions alkalis-granulats dans le beton", Annales des Travaux Publics de Belgique", Vol. 4, Ministère des Travaux Publics, Belgique: 345-359.

Biste, M., 1979, "Die Anwendung geochemischer Indikatoren auf die Zinn-Hoeffigkeit herznishcer granite in Sued-Sardinien. Berliner Geowissenschaften Abhandlungen, Vol. 18: 1-109.

BRE Digest 330, 1991, "Alkali aggregate reactions in concrete", Building Research Establishment, U.K, 7 p.

Breton, D., Carles-Gibergues, A., Ballivy, G., Grandet, J., 1993, "Contribuition to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste", Cement and Concrete Research, Vol. 23 : 335-346.

Broekmans, M.A.T.M., 1999, "Classification of the alkali-silica reaction in geochemical terms of silica dissolution", 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Delft: 155-170.

Broekmans, M.A.T.M., 2002, "The alkali-silica reaction: mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegian mylonites", PhD. Thesis, University of Utrecht, 144 p.

Brouxel, M., 1993, "The alkali-aggregate reaction rim: Na2O, SiO2, K2O and CaO chemical distribution", Cement and Concrete Research, Vol. 23 (2): 309-320.

Brown, E.T., Richards, L.R., Barr, M.V., 1977, "Shear strength characteristics of Delabole slates", Proceedings of Conference on Rock Engineering, Newcastle upon Tyne: 33-51.

BS 812: Part 1, 1975, "Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sands and fillers. Part 1: Methods for determination of particle size and shape", British Standards Institution, London.

BS 812: Part 102, 1989, "Testing aggregates. Part 102: Methods for sampling", British Standards Institution, London, 9 p.

BS 7943, 1999, "Guide to the interpretation of petrographical examinations for alkali-silica reactivity", British Standards Institution, London, 15 p.

Buck, A.D., 1983, "Alkali reactivity of strained quartz as a constituent of concrete aggregate", Cement, Concrete and Aggregates, The American Society for Testing Materials, Philadelphia, Vol. 5 (2): 131-133.

Cabral, J., Ribeiro, A., 1989, "Carta neotectónica de Portugal", Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Campbell, D.H., 1999, "Microscopical examination and interpretation of Portland cement and clinker", 2nd edition, Portland Cement Association, SP030, USA, 201 p.

Carta Geológica de Portugal, 1982, "Folha 6-A, 1982, Montalegre", Escala 1:50.000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Carta Geológica de Portugal, 1992, Escala 1: 500.000, Folha Norte, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

CEB, 1992, "Durable concrete structures – Design guide", Comité Euro-International du Béton, Task Group 20 Durability and Service Life of Concrete Structures, Thomas Telford Services, Ltd, Lausanne, 112 p.

Chatterjee, S. Fordos, Z., Thaulow, N., 1992, "Alkali-silica reaction – Danish experience", In: Swamy, R.N. (editor), The alkali-silica reaction in concrete, Blackie and Son Ltd., London: 188-207.

Chatterji, S., 1979, "The role of Ca(OH)2 in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction", Cement and Concrete Research, Vol 9 (2): 185-188.

Chatterji, S., Thaulow, N., 2000, "Some fundamental aspects of alcali-silica reaction", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 21-29.

Chatterji, S., Jensen, A.D., Thaulow, N., Christensen, P., 1986, "Studies of alkali-silica reaction, Part 3. Mechanisms by which NaCl and $Ca(OH)_2$ affect the reaction", Cement and Concrete Research, Vol. 16 (2): 246-254.

Chatterji, S., Thaulow, N., Jensen, A.D., 1988, "Studies of alkali-silica reaction, Part 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism", Cement and Concrete Research, Vol 18 (3): 363-366.

Collepardi, M., 2003, "A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete", Cement and Concrete Composites, Vol. 25: 401-407.

Concrete Society, 1987, "Alkali-silica reaction: minimising the risk of damage to concrete. Guidance notes and model specification clauses", Technical Report nº 30, 3rd Edition, Concrete Society, London, 34 p.

Concrete Society, 1989, "Analysis of hardened concrete – a guide to tests, procedures and interpretation of results", Report of a Joint Working Party of the Concrete Society and Society of Chemical Industry, Technical Report nº 32, Concrete Society, London, 111 p.

Constantiner, D., Diamond, S., 2003, "Alkali release from feldspars into pore solutions", Cement and Concrete Research, Vol. 33 (4): 549-554.

Coutinho, A.S., 1988, "Fabrico e propriedades do betão", 3 volumes. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

CR 1901, 1995, "Regional specifications and recommendations for the avoidance of damaging alkali silica reactions in concrete", CEN Report, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 63 p.

Davies, G., Oberholster, R.E., 1987, "Use of the NBRI accelerated test to evaluate the effectiveness of the mineral admixtures in preventing the alkali-silica reaction", Cement and Concrete Research, Vol. 17 (1): 621-635.

Davies, G., Oberholster, R.E., 1988, "Alkali-silica reaction products and their development", Cement and Concrete Research, Vol. 18 (4): 621-635.

De Hills, S.N., Corvalán, J., 1964, "Undulatory extinction in quartz grains of some Chilean granitic rocks of different ages", Geological Society of America Bulletin, 75: 363-366.

Deloye, F-X., 1989, "Action conjuguée du soufre et des alcalins dans les réactions liants-granulats au sein du béton", Bulletin Liaison des Laboratoires des Ponts et Chausées, 16 : 41-49.

Dent Glasser, L.S., Kataoka, N., 1981, "The chemistry of alkali-aggregate reaction", Cement and Concrete Research, Vol. 11 (1): 1-9.

Dent Glasser, L.S., Kataoka, N., 1982, "On the role of calcium in the alkali-aggregate reaction", Cement and Concrete Research, Vol. 12 (3): 321-331.

Dewar, J.D., 1963, "Effect of mica in the fine aggregate on the water requirement and strength of concrete", Cement and Concrete Association Technical Report TRA/370, London.

Diamond, S., 1976, "A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms. 2. Reactive aggregates", Cement and Concrete Research, Vol 6 (4): 549-560.

Diamond, S., 1996, "Delayed ettringite formation – Processes and problems", Cement and Concrete Composites, Vol 18: 205-215.

Diamond, S., 2000, "Chemistry and other characteristics of ASR gels", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 31-40.

Diamond, S., Thaulow, N., 1974, "A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate", Cement and Concrete Research, Vol. 4 (4): 591-607.

Diário de Lisboa, 31 de Julho de 1954, "O presidente da República inaugurou a Barragem e a Central do Cabril", Nº 11.371, Lisboa: 1 e 6.

Divet, L., 2001a, "Les réactions sulfatiques internes au béton: contribuition à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 227 p.

Divet, L., 2001b, "Les reactions sulfatiques internes: les differentes sources de sulfates, les mecanismes et les fracteurs determinants", Seminário Degradação de Estruturas por Reacções Expansivas de Origem Interna, LNEC, Lisboa.

Divet, L., Davy, J., 1996, "Étude des risques d'oxydation de la pyrite dans le milieu basique du béton", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 204 : 97-107.

Dolar-Mantuani, L.M.M., 1981, – "Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali-reactive rocks", Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, Cape Town. National Building Research Institute Pretoria, paper S252/36.

Durand, B., 2000, "A note about alkali contribution from aggregates in concrete affected by ASR", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 169-177.

El Bouseily, A.M., El Sokkary, A.A., 1975, "The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks", Chemical Geology, Vol. 16: 207-220.

EN 206-1, 2000, "Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity", Comité Europeu de Normalização, Brussels, 72 p.

Especificação LNEC E 159, 1964, "Agregados – Determinação da reactividade potential (processo absorciométrico)", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 11p.

Especificação LNEC E 373, 1993, "Inertes para argamassas e betões – Características e verificação da conformidade", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 3p.

Especificação LNEC E 388, 1993, "Betões. Análise macro e micro-estrutural. Exame petrográfico", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 18 p.

Especificação LNEC E 415, 1993, "Inertes para argamassas e betões – Determinação da reactividade potencial com os álcalis. Análise petrográfica", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 6 p.

Farmer, I.W., 1968, "Engineering properties of rocks", Routledge Chapman and Hall, New York.

FD P18-542, 2004, "Granulats. Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction", Normalisation Française, AFNOR, Paris.

Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A., Ribeiro, M.L., 1987, "Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico", In: Bea, F., Carnicero, A., Gonzalo, J.C., López Plaza, M., Rodriguez Alonso, M.D. (Eds.), Geologia de los Granitoides y Rocas Asociadas del Macizo Hespérico. Ed. Rueda, Madrid, pp. 37-51.

Fookes, P.G., Revie, W.A., 1982, "Mica in concrete – a case history from Eastern Nepal", Concrete, Journal of Concrete Society, Vol. 16 (3): 12-16.

French, W.J., 1980, "Reactions between aggregates and cement paste – an interpretation of the pessimum", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 13: 231-247.

French, W. J., 1991, "Concrete petrography: a review", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 24: 17-48.

Fu, Y., Ding J., Beaudoin, J.J., 1997, "Expansion of Portland cement mortar due to internal sulfate attack", Cement and Concrete Research, Vol 27 (9): 1299-1306.

Gillott, J.E., 1975, "Alkali-aggregate reactions in concrete", Engineering Geology, Vol. 9: 303-326.

Gillott, J.E., 1980, "Properties of aggregates affecting concrete in North America", Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol. 13: 289-303.

Gillott, J.E., Duncan, M.A.G., Swenson, E.G., 1973, "Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia. IV-Character of the reaction", Cement and Concrete Research, Vol 3 (5): 521-535.

Gogte, B.S., 1973, "An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali-aggregate reactions", Engineering Geology, Vol. 7: 135-153.

Gomes, J.P., Batista, A.L., Oliveira, S., 2004, "Analysis of concrete dams under swelling processes", Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijin: 1148-1157.

Grattan-Bellew, P.E., 1983, "Evaluation of test methods for alkali-aggregate reactivity", Proceedings of the 6th International Conference on Alkalis in Concrete, Copenhagen: 303-314.

Grattan-Bellew, P.E., 1992, "Microcrystalline quartz, undulatory extinction & the alkali-silica reaction", Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London: 383-394.

Grattan-Bellew, P.E., 1994, "Alkali contribution from limestone aggregate to pore solution of old concrete", ACI Materials Journal, American Concrete Institute Vol. 91 (2): 173-177.

Grattan-Bellew, P.E., 2001, "Petrographic and technological methods for evaluation of concrete aggregates", In: Ramachandran, V.S. e Beaudoin, J.J. (editors), Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, techniques, and applications, Noyes Publications, EUA : 63-230.

Grattan-Bellew, P.E., Beaudoin, J.J., 1980, "Effect of phlogopite mica on alkali-aggregate expansion in concrete", Cement and Concrete Research, Vol 10 (6): 789-797.

Gregerová, M., Pospíšil, P., 2003, "Thaumasite and ettringite formation affected by aggregate and cement composition in concrete", Proceedings of the 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Trondheim, CD-ROM.

Grosbois, M., Fontaine, E., 2000, "Evaluation of the potential alkali-reactivity of concrete aggregates: performance of testing methods and a producer's point of view", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 267-276.

Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A., Wildman, T.R., 1968, "Relative and absolute terrestrial abundance of the rare earths", In: Ahrens, L.H., (Editor), Origin and distribution of the rare elements, 1, Pergamon Press, Oxford: 889-911.

Haugen, M., Skjolsvold, O., Lindgard, J., Ostnor, T., Wigum, B., 2003, "Experinece from petrographic analyses on aggregates separated from concrete cores", Proceedings of the 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Trondheim, CD-ROM.

Heaney, P.J., Prewitt, C.T., Gibbs, G.V., 1994 (Editores), "Silica: physical behavior, geochemistry and materials applications", Reviews in Mineralogy, Nº 29, 606 p.

Helmuth, R.A., Stark, D., 1992, "Alkali silica reactivity mechanisms", In: J. Skalny (Editor), Materials science of concrete III, American Ceramic Society, Westerville, OH: 131-208.

Hey, M.H., 1954, "A new view of the chlorides", Mineralogical Magazine, Vol. 30.

Hobbs, D. W., 1984, "Expansion of concrete due to alkali-silica reaction", Structural Engineer, Cement and Concrete Association, Slough, 9 p.

Hobbs, D. W. (Editor), 1988, "Alkali-silica reaction in concrete", Thomas Telford Ltd. London, 183 p.

Hobbs, D. W., 2001, "Cracking of concrete attributed to delayed ettringite formation", Proceedings of the Eleventh Annual BCA/Concrete Society Conference on Higher Education and the Concrete Industry, UMIST, Mancherter: 51-60.

Hobbs, D.W., Gutteridge, W.A., 1979, "Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction", Magazine of Concrete Research, Cement and Concrete Association, Vol. 31 (109): 235-242.

ICOLD, 1991, "Alkali-aggregate reaction in concrete dams", International Commission on Large Dams, Committee on Materials for Concrete Dams, Bulletin 79. Paris, 157 p.

Idorn, G.M., 1967, "Durability of concrete structures in Denmark", Teknisk Forlag, Copenhagen, 208 p.

Idorn, G.M., Johansen, V., Thaulow, N., 1992, "Assessment of causes of cracking in concrete", In: J. Skalny (Editor), Materials science of concrete III, The American Ceramic Society, New York: 71-104.

ISRM, 1981, "Basic geotechnical description of rock masses (BGD)", Commission on Classification of Rock and Rock Masses, Document Nº 1, International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Vol. 18: 85-110.

Jakobsen, U.H., Thaulow, N., 2000, "Sulphate attack as observed by optical and scanning electron microscopy", Cement and Concrete Technology in the 2000s, Second International Symposium, Istanbul.

Jakobsen, U.H., Thaulow, N., Johansen, V., 1993, "Analyses of sodium- and potassium-rich droplets observed on the surface of alkali-silica reactive aggregates and on gel in polished thin sections", Ramboll, Bulletin Nº 39, 14 p.

Jensen, V., 1993, "Alkali aggregate reaction in southern Norway", Doctor Technicae Thesis, The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, 262 p.

Jensen, V., Sibbick, T., 2001, "RILEM Petrographic method: practical use and comparison with other petrographic methods in use", Proceedings of the 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Athens: 579-586.

Jepsen, B.B., Christensen, P., 1989, "Petrographic examination of hardened concrete", Bulletin of the International Association of Engineering Geology", Nº 39: pp.99-103.

Johansen, V., Thaulow, N., Skalny, J., 1993, "Simultaneous presence of alkali-silica gel and ettringite in concrete", Advances in Cement Research, Vol. 5 (17): 23-29.

Kawamura, M., Arano, N., Terashima, T., 1998, "Composition of ASR gels and expansion of mortars", In: Cohen, M., Mindess, S. e Skalny, J. (Editors), Materials Science of Concrete: Special Volume – The Sidney Diamond Symposium, American Ceramic Society, Westerville, OH: 261-276.

Kawamura, M., Fuwa, H., Juni, M., 2001, "ARS gel composition and expansion in mortars with an extremely low water:cement ratio", Proceedings of the 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Athens: 159-166.

Kerrick, D,M., Hooton, R.D., 1992, "ASR of concrete quarried from a fault zone : results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar tests", Cement and Concrete Research, Vol. 22 (5): 949-960.

Knudsen, T., Thaulow, N., 1975, "Quantitative microanalyses of alkali-silica gel in concrete", Cement and Concrete Research, Vol 5 (5) : 443-454.

Krumbein, W.C., Sloss, L.L., 1966, "Stratigraphy and sedimentation", San Francisco, WH Freeman & Co, 660 p.

Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Brown, J.T., Meyer-Ilse, 1998, "Imaging of ASR gel by soft X-ray microscopy", Cement and Concrete Research, Vol. 28 (3): 411-421.

Larive, C., 1990, "Les réactions de dégradations internes du béton – Où, quand, comment, pourquoi?", Relatório do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Série OA-6, Paris, 70 p.

Larive, C., 1998, "Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 395 p.

Lawrence, C.D., 1995, "Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature", Cement and Concrete Research, Vol. 25 (4): 903-914.

LCPC, 1993, "Essai de granulats. Détermination des alcalins solubles dans l'eau de chaux", Méthod D'Essai LPC nº 37, Paris, 13 p.

LCPC, 1994, "Recommandations pour la prevention des desordres dus a l'alcali-reaction", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Version 1994, 51 p.

LCPC, 1999, "Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art", Paris, 42 p.

Le Roux, A, 1991, "Méthodes pétrographiques d'étude de l'alcali-réaction" in Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Nº 44: 47-54.

Le Roux, A., 2001, "Les mécanismes mis en jeu dans les dégradations dues à l'alcali-réaction", Seminário Degradação de Estruturas por Reacções Expansivas de Origem Interna, LNEC, Lisboa.

Le Roux, A., Thiebaut, J., Guédon, J.-S., Wackenheim, C., 1999, "Pétrographie appliquée à l'alcali-réaction", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 98 p.

Lea, F.M., 1998, "The chemistry of cement and concrete", 4th edition, London, Edward Arnold. 1052 p.

Leemann, A., Holzer, L., 2003, "Alkali-aggregate reaction – identification of reactive silicates", Proceedings of the 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Trondheim (CD-Rom).

Longhnan, F.C., 1969, "Chemical weathering of the silicate minerals", Ed. American Elsevier Publishing Co., Inc., New York, 154 p.

Louarn, N., Larive, C, 1993, "Alcali-réaction et réaction sulfatique: synthèse des études microscopiques d'expertises de ponts dégradés", Bulletin Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, nº 184, LCPC, Paris : 57-69.

Marzouk, H., Langdon, S., 2003, "The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete", Cement and Concrete Composites, Nº 25: 549-556.

Mayfield, B., 1990, "The quantitative evaluation of the water/cement ratio using fluorescence microscopy", Magazine of Concrete Research, Vol. 42 (150): 45-49.

Mays, G.C., 1992, "The behaviour of concrete", In: Geoff Mays (Editor), Durability of concrete structures – Investigation, repair, protection, E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 267 p.

Mehta, P.K., 1983, "Mechanism of sulphate attack on Portland cement concrete – another look", Cement and Concrete Research, Vol 13 (3): 401-406.

Mehta, P.K., 1992, "Sulfate attack on concrete – a critical review", In: J. Skalny (Editor), Materials Science of Concrete III, American Ceramic Society, Westerville, OH: 105-130.

Michel, B., Thiébaut, J., Wackenheim, C., 2003, "Intérêt de la minéralogie des granulats dans la connaissance des risques de l'alcali-réaction, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 62 (2): 145-153.

Mielenz, R.C., 1946, "Petrographic examination of concrete aggregates", Geological Society of America Bulletin, Vol. 57 : 309-318.

Mielenz, R.C., Greene, K.T., Benton, E.J., 1947, "Chemical test for reactivity of aggregates with cement alkalies. Chemical processes in cement-aggregate reaction", Journal of The American Concrete Institute, Nº 19 : 193-221.

Monteiro, P.J.M., Shomglin, K, Wenk, H.R., Hasparyk, N.P., 2001, "Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction", ACI Materials Journal, American Concrete Institute, Vol. 98 (2) : 179-183.

Moore, I.C., Gribble, C.D., 1980, "The suitability of aggregates from weathered Peterhead granites", The Quarterly Journal of Engineering Geology, Nº 13: 305-314.

Mullick, A.K., 1987, "Evaluation of ASR potential of concrete aggregates containing strained quartz", NCB Quest, National Council for Cement and Building Materials, New Delhi, 1: 35-46.

Natesaiyer, K., Hover, K. C., 1988, "In situ identification of ASR products in concrete", Cement and Concrete Research, Vol 18 (3): 445-463.

Natesaiyer, K., Hover, K. C., 1989, "Further study of an in situ technique for the identification of alkali-silica products in concrete", Cement and Concrete Research, Vol 19 (5): 770-778.

Neiva, J.M.C., 1958, "Barragem do Alto Rabagão. Reconhecimento Geológico", Hidroeléctrica do Cávado, 31 p.

Neiva, J.M.C., 1959a, Alto Rabagão – Geologia da Pedreira nº 1", Hidroeléctrica do Cávado, 3 p.

Neiva, J.M.C., 1959b, "Notas sobre a pedreira Nº 2, próximo da Ponte da Amareira", Hidroeléctrica do Cávado, 3 p.

Neiva, J.M.C., 1959c, "Notas sobre o granito e as pedreiras 1 e 2 do Alto-Rabagão", Hidroeléctrica do Cávado, 3 p.

Neiva, J.M.C., 1959d, "Significado geológico dos índices de alteração do granito do Alto-Rabagão", Hidroeléctrica do Cávado, 6 p.

Neiva, J.M.C., 1981, "Geologia do Local da Barragem do Cabril", Electricidade de Portugal, 33 p.

Neiva, J.M.C., 1987, "Água e materiais saídos dos drenos da barragem do Alto-Rabagão e seu interesse", Electricidade de Portugal, 19 p.

Neiva, J.M.C., Lima, C., Plasencia, N., Ferreira, F., 1995, "Concrete deterioration of the Pracana dam: microscopy and rehabilitation", Proceedings of the 5th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Leuven: 151-161.

Neiva, J.M.C., Neiva, A.M.R., Godinho, M.M., 1965, "Meteorização do Granito em Clima Temperado Quente – Alteração do Granito de Pisões (Montalegre), Memória e Notícias nº 60, Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra e Centro de Estudos Geológicos: 33-53.

Neves, J.C.M.B., Lobo, L.M., Nunes, J.M.O., 1964, "Considerations sur les etudes du beton de quelques grands barrages portugais", Huitième Congrès International des Grands Barrages, Q.30 R.23, Edinburgh : 369-392.

Neville, A.M., 1999, "Properties of concrete", 4th edn. Pearson Education Limited, Essex, 844 p.

NF P18-590, 1993, " Granulats – Stabilité dimensionelle en milieu alcalin. Essai accéléré sur mortier par autoclave". Normalisation Française, AFNOR, Paris, 7 p.

Nishibayashi, S., Okada, K., Kawamura, M., Kobayashi, K., Kojima, T., Miyagawa, T., Nakano, K., Ono, K., 1992, "Alkali-silica reaction – Japanese experience", In: Swamy, R.N. (Editor), The alkali-silica reaction in concrete, Blackie and Son Ltd., UK, pp. 270-306.

Nixon, P.J., Collins, R.J., Rayment, P.L., 1979, "The concentration of alkalies by moisture migration in concrete – a factor influencing alkali aggregate reaction", Cement and Concrete Research, Vol 9 (4): 417-423.

Nixon, P., Hawthorn, F., Sims, I., 2004, "Developing an international specification to combat AAR proposals of RILEM TC 191-ARP", Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijin: 8-16.

Noronha, F.M.P., 1983, "Estudo Metalogénico da Área Tungstífera da Borralha", Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 413 p.

Noronha, F., Ribeiro, M.L., 1983, "Notícia explicativa da Folha 6-A Montalegre", Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50 000, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 30 p.

NP EN 197-1, 2001, "Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.", Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 35 p.

NP EN 932-3, 2000, "Ensaios para determinação das propriedades gerais dos agregados. Parte 3: Procedimento e terminologia para a descrição petrográfica simplificada", Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 14 p.

NP 1381, 1976 "Inertes para argamassas e betões. Ensaio de reactividade potencial com os álcalis do ligante. Processo da barra de argamassa", CT104, Norma Portuguesa, IGPAI, Lisboa, 6 p.

NP EN 1926, 2000, "Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão.", Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 19 p.

NP EN 12390-1, 2003, "Ensaios do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes", Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 14 p.

NP EN 12390-3, 2003, "Ensaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio", Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 21p.

NP EN 12620, 2004, "Agregados para betão", Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 56 p.

Nunes, J.M.O., Lobo, L.M., 1955, "Le dosage en ciment dans les bétons des derniers barrages-voute construits au Portugal", Cinquième Congrès International des Grands Barrages, Q.19 R.39, Paris : 207-211.

Nunes, J.M.O., Machado, E.F.P., 1961, "Spécifications concernant les agrégats pour béton des barrages portugais", Septième Congrès International des Grands Barrages, Q.24 R.87, Roma : 731-752.

Oberholster, R.E., 1983, "Alkali reactivity of siliceous rock aggregates: Diagnosis of the reaction, testing of cement and aggregate and prescription of preventive measures", Proceedings of the 6th International Conference of Alkalis in concrete – research and practice, Technical University of Denmark, Copenhagen: 419-433.

Oberholster, R.E., Davies, G., 1986, "An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates", Cement and Concrete Research, Vol. 16 (2): 181-189.

Ouyang, C., Nanni, A., Chang, W., 1988, "Internal and external sources of sulfate ions in Portland cement mortar: two types of chemical attack", Cement and Concrete Research, Vol. 18 (5): 699-709.

Owsiak, Z., 2004, "Alkali-aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate". Cement and Concrete Research, Vol. 34 (1): 7-11.

Pereira, L.C.G., 1984a, "Sobre a ocorrência de fosfatos no granito de Pedrógão Grande (Portugal Central)", Memórias e Notícias, nº 98, Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, Coimbra: 125-131.

Pereira, L.C.G., 1984b, "Sobre a existência de fosforitos no Complexo Xisto-Grauváquico na região a Norte de Figueiró dos Vinhos e a Este de Pedrógão Grande (Portugal Central)", Memórias e Notícias, nº 98, Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, Coimbra: 133-135.

Pereira, L.C.G., 1987, "Tipologia e evolução da sutura entre a ZCI e a ZOM no sector entre Alvaiázere e Figueiró dos Vinhos (Portugal Central), Tese de Doutoramento, Centro de Geociências da Universidade de Coimbra, 331 p.

Pettifer, K., Nixon, P.J., 1980, "Alkali metal sulphate – a factor common to both alkali aggregate and sulphate attack on concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 10 (2): 173-181.

Pinto, A.V., 2001, "Estatísticas relativas a barragens existentes" In: Quintela, A.C, Pinheiro, A.N., Gomes, A.S., Afonso, J.R., Almeida, J.M. e Cordeiro, M.S., (Editores), 2001, "Curso de exploração e segurança de barragens", Instituto da Água, Lisboa: 3.6-3.12.

PNCOLD, 1992, "Large Dams in Portugal", Portuguese National Committee on Large Dams, Melo, F.G. e Gomes, A.S. (editores), LNEC. Lisboa. 276 p.

Poole, A.B., 1992, "Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete", In: Swamy, R.N. (Editor), The alkali-silica reaction in concrete, Blackie and Son Ltd., London, pp. 1-29.

Portaria 847/93, 1993, "Normas de observação e inspecção de barragens", DR nº 213, I Série B de 10-9-1993, Lisboa.

Power, T.O., Hammersley, G.P., 1978, "Practical concrete petrography". Concrete, Vol. 12 (8), The Concrete Society: 27-31.

Powers, M.C., 1953, "A new roundness scale for sedimentary particles", Journal of Sedimentary Petrology, 23 (2): 117-119.

Powers, T.C., Steinour, H.H., 1955a, "An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction. Part 1 – The chemical reactions and mechanisms of expansion", Journal of American Concrete Institute, Title nº 51-26: 497-516.

Powers, T.C., Steinour, H.H., 1955b, "An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction. Part 2 – A hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete", Journal of American Concrete Institute, Title nº 51-40: 758-811.

Prince, W., Perami, R., 1993, "Mise em evidence du role essentiel des ions OH^- dans les reactions alcali-silice", Cement and Concrete Research, Vol 23 (5) : 1121-1129.

Prince, W., Castanier, G., Giafferi, J.L., 2000, "Similarity between alkali-aggregate reaction and the natural alteration of rocks", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 89-98.

Proença, A.M., 1995, "Adjuvantes e adições – Influência na durabilidade", 1ª Jornadas de Estruturas de Betão, Porto: 31-46.

Ramos, J.M, 2001, "Barragens de alvenaria e de betão" in Quintela, A.C, Pinheiro, A.N., Gomes, A.S., Afonso, J.R., Almeida, J.M. e Cordeiro, M.S., (Editores), 2001, "Curso de exploração e segurança de barragens", Instituto da Água, Lisboa: 1.39-1.56.

Ramos, J.M, Batista, A.L., Oliveira, S.B., Castro, A.T., Silva, H.S., Pinho, J.S., 1996, "Reliability of arch dams subject to concrete swelling. Three case histories", Memória nº 808, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 19 p.

Ranc, R., Isabelle, H., Clément, J.Y., Sorrentino, D., 1994, "Limits of application of the ASTM C 227 mortar bar test. Comparison with two other standards on alkali aggregate reactivity", Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 16 (1), The American Society for Testing and Materials: 63-72.

Reis, M.O.B., Silva, H.S., Silva, A.S., 1996, "Ocorrência de reacções álcalis-inerte em Portugal. Estudos de Casos", Betão Estrutural 1996 – 6º Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-esforçadas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1996: 2.37-2.48.

Rendell, F., Jauberthie, R., Grantham, M., 2002, "Deteriorated concrete. Inspection and physicochemical analysis", Thomas Telford, London, 194 p.

Rhoades, R., Mielenz, R.C., 1946, "Petrography of concrete aggregate", Journal of the American Concrete Institute, Vol. 17 (6): 581-600.

RILEM TC 106-2 AAR, 2000, "Alkali-aggregate reaction: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – The ultra-accelerated mortar-bar test", Materials and Construction, Vol. 33: 283-293.

RILEM AAR-0, 2003, "Detection of alkali-reactivity potential in concrete – Outline guide to the use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity", TC 191-ARP: Alkali-reactivity and prevention – Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, prepared by I. Sims and P. Nixon, Materials and Constructions, Vol. 36: 472-479.

RILEM AAR-1, 2001, "Rilem petrographic method", New edited draft – December, 2001, RILEM/TC-ARP/01/03a, 51 p.

RILEM AAR-1, 2003, "Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method", TC 191-ARP: Alkali-reactivity and prevention – Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, prepared by I. Sims and P. Nixon, Materials and Constructions, Vol. 36: 480-496.

Rito, A., Appleton, J., 2000, "Inspecção e reabilitação da Ponte da Figueira da Foz e dos viadutos de acesso.", REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa: 877-888.

Rivard, P., Fournier, B., Ballivy, G., 2000, "Quantitative assessment of concrete damage due to alkali-silica reaction (ASR) by petrographic analysis", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 889-898.

Rocha, M., 1981, "Mecânica das rochas", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa: 445 p.

Rocha, M., Silveira, A.F., 1964, "Assessment of observation techniques used in Portuguese concrete dams", Huitième Congrès International des Grands Barrages, Q.29 R.42, Edinburgh: 757-790.

Rocha, M., Serafim, J.L., Silveira, A.F., Guerreiro, M, 1959, "Observação de barragens de betão. Resultados obtidos na Barragem do Cabril", Electricidade – Revista Técnica Portuguesa, Empresa Editorial Electrotécnica, EDEL, Lda., nº 10, Lisboa: 99-121.

Rocha, M., Silveira, A.F., Azevedo, M.C.C., Lopes, J.B., 1967a, "Influence of a very high deformability of the foundation on the conception and behaviour of an arch dam", Neuvième Congrès International des Grands Barrages, Q.32 R.28, Istambul: 441-461.

Rocha, M., Silveira, A.F., Rodrigues, O.V., Florentino, C., 1967b, "Assessment of the behaviour of a large dam during its first loading", Neuvième Congrès International des Grands Barrages, Q.34 R.23, Istanbul: 403-418.

Sahu, S, Clark, B.A., Lee, R.J., 1998, "Delayed ettringite formation and the mode of concrete failure", In: Cohen, M., Mindess, S. e Skalny, J. (Editors), Materials Science of Concrete – The Sydney Diamond Symposium, The American Ceramic Society, Westerville: 379-394.

Sampaio, J.C., 1995, "Parâmetros a considerar na durabilidade dos betões", 1ª Jornadas de Estruturas de Betão, Porto: 7-18.

Shayan, A., 1989, "Re-examination of AAR in an old concrete", Cement and Concrete Research, Vol.19 (3): 434-442.

Shayan, A., 1992, "The "pessimum" effect in an accelerated mortar bar test using 1M NaOH solution at 80º C", Cement and Concrete Composites, Vol. 14 (4): 249-255.

Shayan, A., 1993, "Alkali reactivity of deformed granitic rocks: a case study", Cement and Concrete Research, Vol.23 (5): 1229-1236.

Shayan, A., Ivanusec, I., 1996, "An experimental clarification of the association of delayed ettringite formation with alkali-aggregate reaction", Cement and Concrete Composites, Vol 18: 161-170.

Shayan, A., Quick, G.W., 1989, "Microstructure and composition of AAR products in conventional standard and new accelerated testing", Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto: 475-482.

Shayan, A., Quick, G.W., 1991/92, "Relative importance of deleterious reactions in concrete: formation of AAR products and secondary ettringite", Advances in Cement Research, Vol. 4 (16): 149-157.

SHRP, 1994, "Alkali-silica reactivity: an overview of research", Strategic Highway Research Program-C-342, National Research Council, Washington, USA, 105 p.

Sibbick, T., Crammond, N., 2003, "The petrographic examination of popcorn calcite depositino (PCD) within concrete mortar, and its association with other forms of degradation", 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Trondheim, CD-ROM.

Sibbick, T., Crammond, N.J., Metcalf, D., 2003 "The microscopical characterisation of thaumasite", Cement and Concrete Composites, Nº 25: 831-837.

Silva, A.S., Reis, M.O. B., 2000, "Avaliação da reactividade aos álcalis dos agregados para betão", Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, FEUP, Porto: 23-32.

Silva, H.S., 1992, "Estudo do envelhecimento das barragens de betão e de alvenaria – alteração físico-química dos materiais", Tese apresentada a concurso para acesso à categoria de Investigador Auxiliar e para obtenção do grau de Especialista do LNEC, Lisboa, 385 p.

Silva, H.S., Rodrigues, J.D., 1993, "Importância, ocorrência em Portugal e métodos de diagnóstico das reacções álcali-agregado em betões. Contribuição dos conhecimentos geológicos", Geotecnia, Nº 67: 65-76.

Silveira, A.F., 1961, "As variações de temperatura nas barragens", Memória nº 177, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, pp.466.

Silveira, A.F., Pina, C.A.B., Costa, C.A.P., Direito, F.T., 1991, "Influence of foundation heterogeneity on safety of arch dams", Dix-septième Congrès International des Grands Barrages, Q.66 R.76, Viena: 1429-1446.

Sims, I., 1981, "The application and reliability of standard testing procedures for potential alkali-reactivity", Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, Cape Town. National Building Research Institute Pretoria, paper S252/13.

Sims, I., 1987, "The importance of petrography in the ASR assessment of aggregates and existing concretes", Proceedings of the 7th International Conference on AAR, Ottawa: 358-367.

Sims, I., 1992, "Alkali-silica reaction – UK experience" In: Swamy, R.N. (Editor), The alkali-silica reaction in concrete, Blackie and Son Ltd., London: 122-187.

Sims, I., Brown, B., 1998, "Concrete aggregates", In Peter C. Hewlett (Editor), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Arnold. London: 903-1011.

Sims, I., Smart, S., Hunt, B., 2000, "Practical petrography – the modern assessment of aggregates for AAR potential", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 493-502.

Skalny, J., Marchand, J., Odler, I., 2002, "Sulfate Attack on concrete", Modern Concrete Technology Series 10, Spon Press, London and New York, 217 p.

Smith, M.R., Collis, L. (Editores), 2001, "Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes", 3rd edition, Revised by Fookes, P.G., Lay, J., Sims, I., Smith, M.R., West, G., Geological Society Engineering Geology Special Publication Nº 17, London, 339 p.

Stievenard-Gireaud, D., 1987, "Etude de la réaction alcalis-silice dans des bétons" Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC Nº 144, Paris, 104 p.

St John, D.A., Poole, A.B., Sims, I., 1998, "Concrete petrography – A handbook of investigative techniques", Arnold, U.K, 474 p.

Struble, L., Skalny, J., Mindess, S., 1980, "A review of the cement-aggregate bond", Cement and Concrete Research, Vol 10 (2): 277-286.

Swamy, R.N. (Editor), 1992, "The alkali-silica reaction in concrete", Blackie and Son Ltd., London, 336 p.

Swamy, R.N., Al-Asali, M.M., 1988a, "Expansion of concrete due to alkali-silica reaction", ACI Materials Journal, Vol. 85 (1): 33-40.

Swamy, R.N., Al-Asali, M.M., 1988b, "Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction", ACI Materials Journal, Vol. 85 (5): 367-374.

Taylor, H.F.W., 1997, "Cement chemistry", 2nd edition, Thomas Telford Publishing, London, 459 p.

Taylor, H.F.W., Famy, C., Scrivener, K.L., 2001, "Delayed ettringite formation", Cement and Concrete Research, Vol. 31 (5): 683-693.

Teles, M., 1985, "Comportamento térmico de barragens de betão", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 284 p.

Thaulow, N., Jakobsen, U.H., Clark, B, 1996, "Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses", Cement and Concrete Research, Vol. 26 (2): 309-318.

The Institution of Structural Engineers, 1992, "Structural effects of alkali-silica reaction – Technical guidance on the appraisal of existing structures", London, 48 p.

Thomas, M.D.A., 1998, "The role of calcium in alkali-silica reaction", In: Cohen, M., Mindess, S e Skalny, J. (Editors), Materials Science of Concrete: The Sidney Diamond Symposium, The American Ceramic Society: 325-337.

Van Aardt, J.H.P., Visser, S., 1977, "Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions", Cement and Concrete Research, Vol 7 (6): 643-648.

Xerez, A.C., 1954, " O aproveitamento do Cabril", Técnica, Revista de Engenharia dos Alunos do IST, nº 243, Lisboa: 515-528.

Xerez, A.C., 1970, "Controle de la sécurité des barrages-voutes", Dixième Congrès International des Grands Barrages, Q.38 R.45, Montreal : 857-869.

Xerez, A.C., Lamas, J.F., 1958, "Methods of analysis of arch dam behaviour", Sixième Congrès International des Grands Barrages, Q.21 R.39, New York : 407-431.

Wang, H., Gillot, J.E., 1991, "Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide". Cement and Concrete Research, Vol. 21 (4): 647-654.

West, G., 1991, "A note on undulatory extinction of quartz in granite", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 24: 159-165.

West, G., 1994, "Undulatory extinction of quartz in some British granites in relation to age and potential reactivity", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 27, Part 1: 69-74.

West, G., 1996, "Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges", Thomas Telford Publications, London, 167 p.

Weyermann, W., 1970, "Résultats de l'observation des sous-pressions du barrage de L'Alto Rabagão (Portugal)", Dixième Congrés International des Grands Barrages, Q.37 R.22, Montreal : 369-390.

WGPNCOLD, 1985, "Cracking and repair works in Cabril dam", Quinzième Congrés International des Grands Barrages, ICOLD, Q.77 R.21, Lausanne: 367-387.

WGPNCOLD, 1991, "Some case studies of ageing scenarios control in Portuguese concrete dams", Dix-septième Congrés International des Grands Barrages, ICOLD, Q.65 R.57, Viena :1035-1055.

Wigum, B. J., 1995, "Alkali-aggregate reactions in concrete – properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks", PhD. Thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Norway, 227 p.

Wigum, B.J., Hagelia, P., Haugen, M., Broekmans, M.A.T.M., 2000, "Alkali aggregate reactivity of Norwegian aggregates assessed by quantitative petrography", Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec: 533-542.

Wirgot, S., 1992, "La mesure du rapport eau/ciment du béton durci au microscope optique", Infrastructuur in Het Leefmilieu 2/92 : 127-133.

ANEXO A

Descrição de amostras e lâminas delgadas de betão (ASTM C 856-04, 2004)

Exame visual do betão (ASTM 856-04, 2004)

Agregado grosso	Agregado fino	Matriz	Ar	Outros materiais
Composição. Dimensão máxima [A] em mm, no intervalo >d>. *Tipo:* 1. Seixo; 2. Rocha britada; 3. Mistura 1 e 2; 4. Outro (nome); 5. Mistura 1 +/ou 2 +/ou 4. Se tipo 1, 2 ou 4, homogéneo ou heterogéneo. Tipos litológicos Agregado grosso mais de 20, 30, 40 ou 50% do total.	*Tipo:* 1. Areia natural; 2. Areia britada; 3. Mistura; 4. Outro (nome); 5. Mistura 1 +/ou 2 +/ou 4. Se tipo 1, 2 ou 4, homogéneo ou heterogéneo.	Cor, por comparação com o National Research Council *Rock Color Chart* (1963). Distribuição da cor: 1. Mosqueada; 2. Homogénea; 3. Variações graduais.	Mais de 3% do total, predominantemente em poros esféricos? Menos do que 3% do total, poros não esféricos abundantes? Diferenças de cor entre os poros e a matriz? Poros vazios, preenchidos, com orla interna ou parcialmente preenchidos?	Tipo, dimensões, localização; tipos de metal; outros materiais.
Fábrica: Forma. Distribuição. Empacotamento. Granulometria (igual, diferente, excesso ou deficiência de tamanhos). Paralelismo das faces planas ou eixos longos, normais à direcção de colocação ou paralelo às superfícies do betão[B].	Distribuição Forma das partículas Granulometria Orientação preferencial	Distribuição.	Forma. Distribuição. Graduação (se perceptível). Paralelismo dos eixos longos de poros irregulares ou camadas de poros: uns com os outros, com os lados planos ou eixos longos dos agregados grossos.	Poros por baixo de armaduras horizontais ou com baixo ângulo.
Condição: O tarolo soa quando se usa o martelo ou tem um som oco? Pode ser quebrado com os dedos? Tem fissuras? Como estão distribuídas? Através ou em volta dos agregados grossos? Em tarolos ou amostras serradas, o agregado desfaz-se? Qual o preenchimento das fissuras? Há depósitos à superfície? Existem áreas com aspecto invulgarmente húmido ou seco? Há bordaduras nos agregados?				Limpo ou corroído? As fissuras estão associadas com os materiais?

[A] Uma porção substancial do agregado grosso tem dimensões máximas no intervalo indicado, medido em superfícies serradas ou de fractura.

[B] Secções serradas ou tarolos próximos e paralelos à superfície mostram turbulência local como resultado do espaçamento das armaduras. As secções serradas segundo o plano de acamação (normal à direcção de colocação) podem ter orientação pouco nítida. As secções de fractura normais à colocação em betão aplicado convencionalmente, com ligação normal, tendem a originar a concentração de agregados no fundo da peça superior assim como abundantes cavidades no topo da peça inferior.

Exame do betão à lupa binocular (ASTM 856-04, 2004).

Agregado grosseiro	Agregado fino	Matriz	Poros
Tipos litológicos e mineralogia. Textura da superfície. Na amostra: - Forma do grão; - Intervalo máximo de dimensão (mm); - Mediana dentro do intervalo de _mm a _mm; - Sem textura (demasiado fina para ser visível); - Uniforme ou variável na amostra. De peça para peça: - Ligação intergranular; - Porosidade e absorção[B]. Se o betão parte através do agregado, até quanto e de que tipo? Se há poros nos bordos, em que agregados ocorrem? Em todos? Em todos de um tipo? Mais de 50% de um tipo? Vários tipos? Existe segregação?	Tipos litológicos e mineralogia. Forma. Textura da superfície. Granulometria. Distribuição.	Cor. Fracturas à volta ou através do agregado. Contacto da matriz com o agregado: - fechado, sem abertura visível em superfícies serradas ou de fractura; agregado não removível com os dedos ou sonda; aberturas no contacto frequentes, comuns ou raras; - Largura; - Sem preenchimento; - Preenchido. Fissuras presentes, ausentes, resultantes da preparação da amostra ou anteriores à preparação. Misturas minerais[C]. Com contaminação. Com exsudação.	Dimensão. Proporção dos esféricos e não esféricos. Não esféricos, elipsoidais, irregulares, em disco. Variação de cor da superfície interior para a matriz. Superfície interior com brilho semelhante à matriz, escuro, brilhante. Não existem orlas nos poros, são raras, comuns, totais, parciais, sem cor, coloridas, tufos sedosos, tabletes hexagonais, gel, outros. Poros nas faces inferiores ou camadas de poros são raros, pequenos, comuns, abundantes.

[B] Poros visíveis a olho nu ou em nicóis cruzados ou que absorvem a água derramada sobre eles.

[C] Esferas sólidas escuras ou esferas de vidro com orifício no centro, ou de magnetite, ou algumas de vidro e outras de magnetite, reconhecíveis em ampliação de 9x em superfícies serradas de fractura. Outras misturas minerais com partículas características visíveis em baixa ampliação. A superfície de betão contendo cimento portland com escórias de alto forno é invulgarmente branca próximo das superfícies livres, mas retém manchas esverdeadas ou em azul-esverdeado; as partículas de escória podem ser observadas à lupa binocular ou microscópio petrográfico.

Nota 1 – Condições – Quando observada em ampliações de 6 a 10x com boa luz, a superfície de fractura fresca de um betão em boas condições físicas, que ainda retém a maior parte do seu teor de humidade natural, tem um brilho que em termos mineralógicos é translúcido e vítreo. Bordos finos das lâminas da pasta transmitem luz; parecem existir reflexões a partir de vários pontos da superfície e a qualidade do brilho é semelhante à de um vidro partido mas menos intensa. O betão em piores condições físicas é mais opaco nas superfícies de fractura frescas e o brilho é escuro, subvítreo ou pode atingir aspecto de giz. Uma amostra de laboratório de betão adequadamente curado durante 28 dias e misturado em proporções normais, que apresenta resistência à compressão ou à flexão normal e que é partido com martelo e examinado em fractura recente no prazo de uma semana a partir do final da cura, fornece um bom exemplo de betão em boas condições físicas.
Nas mesmas condições de exame, quando existe a certeza de que o betão não contém cimento portland branco ou de escórias, a cor da matriz do betão, em boas condições físicas, é cinzenta ou tisnada, excepto em fracturas antigas ou na superfície original.

Exame do betão em lâmina delgada (ASTM 856-04, 2004).

Agregado grosso e fino	Grãos relíquia do cimento e produtos de hidratação	Características da pasta de cimento
Mineralogia, textura, fábrica, variável ou homogénea. Granulometria: excesso ou deficiência de dimensões de areia deve ser avaliado após exame de várias lâminas delgadas. Dimensão do grão e natureza das orlas internas dos agregados. Classificação de agregados finos e grossos. Agregados naturais ou britados; agregados finos naturais ou manufacturados. Ligação com a matriz; fissuras periféricas no interior dos grãos de inerte; fissuras internas. Microfracturas gerais, se se estabelecer que existiam antes da produção da lâmina delgada. *Reacções álcali-carbonato* – se o agregado grosso é uma rocha carbonatada, existem orlas em que não se observa o hidróxido de cálcio? Rochas dolomíticas que reagiram parcialmente são por vezes rodeadas de pasta sem hidróxido de cálcio na porção dolomítica, enquanto a pasta junto ao calcário é normal. Ver mais comentários na coluna 3. *Reacções alcali-sílica* – o agregado contém partículas reactivas (cherte, novaculite, vidro vulcânico ácido, cristobalite, tridimite, opala, vidro de garrafa)? Se existe quartzito, subgrauvaque metamórfico, argilito, filito ou algum dos referidos anteriormente, existem fissuras internas na periferia dos agregados? O agregado está transformado em gel, de tal modo que desapareceu durante a preparação da lâmina, notando-se apenas os contornos? (Este fenómeno também ocorre em betão com escórias arrefecidas ao ar, indicando reacção com o cimento). As fissuras que parecem ser de tracção e que surgem do centro para os bordos das partículas são também evidência de reacções álcali-sílica.	Em betão com mais de 2 anos e cura normal, os únicos grãos de cimento residuais são os que tinham maior dimensão, que podem ser compostos de diversos constituintes ou ser de alite ou belite (substituição de C_3S e C_2S). Os dois últimos podem estar rodeados de um ou mais níveis de gel com diferentes índices de refracção, ou por um nível de hidróxido de cálcio. Os maiores grãos relíquia podem ser não hidratados e reter a birrefringência baixa (cinzento escuro) da alite em secções quase hexagonais distorcidas, e a birrefringência visível de amarelo de primeira ordem das maclas lamelares em grãos de belite. A aluminoferrite intersticial aparece como grãos prismáticos que variam de castanho a castanho esverdeado ou avermelhado, com elevado índice de refracção e pleocroísmo mascarado pela cor do grão. O aluminato tricálcico não é geralmente reconhecido em lâmina delgada porque: a forma cúbica é isotrópica; hidrata no início da hidratação do betão, para formar ettringite submicroscópica ou sulfato tetracálcico de alumínio hidratado ou outro hidrato com ou sem aniões. Pode ser visível em poros em betão antigo mas é mais fácil de identificar por difracção de raio-X. Os cimentos de diferente origem têm cores diferentes da aluminoferrite e os silicatos de cálcio são verde pálido, amarelo ou esbranquiçado. Deve ser possível atribuir os cimentos a uma origem.	A pasta de cimento normal consiste, em luz transmitida, num material de tom castanho pálido variando por vezes no índice de refracção e contendo grãos relíquia de cimento não hidratados. Em betão cortado prematuramente ou não totalmente curado, a pasta contém grãos não hidratados que podem ter pouco micrómetros a 100 μm de diâmetro se o betão foi produzido em circuito aberto ou em pequenas áreas para diminuir o calor de hidratação. Em nicóis cruzados, a pasta normal é negra ou cinzenta muito escura com cristais poecilíticos anédricos ou pequenas segregações de hidróxido de cálcio e grãos-relíquia de cimento. Em betão com elevada relação água/cimento e agregados siliciosos, os cristais de hidróxido de cálcio atingem a dimensão dos grãos residuais de cimento, ou seja, 100 μm. Em betão com baixa relação água/cimento e maior conteúdo em cimento, e agregados siliciosos ou carbonatados, a dimensão máxima dos cristais de hidróxido de cálcio é bastante menor. Independentemente da relação água/cimento e do tipo de agregado, os cristais de hidróxido de cálcio ocupam o espaço inferior das partículas de agregado. Quando o agregado é carbonatado, o tamanho máximo dos cristais de hidróxido de cálcio é menor do que no caso de agregados siliciosos (o hidróxido de cálcio é provavelmente epitaxial com a calcite). A pasta de cimento em betão sujeito a lixiviação prolongada por ácidos, tem pouco hidróxido de cálcio, que está presente como grãos anédricos recristalizados e precipitados junto das superfícies exteriores. Em betão com mais de 2 ou 3 anos, feito com cimento do tipo I, II ou III, é esperado que exista alguma etringite em rosetas nos poros. Este fenómeno é normal. Para demonstrar que ocorreu ataque por sulfatos, é preciso determinar quimicamente que o conteúdo em SO_3 do betão é superior ao que seria fornecido pelo cimento original. A etringite em poros não é causa de danos no betão, apesar de poder acompanhar etringite submicroscópica na pasta, que origina danos no betão.

ANEXO B

Ensaios ASTM C 1260-94, 2002

Granito "Cabril Norte"

LEMRI – Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos

Anexo ao Boletim nº _____

Ensaio de Reactividade aos Álcalis - Ensaio ASTM C 1260
Barra de Argamassa de 2,5x2,5x28,5 cm

Pedido nº:	
Processo nº:	

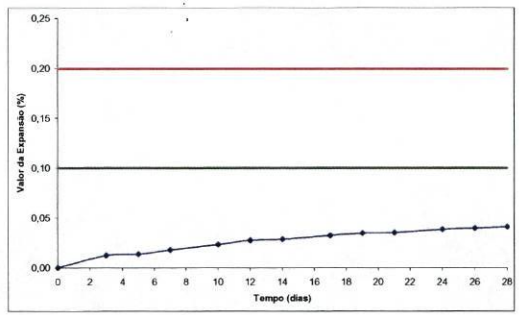
AMOSTRA	**Ensaio Nº:**	110
	Referência :	Granito Cabril N
	Procedência:	Pedreira da Barragem do Cabril
	Natureza:	Granito
	Forma:	Material britado
Técnico executante:		Ludovina Matos
Data da amassadura:		2003-10-08

Areia:	990	g de 0,15 mm - 4,75 mm (***)
Adição:	0	
Cimento :	440	g de Tipo I (*)
Água:	207	ml
A/C:	0,47	
Cimento/Agregado:	0,44	

Medidas	Data	Medidas das Expansões (mm)			Medidas	Dias nºs	Expansão (%)			Média	OBS:
		Provete 1	Provete 2	Provete 3			Provete 1	Provete 2	Provete 3	expansão (%)	
Lseco	2003-10-09	2,376	2,406	2,611	L0	0	0,000	0,000	0,000	0,00	
L0	2003-10-10	2,554	2,583	2,782	L1	3	0,013	0,013	0,011	0,01	
L1	2003-10-13	2,587	2,615	2,809	L2	5	0,014	0,013	0,013	0,01	
L2	2003-10-15	2,590	2,616	2,815	L3	7	0,018	0,018	0,018	0,02	
L3	2003-10-17	2,600	2,627	2,826	L4	10	0,024	0,023	0,023	0,02	
L4	2003-10-20	2,614	2,641	2,839	L5	12	0,028	0,027	0,027	0,03	
L5	2003-10-22	2,625	2,651	2,850	L6	14	0,029	0,028	0,028	0,03	
L6	2003-10-24	2,627	2,654	2,852	L7	17	0,032	0,032	0,033	0,03	
L7	2003-10-27	2,635	2,663	2,864	L8	19	0,035	0,035	0,034	0,03	
L8	2003-10-29	2,641	2,670	2,868	L9	21	0,035	0,036	0,035	0,04	Adição de solução de NaOH 1N
L9	2003-10-31	2,642	2,672	2,869	L10	24	0,038	0,038	0,040	0,04	
L10	2003-11-03	2,648	2,679	2,881	L11	26	0,040	0,039	0,040	0,04	
L11	2003-11-05	2,655	2,681	2,881	L12	28	0,042	0,041	0,040	0,04	
L12	2003-11-07	2,658	2,686	2,883							

Obs: (*) Cimento tipo I 42,5 R da CIMPOR Alhandra com 0,19 % Na2O, 1,02 % K2O, 0,86 % Na2O equivalente e 1,0 mm de expansibilidade
(**) medido de acordo com a norma ASTM C 109 - secção 10,3
(***) amostra foi entregue já britada e separada de acordo com as fracções granulométricas indicadas pela norma

Espalhamento**
80
79
79
77
Média 79



Resultado do Ensaio aos 14 dias (%): 0,03

Resultado do Ensaio aos 28 dias (%): 0,04

Granito "Cabril Sul"

LEMRI – Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos

Anexo ao Boletim nº _____

Ensaio de Reactividade aos Álcalis - Ensaio ASTM C 1260
Barra de Argamassa de 2,5x2,5x28,5 cm

Pedido nº:	
Processo nº:	

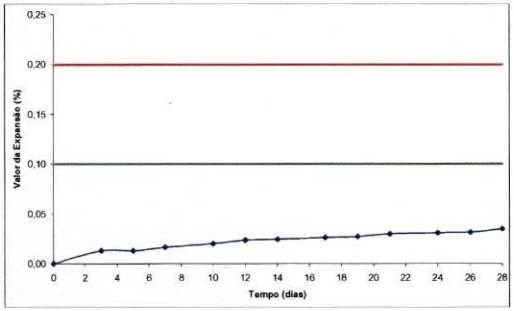
	Ensaio Nº:	111
AMOSTRA	**Referência :**	Granito Cabril S
AMOSTRA	**Procedência:**	Pedreira da Barragem do Cabril
AMOSTRA	**Natureza:**	Granito
AMOSTRA	**Forma:**	Material britado
	Técnico executante:	Ludovina Matos
	Data da amassadura:	2003-10-08

Areia:	990	g de 0,15 mm - 4,75 mm (***)
Adição:	0	
Cimento :	440	g de Tipo I (*)
Água:	207	ml
A/C:	0,47	
Cimento/Agregado:	0,44	

Medidas	Data	Medidas das Expansões (mm)			Medidas	Dias nºs	Expansão (%)			Média	OBS:
		Provete 1	Provete 2	Provete 3			Provete 1	Provete 2	Provete 3	expansão (%)	
Lseco	2003-10-09	2,537	2,683	2,498	L0	0	0,000	0,000	0,000	0,00	
L0	2003-10-10	2,710	2,851	2,660	L1	3	0,014	0,012	0,013	0,01	formação de pontos brancos em todos os provetes
L1	2003-10-13	2,745	2,882	2,693	L2	5	0,013	0,012	0,014	0,01	
L2	2003-10-15	2,742	2,881	2,695	L3	7	0,016	0,016	0,017	0,02	
L3	2003-10-17	2,750	2,892	2,703	L4	10	0,019	0,020	0,022	0,02	
L4	2003-10-20	2,757	2,901	2,714	L5	12	0,022	0,024	0,025	0,02	
L5	2003-10-22	2,765	2,911	2,723	L6	14	0,023	0,025	0,026	0,02	
L6	2003-10-24	2,768	2,913	2,724	L7	17	0,025	0,026	0,027	0,03	
L7	2003-10-27	2,772	2,917	2,728	L8	19	0,026	0,028	0,028	0,03	
L8	2003-10-29	2,775	2,922	2,729	L9	21	0,030	0,031	0,029	0,03	
L9	2003-10-31	2,784	2,929	2,732	L10	24	0,030	0,032	0,031	0,03	
L10	2003-11-03	2,786	2,930	2,737	L11	26	0,032	0,032	0,031	0,03	
L11	2003-11-05	2,790	2,931	2,737	L12	28	0,035	0,036	0,034	0,04	
L12	2003-11-07	2,798	2,940	2,746							

Obs: (*) Cimento tipo I 42,5 R da CIMPOR Alhandra com 0,19 % Na2O, 1,02 % K2O, 0,86 % Na2O equivalente e 1,0 mm de expansibilidade
(**) medido de acordo com a norma ASTM C 109 - secção 10,3
(***) amostra foi entregue já britada e separada de acordo com as fracções granulométricas indicadas pela norma

Espalhamento**
89
88
89
93
Média 90



Resultado do Ensaio aos 14 dias (%): 0,02

Resultado do Ensaio aos 28 dias (%): 0,04

Granito da pedreira de Pisões

LEMRI – Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos

Anexo ao Boletim nº

Ensaio de Reactividade aos Álcalis - Ensaio ASTM C 1260
Barra de Argamassa de 2,5x2,5x28,5 cm

Pedido nº:	
Processo nº:	

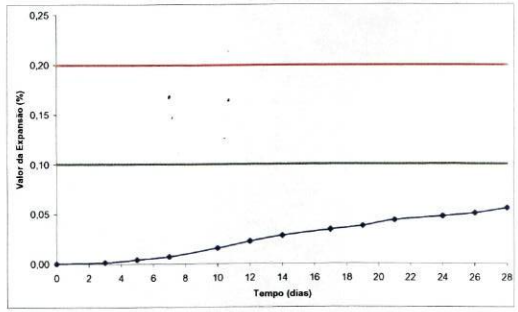
	Ensaio Nº:	112
AMOSTRA	**Referência :**	Granito Alto-Rabagão (Pizões)
AMOSTRA	**Procedência:**	Pedreira da Barragem do Alto-Rabagão
AMOSTRA	**Natureza:**	Granito
AMOSTRA	**Forma:**	Material britado
	Técnico executante:	Ludovina Matos
	Data da amassadura:	2003-10-08

Areia:	990	g de 0,15 mm - 4,75 mm (***)
Adição:	0	
Cimento :	440	g de Tipo I (*)
Água:	207	ml
A/C:	0,47	
Cimento/Agregado:	0,44	

Medidas	Data	Medidas das Expansões (mm)			Medidas	Dias nºs	Expansão (%)			Média	OBS:
		Provete 1	Provete 2	Provete 3			Provete 1	Provete 2	Provete 3	expansão (%)	
Lseco	2003-10-09	2,595	2,675	2,477	L0	0	0,000	0,000	0,000	0,00	
L0	2003-10-10	2,799	2,879	2,681	L1	3	0,002	0,001	0,000	0,00	
L1	2003-10-13	2,805	2,881	2,682	L2	5	0,005	0,004	0,002	0,00	
L2	2003-10-15	2,812	2,890	2,687	L3	7	0,009	0,008	0,005	0,01	
L3	2003-10-17	2,821	2,899	2,694	L4	10	0,018	0,016	0,013	0,02	Formação de pequenos pontos brancos em todos os provetes
L4	2003-10-20	2,844	2,919	2,713	L5	12	0,024	0,022	0,020	0,02	
L5	2003-10-22	2,860	2,935	2,732	L6	14	0,031	0,028	0,026	0,03	Início de formação de pontos de gel nos provetes 1 e 2
L6	2003-10-24	2,876	2,948	2,745	L7	17	0,036	0,034	0,032	0,03	Início de formação de pontos de gel também no provete 3
L7	2003-10-27	2,890	2,964	2,761	L8	19	0,039	0,038	0,037	0,04	
L8	2003-10-29	2,896	2,974	2,774	L9	21	0,046	0,044	0,041	0,04	
L9	2003-10-31	2,914	2,988	2,784	L10	24	0,050	0,047	0,046	0,05	Adição de solução 1N de NaOH
L10	2003-11-03	2,923	2,996	2,796	L11	26	0,052	0,050	0,050	0,05	
L11	2003-11-05	2,930	3,003	2,806	L12	28	0,058	0,055	0,054	0,06	
L12	2003-11-07	2,944	3,016	2,817							

Obs: (*) Cimento tipo I 42,5 R da CIMPOR Alhandra com 0,19 % Na2O, 1,02 % K2O, 0,86 % Na2O equivalente e 1,0 mm de expansibilidade
(**) medido de acordo com a norma ASTM C 109 - secção 10,3
(***) amostra foi entregue já britada e separada de acordo com as fracções granulométricas indicadas pela norma

Espalhamento**
75
71
73
77
Média 74



Resultado do Ensaio aos 14 dias (%): 0,03

Resultado do Ensaio aos 28 dias (%): 0,06

ANEXO C

Observações e análises ao MEV/EDS e ao microscópio óptico

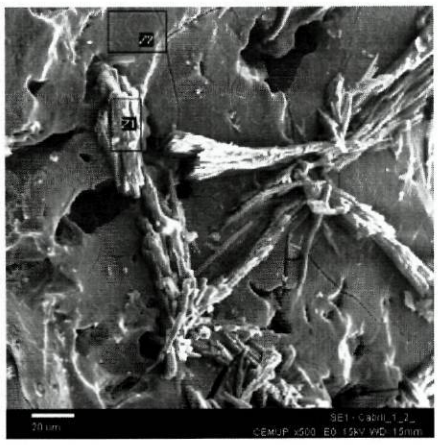
Neste Anexo são apresentadas imagens obtidas ao MEV e espectros EDS de diferentes produtos identificados em eflorescências, exsudações e *pop-outs*. Estão incluídas também imagens de fragmentos e de lâminas delgadas de betão. Encontram-se ainda algumas fotografias de lâminas delgadas de betão obtidas ao microscópio óptico.

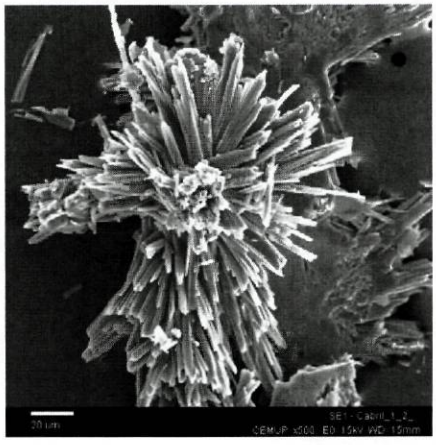
As imagens obtidas ao MEV estão referenciadas com a designação da amostra. Em algumas imagens estão indicadas as zonas onde se realizaram análises semiquantitativas por EDS. Nos espectros, a designação da amostra encontra-se no canto inferior esquerdo e a zona analisada no canto inferior direito.

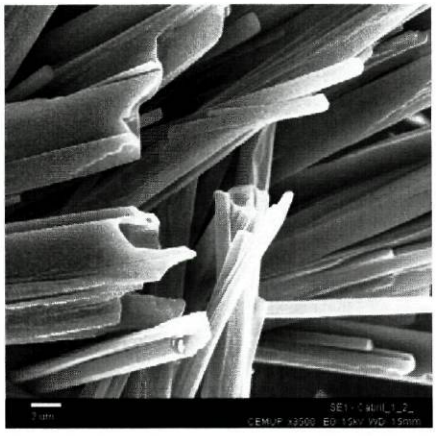
Os espectros relativos às imagens encontram-se à direita destas ou imediatamente abaixo, quando foi analisada mais do que uma zona na mesma amostra ou são apresentados diferentes aspectos da textura de uma mesma amostra.

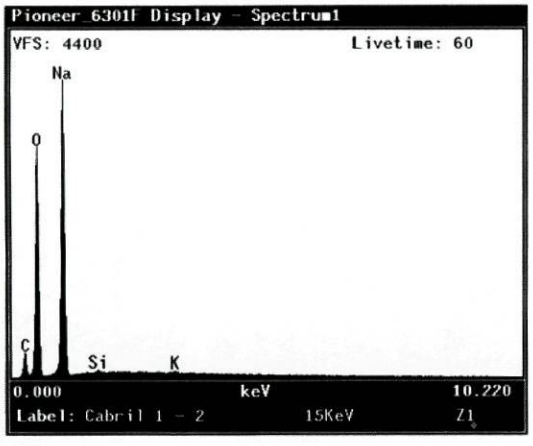
GEL SÍLICO-ALCALINO

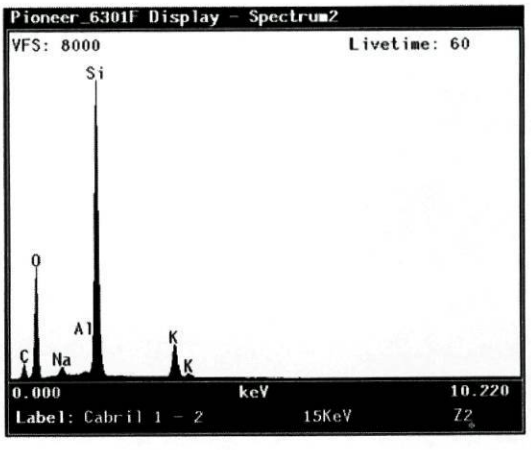
Imagens de gel sílico-alcalino (Z2), e de cristais ricos em sódio (Z1) associados ao gel, obtidas por observação ao MEV da amostra de uma exsudação da barragem do Cabril. O gel apresenta uma superfície lisa. Os cristais ricos em sódio, em geral tabulares, desenvolvem-se paralela ou perpendicularmente à superfície do gel amorfo.





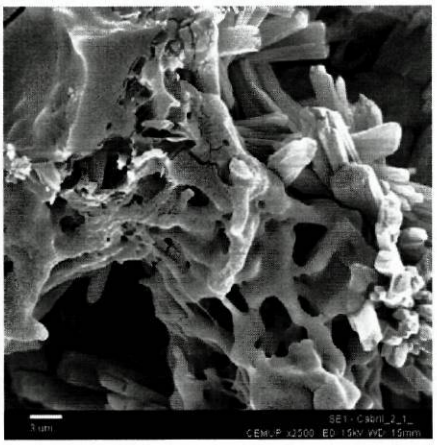



Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 4400
Livetime: 60
Na
O
C
Si
K
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1 - 2
15KeV
Z1

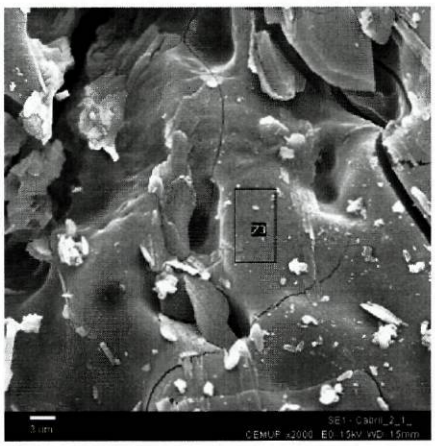

Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 8000
Livetime: 60
Si
O
Al
C
Na
K
K
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1 - 2
15KeV
Z2

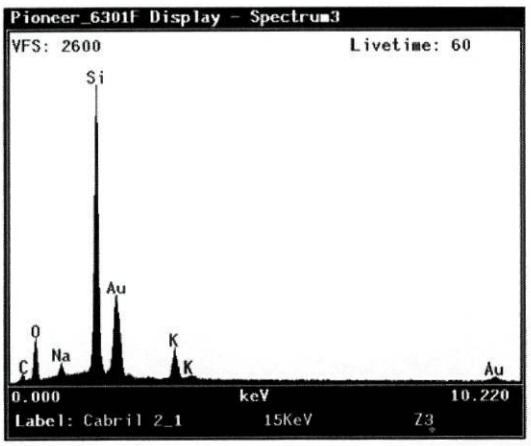
(I) Gel cavernoso e gel amorfo em amostra de exsudação da barragem do Cabril.

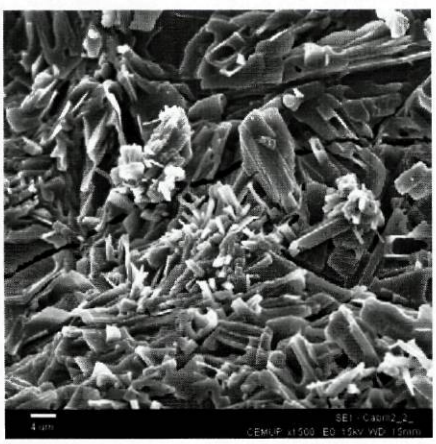
(II) Gel sílico-alcalino amorfo (Z1) sobre o qual existem abundantes cristais ricos em sódio (Z2). O gel apresenta fissuras de retracção características.



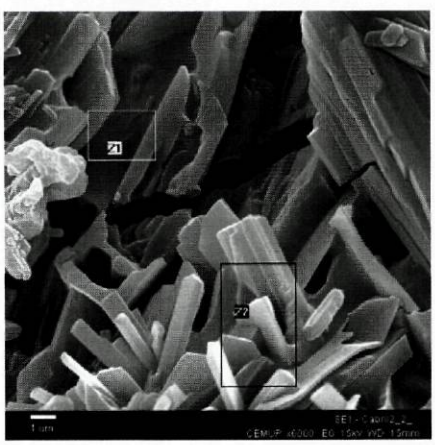
(I)

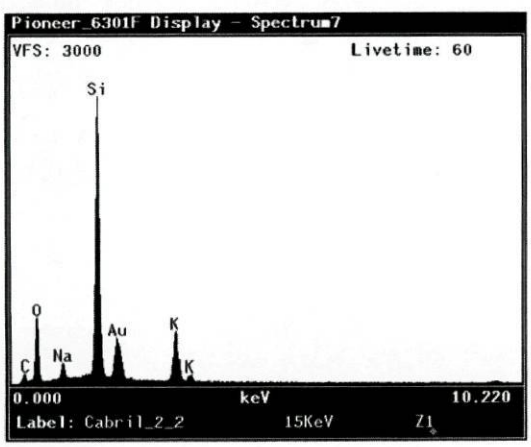

Z1

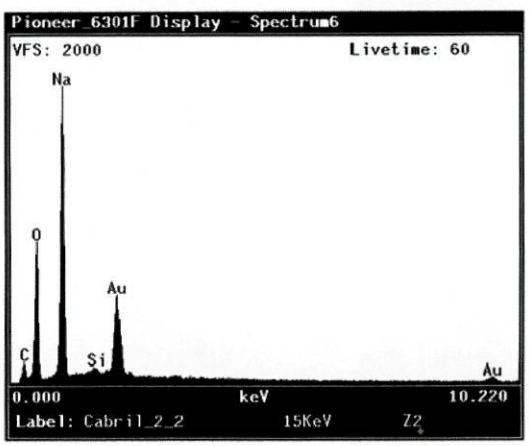

Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 2600
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
C
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 2_1
15KeV
Z3



(II)

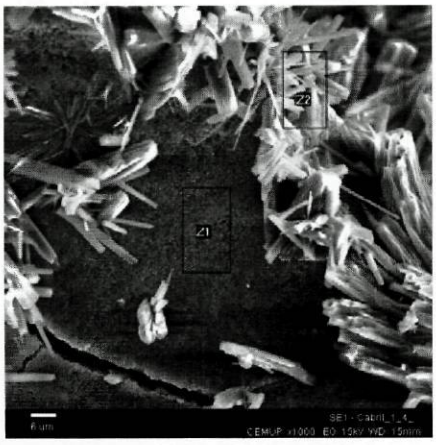

Z1
Z2


Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 3000
Livetime: 60
Si
O
C
Na
Au
K
K
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_2
15KeV
Z1

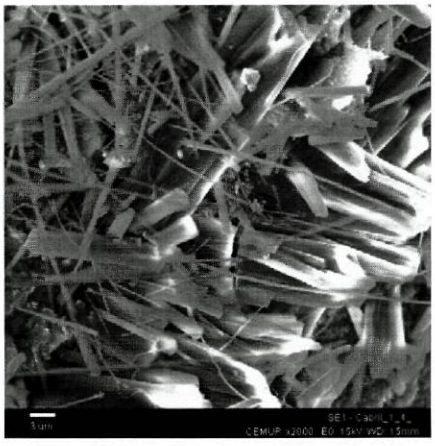

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 2000
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_2
15KeV
Z2

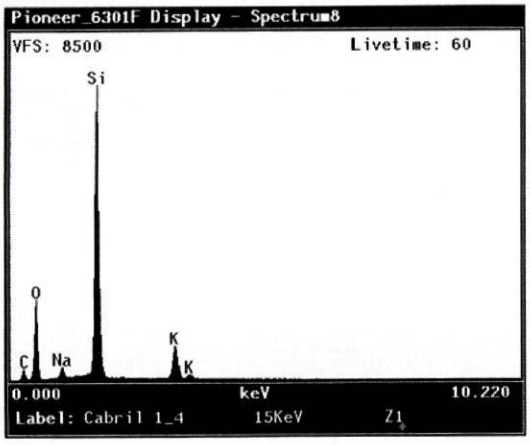
(I) Gel com textura botrióide e fissura de retracção (Z1) sobre o qual se desenvolvem cristais ricos em sódio (Z2).

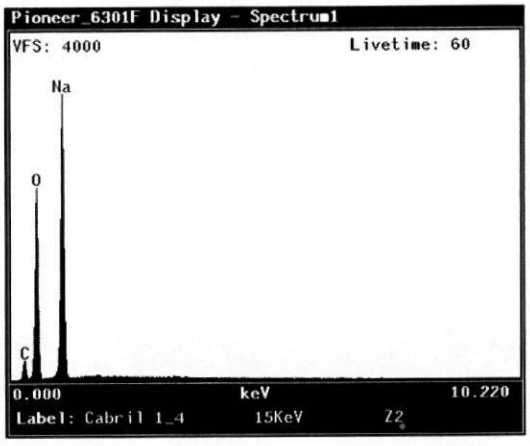
(II) Gel sílico-alcalino amorfo, com carácter viscoso (Z1). Os cristais ricos em sódio (Z2) parecem formar-se a partir deste gel, rompendo a sua superfície.


Z2
Z1

(I)

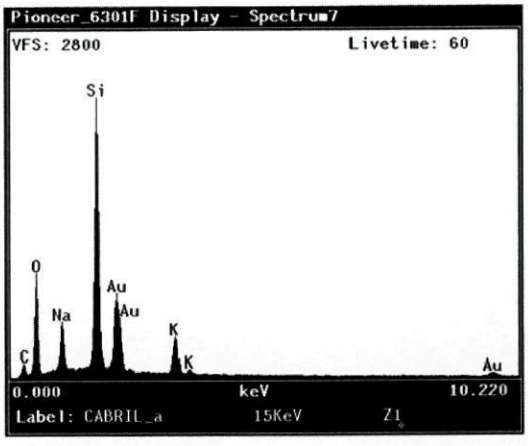


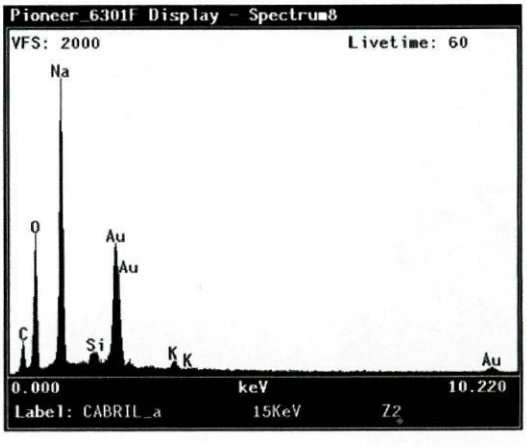

Pioneer_6301F Display - Spectrum8
VFS: 8500
Livetime: 60
Si
O
C
Na
K
K
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1_4
15KeV
Z1


Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 4000
Livetime: 60
Na
O
C
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1_4
15KeV
Z2


Z1
Z2
2 um
SE1 - CABRIL_a_
CEMUP x4000 E0=15kV WD=15mm

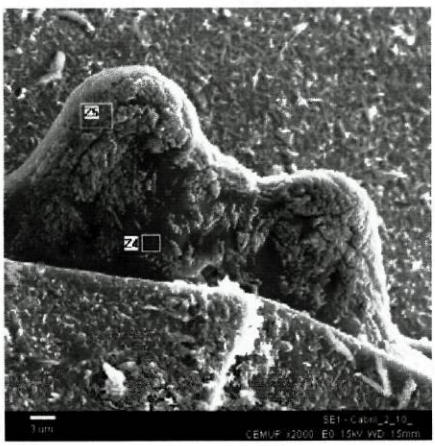
(II)


Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 2800
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
Au
K
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_a
15KeV
Z1

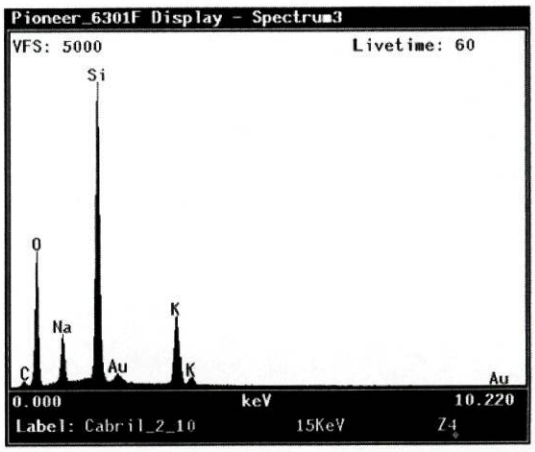

Pioneer_6301F Display - Spectrum8
VFS: 2000
Livetime: 60
Na
O
Au
Au
C
Si
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_a
15KeV
Z2

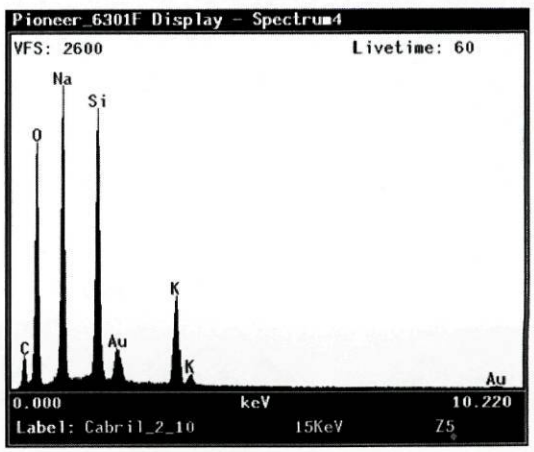
(I) Imagem de uma das amostras de exsudações da barragem do Cabril em que o gel se mostrou viscoso durante a observação ao MEV. A imagem foi obtida durante a segunda observação. São visíveis pequenos cristais ricos em sódio a formar-se sobre o gel. O revestimento a ouro é quase inexistente sobre o gel (Z4).

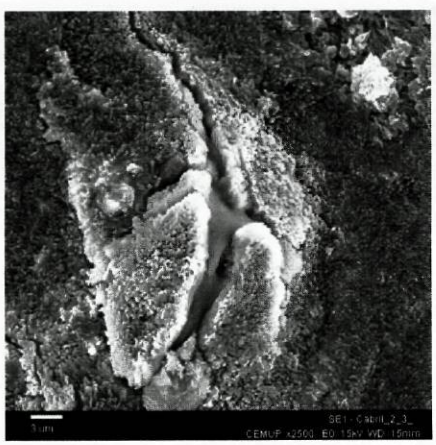
(II) Imagem do gel viscoso durante a observação ao MEV, criando fissuras na superfície cristalina (Z7a). O revestimento a ouro é inexistente na superfície lisa do gel (Z6a).


Z5
Z4
1 µm

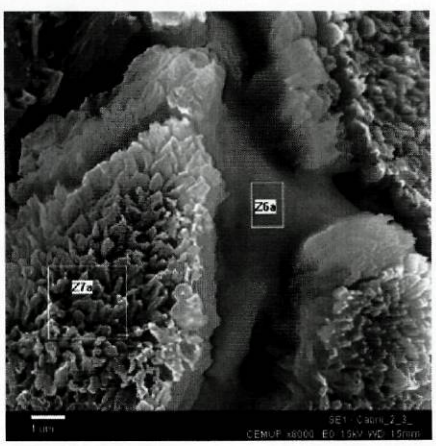
(I)

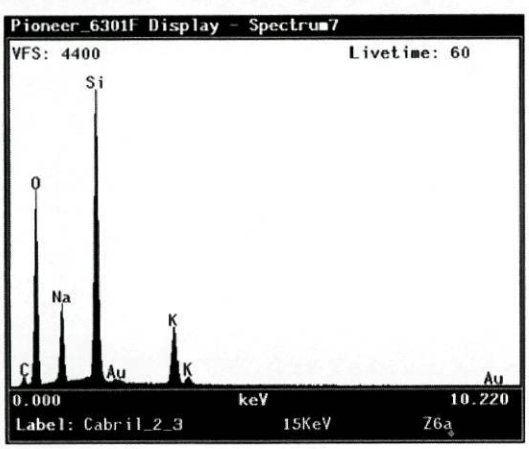

Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 5000
Livetime: 60
Si
O
Na
K
C
Au
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_10
15KeV
Z4

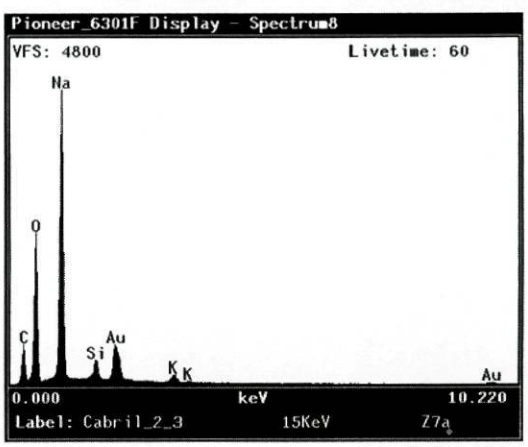

Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 2600
Livetime: 60
Na
Si
O
K
C
Au
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_10
15KeV
Z5


1 µm

(II)


Z6a
Z7a
1 µm

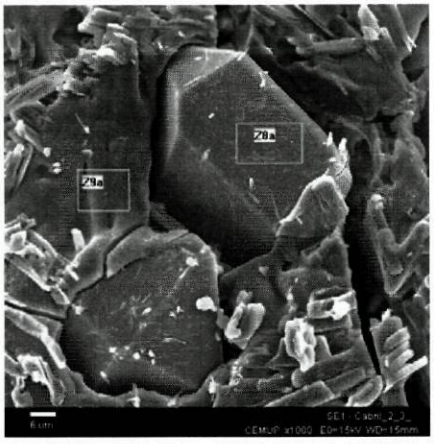

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 4400
Livetime: 60
Si
O
Na
K
C
Au
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_3
15KeV
Z6a


Pioneer_6301F Display - Spectrum8
VFS: 4800
Livetime: 60
Na
O
C
Au
Si
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_3
15KeV
Z7a

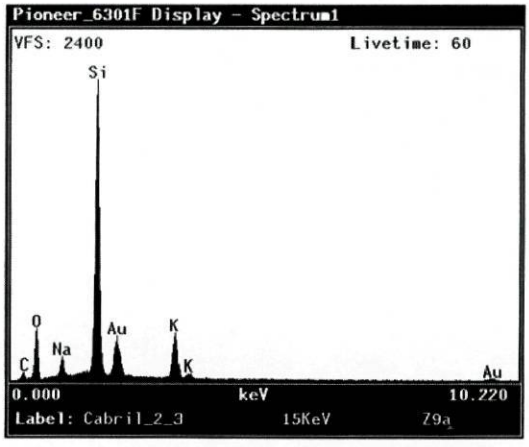
(I) Gel sílico-alcalino (Z9a) de exsudação da barragem do Cabril, mostrando a superfície amorfa. Os cristais são constituídos por cálcio e sódio.

(II) Gel exibindo comportamento viscoso, irrompendo de fissuras existentes na superfície cristalina. Os glóbulos que se encontram na superfície (Z3) formaram-se no decurso da observação ao MEV.

(III) Gel amorfo de superfície lisa com vacúolos e cristais ricos em sódio.


Z8a
Z9a

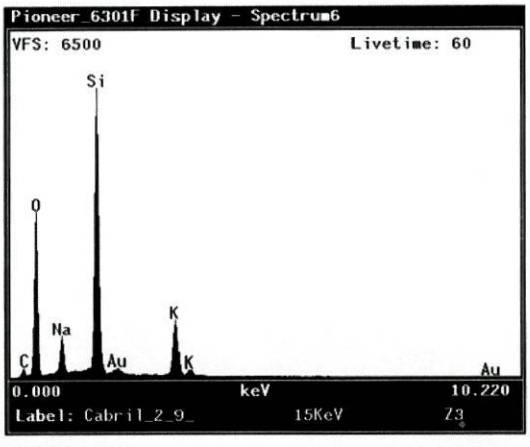
(I)

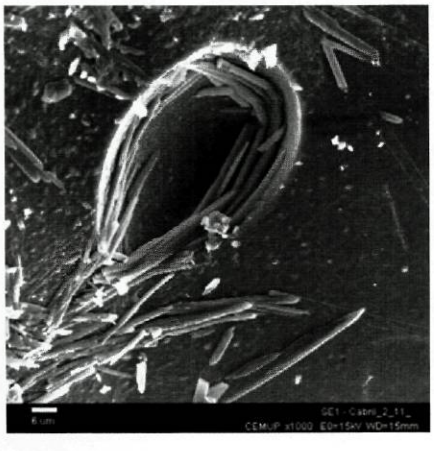

Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 2400
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_3
15KeV
Z9a


Z3

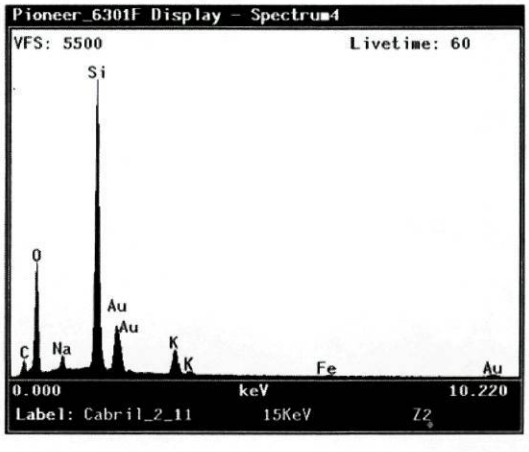
(II)




Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 6500
Livetime: 60
Si
O
Na
K
C
Au
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_9_
15KeV
Z3

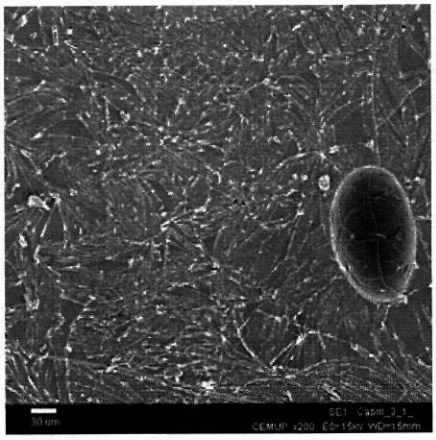


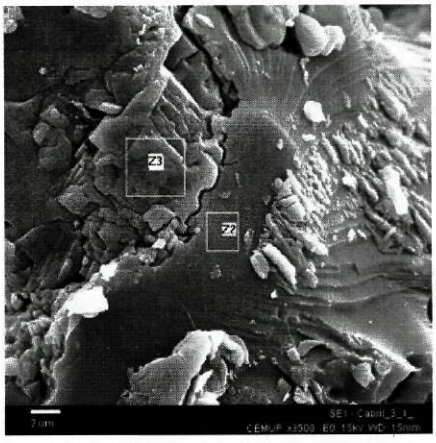
(III)


Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 5500
Livetime: 60
Si
O
Au
Au
C
Na
K
K
Fe
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_11
15KeV
Z2

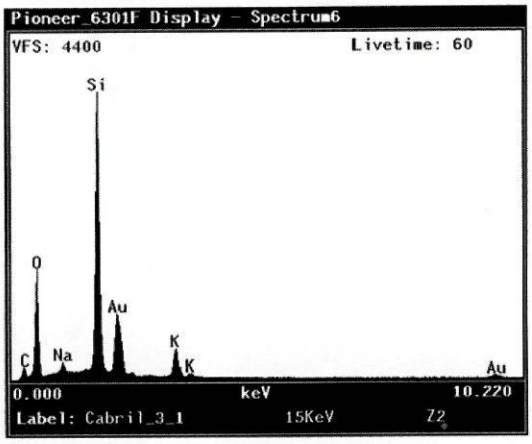
(I) Gel amorfo (Z2) com vacúolos sobre o qual existe uma fina película semi-cristalina rica em sódio (Z3).

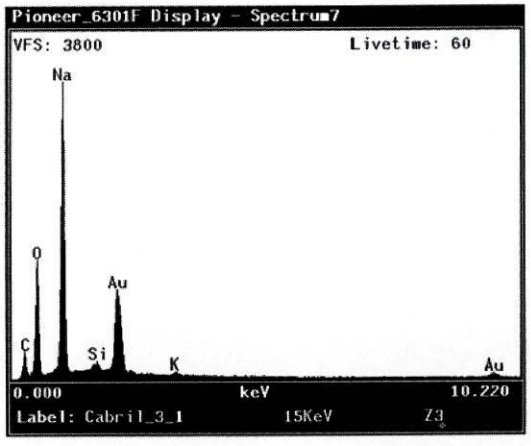
(II) Gel sílico-alcalino amorfo (Z7) em exsudação da barragem do Cabril e cristais tabulares ricos em sódio dispostos paralelamente à superfície (Z4).

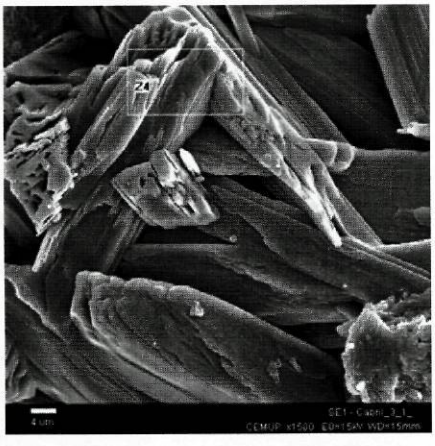



Z3
Z2

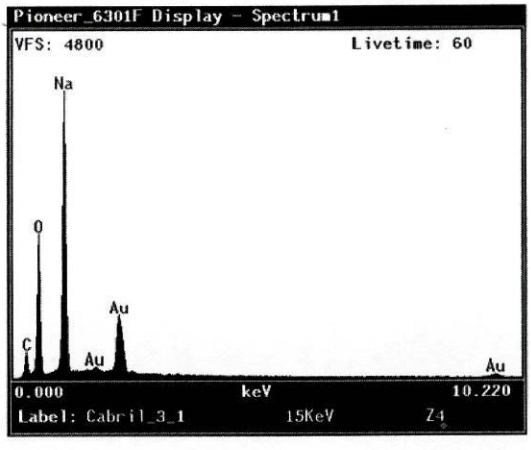
(I)

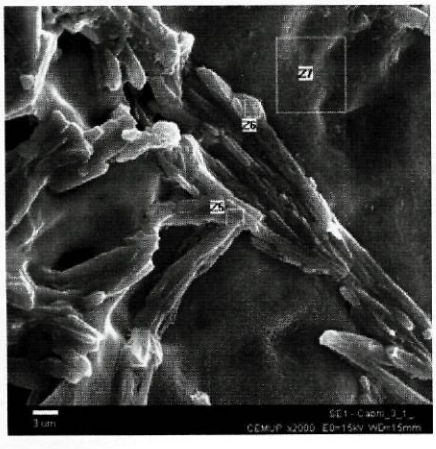

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 4400
Livetime: 60
Si
O
Au
K
C
Na
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_3_1
15KeV
Z2

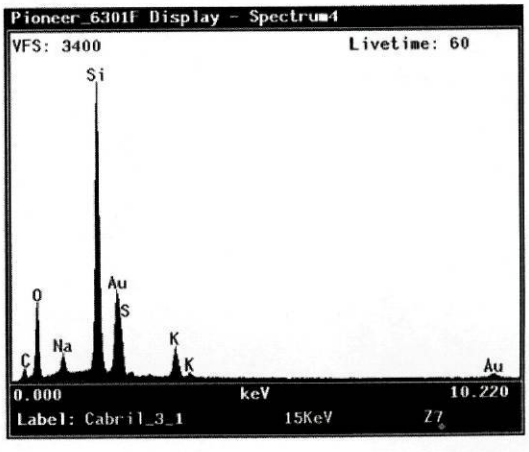

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 3800
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_3_1
15KeV
Z3


Z4

(II)

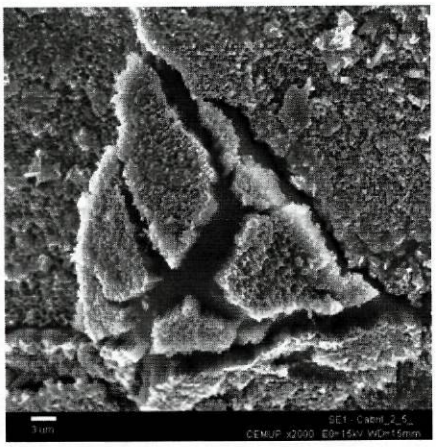

Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 4800
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_3_1
15KeV
Z4

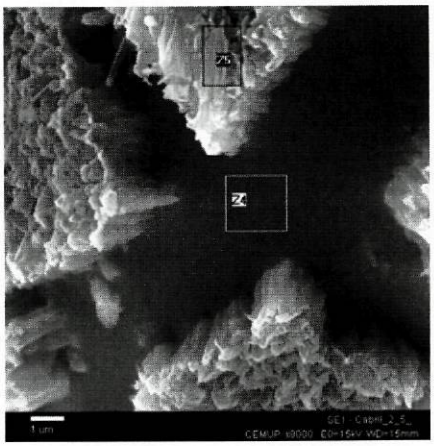

Z7
Z6
Z5


Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 3400
Livetime: 60
Si
Au
O
S
K
Na
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_3_1
15KeV
Z7

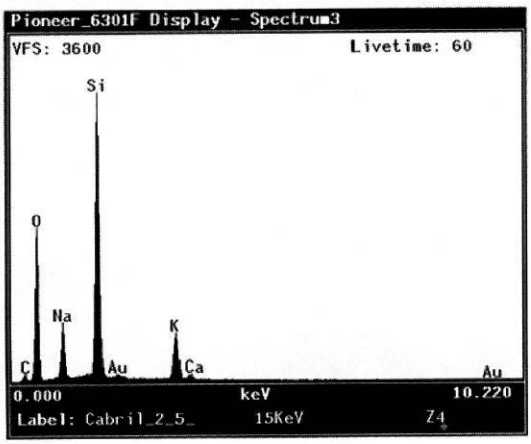
(I) Amostra de exsudação da barragem do Cabril em que o gel (Z4) manteve o carácter viscoso durante a observação ao MEV, rompendo a superfície cristalina rica em sódio (Z5). O revestimento a ouro é inexistente sobre o gel.

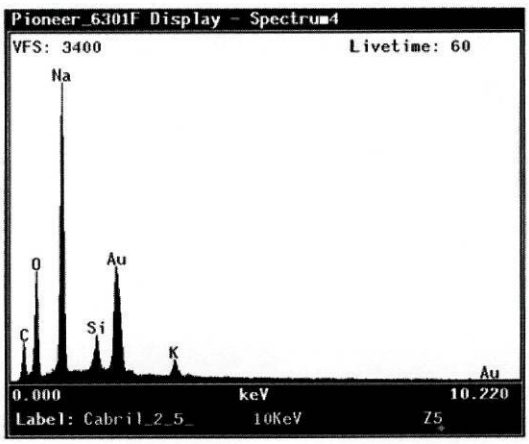
(II) Gel sílico-alcalino (Z6) sob a forma de escorrência sobre os cristais ricos em sódio (Z7).

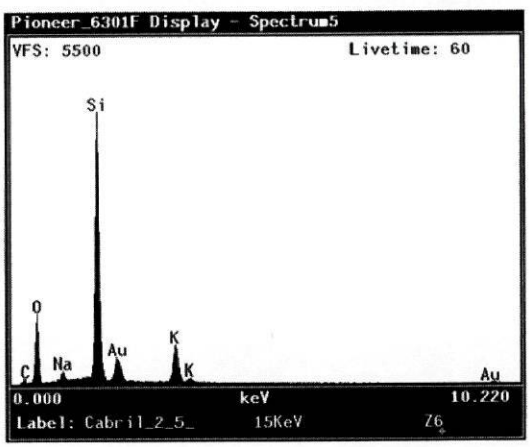


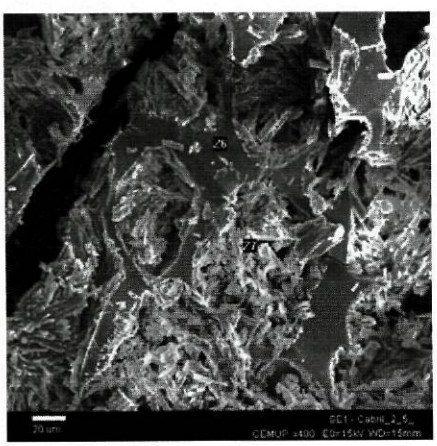


(I)

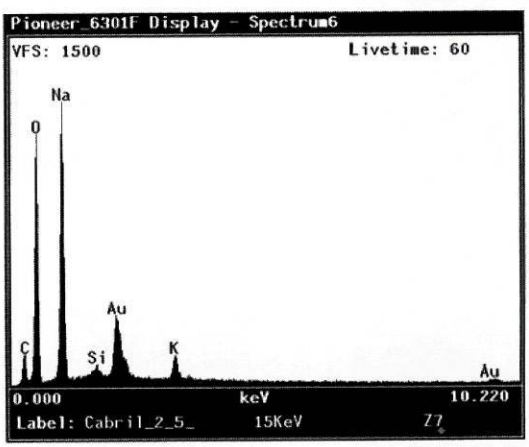

Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 3600
Livetime: 60
Si
O
Na
K
C
Au
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_5_
15KeV
Z4


Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 3400
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_5_
10KeV
Z5


Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 5500
Livetime: 60
Si
O
C
Na
Au
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_5_
15KeV
Z6



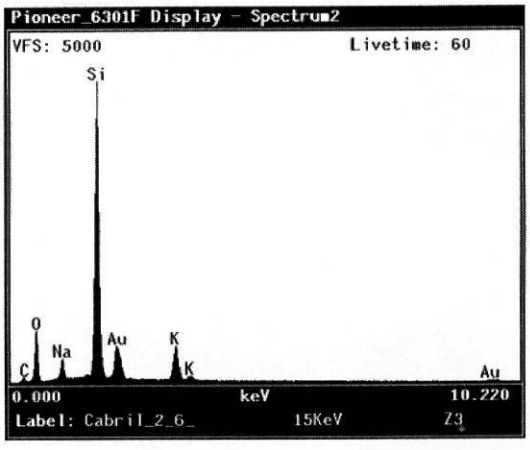
(II)

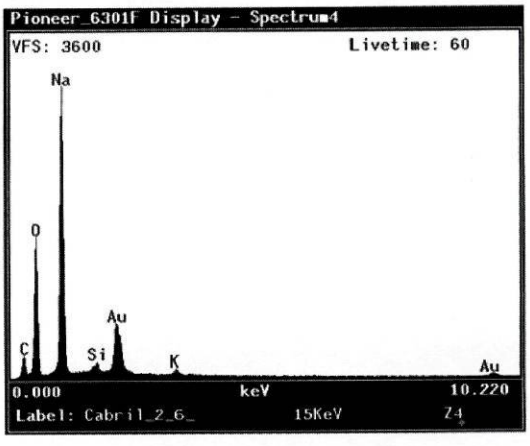

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 1500
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_5_
15KeV
Z7

(I) Gel sílico-alcalino (Z3) presente numa exsudação da barragem do Cabril, com cristais tabulares ricos em sódio irrompendo a superfície (Z4). Na mesma amostra existem cristais em maior densidade (Z1).

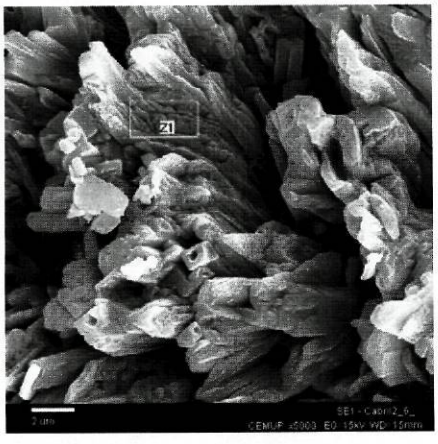
(II) Gel amorfo (Z4a) cobrindo uma superfície semicristalina.

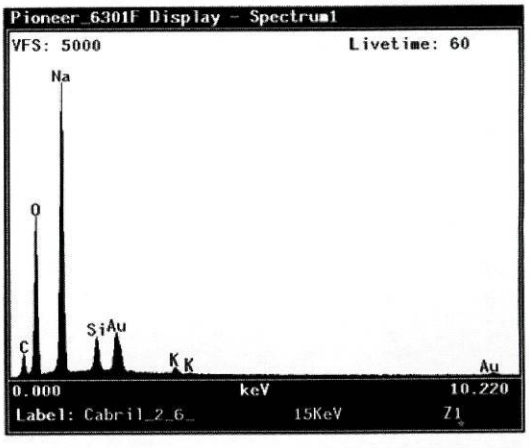

Z3
Z4
2 um

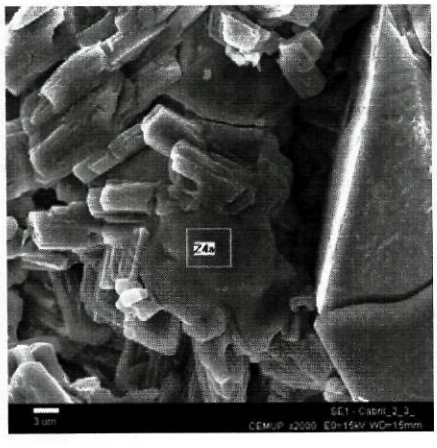

Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 5000
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_6_
15KeV
Z3

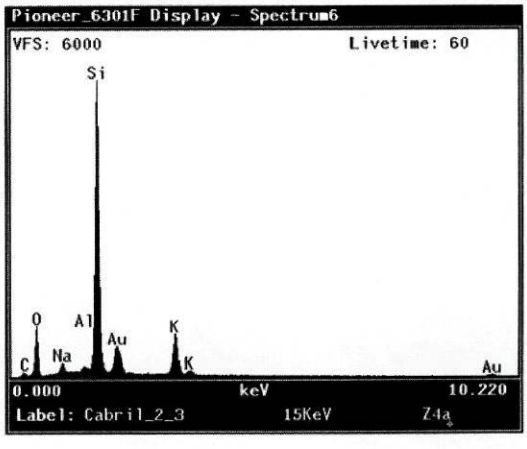

Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 3600
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_6_
15KeV
Z4

(I)


Z1
2 um


Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 5000
Livetime: 60
Na
O
C
Si
Au
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_6_
15KeV
Z1

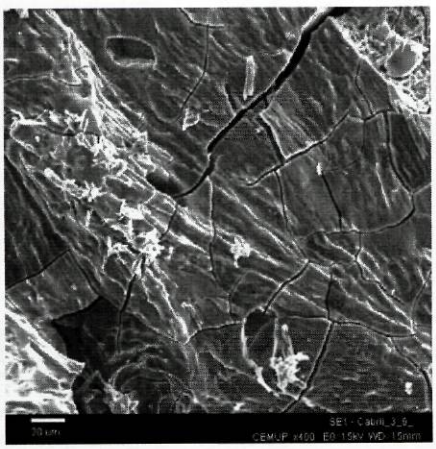

Z4a
3 um

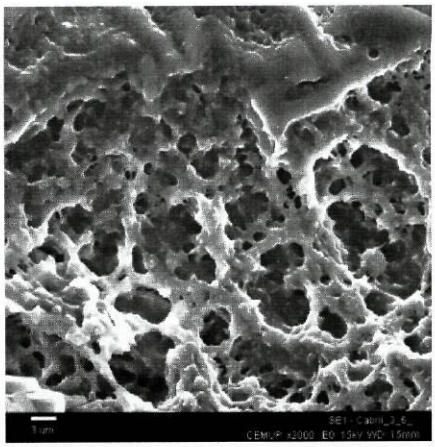

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 6000
Livetime: 60
Si
O
Al
Au
K
C
Na
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_3
15KeV
Z4a

(II)

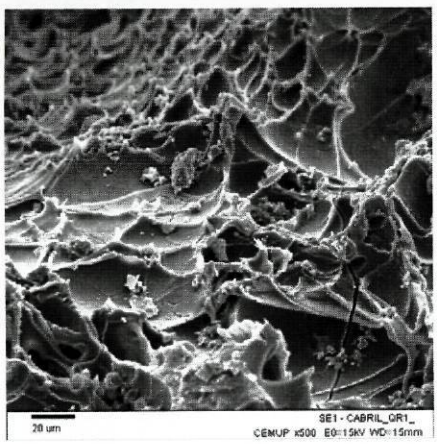
(I) Imagens do gel com diferentes texturas e idêntica composição. Os cristais ricos em sódio (Z2) crescem sobre a superfície de morfologia botrióide (Z3).

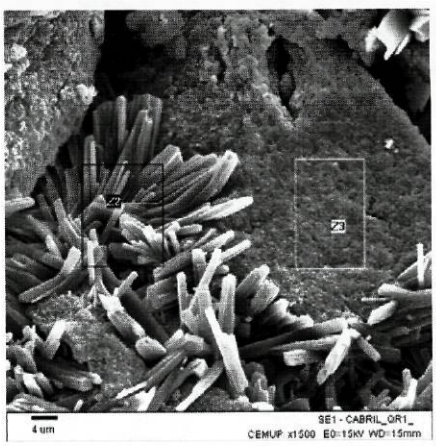
(II) Gel de textura amorfa com fissuras de retracção (Z2a) e cristais ricos em sódio crescendo paralelamente à superfície do gel.

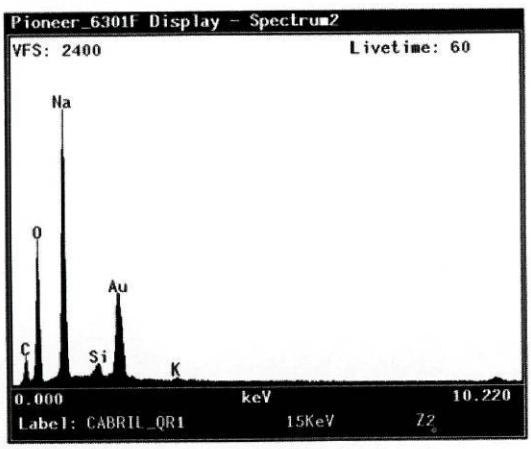


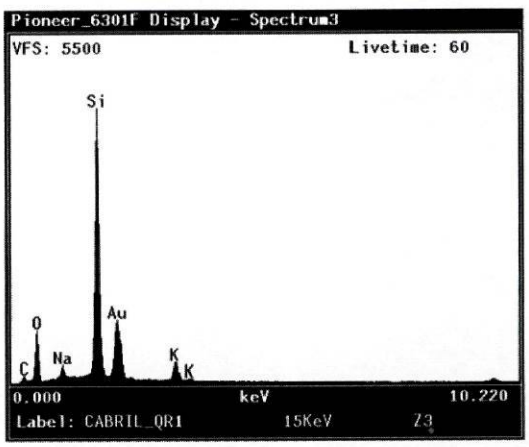


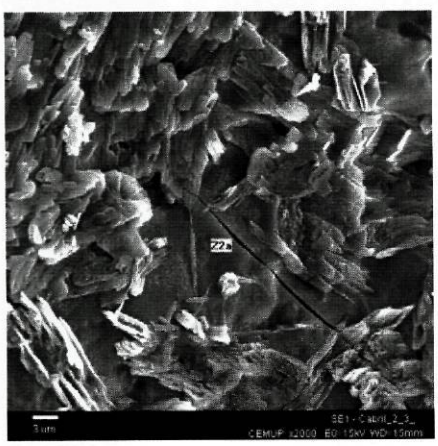
(I)



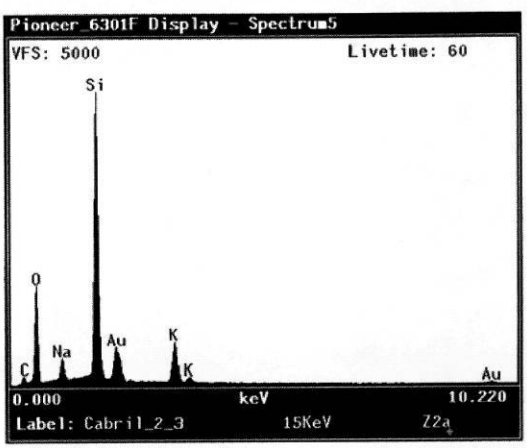



Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 2400
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
K
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_QR1
15KeV
Z2


Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 5500
Livetime: 60
Si
O
Au
C
Na
K
K
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_QR1
15KeV
Z3

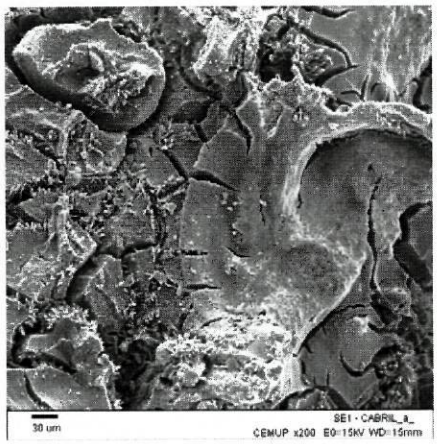


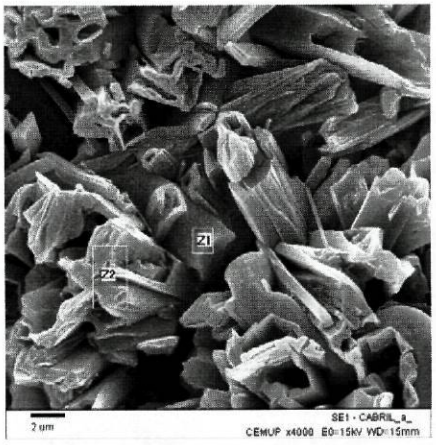
(II)


Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 5000
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_3
15KeV
Z2a

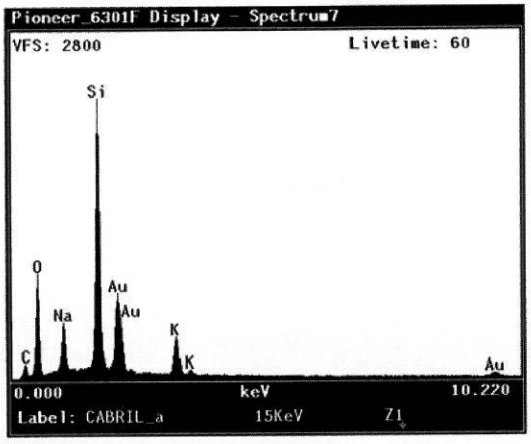
(I) Gel amorfo com fissuras de retracção características (Z1) e cristais ricos em sódio crescendo à superfície (Z2).

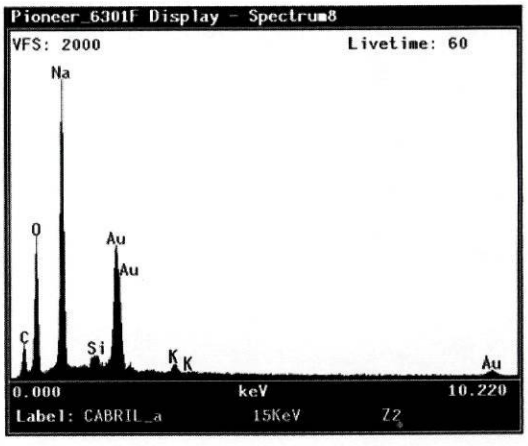
(II) Gel com superfície lisa (Z2), amorfo, por vezes botrióide ou cavernoso (Z1) e raros cristais ricos em sódio (Z3).

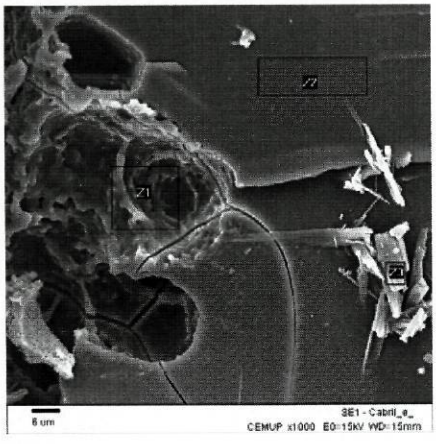

30 um
SE1 - CABRIL_a_
CEMUP x200 E0=15kV WD=15mm


Z1
Z2
2 um
SE1 - CABRIL_a_
CEMUP x4000 E0=15kV WD=15mm

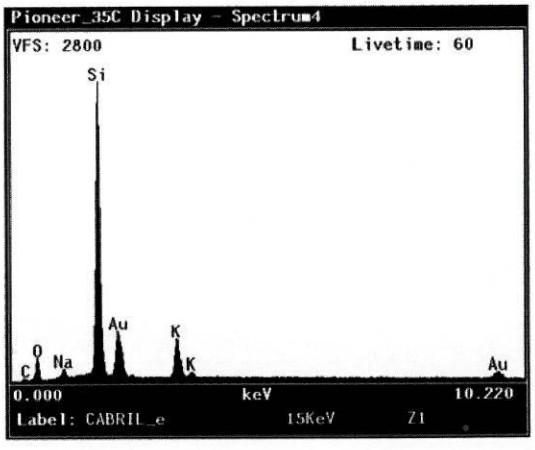
(I)

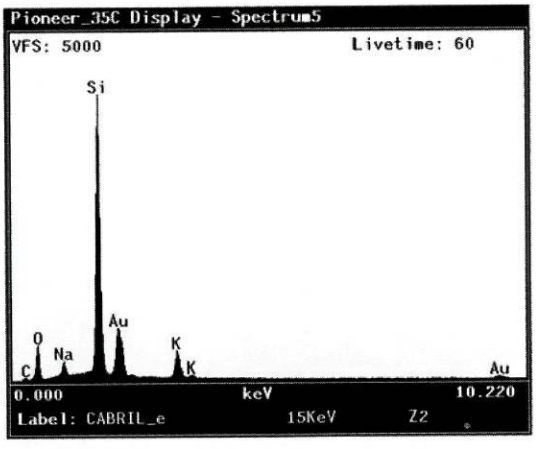

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 2800
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
Au
K
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_a
15KeV
Z1

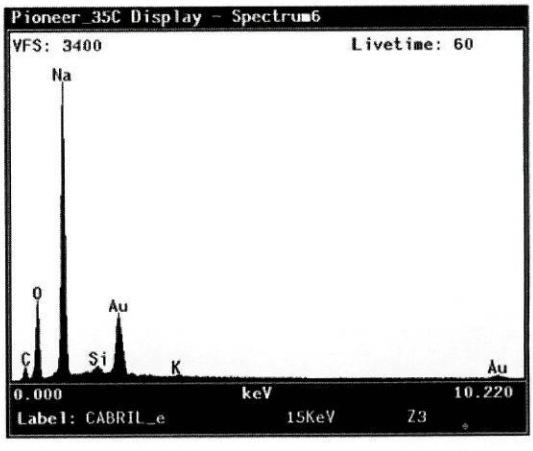

Pioneer_6301F Display - Spectrum8
VFS: 2000
Livetime: 60
Na
O
Au
Au
C
Si
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_a
15KeV
Z2


Z2
Z1
Z3
8 um
SE1 - Cabril_a_
CEMUP x1000 E0=15kV WD=15mm

(II)

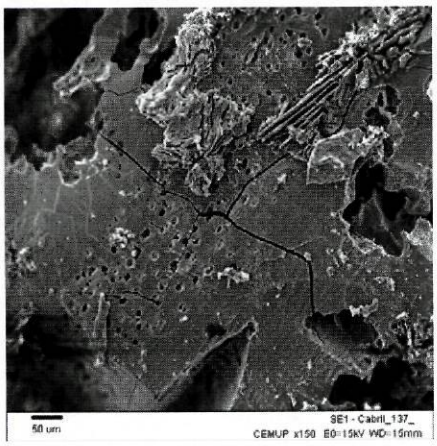

Pioneer_35C Display - Spectrum4
VFS: 2800
Livetime: 60
Si
Au
K
O
Na
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_e
15KeV
Z1

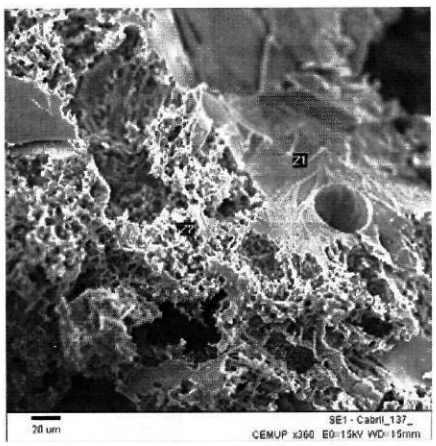

Pioneer_35C Display - Spectrum5
VFS: 5000
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_e
15KeV
Z2


Pioneer_35C Display - Spectrum6
VFS: 3400
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_e
15KeV
Z3

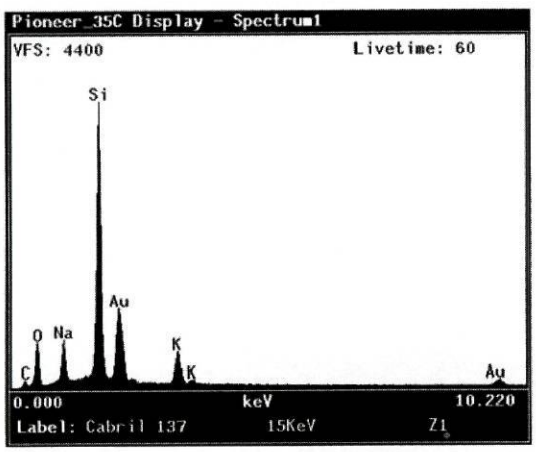
(I) Diferentes morfologias do gel sílico-alcalino (Z1 e Z2) que constitui uma exsudação da barragem do Cabril.

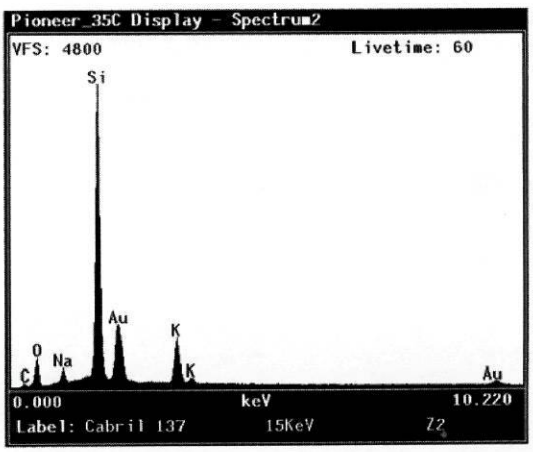
(II) Gel amorfo (Z5) e gel cavernoso (Z4) com formação de produtos semicristalinos com maior teor em sódio (Z3).

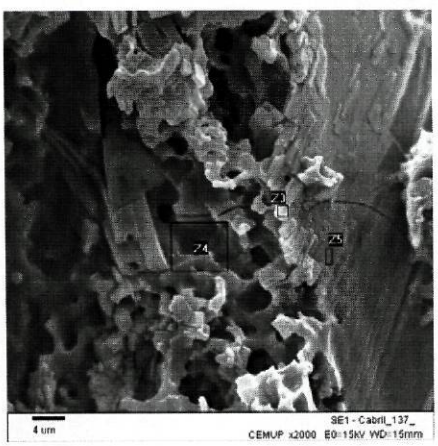

50 um
SE1 - Cabril_137_
CEMUP x150 E0=15kV WD=15mm


Z1
Z2
20 um
SE1 - Cabril_137_
CEMUP x360 E0=15kV WD=15mm

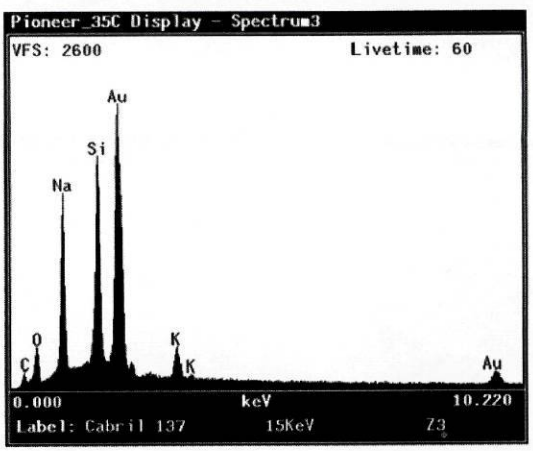
(I)

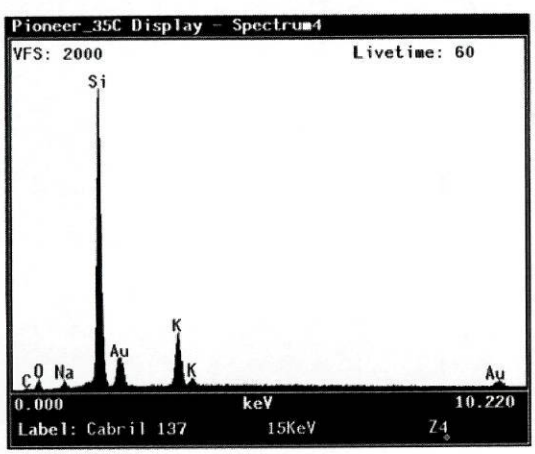

Pioneer_35C Display - Spectrum1
VFS: 4400
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z1

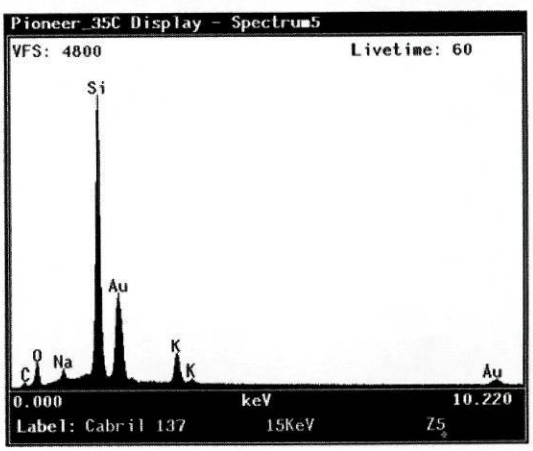

Pioneer_35C Display - Spectrum2
VFS: 4800
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z2


Z3
Z4
Z5
4 um
SE1 - Cabril_137_
CEMUP x2000 E0=15kV WD=15mm

(II)

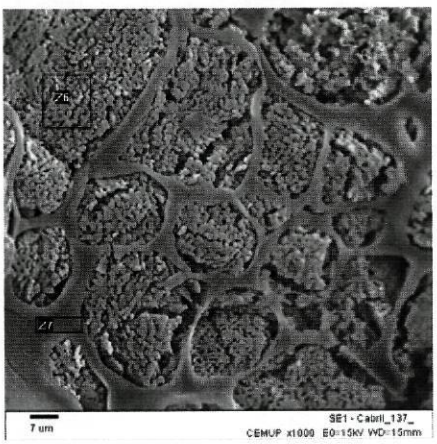

Pioneer_35C Display - Spectrum3
VFS: 2600
Livetime: 60
Au
Si
Na
O
K
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z3


Pioneer_35C Display - Spectrum4
VFS: 2000
Livetime: 60
Si
K
Au
O
Na
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z4

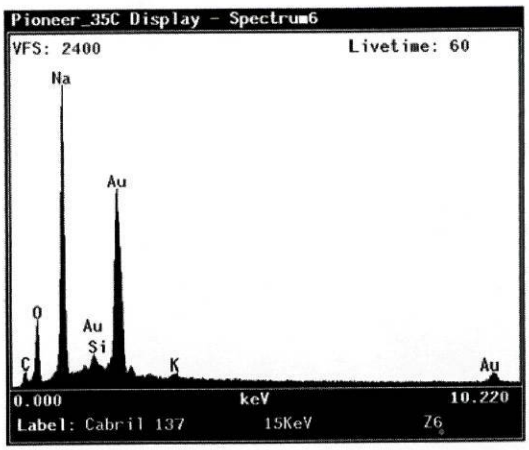

Pioneer_35C Display - Spectrum5
VFS: 4800
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z5

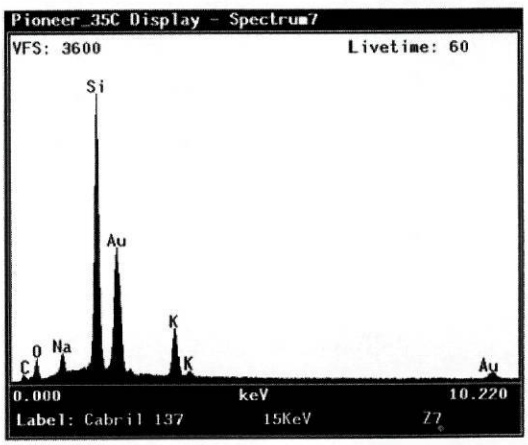
(I) Gel em forma de escorrência, lembrando favos de mel (Z7), sobre abundantes glóbulos ricos em sódio (Z6).

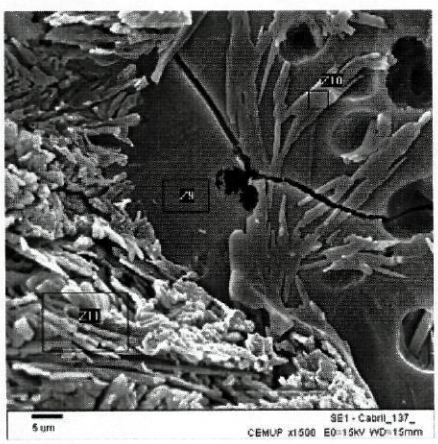
(II) Gel amorfo (Z9), com fissuras características, sobre o qual se formaram cristais lamelares ricos em sódio (Z10), paralelos à superfície, e cristais tabulares (Z11) mais espessos.


Z6
Z7
7 um
SE1 - Cabril_137_
CEMUP x1000 E0=15kV WD=15mm

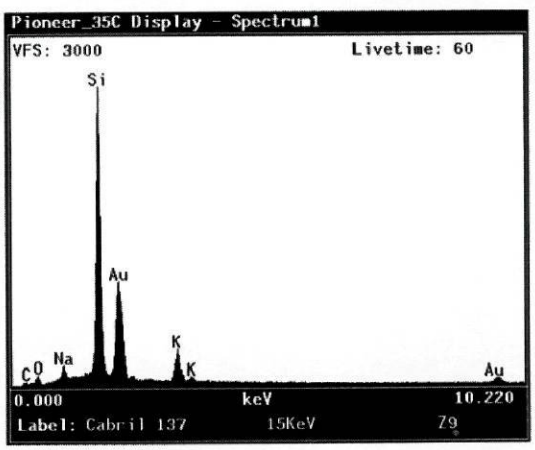
(I)

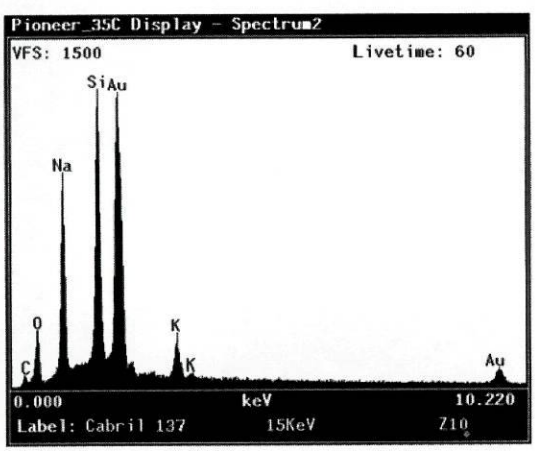

Pioneer_35C Display - Spectrum6
VFS: 2400
Livetime: 60
Na
Au
O
Au
Si
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z6

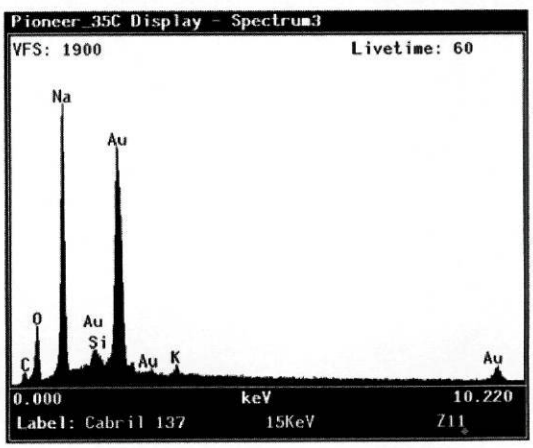

Pioneer_35C Display - Spectrum7
VFS: 3600
Livetime: 60
Si
Au
K
O
Na
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z7


Z10
Z9
Z11
5 um
SE1 - Cabril_137_
CEMUP x1500 E0=15kV WD=15mm

(II)

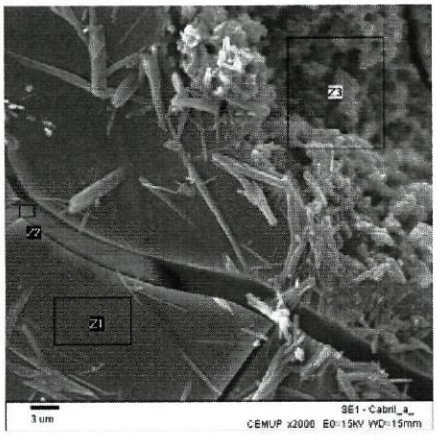

Pioneer_35C Display - Spectrum1
VFS: 3000
Livetime: 60
Si
Au
K
O
Na
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z9


Pioneer_35C Display - Spectrum2
VFS: 1500
Livetime: 60
Si
Au
Na
O
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z10

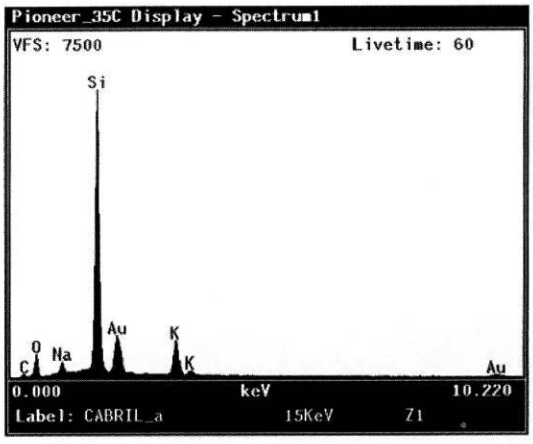

Pioneer_35C Display - Spectrum3
VFS: 1900
Livetime: 60
Na
Au
O
Au
Si
C
Au
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 137
15KeV
Z11

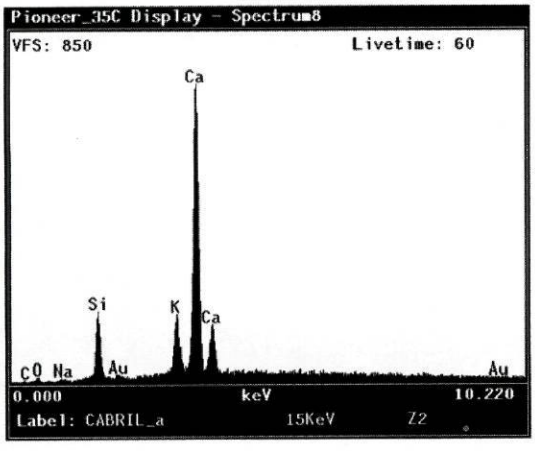
(I) Gel que parece fluir (Z2) nas fissuras que atravessam a superfície amorfa (Z1). Existe também uma textura cavernosa com idêntica composição (Z3). O gel existente nas fissuras contém cálcio e não apresenta o revestimento a ouro efectuado previamente.

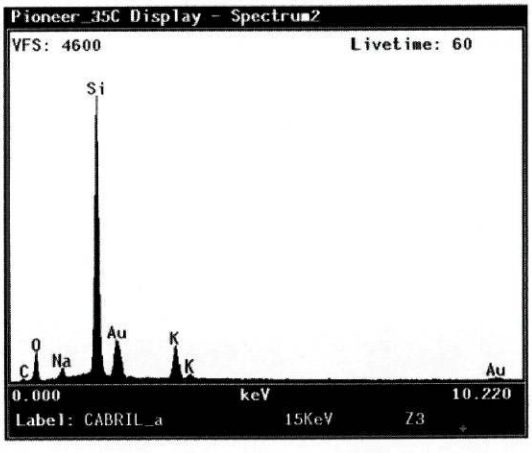
(II) Gel sílico-alcalino (Z1) mostrando uma fina película de um produto semicristalino rico em sódio (Z2).

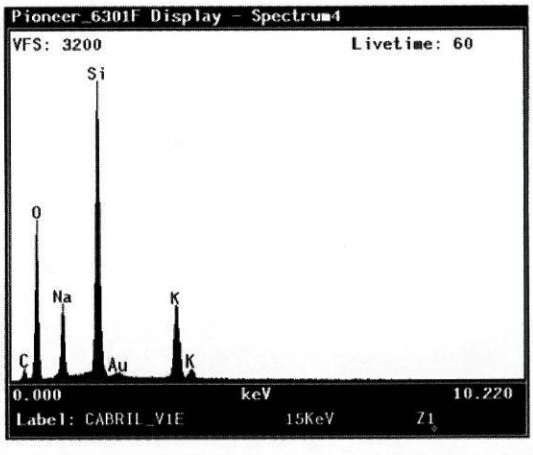

Z1
Z2
Z3
3 um
SE1 - Cabril_a_
CEMUP x2000 E0=15kV WD=15mm

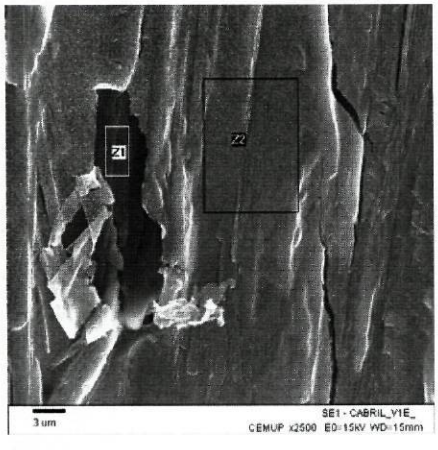
(I)


Pioneer_35C Display - Spectrum1
VFS: 7500
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_a
15KeV
Z1

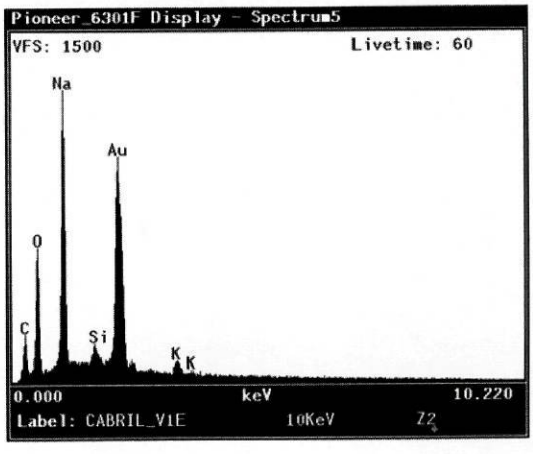

Pioneer_35C Display - Spectrum8
VFS: 850
Livetime: 60
Ca
Si
K
Ca
C
O
Na
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_a
15KeV
Z2


Pioneer_35C Display - Spectrum2
VFS: 4600
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_a
15KeV
Z3


Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 3200
Livetime: 60
Si
O
Na
K
C
Au
K
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_V1E
15KeV
Z1


Z1
Z2
3 um
SE1 - CABRIL_V1E_
CEMUP x2500 E0=15kV WD=15mm

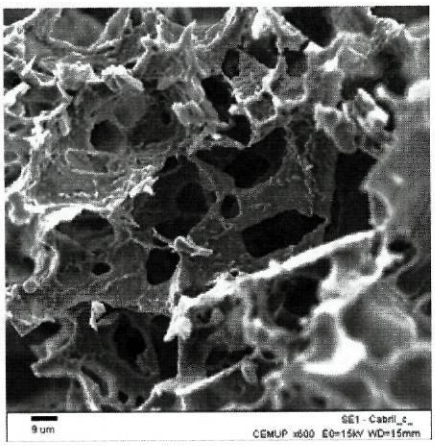
(II)


Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 1500
Livetime: 60
Na
Au
O
C
Si
K
K
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_V1E
10KeV
Z2

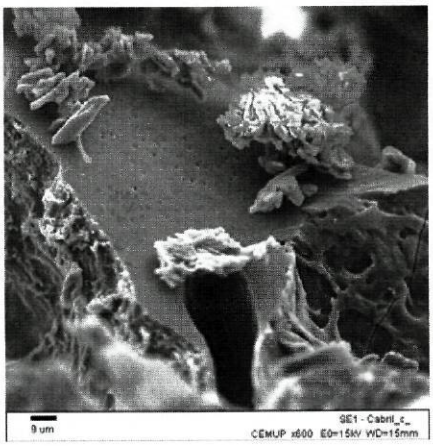
(I) Gel cavernoso e poroso e, na mesma amostra, uma superfície compacta de gel amorfo. A amostra pertence a uma exsudação da barragem do Cabril e tem composição uniforme (Z1).

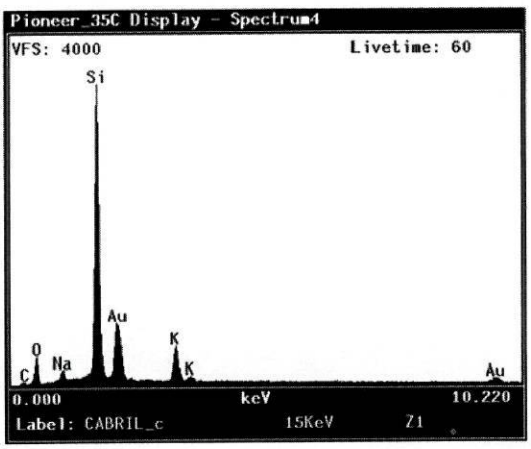
(II) Gel liso, amorfo, em baixa ampliação (Z1).

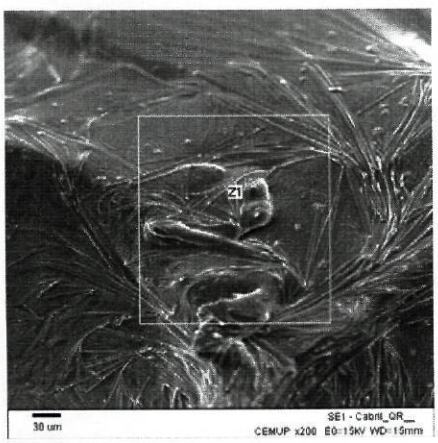
(III) Gel cavernoso, com produtos sobrejacentes ricos em sódio (Z2).


9 um
SE1 - Cabril_c_
CEMUP x600 E0=15kV WD=15mm

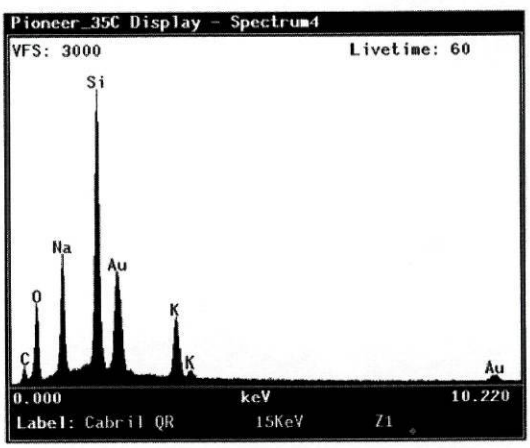
(I)

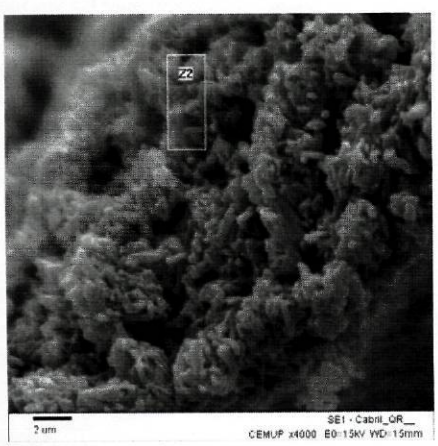

9 um
SE1 - Cabril_c_
CEMUP x600 E0=15kV WD=15mm


Pioneer_35C Display - Spectrum4
VFS: 4000
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
K
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_c
15KeV
Z1

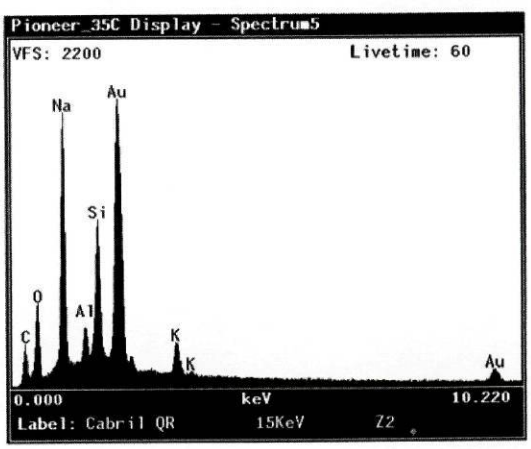

Z1
30 um
SE1 - Cabril_QR__
CEMUP x200 E0=15kV WD=15mm

(II)


Pioneer_35C Display - Spectrum4
VFS: 3000
Livetime: 60
Si
Na
Au
O
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril QR
15KeV
Z1


Z2
2 um
SE1 - Cabril_QR__
CEMUP x4000 E0=15kV WD=15mm

(III)

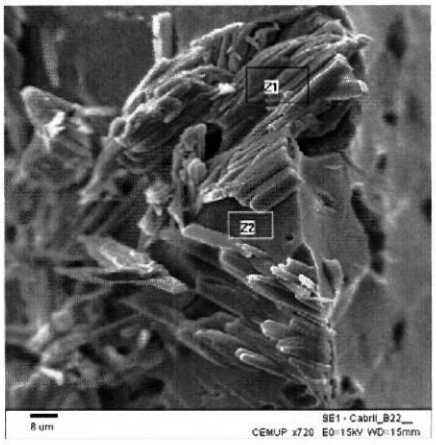

Pioneer_35C Display - Spectrum5
VFS: 2200
Livetime: 60
Na
Au
Si
O
Al
C
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril QR
15KeV
Z2

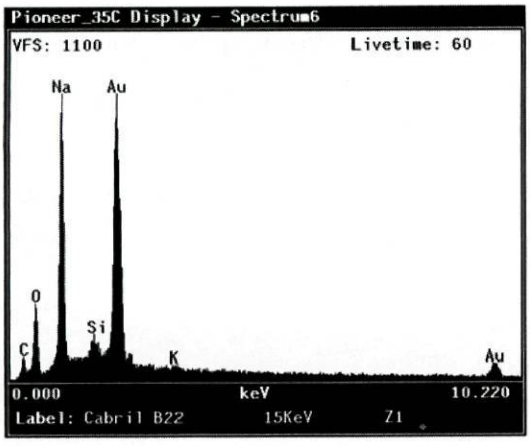
(I) Gel existente em exsudação, de superfície em geral amorfa (Z2), por vezes vacuolar, sobre a qual estão presentes frequentes *clusters* de cristais ricos em sódio (Z1).

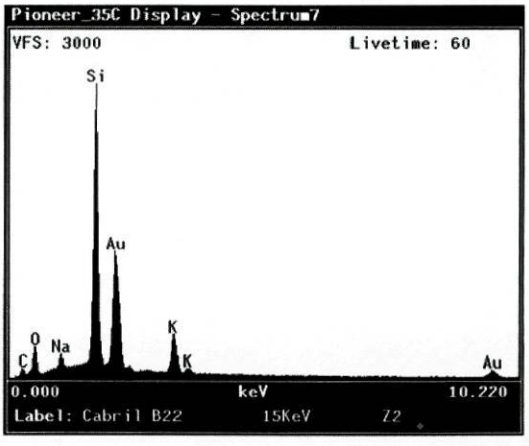
(II) Diferentes texturas do gel sílico-alcalino da amostra referida em (I), mostrando fissuras. A composição do gel é uniforme (Z3 e Z4).

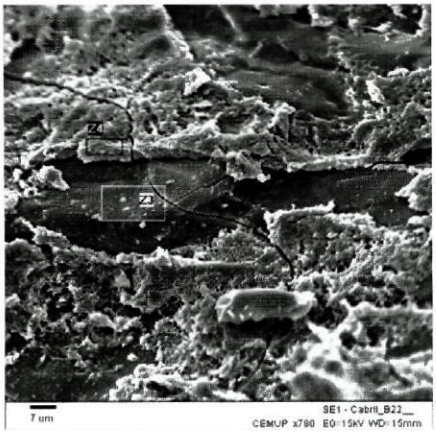

20 um
SE1 - Cabril_B22__
CEMUP x360 E0=15kV WD=15mm

(I)

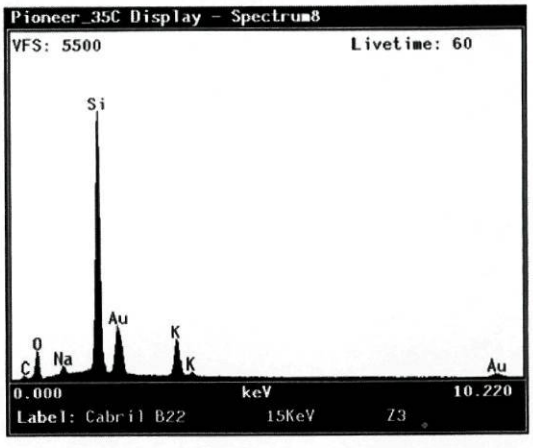

Z1
Z2
8 um
SE1 - Cabril_B22__
CEMUP x720 E0=15kV WD=15mm

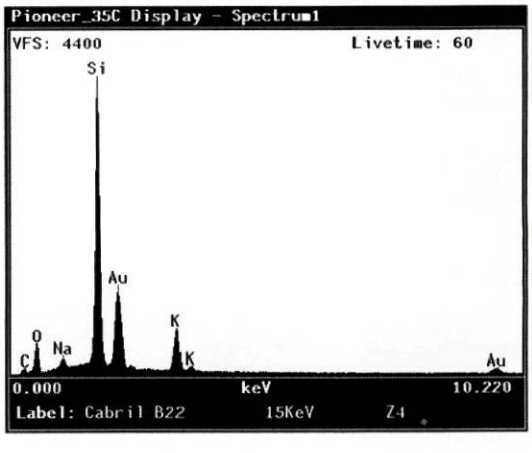

Pioneer_35C Display - Spectrum6
VFS: 1100
Livetime: 60
Na
Au
O
Si
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril B22
15KeV
Z1


Pioneer_35C Display - Spectrum7
VFS: 3000
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril B22
15KeV
Z2


Z4
Z3
7 um
SE1 - Cabril_B22__
CEMUP x780 E0=15kV WD=15mm

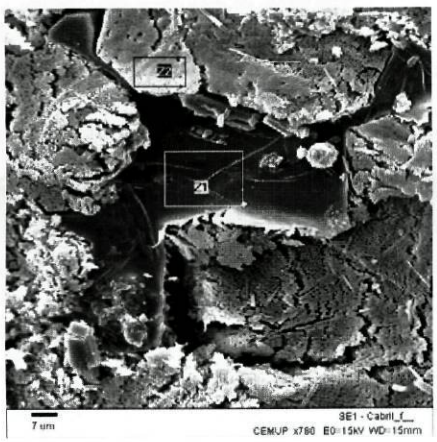
(II)


Pioneer_35C Display - Spectrum8
VFS: 5500
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril B22
15KeV
Z3

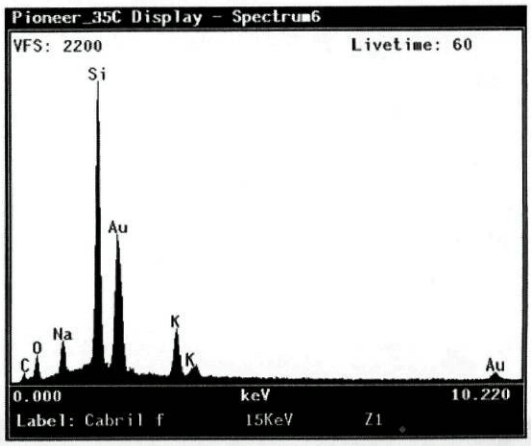

Pioneer_35C Display - Spectrum1
VFS: 4400
Livetime: 60
Si
Au
O
Na
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril B22
15KeV
Z4

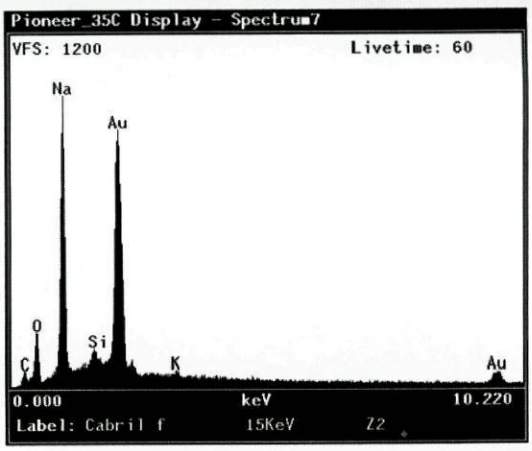
(I) Gel amorfo (Z1) sobre o qual existe uma película fina de um produto rico em sódio que apresenta um carácter semicristalino (Z2).

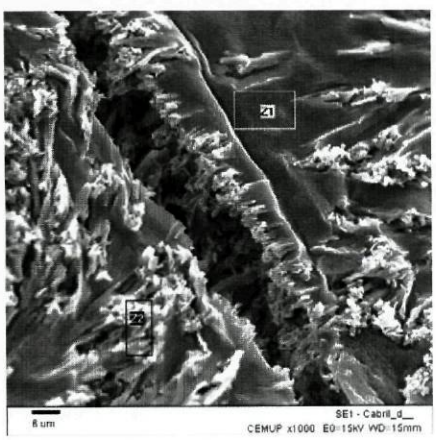
(II) O gel amorfo (Z1) parece fluir. Sobre o gel existem produtos semicristalinos mais ricos em sódio (Z2) do que a superfície amorfa.


Z2
Z1
7 um
SE1 - Cabril_f__
CEMUP x780 E0=15kV WD=15mm

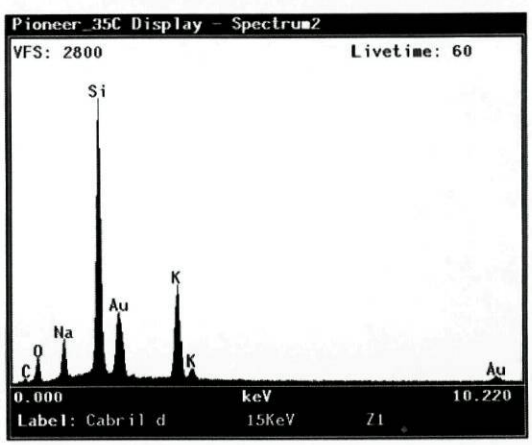
(I)

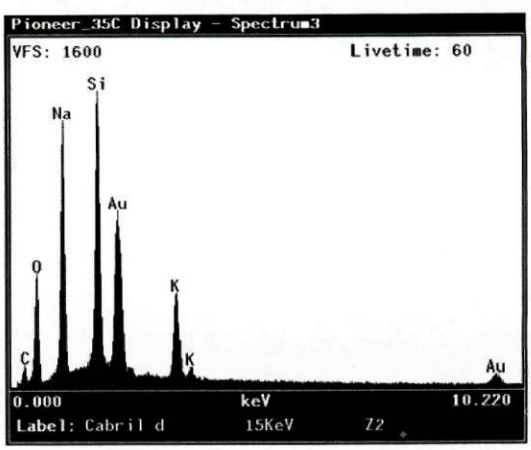

Pioneer_35C Display - Spectrum6
VFS: 2200
Livetime: 60
Si
Au
Na
K
O
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril f
15KeV
Z1


Pioneer_35C Display - Spectrum7
VFS: 1200
Livetime: 60
Na
Au
O
Si
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril f
15KeV
Z2

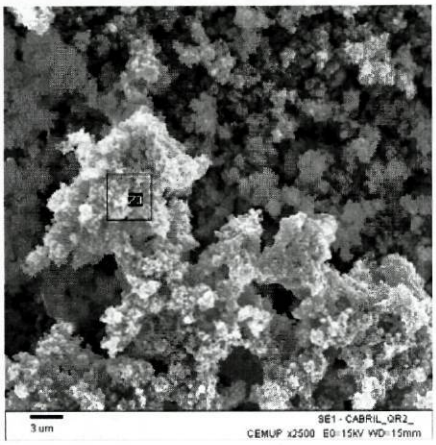

Z1
Z2
8 um
SE1 - Cabril_d__
CEMUP x1000 E0=15kV WD=15mm

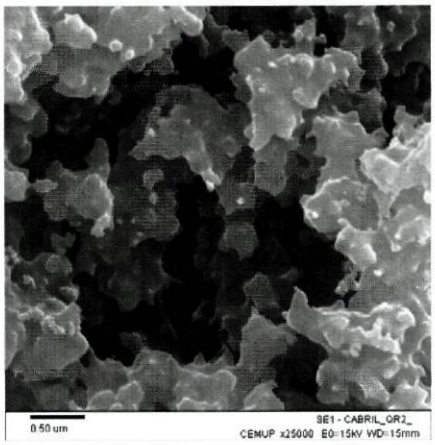
(II)

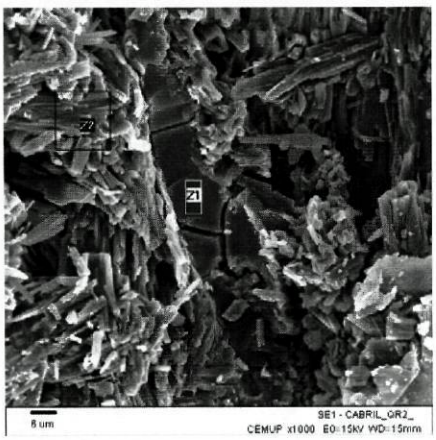

Pioneer_35C Display - Spectrum2
VFS: 2800
Livetime: 60
Si
K
Au
Na
O
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril d
15KeV
Z1

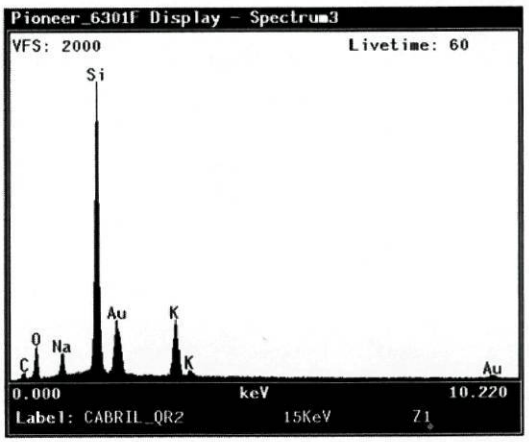

Pioneer_35C Display - Spectrum3
VFS: 1600
Livetime: 60
Si
Na
Au
O
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril d
15KeV
Z2

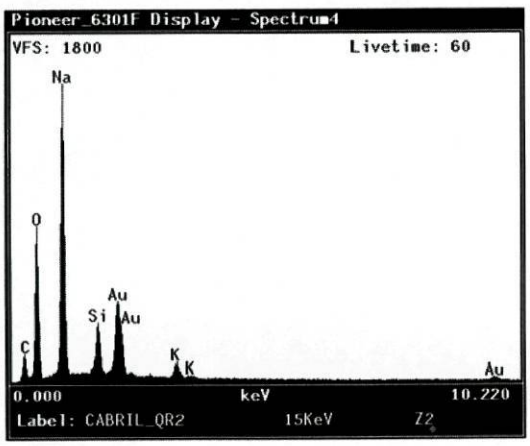
Texturas diversas de gel, mostrando um carácter esquelético, vacuolar e poroso em exsudação da barragem do Cabril (Z1 e Z3). Sobre a superfície amorfa existem cristais ricos em sódio, paralelos à mesma (Z2).

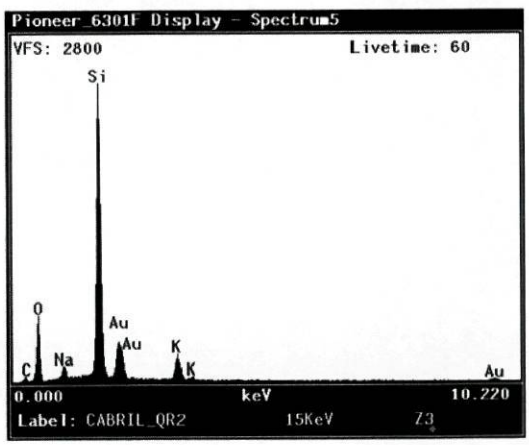

Z1
3 um
SE1 - CABRIL_QR2_
CEMUP x2500 E0=15kV WD=15mm


0.50 um
SE1 - CABRIL_QR2_
CEMUP x25000 E0=15kV WD=15mm


Z2
Z1
8 um
SE1 - CABRIL_QR2_
CEMUP x1000 E0=15kV WD=15mm

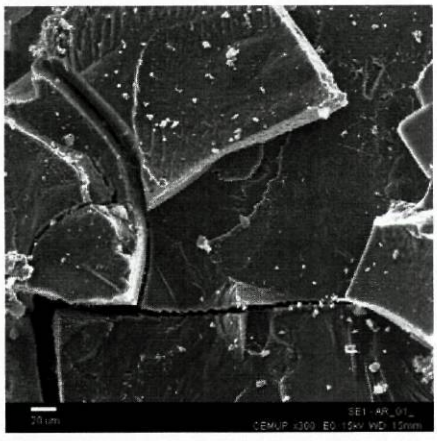

Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 2000
Livetime: 60
Si
O
Na
Au
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_QR2
15KeV
Z1

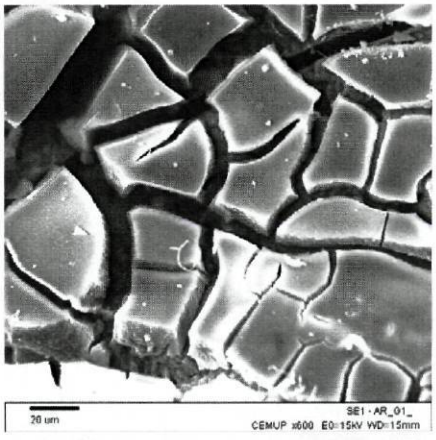

Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 1800
Livetime: 60
Na
O
Au
Si
Au
C
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_QR2
15KeV
Z2


Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 2800
Livetime: 60
Si
O
Au
Au
Na
K
C
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_QR2
15KeV
Z3

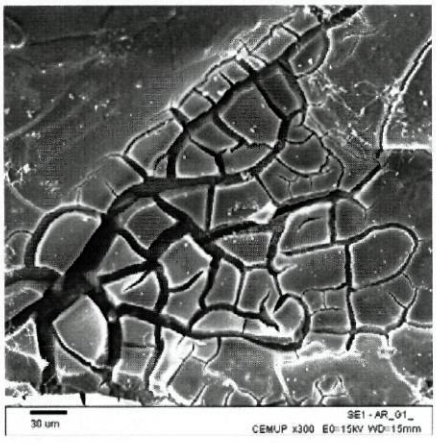
(I) Gel sílico-alcalino (Z2) em exsudação da barragem do Alto Rabagão. A superfície lisa do gel amorfo é atravessada por frequentes fissuras de retracção. Sobre o gel crescem, paralelamente à superfície deste, cristais lamelares ricos em sódio (Z1).

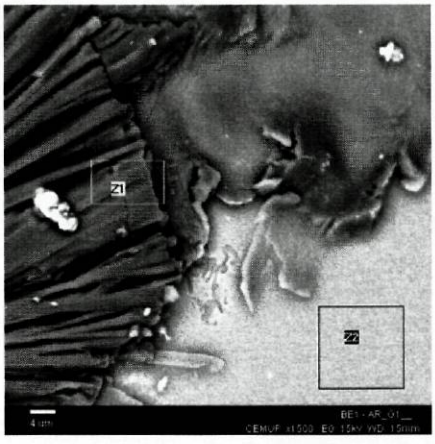
(II) Gel sílico-alcalino (Z8) exibindo uma textura cavernosa, esquelética.

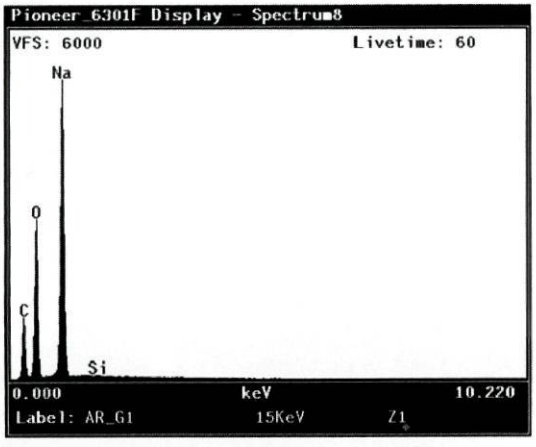


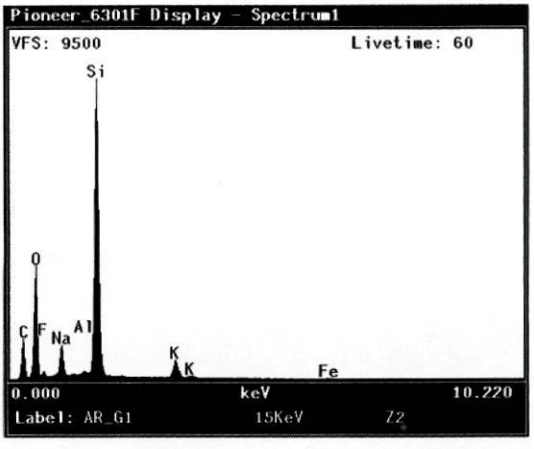


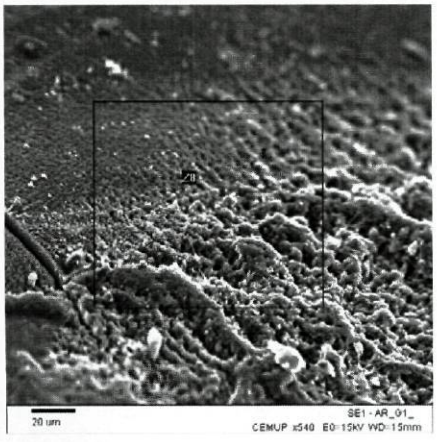
(I)



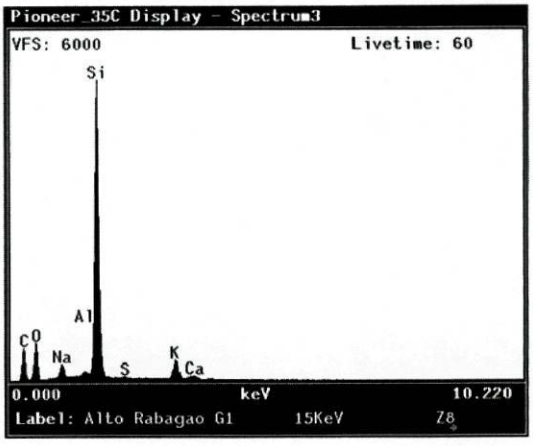

Z1
Z2


Pioneer_6301F Display - Spectrum8
VFS: 6000
Livetime: 60
Na
O
C
Si
0.000
keV
10.220
Label: AR_G1
15KeV
Z1


Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 9500
Livetime: 60
Si
O
C
F
Na
Al
K
K
Fe
0.000
keV
10.220
Label: AR_G1
15KeV
Z2

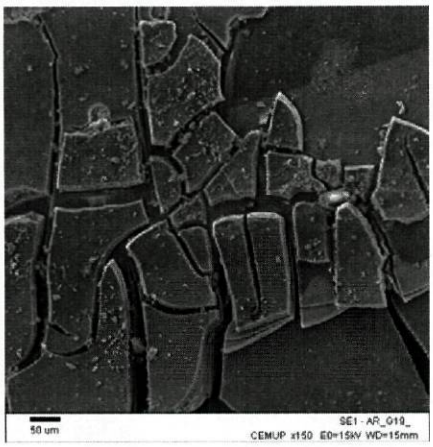


(II)

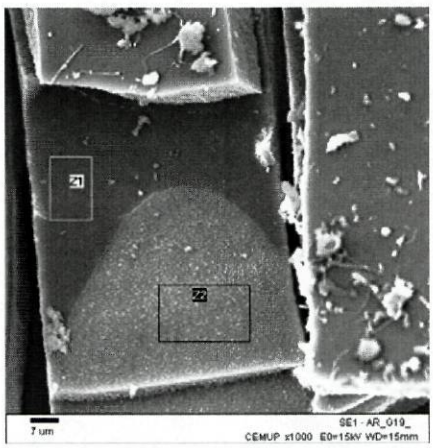

Pioneer_35C Display - Spectrum3
VFS: 6000
Livetime: 60
Si
Al
C
O
Na
S
K
Ca
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao G1
15KeV
Z8

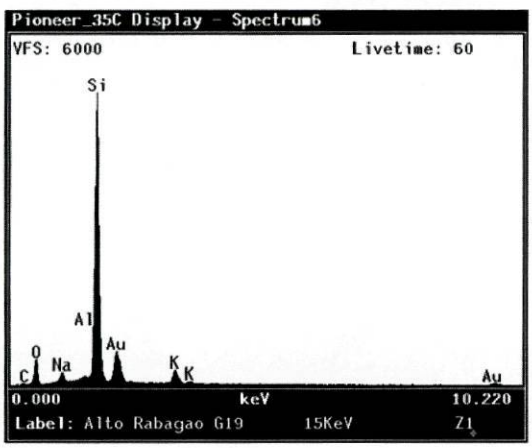
(I) Amostra de exsudação da barragem do Alto Rabagão constituída por gel com carácter idêntico ao anteriormente referido. A composição (Z1 e Z2) mantém-se constante na área observada.

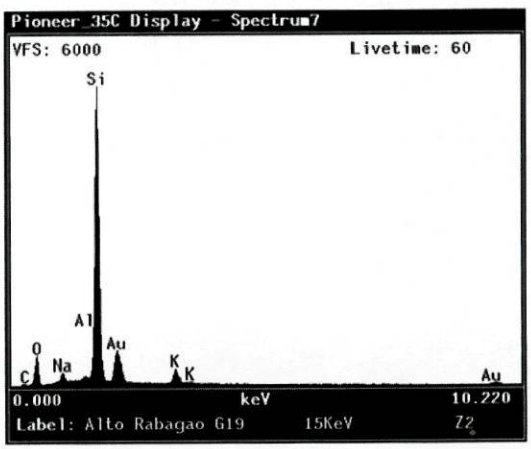
(II) Gel amorfo com fissuras de retracção (Z3) sobre o qual existe uma camada semicristalina que poderá corresponder a carbonato de cálcio (Z5).

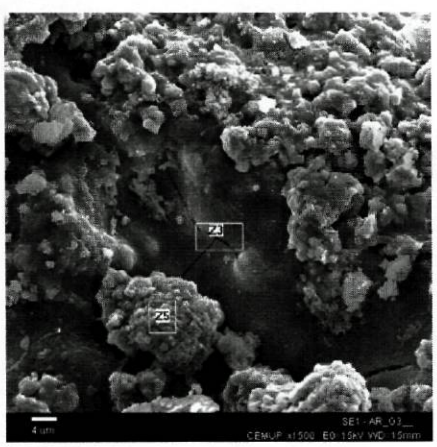

50 um
SE1-AR_G19_
CEMUP x150 E0=15kV WD=15mm

(I)

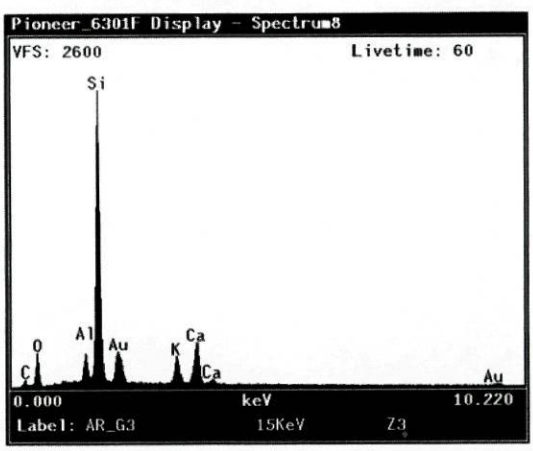

Z1
Z2
7 um
SE1-AR_G19_
CEMUP x1000 E0=15kV WD=15mm

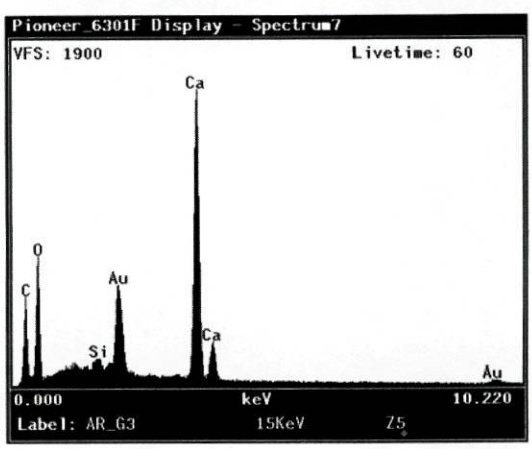

Pioneer_35C Display - Spectrum6
VFS: 6000
Livetime: 60
Si
Al
Au
O
C
Na
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao G19
15KeV
Z1


Pioneer_35C Display - Spectrum7
VFS: 6000
Livetime: 60
Si
Al
Au
O
C
Na
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao G19
15KeV
Z2

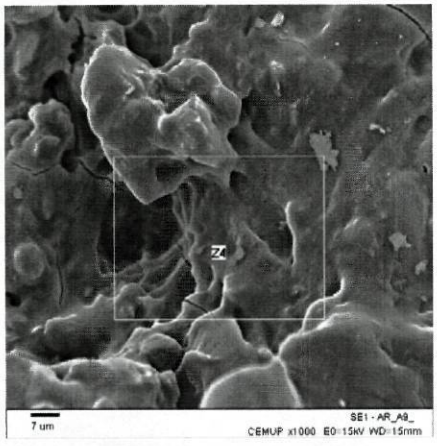

Z4
Z3
4 um
SE1-AR_03_
CEMUP x1500 E0=15kV WD=15mm

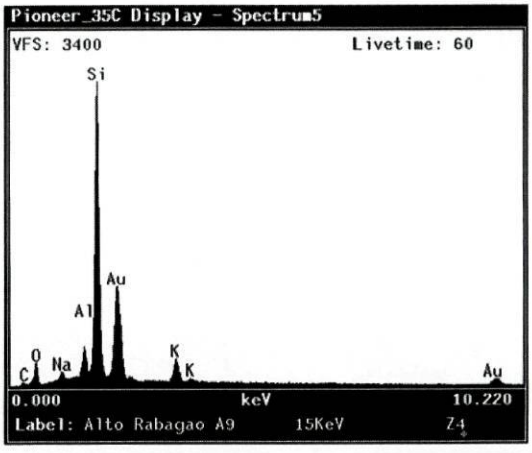
(II)

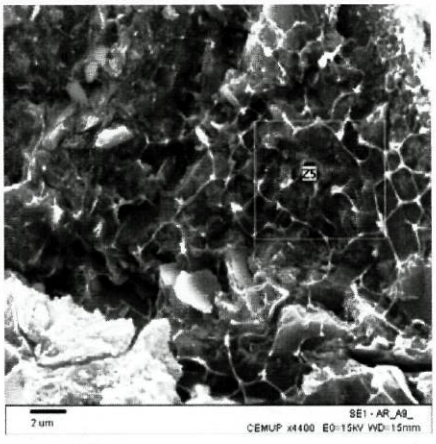

Pioneer_6301F Display - Spectrum8
VFS: 2600
Livetime: 60
Si
Al
Au
O
C
K
Ca
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_G3
15KeV
Z3

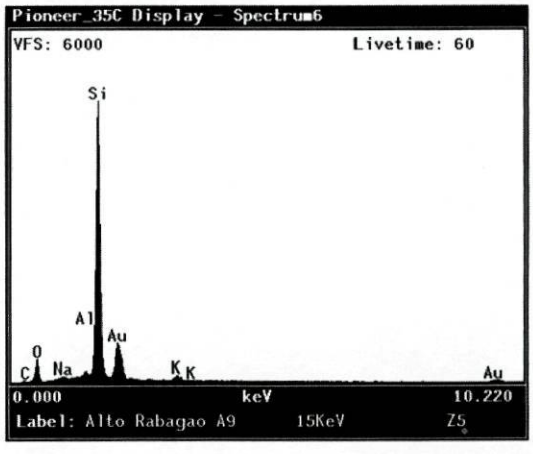

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 1900
Livetime: 60
Ca
O
C
Au
Si
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_G3
15KeV
Z5

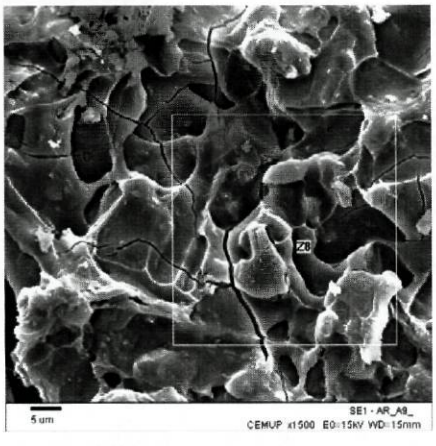
Imagens obtidas ao MEV de um fragmento pertencente a um *pop-out* da barragem do Alto Rabagão. A composição do gel sílico-alcalino mantém-se aproximadamente constante (Z4, Z5 e Z8), variando a morfologia do gel, que em geral é vacuolar.

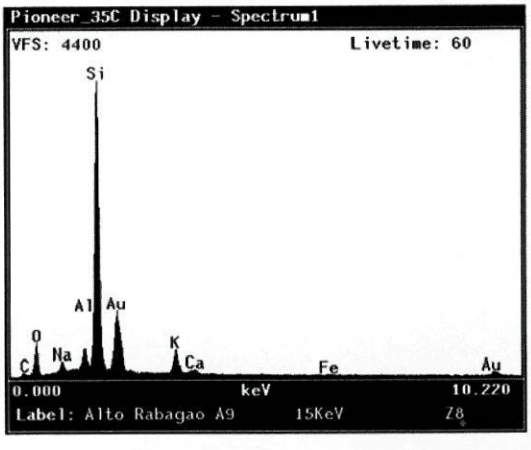

Z4
7 um
SE1 - AR_A9_
CEMUP x1000 E0=15kV WD=15mm

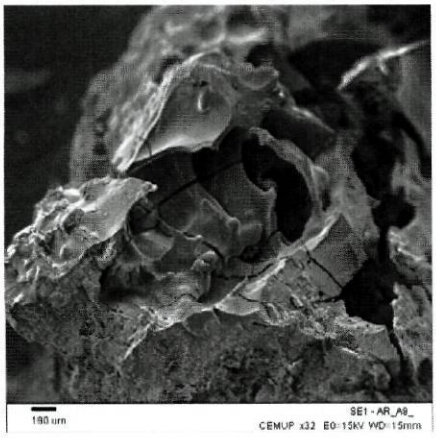

Pioneer_35C Display - Spectrum5
VFS: 3400
Livetime: 60
Si
Au
Al
O
Na
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao A9
15KeV
Z4

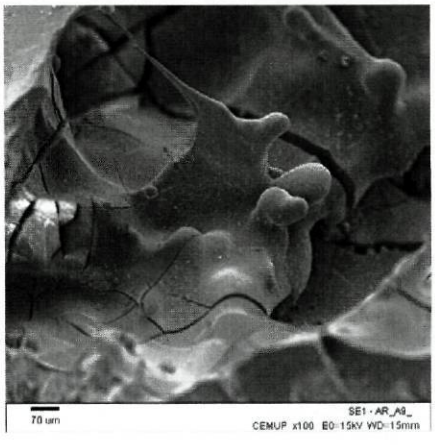

Z5
2 um
SE1 - AR_A9_
CEMUP x4400 E0=15kV WD=15mm


Pioneer_35C Display - Spectrum6
VFS: 6000
Livetime: 60
Si
Al
Au
O
Na
K
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao A9
15KeV
Z5

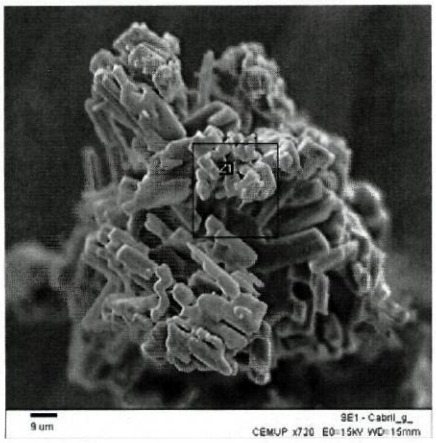

Z8
5 um
SE1 - AR_A9_
CEMUP x1500 E0=15kV WD=15mm

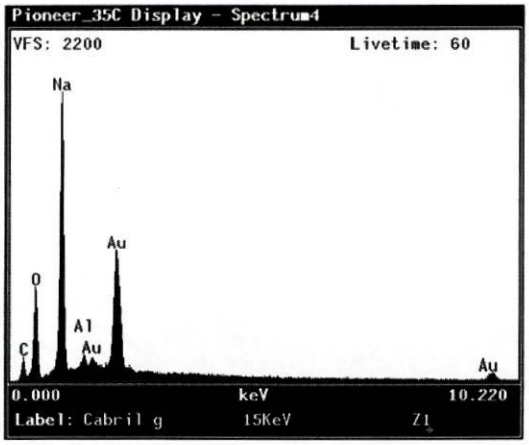

Pioneer_35C Display - Spectrum1
VFS: 4400
Livetime: 60
Si
Al
Au
O
Na
K
Ca
Fe
Au
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao A9
15KeV
Z8

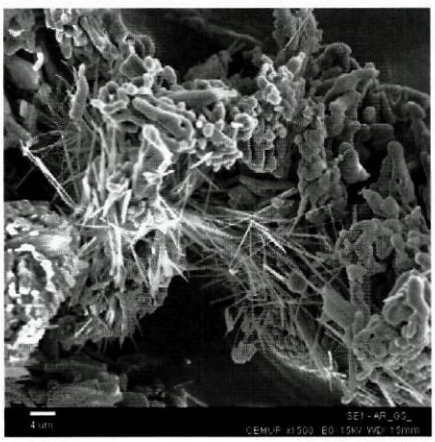

180 um
SE1 - AR_A9_
CEMUP x32 E0=15kV WD=15mm

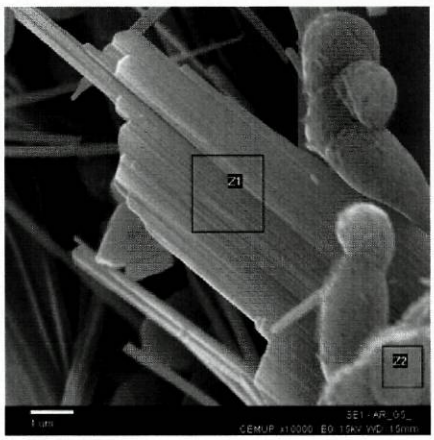

70 um
SE1 - AR_A9_
CEMUP x100 E0=15kV WD=15mm

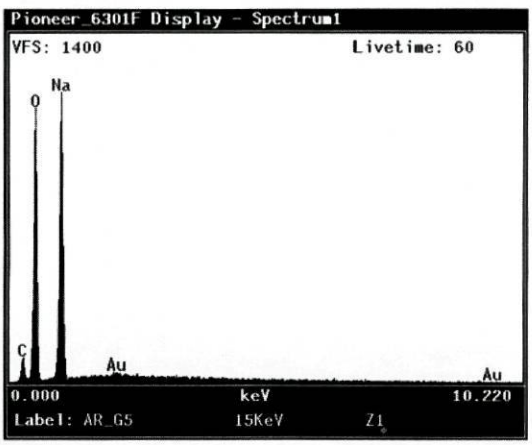
Produtos ricos em sódio (trona) que formam, em geral, cristais tabulares alongados e por vezes pequenos glóbulos que lhe conferem uma aparência vermicular. Verifica-se que, nos cristais mais alongados, o revestimento a ouro está ausente.

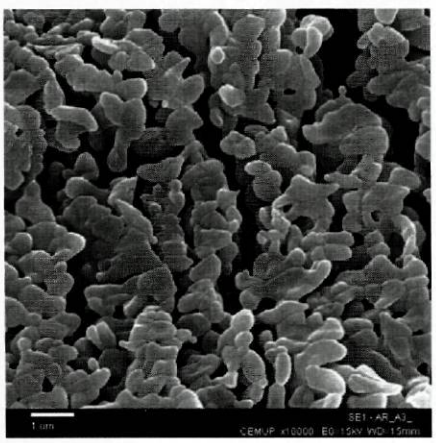

Z1
9 um
SE1 - Cabril_g_
CEMUP x720 E0=15kV WD=15mm

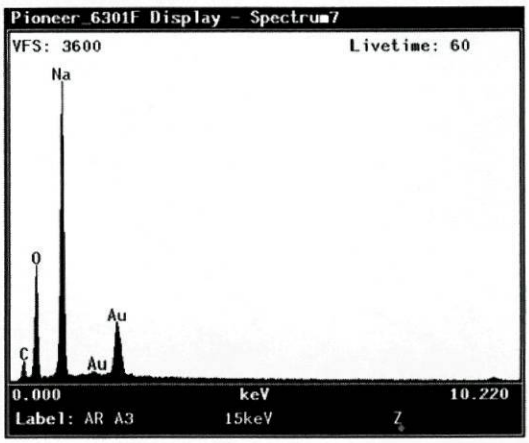

Pioneer_35C Display - Spectrum4
VFS: 2200
Livetime: 60
Na
O
C
Al
Au
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril g
15KeV
Z1


4 um
SE1 - AR_G5_
CEMUP x1500 E0=15kV WD=15mm


Z1
Z2
1 um
SE1 - AR_G5_
CEMUP x10000 E0=15kV WD=15mm

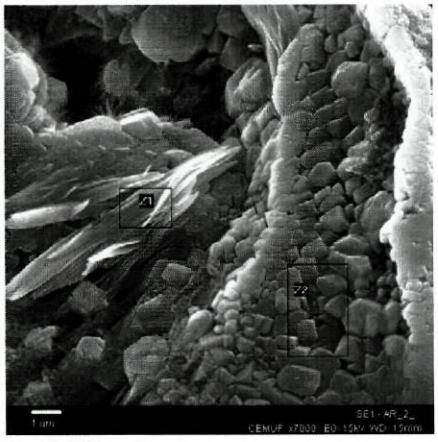

Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 1400
Livetime: 60
O
Na
C
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_G5
15KeV
Z1


1 um
SE1 - AR_A3_
CEMUP x10000 E0=15kV WD=15mm

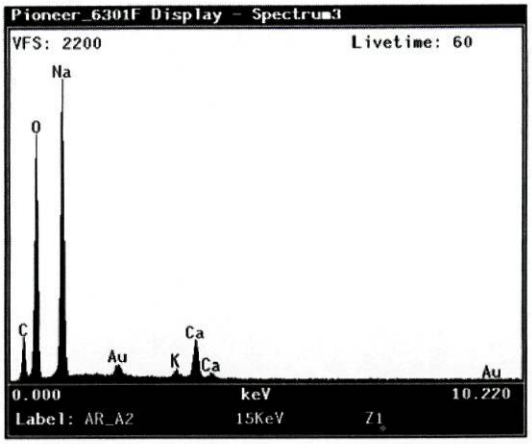

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 3600
Livetime: 60
Na
O
C
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR A3
15keV
Z

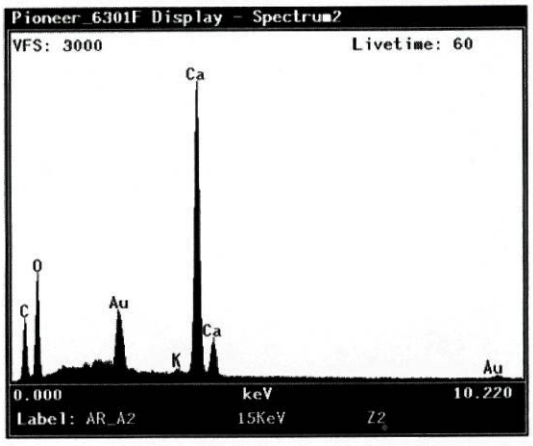
(I) Quando presentes nas amostras de exsudações, os cristais ricos em sódio apresentam-se em geral tabulares e alongados.

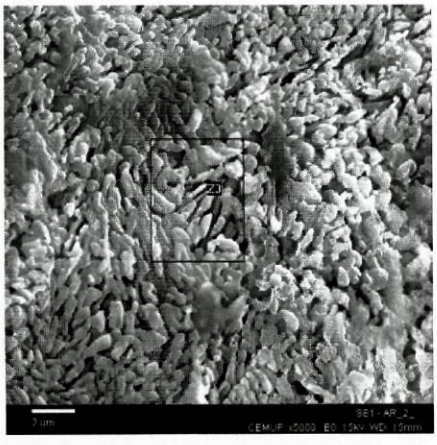
(II) Nas eflorescências a trona com carácter globular, disposta em filamentos, é a mais frequente.


Z1
Z2
1 um
SE1 - AR_2_
CEMUP x7000 E0-15kV WD-15mm

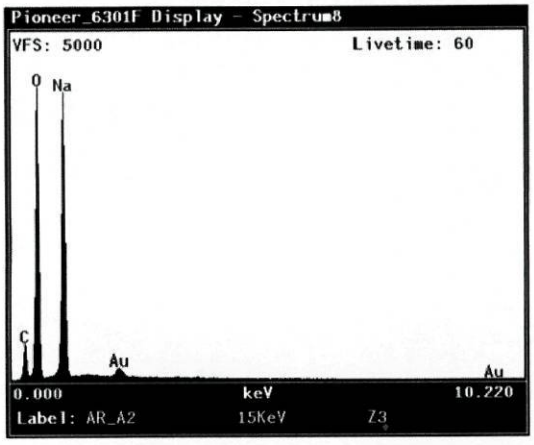
(I)

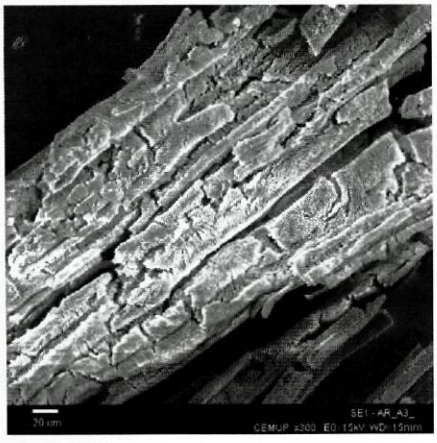

Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 2200
Livetime: 60
Na
O
C
Au
K
Ca
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_A2
15KeV
Z1

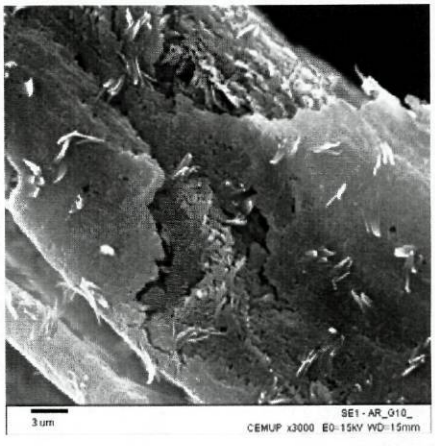

Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 3000
Livetime: 60
Ca
O
C
Au
Ca
K
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_A2
15KeV
Z2


Z3
2 um
SE1 - AR_2_
CEMUP x5000 E0-15kV WD-15mm

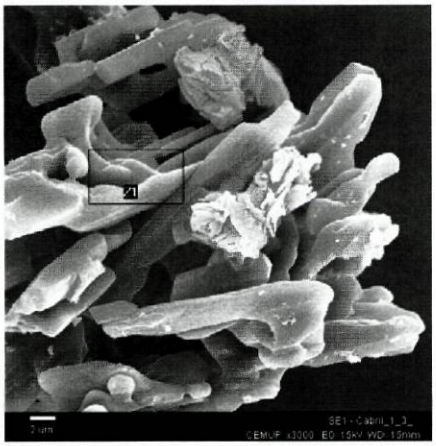
(II)

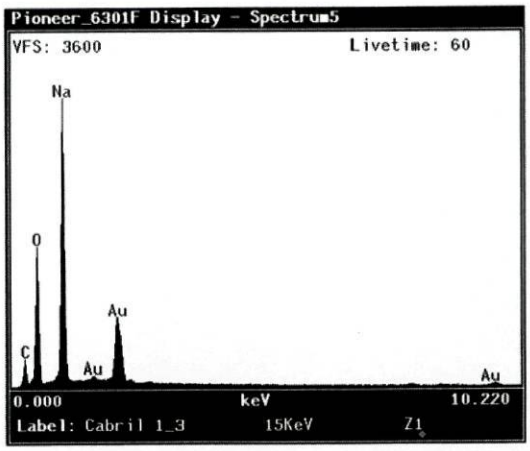

Pioneer_6301F Display - Spectrum8
VFS: 5000
Livetime: 60
O
Na
C
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_A2
15KeV
Z3

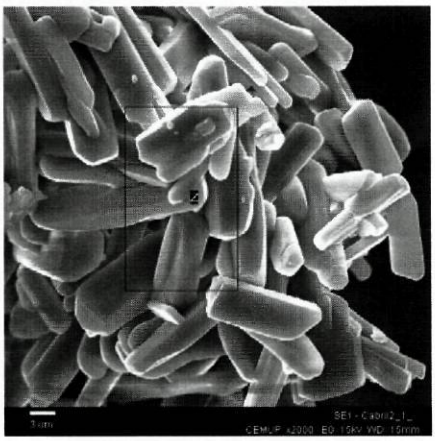

20 um
SE1 - AR_A3_
CEMUP x300 E0-15kV WD-15mm

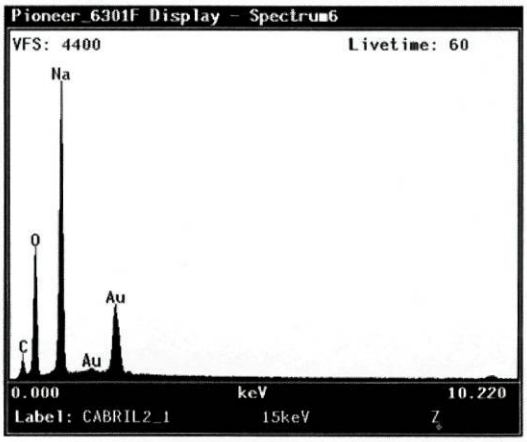

3 um
SE1 - AR_G10_
CEMUP x3000 E0-15kV WD-15mm

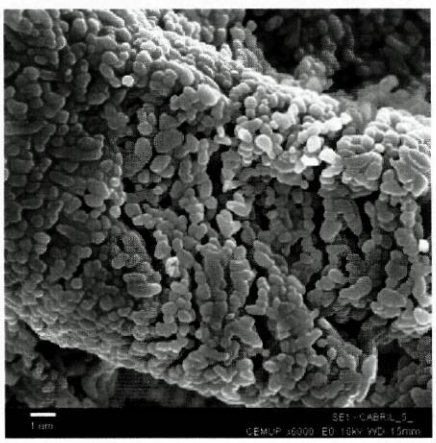
Diferentes imagens ao MEV dos cristais ricos em sódio (trona) presentes nas exsudações da barragem do Cabril.

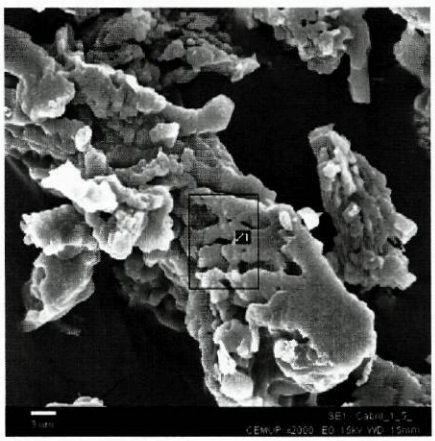

Z1

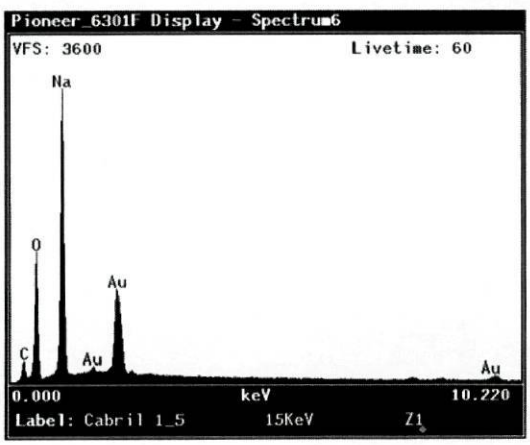

Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 3600
Livetime: 60
Na
O
C
Au
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1_3
15KeV
Z1


Z


Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 4400
Livetime: 60
Na
O
C
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL2_1
15keV
Z

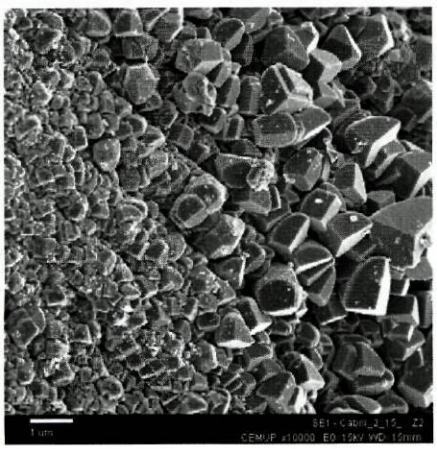


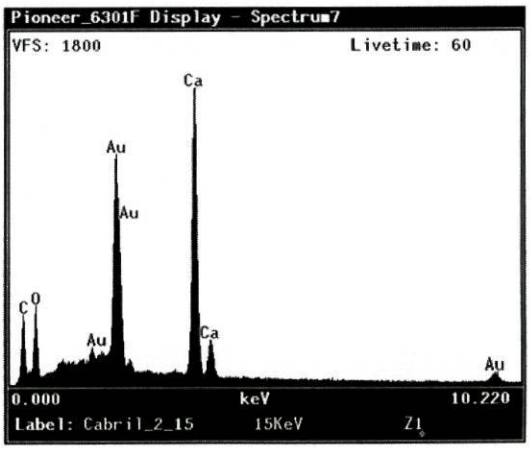

Z1

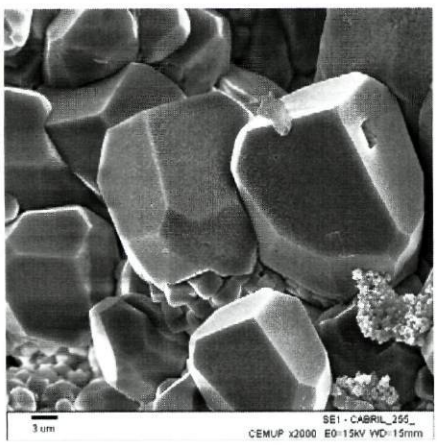

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 3600
Livetime: 60
Na
O
C
Au
Au
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1_5
15KeV
Z1

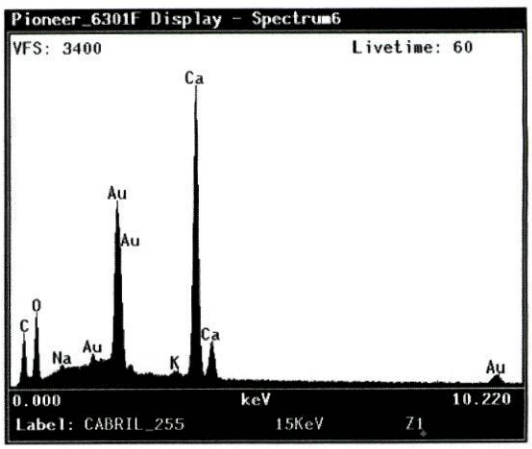
CARBONATO DE CÁLCIO

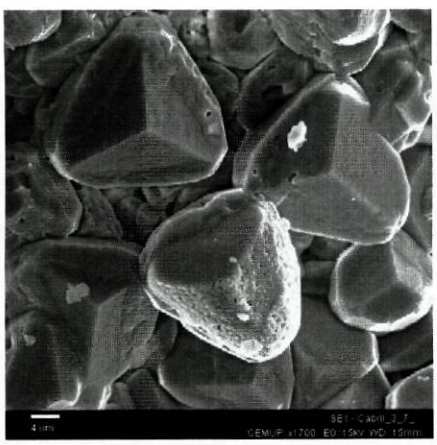
Imagens de cristais de carbonato de cálcio obtidas ao MEV em amostras de estalactites existentes junto aos drenos da barragem do Cabril. Encontram-se também os espectros EDS correspondentes. Numa das amostras foi detectado Sr, que por vezes substitui o Ca.

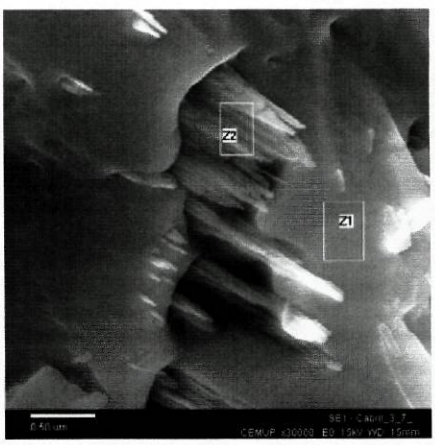


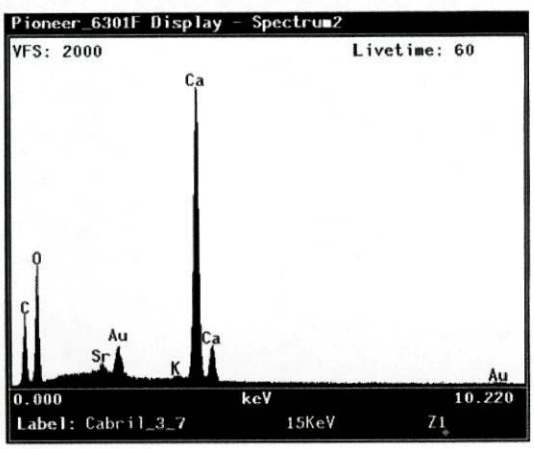

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 1800
Livetime: 60
Ca
Au
Au
C
O
Au
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_15
15KeV
Z1

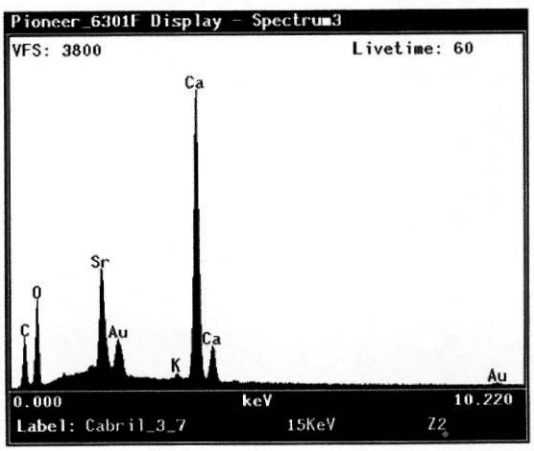



Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 3400
Livetime: 60
Ca
Au
Au
C
O
Na
Au
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: CABRIL_255
15KeV
Z1

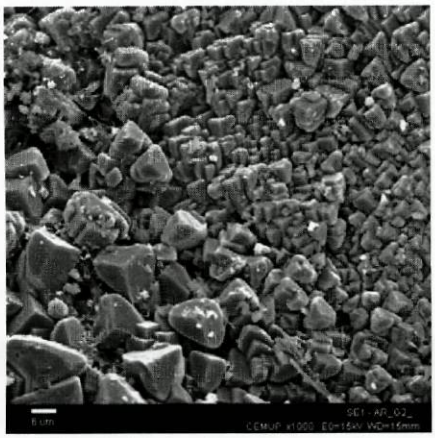


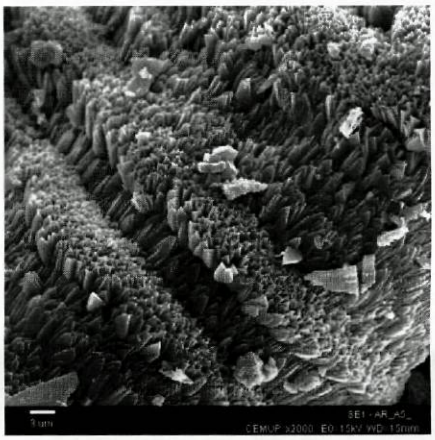

Z2
Z1


Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 2000
Livetime: 60
Ca
O
C
Au
Sr
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_3_7
15KeV
Z1

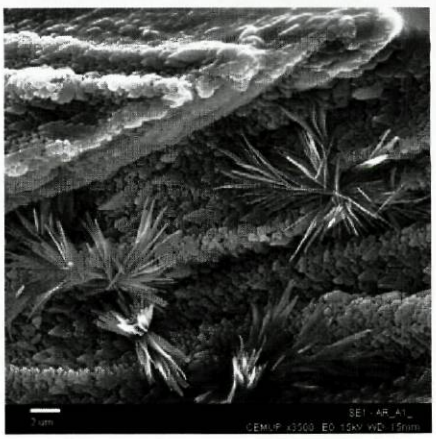

Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 3800
Livetime: 60
Ca
Sr
O
C
Au
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_3_7
15KeV
Z2

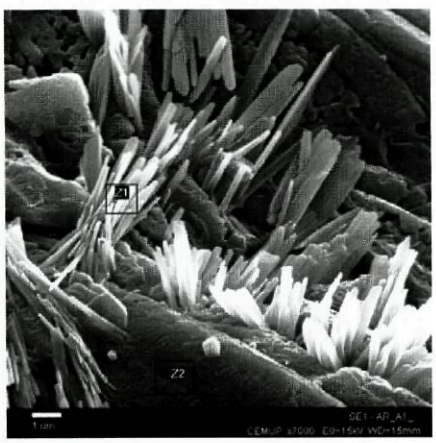
Imagens de produtos ricos em cálcio (provavelmente carbonato de cálcio) obtidas ao MEV de exsudações e de fragmentos de betão retirados das carotes da barragem do Alto Rabagão. Estes produtos apresentam hábitos diversos, mantendo a composição.

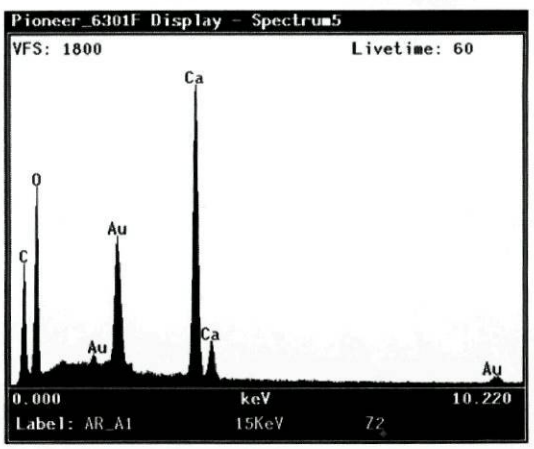


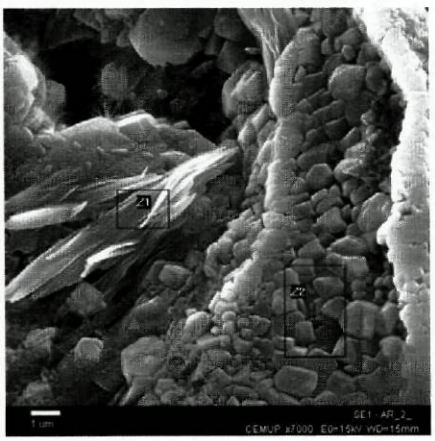


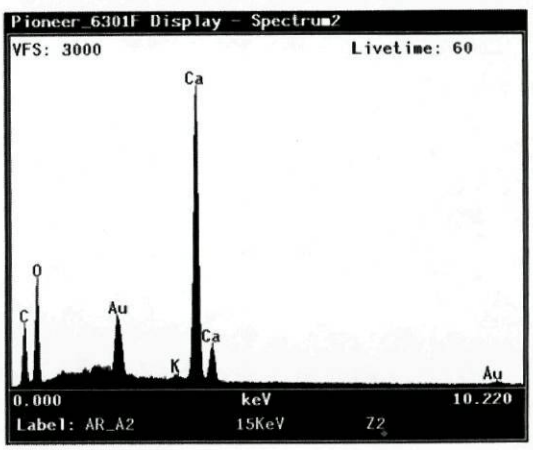





Z1
Z2

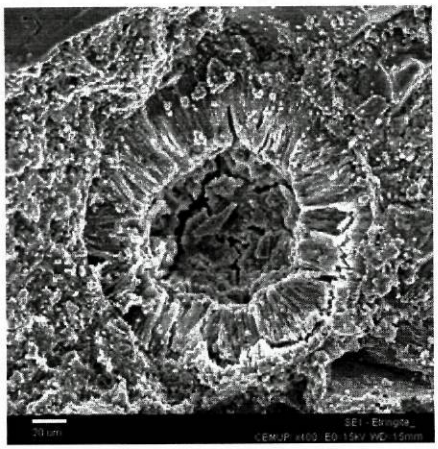

Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 1800
Livetime: 60
Ca
O
C
Au
Au
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_A1
15KeV
Z2

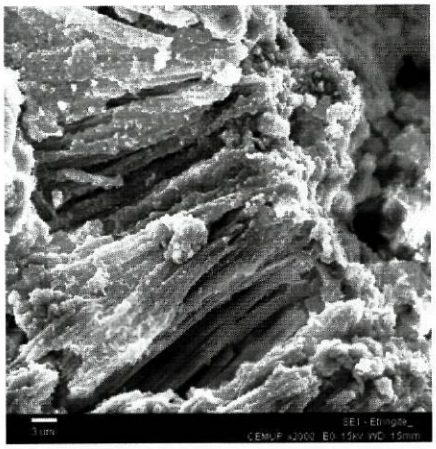

Z1
Z2

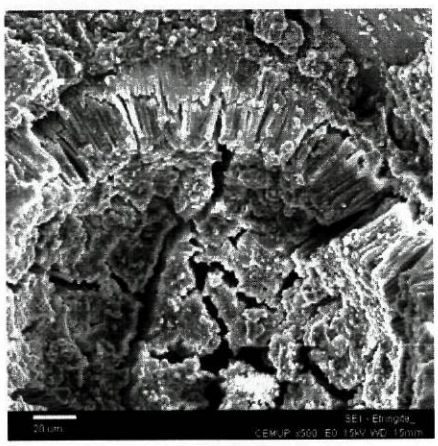

Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 3000
Livetime: 60
Ca
O
C
Au
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_A2
15KeV
Z2

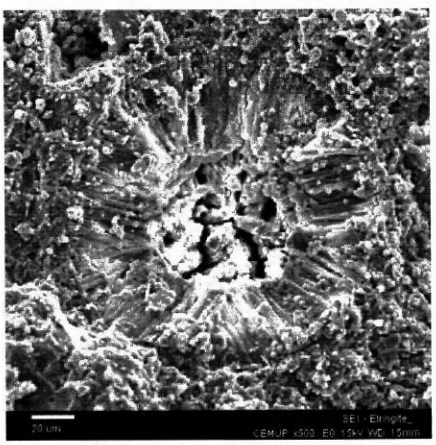
ETRINGITE

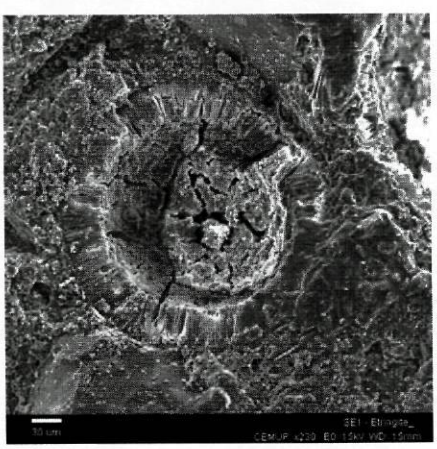
Imagens de etringite obtidas a partir da observação ao MEV de amostras de betão retiradas das carotes da barragem do Cabril. A etringite preenche parcialmente os poros, em geral em cristais aciculares espessos, agrupados, e com fissuras de retracção. Apresenta-se um espectro EDS de uma zona analisada, que mostra silício e álcalis, para além dos constituintes da etringite.

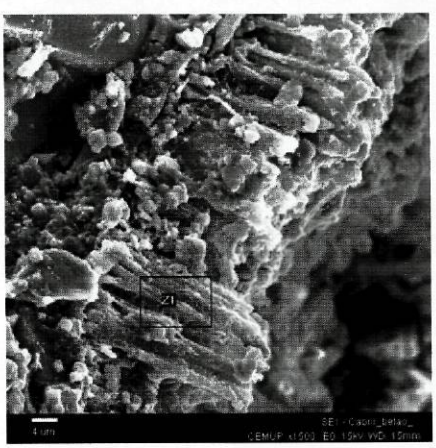


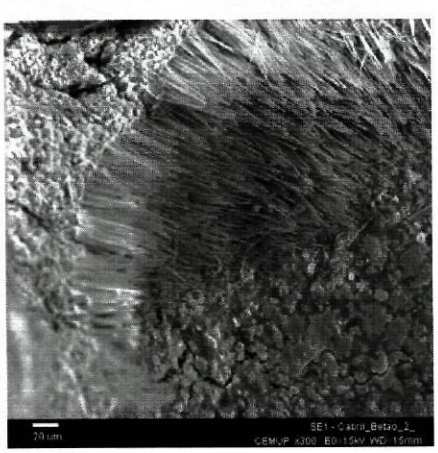


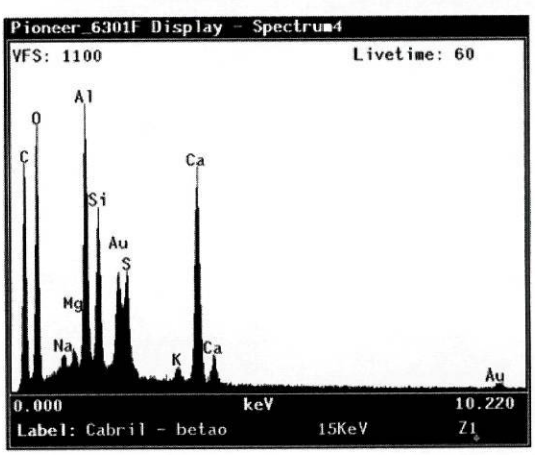







Z1



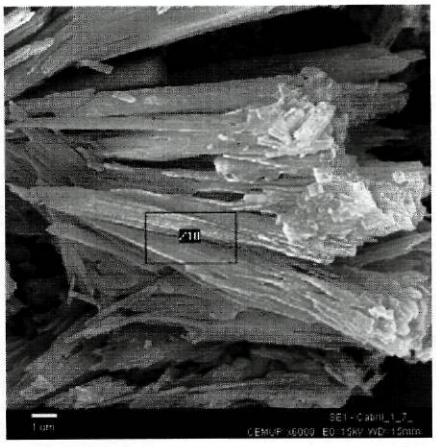

Pioneer_6301F Display - Spectrum4
VFS: 1100
Livetime: 60
Al
O
C
Ca
Si
Au
S
Mg
Na
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril - betao
15KeV
Z1

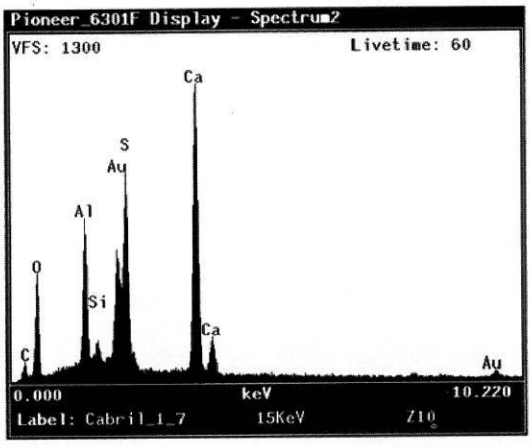
(I) Cristais aciculares de etringite (Z10) orientada existente em amostra de betão da barragem do Cabril, dispostos paralelamente à superfície de uma partícula de agregado.

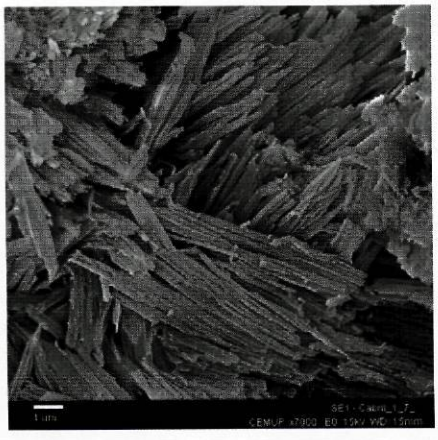
(II) A zona assinalada com Z1a mostra uma composição diferente da geralmente encontrada para a etringite. A presença de silício e álcalis pode indicar a coexistência com gel sílico-alcalino.



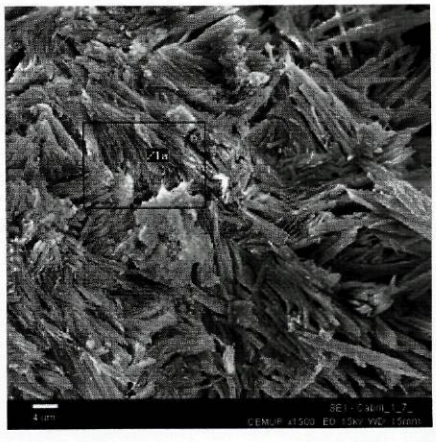
(I)

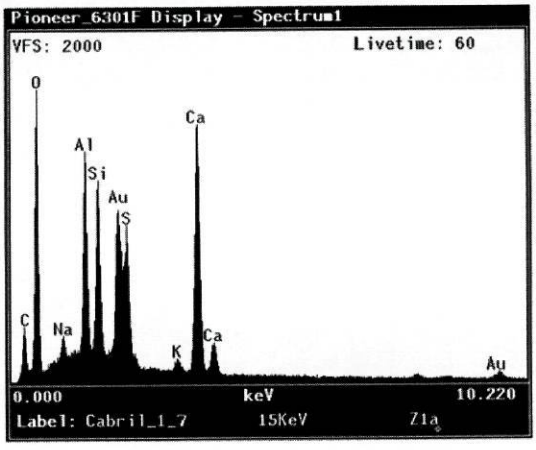

Z10


Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 1300
Livetime: 60
Ca
S
Au
Al
O
Si
Ca
C
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_1_7
15KeV
Z10



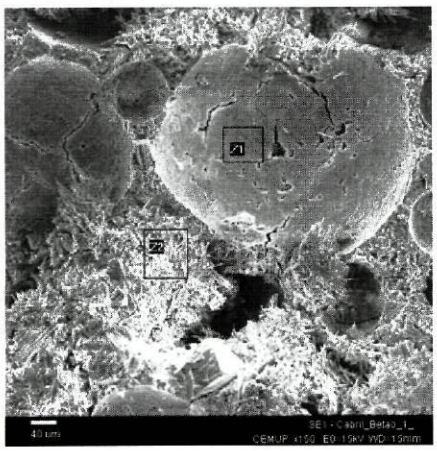
(II)


Z1a


Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 2000
Livetime: 60
O
Ca
Al
Si
Au
S
C
Na
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_1_7
15KeV
Z1a

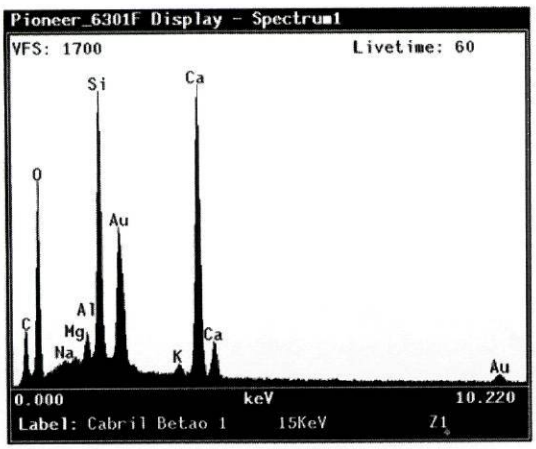
(I) Imagem de um poro no betão da barragem do Cabril mostrando uma pasta composta essencialmente por silicatos de cálcio hidratados (Z1). Existem cristais de etringite na pasta de cimento adjacente (Z2).

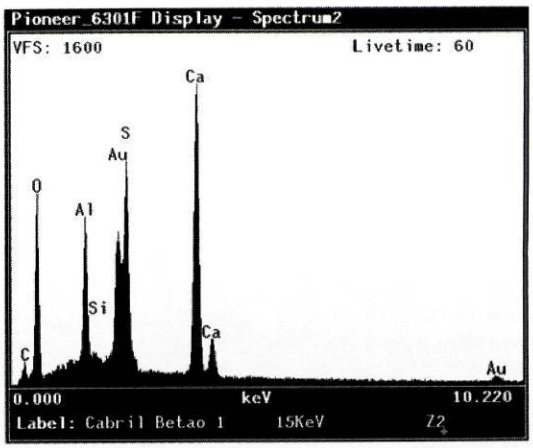
(II) Cristais de etringite (Z14) dispostos paralelamente à superfície de uma partícula de agregado constituída por quartzo (Z15).

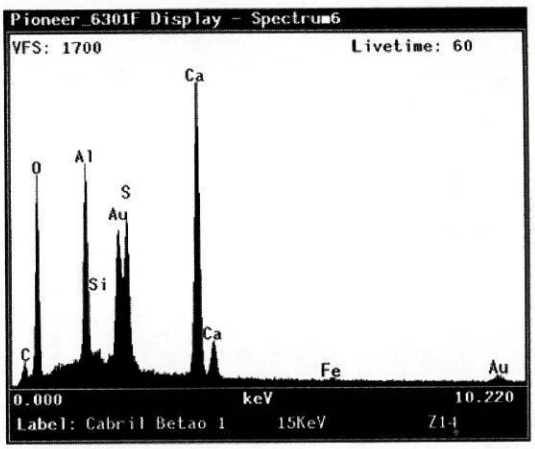

Z1
Z2
4 um
SE1 - Cabril_Betao_1_
CEMUP x150 E0 15kV WD 15mm

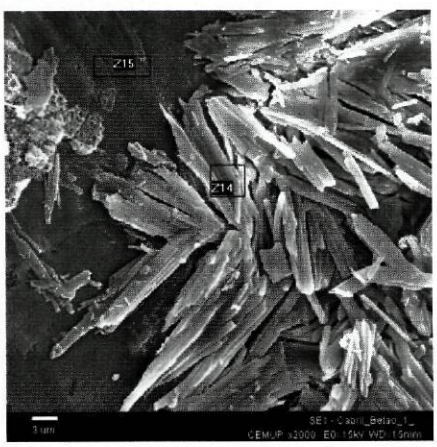
(I)


4 um
SE1 - Cabril_Betao_1_ Z2
CEMUP x1500 E0 15kV WD 15mm

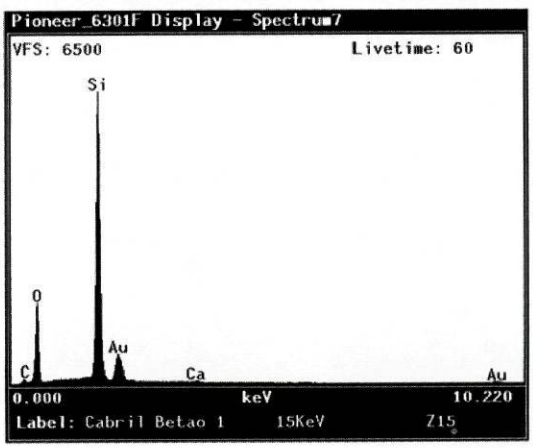

Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 1700
Livetime: 60
Si
Ca
O
Au
Al
C
Mg
Na
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril Betao 1
15KeV
Z1


Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 1600
Livetime: 60
Ca
S
Au
O
Al
Si
C
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril Betao 1
15KeV
Z2

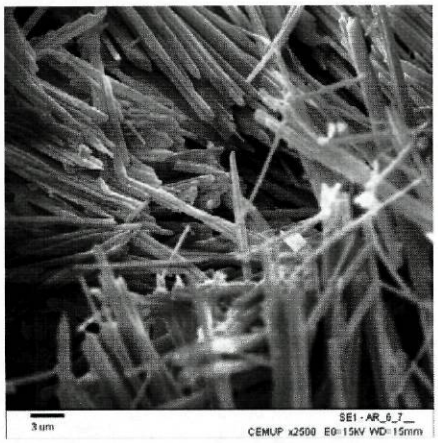

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 1700
Livetime: 60
Ca
O
Al
S
Au
Si
C
Ca
Fe
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril Betao 1
15KeV
Z14

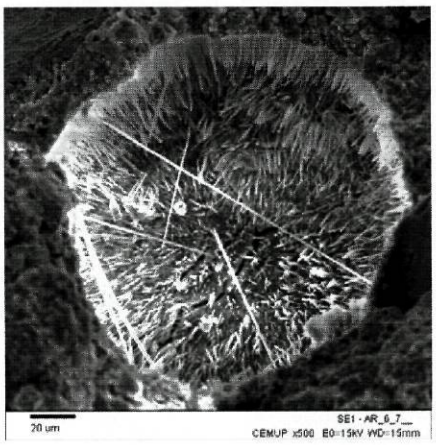

Z15
Z14
3 um
SE1 - Cabril_Betao_1_
CEMUP x2000 E0 15kV WD 15mm

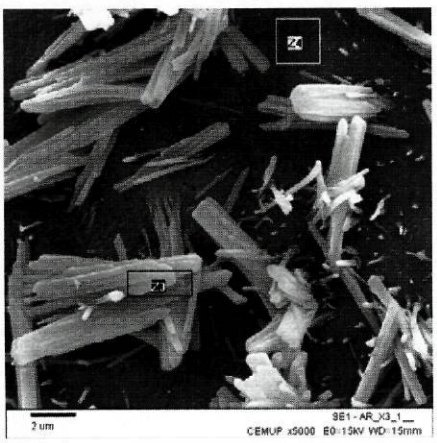
(II)

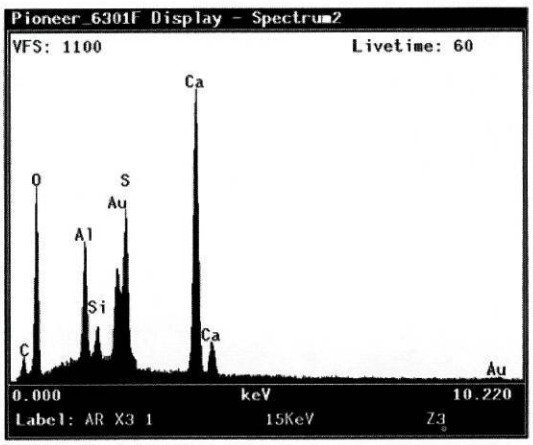

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 6500
Livetime: 60
Si
O
Au
C
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril Betao 1
15KeV
Z15

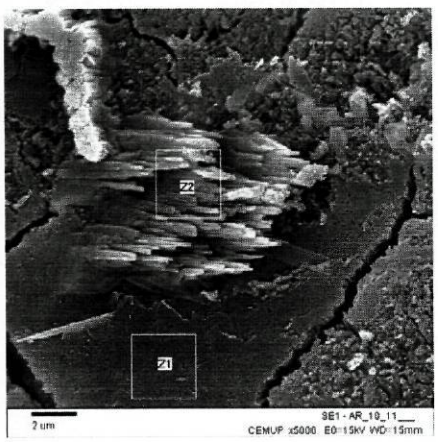
Imagens obtidas ao MEV de amostras de betão das carotes da barragem do Alto Rabagão. Pode observar-se predominantemente etringite (Z3), embora pouco frequente, alguns cristais aciculares ricos em cálcio (Z2) e provavelmente gel (Z1).

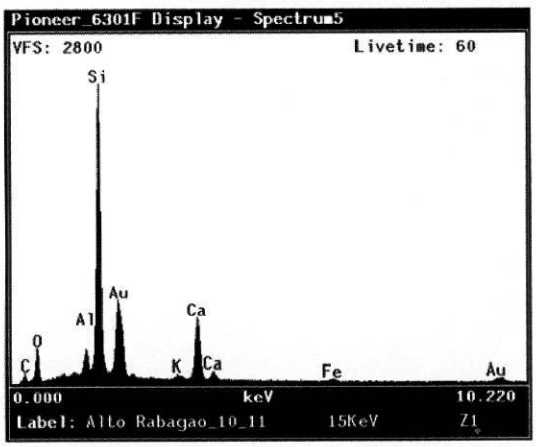

3 um
SE1 - AR_6_7__
CEMUP x2500 E0=15kV WD=15mm

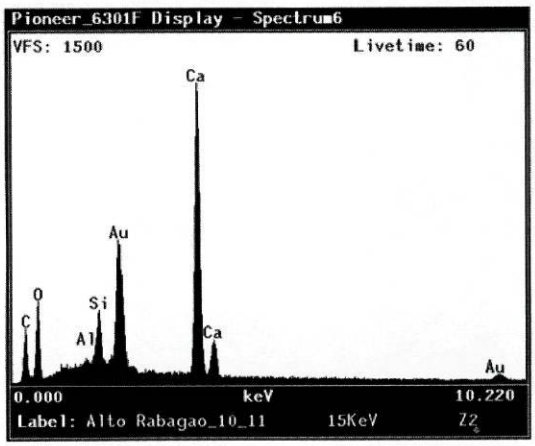

20 um
SE1 - AR_6_7__
CEMUP x500 E0=15kV WD=15mm


Z2
Z3
2 um
SE1 - AR_X3_1__
CEMUP x5000 E0=15kV WD=15mm

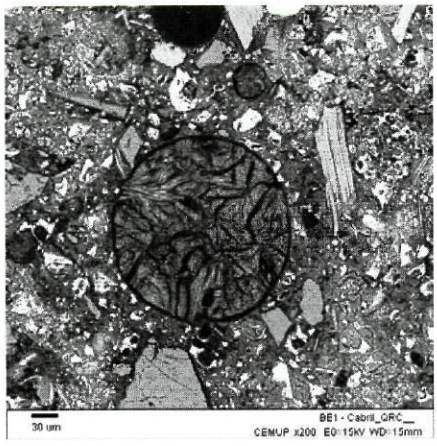

Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 1100
Livetime: 60
Ca
O
S
Au
Al
Si
C
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR X3 1
15KeV
Z3

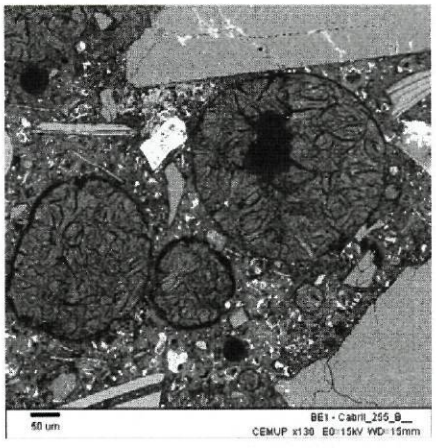

Z1
Z2
2 um
SE1 - AR_10_11__
CEMUP x5000 E0=15kV WD=15mm

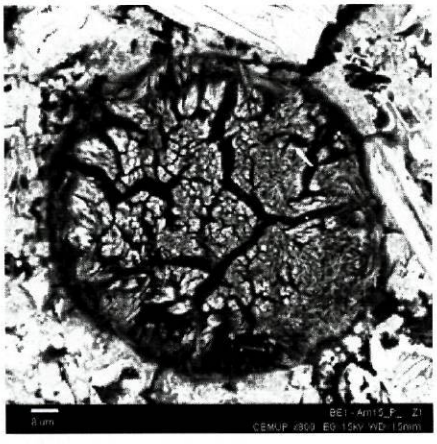

Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 2800
Livetime: 60
Si
Au
Al
Ca
O
C
K
Ca
Fe
Au
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao_10_11
15KeV
Z1

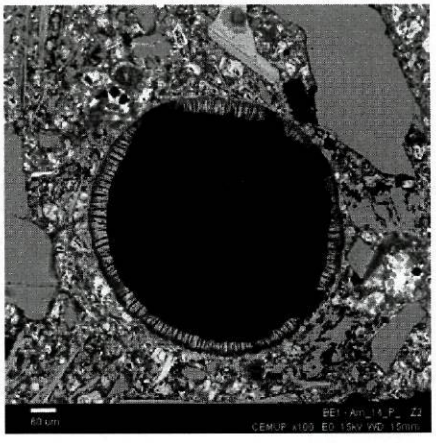

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 1500
Livetime: 60
Ca
Au
O
Si
C
Al
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Alto Rabagao_10_11
15KeV
Z2

Imagens de etringite obtidas a partir da observação ao MEV de lâminas delgadas de betão retiradas das carotes da barragem do Cabril. A etringite preenche total ou parcialmente os poros e mostra, por vezes, cristais entrelaçados, de orientação aleatória, com fissuras de retracção que, em alguns casos, se propagam para a pasta de cimento adjacente.

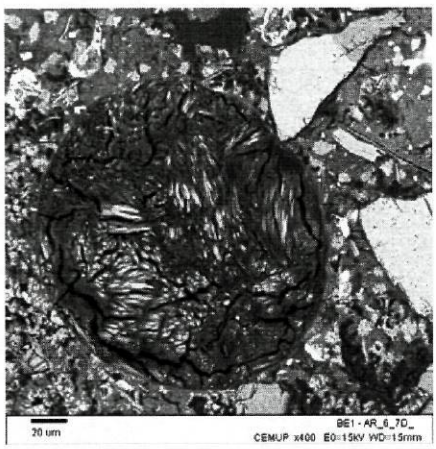

30 um
BE1 - Cabril_QRC__
CEMUP x200 E0=15kV WD=15mm

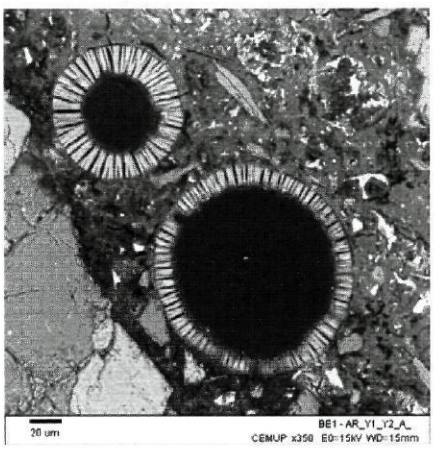

50 um
BE1 - Cabril_255_B__
CEMUP x130 E0=15kV WD=15mm

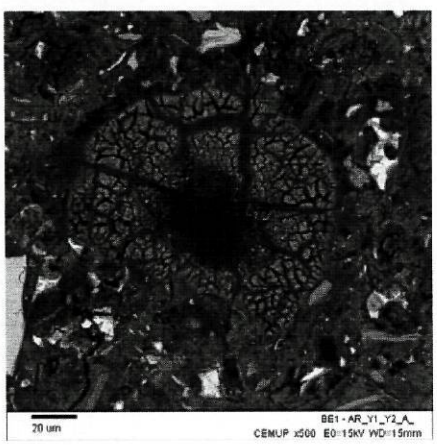

8 um
BE1 - Am15_P_ Z1
CEMUP x300 E0=15kV WD=15mm


50 um
BE1 - Am_14_P_ Z2
CEMUP x100 E0=15kV WD=15mm

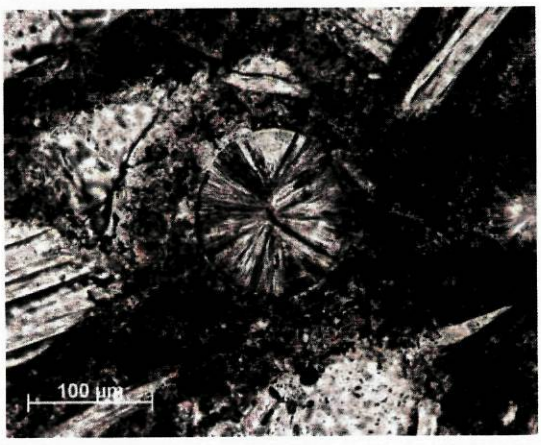
Imagens de etringite obtidas a partir da observação ao MEV de amostras de betão retiradas das carotes da barragem do Alto Rabagão. A etringite mostra, por vezes, um carácter semicristalino com fissuras abundantes.

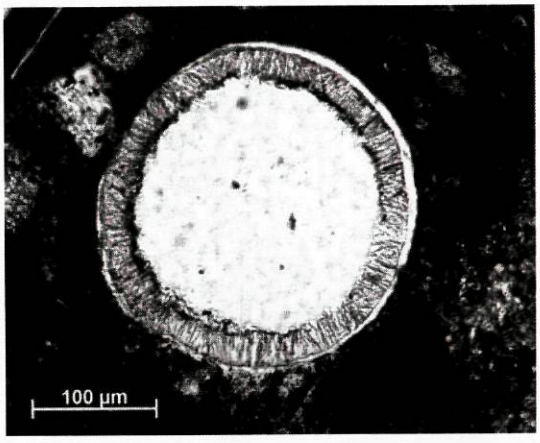

20 um
BE1 - AR_6_7D_
CEMUP x400 E0=15kV WD=15mm

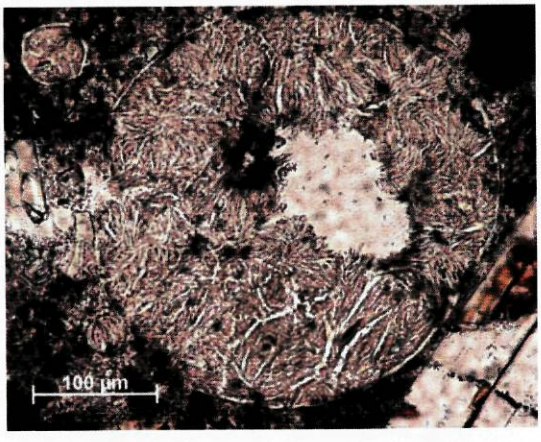

20 um
BE1 - AR_Y1_Y2_A_
CEMUP x350 E0=15kV WD=15mm

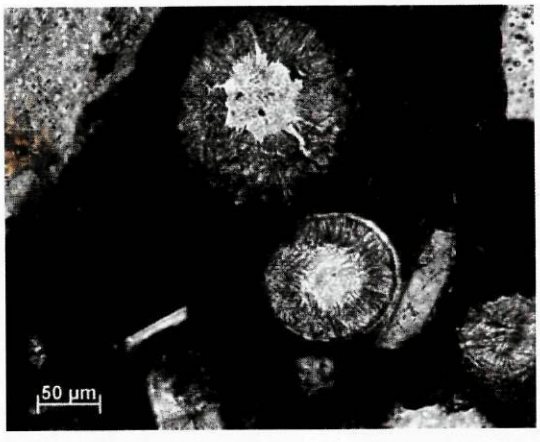

20 um
BE1 - AR_Y1_Y2_A_
CEMUP x500 E0=15kV WD=15mm

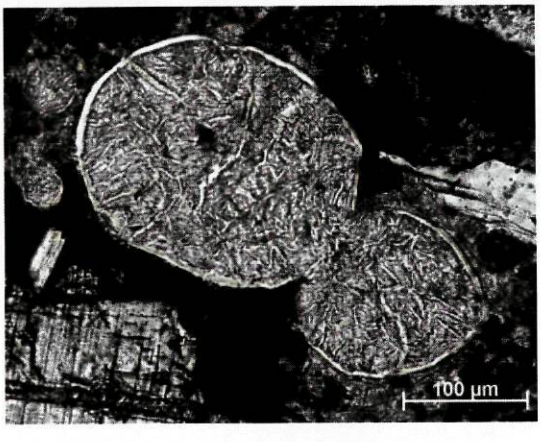
Imagens de etringite obtidas ao microscópio óptico em luz transmitida, por observação de lâminas delgadas de betão da barragem do Cabril.

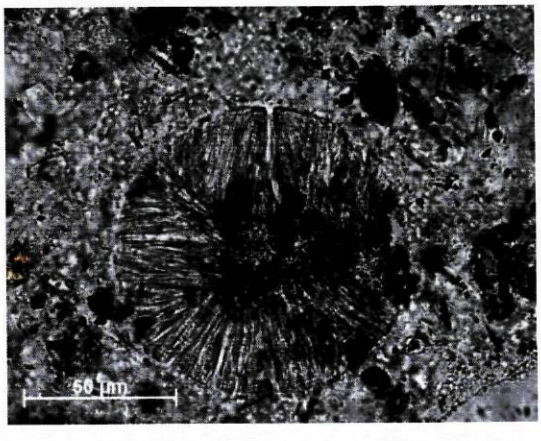

100 µm

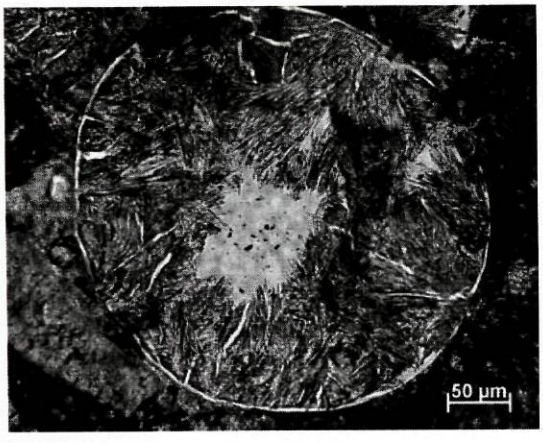

100 µm

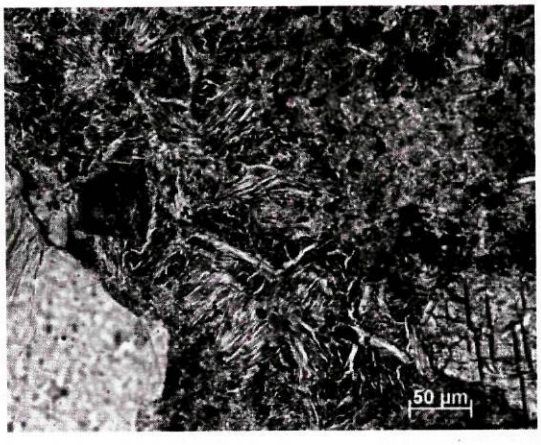

100 µm


50 µm

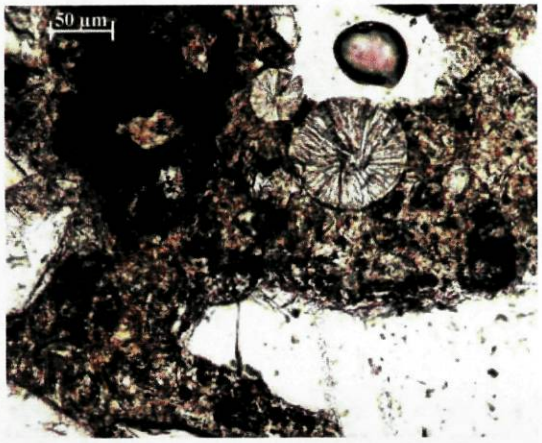

100 µm


50 µm


50 µm

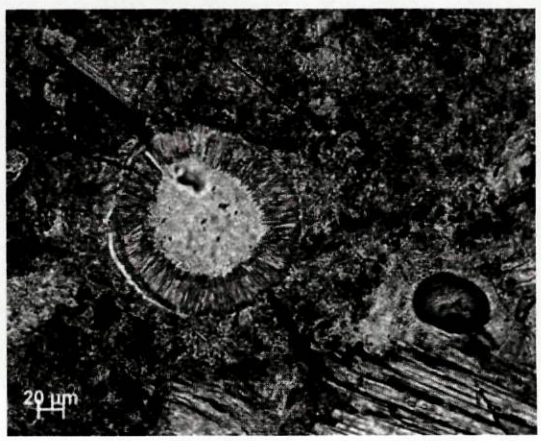

50 µm

Imagens de poros preenchidos por etringite obtidas ao microscópio óptico, por observação de lâminas delgadas de betão da barragem do Alto Rabagão.


50 µm

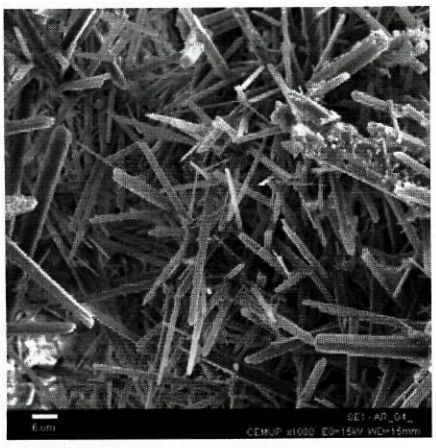

50 µm

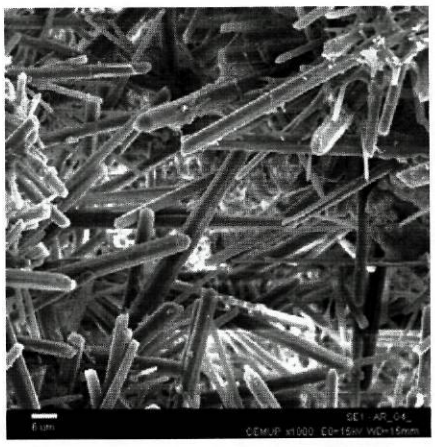

20 µm

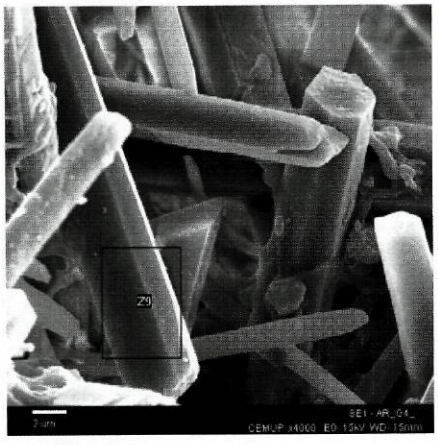

20 µm

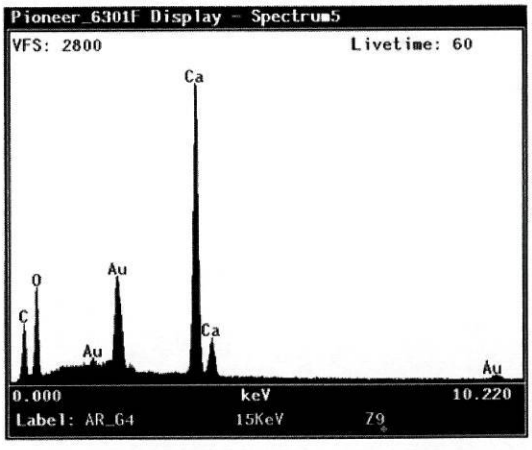
PORTLANDITE

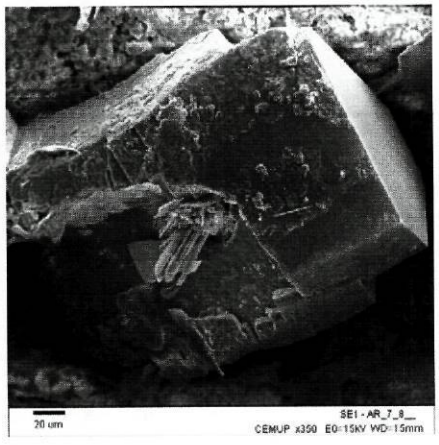
Imagens obtidas ao MEV de amostras de fragmentos de betão da barragem do Alto Rabagão. Os cristais de secção hexagonal deverão corresponder a portlandite (Z9).

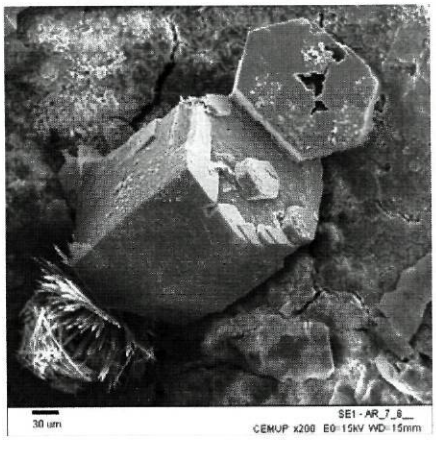






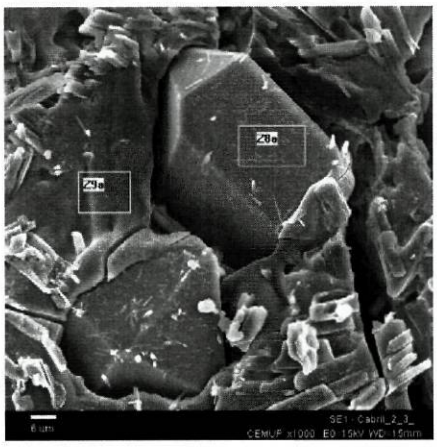

Pioneer_6301F Display - Spectrum5
VFS: 2800
Livetime: 60
Ca
O
Au
C
Au
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_G4
15KeV
Z9



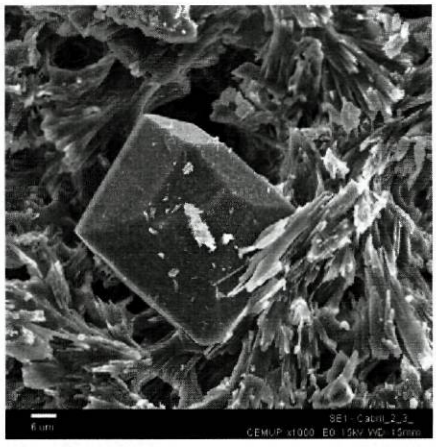


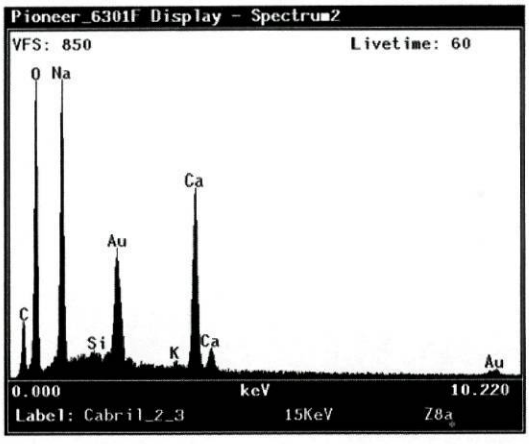
CRISTAIS RICOS EM CÁLCIO E SÓDIO

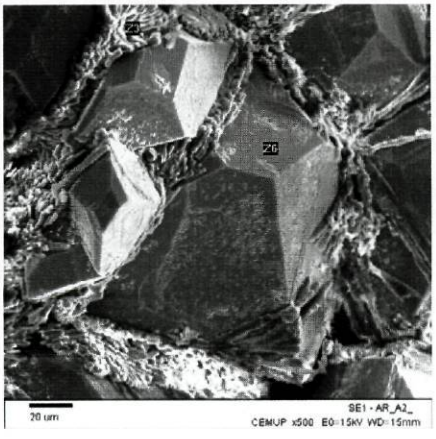
Imagens de cristais compostos predominantemente por cálcio e sódio obtidas por observação ao MEV de amostras de exsudações das barragens do Cabril (I-Z8a) e do Alto Rabagão (II-Z6). Encontram-se associados às imagens os espectros EDS respectivos, com indicação da zona analisada.


Z8a
Z8b

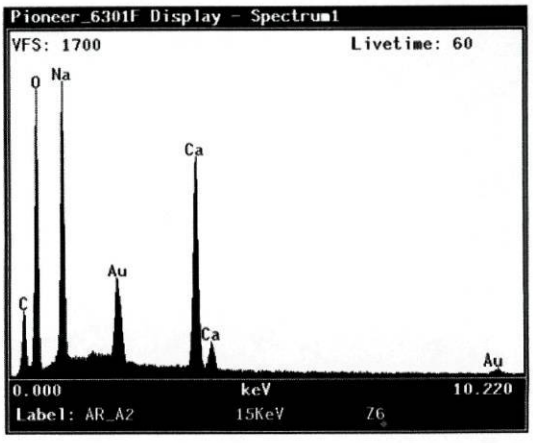
(I)




Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 850
Livetime: 60
O
Na
Ca
Au
C
Si
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_3
15KeV
Z8a


Z6
20 um
SE1 - AR_A2_
CEMUP x500 E0=15kV WD=15mm

(II)

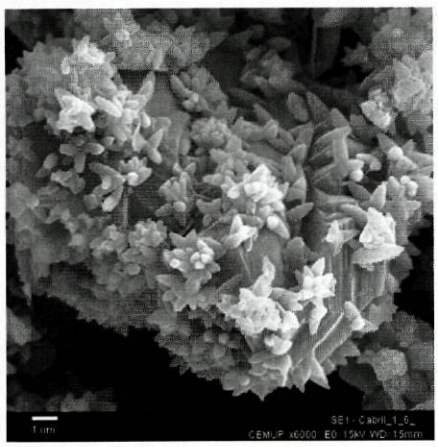

Pioneer_6301F Display - Spectrum1
VFS: 1700
Livetime: 60
O
Na
Ca
Au
C
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: AR_A2
15KeV
Z6

ASPECTOS ENCONTRADOS EM FRAGMENTOS DE BETÃO

Imagens obtidas ao MEV de amostras de betão retiradas das carotes da barragem do Cabril. Encontram-se associados às imagens os espectros EDS respectivos, com indicação da zona analisada:

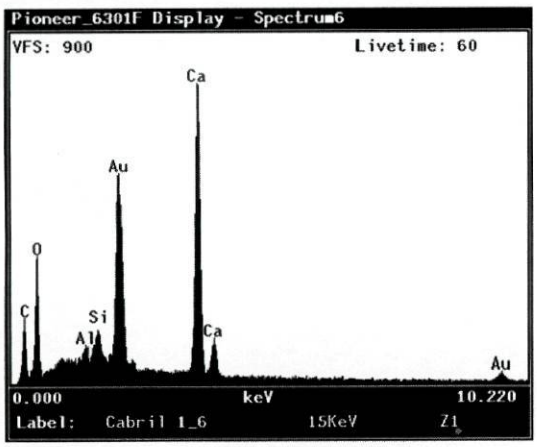
(I) Cristais de carbonato de cálcio sobre pasta de cimento.

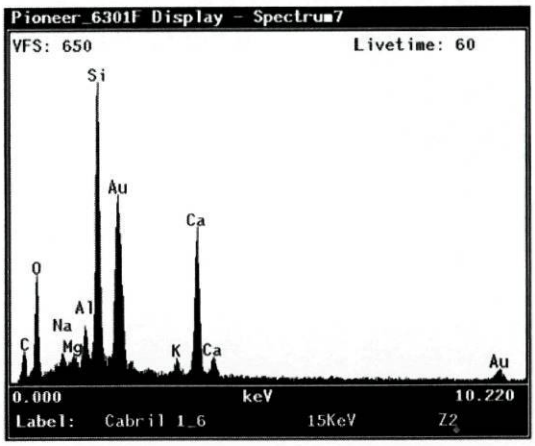
(II) Aspectos de dissolução de um grão de quartzo pertencente ao agregado fino.

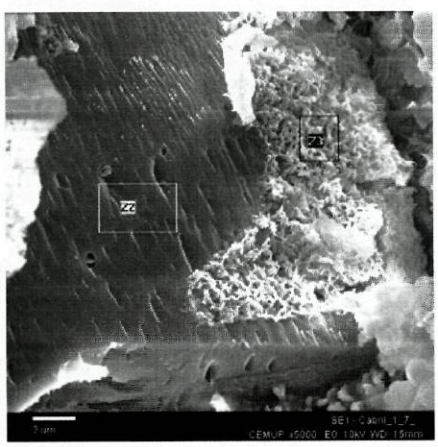



Z1
Z2

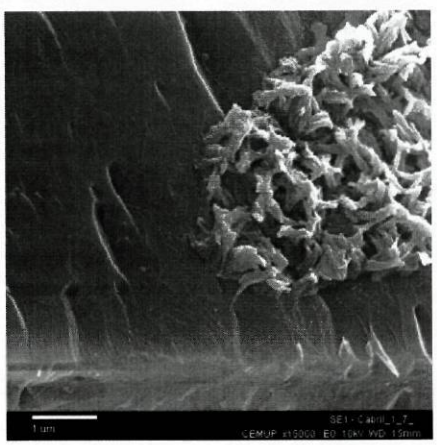
(I)

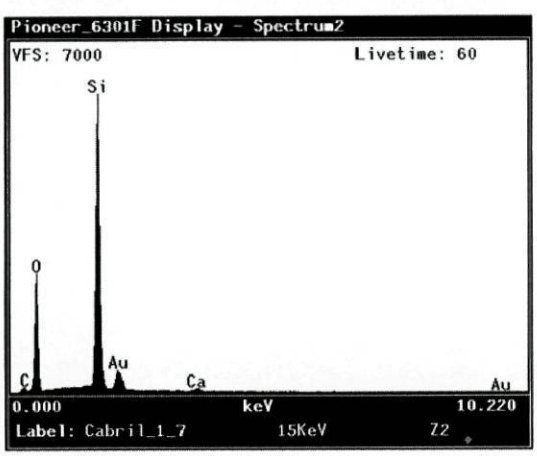

Pioneer_6301F Display - Spectrum6
VFS: 900
Livetime: 60
Ca
Au
O
C
Si
Al
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1_6
15KeV
Z1

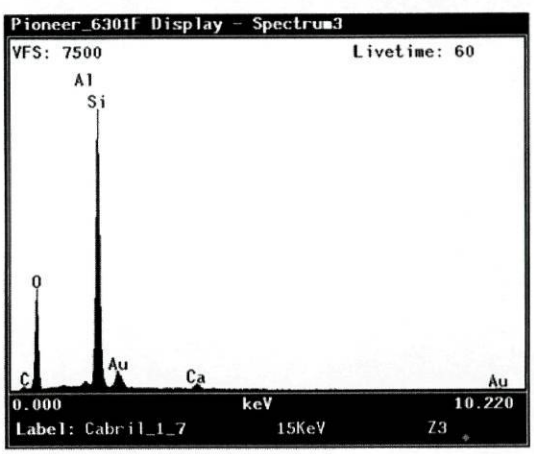

Pioneer_6301F Display - Spectrum7
VFS: 650
Livetime: 60
Si
Au
Ca
O
Al
Na
Mg
C
K
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril 1_6
15KeV
Z2


Z1
Z2

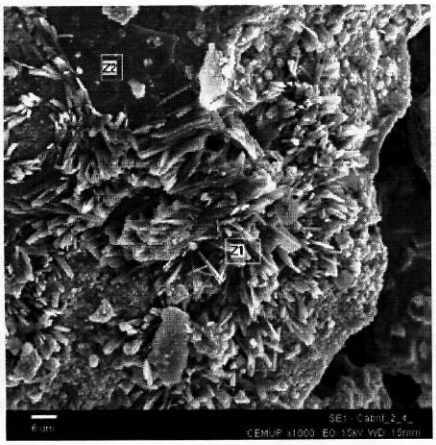
(II)

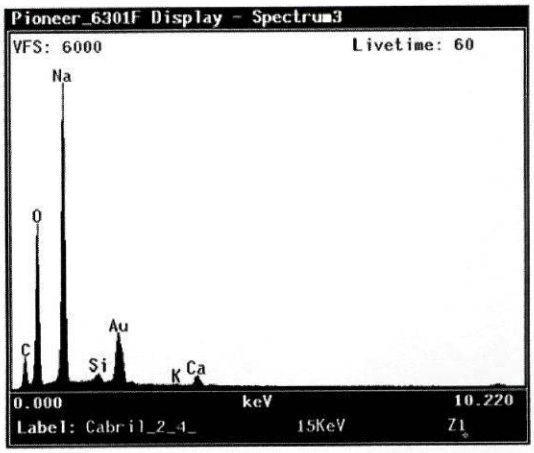


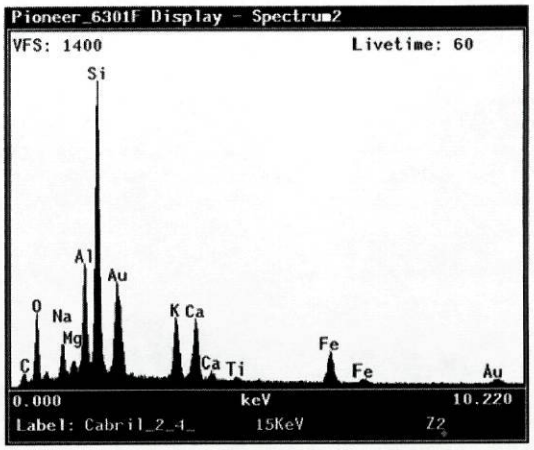

Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 7000
Livetime: 60
Si
O
C
Au
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_1_7
15KeV
Z2

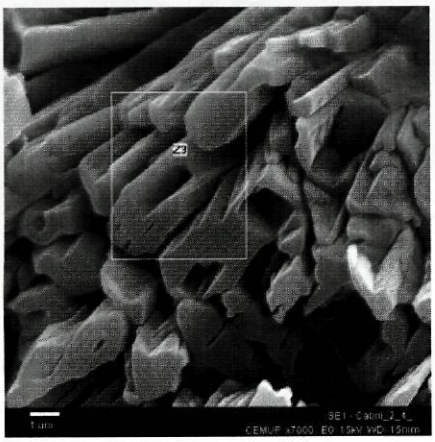

Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 7500
Livetime: 60
Al
Si
O
C
Au
Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_1_7
15KeV
Z3

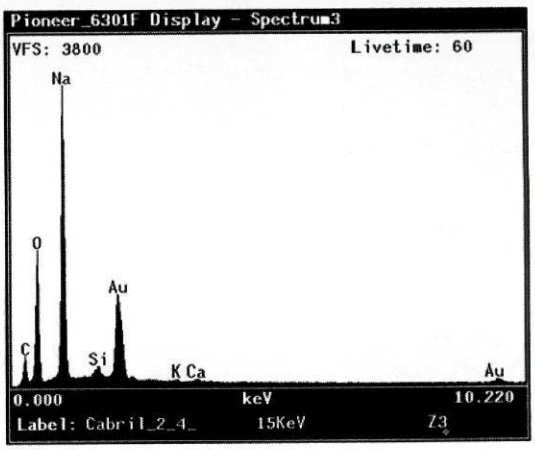
Amostra retirada do betão das carotes da barragem do Cabril mostrando um aspecto da pasta de cimento (Z2) sobre a qual existem abundantes cristais tabulares ricos em sódio (Z1 e Z3).


Z2
Z1


Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 6000
Livetime: 60
Na
O
C
Au
Si
K Ca
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_4_
15KeV
Z1


Pioneer_6301F Display - Spectrum2
VFS: 1400
Livetime: 60
Si
Al
Au
O
Na
Mg
K Ca
C
Ca Ti
Fe
Fe
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_4_
15KeV
Z2


Z3


Pioneer_6301F Display - Spectrum3
VFS: 3800
Livetime: 60
Na
O
Au
C
Si
K Ca
Au
0.000
keV
10.220
Label: Cabril_2_4_
15KeV
Z3