UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

# INVESTIGAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DE CONCRETOS DE UHEs POR REAÇÕES COM OS AGREGADOS

**DANILO GONÇALVES BATISTA**

D0085C13
GOIÂNIA
2013

**DANILO GONÇALVES BATISTA**

# INVESTIGAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DE CONCRETOS DE UHEs POR REAÇÕES COM OS AGREGADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de mestre em engenharia civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Nicole Pagan Hasparyk, Dr[a].

Co-orientadora: Helena Carasek, Dr[a].

D0085C13
GOIÂNIA
2013

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil

# FOLHA DE APROVAÇÃO

## Investigação da Deterioração de Concretos de UHEs por Reações com os Agregados

Danilo Gonçalves Batista

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Prof.ª Dr.ª Nicole Pagan Hasparyk (UFG-Furnas)

Romão

Prof.ª Dr.ª Patrícia de Araújo Romão (GECON/UFG)

Selmo Chapira Kuperman

Prof. Dr. Selmo Chapira Kuperman (DESEK-SP)

Izelman Oliveira da Silva

Prof. Dr. Izelman Oliveira da Silva (PUC-GO)

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico**: **[ X ] Dissertação** **[ ] Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Autor (a): | Danilo Gonçalves Batista | | | | |
| CPF: | 003.658.521-12 | | | | |
| E-mail: | danilogancalves@gmail.com | | | | |
| Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? [x] Sim [ ] Não | | | | | |
| Vínculo empregatício do autor: | Nenhum | | | | |
| Agência de fomento: Campanha Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior | | | | Sigla: | CAPES |
| País: | Brasil | UF: Go | CNPJ: | | |
| Título: | Investigação da deterioração de concretos de UHEs por reações com os agregados | | | | |
| Palavras-chave: | Concreto, Durabilidade, Ataque por sulfatos, Sulfetos, Reação Álcali-agregado. | | | | |
| Título em outra língua: | Investigation of concrete deterioration from HPPs by reactions involving aggregates | | | | |
| Palavras-chave em outra língua: | Concrete, Durability, Sulfate attack, Sulfides, Alkali-aggregate reaction. | | | | |
| Área de concentração: | Construção Civil | | | | |
| Data defesa: (dd/mm/aaaa) | (21/10/2013) | | | | |
| Programa de Pós-Graduação: | Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção civil | | | | |
| Orientador (a): | Drª. Nicole Pagan Hasparyk | | | | |
| E-mail: | nicole@furnas.com.br | | | | |
| Co-orientador (a): | Drª. Helena Carasek | | | | |
| E-mail: | hcarasek@gmail.com | | | | |

**3. Informações de acesso ao documento:**

Liberação para disponibilização?[1] [x] total [ ] parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

[ ] Capítulos. Especifique: _____

[ ] Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Danilo Gonçalves Batista

_____ Data: 21 / 10 / 2013

Assinatura do (a) autor (a)

[1] Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

# AGRADECIMENTOS

É extremamente difícil expressar em poucas palavras meu sincero agradecimento a todos os que colaboraram e auxiliaram para que este trabalho fosse possível de ser realizado; mas, de forma sucinta, reforço os agradecimentos a aqueles que estiveram ligados diretamente e indiretamente a este trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus pela conquista de mais uma etapa de sucesso em minha vida, pois sem ele nada seria possível.

À Glaucia, minha esposa e companheira, pelo incentivo, paciência e pelos vários momentos que deixamos de passar juntos para que fosse possível a concretização deste sonho. Te amo! Obrigado por tudo.

Agradeço também aos meus pais Sebastião e Ana, e a minha irmã Debora pelo incentivo, apoio e compreensão.

Gostaria de deixar meus sinceros agradecimentos à minha orientadora, Drª Nicole Pagan Hasparyk, uma pessoa focada e com grande amor à pesquisa, pelo grande incentivo, contribuições, sugestões, correções, paciência, apreço e amizade, além é claro, do grande conhecimento repassado e pela grande dedicação e empenho a este trabalho.

À Drª Helena Carasek, co-orientadora deste tralho, primeiramente por ter acreditado em mim e me convidado para participar do Projeto ANEEL, além de sua dedicação, apoio concedido, conhecimento repassado, auxílio e grandes contribuições.

Ao Eng. Moacir Alexandre Souza de Andrade, idealizador do projeto de pesquisa da ANEEL a que esta pesquisa está inserida, e ao Eng. Rubens Machado Bittencourt e Ricardo Andre Marques.

Aos funcionários e amigos Centro Tecnológico de Engenharia Civil da Eletrobas Furnas, principalmente a Geóloga Heloisa Helena A. B. da Silva que muito contribuiu com seu conhecimento e apoio técnico, além do Tec. Renato Batista pelo auxílio. Agradeço também ao Tec. Luciano Bernardes, pelo grande auxílio prestado e aos amigos do laboratório de química: Álvaro, Emerson, Ademir, Juliana e Marlei, pessoas que tive o prazer de também trabalhar em tempos anteriores, e que sempre me incentivaram. Aos demais funcionários que também auxiliaram de forma indireta neste trabalho como: Aloísio, Tizo, André, Alício, Luiz Antônio e Fernando.

Quero também agradecer a Márcia Águas pelo auxílio prestado em alguns esclarecimentos, ao Eng. Carlos Dias e ao Técnico Luiz Felipe pelo grande auxílio prestado.

Agradeço também a Inês Bataggin da ABNT, pelo auxílio prestado com relação aos esclarecimentos de dúvidas sobre o projeto de norma da NRB 6118 que se encontra atualmente em consulta nacional, além de esclarecimentos referentes ao módulo de elasticidade do concreto.

À Caroline Siqueira Gomide pelo auxílio nas análises microestruturais de "*Dot Mapping"*, além dos esclarecimentos e colaboração.

Aos membros da banca examinadora: Selmo Kuperman, Patrícia de Araújo Romão e Izelman Oliveira, pela disponibilidade e contribuições a este trabalho.

À Chesf, em nome do Sr. Ruy Barbosa Pinto Junior, Sr. Mair Melo de Andrade e Sr. Aurélio Vasconcelos, por ter permitido a inclusão de três usinas pertencentes ao Complexo de Paulo Afonso neste estudo e, em especial aos funcionários Alberto Jorge e Patrícia Neves pelo auxílio prestado.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil da Eletrobas Furnas, dentro do programa de P&D da ANEEL, pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa ao projeto intitulado de "*Avaliação da Durabilidade e Desempenho de Concretos Preparados com Agregados com Sulfetos*" e ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.

Ao Prof. Dr. Benoit Fournier, da Laval University, Quebec - Canadá, pelos esclarecimentos realizados via e-mail e fornecimento de alguns trabalhos publicados por ele.

Aos colegas de Trabalho do Departamento de Engenharia e Arquitetura da Secretaria Municipal de Saúde da Prefeitura de Goiânia: Henrique, Anrriete, Joice, Gabriela, Max, Sandra, Luiz e, em especial a Elza, pelo apoio e solidariedade prestada.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

A todos meus sinceros agradecimentos,

*Danilo G. Batista.*

# RESUMO

BATISTA, D. G. **Investigação da deterioração de concretos de UHEs por reações com os agregados**. 2013. 309 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2013.

Durante muito tempo as partículas de agregados foram consideradas inertes; entretanto, atualmente esse conceito foi banido. Reações expansivas decorrente da oxidação de minerais sulfetos presentes em agregados e da reação álcali-agregado (RAA) são exemplos de interações químicas potenciais que os agregados podem experimentar quando presentes no concreto, dependendo do meio circundante. A presente pesquisa aborda a investigação de concretos de UHEs com foco na deterioração por reações com os agregados no que tange ao ataque por sulfatos, devido à oxidação de minerais sulfetos, bem como à RAA. Objetiva-se avançar no entendimento do fenômeno de alteração de minerais sulfetos presentes em agregados e verificar a sua influência sobre a durabilidade de concretos, além de verificar as condições e características que maximizam ou não a sinergia desta patologia. Conjuntamente, pretende-se também estudar, nas mesmas estruturas, a possibilidade de ocorrência da RAA. Para tanto, procedeu-se com uma investigação de concretos extraídos de estruturas pertencentes a cinco usinas hidrelétricas brasileiras, a saber: UHE Corumbá, UHE Marechal Mascarenhas de Moraes, UHE Paulo Afonso II, UHE Paulo Afonso IV e UHE Moxotó. Além dos concretos, procedeu-se também com um estudo do material rochoso e dos agregados do entorno das usinas, de mesma origem que os agregados dos concretos. Inicialmente foi realizada criteriosa inspeção visual em campo de algumas estruturas de concreto selecionadas das UHEs, com posterior extração de testemunhos em locais com maior propensão da incidência de alguma reação química. Os testemunhos de concreto foram inicialmente inspecionados em laboratório para a verificação de possíveis anomalias visíveis em suas superfícies, sendo posteriormente submetidos a ensaios laboratoriais para a determinação das propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Foram, na sequência, realizadas análises químicas e microestruturais dos concretos, além da reconstituição de traço e obtenção do pH. Os concretos também foram submetidos a inspeções internas antes das análises microestruturais, sendo estas últimas a microscopia eletrônica de varredura com espectrometria por energia dispersiva de raios X (EDS) e a difração de raios X (DRX), ambas com o objetivo de diagnosticar deterioração. Os agregados extraídos dos concretos juntamente com o material rochoso de mesma origem também foram submetidos a análises químicas e mineralógicas. Pelos resultados, verificou-se boa integridade dos concretos da UHE Corumbá, porém para as demais usinas, constatou-se nos concretos a incidência de RAA, além de ataque por sulfatos, tendo alguns dos concretos das demais usinas indícios de que o ataque por sulfatos é decorrente da oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados.



Palavras Chaves: *Concreto, Durabilidade, Ataque por sulfatos, Sulfetos, Reação Álcali-agregado.*

## ABSTRACT

BATISTA, D. G. **Investigation of concrete deterioration from HPPs by reactions involving aggregates**. 2013. 309 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2013.

A long time ago aggregate particles were considered inert but this concept is no longer adequate. Expansive reactions resulting from the oxidation of sulfide-bearing aggregates and the AAR are examples of potential chemical interactions that aggregates may experience in concrete, depending on the surrounding environment. This research is an investigation into concrete deterioration in Hydroelectric Power Plants (HPPs), focusing on aggregate reactions relating to attack by sulfates, due to oxidation of sulfide minerals, as well as to the alkali-aggregate reaction (AAR). One of the main purposes is to have a clearer understanding of the changes in sulfide minerals occurring in aggregates and verify their influence on concrete durability as well as check the conditions and characteristics that maximize or not the synergy of such pathology. Along with that, another purpose is to study the possibility of the AAR occurring in the same structures. To this end, an investigation of concrete structures extracted from five Brazilian hydroelectric plants, namely Corumbá HPP, Marechal Mascarenhas de Moraes HPP, Paulo Afonso II HPP, Paulo Afonso IV HPP and Moxotó HPP, was conducted. In addition to the concretes, a study of the rocky material and aggregates surrounding the plants that were of the same origin as the aggregates in the concretes was also performed. A thorough visual inspection was made in the field of some concrete structures selected from the HPPs , with the subsequent extraction of concrete cores in spots that were more prone to the incidence of some chemical reaction. The concrete core samples were initially inspected in the laboratory to check for possible visible anomalies on their surfaces, and were subsequently subjected to laboratory tests to determine the mechanical properties such as compressive strength and elasticity modulus. Chemical and microstructural analyses of the concrete were then carried out, in addition to the reconstitution of the mix design and determination of their pH. The concrete were also underwent internal inspections before the microstructural analyses, and the last were scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS) and X-ray diffraction (XRD) in order to diagnose deterioration. Aggregates extracted from concrete cores along with the rocky material of the same origin were also subjected to chemical and mineralogical analyses. The concrete from Corumbá HPP was found to be sound, but in the concretes from the other HPPs it was proved the incidence of AAR and sulfate attack simultaneously, and in some cases, with evidences that the attack by sulfates results from the oxidation of sulfide minerals in the aggregates.


Keywords : *Concrete, Durability, Sulfate attack, Sulfides, Alkali-aggregate reaction.*

# LISTA DE FIGURAS

**Figura 2.1 –** Aspectos da Barragem Rio Descoberto: a) fissura devido à presença de água ácida e de pirita no agregado do concreto, b) execução da parede diafragma (ELC, 2003). ...56

**Figura 2.2 –** Aspectos da Barragem de Graus: a) paramento de jusante com destacamentos e manchamento marrom, b) infiltração no concreto do poço de pêndulo (Moura, 2012).....58

**Figura 2.3 -** Fissuras tipo mapa presentes no bloco de função de uma edificação em Quebec, Canadá (Extraído de RODRIGUES *et al.*, 2012a). .....58

**Figura 2.4 –** Problemas observados em fundações no Canadá: a) abertura de trincas e coloração amarelada; b) fissura mapeada na laje; c) abertura de fissuras d) destacamento na região do agregado (Extraído de RODRIGUES *et al.*, 2012a).....59

**Figura 2.5 –** Consequências verificadas em edificações de Dublin, Irlanda: a) trincas em laje, b) rachaduras em divisórias devido ao solapamento do piso (Extraído de TUOHY, 2012). ...59

**Figura 3.1** – Micrografia de uma rocha vulcânica, onde Pl=plagioclásio; Px=piroxênio; Op=opaco (óxido de ferro); Q=quartzo; K-f=K-feldspato; M=mesóstase. a) amostra de um basalto e, b) amostra de um riolito. Extraído de Tiecher (2010).....68

**Figura 3.2** – Detalhe de um gel exsudado a partir de uma fissura na superfície do concreto da UHE Furnas. Extraído de Hasparyk (2005). .....72

**Figura 3.3** – Classificação segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2008a) da ação preventiva quanto à RAA. Adaptado de Battagin *et al*. (2009). .....75

**Figura 3.4** – Casos de obras que se encontram afetadas pela RAA. Imagem cedida gentilmente por Hasparyk (2011).....79

**Figura 3.5** – Casos do fenômeno deletério da RAA e suas consequências: a) fissuras orientadas verticais em pilar de concreto na tomada d'água - UHE Jaguari, b) desnivelamento entre juntas de trabalho e fissuras na superfície do concreto do vertedor/muro de transição – UHE Furnas (Cedido gentilmente por Hasparyk (2011), cortesia à autora de Selmo Chapira Kuperman, Desek e Furnas). .....80

**Figura 3.6** – Fissuras em forma de mapa no piso da tomada d'água da UHE PA-III. Extraído de Silva (2007). .....80

**Figura 3.7** – Fissuras em bloco de fundação de um edifício com 23 pavimentos, na cidade de Recife-PE. Extraído de Lima (2009).....81

**Figura 3.8** – Pilar da fundação do edifício Solar da Piedade, Recife-PE. Extraído de Silva (2007a).....82

**Figura 3.9** – Bloco de fundação do Edifício Rosita Hardman, em Recife, afetado pela RAA. Extraído de Battagin *et al.* (2009). .....82

**Figura 3.10** – Fissuração observada no bloco de concreto: a) Vista superior; b) Vista lateral. Extraído de Hasparyk *et al*. (2012).....84

**Figura 4.1** - Fluxograma do programa experimental.....89

**Figura 4.2** – Inspeção de campo das estruturas, a) presença de manchas esbranquiçadas na superfície do concreto, b) gel exsudado da RAA. .....91

**Figura 4.3** – Procedimento de extração de testemunho de concreto: a) equipamento de extração e detalhe do furo, pós extração, b) testemunho de concreto extraído. .....92

**Figura 4.4** – Coleta/extração de material rochoso: a) material proveniente de sondagem rotativa realizada na época da construção da UHE Corumbá, b) extração de testemunho de rocha na pedreira explorada na época da construção da UHE Mascarenhas, c) coleta de material rochoso na região do entorno desta UHE Moxotó. .....93

**Figura 4.5** – Inspeção dos testemunhos de concreto: a) topo de um testemunho de concreto, b) lateral do testemunho de concreto indicando material branco neoformado.....94

**Figura 4.6** – Realização do ensaio de resistência à compressão e de módulo de elasticidade no mesmo corpo de prova.....95

**Figura 4.7** – Preparação do testemunho de concreto para a realização da reconstituição de traço: a) separação do agregado e argamassa, b) quebra manual do agregado, c) peneiramento do agregado, d) quarteamento do material. .....96

**Figura 4.8** – Ilustração da determinação do pH da argamassa: a) adição de água deionizada no material em forma de pó, b) mistura do material no Becker com um bastão de vidro, c) medida do pH. .....98

**Figura 4.9** – Ilustração de seções polidas contendo agregado graúdo para análise microscópica de identificação de sulfetos e também para *Dot Mapping*. .....104

**Figura 5.1** – Vista aérea da barragem de concreto da UHE Corumbá. .....115

**Figura 5.2** – Vista frontal da barragem de concreto da UHE Mascarenhas. .....115

**Figura 5.3** – Vista geral das usinas do complexo de Paulo Afonso: a) UHE PA I, II e III; b) vista frontal de Moxotó, c) canal de fuga e enrocamento de PA IV. .....116

**Figura 5.4** – Aspectos observados na inspeção da UHE Corumbá: a) porção inicial da galeria de drenagem da tomada d'água, b) região da galeria do vertedor onde ocorreram as extrações. ..... 120

**Figura 5.5** – Aspectos observados na inspeção da UHE Corumbá: a) lixiviação presente na galeria de drenagem da tomada d'água; b) aspecto da junção viga/parede pré-moldada, com pontos de lixiviação e alguns "escorridos de ferrugem" na região do 5º lance da escada; c) região do 12º lance da escada. ..... 120

**Figura 5.6** – Aspectos observados na inspeção da UHE Mascarenhas: a) presença de gel da RAA na superfície dos concretos da galeria de drenagem da toma d'água – região onde foram extraídos os testemunhos de concreto; b) fissuras tipo mapa existentes na crista da barragem, na região do arco. ..... 122

**Figura 5.7** – Aspectos observados na inspeção da UHE PA II: a) fissuras mapeadas na crista da barragem; b) lixiviação com afloramento de material esbranquiçado e presença de material na cor ferrugem – região onde se extraiu os testemunhos de concreto; c) trinca de aproximadamente três milímetros na superfície da parede de lado de montante do terceiro bloco de concretagem da galeria I. ..... 123

**Figura 5.8** – Inspeção da galeria de drenagem da tomada d'água da UHE PA IV: a) gel da RAA exsudado na parede de montante do corredor da unidade três; b) manchas esbranquiçadas na parede de jusante do corredor da unidade três. ..... 125

**Figura 5.9** – Inspeção da galeria de drenagem do vertedor da UHE PA IV: a) concreto com desagregação superficial; b) presença de material esbranquiçado. ..... 125

**Figura 5.10** – Aspectos observados na inspeção da UHE Moxotó: a) abertura na tampa do gerador de número dois, devido à abertura radial do encaixe do gerado; b) fissuras tipo mapa; c) presença de material pulverulento de coloração amarelada e alguns pontos com material de coloração esbranquiçada, ambas na parede de montante do início da galeria a jusante da casa de máquinas (El. 214,0 m). ..... 126

**Figura 5.11** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE Corumbá: a) aspecto geral do testemunho de concreto; b) agregados com finas bordas e fissuras no agregado. ..... 127

**Figura 5.12** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE Mascarenhas: a) poro totalmente preenchido com material esbranquiçado (C1.CTa); b) poro preenchido com material esbranquiçado de morfologia acicular (C1.CTa). ..... 129

**Figura 5.13** – Inspeção dos testemunhos da UHE Mascarenhas: a) agregado com fissura (C7.CEl.5); b) agregados com fina borda escura e regiões com deposição de material esbranquiçado (C8.CEl.12).....129

**Figura 5.14** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE PA II: a) ocorrência de uma mancha escura, com aparência de umidade, envolvendo um agregado (C2.PAIITa); b) manchas amareladas no corpo do testemunho (C6.PAIITa); c) poro no concreto C5.PAIITa com deposição de material esbranquiçado. .....131

**Figura 5.15** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE PA IV: a) região do testemunho com mancha com aparência de umidade (C2-PAIVTa); b) manchas amarela/marrom ferrugem (C8-PAIVVt); c) poro com deposição de material esbranquiçado (C3-PAIVTa); d) restacamento entre argamassa e agregado (C9-PAIVVt). .....133

**Figura 5.16** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE Moxotó: a) Agregados com fissuras. (C3.MxGD); b) poro totalmente preenchido com material esbranquiçado (C1.MxGD); c) agregado com aparência de oxidação (C5.MxGD), d) mancha na argamassa (C2.MxGD). .....134

**Figura 5.17 -** Comparativo entre as curvas de estimava do módulo de elasticidade pela resistência à compressão do concreto propostas por normas e trabalhos publicados no meio técnico.....139

**Figura 5.18 -** Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE Corumbá: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade. .....142

**Figura 5.19 -** Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade – UHE Corumbá. .....143

**Figura 5.20 -** Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE Mascarenhas: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade. .....144

**Figura 5.21 -** Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade – UHE Mascarenhas. .....145

**Figura 5.22 -** Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE PA II: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade. .....146

**Figura 5.23 -** Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos de PA II. .....147

**Figura 5.24 -** Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE PA IV: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade. .....148

**Figura 5.25 -** Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos ..... 149

**Figura 5.26 -** Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE Moxotó: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade. ..... 150

**Figura 5.27 -** Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos da UHE Moxotó. ..... 151

**Figura 5.28** – Valores de pH determinados para os concretos em estudo. ..... 155

**Figura 5.29** – Teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica dos agregados extraídos dos concretos e dos materiais rochosos coletados. ..... 156

**Figura 5.30** – Teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto. ..... 157

**Figura 5.31** – Teores de enxofre total obtidos por meio de análise por combustão (LECO) das argamassas e agregados extraídos dos testemunhos de concreto. ..... 158

**Figura 5.32** – Correlação dos teores de enxofre entre método químico e por combustão para os agregados extraídos dos testemunhos de concreto. ..... 158

**Figura 5.33** – Correlação dos teores de enxofre entre método químico e por combustão para as argamassas extraídas dos testemunhos de concreto. ..... 159

**Figura 5.34** – a) Visão geral da rocha, destacando a forma irregular e a extinção ondulante fraca do quartzo e pequenas palhetas de mica orientadas em uma direção preferencial (alguns cristais indicados pelas setas) (agregado do testemunho C3.CVt), b) Quartzito formado por grãos alongados de quartzo (1) com extinção ondulante, cimentados por quartzo microcristalino (2) associado com pequenas lamelas de sericita (coloridas) (agregado do testemunho C10.MTa). ..... 171

**Figura 5.35** – a) Vista geral da rocha representane do agregado graúdo (agregado do testemunho C5.PAIITa), b) aspectos gerais do agregado graúdo representado por rochas graníticas composta principalmente de plagioclásio (1), microclínio (2) e quartzo (3) (agregado do testemunho C2.PAIVTa). ..... 171

**Figura 5.36** – a) Visão geral do agregado graúdo representado por uma rocha granítica formada principalmente por plagioclásio (1), microclínio (2) e quartzo (3) com biotita restrita (4), que às vezes está associada com epidoto e allanita (5). (agregado do testemunho C1.MxGD). ..... 172

**Figura 5.37** - Valores médios obtidos no ensaio de expansão e potencialidade por análise petrográfica ..... 175

**Figura 5.38** – Micrografias dos agregados das UHEs Corumbá e Mascarenhas: a) Cristal de pirrotita (Po) com borda de alteração para marcasita (Mc), lamela de exsolução para pentlandita (Ptd) e intercrescido com calcopirita (Cpy) e hematita (Hm) (agregado do testemunho C8.CEl.12), b) fragmentos de pirita (Py) com borda de alteração para limonita (Lm). (agregado do testemunho C5.MTa). ..... 177

**Figura 5.39** - Micrografias dos agregados das UHEs PA II, PA IV e Moxotó: a) fragmento de pirrotita (Po) sendo substituída por material argilolimonítico (Arg/Lm) (agregado do testemunho C1.PAIITa), b) Um cristal de pirrotita (Po) sendo substituída por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cp) (agregado do testemunho C1.PAIVTa), c) um cristal de pirrotita (Po) sendo substituída por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cp) (agregado do testemunho C6.PAIVTa), d) fragmento de pirrotita (Po) com bordas de oxidação para limonita (Lm) (agregado do testemunho C3.MxGD). ..... 177

**Figura 5.40** - Fotomicrografia de um cristal de pirrotita sendo substituída por magnetita (indicação) – UHE PA II (C1.PAIITa). ..... 180

**Figura 5.41** – Cristal da pirrotita destacado na Figura 5.44observado pelo MEV. ..... 180

**Figura 5.42** – Imagem com a identificação dos elementos químicos: a) oxigênio, b) sódio, c) silício, d) enxofre, e) potássio, f) cálcio, g) ferro, h) titânio, i) manganês, j) níquel e k) cobre. ..... 181

**Figura 5.43** – Imagem das fases identificadas por meio do mapeamento químico e as respectivas microanálises: a) sulfeto de ferro e cobre (pirrotita+calcopirita), b) fase argilo-limonítica , c) feldspato plagioclásio, d) magnetita, e) mica muscovita, f) mica biotita. ..... 182

**Figura 5.44** - Fotomicrografia de um fragmento de pirrotita (Po) sendo substituída por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cp) e bornita (Bo) - UHE PA IV (C6-PAIVVt). ..... 184

**Figura 5.45** – Imagem do cristal de pirrotita feita por MEV para o mapeamento químico por EDS. ..... 184

**Figura 5.46** – Imagem da identificação dos elementos químicos: a) sódio, b) magnésio, c) alumínio, d) silício, e) enxofre, f) potássio, g) cálcio, h) titânio, i) ferro, j) níquel e k) cobre. ..... 185

**Figura 5.47** – Imagem das fases identificadas por meio do mapeamento químico: a) sulfeto de ferro (pirrotita), b) magnetita, c) titanita, d) mica ferro-magnesiana, e) mica ferro-magnesiana, f) feldspato plagioclásio (do tipo oligoclásio). ..... 186

**Figura 5.48** – Visualização das argamassas e agregados durante inspeção interna – UHE Corumbá: a) testemunho C3.CVt , b) testemunho C6.CEl.5. (notar argamassa mais esverdeada) ..... 188

**Figura 5.49** – Inspeção interna dos testemunhos da UHE Mascarenhas: a) região da argamassa com poro parcialmente preenchido com material branco, b) agregados com aparência de oxidação, c) agregado com bordas, d) finos cristais aciculares esbranquiçado dentro de um poro na argamassa (foto tirada com emprego de lupa estereoscópica - objetiva 16x). ..... 189

**Figura 5.50** – Inspeção interna dos testemunhos da UHE PA II: a) presença de material vítreo em um poro da argamassa da zona de transição com o agregado, b) agregados com aparência de oxidação. ..... 190

**Figura 5.51** – Inspeção interna dos testemunhos extraídos da tomada d'água da UHE PA IV: a) aspecto geral do concreto, b) presença de material esbranquiçado sobre a argamassa do concreto. ..... 191

**Figura 5.52** – Inspeção interna dos testemunhos extraídos do vertedor da UHE PA IV. a) ocorrência de um agregado oxidado e deposição de material esbranquiçado na argamassa, b) poro totalmente preenchido com material esbranquiçado. ..... 191

**Figura 5.53** – Inspeção interna dos testemunhos da UHE Moxotó. a) bordas brancas envolvendo/recobrindo os agregados e poros preenchidos com material esbranquiçado, b) poro parcialmente preenchido com material esbranquiçado. ..... 192

**Figura 5.54** - Micrografias dos concretos da UHE Corumbá: a) região na pasta do concreto C1.CTa com presença de poros vazios; b) região na pasta do concreto C1.CTa com presença de poros vazios e pulverulência; c) agregado do concreto C7.CEl.5 fragmentado com grãos soltos. ..... 196

**Figura 5.55** - Micrografias dos concretos da UHE Corumbá: a) região localizada do concreto C8.CEl.12 com produtos sugestivos do monossulfato; b) microestrutura da pasta do concreto C3.CVt densa e alguns carbonatos à direita; c) e d) cristais contendo ferro sobre o agregado do concreto C7.CEl.5, indicando alteração mineralógica. ..... 197

**Figura 5.56** – Micrografias dos concretos da UHE Mascarenhas: a) presença de etringita massiva no poro da argamassa do concreto C3.MTa; b) presença de etringita compacta em poro do concreto C3.MTa com fissuras radiais; c) presença de cristais de etringita preenchendo um poro do concreto C10.MTa; d) vista geral da argamassa do concreto C10.MTa apresentando vários poros vazios e preenchidos por cristais de etringita. ..... 199

**Figura 5.57** - Micrografias dos concretos da UHE Mascarenhas: a) presença de produto da RAA sobre superfície de um agregado graúdo do concreto C3.MTa; b) ampliação localizada da micrografia 5.63-a, c) região do concreto C5.MTa com pulverulência localizada. ..... 199

**Figura 5.58** – Espectros de produtos visualizados nos concretos da UHE Mascarenhas: a) espectro da etringita apresentada na Figura 5.56-a; b) espectro do produto sílico-cálcico alcalino da RAA apresentado na Figura 5.57-b. ..... 200

**Figura 5.59** – Micrografias dos concretos da UHE PA II: a) presença de etringita massiva na pasta do concreto C1.PAIITa; b) acículas de etringita dentro de um poro do concreto C1.PAIITa acompanhado de fissuras radiais (setas); c) e d) presença localizada de pulverulência no concreto C2.PAIITa. ..... 202

**Figura 5.60** - Micrografias dos concretos da UHE PA II: a), b) e c) presença de cristais da RAA na pasta da zona de transição com o agregado presentes no concreto C1.PAIITa; d) gel maciço gretado revestindo um poro do concreto C2.PAIITa; e) presença de produto rendado da RAA na zona de transição entre o agregado e a pasta, no concreto C2.PAIITa..... 202

**Figura 5.61** – Espectros de produtos visualizados nos concretos da UHE PA II: a) espectro da etringita visualizada no concreto C1.PAIITa, na região da micrografia 5.59-a; b) espectro característico do produto rendado apresentado em 5.60-e. ..... 203

**Figura 5.62** - Micrografias dos concretos da UHE PA IV: a) presença de acículas de etringita em um poro (C6.PAIVVt); b) presença de acículas de etringita em um poro do concreto C1.PAIVTa; c) cristais de etringita depositados na pasta do concreto C9.PAIVVt; em zona de transição com o agregado; d) fissuras no concreto C10.PAIVVt com cristais de etringita próximo..... 204

**Figura 5.63** - Micrografias dos concretos da UHE PA IV: a) rosáceas da RAA sobre um agregado do concreto C2.PAIVTa; b) rosáceas da RAA na pasta do concreto C2.PAIVTa; c) gel maciço gretado revestindo um poro do concreto C4.PAIVTa; d) gel maciço gretado revestindo um poro do concreto C9.PAIVVt; e) cristais de RAA na pasta do concreto C6.PAIVVt. ..... 205

**Figura 5.64** - Micrografias dos concretos da UHE PA IV: a) pulverulência na pasta e sobre o agregado do concreto C1.PAIVTa; b) pulverulência na pasta do concreto C6.PAIVVt.....206

**Figura 5.65** – Espectros característicos das neoformações observadas nos concretos extraídos da UHE PA IV: a) material sílico-alcalino da RAA, b) etringita. .....206

**Figura 5.66** – Micrografias dos concretos da UHE Moxotó: a) etringita comprimida preenchendo o poro com fissuras radiais no concreto C1.MxGD; b) alguns cristais conglomerados sugestivos de etringita e gel gretado da RAA no concreto C1.MxGD, acompanhado de fissuras. .....207

**Figura 5.67** – Micrografias dos concretos da UHE Moxotó: a) produto sugestivo da trona na borda de um poro (C1.MxGD); b) argamassa do concreto C1.MxGD totalmente fissurada; c) gel maciço gretado no poro (C3.MxGD); d) agregado no concreto (C3.MxGD) totalmente fragmentado; e) cristais da RAA depositados sobre o agregado do concreto C5.MxGD. .....208

**Figura 5.68** – Micrografias e detalhes fotográficos de algumas amostras da UHE Moxotó: a) presença de gel na borda de um poro e rosáceas no seu interior, ambos da RAA; b) foto obtida durante inspeção visual do poro apresentado na micrografia da Figura 5.74-a; c) região do agregado com borda branca indicado gel maciço gretado; d) foto da borda do agregado da Figura 5.74-c. .....209

**Figura 5.69** – Espectros característicos das neoformações observadas nos concretos extraídos da UHE Moxotó: a) espectro sugestivo da trona apresentada na Figura 5.67-a; b) espectro da etringita apresentada na Figura 5.66-a; c) espectro característico de produto da RAA apresentada na Figura 5.67-c. .....209

**Figura 5.70** – Potencial expansão linear dos concretos devido à oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados.....217

# LISTA DE TABELAS

**Tabela 2.1** – Classe de agressividade e recomendações do ACI *Building Code* 318 (ACI, 2008). ..... 50

**Tabela 2.2 -** Requisitos para o concreto exposto a soluções contendo sulfatos. ..... 51

**Tabela 2.3 -** Limites de sulfatos para agregados reciclados empregados em mistura com cimento Portland (Extraído de AGUIAR; SELMO, 2004). ..... 55

**Tabela 2.4 -** Limites preconizados pelas normas brasileiras para os teores de presentes no cimento. ..... 55

**Tabela 5.1a –** Relação das amostras de cada usina e as nomenclaturas adotadas. ..... 113

**Tabela 5.1b –** Relação das amostras de cada usina e as nomenclaturas adotadas. ..... 114

**Tabela 5.2 -** Dados gerais das usinas estudadas. ..... 117

**Tabela 5.3 -** Dados gerais obtidos em levantamento de informações técnicas de cada usina estudada. ..... 118

**Tabela 5.4 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE Corumbá. ..... 128

**Tabela 5.5 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE Mascarenhas. ..... 130

**Tabela 5.6 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE PA II. ..... 131

**Tabela 5.7 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE PA IV. ..... 133

**Tabela 5.8 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE Moxotó. ..... 135

**Tabela 5.9** – Equações para estimativa do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto. ..... 138

**Tabela 5.10 -** Resistência à compressão e módulo de elasticidade - UHE Corumbá. ..... 141

**Tabela 5.11 -** Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos. ..... 144

**Tabela 5.12 -** Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de PA II. . 146

**Tabela 5.13 -** Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de PA IV. ..... 148

**Tabela 5.14 -** Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade. ..... 150

**Tabela 5.15** – Resultados obtidos no ensaio de reconstituição de traço. ..... 153

**Tabela 5.16 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE Corumbá. ..... 160

**Tabela 5.17 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE Mascarenhas. ..... 161

**Tabela 5.18 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE PA II..... 162

**Tabela 5.19 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE PA IV. ..... 162

**Tabela 5.20 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE Moxotó..... 163

**Tabela 5.21 -** Relação dos limites máximos obtidos na literatura. ..... 165

**Tabela 5.22 -** Relação dos teores de compostos sulfatados obtidos para os materiais referentes às **UHEs Corumbá e Mascarenhas** e limites extrapolados..... 166

**Tabela 5.23 -** Relação dos teores de compostos sulfatados obtidos para os materiais referentes às **UHEs PA II, PA IV e Moxotó** e limites extrapolados. ..... 167

**Tabela 2.24 –** Resumo das análises dos agregados e materiais rochosos provenientes das UHEs Corumbá e Mascarenhas..... 169

**Tabela 2.25 –** Resumo das análises dos agregados e materiais rochosos das UHEs PA II, II e Moxotó ..... 170

**Tabela 5.26 –** Resumo das análises petrográficas mineralógicas. ..... 173

**Tabela 5.27** – Valores médios de expansão acelerada obtidas nas barras de argamassa..... 174

**Tabela 5.28 –** Resumo da análise qualitativa dos minerais sulfetos. ..... 176

**Tabela 5.29** – Resumo das fases identificadas nas argamassas por difração de raios X. ..... 193

**Tabela 5.30** – Resumo dos produtos e das características observados nos concretos por MEV/EDS..... 195

**Tabela 5.31** – Valores obtidos para o cálculo da potencial expansão volumétrica primária dos concretos com a pirrotita como principal sulfeto presente nos agregados. ..... 211

**Tabela 5.32 -** Quantidade de moles de monossulfato presente em um metro cúbico de concreto. ..... 212

**Tabela 5.33** – Valores obtidos no cálculo da potencial expansão volumétrica secundária do concreto devido à oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados. ..... 213

**Tabela 5.34 -** Expansão volumétrica potencial total no concreto devido à oxidação dos minerais sulfetos e formação de etringita secundária. ..... 213

**Tabela 5.35 -** Expansão total volumétrica no concreto devido à oxidação dos minerais sulfetos e formação de etringita secundária. ..... 214

**Tabela 5.36** – Deformação longitudinal dos concretos. ..... 216

**Tabela 5.37** – Cálculo da elevação adiabática estimada dos concretos analisados. ..... 219

**Tabela 5.38** – Cálculo estimativo das temperaturas atingidas pelos concretos analisados em função da temperatura do ambiente e da temperatura na hidratação. ..... 219

**Tabela 5.39** – Síntese geral dos resultados obtidos para os concretos extraídos das UHEs estudadas. ..... 222

# LISTA DE PRODUTOS QUÍMICOS

Ácido sulfídrico: $H_2S$
Ácido sulfúrico: $H_2SO_4$
Aluminatos de cálcio hidratados: $C_4AH_{13}$ ou $C_2AH_8$ ou $C_3AH_6$
Calcopirita: $CuFeS_2$
Calcosina: $Cu_2S$
Carbonato de cálcio: $CaCO_3$
Dióxido de carbono: $CO_2$
Etringita ou trissulfoaluminato de cálcio hidratado: $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$
Galena: PbS
Gás sulfídrico: $H_2S$
Gipsita: $CaSO_4.H_2O$
Goetita: $\alpha$-FeO(OH)
Hematita: $Fe_2O_3$
Hidroglauberita: $Na_{10}Ca_3(SO_4)_8 6H_2O$
Hidróxido de cálcio: $Ca(OH)_2$
Hidróxido de ferro: $Fe(OH)_3$
Hisingerita: $Fe_3^{+2}$ Si2O5 $(OH)_4 \cdot 2\ H_2O$
Jarosita: $K_2Fe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$
Limonita: $FeO(OH).nH_2O$
Lepdocrocita: $\gamma$FeO(OH)
Magnetita: $Fe_3O_4$
Marcassita: $FeS_2$
Mateucita: $NaHSO_4 \bullet H_2O$
Monossulfato ou Monossulfoaluminato de cálcio hidratado: CaO.Al2O3.CaSO4.18H2O
Pirita: $FeS_2$
Pirrotita: $Fe_{1-x}S$ (estequiometria utilizada nos cálculos deste trabalho: $Fe_7S_8$)
Pitticita: Fe,$SO_4$,$AsO_4$, $H_2O$
Silicato de cálcio hidratado: C-S-H
Taumasita: $CaSiO_3.CaCO_3.CaSO_4.15H_2O$
Trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou etringita: $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$
Trona (carbonato de sódio): $Na_3HCO_3CO_3 \cdot 2H_2O$
Trioxido de enxofre: $SO_3$
Yelimita: $Ca_4Al_6O_{12}(SO_4)$

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*AFm*: designação dada aos produtos estruturalmente similares ao monossulfoaluminato de cálcio hidratado, podendo possuir composição química variável.
*AFt*: designação dada aos produtos estruturalmente similares ao trissulfoaluminato de cálcio (etringita), podendo possuir composição química variável e conter óxido de ferro em suas estruturas.
BL: Bloco de concretagem.
BSE: elétrons retroespalhados.
C:Testemunhos de concreto.
Cp: Corpo de prova.
Cpy: calcopirita.
CH: hidróxido de cálcio.
C-S-H: silicato de cálcio hidratado.
DRX: difração de raios X.
Eci: Módulo de elasticidade tangente inicial.
Eco: Módulo cordal de elasticidade equivalente a 2,15 x $10^4$ MPa.
El.5: Galeria do muro central situada no 5º lance da escada da UHE Corumbá.
El.12: Galeria do muro central situada no 12º lance da escada da UHE Corumbá.
*fc*: Resistência média à compressão do cimento aos 28 dias de ensaio.
*fcm*: Resistência média do concreto.
*fcmo*: Coeficiente de minoração do *fcm* equivalente a 10 MPa.
*fck*: Resistência característica do concreto aos 28 dias de ensaio.
GD: Galeria de drenagem.
Hm: hematita.
Lm: limonita.
M: Usina Hidroelétrica Marechal Mascarenhas de Moraes.
Mx: Usina Hidroelétrica de Apolônio Sales, mais conhecida por Moxotó.
MxGD: Galeria de drenagem situada à jusante da casa de máquinas. Esta galeria pertencente à UHE Moxotó e é conhecida localmente como “galeria dos cabos” e situa-se na elevação 214 m.
Mc: marcassita.
MEV: microscopia eletrônica de varredura.
PAII: Usina Hidroelétrica de Paulo Afonso II.
PAIV: Usina Hidroelétrica de Paulo Afonso IV.
PI: Potencialmente Inócuo.
Py: pirita.
Po: pirrotita.
PR: Potencialmente Reativo.
RAA: reação álcali-agregado.
RAC: reação álcali-carbonato.
RAS: reação álcali-sílica.
R: material rochoso coletado no entorno da usina e de mesma origem que o agregado empregado na confecção dos concretos.
Ta: Galeria de drenagem situada nas estruturas da tomada d’água.
Vt: Galeria de drenagem situada nas estruturas do vertedor.
$x_e$: Coeficiente de adequação do módulo de elasticidade em função do litotipo do agregado.
W: massa específica do concreto, expressa em kg/m³.

# SUMÁRIO

**CAPÍTULO 1** ..... **28**

**INTRODUÇÃO** ..... **28**

**1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA** ..... 28

**1.2 OBJETIVOS** ..... 30

1.2.1 Objetivo geral ..... 30

1.2.2 Objetivos específicos ..... 30

**1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO** ..... 31

**CAPÍTULO 2** ..... 32

**DETERIORAÇÃO DO CONCRETO POR ATAQUE DECORRENTE DE SULFATOS E SULFETOS** ..... 32

**2.1 INTRODUÇÃO** ..... 32

**2.2 FONTES DE AGENTES AGRESSIVOS** ..... 33

**2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O ATAQUE POR SULFATOS** ..... 34

**2.4 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO INERENTES AO ATAQUE POR SULFATOS** ..... 37

2.4.1 Ataque clássico ..... 37

2.4.2 Ataque com formação de etringita tardia (DEF) ..... 38

4.4.3 Ataque com formação de taumasita ..... 39

**2.5 ATAQUE DECORRENTE DE OXIDAÇÃO DE MINERAIS SULFETOS PRESENTES EM AGREGADOS** ..... 40

2.5.1 Generalidades ..... 40

2.5.2 Características dos minerais sulfetos ..... 42

2.5.3 Variedades de minerais sulfetos ..... 44

2.5.4 Química do processo de oxidação de sulfetos ..... 46

**2.6 MEDIDAS PREVENTIVAS** ..... 49

**2.7 LIMITES PARA OS COMPOSTOS DE ENXOFRE NO CONCRETO** ..... 51

**2.8 CASOS DE ATAQUE** ..... 56

**CAPÍTULO 3** ..... 61

**DETERIORAÇÃO DO CONCRETO PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO** ..... 61

**3.1 INTRODUÇÃO** ..... 61

**3.2 MINERAIS E AGREGADOS REATIVOS** ..... 65

**3.3 ASPECTOS QUÍMICOS E MECANISMOS DE EXPANSÃO** ..... 71

**3.4 MEDIDAS MITIGADORAS DA RAA** ..... 74

**3.5 CASOS DE RAA** ..... 78

**3.6 OUTROS ATAQUES COMBINADOS** ..... 82

**CAPÍTULO 4** ..... 85

**PROGRAMA EXPERIMENTAL** ..... 85

**4.1 PANORAMA GERAL** ..... 85

**4.2 SELEÇÃO DAs UHE$_s$ E LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES TÉCNICAS** ..... 90

**4.3 INSPEÇÃO IN LOCO, EXTRAÇÃO DOS TESTEMUNHOS E INSPEÇÃO APÓS A EXTRAÇÃO** ..... 90

4.3.1 Inspeção "*in loco*" ..... 90

4.3.2. Extração dos testemunhos de concreto e coleta de amostra de rocha ..... 91

4.3.3 Inspeção dos testemunhos após a extração ..... 93

**4.4 ENSAIOS MECÂNICOS** ..... 94

**4.5 ANÁLISES QUÍMICAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS** ..... 95

4.5.1 Reconstituição de traço ..... 95

4.5.2 Determinação do pH ..... 98

**4.6 ANÁLISES PARA A QUANTIFICAÇÃO DE ENXOFRE DAS ROCHAS, AGREGADOS E ARGAMASSAS DOS CONCRETOS** ..... 99

4.6.1 Análise química gravimétrica ..... 99

4.6.2 Análise por combustão - LECO ..... 99

**4.7 AVALIAÇÃO DOS TEORES DE ENXOFRE EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE CONCRETO** ..... 100

**4.8 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS** ..... 101

**4.9 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS FRENTE À RAA** ..... 101

4.9.1 Análise microscópica para a investigação de minerais reativos ..... 102

4.9.2 Ensaio de expansão para avaliar a reatividade ..... 102

**4.10 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS EM RELAÇÃO AOS SULFETOS** ..... 102

4.10.1 Análise microscópica para a investigação de sulfetos ..... 103

4.10.2 Mapeamento químico por espectrometria por energia dispersiva de raios X acoplada ao microscópio eletrônico de varredura ..... 103

**4.11 ANÁLISES VISUAIS E MICROESTRUTURAIS DOS CONCRETOS** ..... 104

4.11.1 Inspeção visual preliminar antes das análises ..... 105

4.11.2 Análise por difração de raios X ..... 105

4.11.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura ..... 106

**4.12 ANÁLISE DO POTENCIAL DE EXPANSÃO DOS CONCRETOS DEVIDO À OXIDAÇÃO DE MINERAIS SULFETOS** ..... 107

4.12.1 Cálculo da expansão primária ..... 108

4.12.2 Cálculo da expansão secundária ..... 108

**4.13 ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DEF** ..... 107

**CAPÍTULO 5** ..... 113

**RESULTADOS E DISCUSSÃO** ..... 113

**5.1 GENERALIDADES** ..... 113

**5.2 SELEÇÃO DAS USINAS E LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES TÉCNICAS** ..... 114

**5.3 INSPEÇÃO IN LOCO, EXTRAÇÃO DOS TESTEMUNHOS E INSPEÇÃO APÓS EXTRAÇÃO.** ..... 119

5.3.1 Inspeção "*in loco*" das estruturas de concreto e extração dos testemunhos de concreto ..... 119

5.3.1.1 UHE Corumbá ..... 119

5.3.1.2 UHE Mascarenhas ..... 121

5.3.1.3 UHE PA II ..... 122

5.3.1.4 UHE PA IV ..... 123

5.3.1.5 UHE Moxotó ..... 125

5.3.3 Inspeção dos testemunhos de concreto após a extração ..... 126

5.3.3.1 UHE Corumbá ..... 126

5.3.3.2 UHE Mascarenhas ..... 128

5.3.3.3 UHE Paulo Afonso II ..... 130

5.3.3.4 UHE Paulo Afonso IV ..... 132

5.3.3.5 UHE Apolônio Sales (Moxotó) ..... 134

**5.4 ENSAIOS MECÂNICOS** ..... 135

**5.5 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS** ..... 152

5.5.1 Reconstituição de traço ..... 152

5.5.2 Determinação do pH ..... 154

**5.6 QUANTIFICAÇÃO DE ENXOFRE DAS ROCHAS, AGREGADOS E ARGAMASSAS DOS CONCRETOS** ..... 156

5.6.1 Análise química gravimétrica ..... 156

5.6.2 Análise por combustão - LECO ..... 157

5.6.3 Correlação entre análise química gravimétrica e LECO ..... 158

**5.7 AVALIAÇÃO DOS TEORES DE ENXOFRE EM RELAÇÃO AO TRAÇO DOS CONCRETOS** ..... 159

5.7.1 Teores de enxofre em relação ao traço de concreto ..... 160

5.7.2 Confronto dos teores de enxofre obtidos com os limites preconizados no meio técnico ..... 164

**5.8 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS** ..... 168

**5.9 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS FRENTE À RAA** 172

5.9.1 Análise microscópica para a investigação de minerais reativos ..... 172

5.9.2 Ensaio de expansão para avaliar a reatividade ..... 174

**5.10 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS EM RELAÇÃO AOS SULFETOS** ..... 175

5.10.1 Análise microscópica para a investigação de sulfetos ..... 175

5.10.2 Mapeamento químico por microscopia eletrônica de varredura e espectrometria por energia dispersiva de raios X (EDS) ..... 179

**5.11 CARACTERÍSTICAS VISUAIS E MICROESTRUTURAIS DOS CONCRETOS** ..... 187

5.11.1 Inspeção visual preliminar ..... 187
5.11.2 Análise por difração de raios X ..... 192
5.11.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura ..... 194
**5.12 ANÁLISE DO POTENCIAL DE EXPANSÃO DOS CONCRETOS DEVIDO À OXIDAÇÃO DE MINERAIS SULFETOS PRESENTES NOS AGREGADOS** ..... 210
**5.13 ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DEF** ..... 218
**5.14 DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS** ..... 220
**CAPÍTULO 6** ..... 229
**CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS** ..... 229
**6.1 CONCLUSÕES** ..... 229
**6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS** ..... 232
**6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS** ..... 233
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... 235
**APÊNDICES** ..... 247
**ANEXOS** ..... 296

# CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Existem vários fenômenos patológicos que podem afetar o desempenho e a durabilidade das estruturas de concreto. Dentre eles destacam-se os fenômenos químicos, causados por reações deletérias indesejáveis, que podem levar à intensa degradação do concreto com a consequente inutilização da estrutura. As reações mencionadas podem ser desencadeadas ou iniciadas em virtude de algum desequilíbrio entre os constituintes do concreto, que podem ocasionar uma interação deletéria.

Algumas características intrínsecas dos agregados empregados na produção de concreto, como a sua constituição mineralógica, podem favorecer ou mesmo causar reações químicas. Os produtos neoformados a partir dessas reações podem ocasionar expansões internas no concreto que conduzem a fissurações, além de possibilitar a perda de resistência, a redução do módulo de elasticidade e causar comprometimento estrutural. Dentre as reações químicas podem ser citadas a reação álcali-agregado e o ataque por sulfatos originado pela oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados.

Inúmeras estruturas de concreto já foram alvo de ataques ou ainda encontram-se em estágios de séria degradação química por processos de reação álcali-agregado (RAA) ou de oxidação de minerais sulfetos. Dentro da mineralogia dos agregados, onde há grande preocupação para os profissionais do campo da construção de obras de concreto, encontram-se os minerais reativos e os minerais sulfetos. A deterioração do concreto pela ação dos sulfetos pode desencadear um específico ataque por sulfatos, entre outras reações paralelas, que podem comprometer de forma irreversível a estabilidade estrutural das peças de concreto, armado ou não. Os procedimentos de reparo e a contenção das manifestações patológicas mencionadas ainda não são totalmente de domínio do meio técnico e os custos envolvidos nesses serviços são elevados, o que pode tornar inviável uma recuperação; há também casos onde a estrutura teve que ser parcialmente ou totalmente demolida (HASPARYK, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2012; TUOHY, 2012).

Em relação aos estudos nacionais sobre a alteração de minerais portadores de sulfetos presentes em agregados utilizados na preparação do concreto, há no meio técnico poucas pesquisas científicas que tratam sobre este tema e muitos conceitos ou entendimentos são controversos, ao contrário da reação álcali-agregado.

Várias publicações científicas disponíveis (AGUADO *et al*., 1996; HASPARYK *et al.*, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2008; GOMIDES, 2008; SCHMIDT *et al*., 2011; DUCHESNE; FOURNIER, 2011, RODRIGUES *et al.*, 2012a, b; OLIVEIRA, 2011; TUOHY, 2012; MOURA, 2012) relatam ocorrências de degradação química do concreto oriundas do ataque por sulfatos ou decorrente de oxidação de minerais sulfetos, demonstrando o quão severo pode ser esta patologia.

Concernente à manifestação da reação álcali-agregado, do tipo álcali-sílica, grandes preocupações são destacadas por pesquisadores, e a gravidade e a dificuldade de combate dessa reação podem ser observadas por meio de várias publicações (PAULON, 1981; KIHARA, 1986; BATIC *et al*., 1994; PREZZI *et al.*, 1997; BARBORAK, 2004; HASPARYK, 2005; HASPARYK *et al.*, 2006; FOLLIARD *et al.*, 2006; SILVA, 2007; COUTO, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2008; CÂNDIDO, 2009; SILVA, 2009; HASPARYK, 2011; REZENDE *et al.*, 2013).

Obras de grande porte como usinas hidrelétricas impactam de forma significativa no meio ambiente e na população. Assim é necessário que o empreendimento ao ser executado lhe seja assegurando a durabilidade e o bom desempenho das estruturas de concreto. Para isto, é de fundamental importância conhecimento sobre os mecanismos que propiciam o desencadeamento de manifestações patológicas que podem impactar negativamente o empreendimento, como é o caso da degradação química do concreto devido ao processo de oxidação de minerais sulfetos presentes em agregados ou ataque por substâncias nocivas como os sulfatos e também a RAA.

Diante do exposto, o presente trabalho aborda, especificamente, a deterioração do concreto decorrente de reações envolvendo os agregados, focando na temática na durabilidade de estruturas de concreto e análise das características e do desempenho de concretos de algumas estruturas pertencentes a usinas hidrelétricas brasileiras relacionadas à sua degradação química frente a reações expansivas como a RAA e o ataque por sulfatos causado pela oxidação dos sulfetos. Esta pesquisa está inserida dentro do projeto de P&D ANEEL da

Eletrobras Furnas intitulado "*Avaliação da Durabilidade e Desempenho de Concretos Preparados com Agregados Contendo Sulfetos Utilizados em Estruturas de UHE's*", que trata de uma pesquisa mais ampla, tendo a participação da Funape/UFG.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral investigar a ocorrência de degradação química em concretos extraídos de estruturas hidráulicas pertencentes a cinco usinas hidrelétricas (UHEs) brasileiras em operação, a saber: UHE Corumbá, UHE Marechal Mascarenhas de Moraes, UHE Paulo Afonso II, UHE Paulo Afonso IV e UHE Moxotó. Foi dado ênfase nas patologias oriundas de reações químicas envolvendo os agregados dos concretos, sendo investigado o comportamento de minerais sulfetos, quando presentes, de forma a avançar no entendimento do fenômeno de alteração destes minerais, por meio do emprego de vários métodos de análises e ensaios e, em paralelo, investigando-se também a possibilidade de ocorrência da RAA, de forma a identificar as possíveis causas do desenvolvimento das patologias, quando existentes.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta pesquisa, têm-se:

- Verificar a existência de minerais sulfetos e suas alterações, bem como minerais potencialmente reativos para a RAA nos agregados de forma a auxiliar na identificação da origem da deterioração, quando presente;
- Correlacionar as propriedades mecânicas dos concretos com as estimativas e verificar a influência do comportamento apresentado diante de ocorrências de deterioração;
- Verificar o potencial de expansão dos concretos devido à oxidação de minerais sulfetos quando presentes nos agregados;
- Confrontar parâmetros envolvendo o enxofre presentes nos concretos com os limites encontrados na literatura de forma a avaliar o potencial deletério aos concretos.

- Diagnosticar a existência de fenômenos químicos patológicos a partir de neoformações nos concretos a nível visual e microestrutural.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

Neste primeiro capítulo é apresentada uma introdução da presente pesquisa sobre a importância e a relevância do tema estudado, com os objetivos e a estrutura da dissertação.

O segundo e terceiro capítulo constituem uma revisão da literatura, sendo abordados no segundo capítulo os principais aspectos do ataque promovido por substâncias sulfatadas, com maior enfoque na temática da oxidação de minerais sulfetos, assim como as particularidades desses minerais, fazendo uma abordagem geral do assunto, incluindo os fundamentos do processo de oxidação desses minerais e a interferência dessa ocorrência na durabilidade dos concretos, quando estes possuem agregados portadores de sulfetos. No terceiro capítulo são apresentados os principais aspectos da RAA, com maior enfoque na mineralogia e nos aspectos dos agregados que contribuem com a deterioração do concreto por esta patologia, além de uma abordagem da sua ocorrência em estruturas de concreto.

O programa experimental está detalhado no quarto capítulo, onde são descritos: o planejamento dos experimentos; as usinas hidrelétricas estudadas nesta pesquisa; os materiais coletados e extraídos; além das descrições dos ensaios e das análises realizadas.

O Capítulo 5 contêm a apresentação, análise e discussão dos resultados, fazendo sempre que possível confronto com a literatura.

Por fim, apresentam-se no Capítulo 6 as conclusões e as considerações finais, além de sugestões para futuras pesquisas.

# CAPÍTULO 2

# DETERIORAÇÃO DO CONCRETO POR ATAQUE DECORRENTE DE SULFATOS E SULFETOS

## 2.1 INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto está pautada na interação entre as fases provenientes da hidratação do cimento Portland e/ou da solução presente em seus poros com os demais materiais integrantes do concreto ou com o ambiente no qual a estrutura está inserida. Desta forma, o concreto é suscetível a vários tipos de degradação química em decorrência de reações como, por exemplo, a reação álcali-agregado e o ataque por sulfatos, que podem conduzir a grandes impactos na integridade e estabilidade de estruturas de concreto.

A durabilidade das estruturas de concreto está cada vez mais presente em discussões do meio técnico, e neste contexto, a degradação química do concreto oriunda de ataque por sulfatos ou decorrente de oxidação de minerais sulfetos vem ganhando relevância, principalmente em virtude dos diversos casos já relatados de deterioração do concreto (AGUADO *et al*., 1996; HASPARYK *et al.*, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2008; RODRIGUES *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2013); conforme já ocorreu no caso da reação álcali-agregado – RAA (HASPARYK, 2010).

Os primeiros experimentos que auxiliaram no descobrimento do ataque por sulfatos foram os de Vicat, onde foi observado que argamassas hidráulicas em contato com água do mar se deterioravam em virtude de expansões e publicou em 1856 que a transformação da cal em gipsita era a responsável por aquela degradação (COUTINHO, 1997). Já no final do século 19, Candlot descobriu os sulfoaluminatos, entre outros compostos, enquanto realizava ensaios relacionados à ação dos principais sais existentes na água do mar sobre o cimento hidratado. Candlot, na tentativa de descobrir a proporção de gipsita na mistura que produzia fissuras nas amostras de argamassas colocadas em água doce, observou que as alterações produzidas dependiam do teor de alumina e do óxido de cálcio presentes no cimento (BOGUE, 1955).

A fórmula do sulfatoaluminato de cálcio hidratado ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) foi determinada com precisão por Deval e o ataque por sulfatos foi observado pela primeira vez por Candlot, em 1887, em argamassas dos fortes de Paris construídos sobre terrenos gipsíferos (DIVET[2], 2001 *apud* NEVES, 2010).

O ataque decorrente de íons sulfatos está associado a fenômenos ligados às reações endógenas de caráter expansivo e geralmente deletérias aos concretos e argamassas. Desta forma, apresentam-se neste capítulo as principais características e peculiaridades deste tipo de ataque ao concreto.

## 2.2 FONTES DE AGENTES AGRESSIVOS

Os fenômenos de degradação química do concreto causados por reações envolvendo compostos à base de enxofre podem estar associados aos agregados ou cimentos empregados na produção do concreto ou ao ingresso de soluções sulfatadas no interior da matriz cimentícia, ou até mesmo a conversão dos compostos sulfatados presentes na pasta cimentícia ao longo do tempo. Desta forma, pertinente ao ataque por sulfatos, a fonte de íons sulfatos pode ser tanto externa quanto interna.

Com relação às fontes externas, a presença do elemento agressor pode ocorrer principalmente em águas sulfatadas contaminadas e em solos com teores elevados de sais de sulfatos. Contaminações decorrentes de contatos com maciços rochosos com inclusões de minerais sulfetos ou águas de superfície provenientes do contato com esses maciços também podem atuar como fontes externas de tais íons danosos ao concreto (TAYLOR, 1997; HASPARYK *et al.*, 2002; BRE *Digest* 1, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Relativo às fontes internas, têm-se as possíveis contaminações advindas dos próprios constituintes dos concretos, onde os materiais empregados na sua produção podem estar contaminados ou possuírem em sua matriz compostos deletérios que possam atuar como fontes internas. Exemplo deste tipo de contaminação é o caso particular de agregados com presença de gipsita ou minerais sulfetos, estes últimos que podem se oxidar, tornando-se assim potenciais fontes internas de íons sulfatos (HASPARYK *et al.*, 2005). Pelo exposto,

[2] Divet, L. **Les reactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanisme de la formation différée de l'ettringite**, Études et recherches des Laboratoire des Ponts et Chaussées, nº 40, 2002.

verifica-se que a qualidade e as características dos materiais que compõem os concretos influenciam na durabilidade das estruturas de concreto.

Os íons sulfato gerados em função do ingresso de umidade e oxigênio na rocha de fundação ou no maciço rochoso em contato com a estrutura de concreto podem penetrar no concreto por capilaridade e/ou absorção e reagir com a portlandita e com o aluminato tricálcico hidratado, acarretando assim na formação de produtos expansivos, como a etringita e a gipsita (PEREIRA, 2008).

Desta forma, não apenas a presença de minerais potencialmente reativos para a RAA, mas também destaque especial deve ser dado ao processo de oxidação dos minerais sulfetos presentes em maciços rochosos, em função da produção de íons sulfatos. Caso o processo ocorra na natureza, diretamente nos sítios geológicos, pode-se desencadear a denominada "drenagem ácida de rocha" (*Acid Rock Drainage*) ou "drenagem ácida de mina", conduzindo assim em uma possível fonte externa (FARFAN *et al*., 2004[3] *apud* LIMA, 2009), ou caso aconteça após o processamento da rocha e emprego desta como agregados para concreto, tem-se uma potencial fonte interna.

Percebe-se que agregados portadores de sulfeto podem tornar-se uma fonte de agentes nocivos ao concreto em decorrência da liberação de íons sulfatos (HASPARYK *et al.*, 2003). Conforme citam Pereira (2008) e Lima (2009), rochas caracterizadas morfologicamente com a presença de sulfetos, em ambiente propício, oxidam liberando íons sulfatos e ácido sulfúrico, que em contato com a pasta de cimento Portland reagirá formando produtos neoformados e causando fenômenos expansivos.

## 2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O ATAQUE POR SULFATOS

A ASTM C 452 (1995) menciona que dentre os fatores que influenciam no ataque de sulfatos, tem-se a temperatura, ciclos de molhagem e secagem, presença de umidade e disponibilidade de oxigênio no meio reagente. O BRE *Digest 1* (2005) destaca ainda como fatores influentes: a quantidade e natureza do sulfato presente; nível da água e sua variação sazonal; fluxo de

[3] FARFÁN, J.R.J.R.; FILHO, O.B.; SOUZA, V.P. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. CETEM/MCT – Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, n. 29, 58p.

água subterrânea e a permeabilidade do solo ou porosidade da rocha de fundação ou em contado com a estrutura, além da qualidade do concreto.

O ataque envolvendo o processo de oxidação dos minerais sulfetos, segundo Taylor (1997), é um processo bem complexo, sendo influenciado por diversos fatores geoquímicos, além de também sofrerem com a influência da gênese de formação e das características do meio circundante.

A vulnerabilidade do concreto ao ataque por sulfatos está relacionada com a presença e a quantidade das fases sulfatadas e de alumina na pasta de cimento. Nesse contexto, Matshei *et al.* (2007) destacam que a proporção dessas fases é função direta da relação gipsita/$C_3A$, em massa, presente no clínquer do cimento, sendo que para relações acima de 3 a fase predominante é a etringita, para relações entre 3 e 1 predominam-se em conjunto a etringita e o monossulfato, já para relações próximas de 1 verifica-se o monossulfato, para uma relação abaixo de 1, ocorre a presença de monossulfato e aluminatos de cálcio hidratados e, quando a relação é zero possui apenas aluminatos de cálcio hidratados.

Tal vulnerabilidade deve-se ao fato dos aluminatos serem compostos ávidos por íons sulfatos, podendo reagir com eles, além dos sulfoaluminatos de cálcio serem compostos metaestáveis. Assim, em função do teor de sulfato presente no meio, eles podem assumir duas formas: o monosulfoaluminato de cálcio hidratado ($3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O$), quando em menores teores de sulfatos ou, quando em maiores teores de sulfatos, o trisulfoaluminato de cálcio hidratado, também conhecido como etringita ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) (COSTA, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Pelo exposto, depreende-se que o acréscimo de sulfatos na solução de poros, fornecidos por fontes internas ou externas, pode conduzir a transformações do sulfoaluminato de cálcio, mesmo em estado sólido. Nesse contexto, Kuzel (1996) também salienta que a concentração de $SO_3$ na solução dos poros precisa ser superior a 2,35 mg/L para que a etringita fique estável e não se converta para monossulfoaluminato.

Conforme apresentado por Mehta; Monteiro (2008), na maioria das vezes a agressividade do ataque por sulfato é diretamente proporcional ao teor de aluminato tricálcico ($C_3A$) presente no clínquer do cimento. Contudo, esta não é uma regra fixa conforme apresentado no BRE *Digest 1* (2005), pois há relatos de situações em que um cimento com elevada quantidade de $C_3A$ ofereceu boa resistência ao ataque por sulfatos, enquanto em outro, com baixo teor,

apresentou pouca resistência. A explicação para este comportamento está na presença da fase do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) que também é atacada pelo sulfato.

No caso específico do ataque promovido pela oxidação dos minerais sulfetos, este é um processo bem complexo, sendo influenciado por diversos fatores como: concentração de oxigênio; presença de umidade; superfície específica do mineral; teor de ferro do sulfeto; natureza petrográfica do agregado; conectividade dos poros do agregado; posição das partículas de sulfeto no agregado, referente à proximidade com a superfície externa; temperatura do ambiente; morfologia e tipo de sulfeto; pH do sistema e presença de bactérias (LOWSON, 1882; TAYLOR, 1997; CZEREWKO *et al.*, 2003; TAGNIT-HAMOU *et al.*, 2005; SCHMIDT *et al.*, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2012).

Com relação à presença de bactérias, em condições adequadas, é possível ocorrer a proliferação desses micro-organismos que podem acelerar e participar do processo de oxidação de minerais sulfetos. Algumas bactérias como as *Acidithiobacillus ferrooxidans* e as *acidithiobacillus thiooxidam* podem conduzir a biodessulfurização de determinado mineral com inclusões de sulfetos, como é corriqueiro em processos de purificação de carvão mineral. Nos casos onde se verifica a ocorrência de drenagem ácida de mina, é comum a presença de bactérias *thiobacillus ferrooxidans* que aceleram o processo de oxidação dos minerais sulfetos, principalmente os de ferro e cobre (BICZOK, 1972; FARFAN *et al.*, 2004[4] *apud* LIMA, 2009; CONTRUCCI, 2012; TORRES *et al.*, 2013).

Diretamente no concreto, a atuação dessas bactérias na oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados não é muito comum, pois elas sobrevivem em habitat cujo pH é extremamente baixo, entre 1 e 3. Entretanto, em obras de concreto em contato com esgotos sanitários, nas regiões que favorecem o desenvolvimento de reações anaeróbias, várias famílias de bactérias podem se proliferar no interior do concreto, como é o caso das bactérias *thiobacillus concretirous*, conhecidas como bastonete de enxofre, que se desenvolvem em faixa de pH entre 6 e 7 e degradam os cristais oriundos da hidratação do cimento como o hidróxido de cálcio (CONTRUCCI, 2012; TORRES *et al*., 2013).

[4] FARFÁN, J.R.J.R.; FILHO, O.B.; SOUZA, V.P. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. CETEM/MCT – Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, n. 29, 58p.

## 2.4 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO INERENTES AO ATAQUE POR SULFATOS

A degradação do concreto pelo ataque por sulfatos está associada ao desenvolvimento de neoformações de maior volume molecular, que geram expansões internas no concreto, ou que possuem menor coesão, minimizando assim a resistência física do material (HASPARYK *et al.*, 2003; PEREIRA, 2008; LIMA, 2009; FAQUINELI, 2010). As neoformações são o resultado da interação química entre íons sulfatos e as fases de hidratação do cimento Portland, sendo as mais comuns: a etringita ($3CaO.Al2O_3.3CaSO_4.32H_2O$), a gipsita ($CaSO4.2H2O$) e, em determinados casos, a taumasita ($CaSiO_3.CaCO_3.CaSO_4.15H_2O$) (BICZOK, 1972; MEHTA, 1976; FU; BEAUDOIN, 1996; TAYLOR, 1997; BENSTED, 2000; BROWN, 2002).

Além do surgimento das neoformações citadas, deve-se destacar que o ataque por sulfatos também resulta em um ataque ácido ao concreto (BEDDOE; DORNER, 2005; FERNANDES *et al*., 2012). Outro fato é que a cristalização e precipitação dos sais de sulfatos também podem originar expansões internas no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Outro efeito colateral da cristalização de sais no interior do concreto é a retenção de umidade por eles, causando o intumescimento da peça (PRISZKULNIK, 2011).

### 2.4.1 Ataque clássico

Conforme destacam Mehta; Monteiro (2008), as fases oriundas da hidratação do cimento Portland mais suscetíveis ao ataque por íons sulfatos são o hidróxido de cálcio e as fases que contêm alumina.

Classicamente o ataque por sulfato pode ser conduzido pela interação entre os íons sulfatos com as fases de hidratação que contém alumina ou o próprio aluminato tricálcico não hidratado, produzindo etringita. Outra possibilidade é da interação dos íons agressivos com o hidróxido de cálcio produzindo gipsita (COSTA, 2004; AGUIAR; SELMO, 2004).

De forma simplificada, as Equações 2.1 e 2.2 ilustram as reações químicas de formação da etringita ($C_3A{\cdot}3\bar{S}{\cdot}H_{32}$) a partir da reação com a alumina hidratada ($C_3A.CH.H_{18}$) e com o monossulfato ($C_3A.C.\bar{S}.H_{18}$), conforme seguem (MEHTA; MONTEIRO, 2008):

$$C_3A{\cdot}CH{\cdot}H_{18} + 2CH + 3\overline{S} + 11H \rightarrow C_3A{\cdot}3\,\overline{S}\,{\cdot}H_{32} \quad (2.1)$$

$$C_3A{\cdot}C{\cdot}\overline{S}{\cdot}H_{18} + 2CH + 2\overline{S} + 12H \rightarrow C_3A{\cdot}3\,\overline{S}\,{\cdot}H_{32} \quad (2.2)$$

Com relação à causa da degradação provocada pela formação da etringita, algumas das hipóteses aceitas no meio técnico referem-se à pressão exercida pelo crescimento dos cristais e a expansão resultante da adsorção de água pelas moléculas de etringita de baixa cristalinidade em meio alcalino (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Havendo formação por uma reação no estado sólido, a etringita será mais expansiva que aquela formada por uma solução; porém, existe mais de um tipo de etringita e nem todas elas são expansivas (ACI, 2000).

Aguiar (2004), Aguiar; Selmo (2004) e Mehta; Monteiro (2008) relatam que a deterioração da pasta endurecida de cimento Portland pela formação de gipsita acontece inicialmente pela redução do pH, perda da rigidez e resistência, seguida por expansão, fissuração e transformação do concreto em uma massa pastosa ou não coesiva.

Kuzel (1996) defende a teoria de que o concreto contendo monossulfoaluminato de cálcio pode também ser atacado pelo $CO_2$, carbonatando essa fase em presença de portlandita, dando origem à etringita e ao hemicarbonato ou monocarbonato. O $SO_4^{-2}$ na estrutura cristalina do monossulfoaluminato é substituído pelo $CO_3^{-2}$, e como resultado a concentração de sulfato na solução dos poros aumenta e a etringita é formada. Tal entendimento também é apresentado por Taylor (1997), que acrescenta que nestes casos, pouca ou nenhuma dissolução da portlandita e/ou descalcificação do C-S-H precisa ocorrer.

## 2.4.2 Ataque com formação de etringita tardia (DEF)

A formação de etringita tardia (DEF - *Delayed Etingite Formation*) é um tipo especial de ataque interno por sulfato, no qual a fonte de íons sulfato é a própria sulfatagem do cimento. Conforme destacam Thaulow *et al.* (1997); Taylor *et al.* (2001); Godart; Divet (2010) este ataque é específico para concretos que tiveram elevação de temperaturas, durante a etapa de cura, próximas ou superiores a 70ºC. Entretanto, esta temperatura ainda é muito controversa na literatura, já sendo empregado muitas vezes, na prática, o limite 60ºC para se evitar riscos de DEF, haja vista relatos de ataques a temperaturas próximas de 60ºC (MELO, 2010).

Pesquisadores como Glasser (1992) e Brunetaud (2005; 2007) relatam que a elevação de temperatura do concreto pode ser devida a uma fonte externa como ocorre com procedimento

de cura térmica, ou a partir de uma fonte interna, como o calor liberado pela hidratação do cimento. A etringita em temperaturas elevadas pode se decompor originando monossulfato e gipsita, que podem reagir posteriormente formando a etringita.

A formação da etringita tardia pode não ocorrer homogeneamente, podendo ser pontual e ocasionar um aumento de volume localizado e gerar tensões que provocam fissuras nos concretos e argamassas endurecidos (FU *et al*., 1995; TAYLOR *et al*., 2001; WAKIZAKA *et al.*, 2003).

Conforme destacam Hasparyk *et al*. (2012) vários estudos vêm demonstrando a atuação em conjunto da reação álcali-agregado e a DEF. Bouzabata *et al*. (2012) relatam que estas duas reações químicas são endógenas e que podem desenvolver-se conjuntamente em estruturas de concreto, causando intensa fissuração. Os autores ainda descrevem que a expansão causada pela DEF pode ser caracterizada como heterogênea e semelhante à oriunda da reação álcali-sílica, possuindo caráter isotrópico, ou seja, se expande igualmente em todas as direções da estrutura e que processos de lixiviação aceleram a cinética das expansões oriundas da DEF.

Com relação aos indícios da manifestação da DEF, autores como Hasparyk *et al*. (2012b) relatam que os sintomas são, em geral, semelhantes aos da RAA e ataque por sulfato, com a presença de fissuras, podendo serem mapeadas e preenchidas.

### 4.4.3 Ataque com formação de taumasita

A gênese da taumasita está normalmente relacionada com a exposição do concreto a condições de alta umidade e a temperaturas mais baixas, geralmente entre 5°C e 15°C (GLASSER *et al.*, 2008). Porém conforme cita Collepardi (1999) esse produto pode também se formar em temperaturas superiores a 20ºC, havendo fontes de sílica gel ou silicato de cálcio, além da disponibilidade de íons carbonato. Nesse contexto, pesquisadores como Hobbs; Taylor (2000) e Crammond (2002), estudando a influência do pH do concreto na formação da taumasita, verificaram que a sua formação será favorecida quanto maior for o pH.

Rodrigues *et al.* (2012a, b), por meio de suas pesquisas, verificaram que a taumasita, cuja estequiometria da reação não é bem definida no meio técnico, é mais frequentemente observada em concretos mais deteriorados, cuja presença de carbonato é indispensável. Além disto, a presença de taumasita no concreto conferia a ele manchas amareladas.

Conforme destaca Taylor (1997) a taumasita é um cristal com estrutura e morfologia similares às da etringita, podendo, por isso, haver confusão na sua identificação. Assim, para sua distinção é necessário o auxílio dos difratogramas de raios X detalhados para se verificar suas correspondentes distâncias interplanares características de cada cristal.

De acordo com Czerewko *et al*. (2003) a formação da taumasita reduz a coesão do concreto em função do ataque ao C-S-H, que libera dióxido de silício necessário à formação do cristal, transformando-o em um material semelhante a uma massa branca e pastosa, muito frágil.

## 2.5 ATAQUE DECORRENTE DE OXIDAÇÃO DE MINERAIS SULFETOS PRESENTES EM AGREGADOS

### 2.5.1 Generalidades

Um dos primeiros trabalhos experimentais envolvendo agregados contendo sulfetos em sua mineralogia, relatado pela literatura disponível, ocorreu na década de 50, sendo realizado pelo "*Swedish Committee on Aggregates*" (HAGERMAN, 1960 *apud* GOMIDES, 2008).

Alguns estudos experimentais com agregados contendo sulfetos desenvolvidos por diversos pesquisadores, dentre eles Vázquez (1999), Hasparyk *et al*. (2003), Gomides (2009) averiguaram a formação de cristais de etringita na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento hidratada. Desta forma, a liberação de íons sulfato resultantes do processo de oxidação de minerais sulfetos pode ter propiciado a origem desse composto deletério.

Os minerais sulfetos sofrem alterações químicas quando em presença de oxigênio e umidade (LOWSON, 1882; CZEREWKO *et al.*, 2003; PEREIRA, 2008; DUCHESNE; FOURNIER, 2011, RODRIGUES *et al.*, 2012a). As piritas ferrosas e marcasitas representam as principais oclusões expansivas nos agregados empregados nos concretos (NEVILLE, 1997). Os sulfetos reagem com água e oxigênio do meio formando sulfato ferroso, que depois se decompõe resultando em hidróxidos, enquanto os íons sulfato reagem com os aluminatos de cálcio da pasta de cimento.

De forma genérica, os principais produtos formados pelo processo de oxidação dos sulfetos presentes no agregado, quando exposto as intempéries naturais, são: óxidos e hidróxidos de ferro e variedades de sulfatos de ferro, segundo Rodrigues *et al.* (2012a).

A expansão do concreto desencadeada pela oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados pode comprometer de forma irreversível a integridade do concreto e o desempenho estrutural das obras, especialmente em casos de estruturas hidráulicas de grande porte como barragens de concreto (SHAYAN, 1988; CASANOVA *et al.*, 1996, 1997).

Segundo Martínez[5] *et al.* (s.d. *apud* HASPARYK *et al.*, 2003), as características dos concretos deteriorados pela ação interna de sulfetos são: a presença de manchas de ferrugem, fissuras mapeadas, intumescimento, desagregação, borda branca ao redor do agregado com presença de sulfeto de ferro, eflorescências brancas superficiais e baixa aderência da pasta ao agregado, além dos produtos neoformados a partir da reação com as fases provenientes do cimento (gipsita e etringita). Neville (1997) destaca também que pode ocorrer desagregação (estouros) da pasta de cimento, particularmente em condições úmidas e quentes.

Em diagnósticos de estruturas, percebe-se que a principal diferença entre o ataque decorrente da oxidação de sulfetos presentes em agregados com um ataque por sulfatos de origem externa é que a deterioração do concreto se estende por toda a profundidade do concreto, ou é mais pronunciada nas regiões de maior umidade, ao contrário do ataque externo, que avança na deterioração do concreto da superfície dos elementos para o interior, estando dependente, portanto, da porosidade e permeabilidade do concreto (RODRIGUES *et al.*, 2012a).

Casanova *et al.* (1997) relataram que em um sistema com pH superior a 10 os sulfetos se tornam instáveis. De acordo com Tagnit-Hamou *et al.* (2005) e Rodrigues *et al*. (2012a), as reações de oxidação são favorecidas em condições de alto pH, portanto o concreto é um meio propício para este processo. Assim, a solução dos poros do concreto pode ser considerada agressiva aos sulfetos, tendo em vista que ela é composta principalmente por íons alcalinos e hidróxidos, e o pH, em condições normais, geralmente é elevado e maior do que 12, conforme descrevem Cascudo; Carasek (2011).

Com relação à interferência do pH no processo de oxidação de minerais sulfetos, autores como Divet; Davy (1996), Casanova *et al*. (1997) e Belzile *et al*. (2004) relataram que por meio de experimentos foi possível observar que em sistema básico, cujo pH seja superior a 10, os sulfetos são mais instáveis. Em uma solução com alto pH, o oxigênio é o principal

[5] MARTÍNEZ ROIG, J.M.; AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; VÁZQUEZ, E. **Metodología en el diagnostico del comportamiento de las presas de Graus y Tabescán**. s.l., s.d., 16p.

agente receptor de elétrons, atuando desta forma como agente de oxidação. Quanto maior o pH da solução, maior a capacidade de oxidação promovida pelo oxigênio.

Em ambientes em que o pH for inferior a 3,5, o íon ferro é o principal responsável pela receptação de elétrons na superfície dos cristais de pirita, sendo que, quanto maior a acidez, maior é a capacidade de lixiviação de metais como o ferro (CZEREWKO *et al*., 2003), fato este que favorece a oxidação do sulfeto.

De forma comparativa, Ritchie (1994) relata que a velocidade de oxidação da pirita, quando o $Fe^{3+}$ é o agente oxidante, é cerca de 10 a 100 vezes maior que pelo oxigênio.

Com relação à mineralogia dos sulfetos, pesquisadores como Aguado *et al*. (1996), Janzen *et al.* (2000) e Torres *et al*. (2013) destacam que quanto maior o teor de ferro disposto nos sulfetos, mais intensa poderá ser a velocidade de oxidação do mineral.

Schmidt *et al*. (2011) ao analisarem concretos extraídos da galeria de uma barragem situada na Suíça e de concretos preparados com agregados de mesma procedência que os do concreto da barragem, verificaram que a formação de hidróxidos de ferro durante a oxidação de minerais sulfetos presentes em agregados pode conduzir à expansão das partículas presentes nos agregados, levando ao seu fraturamento (ou fissuração). De acordo com os pesquisadores, o padrão de fraturamento nos agregados que leva à expansão global no concreto é semelhante ao observado em muitos casos de reação álcali-agregado.

Além do exposto, é de suma importância ressaltar que é necessária água e a presença de oxigênio para que todas as reações químicas de alteração dos sulfetos ocorram.

### 2.5.2 Características dos minerais sulfetos

Os sulfetos representam importante classe de minerais e ocorrem de forma dispersa ou concentrada nos mais diversos ambientes geológicos e tipos de rochas, tanto as ígneas, metamórficas quanto às sedimentares, onde podem ser primários ou secundários. Dentre os sulfetos mais comuns, cita-se a pirita ($FeS_2$), porém existem vários outros sulfetos comuns como a calcopirita ($CuFeS_2$), a pirrotita ($Fe_7S_8$-FeS), a galena (PbS), entre outros (DANA, 1981, BATISTA *et al.*, 2013).

Os sulfetos integram o grupo de minerais não silicatados e possuem fórmula geral expressa como X*m*Z*n*, na qual o X representa o elemento metálico e o Z representa o enxofre. De

forma resumida, o sulfeto é a combinação do elemento químico enxofre, em valência -2, ligado a um radical de natureza metálica. Os sulfetos encontrados em agregados são metálicos, e com exceção da pirrotita, não possuem propriedades ferromagnéticas (DANA, 1981; TAYLOR, 1997; MACHADO *et al*., 2003).

Os minerais sulfetos podem formar-se em condições de baixa ou alta temperatura. As formações em alta temperatura ocorrem em/ou associadas a rochas ígneas e metamórficas ou em veios minerais, cuja origem está na cristalização dos magmas com $H_2S$ na fase fluida ou originam-se pela desgaseificação dos magmas em profundidades e no fundo oceânico, sendo de difícil formação na superfície em tempos atuais devido à atmosfera oxidante, gerando nesse caso normalmente enxofre metálico ou sulfatos. As formações em baixas temperaturas relacionam-se com os processos sedimentares (CZEREWKO; CRIPPS, 2006, ZHENG *et al.*, 2009).

A formação do mineral sulfeto em rochas sedimentares deve-se a reação do $H_2S$ com o íon férrico presente na solução do depósito sedimentar formando sulfeto de ferro metaestável, que posteriormente transforma-se quimicamente em pirita mais estável. Estas condições dão origem à pirita framboidal, que possui maior reatividade frente sua maior área superficial (CZEREWKO; CRIPPS, 2006).

Processo semelhante ao que ocorre com a desnitrificação da matéria orgânica em processos de mineralização da parte sólida de esgotos sanitários, local onde o nitrato proveniente da redução da amônia é reduzido a nitrogênio molecular em uma etapa anóxica, tem-se para o processo de formação de gás sulfídrico ($H_2S$) que dá origem aos sulfetos de ferro em rochas sedimentares.

Nessas rochas, a decomposição anaeróbica bacteriana da matéria orgânica, durante sua diagênese, produz um ambiente anóxico, e nessas condições, as bactérias redutoras convertem os íons sulfato dissolvidos na água em íons sulfeto pela substituição do oxigênio da molécula por hidrogênio, formando assim o gás sulfídrico (CZEREWKO; CRIPPS, 2006; GAVIN *et al.*, 2010).

Conforme destacam Vázquez (1999), Hasparyk *et al*. (2002), Pereira (2008), Silva *et al.* (2012), Tuohy (2012), dentre outros, é de suma importância ter o conhecimento sobre a composição mineralógica dos agregados antes de empregá-los como material constituinte dos

concretos. Este conhecimento está voltado à identificação dos minerais com grande potencial de oxidação presentes no agregado.

Conforme observam Bérubé *et al.* (1986) e Czerewko *et al*. (2003), a morfologia do mineral sulfeto exerce forte controle nas taxas de oxidação de si mesmo, sendo que cristais de pirita do tipo framboidal possuem maior taxa de oxidação devido à presença de maior porosidade e maior superfície específica.

Destaca-se também que, conforme citam Nicholson; Scharer (1994), as taxas de oxidação da pirrotita, em condições atmosféricas, são superiores às da pirita em 20 a 100 vezes, o que pode estar correlacionado com a instabilidade na sua estrutura cristalina. Em consonância com o exposto, de acordo com os resultados obtidos no trabalho de Gomides (2009) a pirrotita foi considerada o sulfeto mais reativo do sistema, sendo o principal mineral responsável pelas alterações observadas nos agregados extraídos de concretos e também estocados em tambores ao longo do tempo.

### 2.5.3 Variedades de minerais sulfetos

Como destacado na literatura, diversas são as formas de sulfetos presentes nos agregados. Desta forma, apresentam-se na sequência as principais características das variedades de sulfeto mais comumente encontradas nos agregados empregados em obras civis. As informações contidas nos itens abaixo foram extraídas de diversas bibliografias, tais como: Dana, (1981); Aguado *et al*. (1996); Biczok (1967); Cánovas (1988); Deer *et al*. (1966) e Nogami (1976); Hutchinson; Ellison (1992), Janzen (2000), Machado *et al*. (2003), Belzile *et al*. (2004) Czerewko; Cripps (2006), Schmidt *et al*. (2011), Mindat (2013), Webmineral (2013).

Destaca-se inicialmente que com relação aos produtos de alteração dos minerais sulfetos, a limonita, cuja fórmula química relatada no meio técnico e atualmente empregada para designar uma extensa quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro não identificados por não apresentarem cristais visíveis e em uma faixa de coloração amarelo-marrom é $FeO(OH).nH_2O$. A espécie de mineral mais comum na limonita é a goetita ($FeO(OH)$), mas podem consistir em várias proporções de: magnetita ($Fe_3O_4$), hematita ($Fe_2O_4$) , lepdocrocita ($\gamma FeO(OH)$), hisingerita ($Fe_3^{+2}\ Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$), pitticita ($Fe,SO_4,AsO_4,H_2O$) e as espécies do grupo da jarosita ($K_2Fe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$).

A pirita, com fórmula molecular $FeS_2$, é um mineral que pode ser encontrado em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, possui composição química aproximada de 46,6% de Fe (ferro) e 53,4% de S (enxofre). Possui cor amarelo-dourada (aspecto de latão polido) e dureza relativamente elevada, entre 6,0 e 6,5. É insolúvel em ácido clorídrico e solúvel em ácido nítrico concentrado. Ela é facilmente alterada para hidróxido de ferro, geralmente na denominada limonita, dentre outras formas de óxidos, hidróxidos, oxi-hidróxidos e oxi-hidróxidos hidratados.

A pirrotita ($Fe_{1-x}S$), comumente expressa na forma de $Fe_7S_8$, que também é um sulfeto de ferro, destaca-se dos demais por seu alto grau de alterabilidade, oxidando-se com facilidade, além de possuir propriedades magnéticas. É um mineral encontrado em vários tipos de rochas, porém com menor frequência em relação à pirita. Possui cor escura tendendo ao negro, apresentando ainda, como a pirita, um brilho metálico. É solúvel em ácido clorídrico, liberando odor sulfídrico. Também é pegajoso ao tato. De forma geral, os produtos da oxidação da pirrotita são semelhantes aos da pirita.

A marcassita, cuja fórmula molecular é semelhante a da pirita ($FeS_2$), é um mineral encontrado preponderantemente em rochas sedimentares, podendo também ser encontrada em demais rochas. Sua coloração varia de amarela a esverdeada, possuindo um brilho metálico menos intenso que os demais. É insolúvel em ácido clorídrico e solúvel em ácido nítrico. Possui dureza similar à da pirita, porém oxida-se com maior facilidade, e é considerada a responsável pelo surgimento das manchas de ferrugem. Verifica-se também que com a oxidação da marcassita, há formação de uma borda branca sobre a superfície do agregado, sendo esta caracterizada e definida como melanterita ($FeSO_4.7H_2O$).

O sulfeto de ferro e cobre conhecido como Calcopirita ($CuFeS_2$) é um mineral que pode ser encontrado em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Apresenta cor amarela latão e brilho metálico, frequentemente altera-se de modo superficial e iridescente e possui dureza entre 3,5 a 4,0. Esse mineral é solúvel em ácido nítrico, liberando o elemento enxofre. Em pequenos grãos, a calcopirita pode assemelhar-se ao ouro e ao oxidar-se, pode liberar além dos típicos produtos provenientes do processo, o sulfato de cobre ($CuSO_4.5H_2O$), a calcosina ($Cu_2S$) e a malaquita ($Cu_2CO_3(OH)$).

A galena (PbS) é um mineral encontrado em rochas metamórficas, sedimentares e ígneas (do tipo pegmatitos). Apresenta coloração cinza chumbo, brilho metálico, porém não tão intenso e

dureza igual a 2,5. Ela decompõe-se no ácido azótico diluído com separação de enxofre, sendo que algumas amostras sofrem efervescência, liberando o $H_2S$ (ácido sulfídrico). A oxidação desse mineral resulta na formação da anglesita ($PbSO_4$) e cerussita ($PbCO_3$), revelando que o ácido sulfúrico não está livre ou disponível para reação.

### 2.5.4 Química do processo de oxidação de sulfetos

Vários pesquisadores como Lowson (1982), Pye; Miller (1990), Casanova *et al.* (1996, 1997), Belzile *et al.* (1997), Rodrigues *et al.* (2012b), dentre outros, vêm estudando as reações de oxidação dos minerais sulfetos, principalmente os sulfetos de ferro e suas particularidades.

Diversas reações químicas têm sido sugeridas na literatura clássica para expressar as etapas decorrentes do processo de oxidação dos sulfetos de ferro, mais especificamente da pirita e a pirrotita. As equações que seguem são as mais difundidas e é uma síntese dos trabalhos publicados por Lowson, (1982), Pye; Miller, (1990), Casanova *et al.* (1996, 1997), Czerewko; Cripps, (1999), Belzile *et al.* (1997) e Rodrigues *et al.* (2012a,b).

Casanova *et al.* (1996; 1997) ressaltam ainda que as reações relativas à oxidação dos minerais sulfetos podem ocorrer de várias formas. Logo a sequência das equações apresentadas não é a única existente para explicar o processo e a química de alteração dos minerais sulfetos.

Em suma, na presença de umidade e oxigênio, o sulfeto de ferro pirita se oxida, resultando na formação do sulfato ferroso e do ácido sulfúrico (Equação 2.3).

$$FeS_2 + H_2O + \frac{7}{2}O_2 \rightarrow FeSO_4 + H_2SO_4 \qquad (2.3)$$

O sulfato ferroso pode reagir com o ácido sulfúrico, em presença de oxigênio, gerando o sulfato férrico (Equação 2.4). Essa reação química pode ser catalisada pela ação das bactérias da classe *Ferrobacillus-Thiobacillus*.

$$2FeSO_4 + \frac{1}{2}O_2 + H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + H_2O \qquad (2.4)$$

Por conseguinte, o sulfato férrico originado, que é um forte agente oxidante, pode reagir com a pirita para formar mais sulfato ferroso e pode propiciar a liberação do elemento enxofre (Equação 2.5).

$$Fe_2(SO_4)_3 + FeS_2 \rightarrow 3FeSO_4 + 2S \tag{2.5}$$

O enxofre liberado pode ser rapidamente convertido em ácido sulfúrico (Equação 2.6). Isso ocorre em condições adequadas de presença de umidade e oxigênio, além de bactérias que podem atuar também em conjunto, novamente como catalisadoras.

$$S + \frac{3}{2}O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \tag{2.6}$$

A Equação 2.7, apresentada na sequência, expressa a reação do processo de oxidação da pirita, o qual resulta na formação do hidróxido de ferro, que é fundamental a disponibilidade no sistema de uma concentração elevada de oxigênio e umidade.

$$FeS_2 + \frac{7}{2}H_2O + \frac{15}{4}O_2 \rightarrow Fe(OH)_3 + 2H_2SO_4 \tag{2.7}$$

Pelas equações expostas percebe-se claramente a formação de ácido sulfúrico em decorrência da oxidação do mineral sulfeto. A presença deste ácido na solução dos poros do concreto pode prejudicá-lo, por meio de um ataque ácido. Além disto, ele estará dissociado em íons cátions $H^+$ e íons ânions $SO_4^{2-}$, o que poderá desencadear o denominado ataque por sulfatos, sendo neste caso a oxidação dos minerais sulfetos a fonte originária dos sulfatos.

Relativo à pirrotita ($Fe_{1-x}S$), o segundo sulfeto de ferro encontrado em maior frequência na natureza, tem-se que o nível de alteração dele é superior aos demais. As equações apresentadas na literatura encontram-se expressas pelas Equações 2.8 e 2.9.

$$Fe_{1-x}S + \left(2 - \frac{x}{2}\right)O_2 + xH_2O \rightarrow (1-x)Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 2xH^+ \tag{2.8}$$

A subsequente oxidação do $Fe^{2+}$ e a precipitação do hidróxido de ferro podem aumentar a produção de ácido. Pela estequiometria, um mol de pirrotita pode gerar mais de um mol de ácido sulfúrico (Equação 2.9).

$$(1-x)Fe^{2+} + \left(\frac{1-x}{4}\right)O_2 + \left(\frac{5-5x}{2}\right)H_2O \rightarrow (1-x)Fe(OH)_3 + (2-2x)H^+ \tag{2.9}$$

Na continuidade da cinética do processamento das reações, os íons sulfato liberados a partir da alteração dos sulfetos, poderão desencadear novas reações químicas diante da interação entre eles e os compostos da pasta de cimento. As possíveis reações químicas para a formação de tais produtos são apresentadas a seguir (AYORA *et al.*, 1998).

$$2Ca(OH)_2 + Ca_4Al_2O_7.19H_2O + 8H_2O + 3SO_4^{2-} + 6H^+ \rightarrow Ca_6Al_2O_6(SO_4)_3.32H_2O \quad (2.10)$$

$$Ca_6Al_2O_6(SO_4)_3.32H_2O + 3SO_4^{2-}\ 6H^+ \rightarrow 6CaSO_4.2H_2O + 2Al(OH)_3 + 20H_2O \quad (2.11)$$

A interação clássica entre os íons sulfatos oriundos da oxidação de minerais sulfetos ou provenientes de fontes externas dá-se pela reação destes com as fases de hidratação do cimento, originando compostos secundários como a etringita, gipsita e, em determinados casos, a taumasita. A etringita e a gipsita são os compostos mais comuns dessas reações em função da eletroafinidade dos íons sulfatos com as fases aluminatos e portlandita.

Apesar do exposto, sendo a solução dos poros do concreto rica em íons alcalinos como os cátions de sódio, de potássio e principalmente os de cálcio, a interação química entre os ácidos e sulfatos com estes íons alcalinos pode resultar no consumo dos hidróxidos ($Ca^{++}$, $Na^+$, $K^+$) e, consequentemente na redução de alcalinidade e dissociação dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados presentes na pasta de cimento, com formação de sais de sulfatos conforme apresentado nas Equações 2.12 a 2.14 (CEMIG, 2007[6] *apud* PEREIRA, 2008).

$$H_2SO_4 + KOH \rightarrow K_2SO_4 + 2\ H_2O \quad (2.12)$$

$$H_2SO_4 + NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O \quad (2.13)$$

$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O \quad (2.14)$$

No geral, em condições favoráveis, os sulfatos alcalinos provenientes da reação com ácido sulfúrico podem dar continuidade ao processo deletério, atacando a pasta de cimento hidratada. Este tipo de ataque, denominado genericamente de "ataque por sulfatos" é

[6] CEMIG, 2007, Cemig Geração e Transmissão S.A., UHE Irapé, P&D 122, Comportamento dos Concretos e das Caldas de Injeção em Presença de Rochas Sulfetadas.

semelhante ao ataque externo, cuja diferença está na fonte de sulfatos, que neste caso é interna ao concreto.

Por fim, conforme se depreende pelo apresentado por Rodrigues *et al*. (2012a), praticamente todos os minerais sulfetos são instáveis em ambiente oxidante, onde a oxidação desses minerais resulta na formação de vários produtos de oxidação secundários, incluindo óxidos e hidróxidos de ferro, gipsita e sulfatos, sendo que a composição dos produtos secundários da reação é em função dos elementos químicos disponíveis na amostra e no meio circundante. Duchesne; Fournier (2011) citam que os produtos secundários mais frequentemente gerados durante a oxidação de sulfetos de ferro são a "ferrugem" em todas as suas formas (goetita (FeOOH), ilmenita ($FeO(OH)nH_2O$)), e os sulfatos incluindo a gipsita.

## 2.6 MEDIDAS PREVENTIVAS

O Instituto Americano do Concreto (*American Concrete Institute* - ACI, 2000) preconiza que para resistir ao ataque por sulfato, a principal consideração a ser feita em relação ao cimento é a sua quantidade de $C_3A$. Para exposições moderadas recomendam-se cimentos do Tipo II (Cimento com moderada resistência aos sulfatos), que têm um teor máximo de aluminato tricálcico de 8% e, para condições severas, o cimento recomendado é o Tipo V (resistente a sulfatos), com um máximo de 5% de $C_3A$.

O cimento Portland contendo menos do que 5% de $C_3A$ é suficientemente resistente aos sulfatos sobre condições moderadas de ataque por sulfato, isto é, quando a única consideração refere-se às reações de formação de etringita. Entretanto, quando altas concentrações de sulfato estão envolvidas (normalmente associadas à presença de cátions de magnésio e de álcalis), o cimento Portland Tipo V pode não ser eficiente contra as reações de troca catiônica que resultam na formação de gipsita. Nestes casos são indicados cimentos que fornecem pouco hidróxido de cálcio na hidratação, como os cimentos com alta concentração de alumina, cimentos Portland com mais de 50% de escória de alto-forno e cimentos Portland pozolânicos com pelo menos 25% de pozolanas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No tocante aos cimentos resistentes a sulfatos, salienta-se que a norma brasileira NBR 5737 (ABNT, 1991) subscreve que o cimento é considerado resistente a sulfatos quando o teor de aluminato tricálcico ($C_3A$) do clínquer for igual ou inferior a 8% e o teor de adições carbonáticas for igual ou inferior a 5% da massa do aglomerante total. No caso específico do

cimento Portland de alto-forno (CP III), o teor de escória granulada de alto-forno deve estar entre 60% e 70% e os cimentos Portland pozolânicos (CP IV) devem apresentar um teor de materiais pozolânicos variando entre 25% e 40%.

Quando o assunto é ataque externo por sulfatos, a melhor proteção está relacionada à produção de concreto de boa qualidade, principalmente concretos de baixa permeabilidade (COSTA, 2004). Fatores ligados diretamente a permeabilidade do concreto como: mistura adequada do concreto, alto consumo de cimento, baixa relação água/cimento, adensamento adequado e cura apropriada são de suma importância para prevenção do concreto.

Com base em normas originalmente desenvolvidas pelo U.S. *Bureau of Reclamation*, a exposição ao sulfato é classificada, segundo o ACI *Building Code* 318 (ACI, 2008), em 4 graus de severidade, que apresenta as seguintes recomendações contidas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** – Classe de agressividade e recomendações do ACI *Building Code* 318 (ACI, 2008).

| Tipo de ataque | Relação com a concentração de sulfato | Medida preventiva a adotar |
|---|---|---|
| Ataque negligen-ciável | Teor de sulfato está abaixo de 0,1% no solo, ou abaixo de 150 ppm (mg/l) na água. | Não há restrição ao tipo de cimento e relação água/cimento. |
| Ataque moderado | Teor de sulfato é de 0,1 a 0,2% no solo, ou de 150 a 1500 ppm na água. | O cimento Portland ASTM Tipo II (semelhante ao CP III ABNT 5735:1991 ou CP IV- ABNT 5736:1991) ou Portland pozolânico ou Portland com escória deve ser usado, com uma relação água/cimento menor que 0,5 para um concreto de peso normal. |
| Ataque severo | Teor de sulfato é de 0,2 a 2,0% no solo ou 1.500 a 10.000 ppm na água. | Emprego de cimento Portland ASTM do Tipo V (semelhante ao CP I RS - ABNT 5732:1991), com uma relação água/cimento menor que 0,45. |
| Ataque muito severo | Teor de sulfato está acima de 2% no solo, ou acima de 10.000 ppm na água. | O cimento ASTM Tipo V (semelhante ao CP I RS - ABNT 5732:1991 + pozolanas) mais uma adição pozolânica devem ser usados, com uma relação água/cimento menor que 0,45. Para um concreto com agregado leve, o ACI Building Code especifica uma resistência mínima aos 28 dias de 29 MPa (4.250 psi) para as condições de ataque severo ou muito severo. |

Com relação à normalização brasileira, a ABNT NBR 12655 (2006), recomenda-se que concretos expostos a solos ou soluções contendo sulfatos devem ser preparados com cimento resistente a sulfatos de acordo com a ABNT NBR 5737 (1992), e atender ao que estabelece na Tabela 2.2, no que se referem à relação água/cimento e à resistência característica à compressão do concreto (f*ck*).

**Tabela 2.2 -** Requisitos para o concreto exposto a soluções contendo sulfatos.

| Condição de exposição em função da agressividade | Sulfato solúvel em água ($SO_4$) presente no solo, % em massa | Sulfato solúvel ($SO_4$) presente na água - ppm | Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal | Mínimo f*ck* (para concreto normal ou leve) MPa |
|---|---|---|---|---|
| Fraca* | 0,00 a 0,10 | 0 a 150 | -- | -- |
| Moderada** | 0,10 a 0,20 | 150 a 1500 | 0,50 | 35 |
| Severa*** | Acima de 0,20 | Acima de 1500 | 0,45 | 40 |

* Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo. **Água do mar. ***Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Sugere-se para o concreto de peso normal uma baixa relação água/cimento (ou maior resistência no caso de concreto leve) para obter melhor estanqueidade ou para proteção contra corrosão da armadura. Para condições de ataque muito severo o BRE *Digest* 1 (BRE, 2005) indica o uso de cimento Portland resistente a sulfatos, relação água/cimento máxima de 0,45 e consumo mínimo de cimento de 370 kg/m$^3$, além de uma camada protetora no concreto. Tais camadas protetoras do concreto não substituem um concreto de boa qualidade ou de baixa permeabilidade, pois é difícil assegurar que a camada não será perfurada ou não irá fissurar.

## 2.7 LIMITES PARA OS COMPOSTOS DE ENXOFRE NO CONCRETO

Os compostos a base de enxofre, para serem agressivos, devem se apresentar em concentrações acima de determinados limites de tolerância (FAQUINELI, 2010). Para uma dada concentração, os danos causados pelos agentes agressivos podem apresentar diferentes magnitudes dependendo das condições que influenciam as reações, conforme apresentado no subitem 2.3.

Conforme destacado por Hasparyk *et al*. (2002, 2003), há vários casos divulgados ao meio técnico internacional alertando quanto aos danos já observados em estruturas com teores variados de sulfetos, desde baixos valores, da ordem de 0,15%, até teores bem mais elevados, como 28%. O teor limite destes elementos ainda é um tema controverso no meio técnico, alguns limites são referenciados na literatura nacional e internacional, sendo que em alguns casos há limitação no teor de pirita ou pirrotita e, em outros, limita-se o teor de enxofre ou de enxofre total.

Alguns trabalhos podem ser encontrados no meio técnico com recomendações de limites de compostos portadores de enxofre presentes nos agregados, conforme segue:

- Teor máximo no agregado de 1%, em peso, de enxofre total expresso em $SO_3$ (ASSEMBLEIA GERAL ALEMÃ PARA ESTUDOS DE JAZIDAS, 1960 *apud* PEREIRA, 2008);
- No agregado miúdo, o teor de enxofre na forma de sulfetos e sulfatos, expresso em $SO_3$, não pode exceder a 1% da massa do agregado, e no agregado graúdo os sulfetos e sulfatos, expressos sob a forma de $SO_3$, não podem exceder a 0,5% da massa do agregado (COMITÊ INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1965);
- Teor máximo de 1% de $FeS_2$ (HAGERMAN; ROOSARR, 1955[7] *apud* HASPARYK *et al.*, 2002).

Os limites encontrados em normalizações e recomendações internacionais, obtidos por meio de pesquisa, foram:

- Quantidade máxima de sulfeto em relação à massa de cimento de: 0,2% no concreto simples com cimento Portland comum ou concreto armado com cimento Portland pozolânico; 0,5% no concreto simples com emprego de cimento Portland pozolânico e 0,05% em concreto protendido (ANTIGO REGULAMENTO PORTUGUÊS DO BETÃO, 1971 *apud* COUTINHO 1977);
- Teor máximo de enxofre no concreto em relação à massa do cimento, expresso na forma de $SO_3$, de 0,5% quando empregado cimento Portland comum ou 1% quando empregado cimento Portland com escória de alto-forno ou 2% se empregado cimento Portland pozolânico (ANTIGO REGULAMENTO PORTUGUÊS DO BETÃO[8], 1971 *apud* COUTINHO, 1977);
- Limite máximo de enxofre total no agregado, expresso em $SO_3$ de 1%, ou 0,4%, se expresso em S. Para agregados de escória de alto-forno esse valor é aumentado para 5% de enxofre expresso em $SO_3$ ou 2% expresso em S. Com relação ao enxofre na forma de sulfatos, determinado por solubilização em ácido clorídrico, conforme método

[7] HAGERMAN, T.; ROOSAR, H. Kismineralens skadein warkens pa betong. Z. Betong, 2: 151–161.1955

[8] Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos criado em 1971 pelo Dec.404/71 de 23/9/71.

preconizado na NF EN 196-2[9] (NF, 1996), e expresso em $SO_3$, o teor máximo é de 0,15%. (AFNOR NF P 18-541, 1994);

- A norma AFNOR NF P 18-541 (NF, 1994) foi substituída pela AFNOR NF P 18-540 (ANFOR, 1997), que traz como limite máximo de enxofre total, expresso em S, o teor de 0,4% para os agregados enquadrados na categoria A[10] ou 1% para os agregados da categoria B, sendo que para os agregados de escória de alto-forno esse valor é de 2%. Limita também o teor de enxofre na forma de sulfatos, determinado por solubilização em ácido clorídrico, conforme método preconizado na NF EN 196-2 (NF, 1996), e expresso em $SO_3$, em 0,2%[11].
- No máximo 1% em massa, de enxofre total nos agregados (miúdos e graúdos); 2% em caso de escória de alto forno esfriadas por ar e 0,1% em caso de presença de sulfetos de ferro na forma de pirrotita. No máximo 0,8% de sulfatos solúveis em ácido, expresso em $SO_3$ e, concentração inferior a um grama por litro de sulfatos, expresso em $SO_4$, na água de amassamento (UNE, 1999);
- Teor máximo 1% de enxofre total em relação à massa do agregado, ou de 2% para agregados de escória. No caso de detectada a presença de pirrotita o limite é de 0,4%, conforme recomendado pela norma francesa e européia NF EN 13242+A1[12]- (NF EN, 2002);
- Teor máximo 1% de enxofre total em relação à massa do agregado, ou de 2% para agregados de escória. No caso de detectada a presença de pirrotita o limite passa para 0,1%, conforme norma francesa e européia NF EN 12620+A1-2008 (NF EN, 2002).

---

[9] Método de ensaio semelhante à metodologia proposta pela NBR NM 16 – Cimento Portland – análise química, determinação do anidrido sulfúrico. A antiga norma NF EN 196-2 foi substituída pela UNE EN 1744-1 (1999), cuja metodologia encontra-se apresentada em seu Capítulo 12 – Determinación de los sulfatos solubles en ácido.

[10] A norma AFNOR NF P 18-540 (ANFOR, 1997) enquadra os agregados, com relação ao teor de enxofre total, expresso em S, como Categoria A se o limite máximo deste elemento for de 0,4% e na Categoria B para os agregados com teor máximo de 1% de S.

[11] A norma AFNOR NF P 18-540 (ANFOR, 1997) cita que só se determina o teor de sulfatos, conforme metodologia da NF EN 196-2, se o valor de S total for superior a 0,08%. Nesse caso, se for maior, o limite máximo de sultatos, expresso em $SO_3$, é de 0,2%.

[12] A norma NF EN 13242+A1 (NF EN, 2002) está voltada para obras rodoviárias e estruturas civis não hidráulicas, sendo a norma NF EN 12620+A1-2008 (NF EN, 2002) a que se refere a obras hidráulicas e de concreto massa.

Em seu texto, a AFNOR NF P 18-541 (NF, 1994) cita ainda que a distribuição dos compostos sulfatados devem ser homogênea e a presença de pirita ou marcassita em grãos com dimensões superiores a 2 mm torna o agregado impróprio para a confecção de concreto.

Atualmente, tanto as normas francesas citadas (ANFOR), quanto o regulamento português mencionado (RPB), foram atualizados e ambas as normalizações encontram-se substituídas pelas normas NF EN 12620+A1-2008 (NF EN, 2002a), NF EN 13242+A1-2008 (NF EN, 2002b) e NF EN 13043-2003 (NF EN, 2003).

Com relação à normalização brasileira, o único limite relativo a compostos sulfatados é o disponível na ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009a), onde limita os teores máximos de sulfatos ($SO_4$) presentes nos agregados, em 0,1% de $SO_4$. Porém apenas em relação àqueles solúveis em água, e em relação à massa total de agregado. Tal norma limita o teor de sulfatos solúveis em água, determinado segundo ABNT NBR 9917 (ABNT, 2009b), não fazendo nenhuma referência ao teor de minerais sulfetos ou sulfatos totais presentes nos agregados.

A NBR 7211 (ABNT, 2009a) também estabelece casos onde os agregados que excedam o limite de 0,1% de $SO_4$ podem ser utilizados em concreto, desde que o teor total trazido ao concreto por todos os seus componentes (água, agregados, cimento, adições e aditivos químicos) não exceda a 0,2%, ou que fique comprovado o uso de cimento Portland resistente a sulfatos.

Existem também alguns limites relacionados aos sulfatos quanto ao emprego de agregados reciclados, podendo-se destacar o trabalho publicado por Aguiar; Selmo (2004) de onde se extraiu a Tabela 2.3 a seguir, que contêm algumas normalizações e limites de sulfato para esse tipo de agregado.

**Tabela 2.3 -** Limites de sulfatos para agregados reciclados empregados em mistura com cimento Portland (Extraído de AGUIAR; SELMO, 2004).

| Pais | Referência | Norma | Limite de sulfatos solúveis | | Aplicação do agregado reciclado |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Teor | Forma de expressão | |
| FRANÇA | RILEM (1994)[13] | TC 121 DRG | 1,0% em massa de agregado | $SO_3$ | Concreto |
| ALEMANHA | DIN (2002)[14] | DIN 4226-100 | 600 mg/L | $SO_4$ | Concreto e argamassa |
| JAPÃO | ASD (2004)[15] | Specification 378 | 1,0% em massa de agregado | $SO_3$ | Concreto (substituição de 20%) |
| HOLANDA | NEN (1990)[16] | NEN 5936 | 1,0% em massa de agregado | $SO_{3*}$ | -- |
| ITÁLIA | UNI (1999)[17] | UNI 8520-2 | 0,20% | $SO_3$ | Agregados Naturais reciclados |
| BRASIL | ABNT (2004) | NBR 15116 (2004) | 1,0% em massa de agregado | $SO_4$ | Concreto não estrutural |

Não obstante, é de suma importância também destacar que o teor de compostos sulfatados adicionados ao cimento para controlar sua pega são limitados segundo instruções normativas brasileiras. Na Tabela 2.4 apresentam-se os limites estabelecidos para cada tipo de cimento Portland comercial.

**Tabela 2.4 -** Limites preconizados pelas normas brasileiras para os teores de presentes no cimento.

| Tipo de cimento | Limite de ($so_3$) - (% da massa) | Norma | Observações |
|---|---|---|---|
| CP I e CP I-S | $\leq$ 4,0 | NBR 5732:1991 | - |
| CP III | $\leq$ 4,0 | NBR 5735:1991 (EB-208) | - |
| CP IV | $\leq$ 4,0 | NBR 5736:1999 (EB-758) | - |
| CP V-ARI | $\leq$ 3,5 | NBR 5733 (EB-2) | - quando $C_3A$ do clínquer de até 8% |
| | $\leq$ 4,5 | | - quando $C_3A$ do clínquer maior que 8% |
| CP II-E | $\leq$ 4,0 | NBR 11578:1997 | - |
| CP II-Z | | | - |
| CP II-F | | | - |

[13] - RILEM Recommendation. 121 – DRG Guiadance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, v 27, p.557-559, 1994.

[14] DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. **Aggregates for concrete and mortar - DIN 4226 - Part 100: Recycled aggregates.** Berlin, 2002

[15] ARCHITECTURAL SERVICES DEPARTMENT. Hong Kong. **Particular specification for designed mix concrete with 20% recycled coarse aggregates.**

[16] NEDERLANDS NORMALISATIE-INSTITUUT. **Aggregates for concrete – determination of sulfide content – NEN 5936**. Delft, 1990.

[17] - ENTE NAZIONALI ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **Aggegrates for use in concretes - definition, classification and properties – UNI 8520**-1. Milano, 1999.

## 2.8 CASOS DE ATAQUE

No Brasil, são escassas as publicações no meio técnico relacionadas a agregados contendo sulfetos. O único relato até o momento de obra com problema de sulfetos em agregados refere-se à Barragem do Rio Descoberto, localizada em Brasília/DF e de propriedade da CAESB. Corrêa (2001) relata que foram empregados no concreto agregados com baixos teores de sulfetos de ferro e alguns anos após o enchimento do reservatório da barragem já podiam ser observados vazamentos nela, que foram relacionados tanto aos sulfetos como também a alguns problemas de execução. A solução definitiva adotada foi a execução de uma parede diafragma ao longo do eixo da barragem (ELC, 2003).

**Figura 2.1 –** Aspectos da Barragem Rio Descoberto: a) fissura devido à presença de água ácida e de pirita no agregado do concreto, b) execução da parede diafragma (ELC, 2003).

Segundo SILVA *et al*. (2007) o conhecimento do problema relacionado à presença de sulfetos em agregados era recente no Brasil em 2007 e somente com o advento da construção da Usina Hidrelétrica de Irapé – MG, local onde o sulfeto encontrava-se presente em altos teores (de 2% a 9%) na rocha de fundação, é que se passou a preocupar com esta possível ocorrência. Essa usina, situada no Vale do Jequitinhonha, com uma barragem de 208 m de altura e estruturas de concreto em contato com o maciço rochoso sulfetado, foi alvo de diversos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, por meio dos quais se definiu pela não utilização do material de escavação obrigatória para agregado, limitando-se o teor de sulfetos nos agregados em 0,5% de forma a evitar eventuais problemas futuros ocasionados a partir dos agregados dos concretos.

No meio internacional existem vários casos citados dessa incidência patológica (HASPARYK *et al*., 2002). Alguns casos, na Espanha, envolvem a presença de pirita, como as estruturas de concreto na região de Maresme na Catalúnia, que ficaram totalmente deterioradas e acabaram

sendo demolidas entre 1970 e 1972. Faquineli (2010) cita também que vários problemas relacionados com a estanqueidade da barragem de Fonsagrada, na Espanha, ocorreram devido à presença de pirita nos agregados dos concretos.

No ano de 1988, em campanha realizada na barragem de Graus, na Espanha, com o objetivo de estudar as causas do comportamento anormal apresentada por ela, foi detectada a presença de sulfetos de ferro nos agregados dos concretos, da etringita secundária (predominantemente em interfaces agregado-pasta) e da gipsita. Foi também encontrado o gel da reação álcali-agregado, mas o gel apresentava-se em quantidades muito pequenas para gerar a expansão observada naquele momento (MARTINEZ, 1991; AYORA, 1998).

Moura (2012) cita que em 1993 foi realizada nova campanha complementar de extração de testemunhos de concreto na Barragem de Graus (Figura 2.2), onde ficou confirmado que os agregados possuíam sulfetos de ferro, principalmente pirrotita, expressa em $SO_3$, na ordem de 2%. Pelos estudos realizados por Araújo (2008), Oliveira (2011) e Moura (2012), foi possível confirmar que os deslocamentos horizontais identificados nesta barragem aconteceram principalmente pelo ataque interno decorrente da oxidação dos minerais sulfetos.

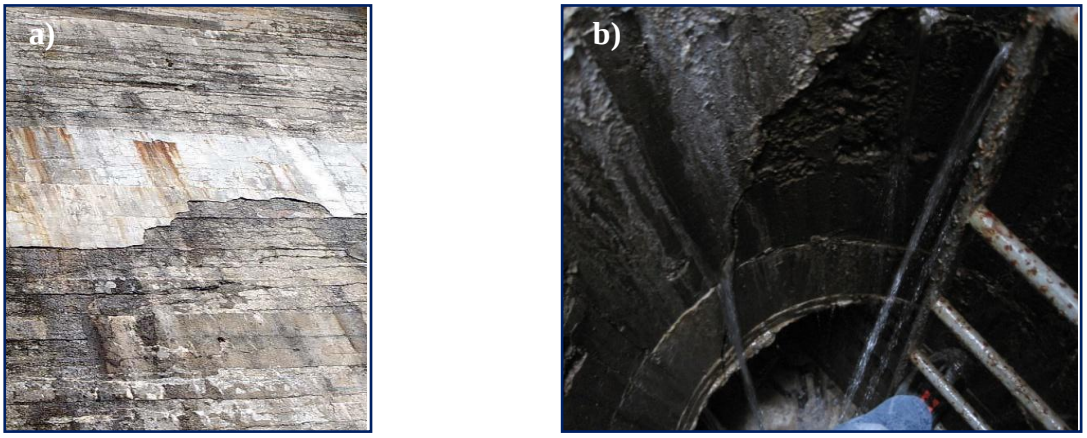
Outra barragem que também apresenta anomalias e ataque interno ao concreto decorrentes da oxidação de minerais sulfetos e, em menor escala, da RAA é a Barragem de Paso Nuevo, também na Espanha. A informação é que, principalmente nos primeiros concretos lançados, foram empregados agregados provenientes de uma pedreira com maior teor de minerais sulfetos (MOURA, 2012). Outros casos semelhantes a esses, como o da Barragem de Torán, também são citados por Araújo (2008). Aguado *et al*. (1996) citam um exemplo de oxidação da pirita catalisada por ação bacteriana em uma barragem da Austrália onde foram identificadas as bactérias *púrpuras Chromatium* e *Chorobium*, as quais aceleraram a oxidação da pirita presente no agregado, que neste caso era um quartzito, causando a desintegração do concreto de um túnel de desvio da barragem.

Schmidt *et al*. (2011) relatam a existência de uma barragem na Suíça, aonde vem sendo verificada a expansão e a movimentação do concreto, provavelmente em função das reações desencadeadas pela oxidação de minerais sulfetos nos agregados.

Atualmente, deteriorações importantes em concretos de fundações residenciais (casas e edifícios comerciais) têm sido observadas na região de Trois-Rivières, cidade de Quebec, no Canadá (Figura 2.3). Na maioria dos casos, a deterioração ocorreu rapidamente e entre três e

cinco anos após a construção (RODRIGUES *et al.*, 2012a, b; 2013). Os sintomas observados nestes concretos foram fissuras em mapa, pipocamento e coloração amarelada na superfície do concreto (Figura 2.4).

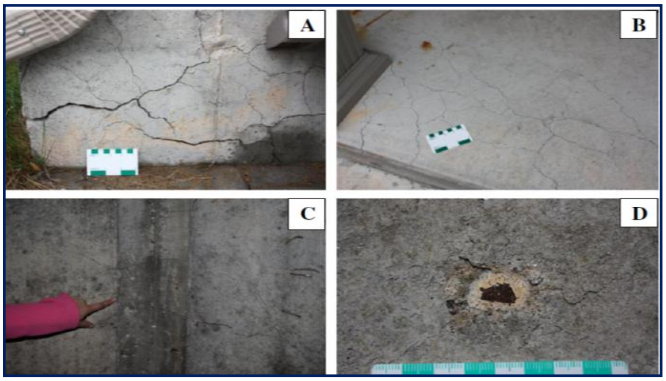
**Figura 2.2 –** Aspectos da Barragem de Graus: a) paramento de jusante com destacamentos e manchamento marrom, b) infiltração no concreto do poço de pêndulo (MOURA, 2012).




Conforme destacam Duchesne; Fournier (2011), Rodrigues *et al.* (2012a, b, 2013) tais fundações afetadas precisaram, em sua grande maioria, ser totalmente demolidas para construção de nova fundação, com o custo equiparado à construção inteira. Para algumas amostras de agregados analisadas, os teores de sulfetos verificados foram elevados, e da ordem de 5% a 7%. Porém alguns agregados chegaram apresentar teores elevadíssimos, da ordem de 50%. A rocha utilizada como agregado graúdo foi um gabro anortosítico (identificação de campo), que continha várias proporções de minerais sulfetos variados, incluindo pirita, pirrotita, calcopirita e pentlandita.

**Figura 2.3 -** Fissuras tipo mapa presentes no bloco de função de uma edificação em Quebec, Canadá (Extraído de RODRIGUES *et al.*, 2012a).

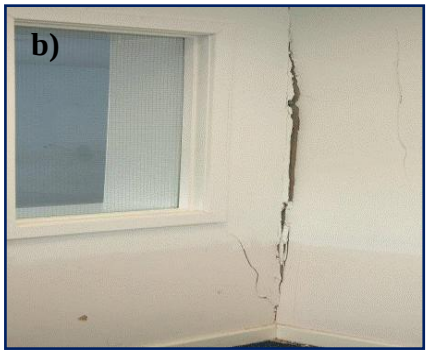
**Figura 2.4 –** Problemas observados em fundações no Canadá: a) abertura de trincas e coloração amarelada; b) fissura mapeada na laje; c) abertura de fissuras no lado interno da fundação e d) destacamento na região do agregado (Extraído de RODRIGUES *et al.*, 2012a).




Outros problemas de grandes proporções, ocorridos no exterior e relacionados às estruturas de concreto de fundações de edificações, em decorrência da presença de mineral sulfeto nos maciços de fundações ou na base de fundação (*hardcore*), têm sido relatados na atualidade, como é o caso das ocorrências diagnosticadas inicialmente por volta do ano de 2007, nos pisos das edificações (Figura 2.5) situadas nos Condados de Dublin, Kildare, Offaly e Meath, na Irlanda (TUOHY, 2012).

Conforme apresentado em Tuohy (2012), o problema citado foi ocasionado pela alteração do mineral pirita presente nos agregados calcários, que em contato com umidade e oxigênio produziram ácido sulfúrico. Por sua vez reagiu com o carbonato de cálcio formando sulfato de cálcio gerando consequente aumento de volume. Devido às proporções que o problema atingiu, para tentar solucioná-lo, houve a mobilização de órgãos como o departamento de meio ambiente e do governo, além da comunidade local. Pelo levantamento realizado, os custos de reparo estão avaliados em 50 milhões de euros (PRB, 2012).

**Figura 2.5 –** Consequências verificadas em edificações de Dublin, Irlanda: a) trincas em laje de piso, b) rachaduras em divisórias devido ao solapamento do piso. Extraído de Tuohy (2012).



No Reino Unido, diversas obras também foram afetadas em decorrência de movimentações do maciço rochoso (maciços xistosos) ocasionado pela oxidação de minerais sulfetos. Como exemplo tem-se o Hospital Landough, em Cardiff, onde parte do prédio foi danificada, uma vez que foi construído em uma escavação profunda e apoiado sobre um afloramento de xisto com presença de minerais sulfetos. O grande problema de solo piritoso vivenciado no Reino Unido conduziu a diversas pesquisas e a criação das recomendações contidas no *Building Research Establishment Special Digest* 1 (BRE, 2005) para obras de engenharia inseridas em ambientes de elevada agressividade, principalmente em decorrência de sulfatos.

# CAPÍTULO 3

# DETERIORAÇÃO DO CONCRETO PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

## 3.1 INTRODUÇÃO

Relata-se que por volta da década de 30, várias manifestações patológicas de caráter expansivo foram observadas em estruturas de concreto pertencentes a pontes e pavimentos nos Estados Unidos, sem se saber a real causa. Em função dessas anomalias, teve início o entendimento da reação álcali-agregado (RAA) com as publicações de Thomas E. Stanton, no começo da década de 40, relatando que tais expansões eram provenientes de reações envolvendo um alto teor de álcalis presente no cimento associado com certos agregados contendo opala e chert (STANTON, 1940).

De forma geral, a RAA é o resultado da interação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto entre determinados constituintes mineralógicos dos agregados e os íons $Na^{+}$, $K^{+}$, $Ca^{++}$ dissolvidos na solução dos poros do concreto, e que são provenientes principalmente do cimento. Conforme destaca Glasser (1992), como produto da reação forma-se um gel com características higroscópicas e expansivo e, em condições propícias pode resultar no surgimento de expansões e fissuras, aumento da permeabilidade, diminuição da resistência física e química e consequente colapso da estrutura.

Os principais fatores condicionantes da RAA são: teor de álcalis disponíveis no concreto, minerais reativos presentes nos agregados e a presença de umidade no concreto (HASPARYK, 1999, 2005; SILVA, 2007a; COUTO, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2008; BATTAGIN *et al.*, 2009; HASPARYK, 2011). Salienta-se ainda que a reação só se manifestará quando existirem esses três fatores, ou seja, se algum não existir, então não haverá risco de ocorrência da reação.

Em função do tipo de mineral presente no agregado e que participa da reação a RAA pode ser subdivida em dois tipos distintos, a saber: reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC).

Conforme definição contida na parte 1 da NBR 15577-1 (ABNT, 2008a) a RAS é "*um tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo*". A norma cita ainda como exemplos de sílica reativa a opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros.

Uma particularidade da RAS é a reação álcali-silicato, que conforme conceituação da NBR 15577-1 (ABNT, 2008) refere-se a "*um tipo específico de reação álcali-sílica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas"*. A norma cita que os silicatos reativos mais comuns nas rochas são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros.

Com relação à RAC, Silveira (2006) destaca que até 1935 não havia registros a respeito de reações deletérias envolvendo rochas carbonáticas. No entanto, em 1957 teve o primeiro diagnóstico desta reação no Canadá por Swenson, baseadas em investigações de expansão, fissuramento e soerguimento de concretos da região de Kingston.

Nesse contexto Paulon (1981) relata que a RAC ocorre de forma totalmente diferente das reações álcali-sílica e álcali-silicato. Este tipo de reação acontece devido à expansão das rochas carbonáticas e calcários dolomíticos argilosos, a partir do ataque dos álcalis do cimento ao calcário dolomítico, formando compostos cristalizados, como: brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico, não formando gel na RAC.

Silveira (2006), após avaliação de vários agregados de origem carbonática, constituídos por pequenas quantidades de silicatos em sua composição mineralógica, deixaram evidente que, além da desdolomitização desencadeada pelos carbonatos presentes nos agregados, caracterizando uma RAC, houve a formação do gel característico da RAS.

Alguns experimentos realizados por Silveira (2006) mostraram que as rochas carbonáticas podem não apenas causar a RAC, mas também a RAS. Este tipo de rocha pode conter tanto argilominerais expansivos (ex. esmectita) como sílica fina, podendo ambos gerar expansões no ensaio de reatividade. Tal fato mostra a necessidade de um bom conhecimento mineralógico dos agregados para uso em concreto de forma a ter uma correta avaliação do comportamento do material do ponto de vista da RAA.

Conforme amplamente destacado no meio técnico (PAULON, 1981; HASPARYK, 1999; FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000; HASPARYK, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008; GRIMAL *et al.*, 2010; HASPARYK, 2011; JIANWEN *et al.*, 2013) a expansão deletéria da RAA ocorre quando o gel, formado pela reação, absorve água e se expande. As características deste gel dependem de sua composição química e da presença de água.

Hasparyk (2011) salienta que em virtude da umidade e temperatura serem fatores que intervém na reação, não existe um tempo pré-estabelecido para a RAA se desenvolver e ser percebida. E embora alguns pesquisadores comentem que a reação normalmente leva de 5 a 12 anos para ocorrer, salvo exceções (POOLE, 1992), é arriscado confirmar esse parâmetro para determinada condição, pois existem ainda vários outros fatores envolvidos.

Munhoz (2007) relata que a RAA tem afetado obras de diversos portes na construção civil e, estruturas que sofreram uma ação moderada podem ser tratadas, recuperadas e monitoradas; porém, obras em situação mais grave, devem ter as estruturas afetadas substituídas. As expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer a resistência e elasticidade do concreto, afetando dessa forma a durabilidade da estrutura, além de afetar negativamente na sua estabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Neste contexto, Hasparyk (2005) verificou em seus experimentos que concretos afetados pela RAA procedentes da UHE Furnas, até certo estágio de deterioração, podem apresentar ganho de resistência à compressão, enquanto o módulo de elasticidade é reduzido desde o princípio. Tal acréscimo de resistência deve-se provavelmente ao preenchimento dos poros e vazios existentes no concreto pelas neoformações e a redução do módulo ocorre como resultado do surgimento de microfissuras. A autora verificou ainda que a propriedade mecânica mais afetada pela ocorrência da RAA foi o módulo de elasticidade.

Ainda, de acordo com os experimentos realizados com testemunhos de concreto por Hasparyk (2005), a pesquisadora percebeu que enquanto o módulo de elasticidade cai, a resistência pode aumentar até atingir um pico a partir do qual passa a cair ao longo do tempo. Para exemplificar, de acordo com a modelagem desenvolvida em seu trabalho e de acordo com a amostragem realizada pela autora, foi possível observar que para um tempo equivalente a 35 anos o módulo cai cerca de 46% enquanto que em um primeiro estágio, em 16 anos, a resistência aumenta em até 46%, até atingir um ponto máximo e depois cai no tempo. Pela

modelagem, foi também possível observar que em idades em torno de 20 anos, tanto a resistência quanto o módulo, tiveram uma queda de aproximadamente 24%.

Priszkulnik (2005) relata que o problema da RAA no Brasil só foi conhecido duas décadas após os primeiros registros publicados nos Estados Unidos. Isso ocorreu quando Gitahy e Ruiz, em 1963, atuando no convênio do IPT (Instituto de Pesquisa e Tecnologia), com as Centrais Elétricas de Urubupungá S.A, para construção da barragem de Jupiá, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, constataram que na composição dos agregados escolhidos para os concretos da barragem havia a presença de substâncias reativas com os álcalis do cimento, conforme Stanton havia publicado.

Diversas ocorrências foram analisadas e investigadas em todo mundo e vários fóruns e congressos foram realizados para discutir o assunto, com o objetivo de se definir as causas, entender melhor o processo de deterioração e avaliar quais as medidas mitigadoras eficientes (FIGUEROA; ANDRADE, 2007; HASPARYK, 2011). Tudo isso propiciou a criação de regulamentos específicos e normas técnicas em vários países, tais como: *Guide to the Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali-Aggregate Reaction* (CSA, 2000), no Canadá; *State of the Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity* (ACI, 1998), nos Estados Unidos; *Strutural effects of alkali-silica reaction - Technical guidance on the appraisal of existing structures* (ISE, 1992), na Inglaterra e, no Brasil, o desenvolvimento da atual NBR 15577- Agregados – Reatividade álcali-agregado (ABNT, 2008).

Conforme relatado por Andrade *et al*. (2006), a constatação de RAA em vários blocos de fundação na Região Metropolitana de Recife-PE foi um marco na normalização brasileira. O Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18), da ABNT, em 2006, iniciou a revisão das normas técnicas vigentes, relacionadas ao assunto. Em 2008, esse trabalho resultou na publicação de um conjunto de normas visando definir os requisitos para o uso de agregados em concretos: a NBR 15577 (ABNT, 2008), que é subdividida em seis partes (ABNT, 2008a; 2008b; 2008c; 2008d; 2008e; 2008f). O principal objetivo desta norma é atuar fortemente na mitigação da RAA. Segundo Battagin *et al.* (2009) ela teve como referência inicial a norma canadense CSA.A.23.1/A.23 (CSA, 2002), devido ser ela a que mais se aproximava das expectativas brasileiras.

## 3.2 MINERAIS E AGREGADOS REATIVOS

Conforme destacam Mehta; Monteiro (2008), os agregados com potencialidade reativa possuem determinadas fases mineralógicas em sua composição susceptíveis à reação com os álcalis solúveis do concreto. Além disso, características como tipo, forma, tamanho, composição dos agregados e área específica dos grãos influenciam nas interações e afetam a magnitude da reação. No caso da textura das rochas possuírem estruturas químicas e mineralógicas semelhantes, apresentarão maiores reatividades as que possuírem maiores deformações de ângulos nos minerais (MONTEIRO *et al.*, 2001).

Diamond (1976) relata que a reação álcali-sílica envolve algumas formas de sílica metaestáveis ou tensionadas eventualmente presentes nos agregados, salientando que seu efeito deletério é dependente da quantidade de álcalis presentes. O pesquisador ressalta que o efeito deletério do quartzo está associado a sua deformação geológica, o da opala em função de sua amorficidade, dos vidros vulcânicos devem-se a sua amorficidade e característica ácida (ocorre uma reação entre ácido e base em meio aos álcalis e o vidro) e por fim, dos silicatos em função de sua capacidade de esfoliação.

De modo geral, todas as rochas que apresentam sílica amorfa ou microcristalina reagem rapidamente com os álcalis. Segundo Munhoz (2007) a rápida reação das fases vítreas com os hidróxidos alcalinos é em função de sua alta energia interna, sendo que essa energia está distribuída entre as partículas que fazem parte do sistema e entre as diversas formas que cada partícula pode armazená-la.

Na reação álcali-silicato os minerais reativos possuem, normalmente, o retículo cristalino deformado (FURNAS, 1997). O quartzo está entre esses minerais, pois devido às tensões de origem geológica, na maioria das vezes apresenta o retículo cristalino deformado, sendo que a deformação do quartzo reflete-se sob a forma de extinção ondulante. Corroborando com o exposto, Hasparyk (1999) cita que as rochas contendo quartzo decorrente de processos tectônicos, especificamente o de cisalhamento, causam a deformação do cristal desse mineral que ocorre em quatro estágios: a extinção ondulante, lamelas de deformação, desenvolvimento de subgrãos e recristalização. A autora cita ainda que quanto mais desestruturado for o agregado mais ele poderá ser reativo com os álcalis do cimento. Como outros exemplos de minerais com forma desordenada que conferem caráter reativo à sílica, têm-se a opala ou sílica amorfa, calcedônia (variedade de quartzo fibroso ou criptocristalino),

cristobalita e tridimita (formas cristalizadas metaestáveis de sílica), vidros naturais ou vulcânicos (depósitos piroclásticos ou rochas vulcânicas) e os vidros artificiais (pyrex).

Outro fato de grande relevância a ser destacado sobre a influência da deformação do quartzo na reação álcali-agregado, conforme verificações experimentais realizadas por Tiecher (2010), é que o comportamento apresentado pelas rochas com diferentes graus de deformação frente à RAA não possui uma tendência única e ascendente, conforme poderia se imaginar, e sim um grau de deformação intermediário (grau 2) que apresenta maior potencial de reatividade. A autora, em seu trabalho, conseguiu classificar os grãos de quartzo em cinco graus de deformação, que variaram desde 0 (zero), que corresponde a grãos sem deformação, até grau 4 (quatro) que corresponde a grãos recristalizados a partir de subgrãos.

Conforme observado por Tiecher (2010), a presença de grãos de quartzo com baixa cristalinidade incorre em rápida ocorrência de expansões em ensaios acelerados, conforme prescrito na NBR 15577-4 (ABNT, 2008d). Porém, quando a quantidade de grãos com essa característica é pequena, a reação pode não ocorrer em campo. Por outro lado, em rochas ácidas (rochas constituídas por mais de 65% de sílica), a presença de grãos melhor cristalizados, com ou sem deformação, muitas vezes denota resultados inócuos nos ensaios acelerados, mas em campo tais rochas mostram-se reativas. Evidencia-se, assim, que em condições de elevada alcalinidade, por um período maior de tempo, o quartzo tende a se solubilizar e formar o gel expansivo da RAS.

Com relação à acidez da rocha, no que diz respeito à RAA, em um primeiro momento, poderia-se pensar que quanto mais ácida a rocha, maior é seu potencial de reação com os álcalis. Entretanto, rochas basálticas têm sido relatadas como extremamente reativas em ensaios acelerados de expansão, tais como basaltos (TIECHER, 2006), porém sem casos de obra com o problema.

Além do exposto, autores como Amo; Pérez (2001), Mehta; Monteiro (2008), Hasparyk (2011) citam ainda que apesar da existência de quartzo com ângulo de extinção ondulante, as rochas que os contém não necessariamente serão reativas, pois a reatividade depende também de outros fatores associados, tais como a textura e o tamanho dos grãos, além das condições ambientais que a estrutura se encontra.

Com relação à mineralogia dos agregados que compõem os concretos, Kihara (1993) cita que os minerais podem ser classificados de acordo com a reatividade em ordem decrescente, da

seguinte forma: amorfa (opala e vidro), microcristalina a criptocristalina (calcedônia), metaestável (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo, feldspato deformados e filossilicatos alterados).

Desta forma, é possível verificar que a reatividade do agregado está relacionada com suas características e composição mineralógica. Portanto, para a avaliação detalhada de um agregado é indispensável que se conheça a sua constituição mineralógica. Neste cenário, a norma NBR 15577-3 (ABNT, 2008c) enfatiza que a análise petrográfica é o primeiro passo na investigação da potencialidade reativa do agregado, pois fornece informações sobre a composição mineralógica, ou seja, a presença ou não de constituintes no agregado suscetíveis aos álcalis do cimento, além de fornecer seu percentual modal.

Ainda de acordo com a NBR 15577-3 (ABNT, 2008c) recomenda-se que se realize uma avaliação a nível microscópico dos agregados a serem empregados nos concretos de forma a identificar e quantificar as principais fases deletérias presentes no material rochoso. Essa análise petrográfica deve ser realizada por meio de microscópio ótico de luz transmitida (ou melhor) de dupla polarização, e o exame realizado em seção ou lâmina delgada de rocha sobre lâmina de vidro, de aproximadamente 30 μm de espessura.

Com base nessa análise petrográfica da rocha, a NBR15577-3 (ABNT, 2008c) classifica-se o agregado quanto a RAA em potencialmente inócuo (PI) ou potencialmente reativo (PR). O agregado é considerado reativo se suplantar determinados limites, que são, a saber: **5% de quartzo deformado; 3% de calcedônia; 1% de tridimita ou cristobalita; 3% de vidro vulcânico e, 0,5% de opala.** Porém, o petrógrafo pode admitir limites distintos com base em sua experiência e nas feições presentes, segundo a norma.

De forma a endossar o assunto, cita-se o anexo A da NBR15577-3 (ABNT, 2008) que apresenta uma relação de rochas e minerais susceptíveis ao desenvolvimento da reação com álcalis. Esta norma subdivide os minerais reativos em duas categorias, na primeira categoria estão os que possuem baixa cristalinidade ou com presença de sílica metaestável e vidros vulcânicos e na outra categoria engloba os minerais de quartzo.

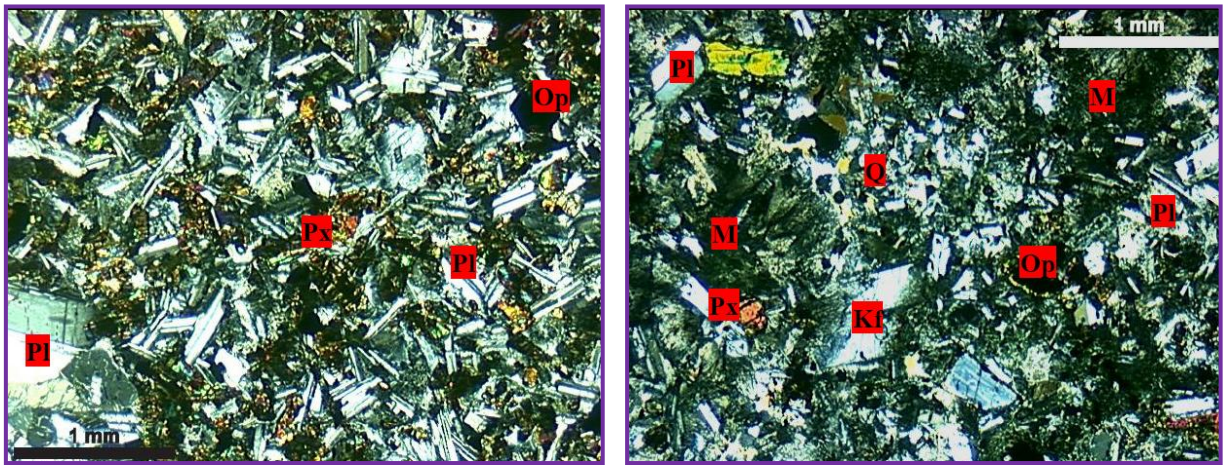
Na primeira categoria têm-se como materiais reativos a opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico. Esses podem ocorrer em rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito; e, também podem ocorrer em rochas vulcânicas que possuem vidro ou vitrofíricas, como

rochas ácidas, intermediarias ou básicas como riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, absidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítria, além de alguns basaltos.

A categoria que engloba os minerais de quartzo, a NBR15577-3 (ABNT, 2008c) traz como materiais reativos a calcedônia, quartzo microcristalino e criptocristalino, quartzo macrogranular, com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado e com quartzo microcristalino no contado do grão.

A norma ainda relata que as rochas suscetíveis a tais materiais são: os chert, flint, veio de quartzo, quartzito, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso; rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino; rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou quantidade significativa de quartzo moderadamente ou intensamente tensionado, como nas rochas ígneas (granito, granodiorito e charnockito), rochas sedimentares (arenito, grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso, arenito e arcóseo) e nas rochas metamórficas (gnaisse, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, ardósia). De forma ilustrativa, apresenta-se na Figura 3.1, uma imagem extraída do trabalho de Tiecher (2010) que foi realizada por meio de microscopia ótica para a identificação dos minerais presentes em rochas, e em especial da mesóstase responsável pela RAS.

**Figura 3.1** – Micrografia de uma rocha vulcânica, onde Pl=plagioclásio; Px=piroxênio; Op=opaco (óxido de ferro); Q=quartzo; K-f=K-feldspato; M=mesóstase. a) amostra de um basalto e, b) amostra de um riolito. Extraído de Tiecher (2010).




Em Hasparyk (2011) pode ser observada a variedade de agregados que causaram a RAA nas obras nacionais levantadas (41 casos), mostrando os riscos desta patologia nas rochas brasileiras. Conforme levantamento bibliográfico realizado por Tiecher (2010), dentre as

classes de minerais silicatos existentes, no que tange à RAA, destacam-se os minerais do grupo dos tectossilicatos, como o quartzo e seus polimorfos (tridimita, cristobalita e as variedades microcristalinas como a calcedônia), os feldspatos, feldspatóides e zeólitas. Tais minerais já foram citados por diversos autores como Diamond (1976), Paulon (1981), Hasparyk (1999, 2011), dentre outros, como responsáveis pela RAA, bem como o vidro vulcânico e a mesóstase intergranular.

Segundo Tiecher (2010), o que ocorre é que em condições de elevada alcalinidade, como no caso da solução de poros do concreto, as ligações Si-O desses minerais são facilmente quebradas. Além disto, a presença de defeitos nos cristais também facilita a reação dos tetraedros de sílica com os hidróxidos alcalinos. Outro fator que potencializa a reação são as estruturas menos estáveis, pois elas possuem estruturas mais frágeis, como, por exemplo, o vidro vulcânico e a opala.

Neste contexto, Hasparyk (1999) relata que minerais do grupo dos filossilicatos, como a mica e os argilominerais, também possuem potencial reativo, pois têm estrutura foliada e são minerais hidratados, acentuando, desta forma o poder de dissolução do mineral. Nessa mesma linha, têm-se os relatos de Batic *et al*. (1994) que observaram em seus estudos realizados com agregados basálticos frente a cimentos com alto e baixo teores de álcalis, que as expansões obtidas nas barras de argamassa não devem apenas ao inchamento da montmorilonita, mas sim a sua participação nas reações químicas. Os autores consideram a partir dos resultados de seus estudos, que agregados com teor de montmorilonita superior a 3% devem ser considerados potencialmente reativos, e assinalam que a montmorilonita tem uma participação ativa na RAS em função de sua desintegração, que libera para a solução presente nos poros do concreto, sílica e álcalis, através do mecanismo de troca catiônica.

Segundo Tiecher (2010) para as demais classes de silicatos existentes (nesossilicatos, sorossilicatos, ciclossilicatos e inossilicatos), não existem registros na literatura de uma relação direta com a RAA. Contudo, todos os silicatos podem estar envolvidos na reação e, além disto, os silicatos correspondem à maior parte dos minerais da crosta terrestre, ou seja, estão presentes na maioria das rochas e sedimentos, que por sua vez são utilizados na construção civil (HASPARYK, 1999).

De forma a melhor elucidar as possíveis diferenças que podem advir no desenvolvimento da RAS devido a diferenças na constituição mineralógica das rochas empregadas como

agregados de concreto, cita-se o trabalho de Munhoz (2007) que ao investigar um basalto e um milonito granítico, verificou que com o basalto a reação ocorreu rapidamente, apresentando o dobro da expansão do milonito granítico aos 14 dias de imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH), tendo as principais fases reativas presentes no basalto (vidro, argilas, e calcedônia) desencadeado a reação do tipo álcali-sílica. Já para o milonito granítico, cujas principais fases reativas eram o quartzo microgranular, recristalizado, cristais de quartzo e feldspato deformados, desencadeou-se a ração do tipo álcali-silicato. Comportamento semelhante já tinha sido observado por Hasparyk (1999) comparando um basalto com um quartzito.

Conforme destacado por Couto (2008) com relação à granulometria dos agregados, vários autores já verificaram que o tamanho dos grãos do agregado pode influenciar diretamente nos valores de expansão. De forma indireta, conforme cita o autor, a própria comparação entre os limites de expansão de 0,1% aos 16 dias e de 0,04% aos 12 meses, nos ensaios preconizados pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008) e ASTM C-1260 (ASTM, 2007), que utilizam agregados com menores dimensões, e pela NBR 15577-6 (ABNT, 2008) e ASTM C-1293 (ASTM, 2008), que ensaiam agregados em maiores dimensões, é um indicativo dessa influência.

Com relação ao comportamento dos agregados em função da presença de quartzo na mesóstase, cita-se o trabalho de Tiecher (2006), que avaliou petrograficamente 14 basaltos de distintas localidades e verificou que estas possuíam quantidades variadas de mesóstase nas amostras. Ao comparar as diferentes quantidades de mesóstases com as expansões obtidas em barras de argamassa confeccionadas com as rochas estudadas, a autora verificou comportamentos curiosos, como, por exemplo, em uma amostra com 20% de mesóstase resultou em expansões maiores que as expansões de outro basalto com 50% de mesóstase. A autora atribui esse comportamento a quantidade de sílica das mesóstases e não à quantidade da mesóstase, propriamente dita, pois na amostra com 20% foram observados pequenos grãos de quartzo, o que indica grande quantidade de sílica livre e na rocha com 50% de mesóstase não foram observados esses grãos.

Por fim, convém também salientar que a NBR 15577 (ABNT, 2008) não estabelece critérios sobre a avaliação e prevenção da reação álcali-carbonato. A referida norma recomenda que a avaliação seja tratada através das prescrições estabelecidas nas normas CSA A23.2-14A (2000a) e CSA A23.2-26A (2000b).

## 3.3 ASPECTOS QUÍMICOS E MECANISMOS DE EXPANSÃO

Conforme já destacado por Hasparyk (2011) os aspectos químicos envolvidos no processo da RAA tem sido bastante discutidos e difundidos na atualidade, assim como os seus mecanismos de expansão, apesar das complexidades dessa reação.

Tiecher (2006) salienta que um dos minerais que mais causa deterioração devido à RAA é a sílica amorfa. Sendo assim, verifica-se que os mecanismos de expansão mais difundidos dizem respeito à reação álcali-sílica.

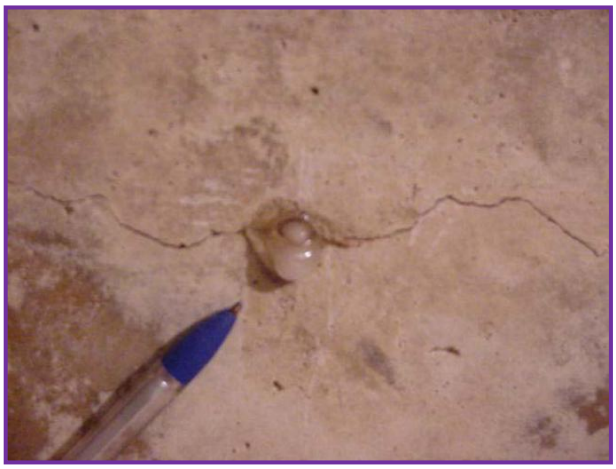
Hasparyk (2011) explica que se a solução dos poros do concreto contiver álcalis, independentemente da fonte, e a presença dos íons hidroxila ($OH^-$), pode-se processar a reação caso haja disponibilidade de sílica no sistema oriunda de fases do agregado quimicamente instáveis. No caso dos álcalis liberados pelo cimento, estes são disponibilizados à medida que a hidratação ocorre, sendo que os álcalis presentes nas fases sulfatadas são fornecidos mais rapidamente para a solução. Contudo, os álcalis que se encontram incorporados nos grãos do clínquer também ficam disponíveis à medida que se processa a hidratação, porém de forma mais lenta. Independente da fonte de álcalis, uma vez que a RAA ocorre lentamente, todos os álcalis existentes poderão participar da reação.

Taylor (1997) relata que o processo da RAA ocorre de forma contínua ao longo do tempo, sendo que em estágios mais avançados, verifica-se a fragmentação da estrutura cristalina tridimensional da sílica em ânions de silicato de variados tamanhos. No início, o gel se encontra confinado, criando tensões localizadas e podendo causar microfissurações quando as pressões geradas suplantam a capacidade resistente do material. Poole (1992) salienta que o gel formado pode migrar ao longo das fissuras e incorporar outros íons, como por exemplo, o $Ca^{2+}$, por meio de trocas iônicas com os hidratos da pasta, razão pela qual o gel pode adquirir uma composição química variável e indefinida. Esta composição química está diretamente relacionada com a capacidade de expansão do gel, conforme destacado por Hasparyk (1999) em seus experimentos envolvendo espectrometria por energia dispersiva de raios X e o MEV.

A solubilidade do gel influencia em sua mobilidade no interior do agregado e possibilita sua migração para regiões microfissuradas do próprio agregado e também do concreto. Através das microfissuras existentes, o gel pode atingir a superfície externa da peça de concreto de acordo com a disponibilidade de água junto ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008), sendo denominado de exsudado. O gel aflorado na superfície do concreto nem sempre é o

mesmo produto que se encontra no interior do concreto, que por vezes também é denominado de gel por muitos pesquisadores. O gel exsudado trata-se de um material rígido, apesar do nome que traz, possui semelhança com um vidro, e representa aquele produto da RAS localizado na superfície exposta do concreto (HASPARYK, 2005, 2011). Na Figura 3.2 tem-se a ilustração de um gel exsudado a partir de uma fissura sobre a superfície do concreto da UHE Furnas, que foi extraída do trabalho de Hasparyk (2005).

**Figura 3.2** – Detalhe de um gel exsudado a partir de uma fissura na superfície do concreto da UHE Furnas. Extraído de Hasparyk (2005).



Ainda conforme apresentado por Hasparyk (2011), as características macroscópicas dos géis exsudados podem ser variadas, porém as características físico-químicas, cristalográficas, microestruturais e atômicas são bem semelhantes. O gel é um silicato de potássio hidratado, tendo alguma semelhança com os vidros, possui baixa concentração de sódio e possui em sua estrutura água livre e adsorvida. Hasparyk (2005) constatou em seus estudos que o gel exsudado é um material com carência de cristalinidade, considerado praticamente amorfo. A pesquisadora também observou que a composição química dos géis exsudados, oriundos da RAS na UHE Furnas, a partir do quartzito reativo que compõem os concretos, é um produto composto majoritariamente por silício, potássio e sódio e em menor escala por cálcio.

Tem-se que as teorias mais difundidas sobre os mecanismos de expansão do gel são as de Hansen (1940), Vivian (1952) e Prezzi *et al.* (1997). Conforme destacado em Hasparyk (2011), a teoria proposta por Hansen, na década de 1940, atribuía a expansão da RAA às pressões hidráulicas exercidas pelos produtos da reação, denominada teoria da pressão osmótica. A teoria desenvolvida por Vivian (1952) atribuía as tensões produzidas pelo crescimento do gel quando saturado à capacidade de adsorção do produto.

Atualmente, outra explicação bem aceita para as expansões provenientes da RAA, baseia-se no conceito básico de química de superfície. De acordo com o modelo proposto por Prezzi *et al.* (1997), as expansões causadas pelo inchamento do gel são atribuídas às forças de repulsão provenientes da dupla camada elétrica. Conforme proposto, as fases sólidas podem desenvolver carga elétrica em sua superfície por adsorção de íons. Assim, entrando o sólido em contato com um líquido, a interface sólido-líquido se carrega e altera as propriedades dos materiais. Na reação álcali-sílica ocorre a interação entre a sílica presente no agregado, que possui a superfície altamente carregada por cargas negativas e a solução alcalina dos poros do concreto, que possuem os cátions. Essa interação conduz à formação de uma dupla camada elétrica, composta pelos íons $Na^{+}$, $K^{+}$ e $Ca^{++}$, localizada na superfície da sílica para neutralizar a sua carga negativa. A sílica então é constantemente dissolvida e dependendo da continuidade do fluido nos poros, os íons ficam difusos nas áreas afetadas. Com o tempo o resultado desse processo é o aumento da concentração de íons, enquanto a dupla camada aumenta de volume e a repulsão de forças diminui.

Prezzi *et al.* (1997) enfatizam ainda que o gel formado, desde que não entre em contato com a água, não causa prejuízo. Entretanto, é provável que ele se forme primeiramente em locais parcialmente saturados, fazendo com que ocorra o aumento de volume e a absorção cada vez maior da água disponível, levando a uma pressão expansiva no concreto, mesmo que de forma pontual. Foi com base neste modelo que Hasparyk (1999) comprovou a teoria de que a composição química está relacionada diretamente com a expansão do gel, sendo que quanto maior o teor de cátions bivalentes (Ca e Mg), menores as expansões da RAA. Nessa mesma linha, pesquisadores como Fournier; Bérubé (2002) observaram que quanto maior o teor de cálcio presente no gel, menor é a sua capacidade de expandir.

Com relação à cinética da RAA, a NBR 15577-1 (ABNT, 2008) descreve que a reação álcali-sílica se desenvolve de forma mais rápida que a reação álcali-silicato. Conforme endossa Regourd (1988), esta menor velocidade deve-se ao fato dos minerais reativos estarem mais disseminados no retículo cristalino do agregado. Diamond (1975), Kihara (1993), dentre outros, citam que a RAS é mais comum que as demais, sendo universalmente considerada como a reação entre os íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto e a sílica amorfa presente nos agregados. No Brasil, observa-se que a reação álcali-sílica do tipo silicato é a mais incidente, haja vista a grande variedade de rochas contendo quartzo reativo, conforme dados disponibilizados em Hasparyk (2011).

A velocidade e o desenvolvimento da RAA estão relacionados a uma série de fatores, tais como: o teor de álcalis solúveis disponíveis, a natureza, tamanho e quantidade dos agregados reativos, temperatura ambiente, disponibilidade de umidade e eventuais restrições físicas à expansão, podendo ser tanto internas quanto externas (TAYLOR, 1997).

## 3.4 MEDIDAS MITIGADORAS DA RAA

Na atualidade é razoável o domínio a respeito da reação álcali-agregado, entretanto certas questões ainda geram discussões no meio técnico. Mesmo assim, é consenso em todo o meio técnico que a prevenção é a melhor alternativa, pois é tecnicamente muito difícil combater a reação quando já iniciada em estruturas acabadas e em uso, além do que, na maioria dos casos, é técnica e economicamente inviável (SILVA, 2007; BATTAGIN *et al*., 2009; HASPARYK, 2011).

De forma resumida, as medidas empregadas na prevenção e mitigação da RAA consistem em: emprego de agregados não reativos, na maioria das vezes inviável técnica e economicamente, caso não haja disponibilidade de outra jazida próxima à obra; limitação do teor de álcalis do concreto; emprego de adições minerais pozolânicas e, uso de adições químicas ou orgânicas como compostos à base de lítio, silanos, dentre outros (HASPARYK, 2005; FOLLIARD *et al.*, 2006; SILVA, 2007; THOMAS *et al.*, 2007, HASPARYK *et al.*, 2008; SILVA, 2009; HASPARYK, 2011; REZENDE *et al.*, 2013).

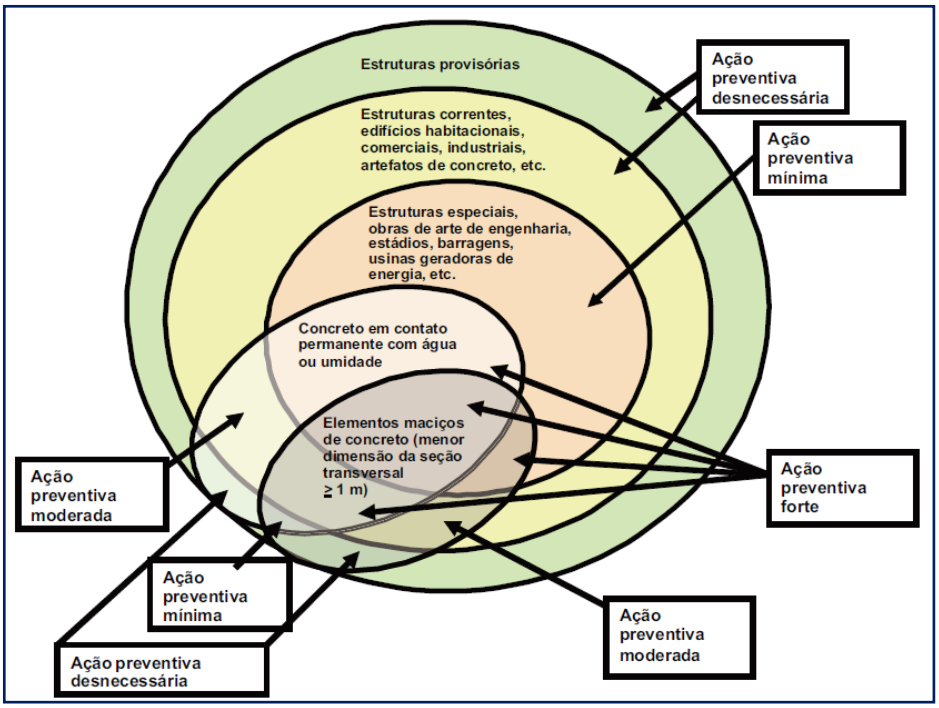
No Brasil, a NBR 15577-5 (ABNT, 2008e) estabelece algumas medidas de mitigação, como já destacado anteriormente e conhecido no meio técnico, porém agora em função da intensidade da ação preventiva, como: limitação do teor de álcalis do concreto; emprego de cimentos com adições e emprego de adições minerais como a sílica ativa e o metacaulim em combinação com qualquer tipo de cimento Portland. Além dessas medidas, a norma também enfatiza que devem ser realizados ensaios em periodicidade de amostragem de acordo com sua segunda parte da norma (ABNT, 2008b) para o acompanhamento da reatividade potencial dos diversos lotes de agregados provenientes de uma mesma jazida, e em caso de alteração na potencialidade reativa do agregado, novas medidas de mitigação poderão ser empregadas, a partir de uma reavaliação.

Em sua primeira parte, a NBR 15577-1 (ABNT, 2008a), traz a menção de que a deliberação do nível de prevenção e mitigação depende da realização de uma análise de risco do

comprometimento do desempenho da peça durante sua vida útil, onde devem ser analisados, além da composição do concreto, outros fatores como: as condições de exposição da estrutura ou do elemento de concreto ao ambiente em contato com água (se úmido ou seco); as dimensões da estrutura ou do elemento de concreto (maciço ou não maciço) e a responsabilidade estrutural.

A NBR 15577-1 (ABNT, 2008a) classifica o risco de ocorrência da RAA em função da necessidade de ações preventivas, cujos níveis são: desnecessária, mínima, moderada e forte; correspondendo essas ao mesmo grau de intensidade das medidas mitigadoras. Autores como Battagin *et al.* (2009) e Filla (2011) citam que considerando a tradição brasileira de produção e consumo de cimentos com adições, a norma brasileira considera seu uso como suficiente para prevenir efeitos danosos da reação quando a classificação da ação preventiva for mínima e estão contemplados nessa condição os cimentos CPII-E, CPII-Z, em conformidade com a NBR 11578 (ABNT, 1991), o CPIII de acordo com as especificações da NBR 5735(ABNT, 1991) e o CP IV enquadrado conforme a NBR 5736 (ABNT, 1999). Apresenta-se na Figura 3.3 a classificação segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2008a) da ação preventiva quanto à RAA.

**Figura 3.3** – Classificação segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2008a) da ação preventiva quanto à RAA. Adaptado de Battagin *et al*. (2009).



Já para as ações preventivas de moderada intensidade, Battagin *et al*. (2009) relatam que essas também correspondem às medidas mitigadoras de moderada intensidade e são atendidas com o uso de cimento Portland de alto-forno (CPIII), com pelo menos 60% de escória em sua composição ou com o uso de cimento Portland pozolânico, com no mínimo 30% de pozolâna. Assim, o emprego de cimentos compostos, atendendo às condições acima mencionadas, conforme estabelecido na NBR 15577 (ABNT, 2008), é considerado suficiente para garantir a ausência de efeitos deletérios devido à RAS em obras especiais de concreto que não contenham elementos maciços e que não estejam em contato com a água (denominação: concreto não maciço e seco).

Apesar do exposto, o grande problema é que nem sempre tais cimentos estão disponíveis na região da construção do empreendimento, segundo Filla (2011). Além disso, conforme destaca Munhoz (2007) é de suma importância saber se, em função do teor de material reativo presente no agregado, o teor de adição utilizada nesses cimentos é suficiente para conter a RAA. Essa observação está de acordo com Tiecher (2006) que, mesmo reconhecendo a diversidade de cimentos disponibilizados no mercado, afirma que ainda há necessidade de estudos mais aprofundados quanto a sua eficiência em prevenir as reações expansivas. É de conhecimento técnico que cada agregado necessita de um teor apropriado de adição para o combate de sua reatividade, devendo-se testá-lo antes do seu emprego.

Conforme citam Munhoz (2007), Miller *et al*. (2010) Hasparyk (2011), o emprego de adições pozolânicas no combate à RAA já é bem conhecido. Segundo Diamond (1984 *apud* TIECHER, 2006) a sílica presente nas adições reage com os álcalis do cimento antes que a sílica existente nos agregados seja atacada, interceptando assim o surgimento de produtos expansivos.

A incorporação de adições pozolânicas diretamente ao concreto, de forma a se ter um controle rotineiro do teor empregado, segundo Tiecher (2006), ainda não é uma prática comum no meio técnico, salvo no caso de grandes obras, como barragens ou pontes.

A utilização de adições ativas, tais como a sílica ativa, metacaulim, cinzas-volantes com alto teor de cálcio e escória de alto forno são reconhecidamente inibidores da reação álcali-agregado. A literatura aponta, em geral, quatro mecanismos de inibição da RAA associados ao uso destas adições, conforme apresentado por Munhoz (2007):

- "*Aumento da impermeabilidade do concreto;*

- *Diluição dos álcalis (redução do teor de cimento no concreto);*
- *Redução do pH da solução dos poros (consequência da reação pozolânica);*
- *Mudança na composição do C-S-H, aumentando sua capacidade de retenção de álcalis*".

A incorporação dessas adições ativas melhoram diversas propriedades tecnológicas dos aglomerantes, bem como dos materiais compósitos produzidos com a sua utilização, tais como: redução do calor de hidratação; redução da permeabilidade; maximização da resistência ao ataque de sulfatos e minimização da reação álcali-agregado. Além disso, tendo a propriedade de minimizar a reação álcali-agregado, estas adições permitem a utilização de agregados locais, mesmo que potencialmente reativos (MUNHOZ, 2007).

Conforme relatado por Battagin *et al.* (2009) a adoção de medidas sistemáticas de prevenção vem, atualmente, evitando a ocorrência da RAA, porém no passado essa iniciativa não era comum. Constituem exemplos de prevenção às barragens de Jupiá (concluída em 1963), Água Vermelha (construída entre 1975 e 1979) e Salto Osório (construída entre 1971 e 1975) dentre outras, onde foram utilizados materiais pozolânicos para inibir a expansão, com o uso local de agregados reativos. Tais empreendimentos tornaram-se exemplos de sucesso de prevenção de danos causados pela RAA.

Com relação às estruturas já consagradas, conforme relatado por pesquisadores como Fournier; Bérubé (2000), Folliard *et al*. (2006), Silva (2009), Hasparyk (2011), existem algumas técnicas destinadas ao combate da RAA, após a sua manifestação, tais como: calafetagem de fissuras, que pode proteger e reestabelecer momentaneamente a integridade do concreto fissurado, porém não impede que a expansão continue e inevitavelmente novas fissuras surjam com o passar do tempo; criação de juntas por meio de cortes nas estruturas afetadas, com o objetivo principal, nestes casos, de aliviar tensões sobre equipamentos mecânicos, tais como comportas ou turbinas; aplicação de protensão ou execução de estruturas auxiliares de confinamento para evitar distorções na estrutura. Além dessas medidas terapêuticas disponíveis, Hasparyk (2011) cita ainda a aplicação de impermeabilizantes, membranas, reforços estruturais, aplicação de produtos a base de lítio, silanos, dentre outros.

Na acepção de se tentar amenizar os efeitos da RAA, quando já instalada em uma estrutura de concreto, Kuperman *et al.* (2005) relatam que é necessário haver um mínimo de 80% de

umidade relativa para que a expansão causada pela reação seja significativa. Pelo exposto, depreende-se que uma maneira eficiente para reduzir os danos causados pela reação seria tentar impedir o contato do concreto com a água ou impedir o ingresso da umidade no mesmo.

Apesar da existência de medidas terapêuticas, Hasparyk (2011) relata que elas apenas minimizam as manifestações e as consequências dos efeitos originários do pronunciamento da RAA e, ao longo do tempo, novas intervenções podem ser necessárias, sendo, portanto essas práticas, na sua maioria, paliativas e caras e caso a RAA não seja sanada em seu processo químico ou nos fatores condicionantes, as expansões não cessarão.

Algumas pesquisas e intervenções realizadas vêm apontando a potencialidade de algumas adições químicas na atenuação do processo da RAA (CÂNDIDO, 2009; SILVA, 2009; HASPARYK, 2011). Nesse contexto, cita-se o trabalho de Silva (2009), que investigou a potencialidade de compostos a base de silanos por meio de testes de laboratório em argamassa, com vistas à aplicação em concretos contendo agregados reativos e na tentativa de minimizar as expansões residuais em estruturas que já se encontram afetadas. A autora verificou que tais produtos são promissores, porém apresentaram menores eficiências que os compostos a base de lítio, destacando assim que estudos em concretos devem ser continuados.

Estudos de expansão realizados por Cândido (2009) mostram a eficiência do lítio no combate da RAA, com níveis de até 90% na redução das expansões.

Schneider *et al.* (2008), estudando o efeito do $LiNO_3$ sobre uma amostra de gel expansivo que foi coletado em uma galeria de drenagem da UHE Furnas, verificaram a ocorrência de mudança na estrutura do gel. Antes do tratamento o gel apresentava uma estrutura composta por camadas e após o tratamento a estrutura se alterou para o formato de uma rede desordenada. Esta mudança, segundo os pesquisadores, pode explicar a redução da expansividade do gel e nesse sentido, o lítio mostra potencial, porém existem vários fatores limitantes como a forma de emprego em concretos e a perda de eficiência no tempo.

## 3.5 CASOS DE RAA

Há relatos de várias obras afetadas pela RAA no Brasil e disponibilizados para o meio técnico, destacando-se principalmente obras hidráulicas e pontes, conforme levantamento feito por Hasparyk (2011), totalizando 41 casos, sem considerar os casos em edificações,

conforme já relatado por Figuerôa; Andrade (2007) e Battagin *et al*. (2009), dentre outros. Na Figura 3.4 apresentam-se os casos de obras afetadas pela RAA, conforme levantamento realizado por Hasparyk (2011), e na Figura 3.5 ilustram-se alguns casos do fenômeno deletério da RAA e suas consequências (HASPARYK, 2011).

**Figura 3.4** – Casos de obras que se encontram afetadas pela RAA. Imagem cedida gentilmente por Hasparyk (2011).

| Obra | UF | Propriedade | Início Constr. | Término da Construção/Início de operação | Indícios e/ou evidências da RAA | Tipo de agregado |
|---|---|---|---|---|---|---|
| UHE Jurupará | SP | CBA | nd | 1947 | Divulgação com diagnóstico: 1997 | Gnaisse; biotita granito |
| Barragem de Peti | MG | CEMIG | 1942 | 1945 | 1964 | Granito-gnaisse |
| Barragem Guanhães - UHE Salto Grande | MG | | nd | 1953 | 2001 | Gnaisse |
| UHE Jaguara | SP | | 1966 | 1971 | 1996 | Quartzito |
| UHE Jaguari | SP | CESP | 1963 | 1977 | Indícios: 1985/1990 Diagnóstico: 2000 | Gnaisse milonitizado |
| UHE Apolônio Sales (Moxotó) | AL | CHESF | 1971 | 1977 | Indícios: 1980 Diagnóstico: 1984 | Granito e biotita gnaisse |
| UHE Paulo Afonso I | BA | | 1949 | 1955 | 1978 | Granito, biotita gnaisse e biotita granito |
| UHE Paulo Afonso II | BA | | 1955 | 1967 | 1978 | Granito e anfibólio gnaisse |
| UHE Paulo Afonso III | BA | | 1967 | 1973 | 1978 | Granito e biotita granito |
| UHE Paulo Afonso IV | BA | | 1972 | 1979 | 1985 | Granito, biotita gnaisse, biotita granito, anfibolito e anfibólio biotita gnaisse |
| UHE Pedra | BA | | 1964 | Barragem: 1968 Casa de força: 1978 | 1980 | Granada granulito |
| UHE Sobradinho | BA | | 1973 | 1981 | 2000 | Quartzito |
| Barragem de Tapacurá | PE | COMPESA | 1969 | 1975 | 1990 | Granito e gnaisse cataclasados |
| UTE Piratininga | SP | EMAE | nd | 1962 | 2002 | Gnaisse |
| Barragem de Pirapora | SP | | nd | 1956 | 1998 | Gnaisse |
| Barragem Reguladora Bilings-Pedras | SP | | nd | 1937 | 1992 | Granito |
| Barragem Rio das Pedras | SP | | nd | 1926 | 1992 | Gnaisse/milonito |
| Usina de Rasgão | SP | | nd | 1925 | nd | Granito/filito |
| Usina Elevatória de Pedreira | SP | | Década de 1930 | 1937 | 2000 | Gnaisse/milonito |
| Usina Elevatória de Traição | SP | | Década de 1930 | 1940 | 1994 | Milonito |
| Barragem de Joanes II | BA | EMBASA | 1969 | 1971 | 1988 | Gnaisse, migmatito e granulito |
| UHE Mascarenhas | ES | ENERGEST | 1968 | 1974 | Divulgação com diagnóstico: 2003 | nd |
| UHE Furnas | MG | FURNAS | 1958 | Barragem: 1963 Etapa 1: 1965 Etapa 2: 1974 | 1976 | Quartzito |
| UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho (antiga denominação: Usina de Estreito) | SP | | 1965 | Etapa1: 1969 Etapa2: 1972 | 1994 | Quartzito |
| UHE Mascarenhas de Moraes (antiga denominação: Usina de Peixoto) | MG | | 1953 | Etapa 1: 1957 Etapa 2: 1969 | 1994 | Quartzito |
| UHE Porto Colômbia | MG | | 1970 | 1973 | 1985 | Basalto/seixo de quartzo |
| UHE Ilha dos Pombos | RJ | LIGHT | 1920 | 1924 | 1991 | Gnaisse |
| UHE Santa Branca | SP | | 1950 | 1960 | 1995 | Gnaisse |
| UHE Sá Carvalho | MG | SÁ CARVALHO S.A. (anteriormente ACESITA) | Década de 1940 | 1951 | Divulgação com diagnóstico: 1997 | Granito |
| Barragem Atibainha | SP | SABESP | 1969 | 1973 | 1992 | Biotita gnaisse cataclástico |
| Barragem Cascata | SP | | 1973 | 1976 | 1992 | Granito-gnaisse |
| Barragem Jaguari | SP | | 1977 | 1982 | 1992 | Gnaisse milonitizado |
| Barragem Paiva Castro | SP | | 1968 | 1972 | 1992 | Biotita granito-gnaisse |
| Barragem Pedro Beitch | SP | | 1929 | 1932 | 1992 | Biotita Gnaisse |
| Barragem Ribeirão do Campo | SP | | 1950 | 1962 | 1992 | Biotita gnaisse cataclástico |
| Túnel 2 | SP | | 1969 | 1973 | 1992 | Granito |
| Túnel 6 | SP | | 1969 | 1974 | 1989 | Granito-gnaisse, biotita gnaisse, biotita gnaisse cataclástico |
| Túnel 7 | SP | | 1978 | 1981 | 1992 | Granito-gnaisse cataclástico |
| Edificações variadas, em fundações | PE | Diversas | variado | variado | 2005 | Milonito |
| Ponte Governador Paulo Guerra - blocos de fundação | PE | Prefeitura da Cidade do Recife | 1977 | 1978 | 2002 | Milonito cataclasito |
| Ponte sobre o Rio Tocantins - fundações | TO | DERTINS | 1976 | 1979 | Evidências: década de 80 Divulgação: 2003 | Quartzito e arenito |
| Ponte sobre o Rio Turvo | MG | DER/MG | Final da década de 50 | Início da década de 60 | 1996 | Quartzito micáceo e quartzo xisto cataclástico |

**Figura 3.5** – Casos do fenômeno deletério da RAA e suas consequências: a) fissuras orientadas verticais em pilar de concreto na tomada d'água - UHE Jaguari, b) desnivelamento entre juntas de trabalho e fissuras na superfície do concreto do vertedor/muro de transição – UHE Furnas (Cedido gentilmente por Hasparyk (2011), cortesia à autora de Selmo Chapira Kuperman, Desek e Furnas).

Em estudos recentes constatou-se que vários casos de RAA em estruturas de concreto brasileiras estão relacionados com a utilização de agregados de origem metamórfica, constituídos por quartzo altamente deformado. Dentre esses casos, citam-se as usinas hidrelétricas do complexo de Paulo Afonso (PA II, PA III, PA IV e Moxotó) (Figura 3.6), construídas com granito-gnaisse (SILVA, 2007a) e a Usina Hidrelétrica de Furnas, construída com quartzito (HASPARYK, 2005, 2011). Além destes, os casos já mencionados das estruturas de fundações da região metropolitana de Recife (FIGUERÔA; ANDRADE, 2007; SILVA, 2007b; BATTAGIN *et al.*, 2009; LIMA, 2009).

**Figura 3.6** – Fissuras em forma de mapa no piso da tomada d'água da UHE PA-III. Extraído de Silva (2007).

No Brasil, os casos mais recentes de RAA publicados no meio técnico referem-se às ocorrências tidas nos edifícios localizados na Região Metropolitana de Recife, local onde foram constatados aproximadamente 20 casos de reação álcali-agregado em edifícios de idades variadas, sendo inclusive observado um caso de um edifício com apenas três anos de idade (FIGUERÔA; ANDRADE, 2007).

Conforme relatado por Lima (2009), após a constatação desses casos surgiu à necessidade de os órgãos competentes da região observar o comportamento das estruturas de edifícios localizados nesta região, com o intuito de identificar e alertar os profissionais e a sociedade para os problemas que poderiam ocorrer nas fundações. A Figura 3.7, apresenta o quadro fissuratório provocado pela RAA em um bloco de sapata de um edifício residencial de Recife-PE.

**Figura 3.7** – Fissuras em bloco de fundação de um edifício com 23 pavimentos, na cidade de Recife-PE. Extraído de Lima (2009).

Conforme apresentado por Silva (2007b), com relação às fundações de edifícios do grande Recife, dentre os vários prédios vistoriados, chama atenção à fundação do edifício Solar da Piedade, vizinho do Arei Branca, que apesar de não haver relatos de problemas de RAA em sua fundação, apresentou-se com alguns pilares totalmente deteriorados no pescoço, semelhante à que levou ao colapso do Areia Branca, conforme ilustrado na Figura 3.8.

**Figura 3.8** – Pilar da fundação do edifício Solar da Piedade, Recife-PE. Extraído de Silva (2007a).

Battagin *et al*. (2009) relaciona cerca de 60 casos brasileiros de patologias em estruturas de concreto. Entre 30 destas ocorrências há fundações de prédios residenciais na região do Recife, cujos agregados eram de naturezas gnáissicas e miloníticas, onde foi comprovada a ocorrência da reação álcali-agregado. Na Figura 3.6 encontra-se uma ilustração de um bloco de fundação do Edifício Rosita Hardman, em Recife, afetado pela RAA.

**Figura 3.9** – Bloco de fundação do Edifício Rosita Hardman, em Recife, afetado pela RAA. Extraído de Battagin *et al.* (2009).

## 3.6 OUTROS ATAQUES COMBINADOS

São vários os tipos de ataques possíveis de ocorrer, podendo ser divididos em processos químicos, físicos, mecânicos, eletroquímicos ou biológicos. Entretanto, na prática os

fenômenos normalmente se sobrepõem e neste caso torna-se necessário levar em conta as suas interações (HASPARYK *et al*., 2012).

Conforme destacado por Bouzabata *et al.* (2012), tanto a RAS quanto a DEF são reações químicas endógenas que podem ocorrer em estruturas de concreto e que podem causar graves danos a elas. Em ambas as reações a presença de umidade é fundamental para o desenvolvimento e manutenção do processo. Além disto, as duas patologias se caracterizam por produzir expansões nos concretos em função da formação de produtos secundários de maior volume molecular e também com propriedades higroscópicas.

Conforme divulgado no 14º *International Conference on Alkali-Aggregate Reactions* por autores como Martin *et al.* (2012) e Seignol *et al.* (2012) é possível verificar a ocorrência em conjunto da RAA e DEF em estruturas de concretos que se encontram em deterioração por reações expansivas.

No caso de estruturas de concreto cujo ambiente externo possui alta umidade, como são os casos de barragens, pontes e demais estruturas hidráulicas, há a possibilidade de ocorrência conjunta da RAS e DEF, caso o agregado possua potencial reativo, dependendo também das características do empreendimento (LARIVE; LOUARN, 1992). Seignol *et al.* (2012) relatam que recentemente alguns casos de DEF em conjunto com RAS têm sido observados em estruturas de concreto na França.

Pesquisadores como Larive; Louarn (1992), Shayan; Quick, (1992), Johansen *et al.* (1993) e Thomas *et al.* (2008) já observaram em seus diagnósticos a ocorrência das duas patologias na mesma estrutura.

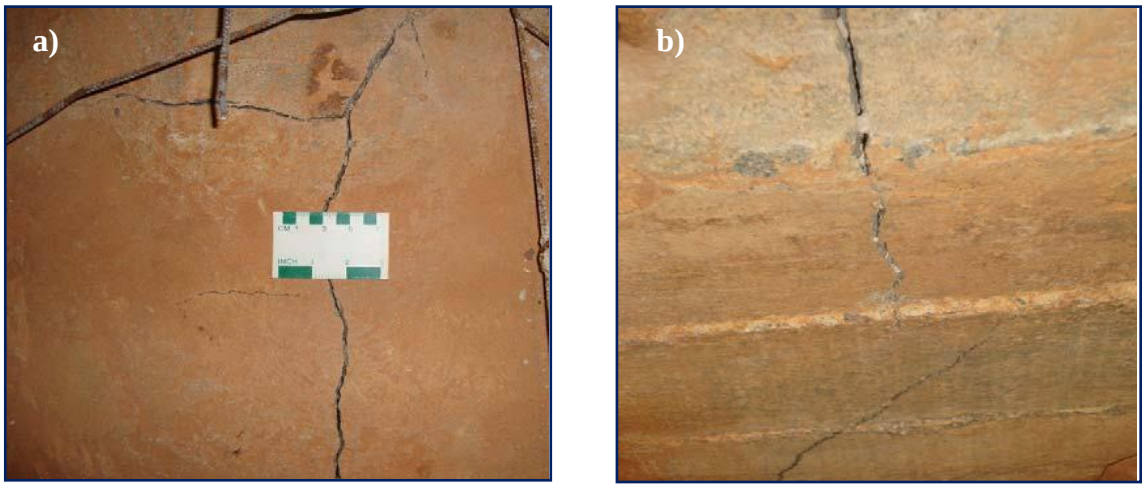
Além do ataque por sulfatos oriundo da DEF, pode-se também ter fontes internas de sulfatos, como é o caso de agregados portadores de minerais sulfetos. Neste âmbito, conforme apresentado em Hasparyk *et al.* (2012a) por meio do diagnóstico obtido para as análises e ensaios realizados nos concretos extraídos de três usinas do complexo de Paulo Afonso, percebeu-se que, apesar da ocorrência da RAA nos concretos analisados, alguns minerais sulfetos contidos nos agregados dos concretos apresentavam-se com indícios de alterações. Além disto, fases sulfatadas foram visualizadas e identificadas na argamassa dos concretos analisados, sugerindo assim um provável ataque combinado de RAA e ataque por sulfatos, este oriundo da oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados. Tais relatos podem indicar a ocorrência das duas patologias em conjunto.

Pelos experimentos de Shayan; Quick (1991), onde realizaram vários ensaios com concretos e argamassas expostos a diversas condições de umidade e temperatura, os autores observaram que primeiramente formam-se os produtos oriundos da RAA (gel), e subsequentemente, as amostras mostram a formação de etringita e fissuração na zona de transição.

De acordo com os experimentos realizados por Bouzabata *et al.* (2012) parece que o conteúdo de umidade necessário para produzir expansão por DEF é superior ao necessário para a expansão por RAS.

Conforme relata Hasparyk *et al*. (2012b), atualmente resultados de investigações mais apuradas tem mostrado no Brasil o potencial de deterioração de estruturas de concreto a partir deste ataque combinado de RAA e DEF (formação tardia de etringita) mencionado anteriormente. Os autores apresentam um estudo de caso brasileiro, mostrando alguns dos ensaios laboratoriais complementares que nortearam o correto diagnóstico das patologias em blocos de fundação de uma edificação no Brasil.

**Figura 3.10** – Fissuração observada no bloco de concreto: a) Vista superior; b) Vista lateral. Extraído de Hasparyk *et al*. (2012b).



# CAPÍTULO 4

# PROGRAMA EXPERIMENTAL

## 4.1 PANORAMA GERAL

O presente programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de investigar concretos extraídos de estruturas de cinco diferentes Usinas Hidrelétricas (UHEs) brasileiras, com foco na ocorrência de manifestações patológicas de degradação química do concreto relacionada com os agregados empregados. Dentre as possíveis patologias, o enfoque será no ataque por sulfatos, promovido pela oxidação de minerais sulfetos, e na reação álcali-agregado (RAA).

A seleção das usinas estudadas baseou-se principalmente na viabilidade técnica para inserção destas na pesquisa, além da disponibilidade administrativa, por parte das concessionárias, para liberação, tanto para explorar os concretos pertencentes ao empreendimento quanto na permissão para divulgação dos dados obtidos. Procurou-se também, dentre as possíveis usinas a serem objeto do estudo, selecioná-las de forma a avaliar concretos com diferentes litotipos de agregados, idades e classes de resistência.

De forma sucinta, o programa experimental visou realizar análises nos concretos e seus agregados, tanto em nível macro como micro, de forma a avaliar as características visuais, mecânicas e microestruturais que comprovem a ocorrência ou não de processos de deterioração química, além de tentar identificar a gênese da patologia e o comprometimento desta em relação à integridade da estrutura de concreto.

Após a seleção das usinas, procedeu-se com levantamento das principais informações técnicas de cada empreendimento, assim como das principais características das estruturas de concreto e dos materiais empregados na produção destas, sempre que disponível, de forma a subsidiar e auxiliar nas análises subsequentes.

Para tanto, realizou-se inicialmente, para cada usina estudada, criteriosa inspeção de campo de algumas das estruturas de concreto de forma a identificar e selecionar os locais com maior incidência/possibilidade de eventuais ocorrências patológicas superficiais. Tais inspeções tiveram como principal foco os concretos pertencentes às galerias de drenagem das usinas.

As regiões para a extração dos testemunhos de concreto foram selecionadas em virtude das características observadas diretamente sobre a superfície dos concretos que compõem as estruturas.

Além das extrações de testemunhos de concreto das usinas em estudo, realizou-se também coleta de materiais rochosos provenientes da mesma região de exploração de agregados para a construção da respectiva usina, com o objetivo de investigar e comparar os agregados que se encontravam no interior dos concretos com agregados de mesma origem que eles. A seleção e coleta desses materiais rochosos tiveram sempre o acompanhamento de um geólogo experiente que auxiliou, em campo, na correta amostragem e seleção de lotes representativos do maciço da região de exploração dos agregados coletados e que possuíam origens semelhantes aos empregados na confecção dos concretos das usinas.

Após a extração de testemunhos de concreto dos locais previamente estabelecidos durante a inspeção "*in loco*" procedeu-se uma nova e criteriosa inspeção, já em laboratório, da superfície dos testemunhos extraídos. Nesta inspeção observaram-se os aspectos gerais dos testemunhos, tendo-se como ênfase a busca de possíveis alterações visíveis a olho nu ou qualquer anomalia indicativa de patologia.

Na sequência, os testemunhos de concreto foram preparados para serem submetidos aos ensaios mecânicos para determinar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. De forma complementar, ocorreu também a caracterização física dos concretos como massa específica, absorção e índice de vazios, com o objetivo de subsidiar a análise final sobre as características dos concretos e para auxiliar nas considerações a serem tecidas sobre o potencial de expansão dos concretos frente à oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados.

Os concretos também foram submetidos às análises químicas para sua caracterização, compreendendo-se estas nos ensaios de reconstituição de traço de concreto endurecido e determinação do pH das argamassas dos concretos. Tais ensaios foram realizados para subsidiar os cálculos e a análise de desempenho das estruturas estudadas.

Dentre os testemunhos de concreto extraídos de cada estrutura estudada, foram selecionados para estudos mais aprofundados (como análises químicas e microestruturais), três testemunhos representativos de cada estrutura. Adotou-se como critério de seleção os valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade, procurando-se sempre selecionar os concretos

com valores próximos aos extremos e um valor intermediário de módulo, próximo à média; outro critério empregado foram as características visuais. Nestes testemunhos selecionados foi realizada uma criteriosa inspeção visual interna dos concretos, de forma a identificar as suas características e peculiaridades, além dos indícios de manifestações patológicas.

As argamassas e os agregados extraídos dos testemunhos de concreto, assim como o material rochoso procedente dos maciços de mesma origem ou do entorno das usinas, foram submetidos a análises químicas para quantificação do elemento enxofre. Os teores quantificados foram relacionados com os dados dos traços de concreto obtidos, de forma a analisar os percentuais desses elementos em relação ao consumo de cimento, e também confrontá-los com os limites disponíveis no meio técnico.

O estudo dos concretos por meio de análises microestruturais envolveram as técnicas de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, com a espectrometria por energia dispersiva de raios X acoplada, de forma a investigar produtos neoformados.

Além dos estudos citados envolvendo os agregados extraídos dos testemunhos de concreto e os materiais rochosos, procedeu-se com análises petrográficas desses para a sua caracterização mineralógica.

Os agregados e materiais rochosos também foram submetidos a análises microscópicas mais detalhadas para a identificação de minerais reativos, além de serem submetidos a ensaios de expansão acelerados complementares, ambos com foco no potencial para o desencadeamento da reação álcali-agregado (RAA) e mais especificamente da reação álcali-sílica (RAS). Esses materiais também foram submetidos a análises para a caracterização microscópica dos sulfetos, quando presentes.

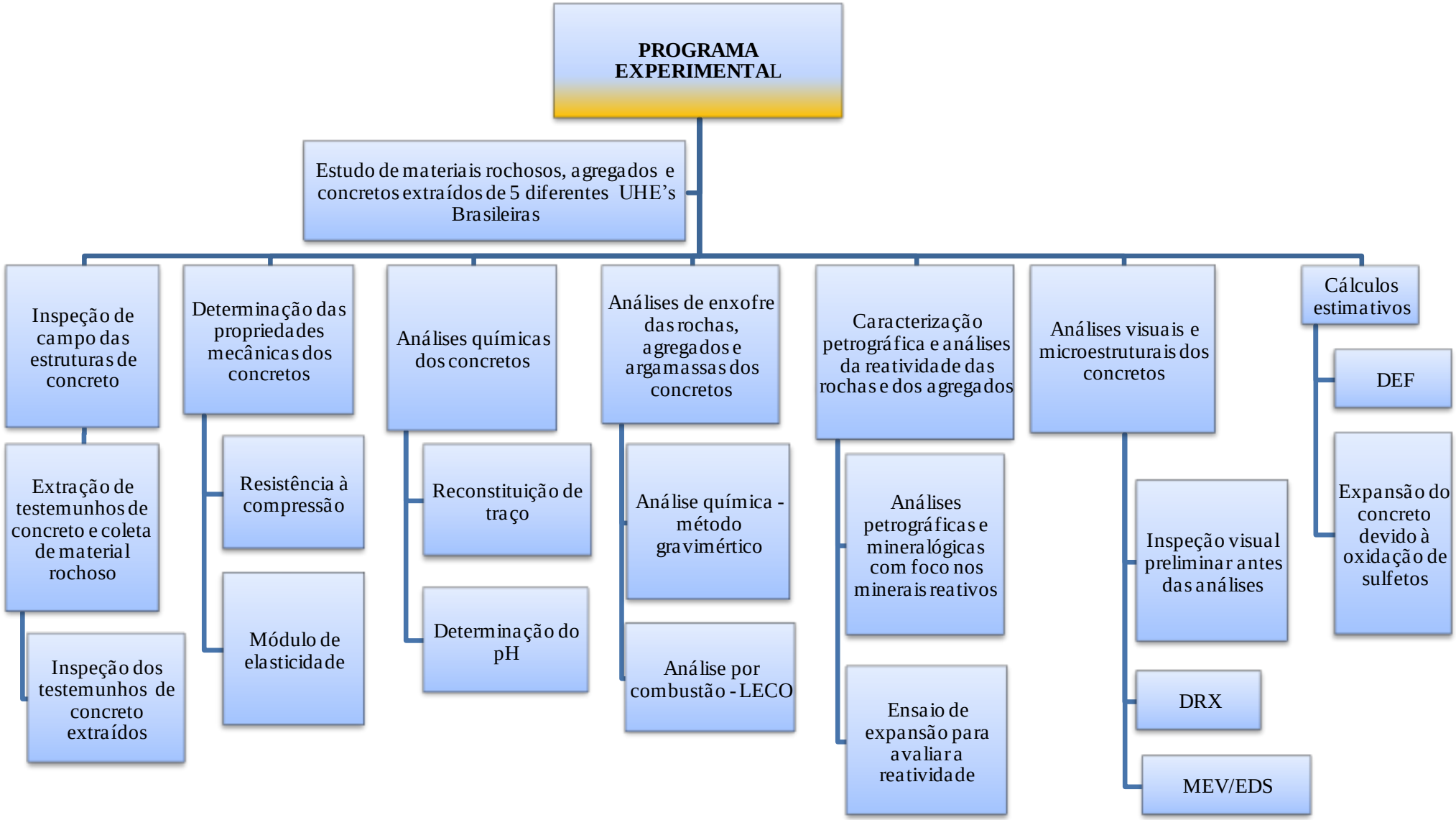
Realizaram-se também cálculos estimativos do potencial de expansão que os concretos podem estar sujeitos em decorrência da variação de volume interno causada exclusivamente pela oxidação dos minerais sulfetos presentes nos agregados. Tais cálculos basearam-se em formulações contidas na literatura, tendo sido adotadas algumas considerações a fim de se estimar a situação mais desfavorável possível, de forma a inferir se o concreto poderá sofrer grandes alterações, caso ocorra a completa dissolução dos minerais sulfetos presentes nos agregados.

Por fim, e de forma complementar, procedeu-se com cálculos estimativos da provável temperatura atingida pelo concreto após o seu lançamento e durante o período inicial de cura,

para se avaliar a possibilidade de ocorrência de formação de etringita tardia (DEF) no concreto.

Apresenta-se na Figura 4.1, de forma ilustrativa, o fluxograma do programa experimental resumido deste trabalho e na sequência, são descritos os procedimentos e análises referentes a cada método empregado e suas respectivas peculiaridades.

**Figura 4.1** - Fluxograma do programa experimental.



## 4.2 SELEÇÃO DAS UHEs E LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES TÉCNICAS

As usinas que integram a presente pesquisa são:

- Usina Hidrelétrica de Corumbá, proprietária Furnas;
- Usina Hidrelétrica Marechal Mascarenhas de Moraes (Mascarenhas), proprietária Furnas;
- Usina Hidrelétrica Paulo Afonso II (PA II), proprietária Chesf;
- Usina Hidrelétrica Paulo Afonso IV (PA IV), proprietária Chesf;
- Usina Hidrelétrica Apolônio Sales (Moxotó), proprietária Chesf.

Como já descrito, de forma a auxiliar nos estudos em questão, procedeu-se um levantamento de informações técnicas sobre cada usina em análise para a obtenção de informações pertinentes às principais características de cada empreendimento, como dados técnicos referentes aos materiais empregados, além dos dados do controle tecnológico.

## 4.3 INSPEÇÃO IN LOCO, EXTRAÇÃO DOS TESTEMUNHOS E INSPEÇÃO APÓS A EXTRAÇÃO

### 4.3.1 Inspeção "*in loco*"

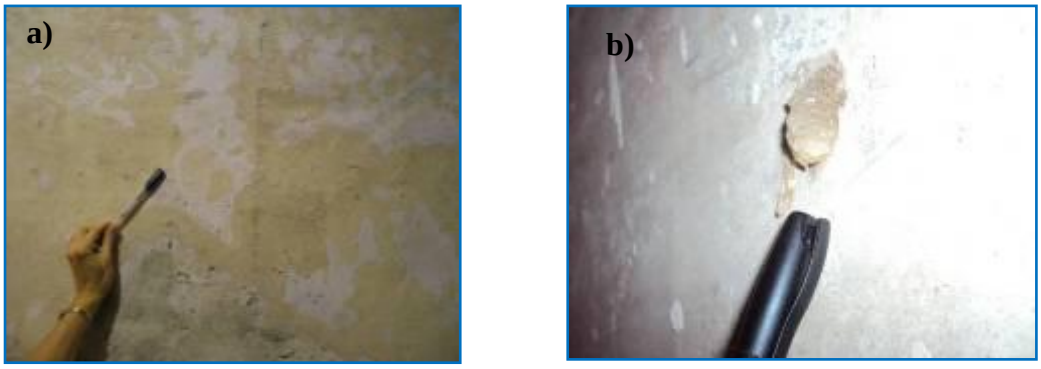
A inspeção visual consistiu em examinar, a olho nu, a superfície dos concretos de algumas estruturas das usinas selecionadas. O objetivo foi o de registrar os eventuais sintomas típicos da alteração de sulfetos quando contidos nos agregados e também da reação álcali-agregado, entre outras observações. Nesta inspeção procurou-se diagnosticar a presença de algumas das principais manifestações patológicas características de degradação química do concreto decorrentes dessas manifestações patológicas. Tais características são, a saber:

- Fissuras "mapeadas" ou orientadas;
- Manchas amareladas ou de ferrugem;

- Eflorescências brancas;
- Presença de gel exsudado;
- Desagregação do concreto ou concreto sem coesão.

Após a realização destas inspeções, foram realizadas as demarcações dos locais de interesse de extração de testemunhos de concreto. Salienta-se que as regiões demarcadas para extração levaram em consideração a existência das eventuais anomalias acima relatadas e a presença de umidade, pois de acordo com a literatura atual, o ambiente com elevada umidade é um parâmetro fundamental para desencadear processos deletérios como a oxidação dos minerais sulfetos contidos nos agregados empregados no concreto e a reação álcali-agregado. Na Figura 4.2 têm-se alguns exemplos de observações tidas durante as inspeções de campo.

**Figura 4.2** – Inspeção de campo das estruturas: a) presença de manchas esbranquiçadas na superfície do concreto, b) gel exsudado da RAA.




## 4.3.2. Extração dos testemunhos de concreto e coleta de amostra de rocha

Para a realização do processo de extração dos testemunhos de concreto foi utilizada uma sonda rotativa com sistema de arrefecimento hidráulico do cálice de extração, do tipo ZWF, com 6,5″ (polegadas) de diâmetro externo, 152 mm de diâmetro interno e 500 mm de comprimento interno livre. A extratora foi fixada na superfície dos concretos por meio de câmara à vácuo ou por meio de pontaletes, dependendo da necessidade. A extração foi realizada lentamente, com o máximo cuidado possível para não danificar o testemunho de concreto.

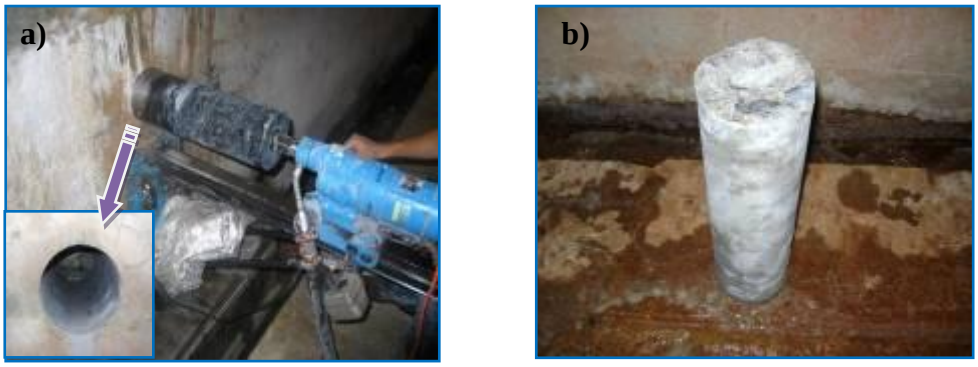
Todos os pontos de extração, determinados após criteriosa inspeção visual das estruturas de concreto, foram demarcados seguindo as recomendações adotadas por Hasparyk (2005). Tais recomendações são:

- *"Distância entre o furo e as juntas de dilatação entre blocos (verticais) de no mínimo 50 cm;*
- *Distância entre o furo e as juntas de construção horizontais (entre camadas de concretagem) e das fissuras candidatas a controle: 30 cm;*
- *Distância mínima horizontal entre furos: 45 cm;*
- *Distância mínima vertical entre furos: 60 cm;*
- *Profundidade máxima permitida para extração: 90 cm*[18]*;*
- *Resguardar os instrumentos instalados e marcações nas paredes com previsão de novos instrumentos, distanciando os furos destes em 2 m".*

Visando recuperar as áreas onde foi realizada a amostragem, após a extração dos testemunhos de concreto, os furos executados na superfície das estruturas selecionadas foram preenchidos com concreto de características semelhantes ou de qualidade superior às dos concretos da estrutura e elaborados com materiais de características conhecidas e sem potencial deletério.

A ilustração do procedimento de extração dos testemunhos de concreto pode ser visualizada na Figura 4.3.

**Figura 4.3** – Procedimento de extração de testemunho de concreto: a) equipamento de extração e detalhe do furo, pós extração; b) testemunho de concreto extraído.




[18] O limite estabelecido de 90 cm para profundidade máxima de extração deve-se principalmente à capacidade de perfuração dos equipamentos utilizados, como por exemplo, o comprimento do cálice de extração que é de aproximadamente 50 cm, além de se resguardar a integridade das estruturas de concretos.

Concomitante com a realização desta etapa procedeu-se também a coleta de material rochoso de mesma origem que os empregados na confecção dos concretos. Com base no levantamento de informações técnicas realizado para cada usina, localizaram-se as pedreiras exploradas durante a construção das usinas e, procedeu-se com coleta de materiais rochosos do local ou realizaram-se extrações de testemunhos de rocha, quando possível. Na Figura 4.4 ilustram-se os serviços de coleta de material rochoso.

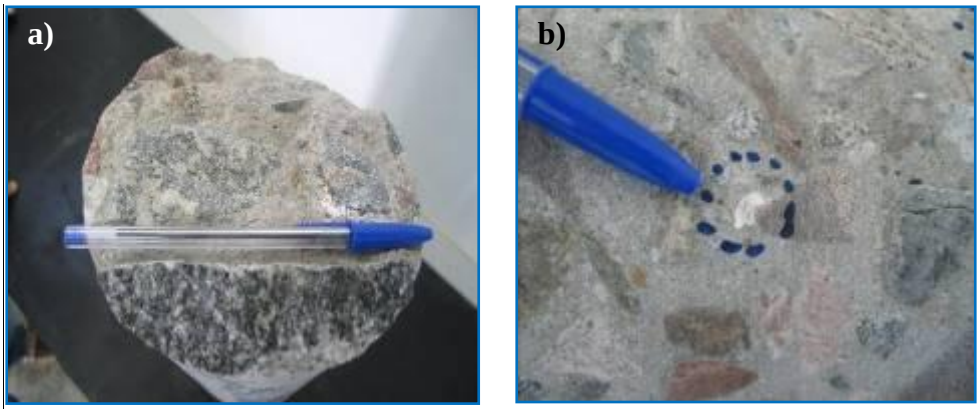
**Figura 4.4** – Coleta/extração de material rochoso: a) material proveniente de sondagem rotativa realizada na época da construção da UHE Corumbá, b) extração de testemunho de rocha na pedreira explorada na época da construção da UHE Mascarenhas, c) coleta de material rochoso na região do entorno da UHE Moxotó.

## 4.3.3 Inspeção dos testemunhos após a extração

O objetivo da inspeção dos testemunhos de concreto extraídos foi de identificar a presença de alguma manifestação patológica ou anomalia decorrente de processos de deterioração química do concreto, como aquelas desencadeadas pela reação álcali-agregado ou em virtude de processo de oxidação dos minerais sulfetos.

Tais indícios foram em geral: presença de fissuras; manchas na superfície ou regiões com tonalidades distintas; indícios de alteração do agregado como oxidação; presença de bordas nos agregados; presença de neoformações nos poros ou zona de transição, entre outras anomalias passíveis de serem visualizadas a olho nu. Apresentam-se na Figura 4.5 alguns testemunhos de concreto durante a inspeção.

**Figura 4.5** – Inspeção dos testemunhos de concreto: a) topo de um testemunho de concreto, b) lateral do testemunho de concreto indicando material branco neoformado.




## 4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

As propriedades mecânicas selecionadas e determinadas nos testemunhos de concretos extraídos das estruturas das usinas foram resistência à compressão e o módulo de elasticidade. A resistência à tração não foi determinada em função do número limitado de corpos de prova disponíveis para ensaio.

Em virtude da quantidade de testemunhos extraídos, o módulo de elasticidade foi determinado no mesmo corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão, conforme diretrizes contidas na norma americana ASTM C-39 (ASTM, 2009) e também na NBR 8522 (ABNT, 2008g).

Os ensaios propriamente ditos de resistência à compressão e de módulo de elasticidade seguiram as orientações das normalizações brasileiras, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007) e NBR 8522 (ABNT, 2008g), cujo método de ensaio se baseou na metodologia A, tendo inicialmente como referência a resistência à compressão obtida por meio do levantamento de informações técnicas para garantir a retirada do extensômetro medidor das deformações antes da ruptura, garantindo assim a sua integridade. De qualquer forma, as medidas de deformação durante ensaio foram realizadas até aproximadamente 90% da carga de ruptura estimada. A partir deste valor, foram retirados os extensômetros elétricos medidores de deformação e o corpo de prova levado até a ruptura para obtenção da resistência à compressão.

Com o valor da resistência à compressão, o módulo foi calculado a partir do diagrama tensão-deformação, em 30% da carga de ruptura, de acordo com as formulações apresentadas na NBR 8522 (ABNT, 2008g).

A velocidade de carregamento durante o ensaio foi constante e igual a 0,45 MPa/s ± 0,15 MPa/s, conforme NBR 8522 (ABNT, 2008). A prensa eletromecânica utilizada foi da marca Emic, modelo DL 100-T, e os extensômetros elétricos da marca Emic, modelo EE08, com comprimento de base de medida igual a 100 mm.

Nos casos necessários, foi realizada correção da relação altura/diâmetro (h/d) para a determinação da resistência à compressão e, a partir dessa correção, o módulo de elasticidade foi determinado. É apresentado na Figura 4.6 o esquema de desenvolvimento do ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

**Figura 4.6** – Realização do ensaio de resistência à compressão e de módulo de elasticidade no mesmo corpo de prova.

De forma a complementar à análise de resultados, procedeu-se também com ensaios para a determinação das propriedades físicas dos concretos, a saber: absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Esses ensaios foram realizados nos fragmentos dos testemunhos de concreto oriundos dos cortes realizados nestes para obtenção do corpo de prova de dimensões de aproximadamente 15 cm x 30 cm. A descrição dos ensaios, assim como os resultados obtidos encontram-se no Apêndice C, deste trabalho.

## 4.5 ANÁLISES QUÍMICAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

### 4.5.1 Reconstituição de traço

Sabe-se que as propriedades dos concretos estão diretamente ligadas ao traço do concreto, ou seja, ao proporcionamento dos constituintes que compõem a massa sólida. Além disto, de forma a possibilitar comparar com dados técnicos levantados sobre a construção e o controle tecnológico empregado durante a fase de execução do empreendimento, é de suma

importância comparar as propriedades dos concretos extraídos com as propriedades obtidas na época da construção e para as quais foram projetados.

Desta forma, o traço de concreto obtido no ensaio pode subsidiar encontrar as dosagens de referência, quando obtidas no levantamento de informações técnicas da estrutura em estudo, possibilitando inferir sobre o desempenho apresentado com o decorrer do tempo, além de servir como base nos cálculos relativos aos concretos.

A metodologia empregada teve como base o método IPT, além do trabalho apresentado por Quarcioni (1998).

Para a realização do ensaio de reconstituição de traço dos testemunhos extraídos realizou-se o agrupamento destes em função da região de extração, sendo cada testemunho preparado separadamente, iniciando-se com a separação física dos agregados graúdos e das argamassas dos concretos. Tal procedimento foi realizado com o máximo de cuidado para não haver nenhuma contaminação da amostra e de forma a obter o mínimo de perda de material.

Após a separação entre agregado e argamassa, procedeu-se a pesagem de cada fração, obtendo-se assim a fração referente a estes constituintes em relação à massa total preparada inicialmente.

Após a obtenção de cada fração, o agregado foi quebrado manualmente até que todo material estivesse passante pela peneira de n. 04 (abertura nominal de 4,75 mm) e a argamassa moída até que todo o material passasse pela peneira n.20 (abertura nominal de 0,84 mm). O registro da sequência das etapas de preparação dos testemunhos de concreto para o ensaio de reconstituição de traço do concreto endurecido pode ser visualizado na Figura 4.7.

**Figura 4.7** – Preparação do testemunho de concreto para a realização da reconstituição de traço: a) separação do agregado e argamassa, b) quebra manual do agregado, c) peneiramento do agregado, d) quarteamento do material.

Para a obtenção do traço unitário 1:m, onde o m representa a soma da massa de agregado graúdo e miúdo presentes no concreto e representado em proporção unitária com a massa de cimento, realizou-se análise química tanto da fração agregado graúdo quanto da fração argamassa.

De forma geral, procedeu-se inicialmente com a determinação da parte volátil e posteriormente com a quantificação dos óxidos constituintes de cada fração. Empregando-se metodologia química gravimétrica quantificou-se o teor de umidade, perda ao fogo, resíduo insolúvel, sílica dissolvida e, por espectrofotometria de absorção atômica, empregando a solução filtrante obtida na determinação da sílica dissolvida, procedeu com leitura nesse equipamento para a determinação do óxido de cálcio e óxidos de ferro, alumínio e magnésio.

O cálculo do teor de cimento e do traço do concreto pode ser baseado em três parâmetros: o anidrido silícico, o óxido de cálcio e o resíduo insolúvel, fazendo-se para isto as seguintes considerações:

- Todo resíduo insolúvel do concreto é proveniente somente dos agregados graúdo e miúdo (despreza-se o resíduo insolúvel do cimento);
- Todo o anidrido silícico do concreto é proveniente apenas do cimento, uma vez que os agregados não possuem sílica solúvel nas condições de ensaio;
- Todo óxido de cálcio é proveniente apenas do cimento.

Para proceder com o cálculo do traço com base nos dois últimos parâmetros (sílica dissolvida e óxido de cálcio) deve-se ter os dados da composição química do cimento empregado no concreto de forma a compará-los. Além disto, para comparar a análise química do concreto com a do cimento utilizado no preparo desse concreto é necessário eliminar a umidade e a perda ao fogo. Os cálculos devem ser refeitos recalculando os resultados na base dos não voláteis para base dos voláteis. Isto é realizado recalculando os demais constituintes da análise química para 100%, sem os compostos voláteis.

Desta forma, com os valores obtidos para a análise química e os dados levantados obtém-se o traço do concreto endurecido.

Com o traço unitário 1:m, obtido com base no resíduo insolúvel, pode-se obter o valor do consumo de cimento e, para tanto, leva-se em consideração os valores de massa específica do

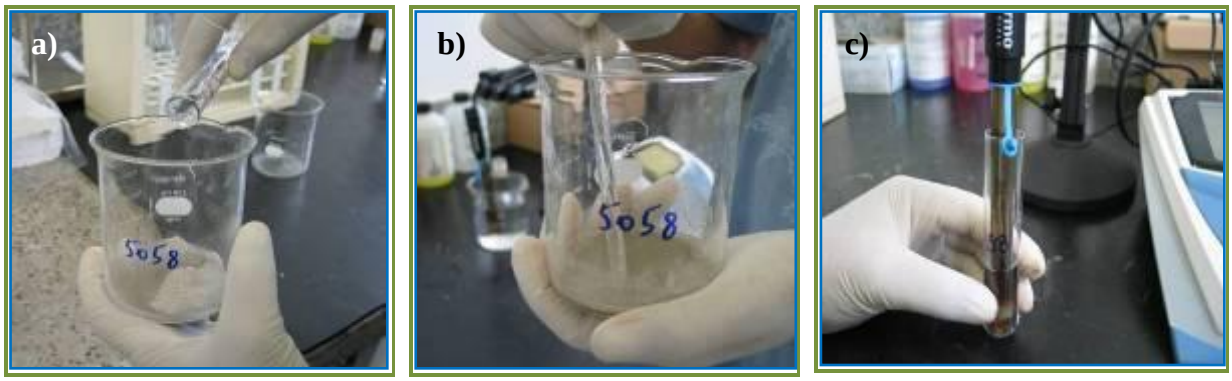
cimento, massa específica do agregado, a/c (relação água/cimento) e índice de vazios dos concretos.

## 4.5.2 Determinação do pH

Para quantificação do pH da argamassa dos concretos estudados adaptou-se o procedimento de ensaio apresentado por Jenifer *et al.* (2007). Tal procedimento, de forma sucinta, compreendeu na separação física da argamassa dos testemunhos de concreto, e posterior moagem desta por meio da utilização de almofariz de ágata, e procedendo com o peneiramento através da peneira ABNT nº. 100 de abertura nominal de malha 150 $\mu$m.

Após a redução a pó da argamassa, tomaram-se aproximadamente cinco gramas deste material, acondicionou-o em um béquer de capacidade volumétrica de aproximadamente 250 ml, e 10 ml de água deionizada na temperatura de 22ºC (temperatura de ambiente laboratorial climatizado), realizando-se sua mistura com auxílio de um bastão de vidro, sem ponta de borracha, até a completa dissolução da parte solúvel. Posteriormente realizou-se a filtração da solução, empregando papel de filtração média. O filtrado, após ser recolhido e acondicionado em um tubo de ensaio, foi submetido à leitura de seu pH por meio da introdução da microssonda do aparelho medidor de pH (Figura 4.8).

**Figura 4.8** – Ilustração da determinação do pH da argamassa: a) adição de água deionizada no material em forma de pó, b) mistura do material no Becker com um bastão de vidro, c) medida do pH.



## 4.6 ANÁLISES PARA A QUANTIFICAÇÃO DE ENXOFRE DAS ROCHAS, AGREGADOS E ARGAMASSAS DOS CONCRETOS

### 4.6.1 Análise química gravimétrica

O objetivo das análises químicas gravimétricas foi o de quantificar o teor de enxofre de três formas, a saber: enxofre total, na forma de sulfetos e na forma de sulfatos presente nas amostras. Amostras de agregados e argamassas procedentes dos testemunhos de concreto foram selecionadas para esta análise, além de amostras de rochas e/ou agregados coletados do entorno das usinas. As análises químicas foram realizadas em amostras moídas (material inferior a 45 μm, passante na peneira nº 325), seja das rochas e/ou agregados, ou das argamassas dos concretos.

Estas análises basearam-se na dissolução do material analisado por meio de ácido nítrico e do clorato de potássio. Em resumo, os minerais sulfeto se dissolvem nesta solução e após sua dissolução em meio aquoso realiza-se a filtração e adiciona-se cloreto de bário ($BaCl_2$) à solução filtrada, até a total precipitação do composto sob a forma de sulfato de bário ($BaSO_4$), que é insolúvel. O precipitado é lavado abundantemente com água destilada até a eliminação completa de cloreto. Ao final o precipitado é calcinado, pesado e o teor de enxofre calculado.

### 4.6.2 Análise por combustão - LECO

De forma complementar, foi realizada também a determinação do teor de enxofre total tanto dos agregados e/ou material rochoso como das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto por meio de um analisador de enxofre por combustão, denominado LECO.

Em resumo, a análise consistiu na calcinação da amostra em um forno tubular aquecido a temperatura próxima de 1500°C, sob fluxo contínuo de um gás inerte, neste caso o oxigênio, que funciona como gás de arraste. O enxofre, nesta temperatura e em um ambiente com grande disponibilidade de oxigênio é convertido em sua forma molecular $SO_2$ e posteriormente oxidado para sua forma mais estável de $SO_3$. Essas espécies são arrastadas pelo fluxo de oxigênio até um sensor de infravermelho devidamente calibrado que faz a leitura da concentração deste elemento.

## 4.7 AVALIAÇÃO DOS TEORES DE ENXOFRE EM RELAÇÃO AO TRAÇO DE CONCRETO

Após a obtenção dos valores de enxofre a partir das análises químicas gravimétricas citadas em 4.6.1, procedeu-se uma avaliação complementar dos teores de enxofre dos agregados e das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto em relação aos traços obtidos para os concretos, a fim de verificar o quanto representam os teores de enxofre quantificados em relação ao consumo de cimento e confrontá-los com alguns limites preconizados na literatura.

De forma geral, procedeu-se inicialmente a conversão do elemento enxofre para a forma oxidada de anidrido sulfúrico ($SO_3$), conforme comumente expresso em análises químicas. Tal procedimento estequiométrico consiste apenas em acrescentar a massa do oxigênio presente no composto. Essa conversão é realizada para o enxofre quantificado sob a forma de sulfato e também sob a forma de sulfetos, tanto para os agregados quanto para as argamassas, sendo que o valor de $SO_3$ total representa a soma dessas duas determinações.

Como o cimento é parte integrante do concreto, e sabendo que tal constituinte possui a adição de sulfatos, geralmente sob a forma de sulfato de cálcio di-hidratado (gipsita) com a função de regular a pega do cimento, e este já se encontra no concreto combinado com os produtos oriundos da hidratação do cimento, procedeu-se, nos cálculos das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto, o desconto do enxofre proveniente do cimento na parcela total de enxofre quantificada na argamassa.

O procedimento mencionado anteriormente resulta na simples subtração do percentual de $SO_3$ total quantificado na argamassa por meio da análise química gravimétrica, da porcentagem do teor aproximado de sulfatos, expresso em $SO_3$, provenientes do cimento. O teor de sulfatos do cimento foi estimado com base nos dados dos controles tecnológicos obtidos com o levantamento de informações técnicas realizado para casa usina.

Foi possível identificar, por meio das análises por microscopia ótica realizada com os agregados extraídos dos testemunhos de concreto, o tipo de sulfeto predominante nas amostras analisadas. Logo, procedeu-se também com cálculos do teor total deste mineral em relação ao consumo de cimento empregado no traço, sendo todo o enxofre na forma de sulfetos quantificado por análise química (item 4.6.1), convertido para a forma do sulfeto identificado na microscopia ótica (item 4.10.1), como sendo o principal nas amostras.

Ao final, os valores calculados são confrontados com os limites obtidos na literatura.

## 4.8 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS

Para caracterização petrográfica e mineralógica dos agregados e das rochas, foi realizada a descrição petrográfica dos minerais por meio da técnica de microscopia ótica por luz transmitida, classificando petrograficamente os materiais rochosos através da descrição dos minerais, da textura e de suas estruturas.

As análises por microscopia ótica de luz transmitida foram realizadas em lâminas delgadas e permitiram a classificação da origem das rochas e dos agregados, identificação de seus constituintes mineralógicos com o percentual semiquantitativo, entre outras características relacionadas à textura e relações petrogenéticas.

Destaca-se que uma análise visual/macroscópica precedeu as análises por microscopia ótica das amostras, antes da preparação das lâminas, observando-se características gerais do material.

O equipamento usado foi o OPTON-TNP-09-NT - Microscópio Petrográfico Trinocular 40x a 630x, com câmera 3.0 MP acoplada.

## 4.9 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS FRENTE À RAA

É de grande importância o conhecimento da potencialidade reativa dos agregados frente aos álcalis do cimento. Desta forma, realizaram-se análises mineralógicas para a identificação da presença de minerais deletérios e procederam-se também com ensaios de expansão por meio do método acelerado em barras de argamassa.

Tais análises e ensaios foram realizados tanto com os agregados extraídos dos testemunhos de concreto (seguindo o critério disposto no item 4.1) quanto com os materiais rochosos coletados durante visitas de inspeção.

### 4.9.1 Análise microscópica para a investigação de minerais reativos

Com o objetivo de identificar e quantificar a presença de minerais potencialmente deletérios no que diz respeito à reação álcali-sílica, durante as análises por microscopia ótica, para a caracterização petrográfica e mineralógica dos agregados e rochas, citadas em 4.8, foi enfatizada a verificação dos minerais potencialmente reativos seguindo-se as recomendações contidas na NBR 15577, Parte 3 (ABNT, 2008c).

### 4.9.2 Ensaio de expansão para avaliar a reatividade

Os ensaios acelerados de expansão em barras de argamassas para avaliar a reatividade dos agregados e dos materiais rochosos coletados seguiram as prescrições normativas da NBR 15577, Parte 4 (ABNT, 2008). Para isso, os agregados e materiais rochosos foram fragmentados até a obtenção das frações necessárias contidas na norma.

O ensaio consistiu na moldagem de três barras de argamassa com dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm, para cada agregado ou material rochoso em análise, na forma de areia artificial, combinado com um cimento padrão (normalizado), com relação a/c igual a 0,47, e uma proporção cimento:agregado de 1:2,25. Após 24 horas da moldagem, as barras foram desmoldadas e curadas em água por mais 24 horas a uma temperatura de 80ºC. Depois de curadas, elas foram retiradas uma a uma, fazendo-se a leitura do comprimento inicial e, acondicionadas em solução aquosa de NaOH 1N, a 80ºC, sendo medidos seus comprimentos diariamente até atingir idade de 30 dias. Ao final do ensaio, a expansão média é comparada ao limite máximo de 0,19% de forma a confirmar se o agregado possui ou não potencial para a RAS.

## 4.10 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS EM RELAÇÃO AOS SULFETOS

As análises microscópicas foram realizadas tanto para os agregados extraídos dos testemunhos de concreto, quanto para os materiais rochosos coletados.

### 4.10.1 Análise microscópica para a investigação de sulfetos

Por meio da técnica de microscopia ótica por luz refletida, realizada em seções polidas das amostras, houve a identificação dos minerais opacos presentes nos agregados, e mais especificamente dos sulfetos presentes nestes opacos. Destaca-se que as análises foram apenas qualitativas.

Essas análises foram realizadas tanto em fragmentos de agregado "*in natura*" quanto em amostras reduzidas a pó, estas tiveram de ser moídas em moinho de disco orbital (modelo MA-360, marca Marconi) até atingir a granulometria inferior a 147µm (passante na peneira # 100).

As amostras foram inseridas, a vácuo, em um conjunto composto por molde cilíndrico e resina, esta pré-aquecida a 50ºC para facilitar a sua percolação pelas amostras. Posteriormente, os moldes contendo a resina ficaram em repouso até a secagem, quando então foram desmoldados e serrados no sentido transversal à base próxima ao centro gerando uma superfície para polimento.

Sobre a superfície serrada realizou-se o desbaste e polimento da seção em politriz (modelo Struers DP-9U2), utilizando lixas, panos de seda sintética e de veludo sintético, com o uso de pasta diamantada em diversas granulometrias. Entre cada fase de mudança de pasta ou pano, as amostras eram limpas em ultrassom, com imersão em álcool isopropílico para remoção de eventuais resíduos provenientes da pasta de granulometria mais grossa.

Pelas análises também foram avaliados o tipo e o estágio das alterações porventura existentes nos minerais sulfetos, quando presentes.

Foi empregado nesta etapa um microscópio ótico Axioskop 40 Pol, uma câmara de vídeo, modelo DFC295, marca Leica, acoplada ao microscópio e uma placa digitalizadora para o computador.

### 4.10.2 Mapeamento químico por espectrometria por energia dispersiva de raios X acoplada ao microscópio eletrônico de varredura

Análises complementares com algumas amostras específicas de rocha selecionadas envolveram a microscopia eletrônica de varredura (MEV), fazendo uso de **mapeamento**

**químico por EDS** (mapeamento da composição química por espectrometria por energia dispersiva de raios X – EDS acoplado ao MEV - Mais comumente conhecido como "*Dot Mapping*", ou também mapeamento por pontos).

O objetivo destas análises foi o de investigar de forma mais detalhada os sulfetos e as suas alterações visualizadas por meio das análises petrográficas realizadas em seções polidas confeccionadas com os agregados em questão. Na Figura 4.9 tem-se a ilustração de três seções polidas confeccionadas com agregados dentro de moldes contendo resina para este tipo de análise.

**Figura 4.9** – Ilustração de seções polidas contendo agregado graúdo para análise microscópica de identificação de sulfetos e também para *Dot Mapping*.

Dentre as amostras pesquisadas por essa técnica, selecionaram-se duas amostras de agregados extraídos dos testemunhos de concreto, sendo uma proveniente do testemunho extraído da tomada d'água da UHE PA II (C1.PAIITa) e a outra proveniente do testemunho extraído do vertedor da UHE PA IV (C6-PAIVVt).

## 4.11 ANÁLISES VISUAIS E MICROESTRUTURAIS DOS CONCRETOS

Após a realização dos ensaios de caracterização mecânica e previamente às análises microestruturais dos testemunhos concretos selecionados, foram realizadas inspeções visuais internas. Na sequência, foram efetuadas análises por difração de raios X (DRX) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectrometria por energia dispersiva de raios X (EDS).

Estas análises tiveram o objetivo de avaliar a microestrutura interna dos concretos e investigar a existência ou não de alguma patologia química. A seleção de amostras seguiu o critério disposto no item 4.1. Os testemunhos de concreto foram fragmentados com o uso de martelo, ponteira e talhadeira com o intuito de realizar uma inspeção visual inicialmente, localizar eventuais regiões com alteração e selecionar material para análise, fazendo também o uso em paralelo de lupa.

### 4.11.1 Inspeção visual preliminar antes das análises

As inspeções internas prévias ocorreram durante a preparação das amostras. O objetivo foi o de verificar e registrar qualquer anomalia visual existente no interior dos concretos. Essa preparação consistiu na fragmentação dos testemunhos para obtenção e seleção das amostras para análise. Durante as inspeções realizadas, as principais características observadas foram: aspecto da zona de transição entre os agregados e a pasta, presença de bordas e microfissuras próximas aos agregados ou nos próprios agregados, além das microfissuras na argamassa, manchas de oxidação nos agregados ou nas argamassas e a presença de poros preenchidos com produtos neoformados, dentre outros.

### 4.11.2 Análise por difração de raios X

As análises por difração de raios X realizadas tiveram caráter qualitativo e foram realizadas em amostras de argamassas extraídas dos concretos.

Os estudos por difração de raios X envolveram as amostras na condição integral, empregando-se o método do pó não orientado. Para tanto, a preparação das amostras foi feita a partir da moagem das argamassas obtidas dos concretos, até obtenção de material inferior a 45 μm (passante na peneira nº 325), sendo na sequência submetida à análise por difração para a identificação dos compostos cristalinos presentes.

Deve-se destacar que o método empregado possui um limite de detecção da ordem de 5% em condições usuais de trabalho; portanto, alguns constituintes que venham a ocorrer na amostra abaixo deste limite poderão não ser detectados por esta técnica. As análises foram realizadas em Furnas, em um difratômetro da marca Siemens, modelo D5000.

As amostras por difração foram analisadas sob voltagem 40 kV e amperagem de 30 mA, em sistema θ/2θ, com velocidade de varredura de 0,05º/seg, de 3º a 70º 2θ. A fonte de energia é

um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda ($\lambda$) são: K$\alpha$ 1,5418 Å e K$\beta$1 1,3922 Å. As interpretações foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se software para captura de dados Diffrac Plus versão 2,3, atualizado em 2009. Para interpretação de dados, Software EVA, versão 2009, com banco de dados de 2009 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

### 4.11.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada em conjunto com a técnica de espectrometria por energia dispersiva de raios X (EDS). Para a execução das análises por MEV, as amostras foram fragmentadas com o intuito de realizar uma inspeção visual inicialmente, localizar eventuais regiões com alteração e selecionar material para análise, fazendo também o uso em paralelo de lupa.

Após a inspeção visual, definição dos pontos de interesse e seleção de superfícies de fratura obtidas pela fragmentação dos testemunhos de concreto, procedeu-se com a colagem das amostras com tinta prata condutora em porta amostra condutor, de alumínio.

Após a colagem das amostras, a superfície delas recebeu a deposição de uma fina camada de material condutor (no presente caso, à base de ouro - Au) para que pudesse ser visível ao MEV. Este procedimento é denominado de metalização e possui objetivo de transformar as amostras em material também condutor. Desta forma, os espectros obtidos a partir das microanálises realizadas poderão conter o elemento Au, não fazendo parte da composição final das fases identificadas.

Na realização das análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as amostras foram avaliadas em superfícies de fratura, usando-se o detector de elétrons secundários, sendo empregados dois microscópios eletrônicos de varredura em função das épocas distintas disponibilizadas das amostras e disponibilidade de equipamento, a saber:

- Marca Leica, modelo S440i, em conjunto com EDS da marca Oxford, modelo 5431, do laboratório da Eletrobras Furnas, situado na Gerência de Serviços Tecnológicos – GST.E (antigo DCT.E);

- Marca JEOL, modelo JSM – 6610, equipado com EDS, ThermoScientific NSS Spectral Imaging, do laboratório multiusuário de microscopia de Alta Resolução (LABMIC) da UFG.

Por meio da análise de imagens no MEV, fazendo associação com a microanálise EDS, foi possível avaliar a estrutura interna dos materiais a nível microestrutural e verificar as possíveis neoformações presentes.

## 4.12 ANÁLISE DO POTENCIAL DE EXPANSÃO DOS CONCRETOS DEVIDO À OXIDAÇÃO DE MINERAIS SULFETOS

Um dos grandes desafios na atualidade é o diagnóstico e a análise do comportamento de estruturas de concreto afetadas por fenômenos expansivos oriundos de ataque interno, como pode ocorrer, por exemplo, devido à oxidação de minerais sulfetos presentes em agregados. Pesquisadores como Sarkar *et al.* (2010), Santa *et al.* (2011), Oliveira (2011), Moura (2012), Oliveira *et al.* (2013a, b) apresentam alguns modelos ou análises para se quantificar e prever o desenvolvimento da expansão total promovida por esse tipo de ataque interno.

Neste cenário, propõe-se o presente cálculo como uma forma de modelo estimativo para a previsão do potencial de expansão volumétrica do concreto promovido pelo ataque interno desencadeado pela oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados dos concretos. Para tanto, fez-se uso de algumas formulações e considerações apresentadas na literatura (POMMERSHEIM; CLIFTON, 1994; CASANOVA *et al.* 1996; CASANOVA *et al.* 1997; AGUADO *et al.* 1998; RIMSTIDT *et al*., 2003; ARAÚJO, 2008; SARKAR *et al*., 2009; OLIVEIRA, 2011; MOURA, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2013a, b; GAO *et al*., 2013) para quantificar a expansão devido à oxidação dos minerais sulfetos.

Por meio de algumas equações publicadas na literatura calculou-se a expansão volumétrica total que pode ocorrer internamente no concreto caso todos os minerais sulfetos se oxidem. Essa expansão é obtida pela soma de duas sucessivas reações expansivas, primária e secundária, que ocorrem com a oxidação dos minerais sulfetos.

Primeiramente, dependendo dos mecanismos difusionais existentes e das características dos materiais envolvidos, podem originar-se óxidos e hidróxidos metálicos no interior do concreto, conduzindo na denominada expansão volumétrica primária. A expansão

volumétrica secundária é resultante da formação de etringita secundária, monossulfato ou a gipsita na pasta de cimento, em função da interação entre os íons sulfatos liberados na oxidação dos minerais sulfetos e algumas fases de hidratação do cimento Portland.

### 4.12.1 Cálculo da expansão primária

A equação 4.1 apresenta, de forma simplificada, a estequiometria da oxidação do mineral pirrotita em presença de oxigênio e umidade e na equação 4.2 encontra-se, também de forma simplificada, a equação de oxidação do mineral pirita. Estima-se que o incremento de volume causado pela formação de hidróxido de ferro e ácido sulfúrico na oxidação de um mol de pirrotita é de aproximadamente 6,04 cm³ e a variação de volume ocasionada pela oxidação da pirita, conforme equação 4.2, é de aproximadamente 3,05 cm³ por mol (CASANOVA *et al.*, 1996; CASANOVA *et al.*, 1997; AGUADO *et al.*, 1998; RIMSTIDT *et al.*, 2003).

$$Fe_7S_8 + 26{,}5\ O_2 + 11\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 8\ SO_4^{2-} + H^+ \quad (4.1)$$

$$4FeS_2 + 15O_2 + 14H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 16H^+ + 8SO_4^{2-} \quad (4.2)$$

Para obter a variação volumétrica por metro cúbico de concreto devido à oxidação do sulfeto presente nos agregados multiplica-se essa variação dimensional molar pela quantidade total de moles de sulfeto existentes na massa de agregado presente em um metro cúbico de concreto.

Desta forma, na presente pesquisa calculou-se a expansão primária multiplicando-se: a massa de agregado contaminado pela porcentagem de sulfeto presente nesses agregados, conforme dados obtidos pela análise química gravimétrica, pela variação volumétrica molar do sulfeto correspondente e dividindo-se esta pela massa molecular do tipo de sulfeto predominante.

### 4.12.2 Cálculo da expansão secundária

A expansão secundária é causada pela interação entre os íons sulfatos liberados na oxidação do sulfeto e algumas fases de hidratação do cimento Portland. Neste contexto, faz-se necessário identificar qual fase irá reagir com os sulfatos liberados, de forma a realizar os cálculos com base na reação mais provável de ocorrer.

Conforme destacam Mehta; Monteiro (2008), as fases oriundas da hidratação do cimento Portland mais vulneráveis ao ataque por íons sulfatos são o hidróxido de cálcio e as fases que contêm alumina. Costa (2004) e Aguiar; Selmo (2004) enfatizam que são dois os meios de

ataque por sulfato ao concreto: um deles envolve a reação dos íons sulfatos com as fases de hidratação que contém alumina ou o próprio aluminato tricálcico não hidratado, produzindo etringita e, na outra forma, os íons agressivos interagem com o hidróxido de cálcio produzindo gipsita.

Conforme relata Schmidt (2007) a quantidade de $C_3A$ não hidratado em concretos com idades acima de três anos é praticamente zero. Portanto, a reação com esse composto pode ser desconsiderada no caso de análises de concretos com idades mais avançadas.

O ataque por íons sulfatos irá ser conduzido em função da quantidade das fases constituintes de alumina e da disponibilidade de hidróxido de cálcio. Autores como Mehta; Monteiro (2008) relatam que na hidratação de cimentos Portland com mais de 5% de $C_3A$ haverá potencial de a maior parte da alumina se transformar em monossulfato hidratado ($C_3A.C.S.H_{18}$). Se o conteúdo de $C_3A$ do cimento for maior do que 8%, em massa, formam-se também fases de alumina hidratada, a saber: $C_3A.CH.H_{18}$.

O ingresso de íons sulfatos ao concreto também pode conduzir a interação destes com as próprias fases sulfatadas presentes no concreto, principalmente com o monossulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Como apresentado nas equações 2.1 e 2.2 do capítulo 2 deste trabalho, para cada mol de alumina hidratada são necessários três moles de íons sulfatos para a formação de um mol de etringita; enquanto que para cada mol de monossulfato, são necessários apenas dois moles de íons sulfatos para a formação de um mol de etringita. Desta forma, para a adoção de um modelo que tenha como consideração a situação mais desfavorável, e levando-se em consideração a formação da etringita secundária, será adotado como reação prioritária nessa expansão secundária a que envolve a conversão do monossulfato.

É importante destacar que em termos de eletroafinidade entre os compostos químicos presentes na pasta de cimento, tem-se que os íons sulfatos reagirão primeiramente com as fases alumina ou com o monossulfato, e em segundo estágio irão reagir com o hidróxido de cálcio. Neste sentido, pelo exposto por Mehta; Monteiro (2008) depreende-se que a existência de gipsita no concreto é sinal de ataque severo a este, pois é indicio de que as fases de alumina ou monossulfatos já reagiram ou estão se exaurindo.

Corroborando com a afirmativa acima, cita-se a explicação de Casanova *et al*. (1996) que salientam que a formação da gipsita se dá prioritariamente em sistemas cujo pH esteja abaixo de 10,5, acima deste valor a prioridade é para a formação de monossulfato ou etringita.

Assim, a expansão volumétrica secundária pode ser adotada como sendo conduzida prioritariamente pela formação de etringita secundária em decorrência da interação dos íons sulfatos com o monossulfato ou com as fases de alumina. A equação 4.3 mostra de forma simplificada a proporção estequiométrica de conversão do monossulfato para etringita.

Conforme apresentado por autores como Sarkar *et al.* (2010) e Santa *et al.* (2011) estima-se que o incremento de volume causado pela formação de 1 mol de etringita secundária, por meio da combinação do monossulfato com o hidróxido de cálcio e os íons sulfatos é de aproximadamente 248 cm³. Extraí-se do trabalho de Casanova *et al.* (1996) as equações de 4.4 a 4.6, que mostram de forma simplificada as equações de conversão para formação da gipsita, monossulfato e etringita, pela combinação entre as fases alumina e portlandita com os íons sulfatos disponibilizados ao sistema.

$$C_4A\bar{S}H_{12} + 2CH + 2H + 2\bar{S} \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32} \tag{4.3}$$

$$CH + \bar{S} + 2H \rightarrow C\bar{S}H_2 \tag{4.4}$$

$$CH + C_3A + \bar{S} + 11H \rightarrow C_4A\bar{S}H_{12} \tag{4.5}$$

$$3CH + 2C_3A + 3\bar{S} + 29H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32} \tag{4.6}$$

Conforme apresentado por Casanova *et al.* (1996), com relação às equações anteriormente citadas, a variação volumétrica resultante da formação molar da gipsita é de 41,63 cm³, para o monossulfato é de 182,89 cm³ e para a etringita é de 172,19 cm³.

De forma a sistematizar a modelagem, deve-se primeiramente saber se o conteúdo de minerais sulfetos presente na massa de concreto analisada possui capacidade para liberar quantidade de íons sulfatos acima da capacidade de reação com as fases de hidratação do cimento ou não.

Pelo exposto, de forma a considerar a situação mais desfavorável possível, porém dentro do preconizado na literatura, assumir-se-á que toda a gipsita adicionada ao cimento reagiu com as fases de alumina, dado origem ao monossulfato, e que toda fonte de íons sulfatos disponibilizada reagirá primeiramente com este, e o restante, caso houver, reagirá com as

fases de alumina e portlandita presentes dando origem a neoformações como a gipsita, monossulfato ou etringita secundária.

Desta forma, o cálculo da expansão volumétrica secundária é realizado calculando-se inicialmente o número de moles de íons sulfato liberados pela completa oxidação dos minerais sulfetos presentes nos agregados dos concretos. Calcula-se também o número de moles de monossulfato presentes no concreto, tendo-se como consideração a quantidade de gipsita adicionada no cimento. Conforme dados apresentados na literatura (AGUADO *et al.*, 1998; OLIVEIRA, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2013a), cada mol de gipsita adicionada ao cimento produz um mol de monossulfato, assim o número de moles de gipsita pode ser obtido pela simples conversão da quantidade de $SO_3$ do cimento, obtido no levantamento de informações técnicas, para gipsita.

Caso o número de moles de sulfatos liberado seja inferior ao dobro do número de moles de monossulfato, a expansão secundária é o resultado da reação de todo o sulfato liberado com o monossulfato formando etringita.

Caso o número de moles de íons sulfato liberado seja superior ao dobro do número de moles de monossulfato, a expansão secundária será a soma da expansão causada pela formação de etringita, resultado da interação de todo monossulfato com os íons sulfato, e a expansão causada pela formação de neoformações como a gipsita, monossulfato ou a etringita secundária, que corresponde à reação tida entre o restante de íons sulfato liberado e as fases de alumina e portlandita presentes na pasta cimentícia, conforme equações de 4.4 a 4.6.

Assim, o potencial de expansão total a que o concreto está sujeito é a soma da expansão volumétrica primária com a secundária.

## 4.13 ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DEF

De forma a auxiliar no estudo da fonte dos íons sulfatos presentes nos concretos, realizou-se também um estudo complementar para avaliar a possibilidade de ocorrência de DEF nos concretos estudados.

Empregando sistemática semelhante à adotada por Hasparyk *et al*. (2012b), procedeu-se com cálculos estimativos da possível elevação adiabática de temperatura dos concretos com base nos consumos de cimento obtidos no ensaio de reconstituição de traço e adotando-se um

coeficiente de elevação adiabática estimado (ºC/kg/m$^3$), tendo-se como base os dados publicados em Furnas (1997).

A temperatura estimada do concreto em seu lançamento foi adotada como sendo a provável temperatura do ambiente. Esta temperatura foi estimada com base na análise das informações disponibilizadas no banco de dados climatológicos do Brasil (EMBRAPA, 2013), levando-se em consideração as temperaturas mínima, média e máxima registradas nos municípios mais próximos das usinas estudadas.

A análise da possibilidade de ocorrência de DEF foi realizada considerando os cálculos estimativos realizados e os valores de limites propostos na literatura.

# CAPÍTULO 5

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 5.1 GENERALIDADES

Apresentam-se nas Tabelas 5.1a e 5.1b, um detalhamento das amostras analisadas e suas respectivas nomenclaturas empregadas para referenciar os materiais estudados.

**Tabela 5.1a –** Relação das amostras de cada usina e as nomenclaturas adotadas.

| Usina | Tipo de amostra | Identificação da amostra | Local da extração/coleta | Dimensões*/detalhes |
|---|---|---|---|---|
| CORUMBÁ | Material rochoso coletado | R1.C | Testemunhos de rocha, quartzito, resultantes de sondagens rotativa (SR) realizadas na época da construção da usina. | Identificação na obra: caixa 03, SR 146 (comp. 5 m; diâm. 5,4 cm[1]). |
| | | R2.C | | Identificação na obra: caixa 06, SR 148 (comp. 5 m; diâm. 5,4 cm). |
| | | R3.C | Testemunhos de rocha, cloritaxisto, resultante de sondagem rotativa (SR) realizada na época da construção da usina. | Identificação na obra: caixa 14, SR 113 (comp. 5 m; diâm. 5,4 cm). |
| | | R4.C | | Identificação na obra: caixa 15, SR 118 (comp. 5 m; diâm. 5,4 cm). |
| | Testemunho de concreto extraído | C1.CTa | Extração realizada na galeria de drenagem da tomada d'água. | CP de 15 cm x 24,6 cm. |
| | | C2.CVt | Extração realizada na galeria de drenagem do vertedor. | CP de 15 cm x 18,8 cm. |
| | | C3.CVt | | CP de 15 cm x 28,6 cm. |
| | | C4.CVt | | CP de 15 cm x 26,8 cm. |
| | | C5.CVt | | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C6.CEl.5 | Extração realizada na escada do poço do muro central, no 5º lance de escada, contados de baixo para cima. | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C7.CEl.5 | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C8.CEl.12 | Extração realizada na escada do poço do muro central, no 12º lance de escada, contados de baixo para cima. | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C9.CEl.12 | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| MASCARENHAS | Material rochoso coletado | R1.M | Testemunhos de rocha quartzítica, extraídos do paredão de rocha da pedreira já desativada e que foi explorada durante a construção da UHE Mascarenhas. | Testemunho de aprox. 1,60 m, e diâmetro aprox. 5,4 cm[1]. |
| | | R2.M | | Testemunho de aprox. 1,38 m, e diâmetro aprox. 5,4 cm[1]. |
| | | R3.M | | Testemunho de aprox. 1,60 m, e diâmetro aprox. 5,4 cm[1]. |
| | Testemunho de concreto extraído | C1-MTa | Extrações realizadas na galeria de drenagem situada nas estruturas da tomada d'água, no bloco de concretagem n.19, sentido montante. | CP de 15 cm x 30,1 cm. |
| | | C2.MTa | | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C3.MTa | | CP de 15 cm x 29,8 cm. |
| | | C4.MTa | | CP de 15 cm x 29,9 cm. |
| | | C5.MTa | | CP de 15 cm x 30,1 cm. |
| | | C6. MTa | Extrações realizadas na galeria de drenagem situada nas estruturas da tomada d'água, no bloco de concretagem n.18, sentido montante. | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C7. MTa | | CP de 15 cm x 30,1 cm. |
| | | C8. MTa | | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C9. MTa | | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C10. MTa | | CP de 15 cm x 30,3 cm. |

* Dimensões dos corpos de prova após o corte dos testemunhos de concreto; CP – Corpo de prova; [1] Extração realizada com coroa tipo NX.

**Tabela 5.1b –** Relação das amostras de cada usina e as nomenclaturas adotadas.

| Usina | Tipo de amostra | Identificação da amostra | Local da extração/coleta | Dimensões*/detalhes |
|---|---|---|---|---|
| PA II | Material rochoso coletado | R1.PAII | Fragmentos de rocha granítica coletados em uma trincheira na região dos transformadores da subestação de PA I, II e III. Próximo à chaminé de equilíbrio de PA II. | Fragmentos de rocha caracterizados visualmente por granitos migmatíticos. |
| | Testemunho de concreto extraído | C1-PAIITa | Extração realizada na galeria I de drenagem, situada nas estruturas da tomada d'água, na região do terceiro bloco de concretagem, sentido de montante. | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C2-PAIITa | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C3-PAIITa | | Desagregou na extração. |
| | | C4-PAIITa | | CP de 15 cm x 30,4 cm. |
| | | C5-PAIITa | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C6-PAIITa | | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C7-PAIITa | | CP de 15 cm x 25,1 cm. |
| PA IV | Material rochoso coletado | R1.PAIV | Fragmentos de rocha granítica coletados no enrocamento do lado direito do vertedor; que protege a barragem de terra com núcleo de argila de PA IV. | Fragmentos de rocha caracterizados visualmente por granitos migmatíticos. |
| | Testemunho de concreto extraído | C1-PAIVTa | Extração realizada na galeria de drenagem situada nas estruturas da tomada d'água, próximo à unidade geradora três, sentido de jusante. | CP de 15 cm x 30,1 cm. |
| | | C2-PAIVTa | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C3-PAIVTa | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C4-PAIVTa | | CP de 15 cm x 30,3 cm. |
| | | C5-PAIVTa | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C6-PAIVVt | Extração realizada na galeria de drenagem situada nas estruturas do vertedor; na região do sétimo bloco de concretagem, sentido jusante. | CP de 15 cm x 19,1 cm. |
| | | C7-PAIVVt | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C8-PAIVVt | | CP de 15 cm x 28,2 cm. |
| | | C9-PAIVVt | | CP de 15 cm x 29,0 cm. |
| | | C10-PAIVVt | | CP de 15 cm x 26,8 cm. |
| MOXOTÓ | Material rochoso coletado | R1.Mx | Fragmentos de rocha granítica coletados ao logo do enrocamento da UHE Moxotó; lado esquerdo da barragem de terra com núcleo de argila. | Fragmentos de rocha caracterizados visualmente por granitos migmatíticos. |
| | Testemunho de concreto extraído | C1.MxGD | Extração realizada na galeria de drenagem situada à jusante da casa de máquinas, na parede de montante. Tal galeria é conhecida localmente como "galeria dos cabos" e situa-se na elevação 214 m. | CP de 15 cm x 30,4 cm. |
| | | C2.MxGD | | CP de 15 cm x 26,0 cm. |
| | | C3.MxGD | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C4.MxGD | | CP de 15 cm x 30,2 cm. |
| | | C5.MxGD | | CP de 15 cm x 25,2 cm. |
| | | C6.MxGD | | CP de 15 cm x 29,3 cm. |
| | | C7.MxGD | | CP de 15 cm x 28,8 cm. |

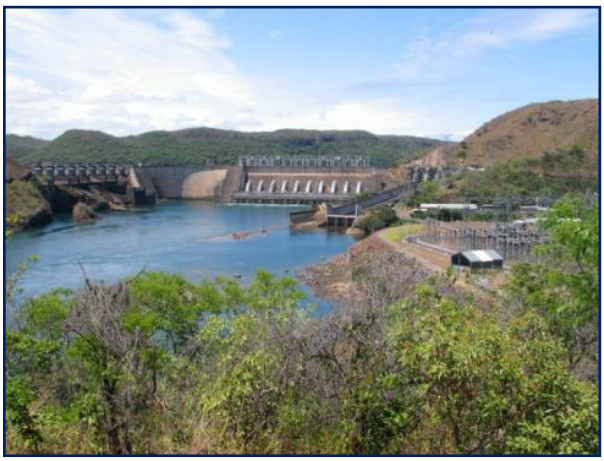
* Dimensões dos corpos de prova após o corte dos testemunhos de concreto; CP – corpo de prova.

## 5.2 SELEÇÃO DAS USINAS E LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES TÉCNICAS

As principais informações técnicas obtidas ao longo do levantamento das usinas estudadas estão apresentadas na Tabela 5.2. Os dados técnicos pertinentes aos concretos e aos materiais empregados na construção das UHEs estão compilados na Tabela 5.3. Na Figura 5.1 há uma vista geral da UHE Corumbá e na Figura 5.2 uma vista frontal da barragem de concreto da UHE Mascarenhas. Essas duas usinas pertencem a Eletrobras Furnas.

**Figura 5.1** – Vista aérea da barragem de concreto da UHE Corumbá.

**Figura 5.2** – Vista frontal da barragem de concreto da UHE Mascarenhas.



Destaca-se que os dados técnicos obtidos para as usinas pertencentes à empresa Eletrobras Furnas foram extraídos de relatórios técnicos de posse da empresa e levantados na biblioteca mantida na Gerência de Serviços Tecnológicos – GST.E, em Goiânia (antigo DCT.E); de arquivos eletrônicos pesquisados no banco de dados virtual da empresa, conhecido como portal do arquivo técnico, além de informações e relatórios obtidos com a Gerência de Engenharia Civil – GEC-E (antigo DEC.C) da Eletrobras Furnas.

Além destas pesquisas, os principais dados técnicos levantados com relação ao controle tecnológico da UHE Mascarenhas foram obtidos diretamente em arquivos localizados no denominado “arquivo morto” existente nas dependências dessa usina.

Salienta-se também que as principais informações técnicas levantadas sobre as estruturas de concreto que compõem as usinas hidrelétricas de PA II, PA IV e Moxotó, que integram o denominado complexo hidrelétrico de Paulo Afonso, cuja proprietária é a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), foram obtidos por meio de pesquisa em trabalhos como o de Silva (2007), que estudou a reação álcali-agregado nas estruturas do referido

complexo, em dados disponíveis no próprio sítio de internet da CHESF (CHESF, 2013), de pesquisa realizada nos arquivos do centro de documentação da empresa localizado na sede da companhia em Recife (PE), além de trabalhos publicados no meio técnico. Apresenta-se na Figura 5.3 uma vista geral das usinas pertencentes ao denominado complexo de Paulo Afonso.

A UHE Corumbá está localizada no rio Corumbá, em Goiás, e a UHE Marechal Mascarenhas de Moraes no rio Grande, que se situa na divisa entre os estados de GO e MG.

As três usinas estudadas pertencentes ao complexo de Paulo Afonso já foram diagnosticadas com a presença de RAA, conforme trabalhos já publicados no meio técnico (MIELENZ, 1984; CAVALCANTI *et al.*, 1992; HASPARYK *et al.*, 2002; LOPES *et al.*, 2002; SILVA, 2007; SILVA *et al.*, 2008; CAVALCANTI, 2010; HASPARYK *et al.*, 2012a).

Em relação à UHE Marechal Mascarenhas de Moraes, cita-se também a respeito da presença desta patologia em trabalhos publicados no 1º Simpósio sobre RAA realizado em Goiânia (VEIGA *et al.*, 1997). Com relação à UHE Corumbá, não se tem qualquer conhecimento e/ou publicação no meio técnico relacionado à existência de qualquer deterioração química nos seus concretos.

**Figura 5.3** – Vista geral das usinas do complexo de Paulo Afonso: a) UHE PA I, II e III; b) vista frontal de Moxotó, c) canal de fuga e enrocamento de PA IV.

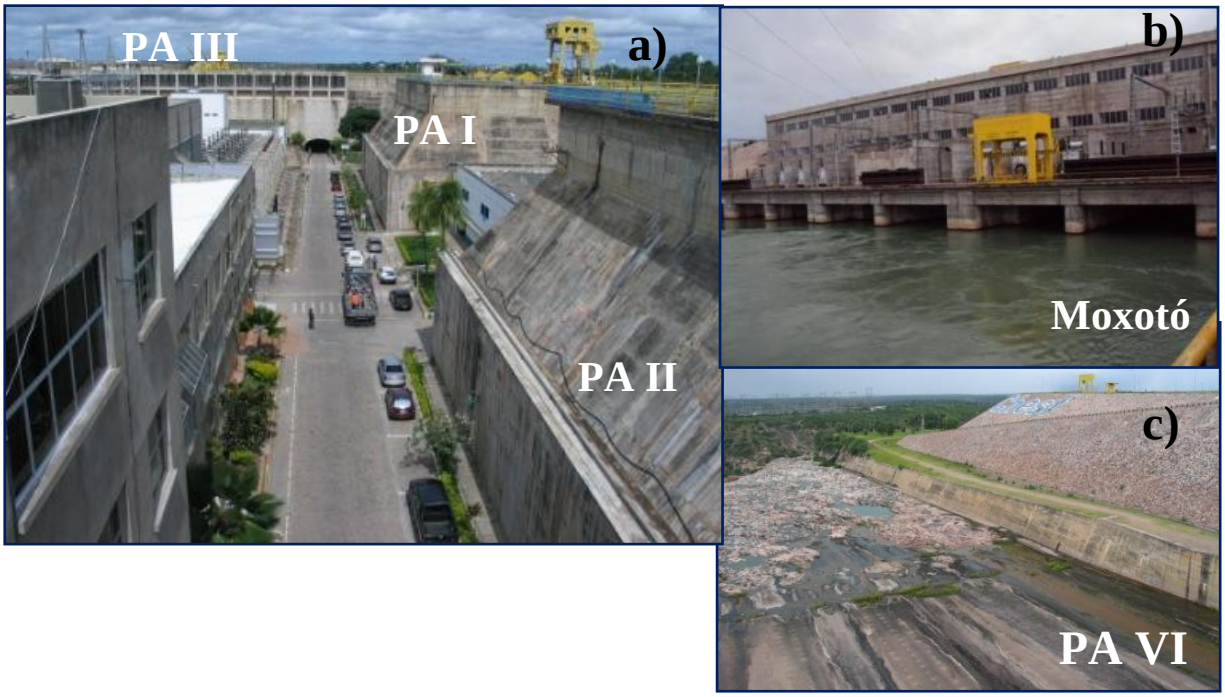


**Tabela 5.2 -** Dados gerais das usinas estudadas.

| Usina | Data da construção | Características dos empreendimentos | Responsável pela construção | Proprietária | Localização | Patologia já relatada |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **CORUMBÁ** | Início da construção em 1982 e início da geração em 1997. | As obras foram iniciadas pela CELG-GO e finalizadas pela FURNAS. Possui barragem de enrocamento com núcleo de argila, com altura máxima de 90 m, e volume total de concreto de 310 mil m³. A Usina tem potência instalada de 375 MW, dividida em três unidades geradoras. | Construída por: Centrais Elétricas de Goiás (CELG) e Furnas Centrais Elétricas S.A. Projetada pela Promon Engenharia. | ELETROBRAS FURNAS | Localiza-se no rio Corumbá, distante cerca de 30 km da cidade de Caldas Novas (GO). | Nenhuma |
| **MASCARE-NHAS** | Construção iniciada em 1950 e início da geração em 1957. | A Usina Hidrelétrica Marechal Mascarenhas de Moraes, denominada inicialmente de Peixoto, teve início da geração por meio de duas unidades geradoras de 40 MW cada. Posteriormente, a regularização das vazões do Rio Grande, sobretudo pela construção da UHE Furnas, permitiu que fosse ampliada e em 1968 alcançou a capacidade de 476 MW, com dez unidades geradoras. | Construída pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e projetada por CIA Internacional de Engenharia e Construções. | ELETROBRAS FURNAS | Localiza-se em um trecho de cânion do Rio Grande, entre as usinas de Furnas e Luiz Carlos Barreto de Carvalho, na divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais, no município mineiro de Ibiraci. | RAA |
| **PA II** | Início da construção em 1955 e início da geração em 1967. | Foi construída em duas etapas: finalizou a primeira em 1961 e a segunda em 1967. Na primeira etapa foram construídas três unidades geradoras, duas de 70 MW e uma de 75 MW e na segunda, mais três unidades, de 76 MW cada, totalizando 443 MW de potência instalada. Possui duas casas de força subterrâneas, cada uma com comprimento de 104,00 m, altura de 36,87 m e largura de 18,00 m. | Projetada e construída pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), atual proprietária. | CHESF | Localiza-se na longitude 38° 16' Oeste e latitude 9° 22' Sul, na cidade de Paulo Afonso, estado da Bahia. | RAA |
| **PA IV** | Construção iniciada em 1972 com e início da geração em 1979. | É constituída de barragens e diques de seção mista terra-enrocamento, com comprimento de 7.430 m e altura máxima de 35 m. As estruturas de concreto, de comprimento total de 1.053,00 m, compreendem: vertedor tipo Creager, dotado de 08 comportas com capacidade de descarga de 10.000 m³/s, tomada d'água, casa de força do tipo subterrânea com seis unidades geradoras com potência unitária de 410,4 MW cada, com potência instalada de 2.462 MW. A casa de força possui comprimento de 210,00 m, altura de 52,00 e largura de 24,20 m. | Foi projetada pela Themag Engenharia Ltda. e construída pela Cetenco Engenharia Ltda. | CHESF | Localiza-se na longitude 38º 16' Oeste e na latitude 9° 22' Sul, no município de Paulo Afonso, estado da Bahia. | RAA |
| **MOXOTÓ** | Início da construção em 1971 com e início da geração em 1977. | Localiza-se a três quilômetros de PAII, de modo que a água turbinada em suas máquinas aciona também uma das usinas de PA I, II ou III, e em um segundo desnível em cascata e através de um canal escavado a partir de sua margem direita, o reservatório de Moxotó fornece a água necessária ao acionamento da usina PA IV. | Projetada por SOFRELEC Engenharia Ltda. e construída pela Mendes Jr Trading e Engenharia S.A. | CHESF | Localiza-se na longitude 38° 11' Oeste e latitude 9° 17' Sul, na cidade de Delmiro Gouveia, estado de Alagoas, a 8 km da cidade de Paulo Afonso, Bahia. | RAA |

**Tabela 5.3-** Dados gerais obtidos em levantamento de informações técnicas de cada usina estudada.

| IDENTIFICAÇÃO DOS CONCRETOS | | CARACTERÍSTICAS DOS CIMENTOS EMPREGADOS | | | | | | | | | | Provável aditivo químico empregado | Provável adição mineral empregada | Idade média provável (anos) | Agregado miúdo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | COMERCIAIS | | COMPOSIÇÃO QUÍMICA ESTIMADA | | | | | | | | | | | |
| **USINA** | **Litotipo do agregado** | **Provável tipo de cimento** | **Marca e Fabricante** | **$SiO_2$** | **CaO** | **R.I** | **$SO_3$** | **MgO** | **$Al_2O_3$** | **$C_4AF$** | **$C_3A$** | | | | |
| **CORUMBÁ** | Quartzito/ Cloritaxisto | Cimento Portland de Alto-forno (CP III-32) | Goiás | 19,56 - 25,12 | 55,22 - 63,87 | 0,36 - 2,08 | 1,03 - 3,97 | 0,91 - 4,47 | 4,38 - 8,10 | 5,74 – 17,21 | ND | Incorporador de ar, retardador de pega e plastificante. | Sílica ativa (apenas em algumas estruturas) | 31 | 55% areia natural; 45% artificial[1] |
| **MASCARE-NHAS** | Quartzito | Cimento sem adição | Companhia de cimento Portland ITAÚ | ~21% | - | ~0,3% | 1,63 | 3,32 | 5,75 | 6,82 | 11,47 | Cloreto de cálcio. | - | 63 | Areia Natural |
| **PA II** | Granito | Cimento sem adição[2] | Poty e Ouro Branco | | Dados não disponíveis | | | | | | | - | - | 58 | Areias naturais quartzosas e areia artificial[1] |
| **PA IV** | Granito | Cimento Portland Comum[3] | Poty, Nassau e Zebu, | ~21% | ~62% | ~1% | 1,61 - 3,10 | 1,20 - 4,50 | 3,6 - 6,74 | 6,98 – 8,48 | 7,66 - 9,27 | Retardador de pega; incorporador de ar | - | 41 | |
| **MOXOTÓ** | Granito | Cimento sem adição[2] | Poty e Ouro Branco | | Dados não disponíveis | | | | | | | - | - | 42 | |

Nota: ND – não possível calcular, pois o cimento contém adição de escória de alto-forno e não se dispõe de dados do clínquer; [1] – areia artificial obtida pela britagem do mesmo maciço rochoso que os agregados graúdos empregados nos concretos; [2] – cimento com resistência à compressão aos 28 dias de ensaio de 25 MPa (conforme ensaio padronizado para o cimento na época da construção da usina); [3] – cimento com resistência à compressão aos 28 dias de ensaio de 32 MPa (conforme ensaio padronizado para o cimento na época da construção da usina).

## 5.3 INSPEÇÃO IN LOCO, EXTRAÇÃO DOS TESTEMUNHOS E INSPEÇÃO APÓS EXTRAÇÃO.

### 5.3.1 Inspeção "*in loco*" das estruturas de concreto e extração dos testemunhos de concreto

De forma geral, as inspeções "*in loco*" tiveram como principal foco as estruturas de concreto das galerias de drenagem existentes nas usinas. Ressalta-se que todas as extrações foram realizadas dentro dessas galerias, não tendo sido extraído nenhum testemunho de concreto externamente. O Apêndice A, deste trabalho, possui alguns croquis e detalhes com as localizações das extrações dos testemunhos de concreto realizadas.

#### 5.3.1.1 UHE Corumbá

As inspeções "*in loco*" foram realizadas nas galerias de drenagem existentes nas estruturas de concreto da tomada d'água, do vertedor e do poço das escadas existentes na estrutura do muro central. Destaca-se que estas estruturas possuem pré-moldados de concreto com espessura de aproximadamente 20 cm e que serviram como fôrma das galerias durante a construção e delimitam toda a extensão das galerias existentes. Desta forma, tal fato impossibilitou avaliar, por meio da inspeção visual "*in loco*", o estado de conservação dos concretos que se encontravam atrás dos pré-moldados.

No geral os concretos se apresentavam íntegros, conforme pode ser observado na Figura 5.4-a e b. Na região da galeria de drenagem da tomada d'água observaram-se apenas alguns pontos de lixiviações e conseguinte processo de carbonatação, conforme pode ser observado na Figura 5.5-a.

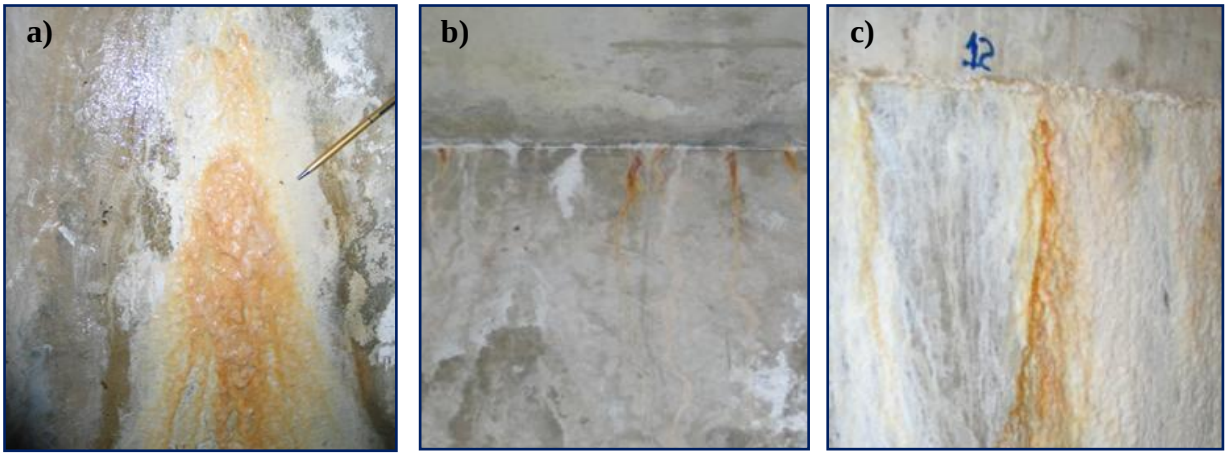
A galeria de drenagem do vertedor não apresentou qualquer indício visual de manifestação patológica. Nos concretos do poço da escada que compõem a estrutura do muro central, verificaram-se em apenas alguns locais isolados, como o da região do 5º lance da escada do poço do muro central, contados de baixo para cima, ocorrências esbranquiçadas provenientes de lixiviação, que neste local encontrava-se em processo pouco mais avançado, tendo inclusive sido observada a formação de estalactites. As superfícies dos concretos dos pré-moldados da região do 12º lance da escada do poço do muro central apresentavam-se com

algumas ocorrências de manchas de oxidação na parede. Nas Figuras 5.5-b e c têm-se a ilustração dos aspectos mencionados.

De forma geral, não foram detectadas manifestações patológicas na superfície dos pré-moldados que indicassem possível deterioração química do concreto em virtude de possíveis reações deletérias envolvendo minerais sulfetos ou mesmo RAA, estando estes elementos isentos de fissuras, bem como de lascamento e intumescimento superficial, eflorescência, dentre outros.

**Figura 5.4** – Aspectos observados na inspeção da UHE Corumbá: a) porção inicial da galeria de drenagem da tomada d'água, b) região da galeria do vertedor onde ocorreram as extrações.

**Figura 5.5** – Aspectos observados na inspeção da UHE Corumbá: a) lixiviação presente na galeria de drenagem da tomada d'água; b) aspecto da junção viga/parede pré-moldada, com pontos de lixiviação e alguns "escorridos de ferrugem" na região do 5º lance da escada; c) região do 12º lance da escada.




Desta forma, mediante inspeção visual realizada, inferem-se em geral como de boa qualidade as características gerais observadas nas superfícies dos concretos que compõem as estruturas inspecionadas da UHE Corumbá, sendo pontuais as poucas ocorrências observadas.

As extrações de testemunhos de concreto ocorreram nas galerias de drenagem existentes nas estruturas de concreto da tomada d'água, do vertedor e do 5º e 12º lance de escada do poço do muro central, nas proximidades de maior incidência das eflorescências, lixiviações e manchas de ferrugem observadas.

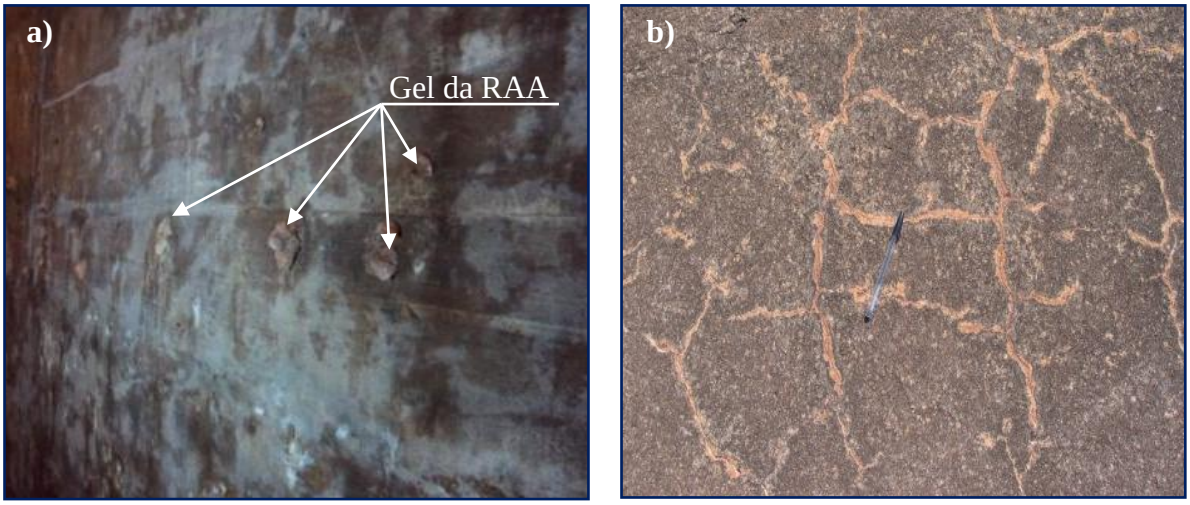
#### 5.3.1.2 UHE Mascarenhas

As estruturas da UHE Mascarenhas inspecionadas foram: galeria de drenagem da tomada d'água, galeria de fundação, galeria dos cabos e dos equipamentos e crista da barragem. Dentre essas estruturas, a galeria de drenagem da tomada d'água foi a que apresentou os maiores indícios de manifestações patológicas, o que conduziu a realizar as extrações nesta galeria. Destaca-se ainda que a principal manifestação patológica observada refere-se à presença de gel exsudado, proveniente da reação álcali-agregado (RAA), sobre a superfície dos concretos, conforme é indicado na Figura 5.6-a.

Ocorrências de materiais de coloração esbranquiçada e pulverulentos se deram de forma pontual, sendo mais constantes as de lixiviações típicas de estruturas hidráulicas com posterior carbonatação dos produtos aflorados.

Apesar da manifestação da RAA nas estruturas de concreto da UHE Mascarenhas já ser conhecida no meio técnico (VEIGA *et al.*, 1997), no interior da galeria de drenagem da tomada d'água não foram observadas incidências de fissuras tipo mapeadas, mesmo nas regiões de grande intensidade de gel exsudado. A única galeria que apresentou fissuras tipo mapa foi a galeria dos equipamentos, mais precisamente nas regiões próximas aos geradores. Tais fissuras mapeadas também foram verificadas de forma expressiva no topo da barragem de concreto (crista da barragem). Apresenta-se na Figura 5.6-b uma foto indicativa da incidência de fissuras mapeadas existentes na crista da barragem em arco.

**Figura 5.6** – Aspectos observados na inspeção da UHE Mascarenhas: a) presença de gel da RAA na superfície dos concretos da galeria de drenagem da toma d'água – região onde foram extraídos os testemunhos de concreto; b) fissuras tipo mapa existentes na crista da barragem, na região do arco.




Pelas características visuais observadas nas inspeções das estruturas de concreto pôde-se confirmar a presença da RAA.

### 5.3.1.3 UHE PA II

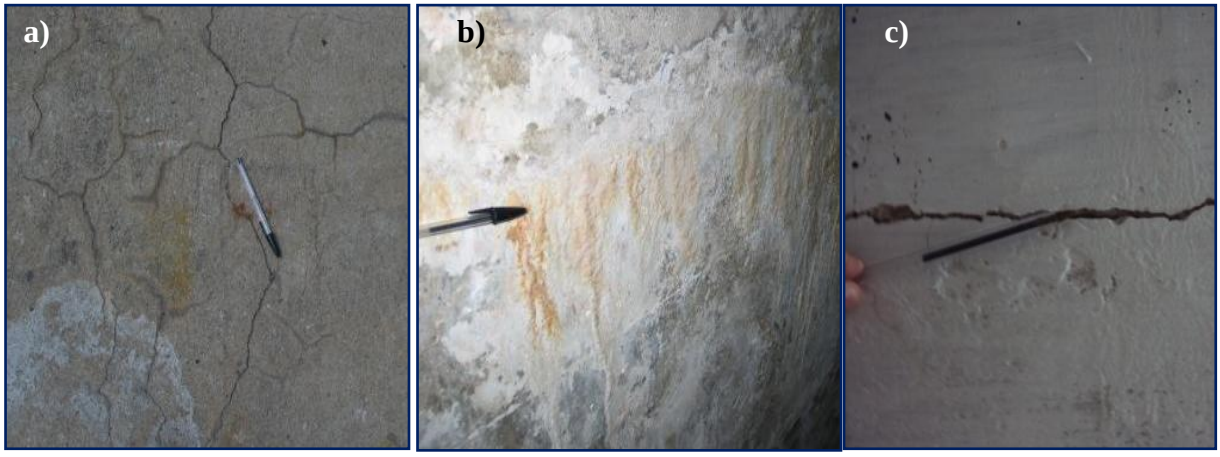
As inspeções de campo foram realizadas nas galerias de drenagem existentes nas estruturas de concreto da tomada d'água, tendo também sido realizada uma visita na crista da barragem onde se constatou grande incidência de fissuras tipo mapa. A Usina Hidrelétrica de PA II possui três galerias de drenagem (galeria I, II e III), paralelas entre si, na região da tomada d'água. Na data da inspeção, todas essas galerias encontravam-se em utilização (como depósito de materiais) e haviam sido pintadas recentemente com tinta mineral à base de cal, dificultando as inspeções.

Em nenhuma das galerias de PA II foi verificado escoamento de água nas canaletas dos drenos. Na galeria I, local onde se procedeu com as extrações de testemunho de concreto, observou-se maior incidência de anormalidades, tais como: vários pontos de lixiviação, trincas nas paredes, pontos de umidade superficial e pontos com desagregação superficial do concreto, conforme pode ser observado na Figura 5.7. Já nas galerias II e III de PA II não foi observada nenhuma anomalia ou incidência que indicasse ocorrência de reações envolvendo deterioração dos concretos devido à RAA ou oxidação de minerais sulfetos. Nestas duas

galerias verificaram-se apenas pontos isolados de umidade e algumas incidências de fissuras nas paredes.

Destaca-se também que próximo à região de extração verificou-se a presença de material exsudado na superfície do concreto que se trata de gel de RAA, identificado visualmente e confirmado posteriormente por difração de raios X, diante da amorficidade do material.

**Figura 5.7** – Aspectos observados na inspeção da UHE PA II: a) fissuras mapeadas na crista da barragem; b) lixiviação com afloramento de material esbranquiçado e presença de material na cor ferrugem – região onde se extraiu os testemunhos de concreto; c) trinca de aproximadamente três milímetros na superfície da parede de lado de montante do terceiro bloco de concretagem da galeria I.




Pelas características visuais observadas nas inspeções das estruturas de concreto, pode-se confirmar a presença da RAA (presença de gel e fissuras típicas).

### 5.3.1.4 UHE PA IV

Pelas inspeções realizadas "*in loco*" constatou-se, na região da casa de força, a existência de várias fissuras radiais, algumas delas com aberturas de aproximadamente dois milímetros, principalmente no piso das tampas dos geradores. Nesta região não foram evidenciadas características visuais do processo de oxidação dos minerais sulfetos.

Na inspeção da galeria de drenagem da tomada d'água de PA IV a maior incidência patológica observada refere-se à corrosão de armaduras, principalmente na base das canaletas de drenagem. Essa galeria encontrava-se em bom estado de conservação e as canaletas destinadas à drenagem estavam, em sua grande totalidade, sem escoamento de água e, de

forma pontual, verificaram-se algumas eflorescências nas superfícies dos concretos dessa galeria.

O local onde foram observadas maiores evidências da RAA foi no corredor da unidade três, este localizado ao final da galeria de drenagem da tomada d'água. Salienta-se que esta região tem influência da umidade proveniente do núcleo argiloso da ombreira direita. Não obstante, destaca-se também que foi identificada a existência de um gel exsudado decorrente da reação álcali-agregado nesta região, conforme mostrado na Figura 5.8-a.

As extrações de testemunhos de concreto ocorreram nessa região, cuja superfície do concreto continha também a presença de materiais com aspecto de talco e coloração esbranquiçada (Figura 5.8-b), além de regiões próximas com manchas amareladas e amarronzadas envolvendo pequenas regiões com material lixiviado de coloração esbranquiçada.

Na galeria de drenagem do vertedor foram observadas poucas incidências de anomalias, apresentando as estruturas, em geral, em boas condições. O principal sintoma observado foi na parede de jusante do sétimo bloco de concretagem, onde se constatou grande umidade superficial, eflorescências e desfragmentação superficial do concreto. Tais incidências estão ilustradas na Figura 5.9.

O concreto desta região, local este onde também se procedeu com as extrações de testemunhos, se encontrava com exposição superficial dos agregados, além da presença de material pulverulento amarelado e de material lixiviado e de coloração esbranquiçada na superfície do concreto.

Diante do exposto, os concretos do vertedor possuem indícios que podem sugerir a ocorrência de um ataque conjugado envolvendo os íons sulfatos e a RAA.

**Figura 5.8** – Inspeção da galeria de drenagem da tomada d'água da UHE PA IV: a) gel da RAA exsudado na parede de montante do corredor da unidade três; b) manchas esbranquiçadas na parede de jusante do corredor da unidade três.

**Figura 5.9** – Inspeção da galeria de drenagem do vertedor da UHE PA IV: a) concreto com desagregação superficial; b) presença de material esbranquiçado.

### 5.3.1.5 UHE Moxotó

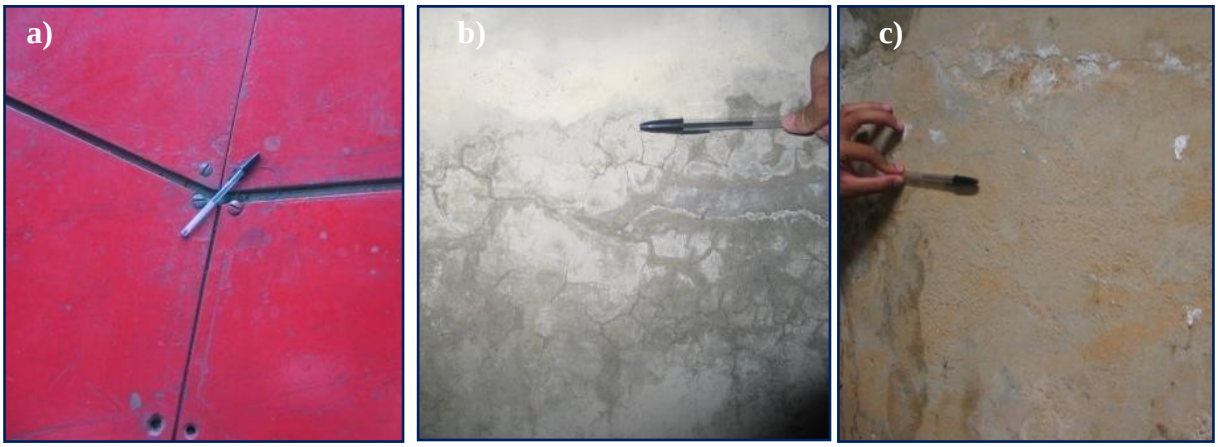
A principal característica observada durante a inspeção de campo das estruturas de concreto da UHE Moxotó foi a grande quantidade de fissuras existentes nas superfícies dos concretos das estruturas que compõem o corpo da referida usina.

A região que apresentou maiores indícios de alteração foi a da galeria de drenagem situada à jusante da casa de máquinas, região esta selecionada para extração de testemunhos de concreto e que continha, na parede de montante durante a inspeção, fissuras tipo mapeada ou orientada, presença de material pulverulento de cor amarelada/amarronzada sobre a superfície da parede e lixiviação com a presença de produtos esbranquiçados e esverdeados

(provavelmente fungos). Algumas dessas manifestações constatadas podem ser visualizadas pelo registro fotográfico apresentado na Figura 5.10.

Nas demais partes das estruturas de concreto da UHE Moxotó, excetuando-se a grande quantidade de fissuras, além de pontos isolados de lixiviação, apresentavam-se com bom aspecto. Tal fato, provavelmente, deve-se aos constantes reparos realizados nessas estruturas devido à expansão ocasionada pela RAA.

**Figura 5.10** – Aspectos observados na inspeção da UHE Moxotó: a) abertura na tampa do gerador de número dois, devido à abertura radial do encaixe do gerador; b) fissuras tipo mapa; c) presença de material pulverulento e amarelado e alguns pontos com material de coloração esbranquiçada, ambas na parede de montante do início da galeria a jusante da casa de máquinas (El. 214,0 m).




## 5.3.3 Inspeção dos testemunhos de concreto após a extração

Por meio das inspeções dos testemunhos de concreto procurou-se identificar a existência ou não de características sugestivas de alguma manifestação patológica, seja decorrente de RAA ou ataque por sulfatos. As principais características observadas foram: deposições em poros, bordas nos agregados, manchas nas argamassas, agregado oxidado, agregado ou argamassa com fissura e deslocamento entre a argamassa e agregado.

Salienta-se que, se pelo menos uma ocorrência dessas características forem identificadas, essa foi indicada nas tabelas que se apresentam as inspeções.

### 5.3.3.1 UHE Corumbá

Os aspectos gerais observados durante a inspeção na superfície externa dos testemunhos de concreto extraídos da UHE Corumbá revelaram que os concretos apresentam cor amarelada e

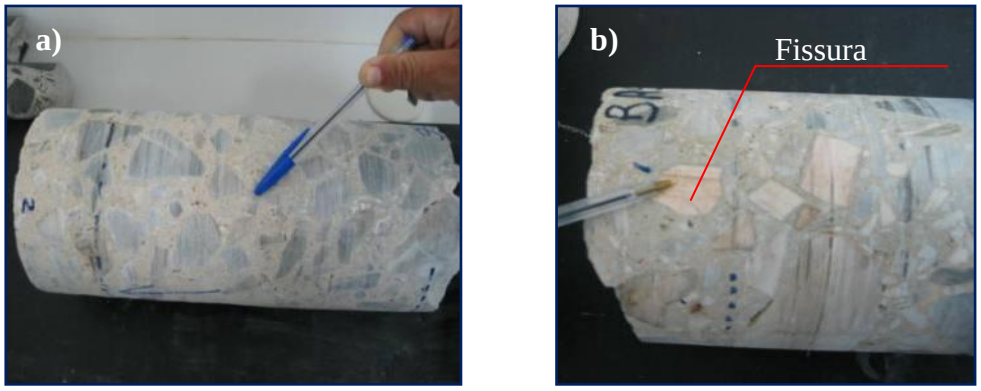
cinza claro, com distribuição dos constituintes e adensamento normais, foram confeccionados com agregados graúdos britados e sem nenhuma anomalia visual detectada como falhas ou alterações presentes na zona de transição entre a argamassa e o agregado.

O testemunho de concreto extraído da galeria de drenagem da tomada d'água apresentou Dmáx de 38 mm, já os do vertedor, com exceção do C2.CVt que possui Dmáx de 19 mm, apresentaram Dmáx de 76 mm. Ambos os testemunhos do quinto lance da escada do muro central apresentaram Dmáx de 19 mm e os testemunhos do 12º lance da escada do muro central apresentaram Dmáx de 38 mm.

Destaca-se que somente nos testemunhos extraídos do 12º lance da escada do poço do muro central foi observada a provável existência de agregados do litotipo clorita xisto. Nos demais, apenas agregados do tipo quartzito foram identificados por meio de inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto.

No testemunho da tomada d'água verificou-se a ocorrência de quatro agregados com fissuras, e nos testemunhos da galeria de drenagem do vertedor foram detectadas algumas finas bordas cinza-escuras em torno de alguns agregados. Já nos testemunhos extraídos do quinto lance da escada do poço do muro central também foram observados alguns agregados com bordas escuras. Esse tipo de borda pode estar associado à rocha de origem e seu processo natural tanto de formação como de alteração no tempo. Algumas dessas observações encontram-se indicadas na Figura 5.11.

**Figura 5.11** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE Corumbá: a) aspecto geral do testemunho de concreto; b) agregados com finas bordas e fissuras no agregado.




Em nenhum desses testemunhos inspecionados externamente foi observada alguma anomalia que possa ser atribuída ao processo de oxidação dos minerais sulfetos ou RAA. Na Tabela 5.4

há as indicações das principais características identificadas durante inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto extraídos da UHE Corumbá.

**Tabela 5.4 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE Corumbá.

| Testemunho | Poros com deposições | Bordas nos agregados | Manchas na argamassa | Agregado oxidado | Agregado fissurado | Argamassa com fissura | Descolamento entre argamassa e agregado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1.CTa | | | | | X | | |
| C2.CVt | | | | | X | | |
| C3.CVt | | X | | | | | |
| C4.CVt | | X | | | X | | X |
| C5.CVt | | X | | | X | | |
| C6.CEl.5 | | X | | | | | |
| C7.CEl.5 | | X | | | | | |
| C8.CEl.12 | | | | | | | X |
| C9.CEl.12 | | | | | | | |

### 5.3.3.2 UHE Mascarenhas

Pela inspeção externa dos testemunhos de concreto extraídos da galeria de drenagem da tomada d'água da UHE Mascarenhas observa-se que os concretos, em geral, apresentam cor cinza claro ao longo de todos os testemunhos, com distribuição normal dos constituintes, agregado graúdo classificado visualmente como quartzito e dimensão máxima de 152 mm, além de ser visível o emprego de areia natural.

Todos os concretos apresentam-se com poucas (entre duas e três) falhas na zona de transição entre a argamassa e o agregado e, com poros de diversos tamanhos. A maioria dos poros encontrava-se vazios, porém em todos os testemunhos foi verificada a existência de poros parcialmente ou totalmente preenchidos por material esbranquiçado (Figura 5.12-a). A observação de maior relevância refere-se à constatação da presença de alguns poros na argamassa contendo material esbranquiçado com perceptível morfologia acicular (Figura 5.12-b).

Destaca-se também que em todos os testemunhos de concreto foi observada a existência de alguns agregados com fissuras (Figura 5.13-a), alguns agregados com a presença de borda (Figura 5.13-b), além de alguns dos agregados com aparência de oxidação. Também foi possível observar em alguns pontos sobre a superfície do testemunho de concreto a presença de manchas amareladas. Os testemunhos extraídos assemelham-se em suas características visuais.

**Figura 5.12** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE Mascarenhas: a) poro totalmente preenchido com material esbranquiçado (C1.CTa); b) poro preenchido com material esbranquiçado de morfologia acicular (C1.CTa).

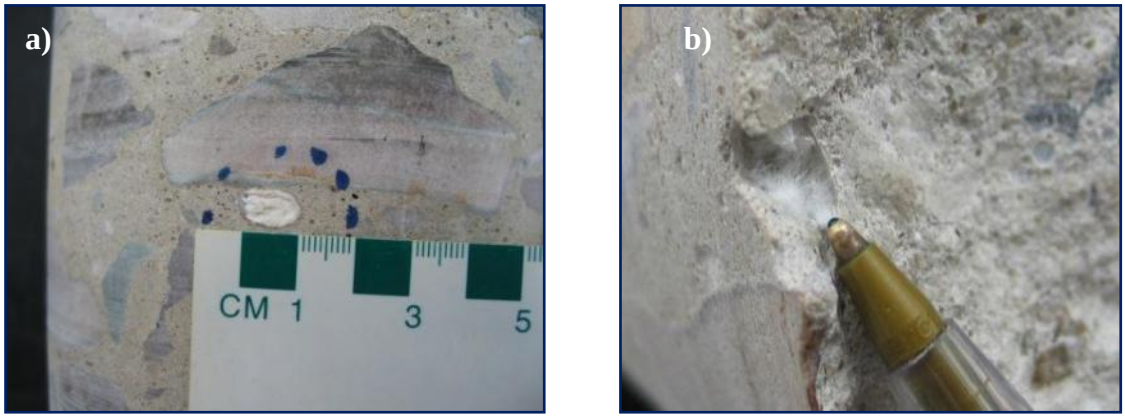
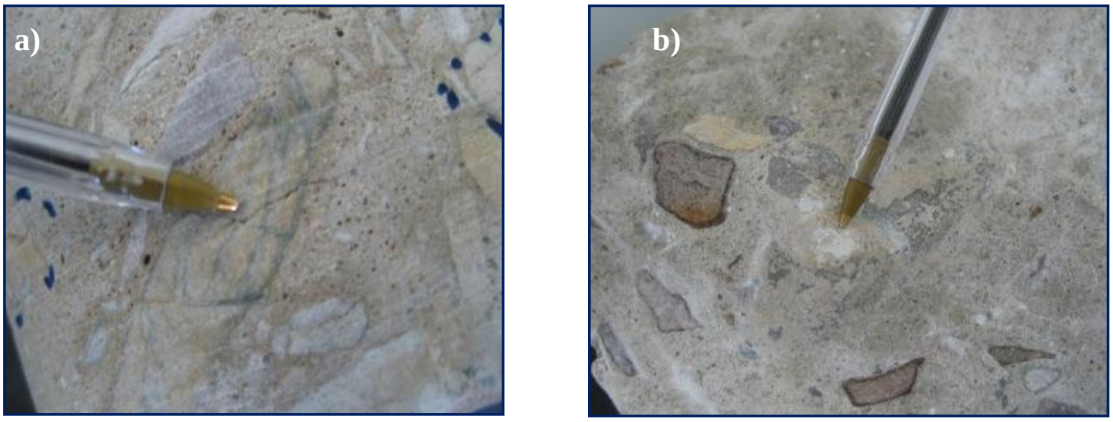



**Figura 5.13** – Inspeção dos testemunhos da UHE Mascarenhas: a) agregado com fissura (C7.CEl.5); b) agregados com fina borda escura e regiões com deposição de material esbranquiçado (C8.CEl.12).




Apresentam-se na Tabela 5.5 as principais características identificadas durante inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto extraídos da UHE Mascarenhas.

**Tabela 5.5 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE Mascarenhas.

| Testemunho | Poros com deposições | Bordas nos agregados | Manchas na argamassa | Agregado oxidado | Agregado fissurado | Argamassa com fissura | Destacamento entre argamassa e agregado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1-MTa | X | X | | X | X | X | X |
| C2.MTa | X | | X | X | X | X | X |
| C3.MTa | X | | X | X | X | X | X |
| C4.MTa | X | X | X | X | X | X | X |
| C5.MTa | X | X | | X | X | | X |
| C6.MVt | X | X | X | X | X | | X |
| C7.MVt | X | X | X | X | X | X | X |
| C8.MVt | X | | X | X | X | X | X |
| C9.MVt | X | X | X | X | X | X | X |
| C10.MVt | X | | X | X | X | | X |

### 5.3.3.3 UHE Paulo Afonso II

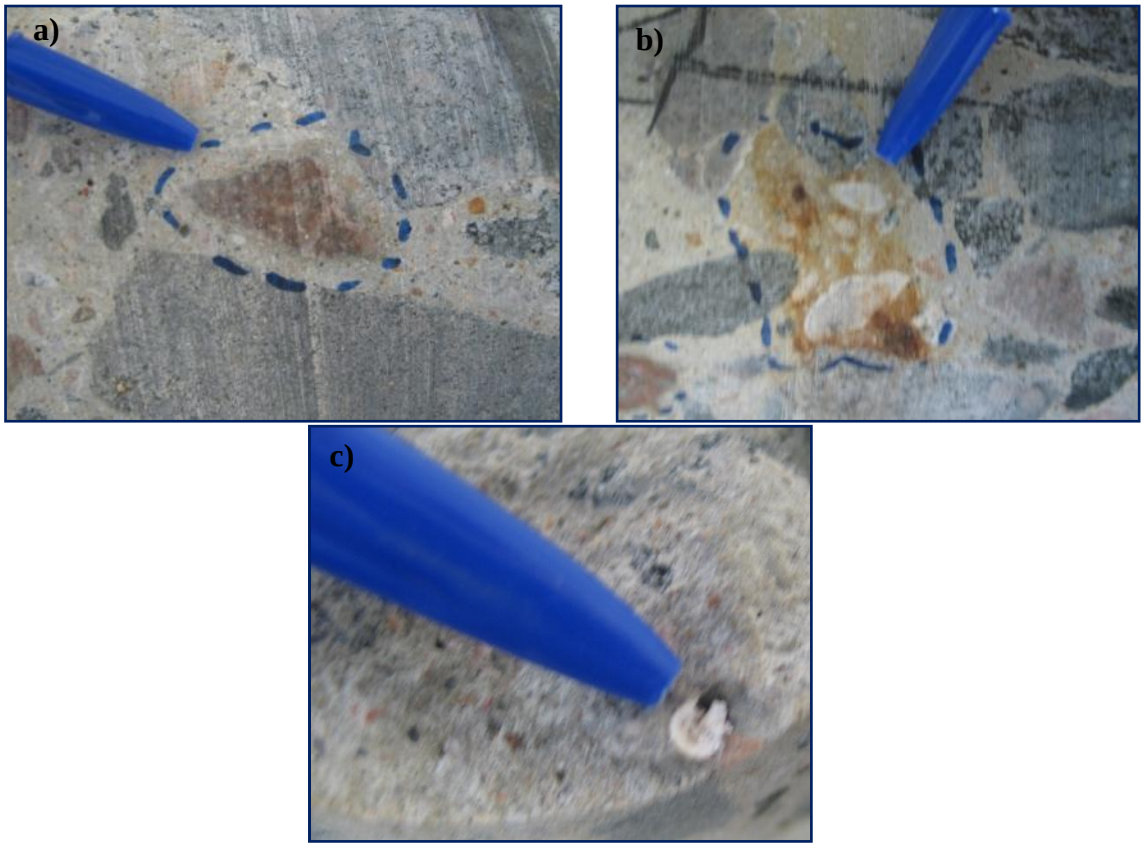
Os aspectos gerais observados na inspeção externa dos testemunhos de concreto extraídos da galeria de drenagem I, situada nas estruturas da tomada d'água de PA II, revelaram que as argamassas dos concretos, em geral, apresentam cor cinza claro, com distribuição normal dos constituintes, agregado graúdo constituído de granito e com dimensão máxima de 76 mm e 152 mm.

Em geral, todos os concretos possuem algumas falhas na zona de transição entre a argamassa e o agregado, com poros de diversos tamanhos. Ficou constatado o emprego de areia natural e também artificial, que pela semelhança visual, pressupõe-se ser do mesmo maciço rochoso originário dos agregados graúdos.

Os testemunhos apresentam em suas superfícies alguns poros revestidos parcialmente com material branco, cuja maior intensidade foi verificada para o testemunho C5.PAIITa, que continham seis poros parcialmente revestidos e dois totalmente preenchidos por material esbranquiçado.

Observou-se também na superfície desses testemunhos a existência de agregados com uma fina borda branca na zona de transição entre o agregado e a argamassa, alguns agregados envoltos por manchas escuras e com aparência de umidade (Figura 5.14-a), e outros agregados com aspecto de oxidação. Além destas, identificaram-se também algumas ocorrências de manchas amareladas na argamassa do concreto (Figura 5.14-b).

**Figura 5.14** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE PA II: a) ocorrência de uma mancha escura, com aparência de umidade, envolvendo um agregado (C2.PAIITa); b) manchas amareladas no corpo do testemunho (C6.PAIITa); c) poro no concreto C5.PAIITa com deposição de material esbranquiçado.




Encontram-se na Tabela 5.6 as principais características identificadas durante inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto referentes à UHE Paulo Afonso II.

**Tabela 5.6 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE PA II.

| Testemunho | Poros com deposições | Bordas nos agregados | Manchas na argamassa | Agregado oxidado | Agregado fissurado | Argamassa com fissura | Destacamento entre argamassa e agregado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1.PAIITa | X | | X | | | | |
| C2.PAIITa | X | | X | | | X | X |
| C3.PAIITa | X | | X | | | | |
| C4.PAIITa | X | | X | X | | X | X |
| C5.PAIITa | X | | X | X | X | | X |
| C6.PAIITa | X | X | X | X | | | |
| C7.PAIITa | X | X | X | X | | | |

### 5.3.3.4 UHE Paulo Afonso IV

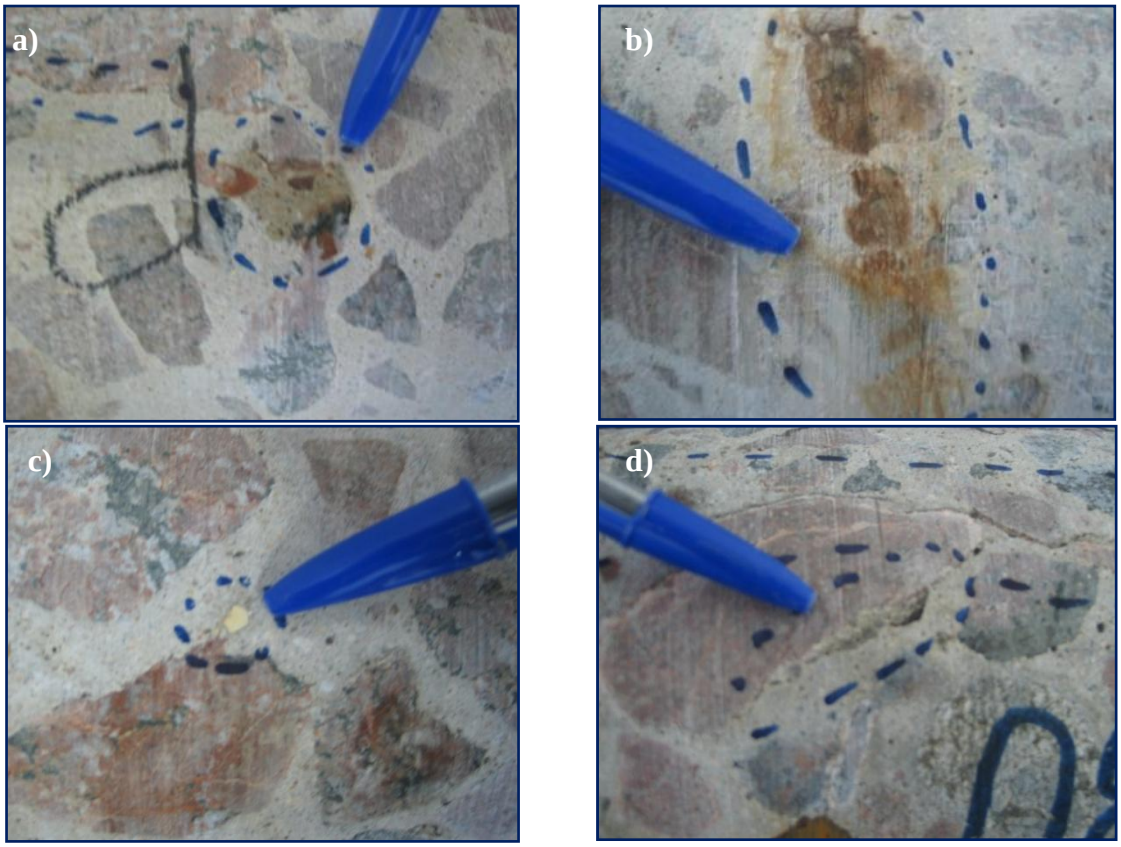
Os concretos extraídos da galeria de drenagem da tomada d'água de PA IV apresentam cor cinza claro, com distribuição normal dos constituintes, agregado graúdo constituído de granito com dimensão máxima de 76 mm e emprego de areia natural.

Todos os concretos apresentaram-se com poucas falhas na zona de transição entre a argamassa e o agregado, com poros de diversos tamanhos e porosidade normal. A grande maioria dos poros encontrava-se vazios, com poucas ocorrências de poros revestidos parcialmente com material esbranquiçado. Em todos os testemunhos foi observada a existência de alguns agregados com fina borda branca. Foi também possível observar alguns pontos sobre a superfície do concreto com manchas com aparência de umidade (Figura 5.15-a) e algumas regiões da argamassa com manchas de coloração cinza escura. Este tipo de mancha já foi observado e relatado por Hasparyk (2005) em sua tese, quando da investigação da UHE Furnas, atribuindo aos produtos da RAA às manchas escuras, após análises por microscopia eletrônica de varredura e EDS.

Os testemunhos extraídos das estruturas do vertedor assemelham-se aos testemunhos extraídos das estruturas da tomada d'água quanto às suas características visuais citadas, não tendo sido observada a presença de fissuras nos agregados e nem nas argamassas. De forma comparativa, dentre os testemunhos extraídos das usinas do complexo de Paulo Afonso, os concretos da usina de PA IV são os que apresentam melhores aspectos, entretanto com alguns indícios de manifestações patológicas.

A Figura 5.15, apresentada a seguir, registra algumas das características observadas durante a inspeção dos testemunhos de concreto da UHE PA IV.

**Figura 5.15** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE PA IV: a) região do testemunho com mancha com aparência de umidade (C2-PAIVTa); b) manchas amarela/marrom ferrugem (C8-PAIVVt); c) poro com deposição de material esbranquiçado (C3-PAIVTa); d) destacamento entre argamassa e agregado (C9-PAIVVt).




Indicam-se na Tabela 5.7 as principais ocorrências vistas durante a inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto referentes à UHE Paulo Afonso IV.

**Tabela 5.7 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE PA IV.

| Testemunho | Poros com deposições[1] | Bordas nos agregados | Manchas na argamassa | Agregado oxidado | Agregado fissurado | Argamassa com fissura | Destacamento entre argamassa e agregado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1-PAIVTa | X | X | X | | X | | X |
| C2-PAIVTa | X | X | X | X | X | | |
| C3-PAIVTa | X | X | X | X | X | | X |
| C4-PAIVTa | X | X | X | | | | X |
| C5-PAIVTa | X | | X | X | | | X |
| C6-PAIVVt | X | | X | X | | | X |
| C7-PAIVVt | X | | X | | | | X |
| C8-PAIVVt | X | | X | X | | | X |
| C9-PAIVVt | X | | X | X | | X | X |
| C10-PAIVVt | X | | X | | | | |

**Nota:** 1 – Em todos os testemunhos foi observada a existência de algum poro com deposição, porém de forma pontual.

### 5.3.3.5 UHE Apolônio Sales (Moxotó)

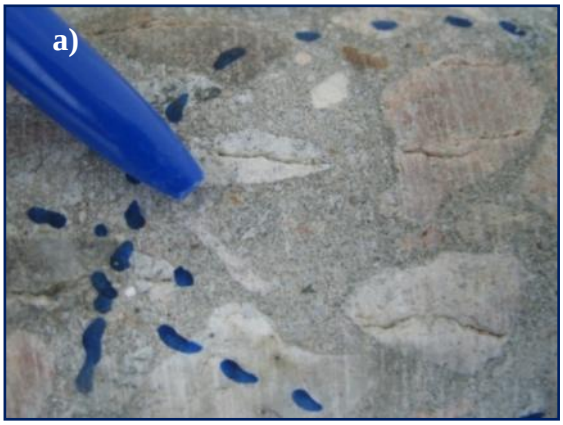
Os aspectos gerais visualizados na inspeção externa dos testemunhos de concreto revelaram que os concretos de Moxotó, de forma geral, apresentam cor cinza claro, com distribuição normal dos constituintes, agregado graúdo constituído pela britagem de provável granito migmatítico, apresentando diversas tonalidades, com dimensão máxima característica predominante de 38 mm e, em somente um testemunho, de 76 mm. Em todos os concretos identificou-se o emprego de areia natural e artificial, provavelmente oriunda da britagem do mesmo maciço rochoso que o agregado graúdo, em função da semelhança visual.

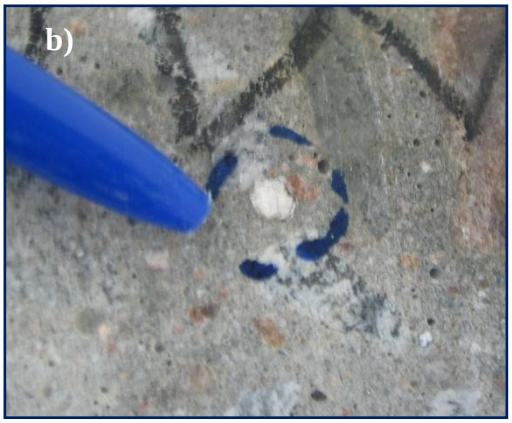
Os concretos apresentam-se com poucas (entre uma e três) falhas na zona de transição entre a argamassa e o agregado. Destaca-se que alguns agregados apresentavam-se fissurados, além de alguns terem apresentado aparência de oxidação.

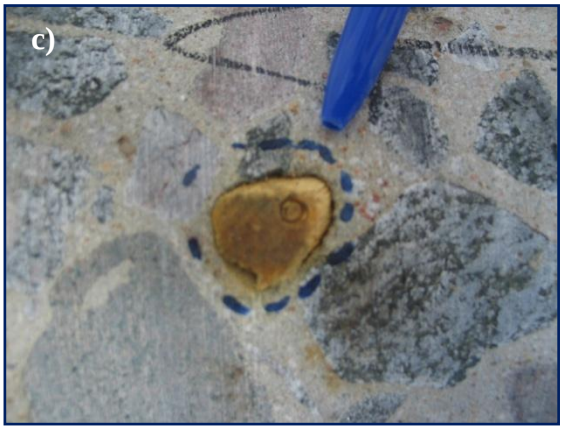
A maior parte dos poros presentes nas superfícies dos testemunhos de concreto encontra-se vazia, com poucas ocorrências de poros revestidos com material esbranquiçado. Em todos os testemunhos foram observados alguns agregados com a presença de fina borda branca no seu entorno, e outros com a presença de coloração cinza escura (aspecto de mancha). Essas manchas escuras são similares àquelas observadas em PA IV e por Hasparyk (2005), conforme mencionado anteriormente.

Apresentam-se na Figura 5.16, algumas das características observadas durante a inspeção dos testemunhos de concreto da UHE Moxotó.

**Figura 5.16** – Inspeção dos testemunhos de concreto da UHE Moxotó: a) Agregados com fissuras (C3.MxGD); b) poro totalmente preenchido com material esbranquiçado (C1.MxGD); c) agregado com aparência de oxidação (C5.MxGD); d) mancha na argamassa (C2.MxGD).





Encontram-se apresentados na Tabela 5.8 as ocorrências identificadas durante a inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto referentes à UHE Moxotó.

**Tabela 5.8 -** Características identificadas na inspeção visual da superfície dos testemunhos de concreto – UHE Moxotó.

| Testemunho | Poros com deposições | Bordas nos agregados | Manchas na argamassa | Agregado oxidado | Agregado fissurado | Argamassa com fissura | Destacamento entre argamassa e agregado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1.MxGD | X | | X | X | X | X | |
| C2.MxGD | X | | X | X | X | X | |
| C3.MxGD | X | | X | | X | X | |
| C4.MxGD | X | | X | X | X | X | X |
| C5.MxGD | X | | X | X | X | X | |
| C6.MxGD | X | | X | X | X | X | |
| C7.MxGD | X | X | X | X | X | X | |

## 5.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Apresentam-se, na sequência, os valores obtidos nos ensaios mecânicos de todos os testemunhos de concretos extraídos das usinas estudadas. Os ensaios mecânicos realizados foram: a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Realizou-se tratamento estatístico dos dados com a eliminação de espúrios, conforme orientações contidas na ASTM E 178 (ASTM, 2008), empregando o método de Dixon, e nenhum dos valores relacionados às propriedades mecânicas dos concretos aqui analisados foram considerados espúrios.

Conforme já apresentado na revisão da literatura, a propriedade mecânica do concreto mais sensível e normalmente mais afetada pelo desenvolvimento da RAA é o módulo de elasticidade. Além disto, as expansões internas causadas em decorrência de oxidações de

minerais sulfetos também podem conduzir a tal fenômeno. Desta forma, faz-se necessário avaliar se os resultados obtidos por meio de ensaio mecânico encontram-se dentro do previsto ou se apresentam com certa discrepância ao esperado.

Destaca-se que não se dispõe de dados de módulo de elasticidade da época da construção dos empreendimentos dos concretos empregados na região onde ocorreram as extrações. Provavelmente, a não localização desses dados deve-se ao fato de a resistência à compressão ter sido a única propriedade mecânica monitorada com maior ênfase durante o controle tecnológico de produção dos concretos, ou pelo fato de não ter sido realizado monitoramento desta propriedade na época da construção.

A acepção atual pelo controle tecnológico é bem mais rigorosa que a vivenciada em obras mais antigas. Desta forma, alguns parâmetros de controle tecnológico empregados durante a construção dessas usinas estudadas podem não ter sido monitorados, justificando assim a não obtenção de tais dados no levantamento de informações técnicas.

É comum correlacionar o valor da resistência à compressão do concreto com o seu módulo de elasticidade. Conforme destaca Pacheco (2006), isto se deve ao fato de essas propriedades físicas, embora em diferentes proporções, serem afetadas pelos mesmos parâmetros e em diferentes graus. Conforme apresentado em Furnas (1997), os fatores que mais influenciam nessas duas propriedades são o tipo e a quantidade de agregado graúdo.

Neste contexto, de forma a auxiliar na avaliação dos valores de módulo de elasticidade obtidos em ensaio mecânico, far-se-á uso de curvas estimativas para o módulo de elasticidade do concreto em função da resistência à compressão. Diversos trabalhos publicados apresentam correlações obtidas ou modelos matemáticos para previsão do módulo de elasticidade por meio da resistência à compressão, além de alguns desses trabalhos tentarem relacionar o tipo de agregado empregado na produção do concreto (ALMEIDA, 1990; SHEHATA *et al.*, 1993; DAL MOLIN; MONTEIRO, 1996; KLISZEWICZ; ADOKIEWICZ, 2002).

Algumas normas e códigos, tanto nacionais quanto internacionais, trazem em seu escopo formulações que permitem estimar o módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto. Como exemplo, podem ser citadas as formulações das normas CEB/FIB *model code* 2010 (CEB, 2012), *Eurocode 2 - Design of concrete structures* (EN, 2004), ACI 318 - *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI, 2011) e a

normalização brasileira NBR 6118 - projeto de estruturas de concreto (ABNT, 2007), procedimento que se encontra inclusive em revisão e já tendo sido disponibilizado para consulta nacional seu projeto de norma (ABNT, 2013). De forma elucidativa, sintetizam-se na Tabela 5.9 algumas das formulações apresentadas pelas principais normas e códigos disponíveis no meio técnico, tanto nacional quanto internacional.

Tais normas referenciadas na Tabela 5.9 são as que possuem maior destaque no meio técnico e, percebe-se que com relação à formulação para se estimar o módulo de elasticidade do concreto em função da resistência à compressão, o projeto de norma que substituirá a atual norma brasileira de dimensionamento de estruturas de concreto, a NBR 6118 (ABNT, 2007), é uma adaptação das referidas normas CEB/FIB (CEB, 2012) e *Eurocode 2* (EN, 2004), com relação a sua equação estimativa de módulo. Fica claro, pelo apresentado nas formulações propostas, a influência que o tipo de agregado possui sobre o valor do módulo de elasticidade do concreto, portanto isto é considerado nas comparações realizadas neste estudo dado o conhecimento do tipo dos agregados empregado nos concretos das usinas avaliadas.

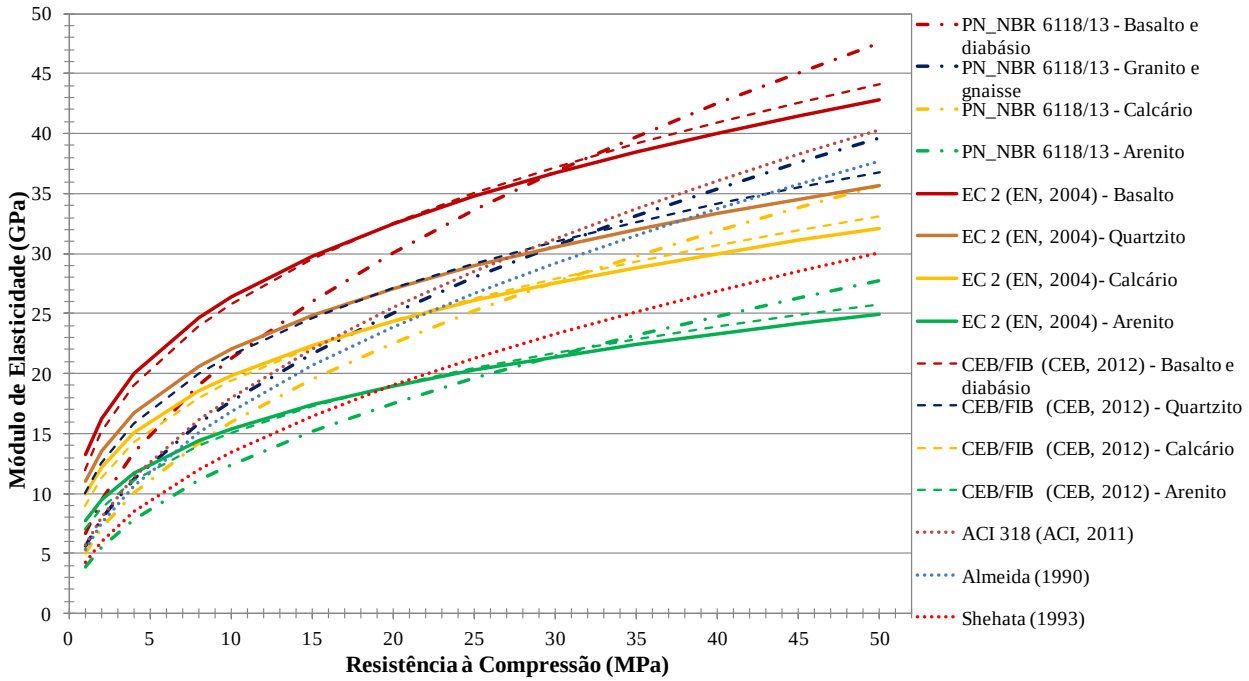
**Tabela 5.9** – Equações para estimativa do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto.

| Referência | Equação | Observações |
|---|---|---|
| CEB/FIB *model code* 2010 (CEB, 2012) | $Eci = x_e\, E_{co} \left(\frac{fcm}{fcmo}\right)^{\frac{1}{3}}$, (em MPa) | - $E_{co} = 2{,}15\ x\ 10^4\ MPa$<br>- fcmo = 10 MPa;<br>- $x_e$ é função do tipo de agregado, sendo:<br>- $x_e$ = 1,2 para basalto e calcário denso;<br>- $x_e$ = 1,0 para quartzito;<br>- $x_e$ = 0,9 para calcário;<br>- $x_e$ = 0,7 para arenito; |
| Eurocode 2- *Design of concrete structures* (EN, 2004) | $Ecm = x_e\, 22 \left(\frac{fcm}{10}\right)^{0,3}$,(em MPa) | A equação é aplicada para agregados quartziticos.<br>- $x_e$ é função do tipo de agregado, sendo:<br>- $x_e$ = 1,2 para basalto;<br>- $x_e$ = 0,9 para calcário;<br>- $x_e$ = 0,7 para arenito; |
| ACI 318 - *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI, 2011) | $Eci = 5700\sqrt{fc}$, (em MPa)<br>Obs. Para concretos de massa específica diferente, trocar o fator "5700" para "0,043.W$^{1,5}$", sendo w a massa específica do concreto. | Equação válida para concretos com massa específica normal. |
| NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (ABNT, 2007) | $Eci = 5600\sqrt{fck}$, (em MPa) | Equação válida para concretos do grupo I (C20 a C50), conforme NBR 8953 (ABNT, 2009). |
| Projeto de norma NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (PN_NBR 6118/13) | – $Eci = x_e\, 5600\sqrt{fck}$, para $fck$ de 20 MPa a 55 MPa.<br>– $Eci = 21{,}5.10^3 x_e \left(\frac{fck}{10} + 1{,}25\right)^{\frac{1}{3}}$, para $fck$ de 55 MPa a 90 MPa. | - $x_e$ é função do tipo de agregado, sendo:<br>- $x_e$ = 1,2 para basalto e diabásio;<br>- $x_e$ = 1,0 para granito e gnaisse;<br>- $x_e$ = 0,9 para calcário;<br>- $x_e$ = 0,7 para arenito; |

**Legenda:** $Eci$ = Módulo de elasticidade tangente inicial; $Ecm$ = Módulo de elasticidade médio; $E_{co}$ = Módulo cordal de elasticidade equivalente a 2,15 x $10^4$ MPa; $x_e$ = Coeficiente de adequação do módulo de elasticidade em função do litotipo do agregado; $fck$= Resistência característica do concreto; $fcmo$ = Coeficiente de minoração do *fcm* e equivalentente a 10 MPa; W = Massa específica do concreto, expressa em kg/m³.

De forma a melhor visualizar o exposto, há na Figura 5.17 um gráfico com as respectivas curvas de estimativas apresentadas pelas normas citadas, além de alguns trabalhos publicados no meio técnico, como os de Almeida (1990) e Shehata (1993).

**Figura 5.17** - Comparativo entre as curvas de estimava do módulo de elasticidade pela resistência à compressão do concreto propostas por normas e trabalhos publicados no meio técnico.




Conforme pode ser observado na Figura 5.17, a curva estimativa da norma do CEB/FIB (CEB, 2012) e a curva do *Eurocode 2* (EN, 2004) são praticamente equivalentes, e possuem similaridade em relação aos coeficientes que relacionam o tipo de agregado empregado no concreto e o respectivo módulo de elasticidade. Já o novo projeto de norma PN NBR 6118 (ABNT, 2013), trás em seu escopo duas equações para estimativa do módulo de elasticidade em função de faixas de fck. Destaca-se que tais curvas referem-se a concretos estruturais, cuja resistência à compressão é acima de 20 MPa, sendo portanto a representação dessas curvas a partir do zero, conforme apresentado na Figura 5.17, apenas uma indicação esquemática.

A principal modificação proposta pelo projeto de norma da NBR 6118 (ABNT, 2013) é a ampliação do escopo desta norma, que passará a abranger além dos concretos do grupo I (C20 a C50), conforme classificação da NBR 8953 (ABNT, 2009), os concretos de alta resistência (C55 a C90). Destaca-se que segundo a classificação apresentada na norma NBR 8953 (ABNT, 2009) para concretos do grupo II, as classes de resistência variam de 55 MPa a 100 MPa, entretanto o novo projeto de norma abrange concretos de no máximo 90 MPa.

Com relação à estimativa do módulo de elasticidade por meio da resistência à compressão, o projeto de norma da NBR 6118 (ABNT, 2013) continua avaliando essa propriedade para os concretos do Grupo I por equações matemáticas que utilizam a raiz quadrada da resistência à

compressão do concreto, porém realizando ajuste em função do tipo de agregado utilizado, conforme já estava previsto na prática recomendada IBRACON (IBRACON, 2008), que faz esclarecimentos sobre a NBR 6118 (ABNT, 2007), e também como fazem o CEB/FIB (CEB, 2012) e o Eurocode 2 (EN, 2004).

Para as classes mais altas de resistência, o projeto de norma da NBR 6118 (ABNT, 2013) adotou uma equação que considera a raiz cúbica da resistência, semelhante à empregada no CEB/FIB *model code* 2010 (CEB, 2012), porém adequando-a de forma que as duas curvas (raiz quadrada e raiz cúbica) encontram-se no mesmo ponto, havendo assim continuidade na curva de crescimento do módulo em função da resistência à compressão do concreto. Também, para os concretos de alta resistência, faz-se a correção em função do tipo de agregado.

É também interessante relatar que a correção do valor do módulo de elasticidade em função do abatimento do concreto, conforme recomenda o trabalho publicado pelo IBRACON (IBRACON, 2008), que comenta sobre as diretrizes da norma NBR 6118 (ABNT, 2007), não foi considerada no projeto de norma da NBR 6118 (ABNT, 2013). Esta prática, também não se encontra relacionada nas equações das normas internacionais citadas na Tabela 5.9.

De acordo com o projeto de norma da NBR 6118 (ABNT, 2013), para concretos de até 55 MPa, caso em que se enquadram todos os concretos desta pesquisa, a única diferença na fórmula é a adição do coeficiente que leva em consideração o tipo de agregado, tendo o projeto de norma apresentado apenas quatro tipos distintos de agregados, a saber: basalto e diabásio, granito e gnaisse, calcário, arenito. Provavelmente tais coeficientes apresentados no projeto de norma devem-se as orientações contidas no CEB/FIB (CEB, 1993) e no Eurocode 2 (EN, 2004).

É possível notar na Figura 5.17 que os valores de módulo de elasticidade estimados pelas equações do CEB/FIB (CEB, 2012) e do Eurocode 2 (EN, 2004), quando comparados com as curvas propostas pelo projeto de norma da NBR 6118 (ABNT, 2013) são superiores até a faixa de resistência de aproximadamente 30 MPa, sendo a diferença mais acentuada para concretos de menor resistência e à medida que a resistência se aproxima desse valor, a diferença vai se atenuando, sendo que para resistências acima de 30 MPa as formulações do projeto de norma fornecem valores mais elevados, sendo maior a diferença à medida que a resistência aumenta. Para concretos de *fck* de 55 MPa até 90 MPa a nova equação do projeto

de norma fornece valores mais próximos das equações do CEB/FIB (CEB, 2012) e do Eurocode 2 (EN, 2004).

Percebe-se que para concretos de até 55 MPa, e com agregados de granito ou gnaisse, a equação do projeto de norma PN NBR 6118 (ABNT, 2013) para estimar o módulo de elasticidade permanece a mesma que a apresentada na NBR 6118 (2007), uma vez que o coeficiente adotado para esse tipo de agregado é um.

Observa-se também que a equação apresentada pelo ACI 318 - *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI, 2011) é bem similar à equação da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007), fornecendo valores ligeiramente superiores, e também empregando uma equação matemática que utilizam a raiz quadrada da resistência à compressão do concreto.

Diante do exposto, realizar-se-á para os concretos analisados, comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtido em ensaio, com as respectivas estimativas propostas pelas normas citadas, fazendo-se sempre o uso das equações que mais se aproximam do tipo de agregado empregado no concreto em análise.

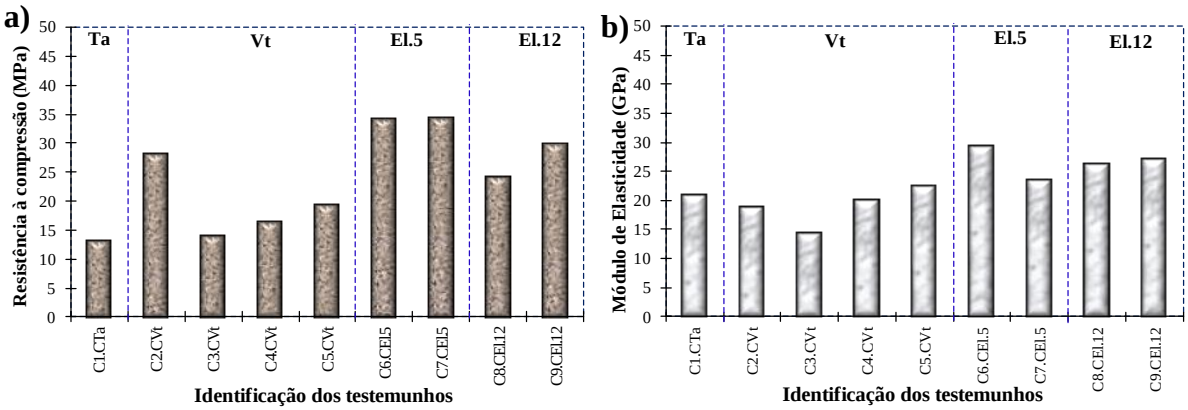
Apresentam-se na Tabela 5.10 os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para os testemunhos de concreto extraídos da UHE Corumbá e as respectivas médias, desvio padrão e coeficiente de variação tidos entre os valores obtidos.

**Tabela 5.10 -** Resistência à compressão e módulo de elasticidade - UHE Corumbá.

| Siglas | Resistência à compressão (MPa) | | | | Módulo de elasticidade (GPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) |
| C1.CTa | 12,90 | 12,90 | - | - | 20,71 | 20,71 | - | - |
| C2.CVt | 27,92 | 19,30 | 5,31 | 28 | 18,49 | 18,74 | 2,98 | 16 |
| C3.CVt | 13,87 | | | | 14,20 | | | |
| C4.CVt | 16,32 | | | | 19,87 | | | |
| C5.CVt | 19,09 | | | | 22,41 | | | |
| C6.CEl.5 | 34,05 | 34,13 | 0,08 | 0,2 | 29,11 | 26,21 | 2,90 | 11 |
| C7.CEl.5 | 34,20 | | | | 23,31 | | | |
| C8.CEl.12 | 23,85 | 26,77 | 2,92 | 11 | 26,20 | 26,60 | 0,40 | 1 |
| C9.CEl.12 | 29,68 | | | | 26,99 | | | |

Na Figura 5.18 apresentam-se os gráficos com os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos extraídos da UHE Corumbá.

**Figura 5.18** - Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE Corumbá: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade.

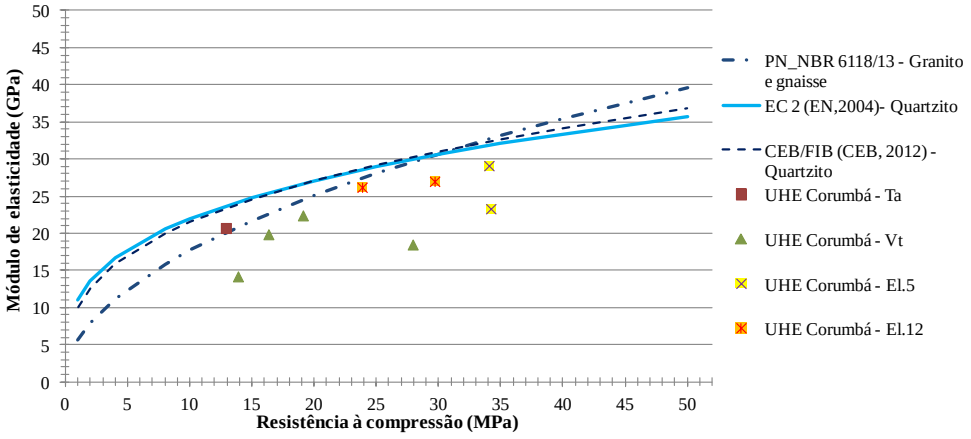



Os agregados empregados na confecção dos concretos da UHE Corumbá são do litotipo quartzito e granada-mica-quartzo xisto. Comparando os diversos valores de módulo de elasticidade de agregados apresentados em Furnas (1997), percebe-se que dentre os quatro tipos de agregados apresentados no projeto de norma da NBR 6118 (ABNT, 2007), o litotipo que mais se assemelha aos agregados referentes à UHE Corumbá são: os granitos e gnaisses.

Pelo exposto e de forma comparativa, far-se-á uso da curva proposta no projeto de norma (ABNT, 2013) para os granitos e gnaisses, além das demais curvas apresentadas pelos códigos relatados, referentes aos agregados de quartzito, para se comparar os valores dos módulos obtidos para os concretos da UHE Corumbá.

Apresenta-se na Figura 5.19 o gráfico com os valores agrupados de resistência à compressão e módulo de elasticidade confrontando-os com as respectivas curvas proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2007), que é a mesma que a do projeto de norma PN NBR 6118 (ABNT, 2013) para agregados de granito ou gnaisse, além das curvas do CEB/FIB (CEB, 2012) e do Eurocode 2 (EN, 2004) para agregados quartzíticos.

**Figura 5.19 -** Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade – UHE Corumbá (agregado quartzítico).




Os concretos da UHE Corumbá apresentaram resistências médias por estrutura que variaram de 12,9 MPa para o concreto da galeria de drenagem da tomada d`água, 19,30 MPa (C.V. = 28%) para os concretos extraídos da galeria de drenagem do vertedor, 34,13 MPa (C.V. = 0,2%) para os concretos do 5º lance da escada do poço do muro central e 26,77 MPa (C.V. = 11%) para os extraídos do 12º lance da escada do muro central.

No geral, as possíveis resistências de dosagem, para cada estrutura eram: 15 MPa, 21 MPa, 37 MPa e 21 MPa, indicando assim variações, estando os três primeiros concretos aparentemente abaixo do esperado e o último acima da possível resistência de projeto.

Os valores de módulo de elasticidade encontram-se, quase em sua totalidade, abaixo das estimativas apresentadas pelos códigos e normas pesquisadas (EN, 2004; CEB, 2012; ABNT, 2013). Apenas o testemunho extraído da tomada d'água obteve módulo aderido à curva proposta pelo projeto de norma brasileira (ABNT, 2013).

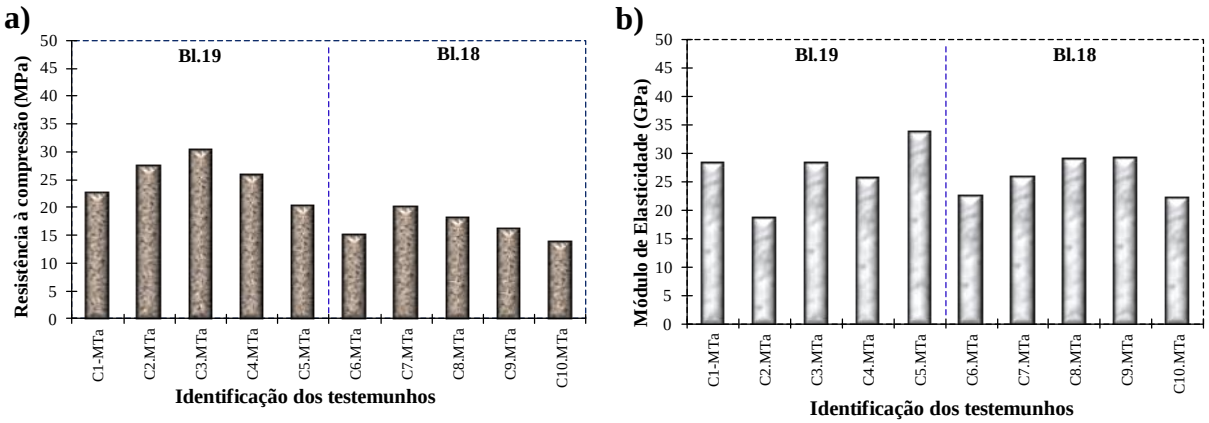
Apresentam-se, na Tabela 5.11, os resultados obtidos para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos testemunhos de concreto extraídos da UHE Mascarenhas.

**Tabela 5.11** - Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.

| Testemunho | Resistência à compressão (MPa) | | | | Módulo de elasticidade (GPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Individua | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) | Individua | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) |
| C1-MTa | 22,36 | 24,99 | 3,54 | 14 | 28,06 | 26,69 | 4,95 | 19 |
| C2.MTa | 27,10 | | | | 18,30 | | | |
| C3.MTa | 30,05 | | | | 28,10 | | | |
| C4.MTa | 25,49 | | | | 25,44 | | | |
| C5.MTa | 19,95 | | | | 33,53 | | | |
| C6.MTa | 14,85 | 16,44 | 2,23 | 14 | 22,13 | 25,46 | 3,03 | 12 |
| C7.MTa | 19,86 | | | | 25,60 | | | |
| C8.MTa | 17,95 | | | | 28,70 | | | |
| C9.MTa | 15,92 | | | | 28,92 | | | |
| C10.MTa | 13,61 | | | | 21,94 | | | |

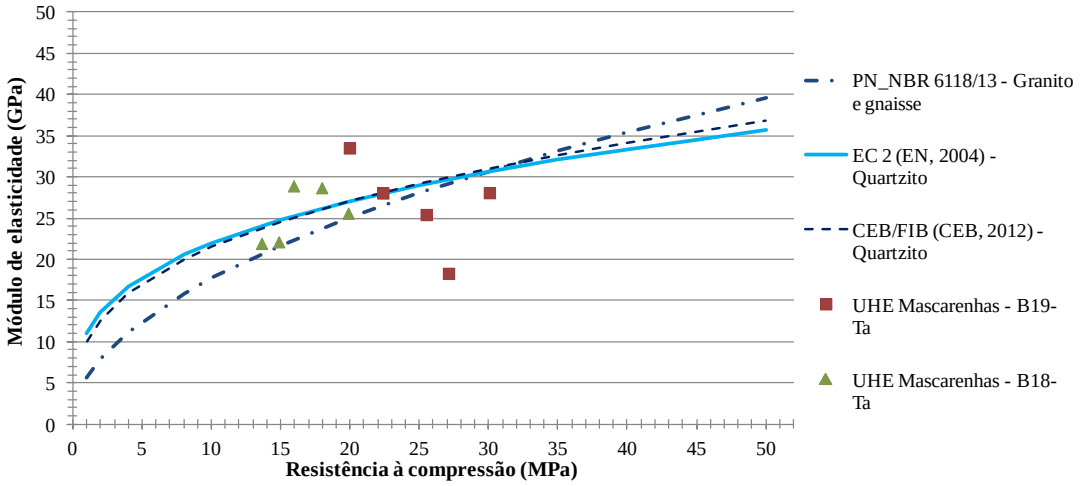
Os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos de concreto referentes à UHE Mascarenhas podem ser visualizados de forma gráfica na Figura 5.20, apresentada na sequência.

**Figura 5.20** - Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE Mascarenhas: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade.




Apresenta-se na Figura 5.21 o gráfico com os valores agrupados de resistência à compressão e módulo de elasticidade, confrontando-os com as respectivas curvas proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2007), que é a mesma que a do projeto de norma PN NBR 6118 (ABNT, 2013) para agregados granitos e gnaisses, além das curvas do CEB/FIB (CEB, 2012) e do Eurocode 2 (EN, 2004), os para agregados quartzíticos. Ressalta-se que os agregados extraídos dos testemunhos de concreto da UHE Mascarenhas são do titotipo quartzito.

**Figura 5.21** - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade – UHE Mascarenhas (agregado quartzítico).




Com relação aos concretos extraídos das estruturas da UHE Mascarenhas, eles apresentaram resistências médias de 16,4 MPa (C.V. = 14%) para os concretos provenientes do bloco 18 e, 25,0 MPa (C.V. = 14%) para os concretos extraídos do bloco de concretagem de número 19. De acordo com os dados obtidos no levantamento de informações técnicas da referida usina, tais concretos obtiveram resistência de controle aos 90 dias de ensaio na ordem de 16 MPa, desta forma, os valores de resistência encontram-se acima deste valor, indicando que não há anormalidade nesta propriedade.

Já em relação ao módulo de elasticidade dos concretos da UHE Mascarenhas, eles não apresentaram comportamento único, porém os valores encontram-se dispersos em regiões próximas as curvas propostas pelas normas e códigos pesquisados (EN, 2004; CEB, 2012; ABNT, 2013), não percebendo-se comportamento anômalo ao esperado quando se compara conjuntamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

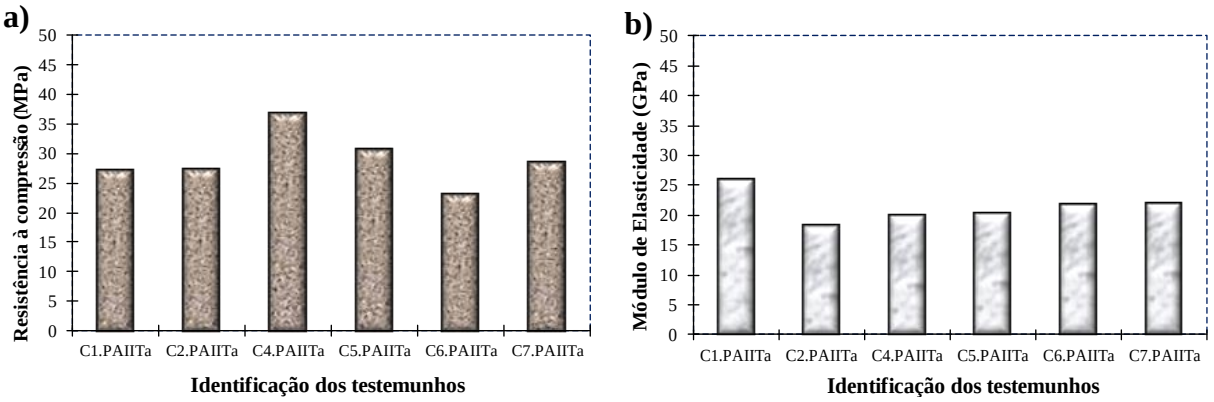
Apresentam-se, na Tabela 5.12, os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos da UHE PA II. Além destes, também são apresentados na referida tabela os valores calculados para a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

**Tabela 5.12 -** Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de PA II.

| Testemunho | Resistência à compressão (MPa) | | | | Módulo de elasticidade (GPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) |
| C1.PAIITa | 26,96 | 28,77 | 4,21 | 14,6 | 25,8 | 21,16 | 2,42 | 11,4 |
| C2.PAIITa | 27,17 | | | | 18,0 | | | |
| C4.PAIITa | 36,67 | | | | 19,7 | | | |
| C5.PAIITa | 30,56 | | | | 20,1 | | | |
| C6.PAIITa | 22,87 | | | | 21,6 | | | |
| C7.PAIITa | 28,41 | | | | 21,7 | | | |

Os gráficos obtidos com os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade para os testemunhos da UHE PA II podem ser visualizados na Figura 5.22.

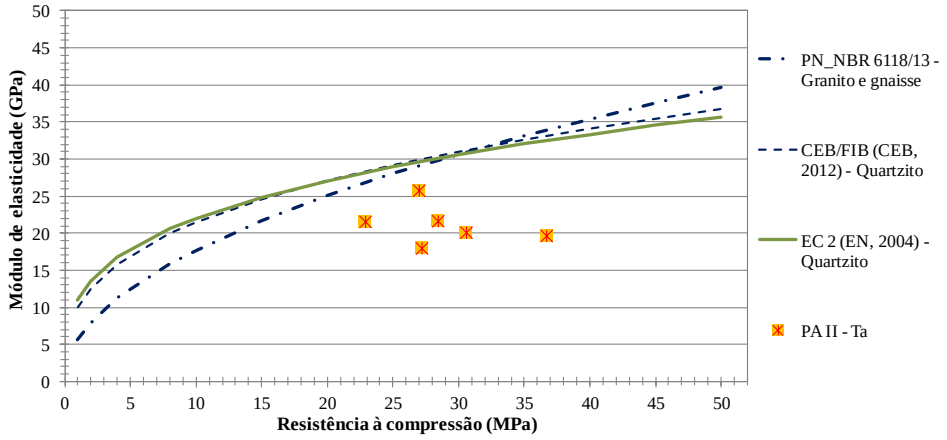
**Figura 5.22 -** Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE PA II: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade.




Conforme classificação petrográfica dos agregados extraídos dos concretos das usinas pertencentes ao complexo de Paulo Afonso, verifica-se que eles possuem certa semelhança e têm como origem rochas graníticas. Para comparar os valores de módulo de elasticidade dos concretos extraídos das usinas desse complexo, foram utilizadas como curvas estimativas de referência, as que se referem ao agregado de litotipo granito e gnaisse do projeto de norma PN NBR 6118 (ABNT, 2013), que é a mesma que a curva da NBR 6118 (ABNT, 2007), além das curvas referentes ao quartzito dos respectivos CEB/FIB (CEB, 1993) e do Eurocode 2 (EN, 2004), por semelhança de mineralogia.

Encontra-se na Figura 5.23 o gráfico com os valores agrupados de resistência à compressão e módulo de elasticidade confrontando-os com as respectivas curvas de estimativas.

**Figura 5.23** - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos de PA II (agregado granítico).




Com relação aos concretos da UHE Paulo Afonso II, estes apresentaram resistência média à compressão da ordem de 29 MPa (C.V. = 15%). Apesar de parecer razoável os valores encontram-se dispersos revelando certa heterogeneidade nos concretos. Não se dispõe de dados das resistências de projeto para esta usina para efeitos comparativos. Com relação ao módulo de elasticidade, todos os valores obtidos apresentam-se abaixo das curvas propostas pelas normas e códigos pesquisados (EN, 2004; CEB, 2012; ABNT, 2013).

Apesar de não existir correlação, observa-se um comportamento quase constante para o módulo de elasticidade com o acréscimo de resistência à compressão. Tal comportamento é contrário ao apresentado pelas curvas de previsão, indicando, desta forma, a provável existência de anomalias no concreto estudado.

A variabilidade percebida não é única, pois comportamento semelhante já foi observado nos concretos das estruturas das usinas do Complexo de Paulo Afonso por Silva (2007). Quando comparadas a três usinas estudadas nesta pesquisa pertencentes ao Complexo de Paulo Afonso, percebe-se que os valores obtidos para o módulo de elasticidade para as usinas de PAII e Moxotó foram os que mais se afastam das curvas apresentadas nos documentos normativos.

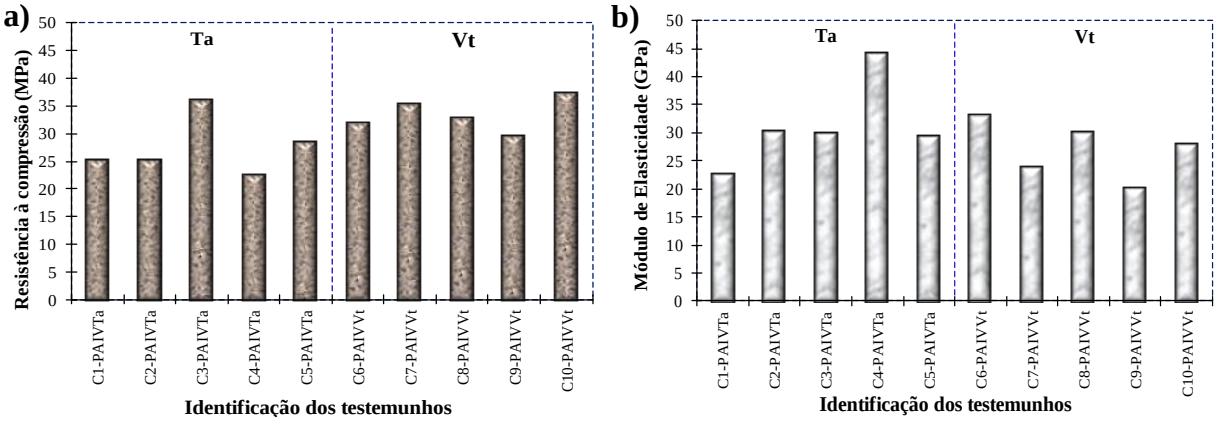
Tais comportamentos mecânicos aparentemente anormais provavelmente são reflexos das reações químicas deletérias existentes no interior dos concretos, que estão afetando o seu comportamento mecânico. Na Tabela 5.13 se encontram os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos de concreto extraídos da UHE Paulo Afonso IV.

**Tabela 5.13** - Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de PA IV.

| Testemunho | Resistência à compressão (MPa) | | | | Módulo de elasticidade (GPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) |
| C1-PAIVTa | 25,09 | 27,40 | 4,65 | 17 | 22,53 | 31,12 | 7,01 | 23 |
| C2-PAIVTa | 25,15 | | | | 30,23 | | | |
| C3-PAIVTa | 35,92 | | | | 29,74 | | | |
| C4-PAIVTa | 22,46 | | | | 43,97 | | | |
| C5-PAIVTa | 28,36 | | | | 29,13 | | | |
| C6-PAIVVt | 31,70 | 33,22 | 2,69 | 8 | 32,89 | 26,81 | 4,59 | 17 |
| C7-PAIVVt | 35,12 | | | | 23,54 | | | |
| C8-PAIVVt | 32,65 | | | | 29,93 | | | |
| C9-PAIVVt | 29,45 | | | | 19,96 | | | |
| C10-PAIVVt | 37,18 | | | | 27,73 | | | |

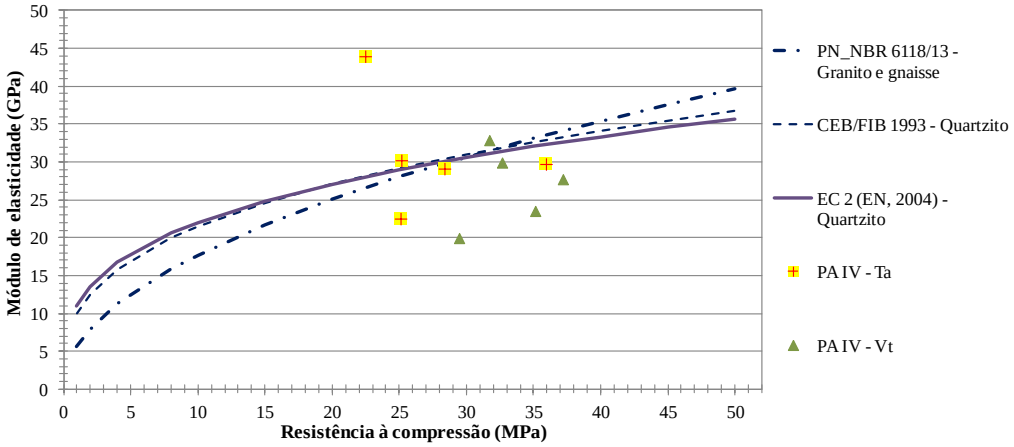
Apresentam-se na Figura 5.24 os gráficos obtidos com os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos de concreto da UHE PA VI.

**Figura 5.24** - Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE PA IV: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade.




Na Figura 5.25 há um gráfico com os valores agrupados de resistência à compressão e módulo de elasticidade confrontando-os com as respectivas curvas de estimativas, empregando neste caso as que se referem ao agregado de litotipo granito e gnaisse do projeto de norma PN NBR 6118 (ABNT, 2013), que é a mesma que a curva da NBR 6118 (ABNT, 2007), além das curvas referentes ao quartzito dos respectivos CEB/FIB (CEB, 1993) e do Eurocode 2 (EN, 2004), devido a semelhança de mineralogia.

**Figura 5.25 -** Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos de PA IV (agregado granítico).




Os concretos da UHE Paulo Afonso IV, apresentaram resistência média à compressão da ordem de 27 MPa (C.V = 17%) para os concretos extraídos da galeria de drenagem da tomada d'água e de 33 MPa (Sd = 2,7 MPa e C.V = 8%) para os concretos extraídos na galeria de drenagem do vertedor. De acordo com o levantamento de informações técnicas, tais concretos possuíam resistência de projeto aos 28 dias de idade de 17,5 MPa, denotando, desta maneira, que apesar de certa dispersão entre os valores, a média se encontra elevada.

Com relação ao módulo de elasticidade dos concretos desta usina, percebe-se comportamento contrário. Três dos cinco testemunhos oriundos da tomada d'água e quatro dos cinco testemunhos extraídos do vertedor apresentaram valores abaixo das estimativas apresentadas pelos códigos e normas pesquisadas (EN, 2004; CEB, 2012; ABNT, 2013), sendo as maiores dispersões observadas para os concretos do vertedor.

Ao comparar os concretos das outras duas usinas estudadas do complexo de Paulo Afonso, verifica-se que somente para os concretos de PA IV observou-se a existência de alguns concretos com valores de módulo de elasticidade acima do previsto, indicando assim, melhores condições de integridade, porém pontual.

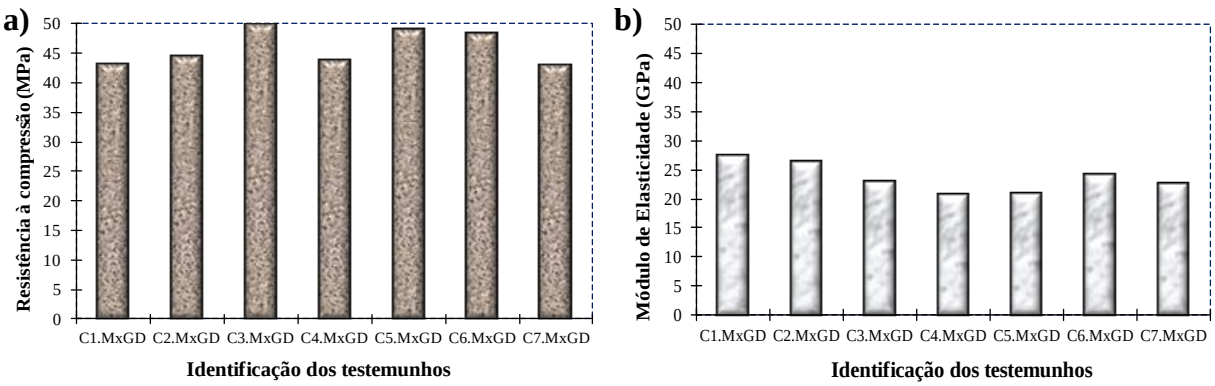
São apresentados na Tabela 5.14 os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos referentes à UHE Moxotó e as respectivas médias, desvio padrão e coeficiente de variação determinados entre os valores obtidos.

**Tabela 5.14** - Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

| Testemunho | Resistência à Compressão (MPa) | | | | Módulo de Elasticidade (GPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) | Individual | Média | Desvio Padrão | C.V. (%) |
| C1.MxGD | 42,94 | 45,86 | 2,79 | 6,1 | 27,3 | 23,45 | 2,36 | 10,1 |
| C2.MxGD | 44,43 | | | | 26,2 | | | |
| C3.MxGD | 49,83 | | | | 22,7 | | | |
| C4.MxGD | 43,75 | | | | 20,7 | | | |
| C5.MxGD | 48,91 | | | | 20,9 | | | |
| C6.MxGD | 48,25 | | | | 24,0 | | | |
| C7.MxGD | 42,91 | | | | 22,4 | | | |

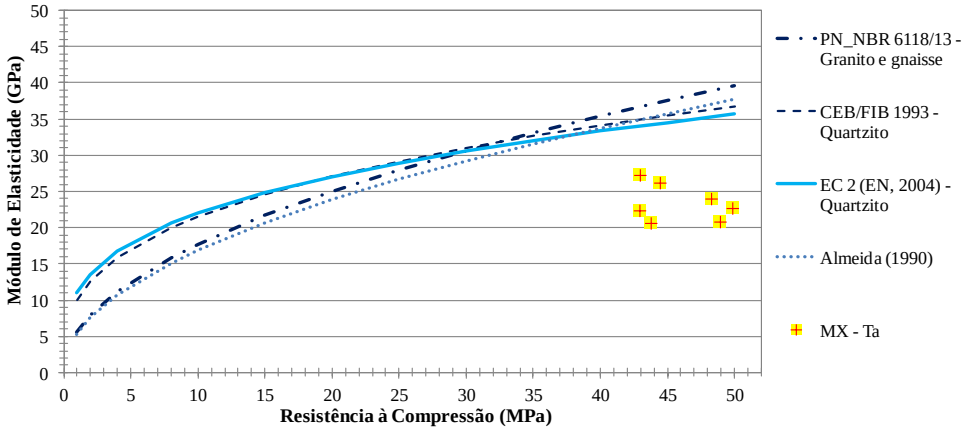
Encontram-se na Figura 5.26 os gráficos de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos testemunhos extraídos da galeria de drenagem a jusante da casa de máquinas da UHE Moxotó, respectivamente.

**Figura 5.26** - Propriedades mecânicas dos testemunhos extraídos da UHE Moxotó: a) resistência à compressão; b) módulo de elasticidade.




Na Figura 5.27 encontram-se agrupados os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade confrontando-os com as respectivas curvas de estimativa do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão. As curvas estimativas empregadas foram as mesmas utilizadas para as usinas de PA II e PA IV.

**Figura 5.27** - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos da UHE Moxotó (agregado granítico).




Pelos valores apresentados na Tabela 5.14, percebe-se que os concretos da UHE Moxotó apresentaram resistência média à compressão relativamente alta, na ordem de 46 MPa (C.V. = 6%). Além do nível de resistência obtido, os valores entre os sete testemunhos estudados encontram-se relativamente próximos e sem grandes dispersões entre eles, quando comparados com as demais usinas do complexo de Paulo Afonso estudadas nesta pesquisa.

Já com relação ao módulo de elasticidade desses concretos, percebe-se comportamento distinto, onde todos os valores apresentam-se bem abaixo das estimativas apresentadas pelos códigos e normas pesquisadas (EN, 2004; CEB, 2012; ABNT, 2013). Pela análise das propriedades mecânicas, a resistência à compressão ainda não parece ter tido reduções; entretanto, o módulo de elasticidade parece encontrar-se influenciado negativamente pelas ocorrências citadas na sequência e pelos valores teoricamente posicionados abaixo da curva. Isto pode ser reflexo da RAA já conhecida na usina ou de outros processos de deterioração do concreto.

Silva (2007) realizou extração de testemunhos de concreto da casa de força, galeria de jusante, situada na elevação 214 m, no sentido horizontal, onde obteve, para os dois testemunhos ensaiados, resistência média de 46,9 MPa, coeficiente de variação de 6,9% e desvio padrão de 3,3 MPa. Tais valores indicam semelhança entre os concretos e confirmam a classe de resistência elevada dos mesmos.

Pela análise das propriedades mecânicas dos concretos das usinas estudadas do complexo de Paulo Afonso, a resistência à compressão ainda não parece ter tido reduções. Entretanto, o

módulo de elasticidade encontra-se influenciado negativamente pelas ocorrências citadas na sequência e pelos valores teoricamente posicionados abaixo da curva.

Diante dos valores apresentados é de suma importância enfatizar as constatações de Hasparyk (2005) que verificou em seus experimentos que concretos afetados pela RAA, até certo estágio de deterioração, podem apresentar ganho de resistência à compressão, enquanto o módulo de elasticidade é reduzido desde o princípio. Tal acréscimo de resistência deve-se provavelmente ao preenchimento dos poros e vazios existentes no concreto pelas neoformações e a redução do módulo ocorre como resultado do surgimento de microfissuras.

Este fato é indicativo dos reflexos da deterioração química presente nos concretos, comportamento este já observado em outros concretos das estruturas das usinas do complexo de Paulo Afonso por Silva (2007) e também por Hasparyk (2005) na UHE Furnas, dentre outros relatos.

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

### 5.5.1 Reconstituição de traço

De forma resumida, apresentam-se na Tabela 5.15 os valores obtidos para o ensaio de reconstituição de traço dos concretos e os dados da dosagem de referência empregada na época da construção do empreendimento. O valor obtido para o traço 1:m refere-se à proporção em massa entre cimento: agregado total, onde este último representa o somatório do agregado miúdo e graúdo. Os valores apresentados têm como base de cálculo o resíduo insolúvel obtido pela análise química das argamassas e agregados graúdos realizada no ensaio de reconstituição do traço do concreto endurecido.

Mediante análise e confronto dos dados obtidos no levantamento de informações técnicas sobre as dosagens empregadas nas estruturas estudadas, com os resultados de ensaios e com as características observadas, tais como, valores obtidos pelo ensaio de reconstituição de traço, com as características levantadas durante inspeção visual dos testemunhos de concreto, como emprego ou não de areia natural e artificial, dimensão máxima característica dos agregados, além dos dados sobre a resistência à compressão, foi possível identificar, a dosagem de referência da época da construção do empreendimento.

Salienta-se que somente nas usinas de PA II e Moxotó não foram localizados os dados concernentes às dosagens aplicadas na construção dos empreendimentos, não sendo desta forma possível identificar a dosagem de referência dos concretos extraídos.

**Tabela 5.15** – Resultados obtidos no ensaio de reconstituição de traço.

| Identificação dos concretos | | Dimensão máxima provável (mm) | Resultados obtidos | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ensaio de reconstituição de traço | | Traço de referência | |
| **Usina** | **Estrutura** | | **Traço do concreto (1:m)** | **Consumo de cimento (kg/m³)** | **Traço do concreto (1:m)** | **Consumo de cimento (kg/m³)** |
| **CORUMBÁ** | Ta | 38 | 1 : 8,7 | 236 | 1:7,9 | 240 |
| | Vt | 76 | 1 : 9,5 | 216 | 1:8,2 | 238 |
| | El.5 | 19 | 1 : 7,8 | 261 | 1:6,5 | 270 |
| | El.12 | 38 | 1 : 11,0 | 190 | 1:10,0 | 192 |
| **MASCARE-NHAS** | Ta-Bl 19 | 152 | 1 : 9,9 | 186 | 1:10,1 | 195 |
| | Ta-Bl 18 | 152 | 1 : 9,4 | 193 | | |
| **PA II** | Ta | 152 | 1 : 7,3 | 239 | N.D | |
| **PA IV** | Ta | 76 | 1 : 10,6 | 182 | 10,6 | 190 |
| | Vt | 76 | 1 : 10,0 | 190 | | |
| **MOXOTÓ** | GD | 38 | 1 : 5,3 | 360 | N.D | |

**Legenda:** N.D - Dados não disponíveis.

Percebe-se alguma variação entre os valores obtidos para os concretos analisados das diferentes estruturas da UHE Corumbá, porém tal fato deve-se às diferentes estruturas analisadas, tendo tido o emprego de diferentes classes de resistências, conforme pode ser observado nos traços de referência levantados. O concreto mais rico refere-se ao do quinto lance da escada do muro central, provavelmente em virtude desta região possuir maiores esforços estruturais que as demais.

Com relação aos traços dos concretos da UHE Mascarenhas, estes se apresentam próximos, indicando concretos semelhantes em ambos os blocos de concretagem em que se procedeu com as extrações, tendo sido obtida uma média para relação cimento:agregado total de 1:9,7 e consumos de cimento da ordem de 190 kg/m³, valores estes característicos de concreto massa e em consonância com o levantamento de informações técnicas.

Dentre as usinas pertencentes ao complexo de Paulo Afonso, os concretos extraídos da UHE PA IV são os mais pobres, cujos traços médios 1:m, obtidos por meio da reconstituição de traço, ficaram em 1:10,6 (cimento: agregado total) e consumo de cimento de 182 kg/m³ para os concretos da tomada d'água e 1:10,0 (cimento: agregado total) e consumo de cimento de 190 kg/m³ para os concretos do vertedor, mostrando também que ambos os concretos analisados possuem traços semelhantes.

Já os concretos da UHE PA II apresentaram traço intermediário, cuja relação unitária 1:m obtida por meio da reconstituição de traço foi de 1:7,3 (cimento: agregado total) e consumo de cimento aproximado de 240 kg/m³.

O concreto mais rico dentre as três usinas do denominado complexo de Paulo Afonso foi o extraído da UHE Moxotó, com traço 1:m de 1:5,3 (cimento: agregado total) e consumo de cimento estimado de 360 kg/m³.

Destaca-se que as extrações na UHE Moxotó ocorreram na galeria de drenagem situada à jusante da casa de máquinas, região esta mais armada e com influência da ação dinâmica da rotação dos geradores o que justifica concretos estruturais e de maior consumo de cimento.

Pela análise de documentos (FURNAS, 1994 a, b, c) realizada no levantamento de informações técnicas foi possível identificar que os concretos empregados no poço das escadas da UHE Corumbá tiveram emprego de sílica ativa, tendo sido empregada a proporção de 21 kg/m³ nos concretos referente ao quinto lance de escada, e no traço do concreto referente ao 12º lance da escada, contados de baixo para cima, foi empregado sílica na proporção de 15 kg/m³. As adições de sílica ativa, em ambos os traços, representam um teor de aproximadamente 8% em relação à massa de cimento.

Também foi possível identificar que no concreto analisado da UHE Mascarenhas foi empregado um aditivo incorporador de ar, conhecido na época pelo nome comercial de "Darex", esse aditivo foi empregado no traço de referência na proporção de 0,131 kg por metro cúbico de concreto, que representa um teor aproximado de 0,07% em relação à massa de cimento (PEIXOTO, 1959 a, b).

Encontram-se no Apêndice D, deste trabalho, um resumo dos resultados obtidos pelo ensaio de reconstituição de traço dos concretos estudados.

## 5.5.2 Determinação do pH

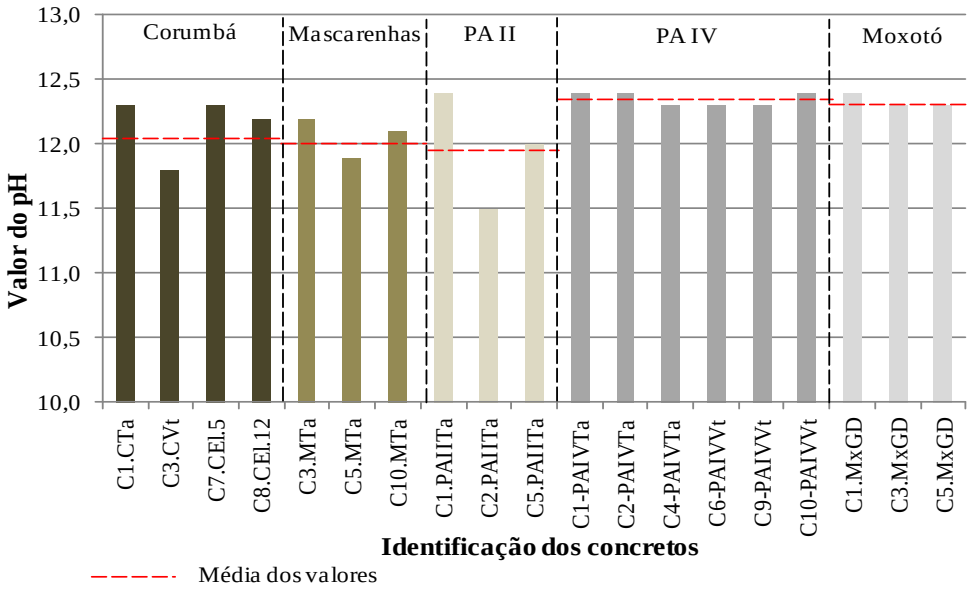
Apresentam-se na Figura 5.28, de forma gráfica, os valores do pH das argamassas extraídas dos concretos analisados, obtidos por análise química. Encontram-se no Apêndice E os valores individuais obtidos em cada ensaio.

Conforme apresentado por Jennifer *et al.* (2007) o pH de saturação do hidróxido de cálcio, em solução, é de aproximadamente 12,4, desta forma, conclui-se que a reserva alcalina de

praticamente todos os concretos analisados encontram-se dentro do esperado, podendo-se inferir a boa reserva alcalina na solução de poros das argamassas.

De forma pontual, observa-se que com relação aos valores obtidos no ensaio de pH das argamassas extraídas dos concretos da UHE Corumbá, o menor valor obtido refere-se ao concreto da galeria de drenagem do vertedor, tendo as demais amostras desta usina apresentado valores de pH e acima de 12,2.

**Figura 5.28** – Valores de pH determinados para os concretos em estudo.




Destaca-se que os concretos da UHE Corumbá tiveram emprego de cimento com escória de alto-forno e, conforme relatado por Sellevold; Nielsen (1987[19] *apud* HELENE, 1993), em concretos contendo adições minerais os valores de pH não variam muito, sendo que para uma adição de até 70% de escória de alto-forno o valor do pH nunca fica abaixo de 11,7; desta forma, mesmo com o menor valor encontrado pode-se considerar tal valor normal.

Com relação aos concretos da UHE Mascarenhas, tem-se também que o pH dos concretos ficou em torno de 12. Este valor de pH pode ser considerado normal conforme disposto em Cascudo; Carasek (2011), que relatam que o concreto representa um meio altamente alcalino com pH, em geral, variando de 12,5 a 13,5.

[19] SELLEVOLD, E. J.; NILSEN, T. **Condensed silica fume in concrete: a world review**. Suplementary cementing materials for concrete. CANMET, p.167 – 243, 1987.

Conforme pode ser observado na Figura 5.28, na média, os concretos da UHE PA II são os que se apresentam mais baixos, porém, mesmo assim, estes também se encontram aparentemente normais e com alcalinidade satisfatória, tendo apenas o concreto do testemunho C2.PAIITa com ligeira queda de pH. Talvez este decréscimo de pH esteja relacionado com alguma eventual lixiviação mais expressiva ocorrida eventualmente na região de extração deste testemunho, pois conforme observado durante inspeção "*in loco*" das estruturas, as extrações ocorreram em regiões próximas às ocorrências observadas (ex.: lixiviações, gel, etc.), e com presença de umidade.

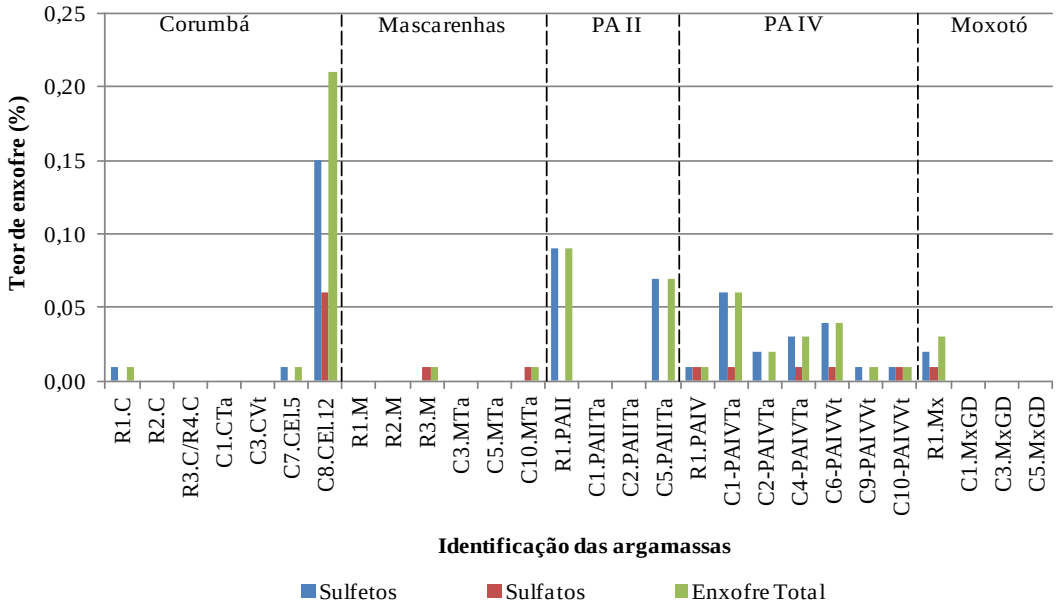
Para os demais concretos analisados, tanto da UHE Paulo Afonso IV quanto para a UHE Moxotó, os valores ficaram acima de 12.

## 5.6 QUANTIFICAÇÃO DE ENXOFRE DAS ROCHAS, AGREGADOS E ARGAMASSAS DOS CONCRETOS

### 5.6.1 Análise química gravimétrica

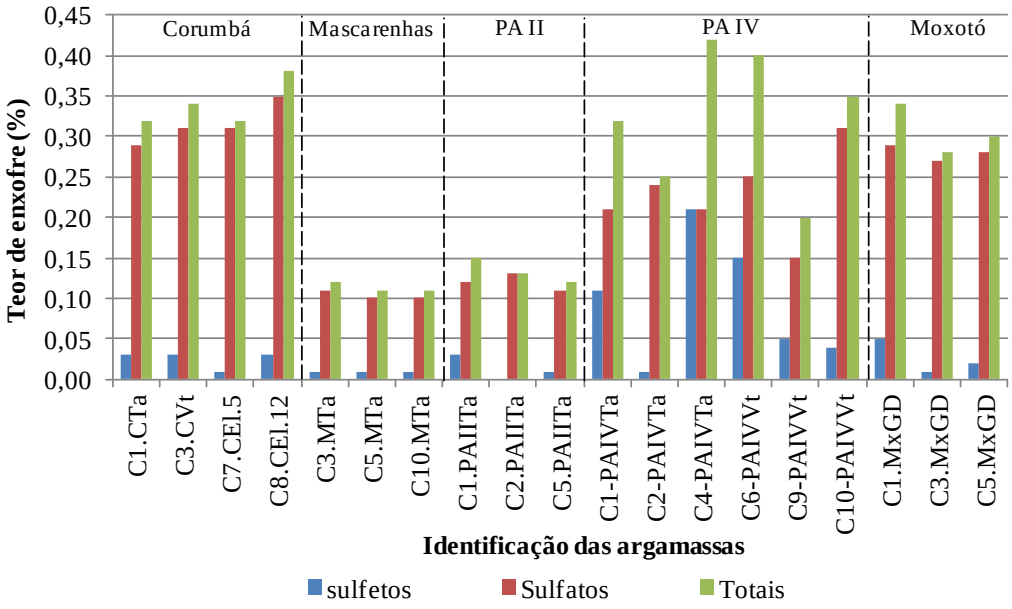
Há na Figura 5.29 os valores obtidos pelo ensaio químico gravimétrico para a quantificação do enxofre na forma de sulfatos e totais, e por diferença entre esses dois valores obteve-se o enxofre na forma de sulfetos. As análises foram realizadas tanto com o material rochoso (R) coletado quanto com as argamassas e agregados extraídos do interior dos concretos (C).

**Figura 5.29** – Teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica dos agregados extraídos dos concretos e dos materiais rochosos coletados.



Apresentam-se na Figura 5.30 os valores obtidos por meio da análise química gravimétrica realizada com as argamassas extraídas dos testemunhos de concreto selecionados de cada usina.

**Figura 5.30** – Teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto.



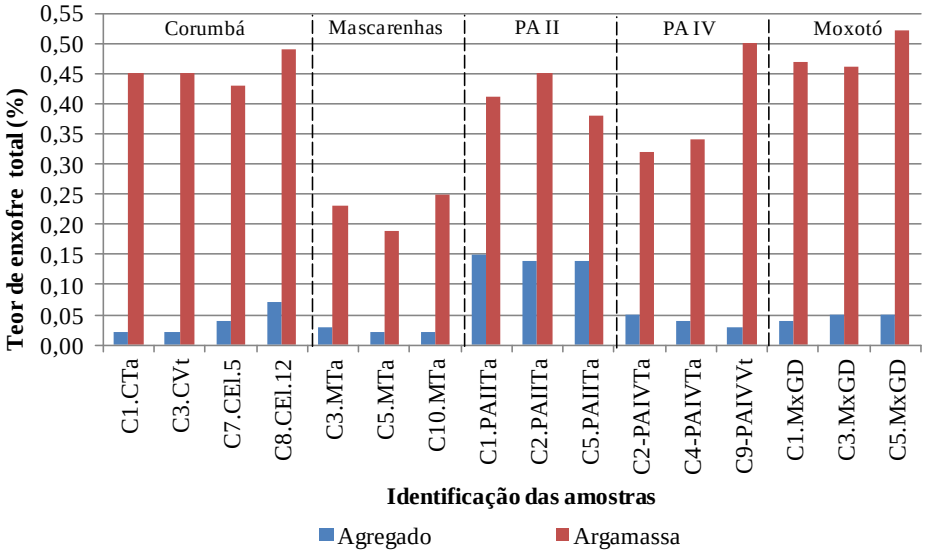

Encontram-se no Apêndice F deste trabalho os valores individuais obtidos para os teores de enxofre tanto das argamassas quanto dos agregados e materiais rochosos.

## 5.6.2 Análise por combustão - LECO

As análises para mensuração de enxofre total por meio da utilização do equipamento à combustão conhecido como LECO foram realizadas apenas para as amostras de agregados e argamassas extraídas dos testemunhos de concreto selecionados para os ensaios microestruturais. Apresentam-se na Figura 5.31 os valores obtidos por meio desta técnica.

Encontram-se no Apêndice F os valores individuais obtidos para os teores de enxofre tanto das argamassas como dos agregados obtidos nas análises por LECO.

**Figura 5.31** – Teores de enxofre total obtidos por meio de análise por combustão (LECO) das argamassas e agregados extraídos dos testemunhos de concreto.




## 5.6.3 Correlação entre análise química gravimétrica e LECO

Ressalta-se que se tentou correlacionar os valores de enxofre total obtidos pelo método químico gravimétrico e pelo método de combustão (Figura 5.32 e 5.33), porém nenhuma correlação apreciável foi verificada.

**Figura 5.32** – Correlação dos teores de enxofre entre método químico e por combustão para os agregados extraídos dos testemunhos de concreto.

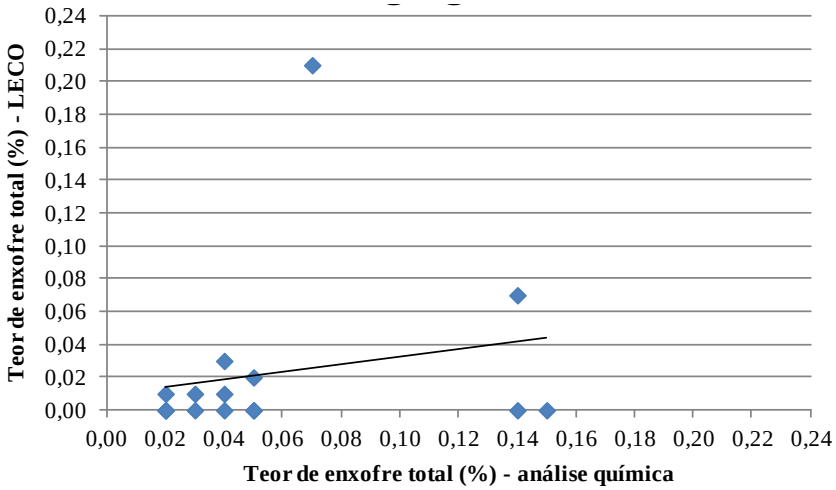
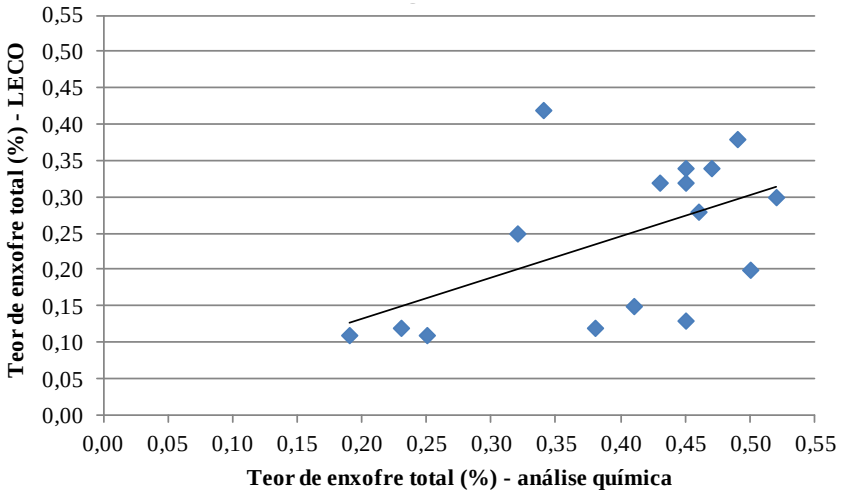


**Figura 5.33** – Correlação dos teores de enxofre entre método químico e por combustão para as argamassas extraídas dos testemunhos de concreto.




Percebe-se que os valores obtidos pelo equipamento LECO são em geral superiores aos obtidos pelo método químico gravimétrico. Destaca-se ainda que para alguns dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto em que o teor de enxofre total foi igual à zero, por meio do ensaio com o equipamento LECO foi possível detectar pequenos teores do elemento enxofre, teores estes, apesar de baixos, acima do limite de detecção da metodologia gravimétrica.

Provavelmente as diferenças de teores percebidas entre as duas metodologias apreciadas devem-se ao fato do equipamento LECO realizar medida de forma indireta. Ressalta-se que tal comportamento já foi percebido também por Silva *et al.* (2012).

Devido a não correlação entre as duas metodologias empregadas para a quantificação do teor de enxofre total presentes nas amostras analisadas, será adotado para as análises do presente estudo apenas os valores obtidos pela análise química gravimétrica, em virtude dessas análises resultarem em uma medida direta do teor de enxofre, além de possibilitar a distinção entre o enxofre que se encontra sob a forma de sulfatos e sob a forma de sulfetos.

## 5.7 AVALIAÇÃO DOS TEORES DE ENXOFRE EM RELAÇÃO AO TRAÇO DOS CONCRETOS

Neste item é apresentada uma avaliação dos teores de enxofre obtidos pelo método químico gravimétrico realizado com as argamassas e agregados extraídos dos testemunhos de

concreto, em relação aos traços dos concretos obtidos, conforme apresentado no subitem 5.5.1, de forma a verificar o quanto os teores de enxofre quantificados representam em relação ao consumo de cimento dos concretos, e de forma a confrontá-los com os limites encontrados no meio técnico.

## 5.7.1 Teores de enxofre em relação ao traço de concreto

Nas Tabelas 5.16 a 5.20 são apresentados os valores dos teores de enxofre obtidos convertidos na forma do sulfeto predominante, $SO_3$ e $SO_4$, e também calculados em relação aos consumos de cimento obtidos a partir da reconstituição de traço dos concretos extraídos das diferentes estruturas das UHEs estudadas.

**Tabela 5.16 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE Corumbá.

| Identi-ficação | Amos-tra | $SO_3$ (%) convertido a partir do S | | | | % $SO_3$ total em relação ao cimento | | $SO_4$ (%) convertido a partir do S total | % Pirrotita | % Pirrotita em relação ao cimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Na forma de sulfatos | Na forma de sulfetos | Total | Total, descontando-se a parcela do cimento | Com a contribuição do cimento | Sem a contribuição do cimento | | | |
| C1.CTa | Agre-gado | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C3.CVt | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C7.CEl.5 | | 0,00 | 0,02 | 0,02 | - | 0,10 | - | 0,03 | 0,03 | 0,10 |
| C8.CEl.12 | | **0,15** | **0,37** | **0,52** | - | 3,48 | - | 0,63 | 0,38 | 2,51 |
| C1.CTa | Arga-massa | **0,73** | **0,06** | 0,79 | 0,25 | 3,67 | 1,17 | 0,95 | 0,06 | 0,29 |
| C3.CVt | | **0,78** | **0,07** | 0,85 | 0,22 | 3,36 | 0,86 | 1,02 | 0,07 | 0,29 |
| C7.CEl.5 | | **0,77** | **0,03** | 0,80 | 0,28 | 3,85 | 1,35 | 0,96 | 0,03 | 0,14 |
| C8.CEl.12 | | **0,87** | **0,08** | 0,95 | 0,54 | 5,81 | 3,31 | 1,14 | 0,08 | 0,51 |
| C1.CTa | Con-creto | 0,35 | 0,03 | 0,38 | 0,12 | 3,67 | 1,17 | 0,46 | 0,03 | 0,29 |
| C3.CVt | | 0,31 | 0,03 | 0,34 | 0,09 | 3,36 | 0,86 | 0,41 | 0,03 | 0,29 |
| C7.CEl.5 | | 0,43 | 0,03 | 0,45 | 0,17 | 3,94 | 1,44 | 0,54 | 0,03 | 0,24 |
| C8.CEl.12 | | 0,49 | 0,23 | 0,73 | 0,53 | 9,29 | 6,79 | 0,87 | 0,24 | 3,02 |

**Nota:** Sem a contribuição do cimento: condição que considera $SO_3$ total, descontando-se aquele contido no cimento obtido pelo levantamento de dados.

Percebe-se que somente os agregados dos testemunhos C7.CEl.5 e C8.CEl.12 apresentaram teores de enxofre. Verifica-se também que as argamassas dos concretos possuem teor de enxofre na forma de sulfetos, estes provavelmente devem-se ao emprego de cimento com adição de escória de alto-forno, podendo também ter alguma contribuição da areia artificial.

**Tabela 5.17 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE Mascarenhas.

| Identi-ficação | Amos-tra | $SO_3$ (%) convertido a partir do S | | | | % $SO_3$ total em relação ao cimento | | $SO_4$ (%) convertido a partir do S total | % Pirita | % Pirita em relação ao cimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Na forma de sulfatos | Na forma de sulfetos | Total | Total, descontando-se a parcela do cimento | Com a contribui-ção do cimento | Sem a contribuição do cimento | | | |
| C3.MTa | Agre-gado | 0,02 | 0,00 | 0,02 | - | 0,17 | - | 0,03 | 0,00 | 0,00 |
| C5.MTa | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C10.MTa | | 0,02 | 0,00 | 0,02 | - | 0,17 | - | 0,03 | 0,00 | 0,00 |
| C3.MTa | Arga-massa | 0,27 | 0,02 | 0,30 | 0,00 | 1,50 | 0,00 | 0,36 | 0,02 | 0,09 |
| C5.MTa | | 0,25 | 0,02 | 0,27 | 0,00 | 1,38 | 0,00 | 0,33 | 0,02 | 0,09 |
| C10.MTa | | 0,25 | 0,02 | 0,27 | 0,00 | 1,38 | 0,00 | 0,33 | 0,02 | 0,09 |
| C3.MTa | Con-creto | 0,12 | 0,01 | 0,13 | 0,02 | 1,68 | 0,17 | 0,15 | 0,01 | 0,09 |
| C5.MTa | | 0,09 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 1,38 | 0,00 | 0,13 | 0,01 | 0,09 |
| C10.MTa | | 0,11 | 0,01 | 0,12 | 0,02 | 1,55 | 0,17 | 0,14 | 0,01 | 0,09 |

**Nota:** Sem a contribuição do cimento: condição que considera $SO_3$ total, descontando-se aquele contido no cimento obtido pelo levantamento de dados.

Os agregados extraídos dos testemunhos de concreto da UHE Mascarenhas não apresentaram enxofre na forma de sulfetos, podendo este resultados estar relacionados ao limite de detecção do método químico gravimétrica empregado, que é de 0,01%. Isto porque, conforme análises mineralógicas realizadas, foi possível visualizar a presença de alguns fragmentos de pirita nesses agregados, porém disseminados pela amostra e em grão pequenos, geralmente abaixo de 20 μm.

Verifica-se também que nas argamassas extraídas dos testemunhos de concreto foi quantificada a presença de enxofre na forma de sulfetos, tendo para as três amostras obtido o teor de 0,02%. Provavelmente esses sulfetos devem-se a alguma contaminação presente no agregado miúdo.

Conforme apresentado na Tabela 5.18, percebe-se que somente os agregados do testemunho C5.PAIITa apresentaram teores de enxofre na forma de sulfetos. Verifica-se também que em duas das três argamassas extraídas dos testemunhos de concreto foi quantificada a presença de enxofre na forma de sulfetos.

**Tabela 5.18 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE PA II.

| Identi-ficação | Amos-tra | $SO_3$ (%) convertido a partir do S | | | | % $SO_3$ total em relação ao cimento | | $SO_4$ (%) convertido a partir do S total | % Pirrotita | % Pirrotita em relação ao cimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Na forma de sulfatos | Na forma de sulfetos | Total | Total, descontando-se a parcela do cimento | Com a contribuição do cimento | Sem a contribuição do cimento | | | |
| C1.PAIITa | Agre-gado | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C2.PAIITa | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C5.PAIITa | | 0,00 | **0,17** | **0,17** | - | 1,03 | - | 0,21 | 0,18 | 1,04 |
| C1.PAIITa | Arga-massa | 0,30 | **0,07** | 0,37 | 0,00 | 1,13 | 0,00 | 0,45 | 0,08 | 0,23 |
| C2.PAIITa | | 0,32 | 0,00 | 0,32 | 0,00 | 0,98 | 0,00 | 0,39 | 0,00 | 0,00 |
| C5.PAIITa | | 0,27 | 0,02 | 0,30 | 0,00 | 0,91 | 0,00 | 0,36 | 0,03 | 0,08 |
| C1.PAIITa | Con-creto | 0,10 | 0,03 | 0,13 | 0,00 | 1,13 | 0,00 | 0,15 | 0,03 | 0,23 |
| C2.PAIITa | | 0,11 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 0,98 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,00 |
| C5.PAIITa | | 0,09 | 0,12 | 0,22 | 0,12 | 1,93 | 1,03 | 0,26 | 0,13 | 1,11 |

**Nota:** Sem a contribuição do cimento: condição que considera $SO_3$ total, descontando-se aquele contido no cimento obtido pelo levantamento de dados.

**Tabela 5.19 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE PA IV.

| Identi-ficação | Amos-tra | $SO_3$ (%) convertido a partir do S | | | | % $SO_3$ total em relação ao cimento | | $SO_4$ (%) convertido a partir do S total | % Pirro-tita | % Pirrotita em relação ao cimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Na forma de sulfatos | Na forma de sulfetos | Total | Total, descontando-se a parcela do cimento | Com a contribuição do cimento | Sem a contribui-ção do cimento | | | |
| C1-PAIVTa | Agre-gado | 0,02 | 0,15 | 0,15 | - | 1,33 | - | 0,18 | 0,15 | 1,34 |
| C2-PAIVTa | | 0,00 | 0,05 | 0,05 | - | 0,44 | - | 0,06 | 0,05 | 0,45 |
| C4-PAIVTa | | 0,02 | 0,07 | 0,07 | - | 0,66 | - | 0,09 | 0,08 | 0,67 |
| C6-PAIVVt | | 0,02 | 0,10 | 0,10 | - | 0,80 | - | 0,12 | 0,10 | 0,80 |
| C9-PAIVVt | | 0,00 | 0,02 | 0,02 | - | 0,20 | - | 0,03 | 0,03 | 0,20 |
| C10-PAIVVt | | 0,02 | 0,02 | 0,02 | - | 0,20 | - | 0,03 | 0,03 | 0,20 |
| C1-PAIVTa | Arga-massa | **0,52** | 0,27 | 0,80 | 0,12 | 2,62 | 0,40 | 0,96 | 0,28 | 0,91 |
| C2-PAIVTa | | **0,60** | 0,02 | 0,62 | 0,00 | 2,05 | 0,00 | 0,75 | 0,03 | 0,08 |
| C4-PAIVTa | | **0,52** | 0,52 | 1,05 | 0,37 | 3,44 | 1,22 | 1,26 | 0,53 | 1,74 |
| C6-PAIVVt | | **0,62** | 0,37 | 1,00 | 0,38 | 3,58 | 1,36 | 1,20 | 0,38 | 1,36 |
| C9-PAIVVt | | **0,37** | 0,12 | 0,50 | 0,00 | 1,79 | 0,00 | 0,60 | 0,13 | 0,45 |
| C10-PAIVVt | | **0,77** | 0,10 | 0,87 | 0,25 | 3,13 | 0,91 | 1,05 | 0,10 | 0,36 |
| C1-PAIVTa | Con-creto | 0,16 | 0,18 | 0,33 | 0,14 | 3,95 | 1,73 | 0,39 | 0,19 | 2,25 |
| C2-PAIVTa | | 0,16 | 0,04 | 0,20 | 0,04 | 2,49 | 0,44 | 0,25 | 0,04 | 0,53 |
| C4-PAIVTa | | 0,16 | 0,20 | 0,34 | 0,16 | 4,10 | 1,88 | 0,41 | 0,20 | 2,41 |
| C6-PAIVVt | | 0,21 | 0,19 | 0,38 | 0,19 | 4,37 | 2,15 | 0,45 | 0,19 | 2,16 |
| C9-PAIVVt | | 0,12 | 0,06 | 0,17 | 0,02 | 1,99 | 0,20 | 0,21 | 0,06 | 0,65 |
| C10-PAIVVt | | 0,26 | 0,05 | 0,29 | 0,10 | 3,33 | 1,11 | 0,35 | 0,05 | 0,56 |

**Nota:** Sem a contribuição do cimento: condição que considera $SO_3$ total, descontando-se aquele contido no cimento obtido pelo levantamento de dados.

Conforme apresentado na Tabela 5.19, todos os agregados extraídos dos testemunhos de concreto da UHE PA IV apresentaram teores de enxofre na forma de sulfetos, que variaram de 0,02% a 0,15% (teores expressos na forma de $SO_3$). Verifica-se também que nas argamassas extraídas desses testemunhos de concreto foi quantificada a presença de enxofre na forma de sulfetos, teores estes, expressos na forma de $SO_3$, que variaram de 0,02% a 0,52%.

**Tabela 5.20 -** Resumo dos teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica e calculados em relação ao traço de concreto – UHE Moxotó.

| Identi-ficação | Amos-tra | $SO_3$ (%) convertido a partir do S | | | | % $SO_3$ total em relação ao cimento | | $SO_4$ (%) convertido a partir do S total | % Pirro-tita | % Pirrotita em relação ao cimento |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Na forma de sulfatos | Na forma de sulfetos | Total | Total, descontando-se a parcela do cimento | Com a contribui-ção do cimento | Sem a contribuição do cimento | | | |
| C1.MxGD | Agre-gado | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C3.MxGD | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C5.MxGD | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,00 | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| C1.MxGD | Arga-massa | **0,72** | 0,12 | 0,85 | 0,13 | 2,62 | 0,40 | 1,02 | 0,13 | 0,39 |
| C3.MxGD | | **0,67** | 0,02 | 0,70 | 0,00 | 2,16 | 0,00 | 0,84 | 0,03 | 0,08 |
| C5.MxGD | | **0,70** | 0,05 | 0,75 | 0,03 | 2,31 | 0,09 | 0,90 | 0,05 | 0,16 |
| C1.MxGD | Con-creto | 0,33 | 0,06 | 0,38 | 0,06 | 2,62 | 0,40 | 0,46 | 0,06 | 0,39 |
| C3.MxGD | | 0,30 | 0,01 | 0,31 | 0,00 | 2,16 | 0,00 | 0,38 | 0,01 | 0,08 |
| C5.MxGD | | 0,31 | 0,02 | 0,34 | 0,01 | 2,31 | 0,09 | 0,40 | 0,02 | 0,16 |

**Nota:** Sem a contribuição do cimento: condição que considera $SO_3$ total, descontando-se aquele contido no cimento obtido pelo levantamento de dados.

Os agregados extraídos dos testemunhos de concreto da UHE Moxotó não apresentaram enxofre na forma de sulfetos, podendo este resultados estarem relacionados ao limite de detecção do método químico gravimétrico empregado, que é de 0,01%. Isto porque, conforme análises mineralógicas realizadas, foi possível visualizar a presença de alguns fragmentos dede pirrotita e pirita nesses agregados, porém disseminados pela amostra e em grãos pequenos, geralmente abaixo de 50 μm.

Verifica-se também que nas argamassas extraídas dos testemunhos de concreto foi quantificada a presença de enxofre na forma de sulfetos, teores estes que, expressos na forma de $SO_3$, variaram de 0,02% a 0,12%.

Destaca-se que com relação aos concretos analisados das usinas do complexo de Paulo Afonso apenas uma das argamassas de PA II não foi quantificada a presença de sulfetos, provavelmente a presença destes elementos nas argamassas devem-se a alguma contaminação

presente na areia artificial empregada nos concretos, ou até mesmo a alguma contribuição da areia natural.

### 5.7.2 Confronto dos teores de enxofre obtidos com os limites preconizados no meio técnico

Conforme apresentado no item 2.7, na revisão da literatura, foram localizados alguns limites preconizados em determinados trabalhos e normas, tanto nacionais quanto internacionais, que recomendam limitar o teor de compostos a base de enxofre nos materiais a serem empregados na confecção do concreto, além de limitar esses compostos com relação à massa de cimento do concreto.

Têm-se na Tabela 5.21 os valores tabelados para os limites encontrados na literatura e nas Tabelas 5.22 e 5.23 apresentam-se, de forma resumida, os principais valores obtidos na presente pesquisa para os teores de compostos sulfatados ou do próprio elemento enxofre, tanto nos agregados quanto nas argamassas, com a marcação dos daqueles que extrapolam os limites.

Em relação à ABNT 7211 (ABNT, 2009), estabeleceu-se de forma didática e comparativa uma relação entre os compostos com enxofre quantificados com relação aos seus limites, porém ressalta-se que o que se encontra disposto na referida norma é relativo aos sulfatos solúveis em água, e neste trabalho determinou-se os sulfatos totais solúveis em ácido. Conforme pode ser observado na Tabela 5.21, os limites da norma européia EN 12620 (EN, 2008), são semelhantes aos preconizados pela atual recomendação UNE EM 1744-1, que citam que os compostos de enxofre total dos agregados graúdos e miúdos não podem exceder 1% da massa total do agregado e no caso de escória, a especificação para ser de 2%, além disto citam também que no caso de ser detectado a presença de pirrotita na mineralogia dos agregados o conteúdo de enxofre aportados por estes, e expressos em “S” deverá ser inferior a 0,1%.

**Tabela 5.21 -** Relação dos limites máximos obtidos na literatura.

| **Parâmetro avaliado** | **Limites preconizados na literatura** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
| S sulfetos, se detectada presença de pirrotita (ag.) | | | | | | | | 0,1% | | |
| S total (ag.) | | | 0,4% | 0,4%[11] 1%[12] | | | | 1% (se pirrotita, 0,1%) | 1% (se pirrotita, 0,1%) | 1% (se pirrotita, 0,4%) |
| Pirita a partir do S sulfetos (ag.) | | | | | 1% | | | | | |
| $SO_3$ sulfatos a partir do S sulfatos (ag.) | | | 0,15% | 0,2% | | | | 0,8% | | |
| $SO_3$ total a partir do S total (ag.) | 1% | 0,5% | | | | 0,1%[13] | | | | |
| Sulfeto em relação à massa de cimento. | | | | | | | 0,2%.[14] | | | |
| | | | | | | | 0,5%.[15] | | | |
| $SO_3$ total em rel. massa cimento a partir do S total (concreto) | | | | | | | 0,5%[16], 1%[17], 2%[18] | | | |
| $SO_4$ total a partir do S total (concreto) | | | | | | 0,2%[13] | | | | |

**Notas:** 1 - **Assembleia geral alemã para estudos de jazidas** (1960) citada por Pereira (2008); 2 - COMISSION INTERNATIONALE DES GRANDES BARRAGENS. ***Guide et Recommendation concernant les Granulats pour les Betons des Grandes Barragens***, maio 1965. (item 8.2); 3 - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. ***Granulats pour bétons hydrauliques – Spécifications***. NF P 18-541. France, 1994. 4 - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. ***Granulats – Définitions, conformité, specifications*** - NF P 18 540. France, 1997; 5 - HAGERMAN, T.; ROOSAR, H. ***Kismineralens skadein warkens pa betong***. Z. Betong, 2: 151-161.1955, citado por Hasparyk *et al.* (2002); 6 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2009**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2009. 9p. 7 – RPB - **Regulamento Português do Betão** (1971) citado por Coutinho (1977); 8- INSTRUÇÃO ESPANHOLA, **Propriedades Tecnológicas De Los Materiales** (3º Título), Capítulo VI. 1999; 9 - BRITISH STANDARD - **BS EN 12620:2002 + A1:2008** - *Aggregates for concrete. Europa*, 58p, 2008. ISBN 978 0 580 63327 0; 10 - EUROPEAN/FRENCH STANDARD. **NF EN 13242 + A1:2008** - *Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*; 11 – Teor válido para os agregados classificados como sendo da categoria A, conforme classificação da AFNOR NF P 18-540 (ANFOR, 1997); 12 – Teor válido para os agregados classificados como sendo da categoria B, conforme classificação da AFNOR NF P 18-540 (ANFOR, 1997); 13 - a norma ABNT 7211 (ABNT, 2009) preconiza tais limites tendo como referência os valores obtidos para sulfatas solúveis; tais comparações realizadas para os valores de sulfatos totais solúveis em ácido é apenas com fins didáticos, não representando a realidade exposta pela norma em questão; 14 - Máx. 0,2 no concreto simples com cimento Portland comum ou concreto armado com cimento Portland pozolânico; 15 - Máx. 0,5% no concreto simples com emprego de cimento Portland pozolânico; 16 – para cimento Portland comum ; 17 – para cimento Portland com escória de alto-forno; 18 – com cimento Portland pozolânico.

**Tabela 5.22 -** Relação dos teores de compostos sulfatados obtidos para os materiais referentes às **UHEs Corumbá e Mascarenhas** e limites extrapolados.

| **Descrição dos enxofres** | **UHE Corumbá** | | | | | **UHE Mascarenhas** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **R** | **C1.CTa** | **C3.CVt** | **C7.CEl.5** | **C8.CEl.12** | **R** | **C3. MTa** | **C5. MTa** | **C10. MTa** |
| S sulfetos, se detectada presença de pirrotita (ag.) | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,15 | - | - | - | - |
| S total (ag.) | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,21 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| Pirita a partir do S sulfetos (ag.) | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,28 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $SO_3$ sulfatos a partir do S sulfatos (ag.) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| $SO_3$ total a partir do S total (ag.) | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,52 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| Sulfeto em relação à massa de cimento | - | 0,29 | 0,29 | 0,24 | 3,02 | - | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| $SO_3$ total em rel. massa cimento a partir do S total (concreto) | - | 3,67 | 3,36 | 3,94 | 9,29 | - | 1,68 | 1,38 | 1,55 |
| $SO_4$ total a partir do S total (concreto) | - | 0,46 | 0,41 | 0,54 | 0,87 | - | 0,15 | 0,13 | 0,14 |

**Tabela 5.23 -** Relação dos teores de compostos sulfatados obtidos para os materiais referentes às **UHEs PA II, PA IV e Moxotó** e limites extrapolados.

| Descrição dos enxofres | UHE PA II | | | | UHE PA IV | | | | | | | UHE Moxotó | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | R | C1. PAIITa | C2. PAIITa | C5. PAIITa | R | C1.PAI VTa | C2.PAI VTa | C4.PAI VTa | C6.PAI VVt | C9.PAI VVt | C10.PA IVVt | R | C1.Mx GD | C3.Mx GD | C5.Mx GD |
| S sulfetos, se detectada presença de pirrotita (ag.) | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| S total (ag.) | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Pirita a partir do S sulfetos (ag.) | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,02 | 0,11 | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $SO_3$ sulfatos a partir do S sulfatos (ag.) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $SO_3$ total a partir do S total (ag.) | 0,22 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,02 | 0,15 | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sulfeto em relação à massa de cimento | - | 0,23 | 0,00 | 1,11 | - | 2,25 | 0,53 | 2,41 | 2,16 | 0,65 | 0,56 | - | 0,39 | 0,08 | 0,16 |
| $SO_3$ total em rel. massa cimento a partir do S total (concreto) | - | 1,13 | 0,98 | 1,93 | - | 3,95 | 2,49 | 4,10 | 4,37 | 1,99 | 3,33 | - | 2,62 | 2,16 | 2,31 |
| $SO_4$ total a partir do S total (concreto) | - | 0,15 | 0,13 | 0,26 | - | 0,39 | 0,25 | 0,41 | 0,45 | 0,21 | 0,35 | - | 0,46 | 0,38 | 0,40 |

Tendo como referência a NBR 7211 (ABNT, 2009), as amostras da UHE de Mascarenhas foram às únicas que não suplantaram seus limites. Tal fato pode estar relacionado à extrapolação feita onde todos os dados referem-se ao enxofre total e a norma é aplicada apenas aos solúveis, majorando assim os resultados. Salienta-se também que os limites da literatura que mais foram extrapolados pelos concretos estudados referem-se àqueles contidos no Antigo Regulamento do Betão (1971). Conforme já mencionado na revisão da literatura, atualmente, tanto a norma francesa (AFNOR), quanto o regulamento português (RPB), foram atualizados e ambas as normalizações encontram-se substituídas pelas normas NF EN 12620+A1-2008 (NF EN, 2002a), NF EN 13242+A1-2008 (NF EN, 2002b) e NF EN 13043-2003 (NF EN, 2003), normas essas que não trazem em seu escopo os limites do antigo Regulamento Português que foram extrapolados pelos concretos analisados.

Todos os testemunhos analisados suplantaram o limite exposto pelo Antigo Regulamento do Betão (1971) de 0,5% de $SO_3$ em relação ao cimento, considerando o concreto com emprego de cimento comum.

De forma distinta das amostras das demais UHEs citadas anteriormente, um dos testemunhos de concreto da UHE Corumbá suplantou vários dos limites dispostos (Tabela 5.21). Um dos limites é o preconizado tanto pela UNE (1999) quanto pela BS EN 12620 (EN, 2008), de 0,1% de enxofre na forma de sulfetos quando da presença de pirrotita. Outro foi o limite citado no CIGB (1975).

## 5.8 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS

De forma resumida, apresentam-se nas Tabelas 5.24 e 5.25 os principais dados obtidos pelas descrições realizadas por meio da análise petrográfica em microscópico ótico de luz transmitida, realizadas em lâminas delgadas confeccionadas com os agregados e os materiais rochosos provenientes de cada usina analisada.

**Tabela 2.24** – Resumo das análises dos agregados e materiais rochosos provenientes das UHEs Corumbá e Mascarenhas.

| Usina | Amostra | Natureza | Litotipo | Estrutura | Principais minerais |
|---|---|---|---|---|---|
| CORUMBÁ | R1.C | Metamórfica | Quartzito | Bandada | Quartzo: 95-98%; mica branca: 1-2%; opacos: <1%; zircão/turmalina: traços. |
| | R2.C | | | Orientada | Quartzo: 95-97%; mica branca: 2-5%; opacos: <1%; zircão: traços. |
| | R3.C | | Granada-mica-quartzo xisto | Foliada (xistosa) | Quartzo: 45-50%; muscovita: 35-40%; clorita: 5-10%; biotita: 2-3%; granada: 1-2%; opacos: <1%; apatita, carbonato, zircão e turmalina: traços. |
| | R4.C | | | | |
| | C1.CTa | | Quartzito | Maciça | Quartzo: 99-100%; mica branca: <1%; opacos/turmalina: traços. |
| | C3.CVt | | | Maciça | Quartzo: >99%); mica branca: <1%; opacos: <01%; turmalina: <1%; chert: <1%. |
| | C7.CEl.5 | | | Maciça | Quartzo: 95-99%; mica branca: 1-3%; opacos: <1%; zircão: <1%; quartzo. Restritos: mica branca, feldspato, carbonato, opacos e granada. |
| | C8.CEl.12 | | Granada-mica-quartzo xisto | Foliada (xistosa) | Quartzo: 50-55%; muscovita: 30-35%; clorita: 10-15%; granada: 2-3%; opacos: 2-3%; feldspato: <1%; zircão e turmalina: traços. |
| MASCARENHAS | R1.M | Metamórfica | Quartzito | | Quartzo: 95-99%; opacos: traços; turmalina: traços. |
| | C3.MTa | Metamórfica | Quartzito | Maciça | Quartzo: 99-100%; sericita: <1%; opacos: <1%; titanita: traços. |
| | C5.MTa | | | Maciça | Quartzo: 99-100%; sericita: <1%; opacos: <1%. |
| | C10.MTa | | | Maciça | Quartzo: 99-100%; sericita: <1%; opacos: <1%. |

**Tabela 2.25** – Resumo das análises dos agregados e materiais rochosos das UHEs PA II, II e Moxotó.

| Usina | Amostra | Natureza | Litotipo | Estrutura | Principais minerais |
|---|---|---|---|---|---|
| PA II | R1.PAII | Metamórfica | Migmatito | Maciça | Plagioclásio: 50-55%; biotita: 30-35%; epidoto: 5-10%; quartzo: 3-7%; anfibólio: 1-2%; Titanita+ apatita+opacos+zircão: 1-2%. |
| | C1.PAII Ta | Ígnea | Biotita granito | Maciça | Plagioclásio: 50-55%; quartzo: 35-40%; **microclínio: 5-10%**; biotita: 2-5%; opacos-muscovita-epidoto-titanita-carbonato-apatita-zircão: 1-2%. |
| | C2.PAIITa | | Diorito | Maciça | Plagioclásio: 70-75%; biotita: 10-15%; quartzo: 5-10%; epidoto: 5-10%; anfibólio: 1-2%; opacos-titanita-clorita-carbonato-apatita-allanita: 1-2%. |
| | C5.PAIITa | | Granodi-orito | Maciça | Plagioclásio: 60-65%; **microclínio: 5-10%**; quartzo: 30-35%; biotita: 1-2%; opacos-epidoto-allanita-titanita-clorita-muscovita-apatita-zircão: 1-2%. |
| PA IV | R1.PAIV | Metamórfica | Migmatito | Maciça | **Microclínio: 40-45%;** plagioclásio: 30-35%; quartzo: 20-25%; muscovita+ biotita+opacos: 1-2%. |
| | C2-PAIVTa | Ígnea | Biotita granito | Maciça | **Microclínio: 10-15%;** plagioclásio: 65-70%; quartzo: 5-10%; biotita: 5-10%; apatita-zircão-opacos-carbonato-titanita: <1%. |
| | C9-PAIVVt | | Leuco-granito | Maciça | **Microclínio: 20-25%;** plagioclásio: 60-65%; quartzo: 10-15%; muscovita+biotita: 2-3%; apatita-zircão-opacos: traços. |
| MOXOTÓ | R1.Mx | Metamórfica | Migmatito | Maciça | Plagioclásio: 55-60%; **microclínio: 10-15%;** quartzo: 20-25%; biotita: 5-10%; opacos+epidoto +allanita+apatita: <1%. |
| | C1.MxGD | Ígnea | Biotita granito | Maciça | Plagioclásio: 50-55%; quartzo: 33-35%; **microclínio: 10-15%;** biotita: 2-5%; opacos-epidoto-allanita -apatita: 1-2%. |
| | C3.MxGD | | Grano-diorito | Maciça | Plagioclásio: 70-75%; quartzo: 10-15%; **microclínio: 5-10%;** biotita: 10-15%; anfibólio: 1-2%; epidoto-opacos-titanita-clorita-carbonato-apatita-allanita: 1-2%. |
| | C5.MxGD | | Biotita granito | Maciça | Plagioclásio: 55-60%; quartzo: 20-25%; **microclínio: 10-15%**; biotita: 2-5%; opacos-muscovita-epidoto-titanita-carbonato-apatita-zircão: 1-2%. |

Verifica-se que os materiais rochosos coletados no entorno das usinas do complexo de Paulo Afonso são do litotipo migmatito. Essas rochas foram classificadas, por meio das análises petrográficas, como possuindo natureza metamórfica, porém este tipo de rocha está na transição entre ígnea e metamórfica, possuindo parte metamórfica (xistosa) e parte ígnea (granitóide), tendo sofrido fusão parcial.

As lâminas analisadas desses materiais rochosos foram obtidas a partir de blocos de migmatito que, resumidamente, consistem em uma rocha híbrida gerada em temperaturas muito elevadas, apresentando porções metamórficas e porções ígneas. As amostras analisadas foram consideradas como rochas graníticas.

Apresentam-se nas Figuras 5.34 a 5.36 algumas das fotomicrografias obtidas nas análises petrográficas e mineralógicas dos agregados e materiais rochosos das usinas estudadas.

**Figura 5.34** – a) Visão geral da rocha, destacando a forma irregular e a extinção ondulante fraca do quartzo e pequenas palhetas de mica orientadas em uma direção preferencial (alguns cristais indicados pelas setas) (agregado quartzito do testemunho C3.CVt); b) quartzito formado por grãos alongados de quartzo (1) com extinção ondulante, cimentados por quartzo microcristalino (2) associado com pequenas lamelas de sericita (coloridas) (agregado do testemunho C10.MTa).

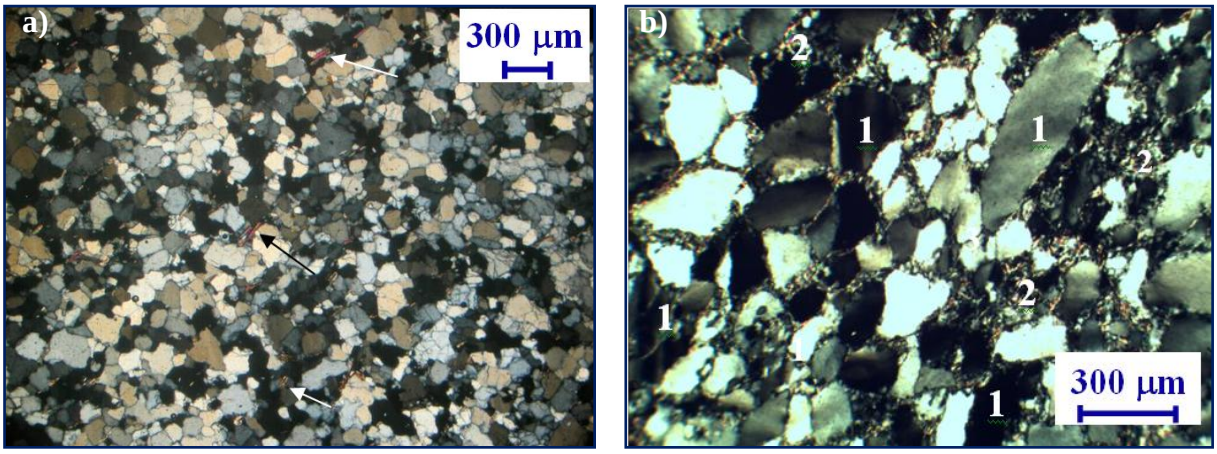



**Figura 5.35** – a) vista geral do agregado graúdo (agregado granodiorito do testemunho C5.PAIITa); b) aspectos gerais do agregado graúdo representado por rochas graníticas composta principalmente de plagioclásio (1), microclínio (2) e quartzo (3) (agregado biotita granito do testemunho C2.PAIVTa).

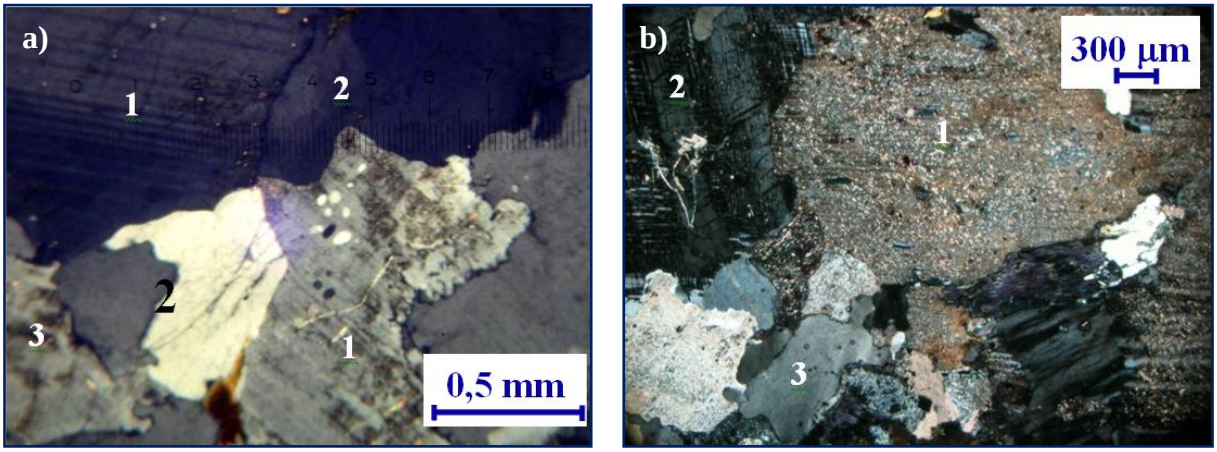
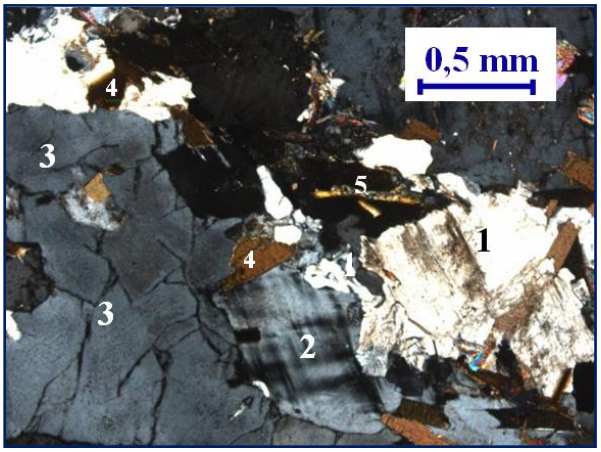


**Figura 5.36** – a) visão geral do agregado graúdo representado por uma rocha granítica formada principalmente por plagioclásio (1), microclínio (2) e quartzo (3) com biotita restrita (4), que às vezes está associada com epidoto e allanita (5). (agregado biotita granito do testemunho C1.MxGD).




Com relação à análise petrográfica das rochas e dos agregados oriundos da UHE Corumbá, observaram-se dois tipos principais de rochas provenientes da área de escavação da usina: quartzito e granada-mica-quartzo xisto. Essas rochas são de natureza metamórfica, com grau de metamorfismo que varia de baixo a médio. Com relação à UHE Mascarenhas, as análises petrográficas indicaram, em geral, características mineralógicas semelhantes entre os agregados dos testemunhos, sendo todos de natureza metamórfica e do tipo quartzito.

Já no caso dos agregados graúdos e materiais rochosos das usinas de Paulo Afonso foi identificado que os agregados extraídos dos testemunhos de concreto são rochas graníticas, de natureza ígnea, e os materiais rochosos coletados são migmatitos, de natureza metamórfica. Esses materiais apresentaram-se com algumas variações nos litotipos conforme Tabela 5.25.

## 5.9 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS FRENTE À RAA

### 5.9.1 Análise microscópica para a investigação de minerais reativos

As principais características relacionadas às análises mineralógicas voltadas para a identificação de constituintes reativos frente à RAA do material rochoso e dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto das UHEs estão mostradas na Tabela 5.26. As siglas empregadas na tabela PR e PI representam potencialmente reativo e inócuo, respectivamente.

EO diz respeito à extinção ondulante observado nos cristais de quartzo, sendo expressa na forma de ângulo (em º).

**Tabela 5.26** – Resumo das análises petrográficas mineralógicas.

| Usina | Amostra | Minerais Deletérios | % de quartzo deformado | Ângulo de deformação (º) | Potencia-lidade |
|---|---|---|---|---|---|
| **Corumbá** | R1.C | Quartzo deformado | < 5% | 15º | P.I |
| | R2.C | | < 5% | 10º | |
| | R3.C | | 60% | 10º a 30º | P.R |
| | R4.C | | 50% | 10 a 15º | |
| | C1.CTa | | 10% | 10º e 15º | P.I |
| | C3.CVt | | 85%<br>15º | 15º e 25º<br>30º | P.R |
| | C7.CEl.5 | | 30% | 10º a 30º, porém valores ~ de 20º são mais comuns | |
| | C8.CEl.12 | | 20% | 10º a 15º | |
| **Masca-renhas** | R1.M | Quartzo deformado | 20% | 15º e 30º | P.R |
| | C3.MTa | Presença de quartzo deformado e de 5% a 15% de quartzo microgranular | 90% | 30º | |
| | C5.MTa | | | | |
| | C10.MTa | | | | |
| **PA II** | R1.PAII | Quartzo deformado | 90% | 20º a 30º | P.R |
| | C1.PAIITa | | 15% | 15º a 30º | |
| | C2.PAIITa | | 30% | 25º | |
| | C5.PAIITa | | 30% | 15º e 30º | |
| **PA IV** | R1.PAIV | Quartzo deformado | > 95% | 15º a 30º | P.R |
| | C2-PAIVTa | | 85% a 90% | 20º a 30º | |
| | C9-PAIVVt | | 80% a 85% | 30º | |
| **Moxotó** | R1.Mx | Quartzo deformado | > 98% | 20º a 30º | P.R |
| | C1.MxGD | | 15% | 10º a 20º | P.I |
| | C3.MxGD | | 30% | 15º e 25º | P.R |
| | C5.MxGD | | 60% | 20º e 30º | |

Em relação aos materiais da UHE Corumbá, a maioria pode ser caracterizada como potencialmente reativa, conforme preconizado na ABNT NBR 15577-3 (ABNT, 2008). Nos agregados dos concretos, apenas o testemunho da tomada d'água indicou PI, entretanto com ângulo chegando a 15º.

Verifica-se que todos os agregados da UHE Mascarenhas foram classificados como potencialmente reativos por meio das análises mineralógicas realizadas em conformidade com a NBR 15577 (ABNT, 2008), chegando os cristais a ângulos elevados, e de 30º, na maior parte do quartzo presente.

Conforme pôde ser observado na Tabela 5.26 praticamente todos os agregados procedentes das UHEs PA II, PA IV e Moxotó foram identificados como potencialmente reativos por

meio das análises mineralógicas, exceto o agregado extraído do testemunho C1.MxGD. Esses agregados foram considerados potencialmente reativos pela NBR 15577, parte 3 (ABNT, 2008c), devido à presença de quartzo deformado (> 5%) com extinção ondulante. Destaca-se também a presença dos feldspatos alcalinos (microclínio) identificados na maioria das amostras, conforme item 5.8, podendo eles também contribuir para a RAA (VAN AARDT; VISSER, 1977 a, b).

Encontram-se no Apêndice G, deste trabalho, um resumo das análises mineralógicas para a identificação dos minerais reativos presentes nos agregados extraídos dos testemunhos de concreto e dos materiais rochosos referentes a cada usina estudada.

## 5.9.2 Ensaio de expansão para avaliar a reatividade

Apresentam-se na Tabela 5.27 os valores médios obtidos para o ensaio de expansão acelerada realizado em barras de argamassa confeccionadas com os agregados analisados, conforme as diretrizes contidas na NBR 15577, parte 4 (ABNT, 2008d), nas idades de 16 e 30 dias. Os gráficos e os valores dos ensaios de expansão encontram-se no Apêndice H, deste trabalho.

**Tabela 5.27** – Valores médios de expansão acelerada obtidas nas barras de argamassa.

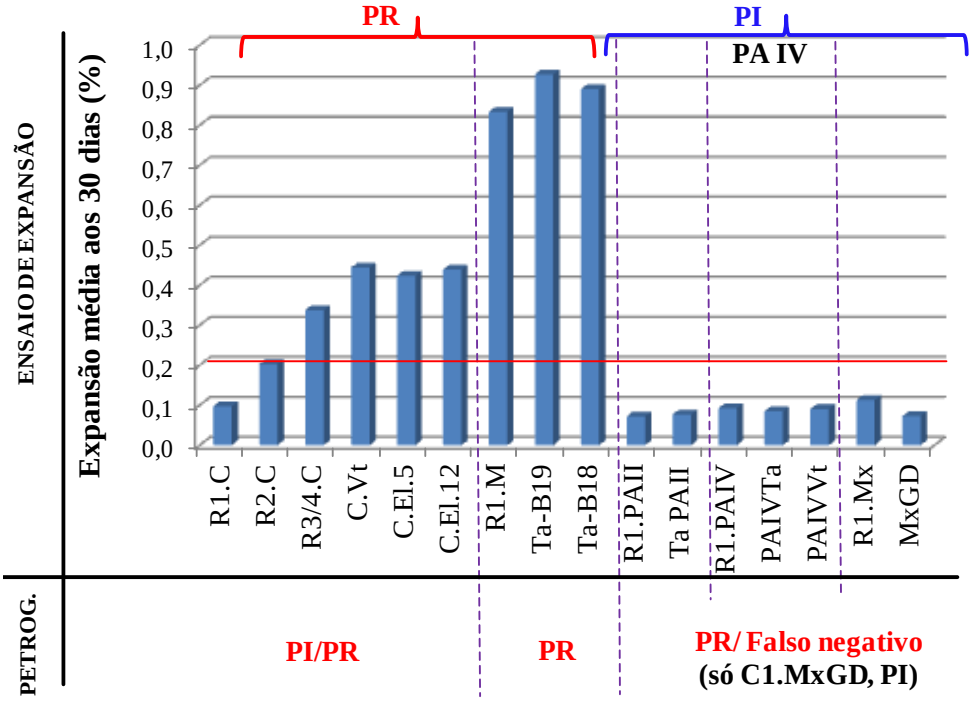
| Usina | Procedência dos agregados | Expansão (%) | |
|---|---|---|---|
| | | 16 dias | 30 dias |
| CORUMBÁ | R1.C | 0,04 | 0,10 |
| | R2.C | 0,08 | 0,20* |
| | R3.C e R4.C | 0,14 | 0,34* |
| | Concretos do Vt | 0,24 | 0,44* |
| | Concretos da El.5 | 0,23 | 0,42* |
| | Concretos da El.12 | 0,21 | 0,44* |
| MASCARENHAS | R1.M | 0,52 | 0,83* |
| | Concretos da Ta - Bl 19 | 0,57 | 0,93* |
| | Concretos da Ta - Bl 18 | 0,54 | 0,89* |
| PA II | R1.PAII | 0,04 | 0,07 |
| | Concretos da Ta | 0,03 | 0,08 |
| PA IV | R1.PAIV | 0,05 | 0,09 |
| | Concretos da Ta | 0,04 | 0,08 |
| | Concretos do Vt | 0,05 | 0,09 |
| MOXOTÓ | R1.Mx | 0,06 | 0,11 |
| | Concretos da GD | 0,03 | 0,07 |

**Nota:** Valores com * representam amostras com expansão acima do limite de norma, de 0,19% aos 30 dias, indicando potencial reativo para a RAA. Nos ensaios, agregados de alguns testemunhos de concreto tiveram que ser agrupados para obtenção de quantidade suficiente para ensaio.

Na Figura 5.37 estão apresentados, de forma gráfica, os valores médios de expansão obtidos no ensaio acelerado aos 30 dias, conforme diretrizes contida na NBR 15577, parte 4 (ABNT,

2008d), confrontando-os com a potencialidade obtida a partir das análises petrográficas/mineralógicas.

**Figura 5.37** - Valores médios obtidos no ensaio de expansão e potencialidade por análise petrográfica.




Pelos ensaios de expansão, verifica-se que os agregados provenientes das UHEs Corumbá e Mascarenhas apresentaram-se potencialmente deletérios em sua maioria. Tais resultados encontram-se em consonância com as análise petrográficas realizadas.

Já as três usinas do complexo de Paulo Afonso apresentaram o denominado "falso negativo", uma vez que não foi diagnosticado o seu potencial reativo, tanto dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto quanto dos materiais rochosos coletados. Este comportamento já foi observado por Silva (2007). Sabe-se que tais agregados possuem potencial deletério, além das suas características mineralógicas o indicarem e existir manifestação da reação álcali-agregado comprovada pelas inspeções e análises realizadas até o momento nestas usinas.

## 5.10 AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS E MATERIAIS ROCHOSOS EM RELAÇÃO AOS SULFETOS

### 5.10.1 Análise microscópica para a investigação de sulfetos

De forma sintetizada, apresenta-se na Tabela 5.28 um resumo das identificações e investigações realizadas sobre os sulfetos presentes nos opacos dos agregados e materiais rochosos coletados, utilizando-se a microscopia ótica por luz refletida.

**Tabela 5.28** – Resumo da análise qualitativa dos minerais sulfetos.

| UHE | Amostra | Litotipo | Sulfeto identificado | Alteração |
|---|---|---|---|---|
| **Corumbá** | R1.C | Quartzito | Po | Oxidação para Lm. |
| | R2.C | | Po; Py; Cpy | A Py apresenta incipiente oxidação para Lm. |
| | R3.C | Granada-mica-quartzo xisto | Po; Py; Cpy | Po; Py apresentam incipiente oxidação para Lm. A Cpy apresenta-se inalterada. |
| | R4.C | | Po; Py; Cpy; | Vários cristais de Po com estágios diferentes de alteração: do início de alteração para Mc, ou apenas a borda com oxidação para Lm, ou até mesmo todo o cristal em adiantado grau de alteração para Lm. A Py e a Cpy se mostraram inalteradas. |
| | C3.CVt | Quartzito | Py | Preferencialmente sã; há poucos fragmentos com oxidação para limonita. |
| | C7.CEl.5 | | Py | Alguns fragmentos apresentaram-se corroídos alterando-se para limonita. |
| | C8.CEl.12 | Granada-mica-quartzo xisto | Po; Py; Cpy; Ptl | Sulfetos predominantemente sãos ou inalterados, porém algumas Po possuem borda de alteração para marcassita. |
| **Masca-renhas** | R1.M | Quartzito | Py | Raros fragmentos corroídos de Py. |
| | C3.Mta | | | |
| | C5.MTa | | | |
| | C10.MTa | | | |
| **PA II** | R1.PAII | Migmatito | Py,Cpy | Sãos. |
| | C1.PAIITa | Biotita granito | Po, Py | Po com algumas alterações e oxidações, Py - sã. |
| | C2.PAIITa | Diorito | Po | Sãos e raramente alterados para Lm. |
| | C5.PAIITa | Granodiorito | Po | Frequentes sinais de corrosão e oxidação |
| **PA IV** | R1.PAIV | Migmatito | Py | Sãos. |
| | C1-PAIVTa | ND | Po, Py, Cpy | Predominantemente sãos e com poucas alterações: Po para Mg e Py para Lm, Cpy - sã. |
| | C2-PAIVTa | Biotita granito | Po, Py, Cpy e Bo | Predominantemente sãos e com algumas Po alterando-se para Mg; Py e Cpy - sãos. |
| | C4-PAIVTa | ND | Po, Py, Cpy | Predominantemente sãos e com poucas alterações: Po para Mg e Py para Lm, Cpy - sã. |
| | C6-PAIVVt | | Po, Py, Cpy e Bo | Predominantemente sãos e com poucas alterações: Po para Mg e Py para Lm, Cpy - sã. |
| | C9-PAIVVt | Leucogranito | Py, Cpy | Predominantemente sãs, com algumas Py corroídas e com alterações p/ material argilo-limonitico; Cpy - sã. |
| | C10-PAIVVt | ND | Py, Cpy | Sãos. |
| **Moxotó** | R1.Mx | Migmatito | Py, Po | Po corroída, Py - sã. |
| | C1.MxGD | Biotita granito | Po | Corroída |
| | C3.MxGD | Granodiorito | Po, Py | Rara alteração da Po para Mg/Lm |
| | C5.MxGD | Biotita granito | Po | Corroída |

**Legenda:** Po - pirrotita; Py - pirita; Cpy - calcopirita; Mg - magnetita; Mc - Marcassita; Lm - limonita ou hidróxido de ferro; Hm - hematita; Bo – bornita; Ptl - Pentlandita. **Obs:** pirita ($FeS_2$); pirrotita ($Fe_7S_8$); calcopirita ($CuFeS_2$); marcassita ($FeS_2$) bornita; ($Cu_5FeS_4$); pentlandita ((Fe, Ni)$9S_8$); magnetita ($Fe_3O_4$); hematita ($Fe_2O_3$), ilmenita ($FeTiO_3$), limonita ($FeO(OH).nH_2O$. ND – Não Determinado.

Apresentam-se nas Figuras 5.38 e 5.39 algumas das fotomicrografias obtidas nas análises mineralógicas dos agregados para identificação dos minerais sulfetos. Encontram-se no Apêndice I um detalhamento das análises mineralógicas realizadas para a identificação dos sulfetos presentes nos agregados extraídos dos testemunhos de concreto e dos materiais rochosos referentes a cada usina estudada.

**Figura 5.38** – Micrografias dos agregados das UHEs Corumbá e Mascarenhas: a) Cristal de pirrotita (Po) com borda de alteração para marcasita (Mc), lamela de exsolução para pentlandita (Ptd) e intercrescido com calcopirita (Cpy) e hematita (Hm) (agregado granada-mica-quartzo xisto do testemunho C8.CEl.12); b) fragmentos de pirita (Py) com borda de alteração para limonita (Lm) (agregado quartzito do testemunho C5.MTa).

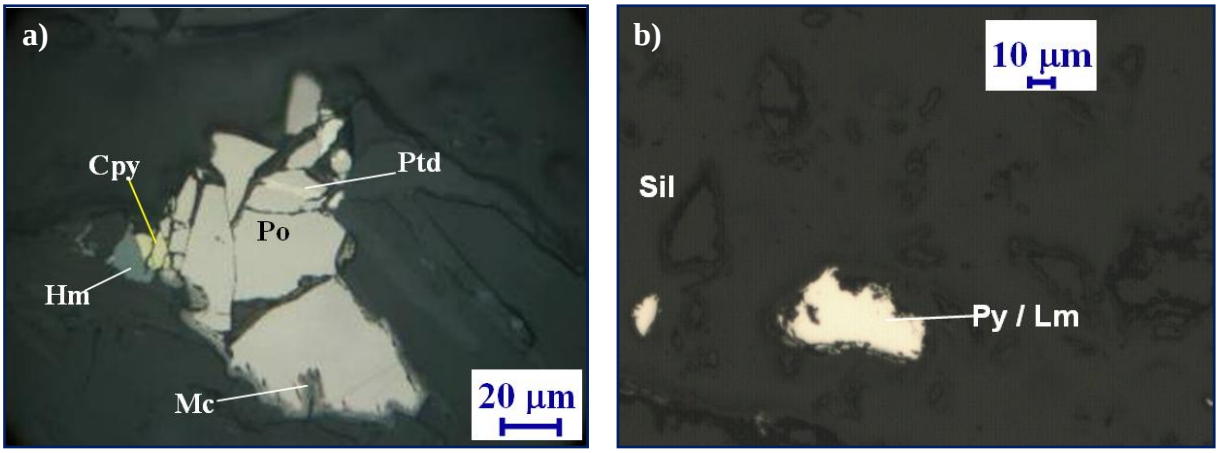
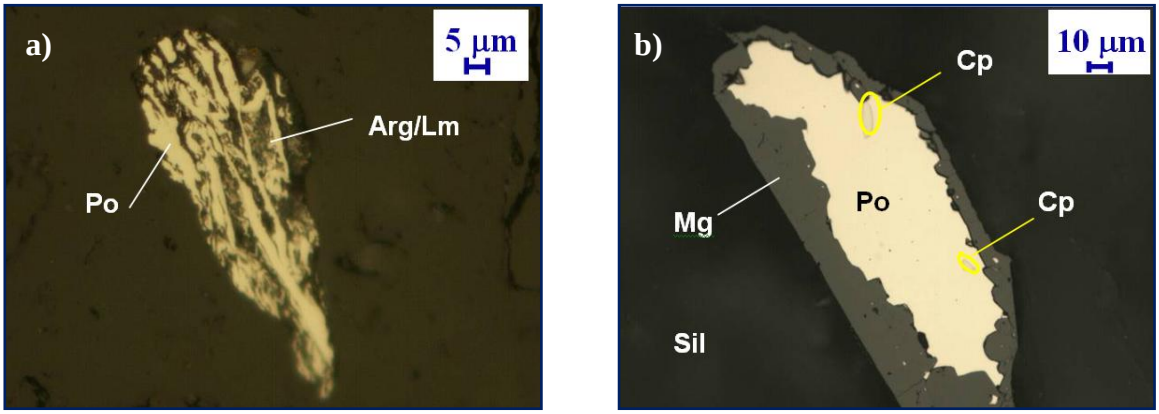
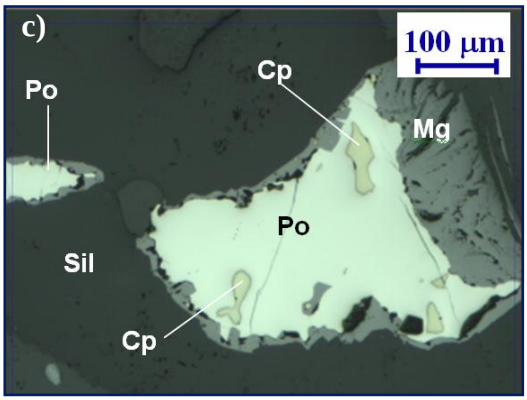
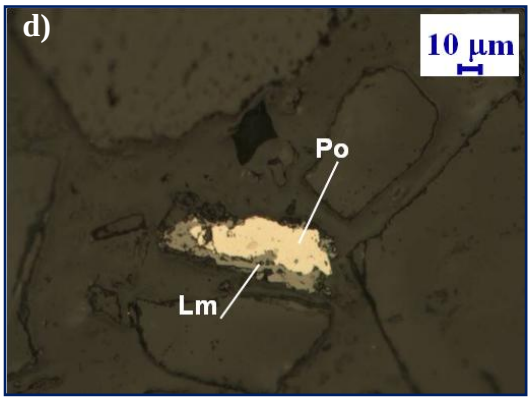



**Figura 5.39** - Micrografias dos agregados das UHEs PA II, PA IV e Moxotó: a) fragmento de pirrotita (Po) sendo substituída por material argilo-limonítico (Arg/Lm) (agregado biotita granito do testemunho C1.PAIITa); b) um cristal de pirrotita (Po) sendo substituída por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cp) (agregado granítico do testemunho C1.PAIVTa); c) um cristal de pirrotita (Po) sendo substituída por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cp) (agregado granítico do testemunho C6.PAIVVt); d) fragmento de pirrotita (Po) com bordas de oxidação para limonita (Lm) (agregado do testemunho C3.MxGD).






Pelos resultados apresentados observa-se que os agregados referentes à UHE Corumbá possuem minerais sulfetos do tipo pirrotita, pirita, calcopirita e pentlandita, sendo que, no geral, o sulfeto preponderante é a pirrotita seguida de pirita. Verifica-se que alguns dos minerais sulfetos visualizados, principalmente a pirrotita, apresentaram-se com alterações ou presença de bordas corroídas, porém de forma incipiente e não muito pronunciada.

Observa-se que os agregados da UHE Mascarenhas possuem minerais sulfetos, do tipo pirita, disseminados pela amostra e apresentando sempre alguns fragmentos com borda de corrosão e início de alteração para material argilo-limonítico. Percebe-se similaridade entre o material rochoso extraído da pedreira explorada na época da construção e os agregados extraídos dos testemunhos dos concretos. Esses quartzitos são friáveis, desta forma suscetíveis ao ingresso de agentes oxidantes como o oxigênio e a umidade, facilitando assim a alteração dos minerais sulfetos. Essas alterações dos minerais sulfetos podem fornecer íons sulfatos para a pasta cimentícia, de forma a originar fases sulfatadas.

O principal sulfeto identificado nos agregados extraídos dos testemunhos de concreto da UHE PA II foi a pirrotita, sendo que somente nos agregados extraídos do testemunho C1.PAIITa observou-se também a presença de pirita. Verifica-se que na maioria dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto foi identificada a presença de pirrotita com indícios de alterações (corroídas) e oxidações.

Já o material rochoso coletado no entorno da UHE PA II possui a pirita como principal sulfeto, seguido de calcopirita. Nessas rochas os sulfetos presentes encontram-se sãos e sem indícios de alterações. Pode-se questionar se tais agregados, porventura, não possuíam sulfetos pirrotita, conforme observado nos agregados extraídos dos testemunhos de concreto, tendo eles se alterado em função das intempéries e, devido a isto, não sendo mais visualizados

nessas amostras. Porém, como não foi identificado nenhum produto de alteração nos materiais rochosos coletados, como a limonita ou outro óxido de alteração, descarta-se esta hipótese.

O principal sulfeto identificado nos agregados extraídos dos testemunhos de concreto da UHE PA IV, em geral, foi a pirrotita, cujas exceções ocorreram para os agregados dos concretos C9-PAIVVt e C10-PAIVVt, onde a pirita encontra-se em maior proporção, e em menor proporção ocorre a calcopirita, sendo esses dois sulfetos os únicos identificados nos agregados desses dois concretos. Verifica-se também que em praticamente todos os agregados extraídos dos testemunhos de concreto analisados foram identificadas a presença de pirrotita ou pirita predominantemente sãs, com algumas alterações indicativas de corrosão mineral ou oxidações, e apenas os agregados do testemunho C10-PAIVVt encontravam-se com sulfetos totalmente sãos.

No material rochoso coletado no entorno da UHE PA IV, apenas a pirita foi identificada, apresentando-se sempre inalterada e não se constatou a presença de fases como óxidos, hidróxidos ou oxi-hidróxidos de ferro que indicassem alteração de minerais sulfetos.

Com relação aos agregados extraídos dos testemunhos de concreto da UHE Moxotó, os únicos sulfetos identificados foram a pirrotita e a pirita, sendo esta última identificada apenas nos agregados extraídos do testemunho C3.MxGD, apresentando as pirrotitas como principal sulfeto, e em geral, corroída ou com alguma alteração. Já no material rochoso coletado no entorno da UHE Moxotó identificou-se a presença de dois tipos de sulfetos, a saber: pirita e pirrotita, e apenas esta última com grãos corroídos.

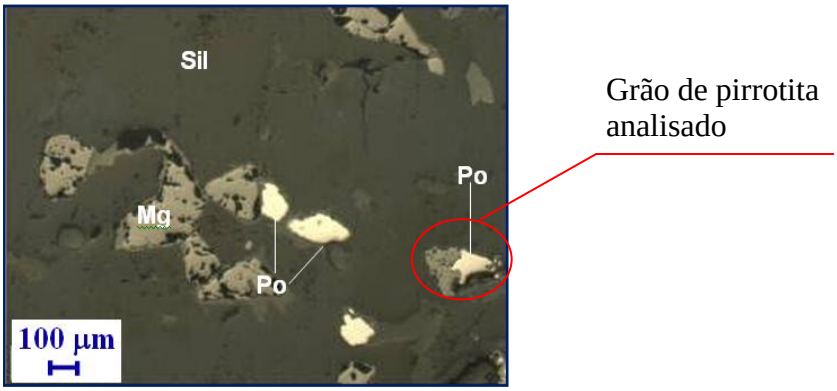
### 5.10.2 Mapeamento químico por microscopia eletrônica de varredura e espectrometria por energia dispersiva de raios X (EDS)

De forma complementar, procedeu-se também com algumas análises de mapeamento da composição química por meio da espectrometria por energia dispersiva de raios X (EDS), empregando a microscopia eletrônica de varredura (MEV), em algumas amostras de agregados extraídos de testemunhos de concreto. Este mapeamento é também conhecido como "*Dot Mapping*", termo em inglês, sendo chamado ao longo do texto resumidamente de mapeamento por EDS. Destaca-se que nesta etapa as análises foram localizadas, restringindo-se apenas às amostras e seções selecionadas.

Dentre as amostras analisadas pelo mapeamento por EDS, selecionaram-se duas de agregados extraídos dos testemunhos de concreto, sendo uma proveniente do testemunho C1.PAIITa e a outra proveniente do testemunho C6-PAIVVt.

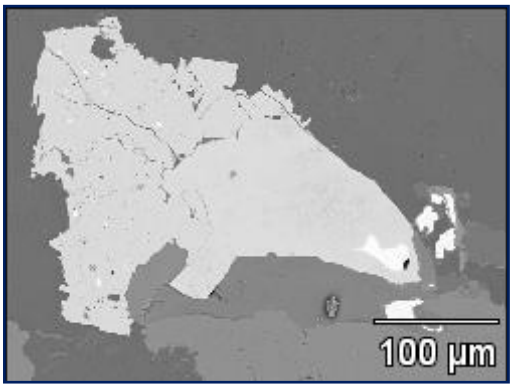
Apresenta-se na Figura 5.40 a fotomicrografia obtida por meio da análise microscópica por luz refletida, onde se observa um cristal de pirrotita sendo substituída por magnetita.

**Figura 5.40** - Fotomicrografia de um cristal de pirrotita sendo substituída por magnetita (indicação) – UHE PA II (C1.PAIITa).



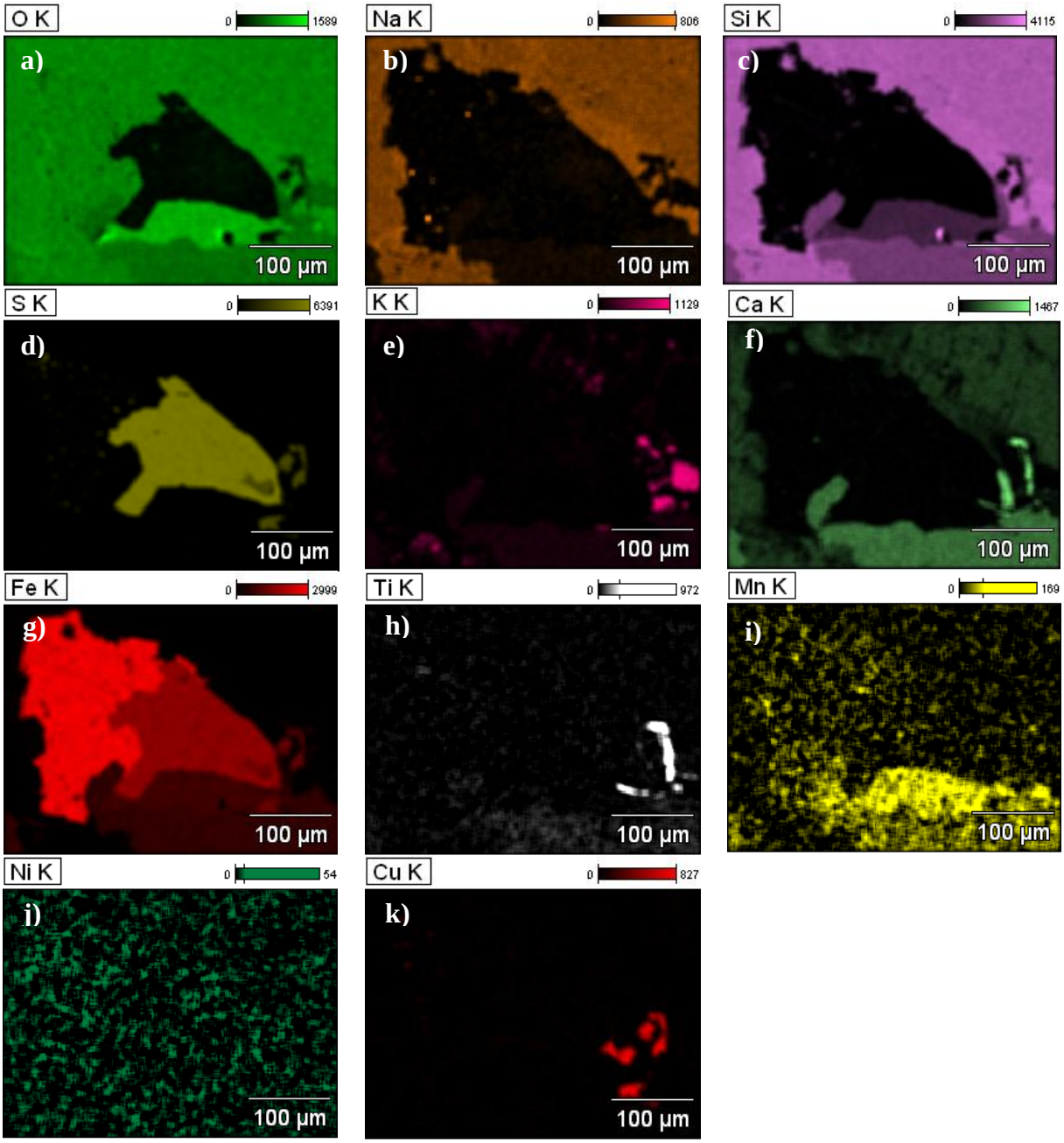

Na Figura 5.41 pode ser visualizada uma imagem feita por meio do MEV, para posterior o mapeamento por EDS do mesmo fragmento de pirrotita assinalado na Figura 5.40.

**Figura 5.41** – Cristal da pirrotita destacado na Figura 5.40 e observado pelo MEV.



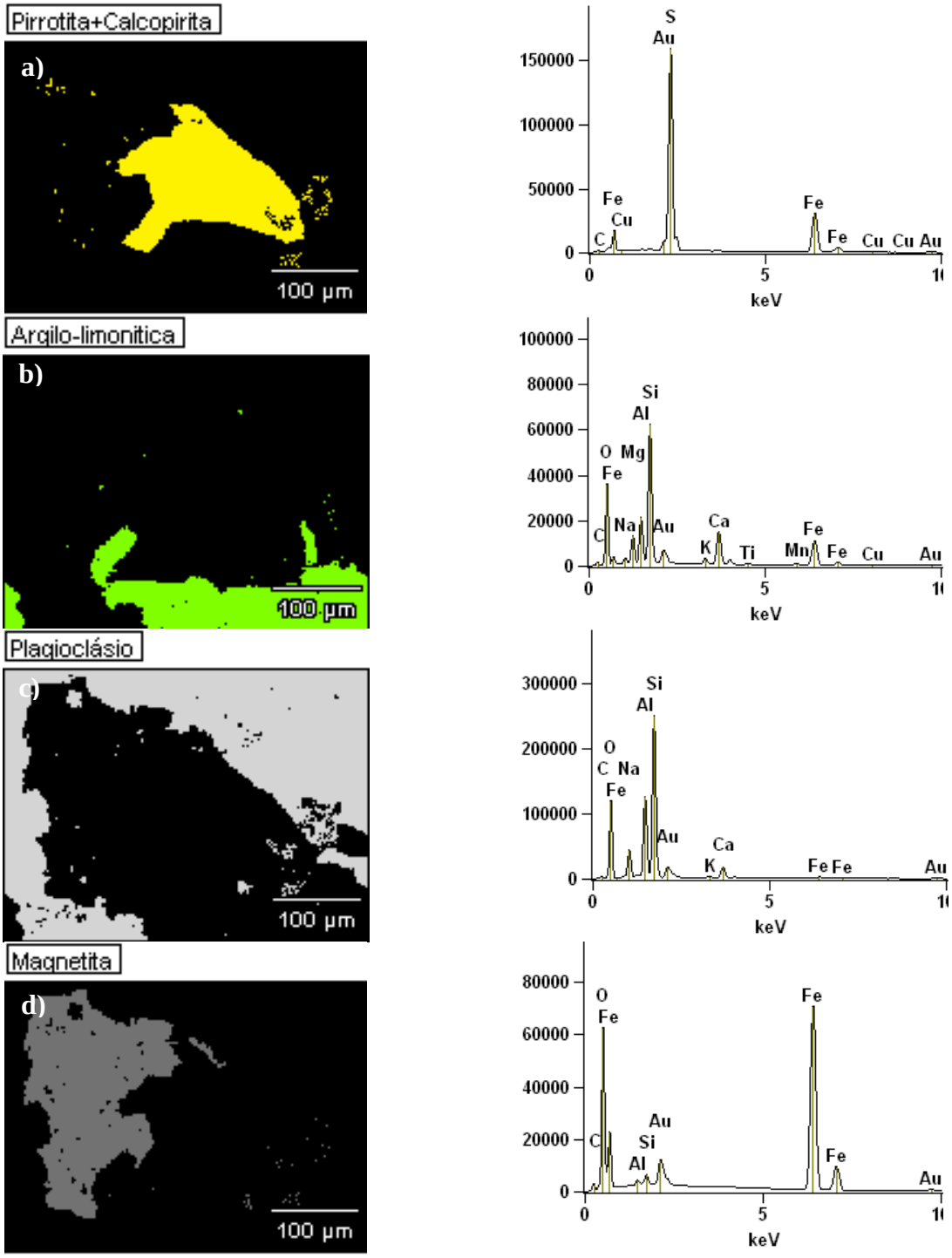

Sobre a superfície desta região da amostra (Figura 5.41) foi realizada a análise do mapeamento químico por EDS de forma a identificar, ponto a ponto, os elementos químicos presentes. Na Figura 5.42 têm-se apresentadas as imagens obtidas dos distintos elementos químicos identificados sobre a superfície analisada, cada qual com uma cor de forma a distingui-los.

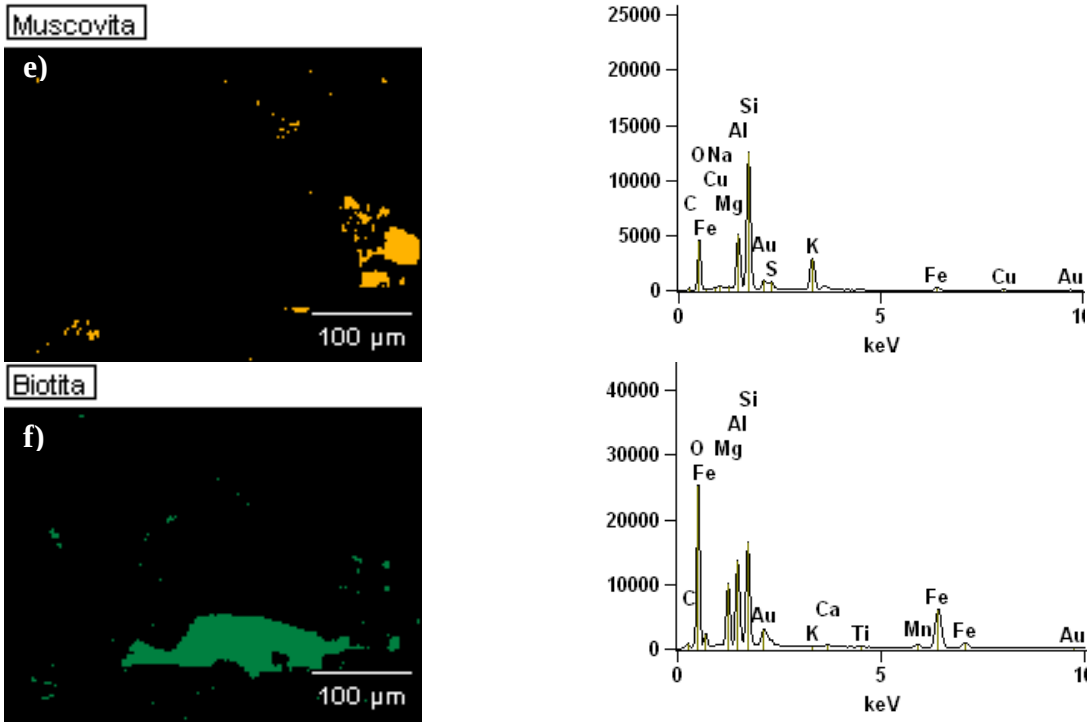
**Figura 5.42** – Imagem com a identificação dos elementos químicos: a) oxigênio; b) sódio; c) silício; d) enxofre; e) potássio; f) cálcio; g) ferro; h) titânio; i) manganês; j) níquel e k) cobre.




Por meio da identificação dos elementos químicos existentes sobre a superfície do material rochoso é possível realizar a identificação das distintas fases compostas por esses elementos. As imagens das fases identificadas na seção do material analisado podem ser visualizadas na Figura 5.43.

**Figura 5.43** – Imagem das fases identificadas por meio do mapeamento químico e as respectivas microanálises: a) sulfeto de ferro e cobre (pirrotita+calcopirita); b) fase argilo-limonítica; c) feldspato plagioclásio; d) magnetita; e) mica muscovita; f) mica biotita.






Por meio do mapeamento químico dos elementos da superfície do material rochoso foi possível identificar a existência de sete distintas fases, a saber: fases pirrotita e calcopirita, fase composta por produto argilo-limonítico, plagioclásio, magnetita, muscovita e biotita.

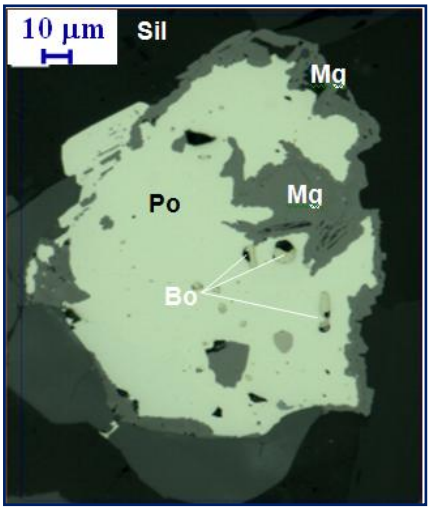
A fase argilo-limonítica, além da magnetita é uma indicação de que houve alteração do mineral sulfeto, com a liberação dos íons metálicos ferrosos, tendo esses íons reagidos posteriormente com as fases vizinhas como alguma argila circundante ao fragmento de sulfeto analisado.

É possível verificar pelas Figuras 5.43-a e 5.43-d que o cristal de pirrotita encontra-se aparentemente sendo substituído pela magnetita. Além disso, as facetas da magnetita apresentam-se com contornos de ângulos mais suaves. Há autores que sugerem que o cristal de pirrotita pode ser substituído pela magnetita, ou seja, que esta fase pode não ser natural do agregado, e sim um produto de alteração.

Em relação aos demais cristais circundantes, as fases sulfetadas compostas por pirrotita e calcopirita são naturais do agregado. Elas encontram-se em consonância com a descrição mineralógica realizada para este material rochoso por microscopia ótica de luz refletida.

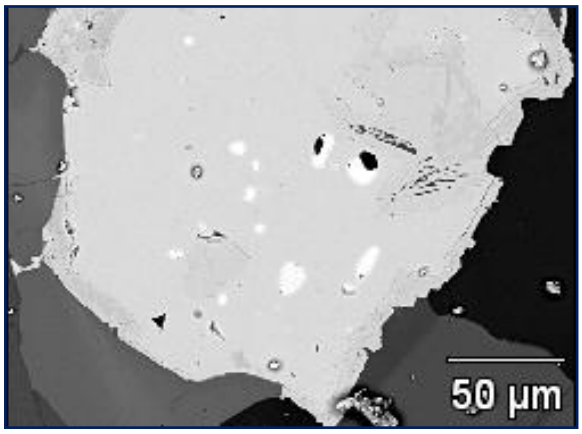
Apresenta-se na Figura 5.44 a fotomigrografia obtida por meio da análise microscópica por luz refletida, onde se observa um fragmento de pirrotita sendo substituída por magnetita.

**Figura 5.44** - Fotomicrografia de um fragmento de pirrotita (Po) sendo substituída por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cp) e bornita (Bo) - UHE PA IV (C6-PAIVVt).



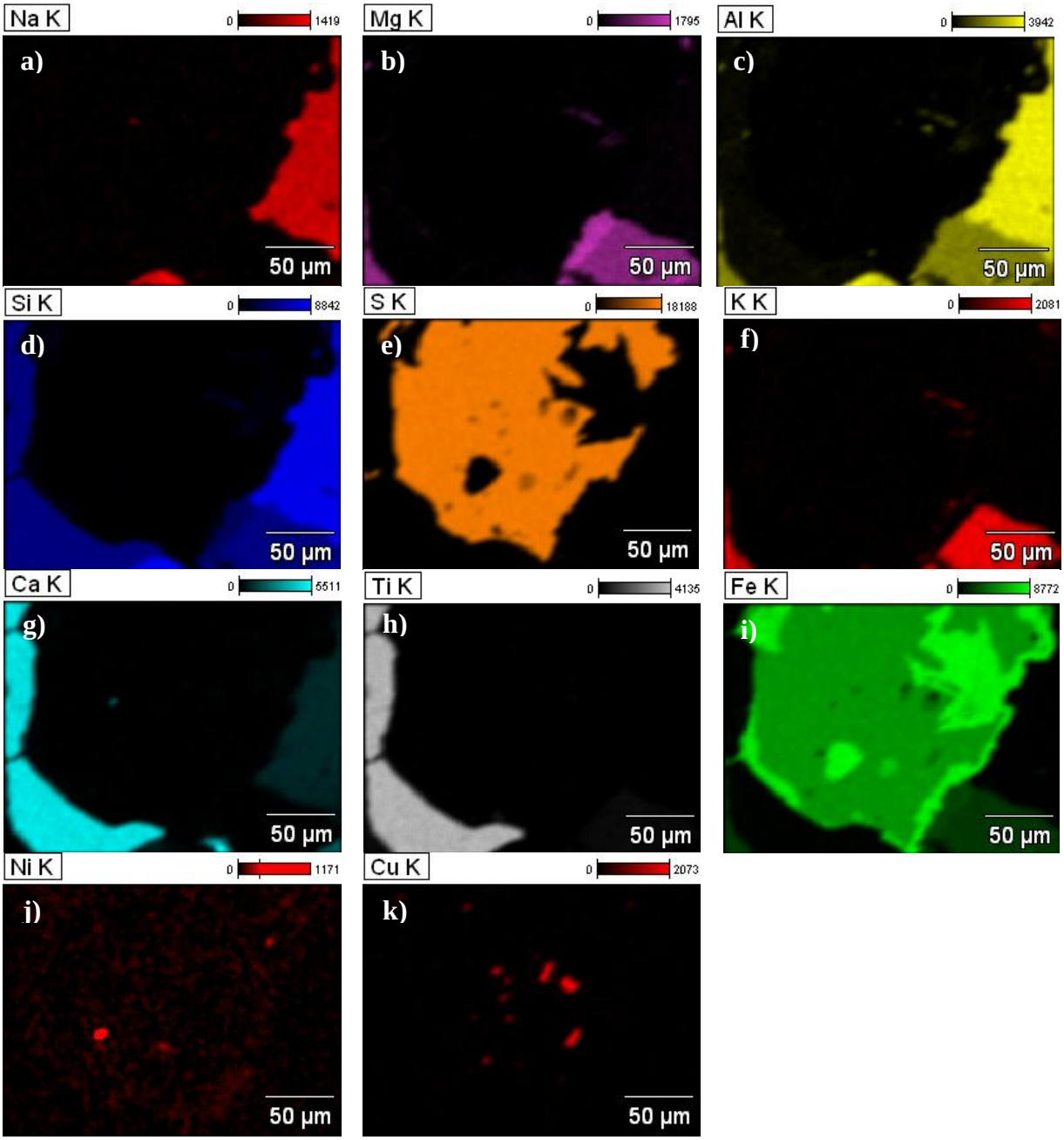

Na Figura 5.45 tem-se uma imagem feita por meio do MEV, empregando a análise por EDS do mesmo fragmento de pirrotita identificada na Figura 5.44.

**Figura 5.45** – Imagem do cristal de pirrotita feita por MEV para o mapeamento químico por EDS.



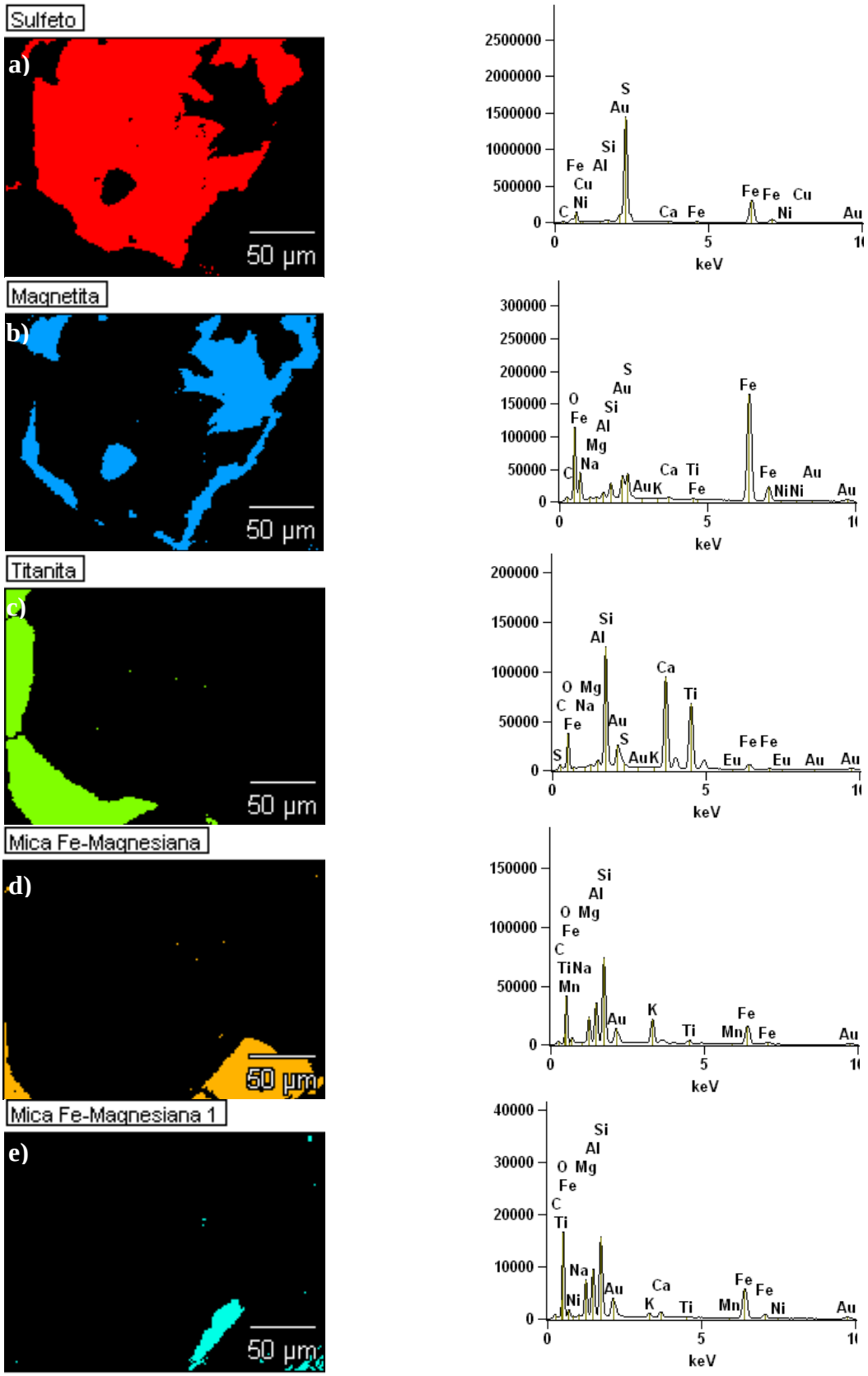

Sobre a superfície da amostra, na região apresentada na Figura 5.45, foi realizada a análise do mapeamento da composição química por meio de EDS empregando a microscopia eletrônica de varredura (MEV) de forma a identificar, pontualmente, os elementos químicos presentes. Na Figura 5.46 têm-se apresentadas as imagens obtidas dos distintos elementos químicos identificados sobre a superfície analisada.

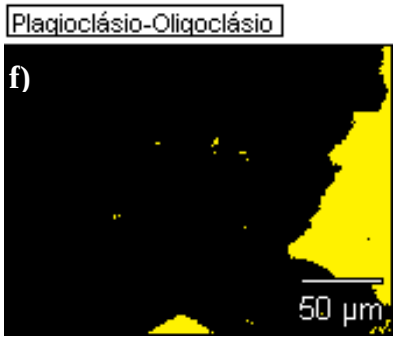
**Figura 5.46** – Imagem da identificação dos elementos químicos: a) sódio; b) magnésio; c) alumínio; d) silício; e) enxofre; f) potássio; g) cálcio; h) titânio; i) ferro; j) níquel e k) cobre.

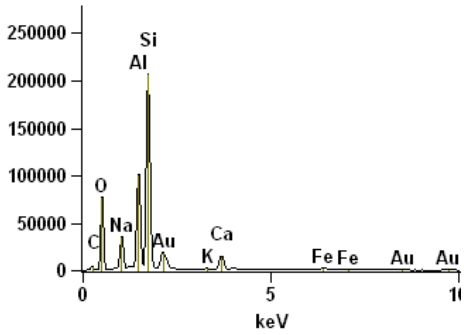



Por meio da identificação dos elementos químicos existentes sobre a superfície do material rochoso foi possível identificar as distintas fases que compõem esses elementos. Na Figura 5.47 apresentam-se as imagens das fases identificadas na seção do material analisado.

**Figura 5.47** – Imagem das fases identificadas por meio do mapeamento químico: a) sulfeto de ferro (pirrotita); b) magnetita; c) titanita; d) mica ferro-magnesiana; e) mica ferro-magnesiana; f) feldspato plagioclásio (do tipo oligoclásio).






Por meio do mapeamento químico dos elementos da superfície do material rochoso foi possível identificar a existência de seis distintas fases, a saber: magnetita, titanita, sulfeto de ferro (pirrotita), plagioclásio (oligoclásio) e duas fases de mica ferro-magnesiana. Destaca-se que a fase mica ferro-magnesiana apresentada na Figura 5.47-e, se distingue da apresentada na Figura 5.47-d, apenas por apresentar uma maior concentração de ferro e magnésio.

É possível verificar pelas Figuras 5.47-a e 5.47-b que a pirrotita encontra-se circundada pela magnetita. Além disto, as facetas desse cristal apresentam-se com contornos mais suaves, fatores estes sugestivos de que o cristal de pirrotita está sendo substituído pela magnetita, ou seja, que esta fase pode não ser natural do agregado, e sim um produto de alteração.

Os demais cristais circundantes ao fragmento de pirrotita são naturais do agregado e encontram-se em consonância com a descrição mineralógica realizada para este material.

## 5.11 CARACTERÍSTICAS VISUAIS E MICROESTRUTURAIS DOS CONCRETOS

### 5.11.1 Inspeção visual preliminar

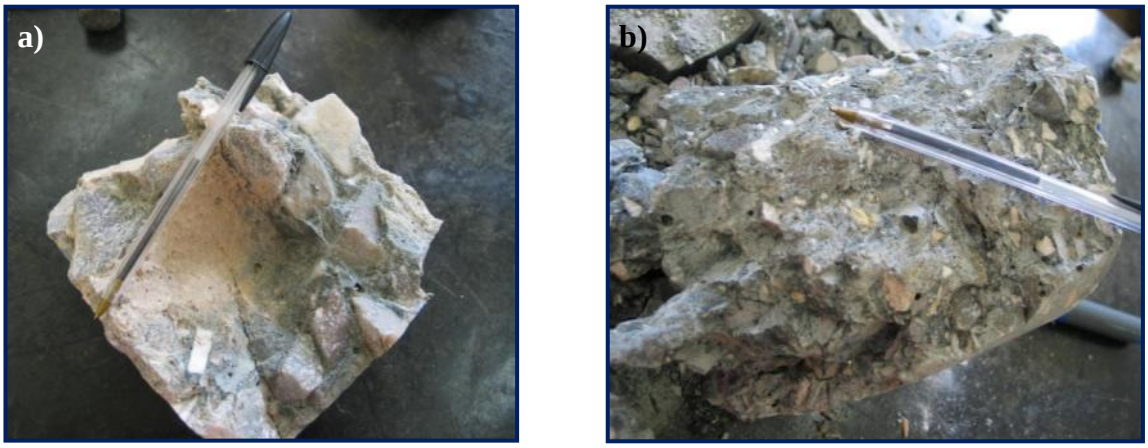
Durante a preparação e seleção de amostras dos testemunhos de concreto para as análises microestruturais, realizou-se também uma criteriosa inspeção interna deles, com o objetivo de verificar e registrar qualquer anomalia existente.

Os concretos da UHE Corumbá apresentaram, no geral, argamassas com coloração cinza clara a tons mais esverdeados, provavelmente devido o emprego de cimento com escória de alto-forno. Em todos os testemunhos foi possível visualizar, porém de forma pouco expressiva, apenas um ou dois agregados, por testemunho, com alguma fissuração. De forma semelhante ao observado durante a inspeção externa dos testemunhos, alguns agregados pareciam possuir borda envolta a estes; porém tais bordas sugerem ser naturais dos próprios agregados. Em

nenhum dos testemunhos analisados da UHE Corumbá foram detectados poros preenchidos ou com deposições e em geral, todos os concretos apresentavam-se bem coesos e íntegros.

Pela inspeção visual interna dos testemunhos da UHE Corumbá também foi possível confirmar o emprego de areia natural e artificial, tendo o concreto C8.CEl.12 o menor volume de argamassa e também o mais fragmentável dentre os quatro testemunhos analisados. O concreto mais coeso foi o C3.CVt. O aspecto geral dos concretos da UHE Corumbá pode ser visualizado pela Figura 5.48.

**Figura 5.48** – Visualização das argamassas e agregados durante inspeção interna – UHE Corumbá: a) testemunho C3.CVt; b) testemunho C6.CEl.5 (notar argamassa mais esverdeada).

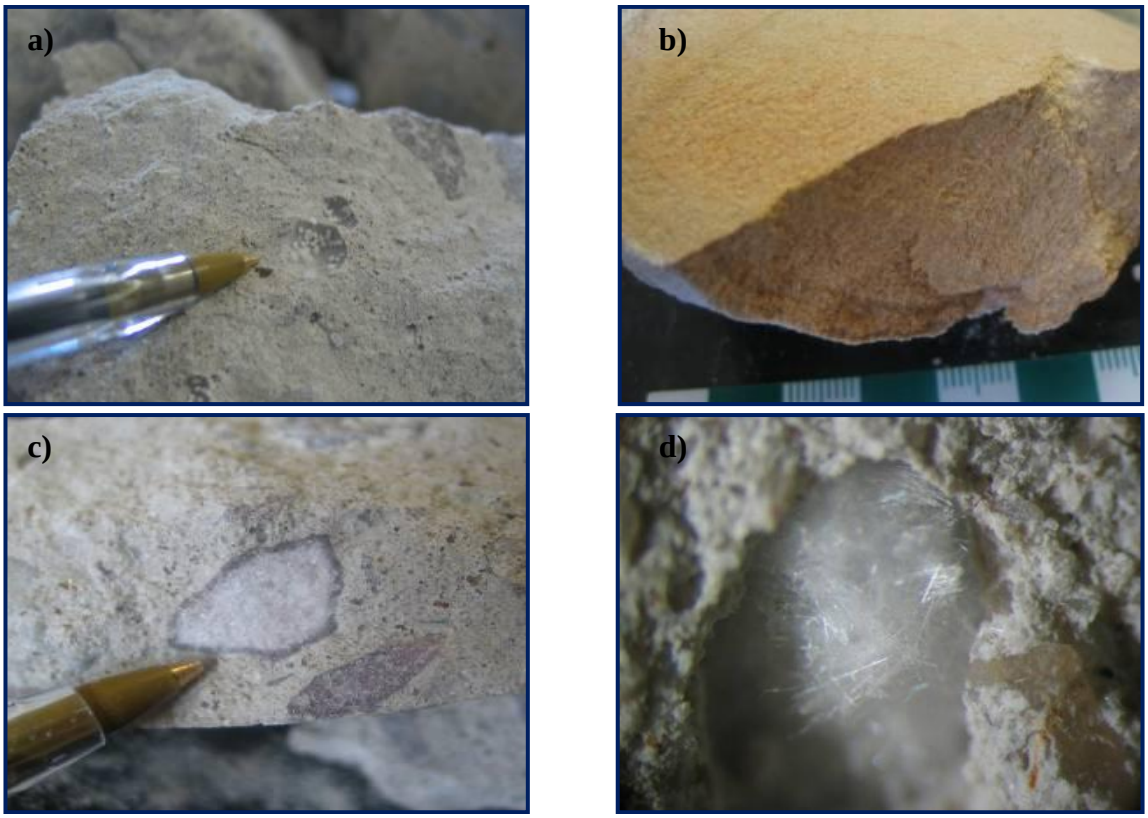



Com relação aos concretos da UHE Mascarenhas foi possível confirmar, pela inspeção visual interna dos concretos, o emprego de areia natural como agregado miúdo em todos os concretos analisados. Verificou-se também a presença de produtos neoformados no interior desses concretos. O testemunho que apresentou quantidade mais expressiva de neoformações foi o concreto C10.MTa, sendo este o mais fácil de se desfragmentar durante a preparação.

Ao analisar visualmente a argamassa na zona de transição com o agregado, todos os concretos inspecionados da UHE Mascarenhas apresentaram muitos poros vazios, sendo mínima a existência de poros nessa região com a presença de neoformações. Entretanto, já disseminados na argamassa, foi possível perceber alguns poros com deposição de produtos brancos (Figura 5.49-a), com aspecto de conglomerado de acículas brancas, sendo algumas de forma pontual, onde o testemunho C10.MTa apresentou-se com maior presença desses materiais.

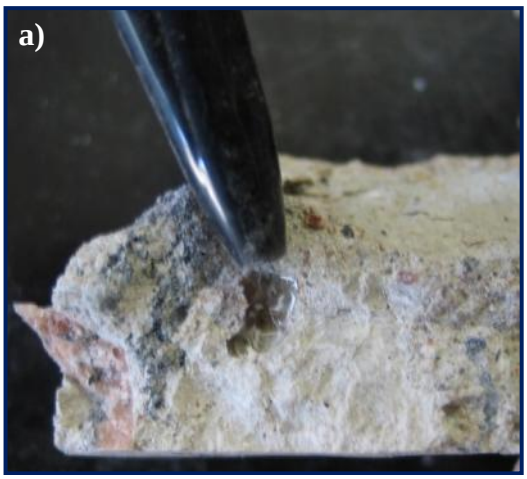
Nos testemunhos C5.MTa e C10.MTa foi possível verificar a presença de um e dois agregados com aparência de oxidação, respectivamente, tendo um desses agregados do testemunho C5.MTa coloração totalmente amarelada (Figura 5.49-b). Em todos os testemunhos visualizou-se a presença de bordas nos agregados (Figura 5.49-c), essas típicas da RAA, porém em nenhum dos agregados foi possível visualizar a presença de fissuras. Produtos esbranquiçados de morfologia acicular, sugestivos da etringita, também foram visualizados nas argamassas (Figura 5.49-d).

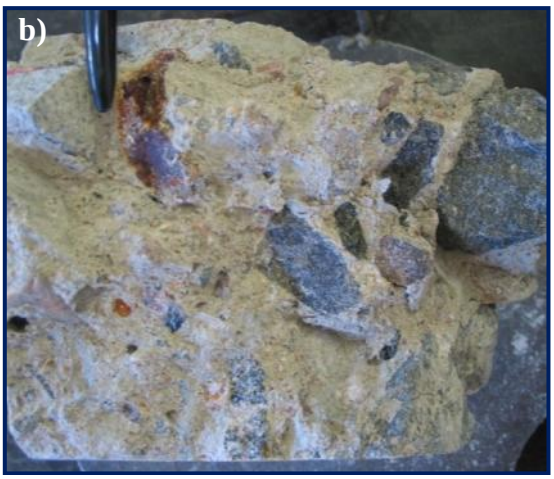
**Figura 5.49** – Inspeção interna dos testemunhos da UHE Mascarenhas: a) região da argamassa com poro parcialmente preenchido com material branco; b) agregado com aparência de oxidação; c) agregado com bordas; d) finos cristais aciculares esbranquiçados dentro de um poro na argamassa (foto tirada com emprego de lupa estereoscópica - objetiva 16x).




Com relação aos testemunhos da UHE PA II, foi possível identificar que todos os concretos inspecionados continham alguns poros preenchidos com material esbranquiçado (Figura 5.50), tendo o concreto C2.PAIITa apresentado material vítreo em uma zona de transição (Figura 5.50-a) e com alguns agregados envoltos por material esbranquiçado além de agregados com aparência de oxidação (Figura 5.50-b). Foi também possível perceber o emprego de areia natural e artificial nos concretos.

**Figura 5.50** – Inspeção interna dos testemunhos da UHE PA II: a) presença de material vítreo em um poro da argamassa da zona de transição com o agregado; b) agregados com aparência de oxidação.




Com relação aos concretos da UHE PA IV todos eles apresentavam-se com baixa coesão, com relativa facilidade de fragmentação; porém, não tendo verificada a existência de nenhuma borda envolvendo os agregados, e os concretos possuíam porosidade média e com boa distribuição dos constituintes. A presença de agregados com aparência de oxidação foi aleatória e praticamente todos os testemunhos apresentavam algum agregado com esta aparência.

Foi também possível notar que houve emprego de areia natural e artificial na confecção dos concretos da UHE PA IV.

Em nenhum dos concretos extraídos da tomada d'água verificou-se a presença de poros totalmente preenchidos, apesar da presença de vários poros parcialmente preenchidos. Já nos concretos extraídos do vertedor, no testemunho C9.PAIVVt visualizou-se um poro grande totalmente preenchido com material esbranquiçado (Figura 5.52-b) e no testemunho C10.PAIVVt foram visualizados três poros totalmente preenchidos por material esbranquiçado.

De forma pouco expressiva, por meio da inspeção internas dos testemunhos extraídos da UHE PA IV, pôde-se observar que os concretos provenientes do vertedor apresentavam-se visualmente com mais neoformações (produtos esbranquiçados) do que os extraídos da tomada d'água.

Encontra-se nas Figuras 5.51 e 5.52 o registro de algumas das observações realizadas durante a inspeção interna dos testemunhos de concreto extraídos das estruturas da tomada d'água e do vertedor de PA IV, respectivamente.

**Figura 5.51** – Inspeção interna dos testemunhos extraídos da tomada d'água da UHE PA IV: a) aspecto geral do concreto; b) presença de material esbranquiçado sobre a argamassa do concreto.

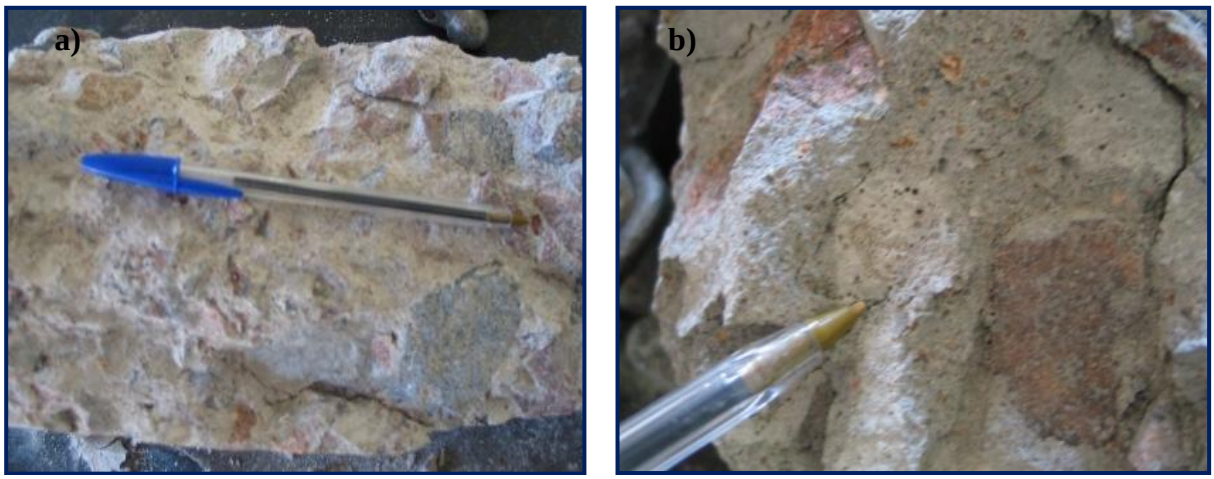
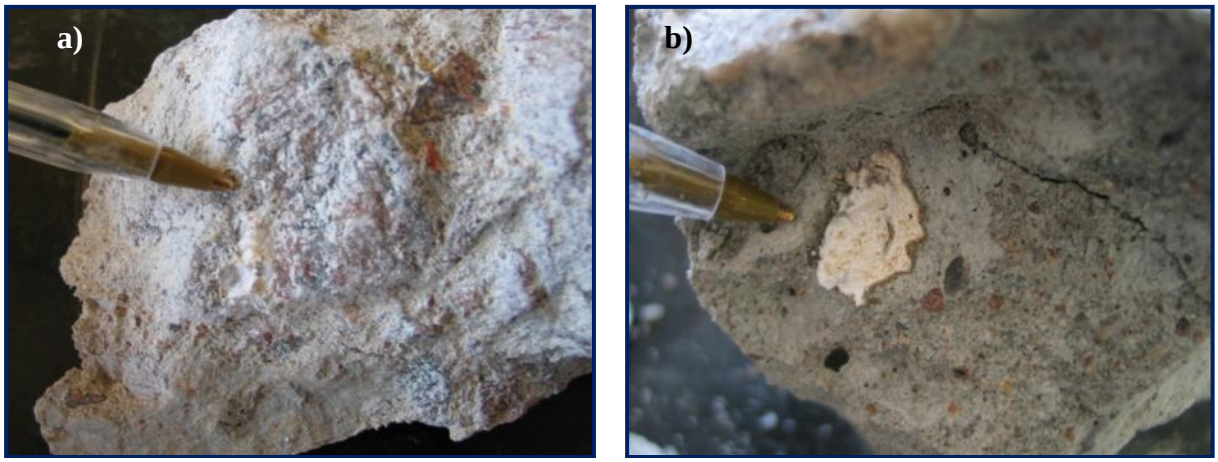
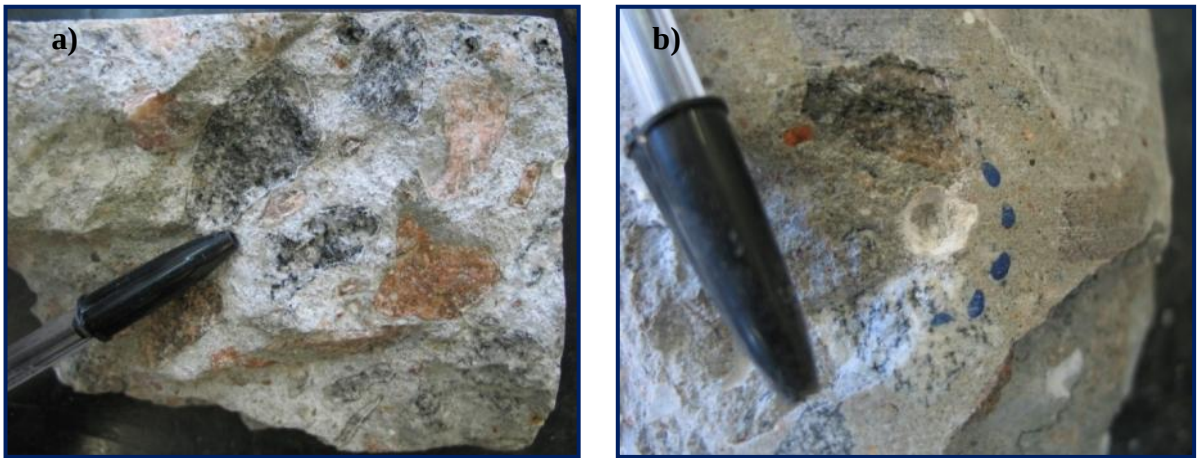



**Figura 5.52** – Inspeção interna dos testemunhos extraídos do vertedor da UHE PA IV: a) ocorrência de um agregado oxidado e deposição de material esbranquiçado na argamassa; b) poro totalmente preenchido com material esbranquiçado.




Os testemunhos de concreto procedentes da UHE Moxotó apresentaram-se semelhantes, sendo observados vários poros totalmente preenchidos com material esbranquiçado, alguns agregados com aparência de oxidação e alguns com presença de bordas, além de alguns agregados com presença também de fissuras. Notou-se também o emprego de areia natural e artificial nos concretos. Apresentam-se na Figura 5.53 algumas dessas observações relatadas.

**Figura 5.53** – Inspeção interna dos testemunhos da UHE Moxotó. a) bordas brancas envolvendo/recobrindo os agregados e poros preenchidos com material esbranquiçado, b) poro parcialmente preenchido com material esbranquiçado.




Dentre as três usinas estudadas pertencentes ao complexo de Paulo Afonso, a UHE Moxotó foi a que apresentou maiores indícios visuais de deterioração nos concretos avaliados, destacando-se que grande parte dos agregados continham finas bordas sugestivas da RAA.

Por meio da inspeção visual interna dos concretos é possível dizer que a usina que apresentou menores indícios de qualquer alteração visual foi a UHE Corumbá, sendo os concretos identificados como os mais deteriorados visualmente dentre as cinco usinas avaliadas, os extraídos da UHE Moxotó.

## 5.11.2 Análise por difração de raios X

Apresentam-se neste item, de forma resumida, as fases identificadas por difração de raios X das argamassas dos concretos selecionados para o estudo microestrutural (Tabela 5.29). Encontra-se no Apêndice J, deste trabalho, um resumo das fases identificadas por esta técnica e no Anexo A os respectivos difratrogramas obtidos para cada amostra de argamassa.

Destaca-se que, como as neoformações oriundas da RAA possuem baixa cristalinidade, não é possível a sua identificação precisa por meio desta técnica. Diante do exposto, o principal foco dessas análises foi a identificação de fases sugestivas de algum ataque por sulfatos. Destaca-se também que as análises por DRX apresentadas são apenas qualitativas, não sendo, portanto, possível saber o grau de incidência de cada uma das fases identificadas pela presente técnica.

**Tabela 5.29** – Resumo das fases identificadas nas argamassas por difração de raios X.

| UHE | Testemunho | Compostos sulfatados identificados | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Monossulfato | Etringita | Gipsita | Outros atípicos |
| CORUMBÁ | C1.CTa | | | | |
| | C3.CVt | X | | | |
| | C7.CEl.5 | | | | |
| | C8.CEl.12 | X | | | |
| MASCA RE-NHAS | C3.MTa | | | | |
| | C5.MTa | | | | |
| | C10.MTa | | X | | |
| PA II | C1.PAIITa | | | X | Taumasita;Yelimita[1] |
| | C2.PAIITa | | | X | |
| | C5.PAIITa | | | X | Yelimita [1] |
| PA IV | C1-PAIVTa | X | | | |
| | C2-PAIVTa | | | | Hidroglauberita[1] Mateucita[1] |
| | C4-PAIVTa | X | | | Mateucita[1] |
| | C6-PAIVVt | | | | |
| | C9-PAIVVt | | X | | |
| | C10-PAIVVt | | X | X | |
| MOXO-TÓ | C1.MxGD | X | | X | |
| | C3.MxGD | | | X | |
| | C5.MxGD | | | X | |

**Nota:** [1] – Fases identificadas empregando-se ficha catalográfica do banco de dados de produtos cimentícios de 2009 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

Além das fases sulfatadas apresentadas na Tabela 5.29, destaca-se a presença de carbonatos de cálcio nos testemunhos de todas as usinas, exceto em Mascarenhas. Fases relacionadas aos produtos de hidratação normais da pasta de cimento foram encontradas em praticamente todas as amostras, destacando o CH e C-S-H, entre outras do cimento.

Não foram identificadas fases sulfatadas sugestivas da incidência de manifestação patológica decorrente de ataque por sulfatos nos concretos da UHE Corumbá, sendo o monossulfato a única fase portadora de sulfatos identificada. Já na UHE Mascarenhas, apenas um dos testemunhos estudados apresentou a etringita por difração.

Com relação às análises de difração de raios X das argamassas provenientes dos concretos da UHE PA II, além das fases normais de serem verificadas em pastas de cimento Portland, identificou-se em todas as amostras a gipsita, que é uma fase típica de ataque por sulfatos. Já a taumasita (sulfocarbonato de cálcio e sílica hidratada) foi sugerida de estar presente somente no concreto C1.PAIITa. Outra fase portadora de enxofre identificada foi a "yelimita" - $Ca_4Al_6O_{12}(SO_4)$, que é um sulfato anidro (uma espécie de sulfoaluminato de cálcio não

hidratado). Tal fase pode ser detectada em concretos cujo emprego de cimento tenha um teor de sulfatos elevado, segundo Halstead; Moore (1962), e a sua decomposição em água pode liberar a etringita e o hidróxido de alumínio ($Al(OH)_3$).

Com relação aos concretos da UHE PA IV verificam-se algumas fases sulfatadas sugestivas de alterações químicas como a etringita e a gipsita, porém apenas em concretos do vertedor. Estas fases, especificamente, não foram identificadas nos concretos da tomada d'água. Outras fases não tão comuns de serem encontradas, porém também portadoras de enxofre como a hidroglauberita ($Na_{10}Ca_3(SO_4)_8 \bullet 6H_2O$, sulfato de cálcio e sódio hidratado) e a mateucita ($NaHSO_4 \bullet H_2O$, sulfato de sódio hidratado) foram identificadas em alguns dos concretos de ambas as estruturas da UHE PA IV. Em um dos três concretos da tomada d'água identificou-se a hidroglauberita. Já mateucita foi identificada em dois dos três testemunhos analisados do vertedor e também em dois dos três testemunhos analisados da tomada d'água.

Com relação às fases observadas na UHE Moxotó, destaca-se a gipsita em todas as amostras, além do monossulfato em uma das amostras analisadas.

Conforme se depreende pelo apresentado por Rodrigues *et al*. (2012a) os produtos oriundos da interação entre íons sulfatos, como os liberados pela oxidação de minerais sulfetos presentes em agregados dos concretos, com o meio em que se encontram é função dos elementos químicos disponíveis no meio circundante. Portanto tais produtos atípicos identificados podem ser indícios de que houve aporte de íons sulfatos, já que tratam-se de fases sulfatadas, e estes interagiram com o meio alcalino do concreto. Não obstante, conforme apresentado no BRE digest 1 (BRE, 2005), íons sulfatos liberados na oxidação de minerais sulfetos, quando em presença de metais alcalinos, podem originar sulfatos alcalinos, como a hidroglauberita que é higroscópica.

No geral, das cinco usinas analisadas, nas três pertencentes ao complexo de Paulo Afonso foram identificadas fases típicas de um ataque por sulfatos e em Mascarenhas apenas um dos testemunhos observou-se a presença de fase típica desse ataque, a saber, a etringita.

### 5.11.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura

Apresentam-se na Tabela 5.30, de forma resumida, as principais características obtidas por meio das análises por MEV/EDS dos concretos estudados. Na sequência são apresentadas as características individuais, por amostra e usina.

**Tabela 5.30** – Resumo dos produtos e das características observados nos concretos por MEV/EDS.

| UHE | Testemunho | Etringita/ Taumasita | Monossulfato | Pulverulência[1] | RAA |
|---|---|---|---|---|---|
| CORUMBÁ | C1.CTa | -- | -- | x | -- |
| | C3.CVt | | | | |
| | C7.CEl.5 | | | | |
| | C8.CEl.12 | | x | | |
| MASCA-RENHAS | C3.MTa | Etringita | -- | -- | x |
| | C5.MTa | | | x | Suspeita de borda |
| | C10.MTa | | | -- | -- |
| PA II | C1.PAIITa | Etringita | -- | -- | x |
| | C2.PAIITa | -- | | x | x |
| | C5.PAIITa | | | | -- |
| PA IV | C1.PAIVTa | Etringita | Possível | x | x |
| | C2.PAIVTa | -- | -- | -- | |
| | C4.PAIVTa | | | x | |
| | C6.PAIVVt | Etringita | | | |
| | C9.PAIVVt | | | -- | |
| | C10.PAIVVt | | | x | |
| MOXOTÓ | C1.MxGD | Etringita | -- | -- | x (+ Trona) |
| | C3.MxGD | | | | x |
| | C5.MxGD | | | | |

**Legenda: "--**" não possui; "x" possui. **Notas:** [1] – O aspecto de pulverulência foi identificado de forma pontual, podendo este mascarar as análises e a identificação de algum produto de reação.

Salienta-se que em nenhum dos concretos analisados por MEV/EDS, com relação às fases sulfatadas, foi identificada a presença de taumasita, somente fases atribuídas à etringita ou ao monossulfato.

A partir dos resultados das análises no microscópio eletrônico de varredura em associação com as microanálises (MEV/EDS) realizadas com os concretos da UHE Corumbá, foi possível identificar nas argamassas do concreto extraído da tomada d'água (C1.CTa): a existência de regiões com pulverulência localizadas, alguns agregados fragmentados, produtos normais de hidratação na pasta de cimento, alguns materiais soltos e poros vazios.

Já na argamassa extraída do concreto referente à galeria de drenagem do vertedor (C3.CVt), pôde ser observada a existência de poros vazios, pulverulência localizada, compostos normais de hidratação do cimento, carbonatos localizados, portlandita e C-S-H, poros sem qualquer deposição de materiais além de interface preservada. Salienta-se que neste concreto, por meio das análises por difração de raios X, foram visualizados picos sugestivos da fase monossulfato, entretanto este não foi visualizado por MEV.

No concreto C7.CEl.5 foi identificada a existência de agregado alterado/oxidado, poros vazios, argamassa densa, pontualmente agregado fragmentado e C-S-H, não tendo sido identificada nenhuma fase portadora de sulfatos ou proveniente de RAA.

Destaca-se que na argamassa do concreto C8.CEl.12 o monossulfato foi identificado pontualmente pelo MEV, sendo também detectado pela difração de raios X.

Encontram-se nas Figuras 5.54 e 5.55 algumas das micrografias referentes às análises realizadas com os concretos da UHE Corumbá.

**Figura 5.54** - Micrografias dos concretos da UHE Corumbá: a) região na pasta do concreto C1.CTa com presença de poros vazios; b) região na pasta do concreto C1.CTa com presença de poros vazios e pulverulência; c) agregado do concreto C7.CEl.5 fragmentado com grãos soltos.

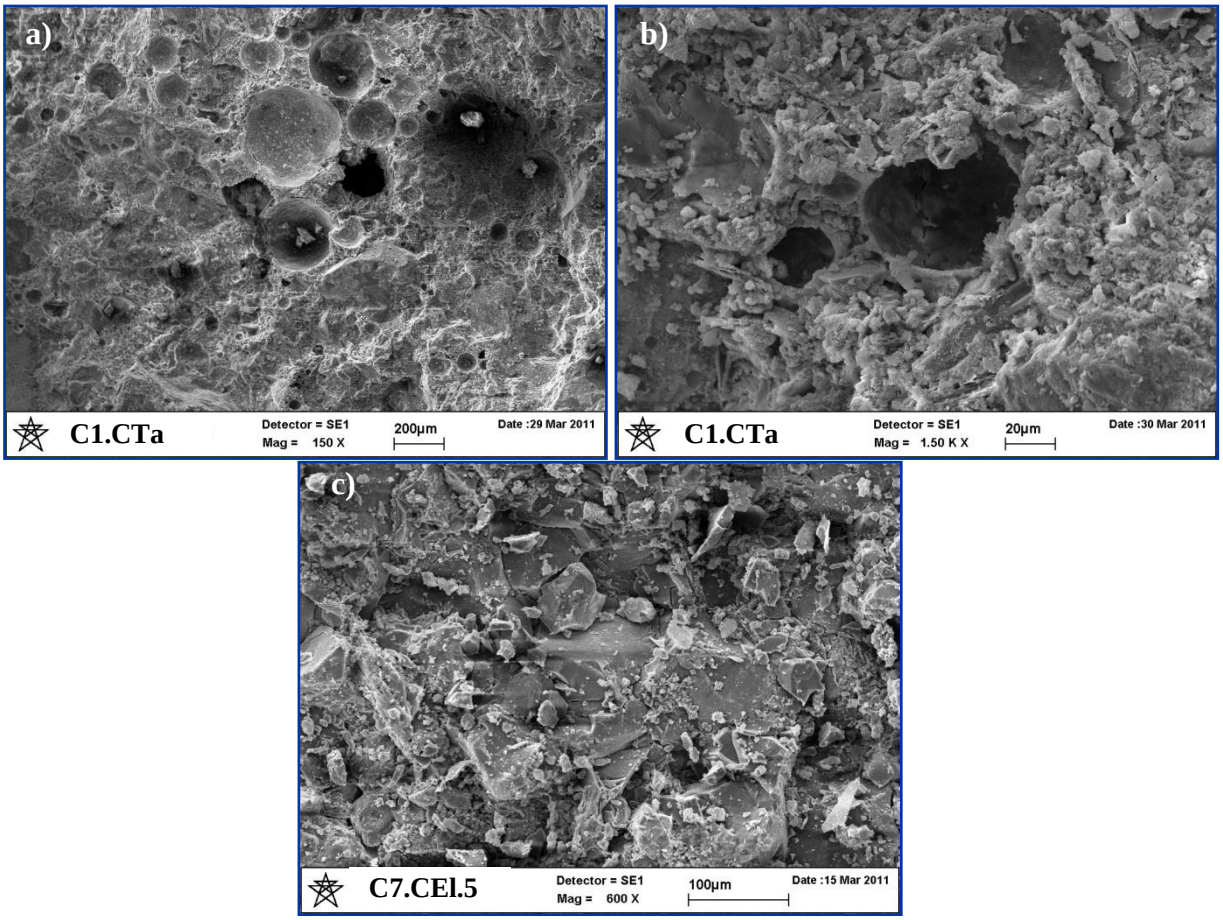
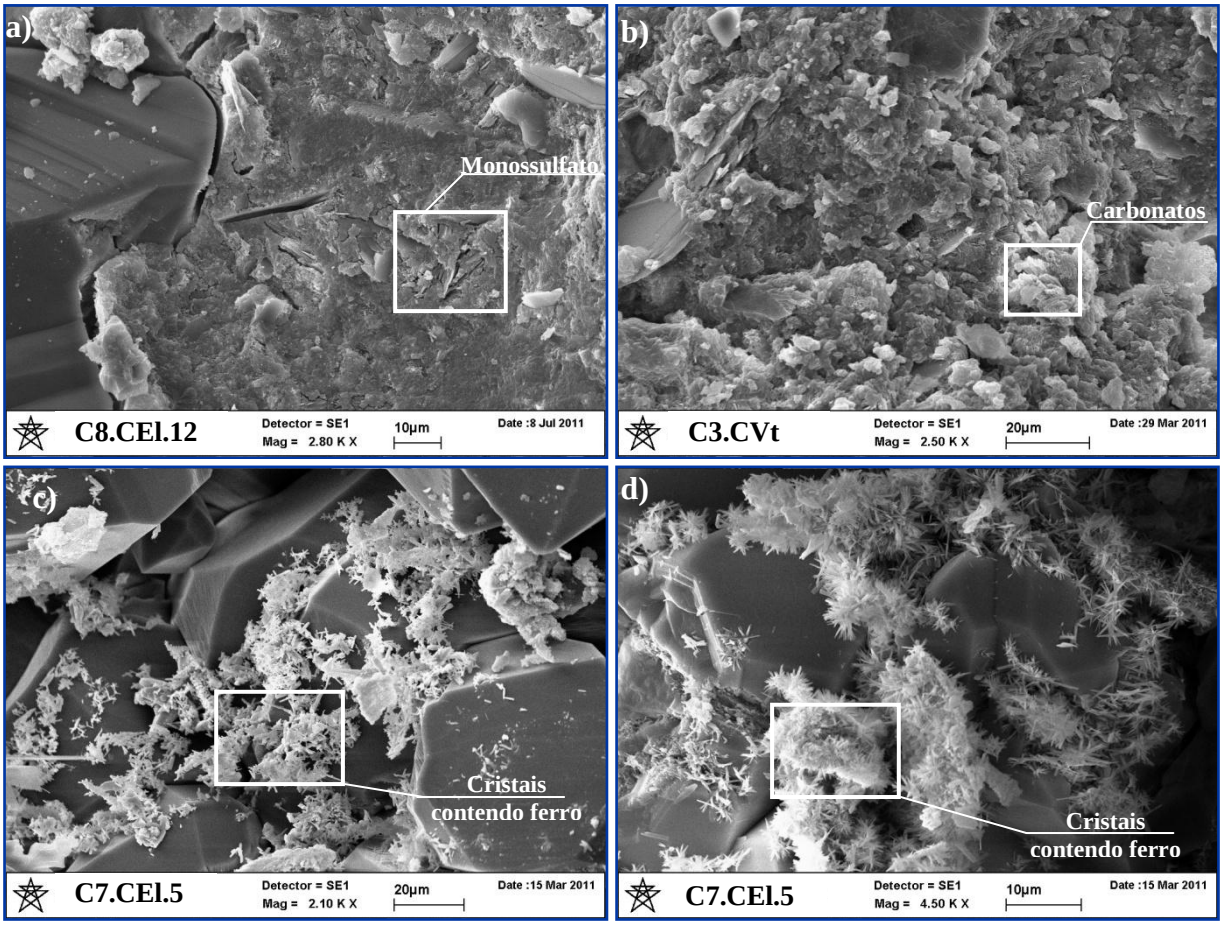


**Figura 5.55** - Micrografias dos concretos da UHE Corumbá: a) região localizada do concreto C8.CEl.12 com produtos sugestivos do monossulfato; b) microestrutura da pasta do concreto C3.CVt densa e alguns carbonatos à direita; c) e d) cristais contendo ferro sobre o agregado do concreto C7.CEl.5, indicando alteração mineralógica.




Conforme apresentado na Figura 5.55-c e d, identificou-se sobre a superfície de um dos agregados analisados, pertencente ao concreto C7.CEl.5, a presença sobre o agregado de cristais contendo ferro, indicando assim uma alteração mineralógica nele. Durante as inspeções visuais dos concretos da UHE Corumbá, não foram identificados indícios que sugerissem oxidação dos agregados. Portanto, provavelmente tais produtos observados podem estar associados às bordas cinza-escuras em torno dos agregados, indicando assim oxidação de minerais contendo ferro situados próximos à superfície do agregado, ou em decorrência da alteração de alguns minerais sulfetos presentes nos agregados, conforme identificações tidas por meio das análises mineralógicas em microscópico ótico de luz refletida.

Pelo exposto, verifica-se que não se visualizou a presença de fases sugestivas de ocorrência de patologias como a RAA ou ataque por sulfatos, indicando assim, em geral, a boa integridade microestrutural dos concretos extraídos da UHE Corumbá.

Com relação aos concretos da UHE Mascarenhas, em geral, têm-se algumas áreas com características microestruturais normais de serem encontradas em concreto, produtos de hidratação, além de poros vazios. Já em outras regiões, foram observados alguns agregados alterados, outros agregados fragmentados, e várias fases cristalizadas sulfatadas que estão associadas à etringita, estas depositadas principalmente nos poros.

Nesses concretos, também foi observada a existência de poros totalmente preenchidos por cristais de etringita, encontrando-se em alguns desses poros a presença localizada de fissuras radiais (Figura 5.56-b). Essas fissuras podem ser sugestivas de tensões na parede destes poros devido à formação de cristais de etringita (do tipo compacta). Caso essas fissuras tenham eventualmente sido originadas na preparação das amostras, pode-se depreender que tais regiões fissuradas tratavam-se de zonas já fragilizadas.

Além das fases sulfatadas visualizadas nos concretos da UHE Mascarenhas, observaram-se também alguns produtos sugestivos da instalação da RAA, ou mesmo em estágio inicial desta reação com o quartzo, na borda. Salienta-se que as imagens apresentadas dos produtos oriundos da RAA são típicas desta patologia conforme já relatado no meio técnico por pesquisadores como Hasparyk (1999, 2005).

A UHE Mascarenhas já possui relatos de manifestação da RAA. Além disto, durante as inspeções foi constatada a presença de gel exsudado desta reação sobre algumas das superfícies dos concretos, como no local onde se extraiu os testemunhos. Também foi detectada em regiões como na crista da barragem, a presença de fissuras mapeadas, típicas desta reação.

De qualquer forma, a incidência da RAA não pareceu tão expressiva nas amostras que foram analisadas. Portanto, naqueles poros onde foi verificado o material branco na inspeção visual, ele parece estar em sua maioria associado às neoformações citadas e especialmente às sulfatadas.

Apresentam-se nas Figuras 5.56 e 5.57 micrografias dos concretos da UHE Mascarenhas e na Figura 5.58 alguns espectros de produtos visualizados nas análises por MEV.

**Figura 5.56** – Micrografias dos concretos da UHE Mascarenhas: a) presença de etringita massiva no poro da argamassa do concreto C3.MTa; b) presença de etringita compacta em poro do concreto C3.MTa com fissuras radiais; c) presença de cristais de etringita preenchendo um poro do concreto C10.MTa; d) vista geral da argamassa do concreto C10.MTa apresentando vários poros vazios e preenchidos por cristais de etringita.

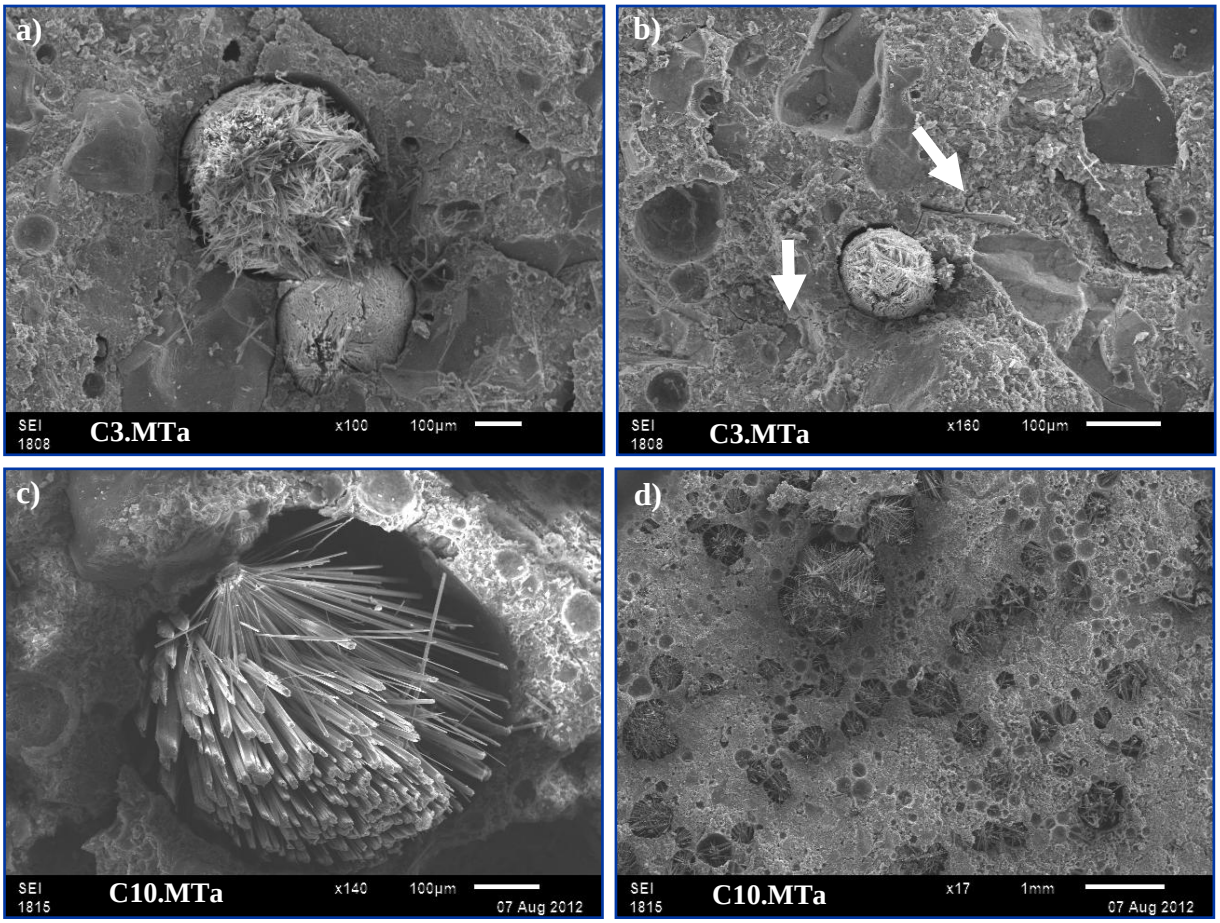
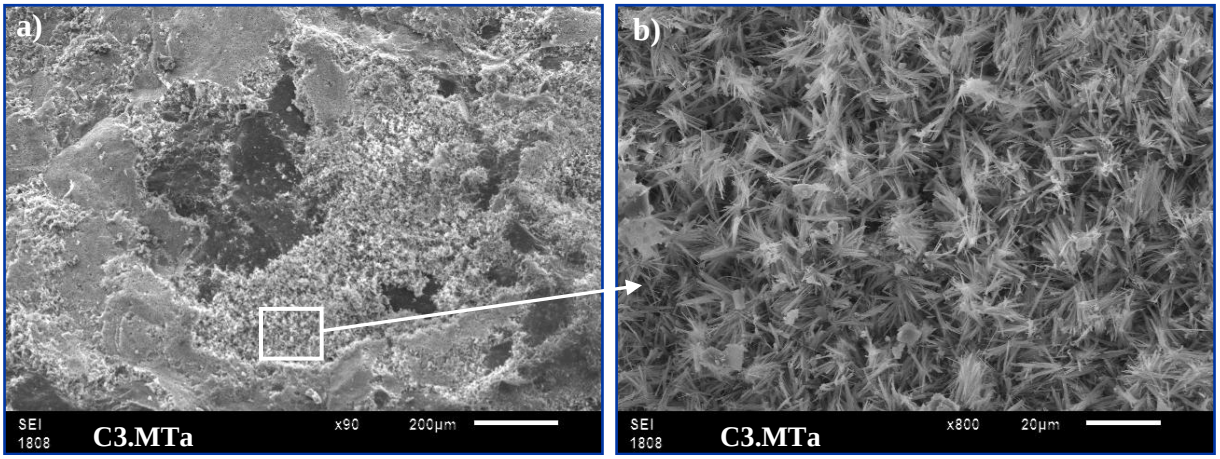



**Figura 5.57** - Micrografias dos concretos da UHE Mascarenhas: a) presença de produto da RAA sobre superfície de um agregado graúdo do concreto C3.MTa; b) ampliação localizada da micrografia 5.63-a, c) região do concreto C5.MTa com pulverulência localizada.




**c)**

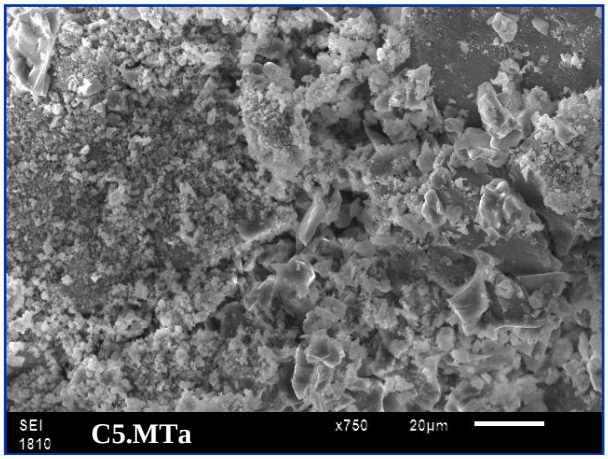
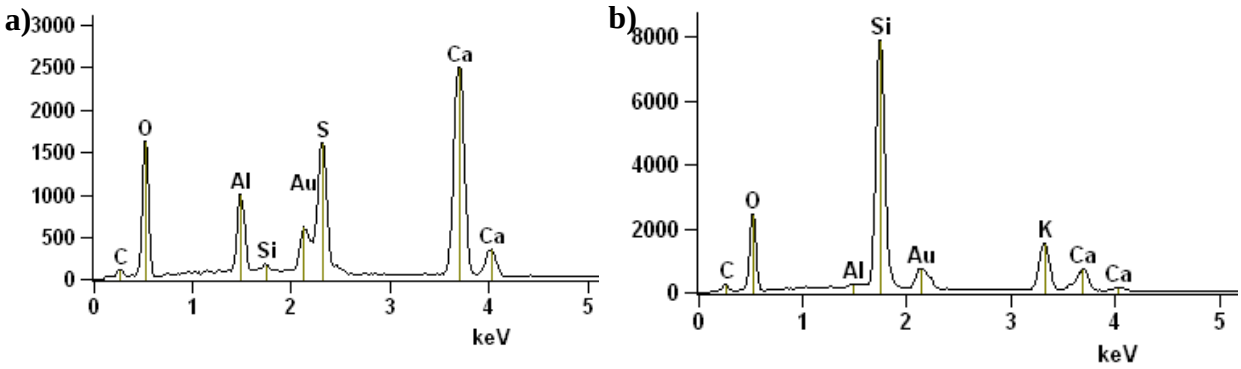



**Figura 5.58** – Espectros de produtos visualizados nos concretos da UHE Mascarenhas: a) espectro da etringita apresentada na Figura 5.56-a; b) espectro do produto sílico-cálcico alcalino da RAA apresentado na Figura 5.57-b.




Assim, pelo apresentado, constata-se a incidência de RAA e também da fase etringita que pode estar associada a um eventual ataque por sulfatos nos concretos da UHE Mascarenhas.

Pela morfologia e característica dos cristais detectados de etringita, acredita-se que se tratam de neoformações secundárias. Somando-se ao exposto, diante dos dados da composição química do cimento empregado, ele possui um teor médio de $C_3A$ da ordem de 11,5% e 1,6% de $SO_3$. Assim, conforme informações apresentadas por Matshei *et al.* (2007), para a relação gipsita/$C_3A$ abaixo de um (nesta situação a relação obtida é de 0,24), têm-se que as fases de monossulfato e aluminatos de cálcio hidratados são as mais estáveis neste sistema, ou seja, o sistema em questão não é propício à formação de etringita primária, podendo esta fase ter sido formada posteriormente.

Além do exposto, as neoformações com morfologia do tipo acícula são mais perceptíveis em poros da argamassa de maiores dimensões, conforme inspeção dos testemunhos de concreto. Somando-se a estes indícios, tem-se também que, caso as fissuras radiais tenham sido originadas em decorrência da pressão dos cristais de etringita, é alusivo de que tais

neoformações são secundárias, pois conforme destacado na literatura (ACI, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2008), existe mais de um tipo de etringita e nem todas são expansivas. Porém, havendo formação por uma reação no estado sólido, a etringita será mais expansiva do que aquela formada por uma solução.

Com relação aos concretos da UHE PA II, no geral, foram visualizadas algumas áreas com características microestruturais normais de serem encontradas em concreto, inclusive poros vazios. Porém há também a presença de cristais sílico-cálcico alcalinos e produtos amorfos característicos do gel da RAA. Estes produtos foram vistos tanto no concreto do testemunho C1.PAIITa quanto no concreto do testemunho C2.PAIITa, estando presentes em vários pontos das amostras, sejam depositados nos poros, sobre os agregados, na interface pasta-agregado, ou mesmo dispersos na pasta. Já em outras regiões, foi também observada, além de pulverulência localizada, a etringita, porém esta apenas no concreto C1.PAIITa. No concreto C5.PAIITa, não foram observadas fases sugestivas de ocorrência da RAA, nem de ataque por sulfatos. Porém por difração de raios X, constatou-se a presença de fases sulfatadas (gipsita e yelimita), mostrando assim que este concreto também possui indícios de manifestação de determinado ataque por sulfatos.

Relata-se que naqueles poros onde foi verificado o material branco na inspeção visual, ele sempre esteve associado às neoformações provenientes da RAA ou as fases de etringita.

São apresentadas, nas Figuras 5.59 e 5.60, as micrografias obtidas nas análises realizadas por MEV/EDS dos concretos da UHE PA II e na Figura 5.61 alguns espectros de produtos visualizados nas análises por MEV para esta usina.

**Figura 5.59** – Micrografias dos concretos da UHE PA II: a) presença de etringita massiva na pasta do concreto C1.PAIITa; b) acículas de etringita dentro de um poro do concreto C1.PAIITa acompanhado de fissuras radiais (setas); c) e d) presença localizada de pulverulência no concreto C2.PAIITa.

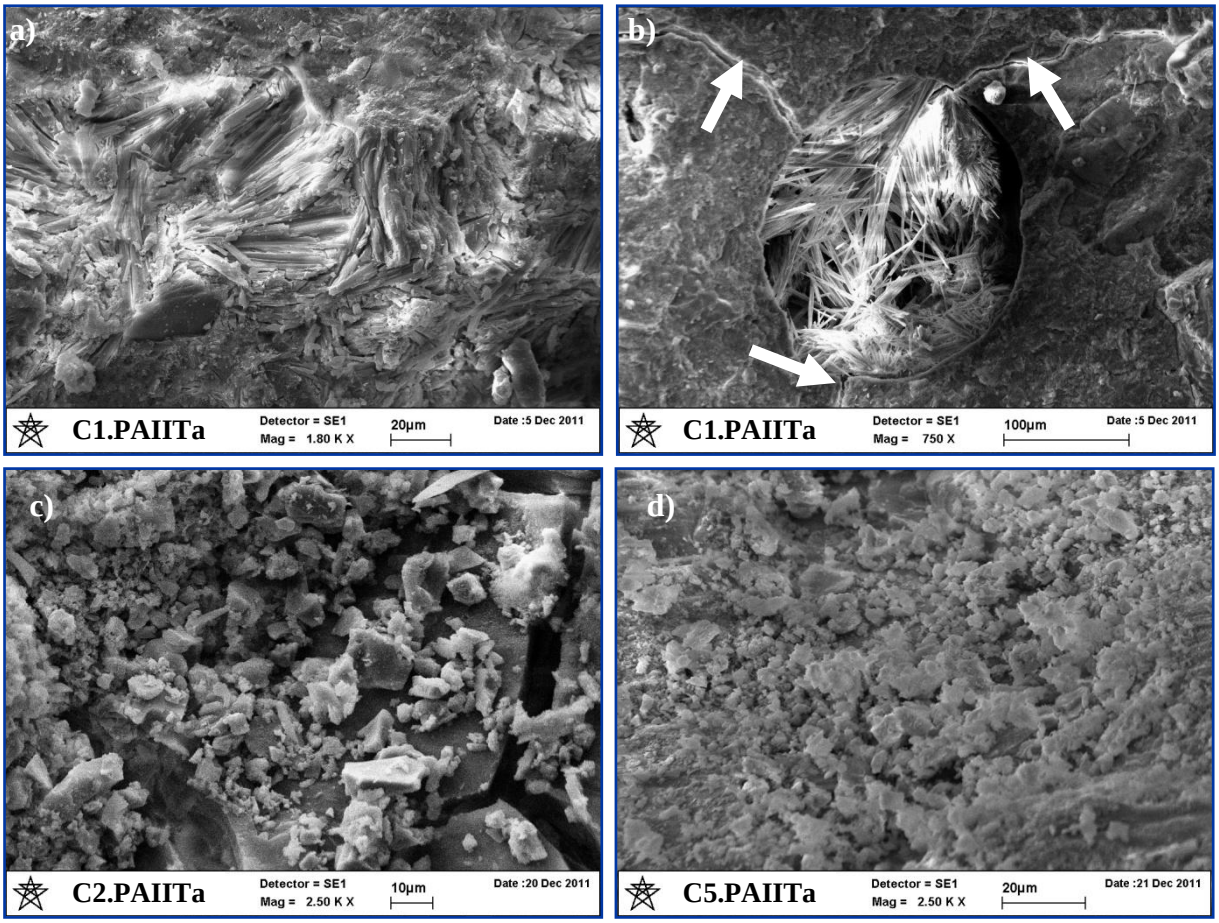
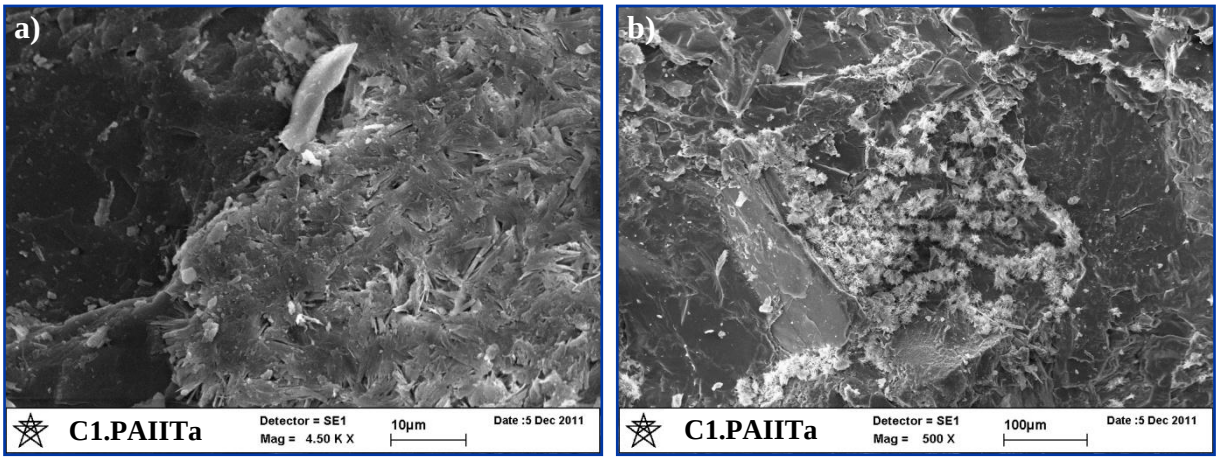



**Figura 5.60** - Micrografias dos concretos da UHE PA II: a), b) e c) presença de cristais da RAA na pasta da zona de transição com o agregado presentes no concreto C1.PAIITa; d) gel maciço gretado revestindo um poro do concreto C2.PAIITa; e) presença de produto rendado da RAA na zona de transição entre o agregado e a pasta, no concreto C2.PAIITa.



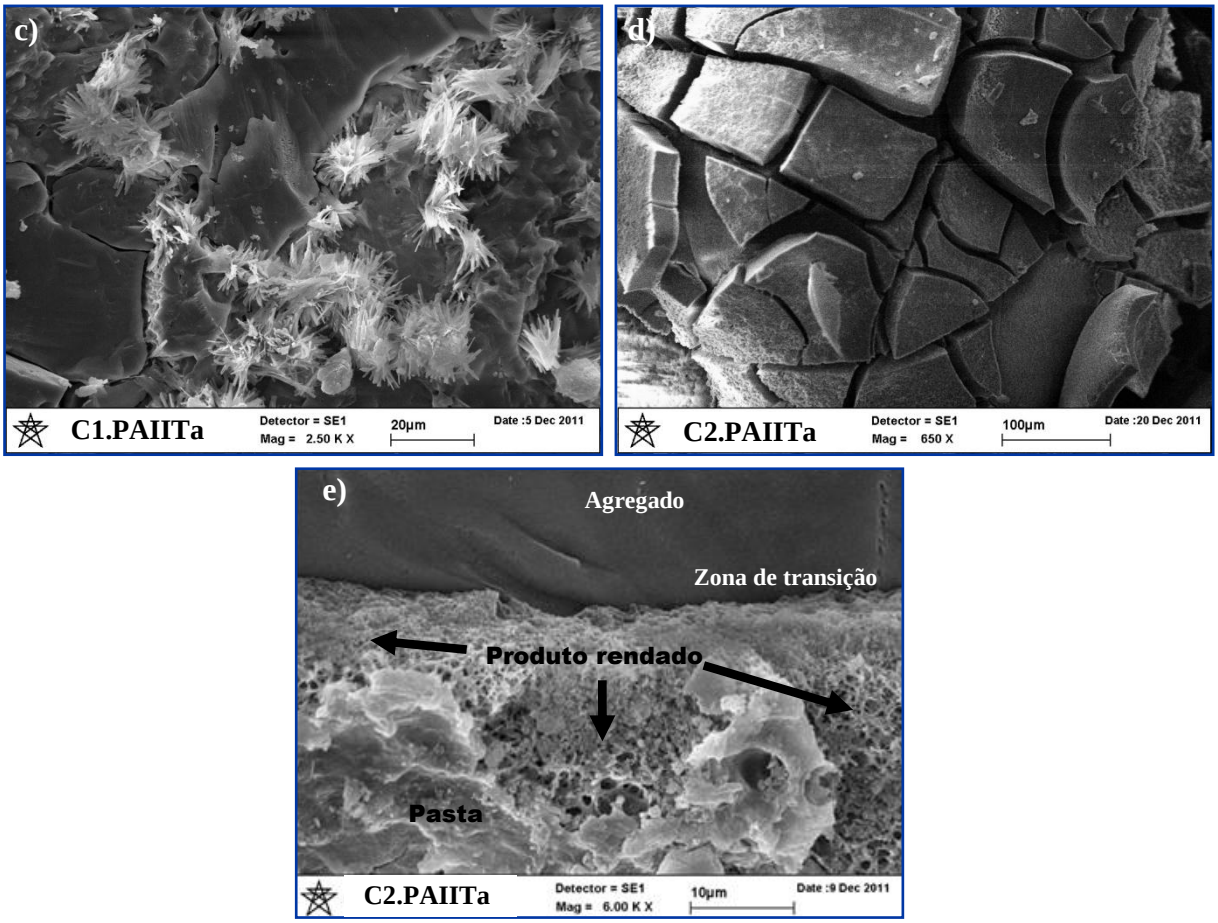
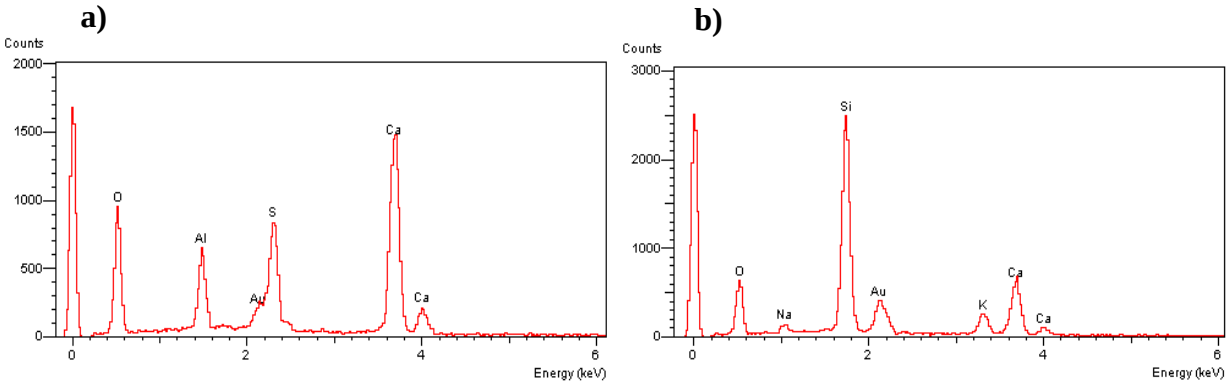



**Figura 5.61** – Espectros de produtos visualizados nos concretos da UHE PA II: a) espectro da etringita visualizada no concreto C1.PAIITa, na região da micrografia 5.59-a; b) espectro característico do produto rendado apresentado em 5.60-e.




Destaca-se também que foram observadas, porém de forma pontual, fissuras radiais ao poro preenchido por etringita (Figura 5.59-b), podendo estas terem surgido da mesma forma que mencionado anteriormente para Mascarenhas.

Na UHE PA IV, seja na tomada d'água ou no vertedor, e da mesma forma que para PA II, foram identificadas algumas áreas com características microestruturais normais, poros vazios, presença localizada de pulverulência, além de fases sulfatadas (típicas da etringita) e fases

indicativas da ocorrência da RAA. Apenas nos concretos C2.PAIVTa e C4.PAIVTa não foi visualizada a etringita, tendo nos demais concretos analisados identificadas essas duas neoformações, estando essas fases presentes em vários pontos das amostras, sejam depositados nos poros, sobre os agregados, na interface pasta-agregado, ou mesmo dispersos na pasta.

Apresentam-se nas Figuras 5.62 a 5.64 algumas micrografias obtidas por meio das análises realizadas por MEV/EDS dos concretos extraídos da UHE PA IV, e na Figura 5.65 alguns espectros de produtos visualizados nas análises por MEV para esta usina.

**Figura 5.62** - Micrografias dos concretos da UHE PA IV: a) presença de acículas de etringita em um poro (C6.PAIVVt); b) presença de acículas de etringita em um poro do concreto C1.PAIVTa; c) cristais de etringita depositados na pasta do concreto C9.PAIVVt; em zona de transição com o agregado; d) fissuras no concreto C10.PAIVVt com cristais de etringita próximo.

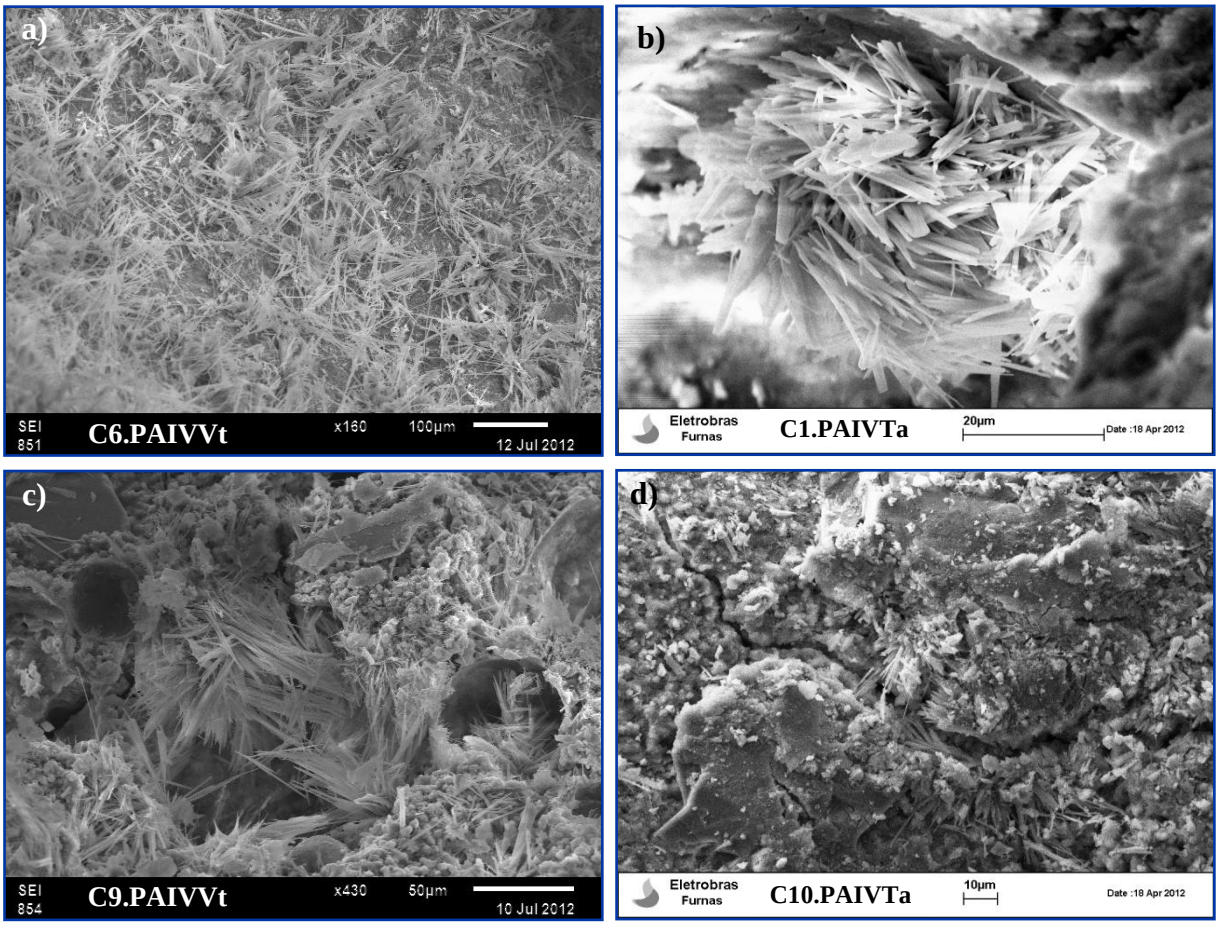


**Figura 5.63** - Micrografias dos concretos da UHE PA IV: a) rosáceas da RAA sobre um agregado do concreto C2.PAIVTa; b) rosáceas da RAA na pasta do concreto C2.PAIVTa; c) gel maciço gretado revestindo um poro do concreto C4.PAIVTa; d) gel maciço gretado revestindo um poro do concreto C9.PAIVVt; e) cristais de RAA na pasta do concreto C6.PAIVVt.

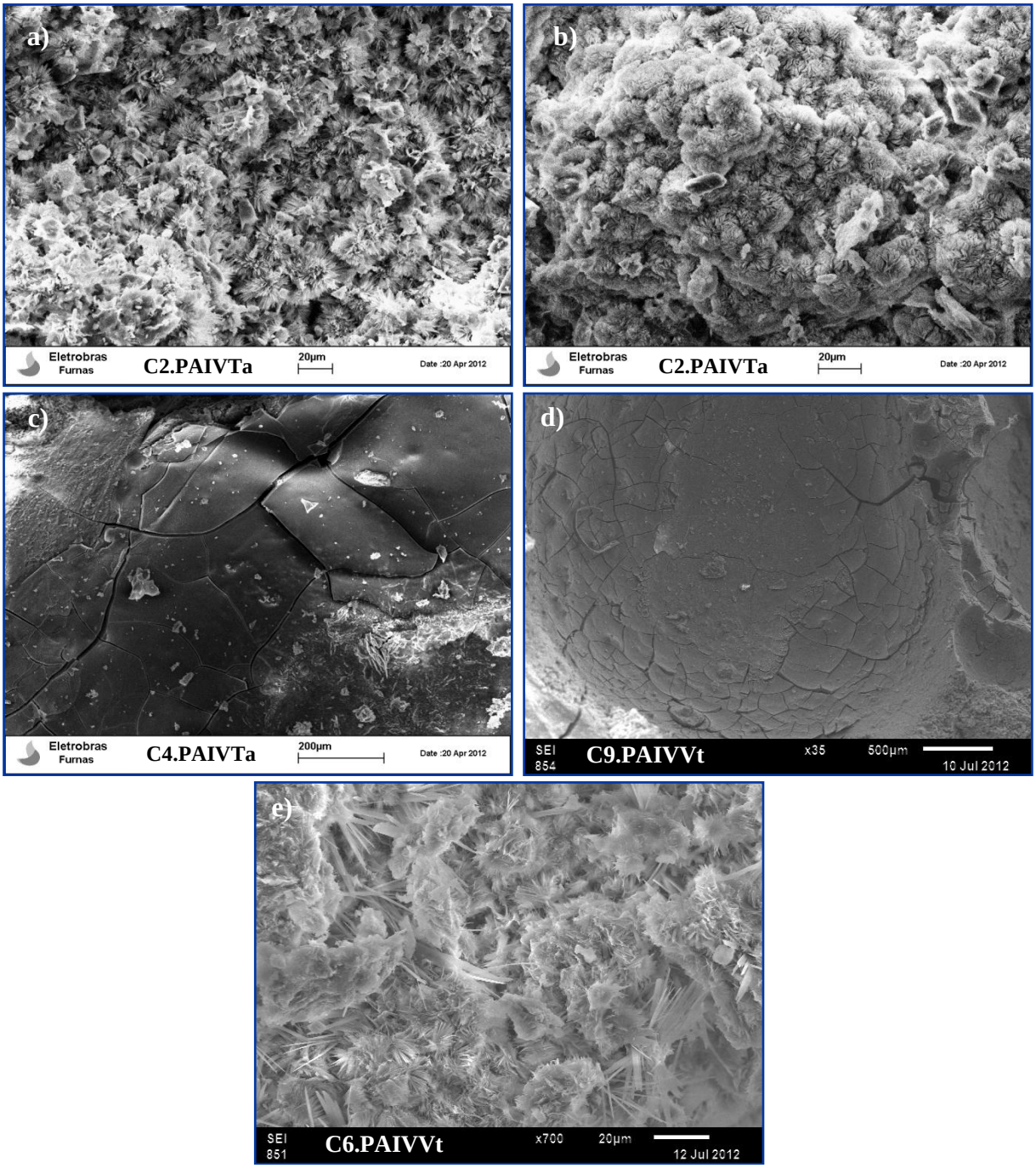


**Figura 5.64** - Micrografias dos concretos da UHE PA IV: a) pulverulência na pasta e sobre o agregado do concreto C1.PAIVTa; b) pulverulência na pasta do concreto C6.PAIVVt.

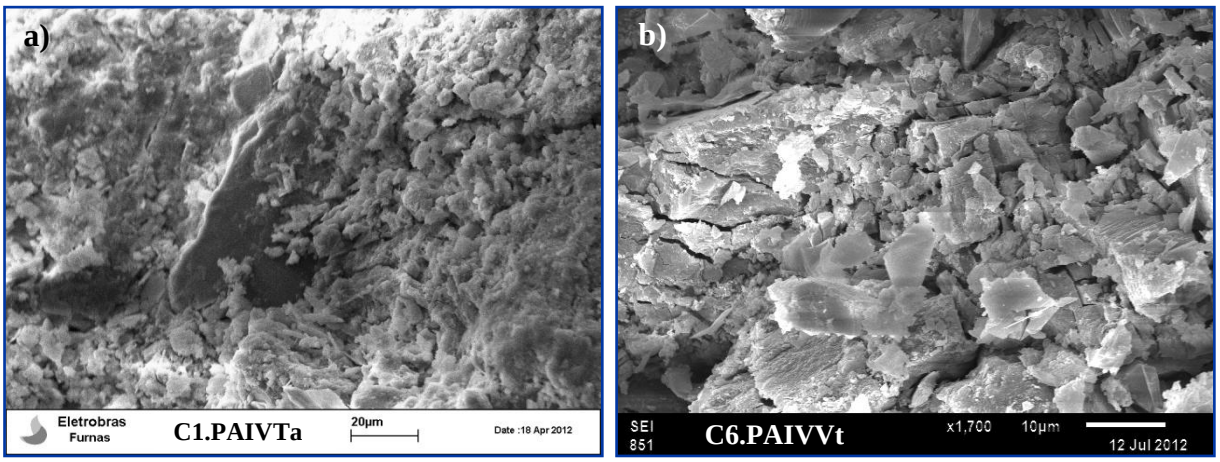
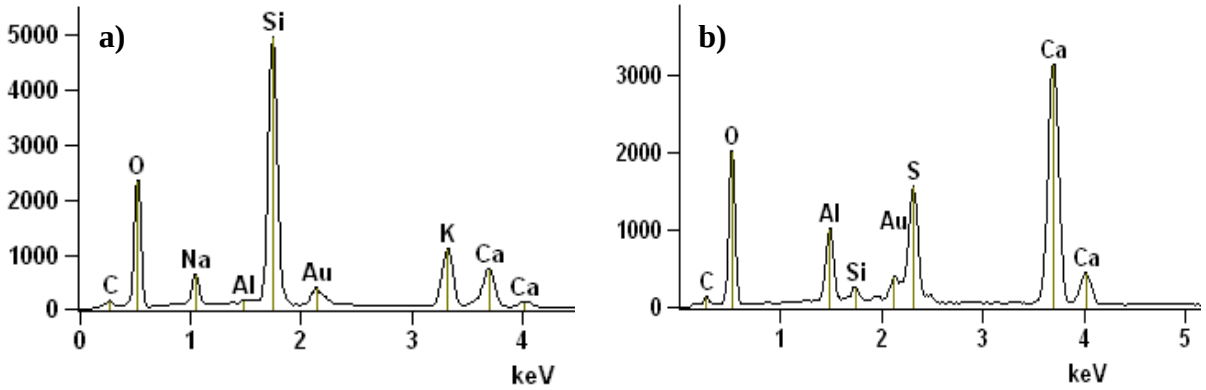



**Figura 5.65** – Espectros característicos das neoformações observadas nos concretos extraídos da UHE PA IV: a) material sílico-alcalino da RAA, b) etringita.




Com relação aos concretos extraídos da UHE Moxotó, também foram visualizadas áreas com características microestruturais normais de serem encontradas em concreto, inclusive com poros vazios. Já em outras regiões, foram observados produtos de alteração química representando várias fases cristalizadas sulfatadas típicas da etringita, além de cristais sílico-cálcico alcalinos e produtos amorfos como o gel, ambos característicos da RAA. Adicionalmente, foi verificado no concreto C1.MxGD um produto rico em sódio, sugestivo da trona (carbonato de sódio: $Na_3HCO_3CO_3 \cdot 2H_2O$). Essa fase indica excesso de álcalis no concreto.

Enfatiza-se que tanto as neoformações provenientes da RAA quanto as fases sulfatadas foram vistas em todos os testemunhos analisados da referida usina. Esses produtos encontravam-se presentes em vários pontos das amostras, sejam depositados nos poros, sobre os agregados, na interface pasta-agregado, ou mesmo dispersos na pasta. Nos poros onde foi verificado o

material branco na inspeção visual, ele sempre esteve associado às neoformações indicativas da RAA e ataque por sulfatos.

De forma semelhante, por meio das análises por difração de raios X também foram identificadas fases sulfatadas, porém não da etringita (esta que pode eventualmente estar abaixo do limite de detecção desta técnica), mas sim da gipsita nas argamassas dos três testemunhos de concreto analisados.

Encontram-se nas Figuras 5.66 a 5.69 algumas das micrografias e espectros obtidos pelas análises realizadas por MEV/EDS dos concretos extraídos da UHE Moxotó.

**Figura 5.66** – Micrografias dos concretos da UHE Moxotó: a) etringita comprimida preenchendo o poro com fissuras radiais no concreto C1.MxGD; b) alguns cristais conglomerados sugestivos de etringita e gel gretado da RAA no concreto C1.MxGD, acompanhado de fissuras.

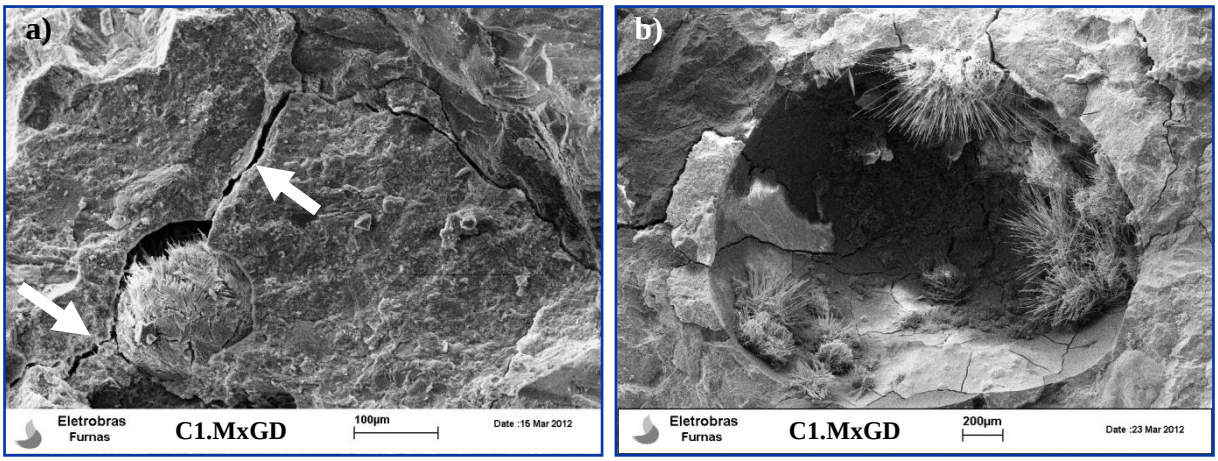


**Figura 5.67** – Micrografias dos concretos da UHE Moxotó: a) produto sugestivo da trona na borda de um poro (C1.MxGD); b) argamassa do concreto C1.MxGD totalmente fissurada; c) gel maciço gretado no poro (C3.MxGD); d) agregado no concreto (C3.MxGD) totalmente fragmentado; e) cristais da RAA depositados sobre o agregado do concreto C5.MxGD.

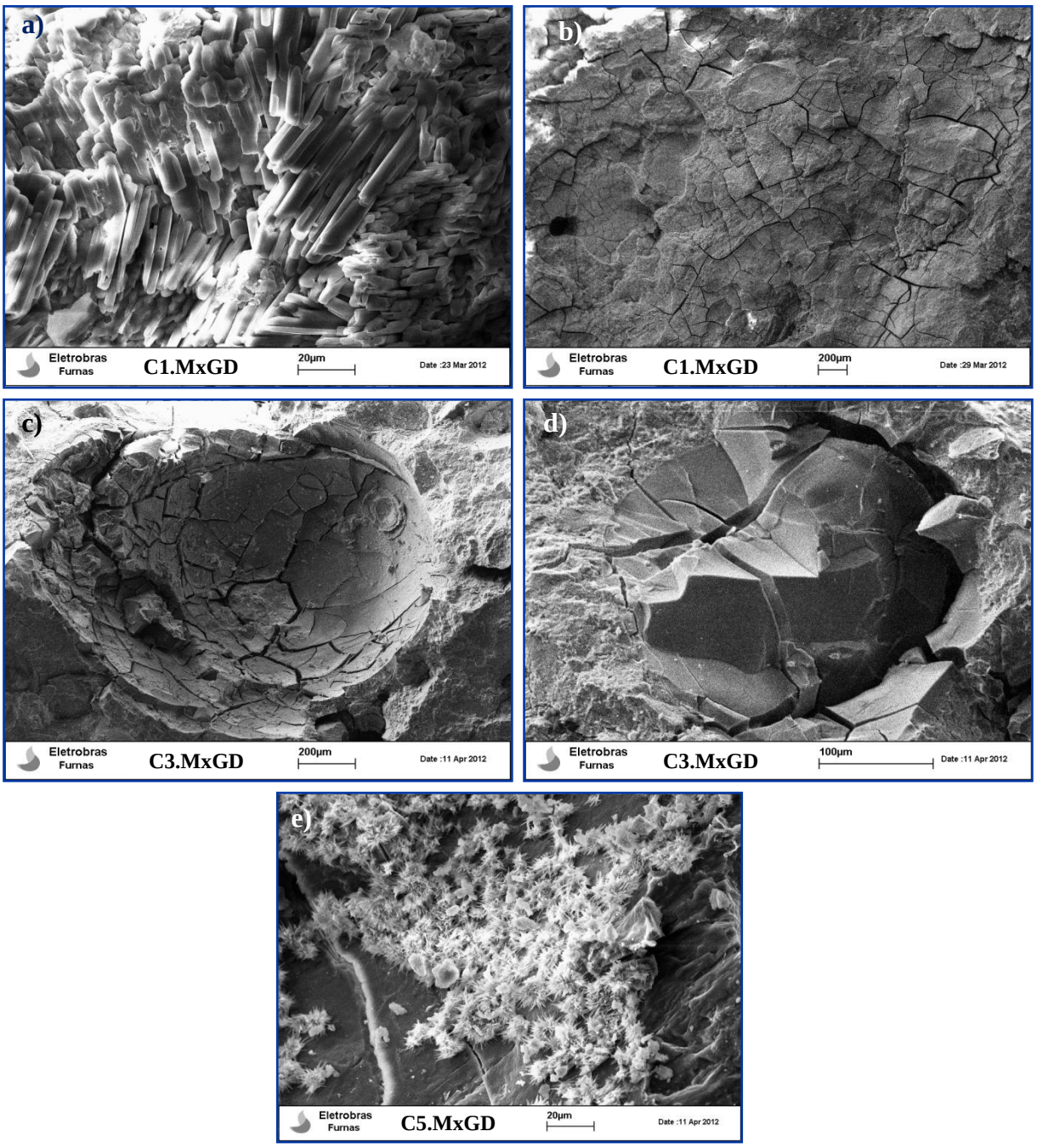


**Figura 5.68** – Micrografias e detalhes fotográficos de algumas amostras da UHE Moxotó: a) presença de gel na borda de um poro e rosáceas no seu interior, ambos da RAA; b) foto obtida durante inspeção visual do poro apresentado na micrografia da Figura 5.74-a; c) região do agregado com borda branca indicado gel maciço gretado; d) foto da borda do agregado da Figura 5.74-c.

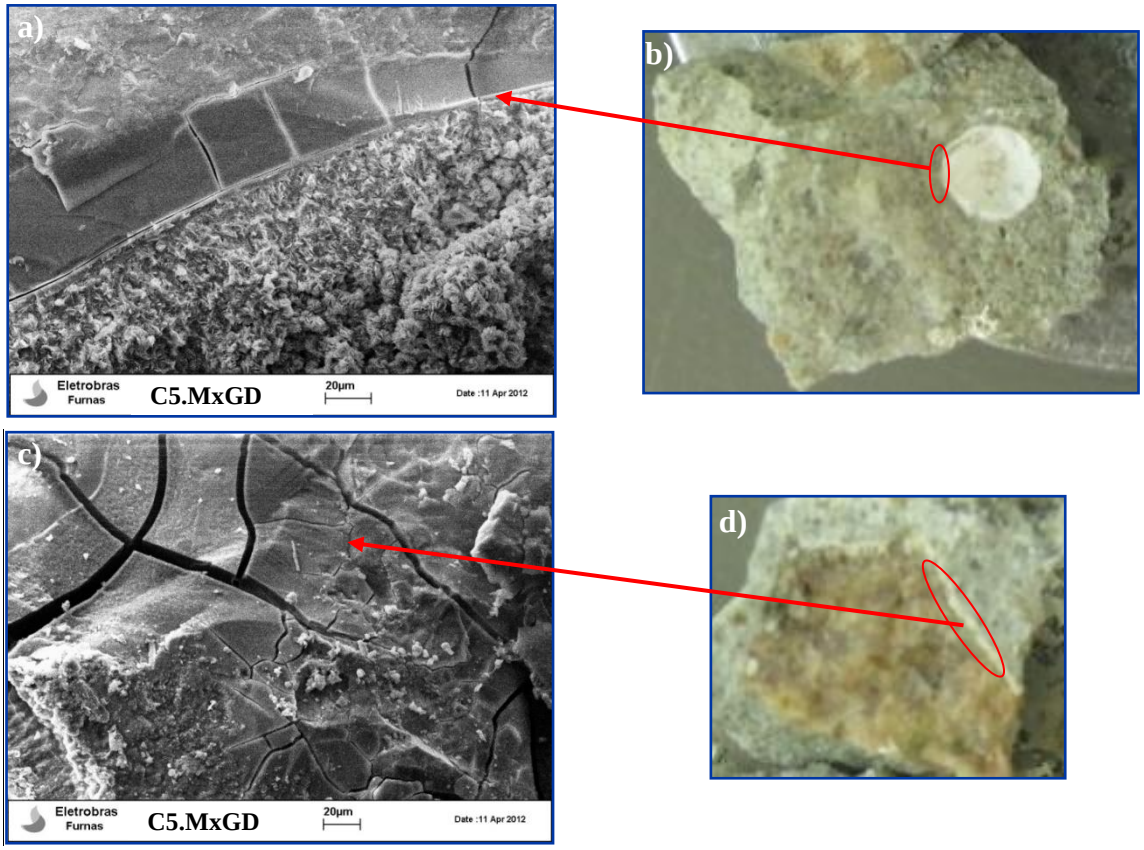
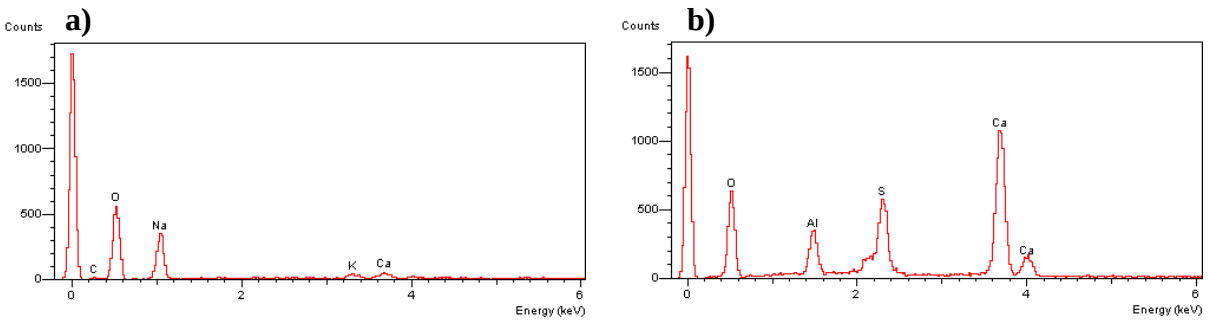
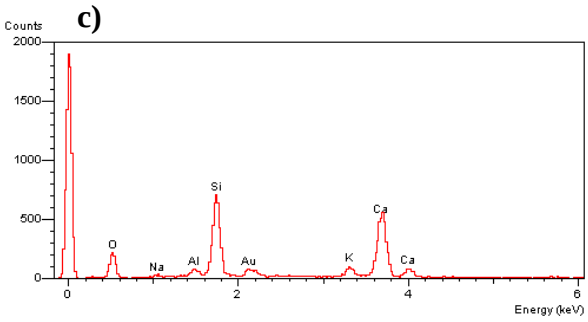



**Figura 5.69** – Espectros característicos das neoformações observadas nos concretos extraídos da UHE Moxotó: a) espectro sugestivo da trona apresentada na Figura 5.67-a; b) espectro da etringita apresentada na Figura 5.66-a; c) espectro característico de produto da RAA apresentada na Figura 5.67-c.






## 5.12 ANÁLISE DO POTENCIAL DE EXPANSÃO DOS CONCRETOS DEVIDO À OXIDAÇÃO DE MINERAIS SULFETOS PRESENTES NOS AGREGADOS

Apresentam-se na Tabela 5.31 os valores obtidos nos cálculos realizados para a obtenção da **potencial variação volumétrica primária**, tendo-se como consideração que todos os minerais sulfetos presentes nos agregados dos concretos se oxidarão e produzirão compostos como óxidos e hidróxidos de ferro. Destaca-se que para os agregados cuja porcentagem de sulfetos detectada na análise química foi zero, não tiveram cálculos de expansão realizados, em função de este ser nulo nesta condição.

Para simplificar os cálculos, considerou-se todo o conteúdo de sulfetos presente nos agregados referentes a cada concreto analisado como se eles fossem de apenas um tipo, adotando-se sempre o sulfeto identificado como principal nas análises por microscopia ótica de luz refletida. Assim, apenas Mascarenhas apresentou por esta técnica a pirita, tendo as demais usinas a pirrotita como prioritária. Entretanto, nas análises químicas a pirita não foi quantificada em Mascarenhas e nem a pirrotita em Moxotó, devendo estar próximas de zero, provavelmente em função do limite de detecção da análise química. Desta forma, não houve cálculo da expansão primária para os concretos dessas duas usinas.

**Tabela 5.31** – Valores obtidos para o cálculo da potencial expansão volumétrica primária dos concretos.

| Usina | Amostra | Massa de agregado em 1 m³ de concreto (kg) | % de pirrotita[1] no agregado | Massa de pirrotita em 1 m³ de concreto (kg) | Número de moles de pirrotita em 1 m³ de concreto | Incremento de volume pela total oxidação da pirrotita (cm³) | Expansão volumétrica primária no concreto (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Corum-bá | C7.CEl.5 | 1045 | 0,025 | 0,26 | 0,40 | 2,42 | 0,000 |
| | C8.CEl.12 | 1274 | 0,379 | 4,82 | 7,44 | 44,95 | 0,004 |
| PA II | C5.PAIITa | 1403 | 0,177 | 2,48 | 3,83 | 23,13 | 0,002 |
| PA IV | C1-PAIVTa | 1614 | 0,151 | 2,44 | 3,77 | 22,75 | 0,002 |
| | C2-PAIVTa | 1614 | 0,050 | 0,81 | 1,25 | 7,55 | 0,001 |
| | C4-PAIVTa | 1614 | 0,076 | 1,22 | 1,88 | 11,38 | 0,001 |
| | C6-PAIVVt | 1514 | 0,101 | 1,53 | 2,36 | 14,27 | 0,001 |
| | C9-PAIVVt | 1514 | 0,025 | 0,38 | 0,59 | 3,54 | 0,000 |
| | C10-PAIVVt | 1514 | 0,025 | 0,38 | 0,59 | 3,54 | 0,000 |

**Nota:** [1] – Valores calculados pela conversão estequiométrica do enxofre quantificado na forma de sulfetos nos agregados por meio da análise química gravimétrica para a forma de pirrotita ($Fe_7S_8$).

Os dados referentes à quantidade de moles de monossulfato (mono) presentes em um metro cúbico de concreto, considerando que apenas eles seriam formados durante a hidratação do cimento envolvendo as fases sulfatadas, podem ser visualizados na Tabela 5.32. Nessa Tabela também encontram-se os valores obtidos na quantificação do número de moles de íons sulfatos ($SO_4^{2-}$) que poderão ser disponibilizados, caso ocorra a completa alteração dos minerais sulfetos presentes na massa de agregados graúdos referentes a um metro cúbico de concreto. Neste cálculo, levaram-se em consideração as equações 4.1 e 4.2 apresentadas no programa experimental (item 4.11.1).

**Tabela 5.32 -** Quantidade de moles de monossulfato presentes em um metro cúbico de concreto e o número de moles de sulfatos liberados na oxidação dos sulfetos presentes nos agregados.

| Usina | Amostra | Massa estimada de cimento em 1 m³ de concreto | % de $SO_3$ no cimento | % de gipsita no cimento[1] | Número de moles de mono presente em 1 m³ de concreto | Número de moles de sulfatos liberados na oxidação dos sulfetos |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Corumbá | C7.CEl.5 | 270 | 2,50 | 5,38 | 84,43 | 3,21 |
| | C8.CEl.12 | 192 | 2,50 | 5,38 | 60,04 | 59,54 |
| PA II | C5.PAIITa | 239 | 2,20 | 4,73 | 65,77 | 30,63 |
| PA IV | C1-PAIVTa | 182 | 2,22 | 4,77 | 50,54 | 30,14 |
| | C2-PAIVTa | 182 | 2,22 | 4,77 | 50,54 | 10,01 |
| | C4-PAIVTa | 182 | 2,22 | 4,77 | 50,54 | 15,07 |
| | C6-PAIVVt | 190 | 2,22 | 4,77 | 52,76 | 18,90 |
| | C9-PAIVVt | 190 | 2,22 | 4,77 | 52,76 | 4,69 |
| | C10-PAIVVt | 190 | 2,22 | 4,77 | 52,76 | 4,69 |

**Nota:** [1] – Valores de gipsita calculados com base no teor médio de $SO_3$ indicado na tabela, quantificado por análise química do cimento na época da construção das obras, conforme dados obtidos no levantamento de informações técnicas de cada usina.

Comparando os valores apresentados na Tabela 5.32 verifica-se que conforme sistemática de cálculo adotada, a quantidade de moles de monossulfatos presentes em todos os concretos analisados é superior ao número de moles disponibilizados pela completa oxidação de todo o conteúdo de minerais sulfetos presentes nos concretos. Desta forma, o cálculo da **potencial expansão volumétrica secundária** será conduzido pela reação apresentada na equação 4.3. Ou seja, considerando que todo o conteúdo de enxofre do cimento originou monossulfato e que este irá reagir com os íons sulfatos adicionais disponibilizados na oxidação dos sulfetos formando a etringita secundária.

Os valores obtidos nos cálculos com relação à **potencial expansão volumétrica secundária** do concreto, promovida pela oxidação dos sulfetos e tendo como consideração o exposto no parágrafo supracitado podem ser visualizados na Tabela 5.33.

**Tabela 5.33** – Valores obtidos no cálculo da potencial expansão volumétrica secundária do concreto devido à oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados.

| Usina | Amostra | Massa de cimento em 1 m³ de concreto | Número de moles de sulfatos liberados pela oxidação dos minerais sulfetos[1] | Variação de volume devido à formação de etringita secundária (cm³)[2] | Expansão volumétrica secundária no concreto (%)[3] |
|---|---|---|---|---|---|
| Corumbá | C1.CTa | 240 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C3.CVt | 238 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C7.CEl.5 | 270 | 3,21 | 398,23 | 0,04 |
| | C8.CEl.12 | 192 | 59,54 | 7382,54 | 0,74 |
| PA II | C1.PAIITa | 239 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C2.PAIITa | 239 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C5.PAIITa | 239 | 30,63 | 3798,49 | 0,38 |
| PA IV | C1-PAIVTa | 182 | 30,14 | 3737,22 | 0,37 |
| | C2-PAIVTa | 182 | 10,01 | 1240,63 | 0,12 |
| | C4-PAIVTa | 182 | 15,07 | 1868,61 | 0,19 |
| | C6-PAIVVt | 190 | 18,90 | 2343,42 | 0,23 |
| | C9-PAIVVt | 190 | 4,69 | 582,03 | 0,06 |
| | C10-PAIVVt | 190 | 4,69 | 582,03 | 0,06 |

**Nota:** [1] – Considera-se que dois moles de sulfato ($SO_4^{2-}$) liberados reagirão com um mol de monossulfato dando origem a um mol de etringita secundária, conforme Casanova *et al.* (1996) Sarkar *et al.* (2010) e Santa *et al.* (2011); [2] – Variação de volume considerando que cada mol de etringita secundária formado produzirá um incremento de volume de 248 cm³; [3] – relação, em porcentagem, entre a variação de volume devido a formação da etringita e o volume inicial, que corresponde a 1 m³.

São apresentados na Tabela 5.34 os valores de expansão volumétrica total passível de ocorrer no concreto em função da oxidação de minerais sulfetos presentes nos concretos. Ressalta-se que a expansão total potencial refere-se à soma das denominadas **expansão volumétrica primária e secundária**.

**Tabela 5.34** - Expansão volumétrica potencial total no concreto devido à oxidação dos minerais sulfetos e formação de etringita secundária.

| Usina | Amostra | Expansão volumétrica total no concreto (%) |
|---|---|---|
| Corumbá | C7.CEl.5 | 0,04 |
| | C8.CEl.12 | 0,74 |
| PA II | C5.PAIITa | 0,38 |
| PA IV | C1-PAIVTa | 0,38 |
| | C2-PAIVTa | 0,12 |
| | C4-PAIVTa | 0,19 |
| | C6-PAIVVt | 0,24 |
| | C9-PAIVVt | 0,06 |
| | C10-PAIVVt | 0,06 |

Pelos valores apresentados na Tabela 5.34 verifica-se que o concreto que possui maior potencial para expansão é o C8.CEl.12, cuja expansão total calculada foi de 0,74%.

Em função da não quantificação de enxofre na forma de sulfetos nos agregados extraídos dos testemunhos de concreto das UHEs Mascarenhas e Moxotó, as expansões calculadas para esses concretos é zero, conforme já esperado.

Os valores de expansão apresentados na Tabela 5.34 referem-se à acepção adotada de que os moles de íons sulfato liberados pela oxidação dos minerais sulfetos presentes nos agregados reagirão com o possível monossulfato presente na pasta de cimento formando etringita secundária. Entretanto, conforme apresentado por autores como Casanova *et al.* (1996) os íons sulfato liberados também podem interagir com os produtos de hidratação do cimento Portland formando fases sulfatadas como a gipsita, monossulfato além da etringita secundária, sendo estes em decorrência da interação entre os íons sulfato e as fases de alumina e portlandita.

De forma comparativa, apresentam-se na Tabela 5.35 os valores de expansão volumétrica interna do concreto, levando-se em consideração que os íons sulfato liberados na oxidação dos minerais sulfetos presentes nos agregados irão interagir com as fases de alumina e portlandita presentes na pasta cimentícia formando gipsita, monossulfato ou etringita secundária.

**Tabela 5.35** - Expansão total volumétrica no concreto devido à oxidação dos minerais sulfetos e posterior formação de gipsita, monossulfato ou etringita secundária.

| Usina | Amostra | Expansão volumétrica total no concreto devido à formação de - (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Gipsita | Monossulfato | Etringita secundária |
| Corumbá | C7.CEl.5 | 0,01 | 0,06 | 0,02 |
| | C8.CEl.12 | 0,25 | 1,09 | 0,35 |
| PA II | C5.PAIITa | 0,13 | 0,56 | 0,18 |
| PA IV | C1-PAIVTa | 0,13 | 0,55 | 0,18 |
| | C2-PAIVTa | 0,04 | 0,18 | 0,06 |
| | C4-PAIVTa | 0,06 | 0,28 | 0,09 |
| | C6-PAIVVt | 0,08 | 0,35 | 0,11 |
| | C9-PAIVVt | 0,02 | 0,09 | 0,03 |
| | C10-PAIVVt | 0,02 | 0,09 | 0,03 |

**Nota:** Conforme apresentado por Casanova *et al.* (1996) a variação volumétrica resultante da formação molar da gipsita é de 41,63 cm³, para o monossulfato é de 182,89 cm³ e para a etringita é de 172,19 cm³.

Pelos valores apresentados nas Tabelas 5.34 e 5.35 percebe-se que a situação mais desfavorável no ataque por sulfatos desencadeado pela oxidação de minerais sulfetos com relação à expansão do concreto refere-se à formação da fase sulfatada de monossulfato

promovida pela interação entre os íons sulfato liberados e as fases de alumina e portlandita presentes na presentes na pasta de cimento.

Apesar de parecer contraditório, tal fato se explica pela estequiometria das reações, conforme pode ser observado nas Equações de 4.4 a 4.6, apresentadas no capítulo 4 deste trabalho. Na formação de etringita secundária, conforme Equação 4.4, na reação entre íons sulfato com o monossulfato são necessários dois moles de sulfato para a formação de um mol de etringita secundária; assim, apesar da variação volumétrica na formação molar desta etringita ser maior (aproximadamente 248 $cm^3$), na reação que conduz à formação de monossulfato, segundo equação 4.5, é necessário apenas um mol de sulfato para formação do monossulfato, cuja variação volumétrica molar é da ordem de 182,89 $cm^3$, desta forma, no caso da reação promovida por dois moles de sulfatos, haverá uma variação volumétrica de 367,78 $cm^3$ (formação de dois moles de monossulfato), que é superior a primeira situação mencionada (formação de um mol de etringita).

Apesar de os valores apresentados nas Tabelas 5.34 e 5.35 parecerem baixos, pois a maior expansão observada dentre todas as situações é a do concreto C8.CEl.12, na consideração da formação de monossulfato, onde se obteve o valor de 1,09%, cita-se, de forma comparativa, o limite preconizado pelo método de ensaio número 66 do *Laboratoire Central dês Ponts et Chaussées* (LCPC, 2007) com relação a formação de etringita tardia (DEF), onde se estabelece o limite para a deformação longitudinal (expansão linear) média das faces de um prisma de concreto padrão em 0,04%, que é o mesmo já praticado para o ensaio de expansão em concreto devido à RAA, segundo as diretrizes da NBR 15577 (ABNT, 2008).

De forma a comparar os resultados obtidos para a variação volumétrica total calculada de acordo com o modelo simplificado apresentado, cita-se o trabalho de Bouzabata *et al*. (2012) que diante de seus experimentos em prismas de concreto e cálculos, consideraram a expansão causada pela DEF como isotrópica, ou seja, expandindo igualmente em todas as direções da estrutura.

Assim, de forma a simplificar os cálculos, e considerando-se que a expansão volumétrica total seja distribuída isotropicamente para unidade considerada de um metro cúbico de concreto, transforma-se essa variação volumétrica obtida em deformação longitudinal média para comparar com o limite proposto pelo LCPC (2007) de 0,04%. Os valores obtidos para a

deformação longitudinal do concreto devido à variação volumétrica total calculada podem ser visualizados na Tabela 5.36, apresentada na sequência.

**Tabela 5.36** – Deformação longitudinal dos concretos.

| Usina | Amostra | Deformação longitudinal no concreto devido à formação de - (%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Etringita formada pela reação com monossulfato[1] | Etringita formada pela reação com aluminatos e portlandita[2] | Gipsita | Monossulfato |
| Corumbá | C7.CEl.5 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 |
| | C8.CEl.12 | **0,25** | **0,12** | **0,08** | **0,36** |
| PA II | C5.PAIITa | **0,13** | **0,06** | **0,04** | **0,19** |
| PA IV | C1-PAIVTa | **0,13** | **0,06** | **0,04** | **0,18** |
| | C2-PAIVTa | **0,04** | 0,02 | 0,01 | **0,06** |
| | C4-PAIVTa | **0,06** | 0,03 | 0,02 | **0,09** |
| | C6-PAIVVt | **0,08** | **0,04** | 0,03 | **0,12** |
| | C9-PAIVVt | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 |
| | C10-PAIVVt | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 |

**Nota:** [1] – Deformação longitudinal calculada de acordo com a expansão apresentada na Tabela 5.34; [2] – Deformação longitudinal calculada de acordo com a expansão apresentada na Tabela 5.35.

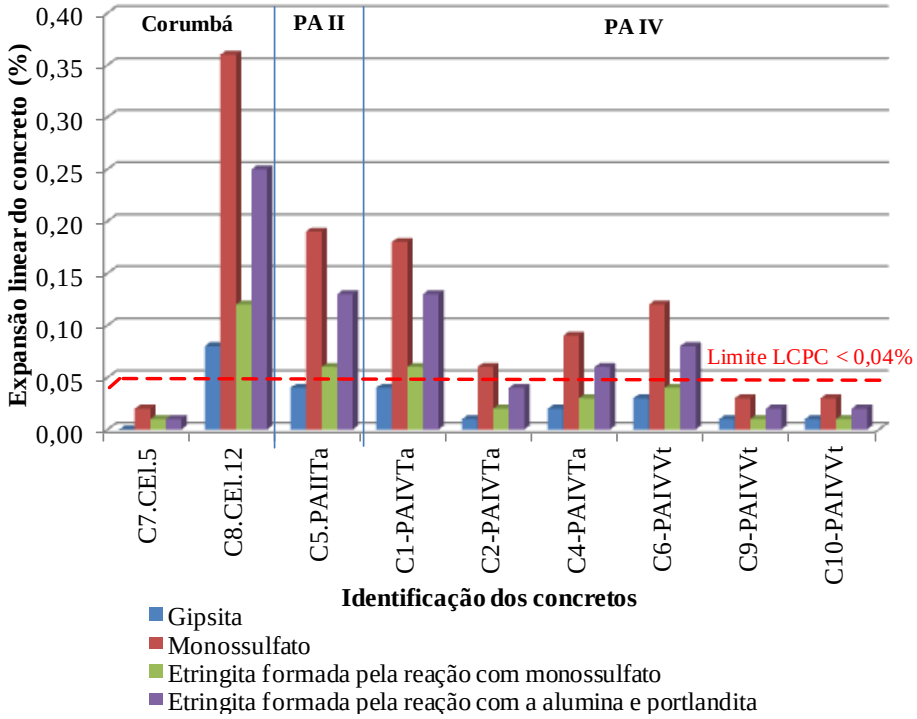
Conforme pode ser observado na Tabela 5.36 a maior deformação longitudinal observada foi a do concreto C8.CEl.12, na consideração da formação de monossulfato, onde se obteve o valor de 0,36% (que corresponde a uma variação volumétrica 1,09%).

Conforme destacado por alguns pesquisadores (POMMERSHEIM; CLIFTON, 1994; CASANOVA *et al.* 1996; RIMSTIDT *et al*., 2003; SARKAR *et al*., 2009; OLIVEIRA, 2011; MOURA, 2012; GAO *et al*., 2013), as neoformações oriundas do ataque por sulfatos podem se acomodar em regiões como vazios, fissuras ou poros existentes no concreto, colmatando-os. Em virtude disto, os modelos de previsão da expansão interna do concreto levam em consideração parâmetros relacionados com a microestrutura do concreto e os mecanismos difusionais que envolvem o sistema em análise. Desta forma, as expansões geradas são amortizadas e dependentes destas características dos concretos.

Apesar do exposto, diante dos resultados obtidos percebe-se que embora os teores de minerais sulfetos serem aparentemente baixos, estes podem efetivamente serem capazes de produzir efeitos colaterais aos concretos, caso eles se alterem. Verifica-se que para a condição mais desfavorável, dos dezenove concretos estudados (selecionados para ensaios microestruturais), seis deles suplantariam o limite de expansão preconizado pelo LCPC (2007), se não houvesse a amortização dos efeitos expansivos causados pela oxidação dos minerais sulfetos.

Apresentam-se na Figura 5.70, de forma gráfica, as potenciais deformações longitudinais (ou expansões lineares) dos concretos promovidas pela variação volumétrica total calculada para as condições relatadas.

**Figura 5.70** – Potencial expansão linear dos concretos devido à oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados.




Diante dos dados apresentados percebe-se, por exemplo, que um teor de 0,15% de enxofre na forma de sulfetos do tipo pirrotita, como ocorreu para o concreto C8.CEl.12, pode conduzir a expansões volumétricas acima de 0,7%. Estas expansões podem proporcionar ao concreto deformações longitudinais próximas de 0,4%, demonstrando assim o grande potencial deletério de minerais sulfetos quando presentes em agregados de concreto.

Verifica-se que dentre os dezenove concretos analisados, seis deles possuíam agregados com teores de minerais sulfetos suficientes para conduzir expansões que suplantam os limites de deformação longitudinal preconizado para o ensaio de DEF exposto pelo LCPC (2007). Observa-se que nas três usinas em que foram quantificados teores de enxofre na forma de sulfetos nos agregados, pelo menos um dos concretos de cada usina extrapolou o limite mencionado.

## 5.13 ANÁLISE DA POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DEF

Tendo sido observadas fases sulfatadas em determinados concretos durante o programa experimental, conforme exposto anteriormente, e para auxiliar no estudo da fonte dos íons sulfato que as originaram, realizou-se um estudo complementar para avaliar a possibilidade de ocorrência de DEF.

Conforme sistemática adotada com objetivo de diagnosticar e investigar este tipo de problema, e suas possíveis causas, observado em blocos de fundação de edificação no Brasil, os pesquisadores Hasparyk *et al*. (2012b) realizaram cálculos estimativos da elevação adiabática de temperatura do concreto com base nos consumos de cimento obtidos por reconstituição de traço (referência adotada para a elevação adiabática pelos pesquisadores: 0,12°C/kg/m³). Pelo exposto, e tendo como embasamento inicial a referência citada, realizou-se procedimento semelhante para inferir sobre a possibilidade dos concretos analisados terem sofrido grandes elevações de temperatura, em decorrência do calor de hidratação liberado pelo cimento, que eventualmente pudessem indicar a possibilidade de ocorrência de DEF.

Conforme apresentado em Furnas (1997), a elevação adiabática da temperatura do concreto é diretamente proporcional ao consumo de cimento do concreto, podendo ser expressa através do coeficiente de elevação adiabática. Assim, a partir de um levantamento de dados na referência citada, e relacionando-os com as características disponíveis dos concretos estudados nesta pesquisa, foi possível obter, de forma aproximada, por meio da interpolação de alguns dos valores apresentados na referida bibliografia, um valor de coeficiente de elevação adiabática para cada concreto em estudo.

Adicionalmente, com base na análise de informações disponibilizadas no banco de dados climatológicos do Brasil (EMBRAPA, 2013), tomando-se como embasamento os valores das medianas anuais e mensais obtidas para cada estado em que se localizam as usinas estudadas, adotou-se, para fins didáticos a temperatura média estimada do ambiente dos municípios mais próximos aos empreendimentos em estudo, dos dados disponíveis das leituras realizadas entre o período 1961 a 1990, tendo-se como base os valores médios anuais e a temperatura mínima e a máxima mensal, fazendo referência a elas como sendo a provável temperatura do ambiente quando do lançamento dos concretos.

De acordo como o exposto, apresenta-se na Tabela 5.37 o cálculo da elevação adiabática estimada dos concretos analisados nesta pesquisa. E na Tabela 5.38 têm-se os valores obtidos

para o cálculo estimativo das temperaturas atingidas pelos concretos analisados em função da temperatura do ambiente levantada e da provável elevação de temperatura promovida pelo calor de hidratação liberado pelo cimento.

**Tabela 5.37** – Cálculo da elevação adiabática estimada dos concretos analisados.

| Usina | Estrutura | Traço do concreto (1:m) | Consumo de cimento (kg/m³) | Coeficiente de elevação adiabática estimado (ºC/kg/m³) | Elevação adiabática estimada (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| Corumbá | Ta | 1 : 8,7 | 236 | 0,13 | 30,7 |
| | Vt | 1 : 1:9,5 | 216 | | 28,1 |
| | El.5 | 1 : 7,8 | 261 | | 34,0 |
| | El.12 | 1 : 11,0 | 190 | | 24,7 |
| Mascarenhas | Ta-B.19 | 1 : 9,9 | 186 | 0,14 | 26,0 |
| | Ta-B.18 | 1 : 9,4 | 193 | | 27,0 |
| PA II | Ta | 1 : 7,3 | 239 | 0,14 | 33,5 |
| PA IV | Ta | 1 : 10,6 | 182 | 0,13 | 23,7 |
| | Vt | 1 : 10,0 | 190 | | 24,7 |
| Moxotó | GD | 1 : 5,3 | 360 | 0,15 | 54,0 |

**Tabela 5.38** – Cálculo estimativo das temperaturas atingidas pelos concretos analisados em função da temperatura do ambiente e da temperatura na hidratação.

| Usina | Estru-tura | Temperatura do ambiente (°C) | | | Provável temperatura atingida pelo concreto (°C) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Média | Mínima | Máxima | Média | Mínima | Máxima |
| Corumbá | Ta | 23,2 | 20,8 | 24,6 | 53,9 | 51,5 | 55,3 |
| | Vt | 23,2 | 20,8 | 24,6 | 51,3 | 48,9 | 52,7 |
| | El.5 | 23,2 | 20,8 | 24,6 | 57,2 | 54,8 | 58,6 |
| | El.12 | 23,2 | 20,8 | 24,6 | 47,9 | 45,5 | 49,3 |
| Mascarenhas | Ta-B.19 | 22,4 | 19,2 | 24,4 | 48,4 | 45,2 | 50,4 |
| | Ta-B.18 | 22,4 | 19,2 | 24,4 | 49,4 | 46,2 | 51,4 |
| PA II | Ta | 25,7 | 23,0 | 27,7 | 59,2 | 56,5 | **61,2** |
| PA IV | Ta | 25,7 | 23,0 | 27,7 | 49,4 | 46,7 | 51,4 |
| | Vt | 25,7 | 23,0 | 27,7 | 50,4 | 47,7 | 52,4 |
| Moxotó | GD | 25,7 | 23,0 | 27,7 | **79,7** | **77,0** | **81,7** |

**NOTA:** Referência dos dados levantados das temperaturas: EMBRAPA (2013), como segue: EMBRABA, Banco de Dados Climatológicos do Brasil. Disponível em: http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/. Último acesso em setembro de 2013.

Salienta-se que os dados das temperaturas levantadas com relação à UHE Corumbá referem-se ao monitoramento realizado para o município de Goiânia - GO, fonte INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Já os dados das temperaturas levantadas para a UHE Mascarenhas referem-se ao monitoramento realizado para o município de Ribeirão Preto - SP, fonte IAC (Instituto Agronômico de Campinas). Com relação aos dados referentes às temperaturas levantadas para as UHEs pertencentes ao complexo de Paulo Afonso, eles se referem ao monitoramento realizado para o município de Paulo Afonso - BA, fonte INMET.

No Anexo B deste trabalho encontram-se os dados climatológicos referentes a cada município mencionado.

É de suma importância destacar que a DEF é propicia de ocorrer em concretos com elevação de temperaturas, durante a etapa de cura, próxima ou superior a 70ºC, conforme destacam Thawlow (1999); Taylor; Famy; Scrivener (2001), Godart; Divet (2012). Entretanto, esta temperatura é controversa, sendo empregado, muitas vezes na prática, o limite de 60ºC para se evitar riscos de DEF, conforme relatos apresentados por Melo (2010) de ataques a temperaturas próximas de 60ºC.

Neste contexto, considerando os cálculos estimativos realizados, somente os concretos da UHE Moxotó mostraram elevadas temperaturas possíveis de terem sido atingidas, e acima do principal limite proposto na literatura (70ºC). Entretanto, na UHE PA II, e considerando-se apenas a máxima temperatura do ambiente, a temperatura do concreto pode ter atingido, em determinados momentos, valores próximos a 60ºC. Já as demais UHEs analisadas apresentam temperaturas sempre abaixo de 59ºC, não mostrando grande potencial para a DEF.

Considerando todo o exposto, e especificamente para a UHE Mascarenhas, como foram observadas algumas fases sulfatadas nos concretos analisados, embora apenas relacionadas à etringita, pode eventualmente ter tido outra fonte para a sua formação sem ser DEF.

## 5.14 DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS

Neste item é apresentada uma discussão geral de todos os resultados, fazendo sempre que possíveis alguns confrontos entre eles e com a literatura.

Com o objetivo de abordar os principais aspectos observados, quantificados e analisados com o desenvolvimento dos ensaios e análises do programa experimental, apresenta-se, de forma sintetizada, a Tabela 5.39.

Para avaliar se determinado aspecto dos concretos referentes a cada usina foi observado ou quantificado de forma expressiva, indicam-se no respectivo quadrante da Tabela 5.39, três sinais positivos, informando que o aspecto em questão, quando comparado com os concretos das demais usinas (de forma global), apresenta-se com os maiores índices tidos. Entretanto, quando não foi identificado ou quantificado determinado aspecto, apresenta-se a sigla N.O, que significa Não Observado ou Nenhuma Ocorrência.

Assim, são apresentadas na Tabela 5.39, de forma escalar, as amostras que obtiveram os maiores índices em determinado aspecto, pelo sinal de "+++" (três símbolos + sequenciais), e as que não obtiveram nenhuma ocorrência, ou sua quantificação foi zero, encontra-se representada pela sigla N.O e, os valores intermediários são representados, segundo ordem crescente de ocorrência por "+" ou "++".

Cabe destacar que, dentre os concretos provenientes da mesma usina, foi possível verificar, durante os procedimentos de preparação das amostras para ensaios específicos, quando da separação das argamassas e agregados dos testemunhos, que os testemunhos que apresentaram valores mais elevados de módulo de elasticidade, também apresentaram maiores resistências à fragmentação. Por outro lado, os concretos de menor módulo de elasticidade foram mais fáceis de serem separados manualmente.

Com relação à UHE Corumbá, destaca-se que pelas inspeções de campo e dos testemunhos de concreto não foram verificados indícios que sugerisse a ocorrência de RAA ou ataque por sulfatos. Em geral, os concretos, com exceção dos extraídos do 12º lance da escada do poço do muro central, apresentam-se com resistências abaixo, porém ainda próximas do esperado. Os valores de módulo de elasticidade também se encontram quase em sua totalidade abaixo das estimativas.

Por meio da microscopia, identificou-se que os agregados e materiais rochosos dessa usina possuem sulfetos do tipo pirrotita, pirita, calcopirita e pentlandita, sendo o principal a pirrotita. As alterações visualizadas nestes são incipientes e possuem similaridade entre os materiais rochosos coletados e os agregados dos testemunhos de concreto, sugerindo assim que os concretos não aceleraram o processo de alteração dos sulfetos. Essas alterações vistas, por também terem sido visualizadas de forma semelhante nos agregados coletados "*in natura*", podem ter ocorrido antes de sua inserção ao concreto, e mantendo-se nestas mesmas condições, sem qualquer alteração adicional ao longo dos anos de vida útil dos concretos.

Esses agregados provenientes da UHE Corumbá continham minerais sulfetos oxidados ou corroídos, porém em pequenas proporções, cujo maior teor observado foi nos agregados do testemunho C8.CEl.12 (0,15% de enxofre na forma de sulfetos), sendo os demais teores obtidos de 0,01% ou zero. Em virtude deste teor pontual detectado, o concreto que possuía esses agregados extrapolou determinados limites encontrados na literatura.

**Tabela 5.39** – Síntese geral dos resultados obtidos para os concretos extraídos das UHEs estudadas.

| Anomalias investigadas | | Identificação das usinas | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Corumbá | Mascarenhas | PA II | PA IV | | Moxotó |
| | | | | | Tda | Vt | |
| Inspeções visuais | Presença de neoformações | N.O | +++ | ++ | ++ | ++ | +++ |
| | Manchas na argamassa | N.O | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| | Fissuras na argamassa | N.O | ++ | + | N.O | + | +++ |
| | Agr. Fissurado | + | +++ | + | + | N.O | +++ |
| | Agr. Oxidados | | +++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| Prop. Mecânica | Módulo de elasticidade afetado - abaixo do estimado | ++ | + | ++ | + | ++ | +++ |
| Presença de enxofre | Sulfetos nos agregados | +++[2] | N.O | ++[2] | ++ | ++ | N.O |
| | Sulfatos nos agregados | +++ | + | N.O | + | + | N.O |
| | S total na argamassa[1] | +++ | N.O | N.O | ++ | ++ | + |
| | S total no concreto | +++ | + | +++ | ++ | ++ | + |
| | Excedeu limites envolvendo os agregados | +++ | N.O | + | ++ | ++ | N.O |
| | Excedeu limites envolvendo o concreto | +++ | ++ | + | +++ | +++ | +++ |
| Reatividade dos agregados | Análise Petrográfica | ++ | +++ | +++ | +++ | +++ | ++ |
| | Ensaio de expansão | ++ | +++ | + | + | + | + |
| Sulfetos | Análise microscópica - Alterados | +++ | ++ | + | + | + | ++ |
| Análises microestruturais | Fases sulfatadas - DRX | N.O[3] | + | +++ | + | ++ | ++ |
| | Fases sulfatadas - MEV | N.O[3] | ++ | + | + | ++ | +++ |
| | Fases RAA - MEV | N.O | + | ++ | ++ | +++ | +++ |

**Obs.** +++: intensidade alta; ++: intensidade média; +: intensidade baixa; N.O – não observado ou nenhuma ocorrência. **Notas**: [1] – Teor de $SO_3$ total descontando a contribuição do cimento; [2] - somente uma das amostras de agregados analisados apresentou teor elevado; [3] - identificado somente monossulfato.

Os concretos da UHE Corumbá não apresentaram nenhum indício de manifestação patológica que sugerisse a ocorrência de um ataque por sulfatos e RAA pelas inspeções visuais e análises microestruturais.

Ressalta-se que os concretos da UHE Corumbá foram produzidos com o emprego de cimento Portland de alto-forno. Além disto, verificou-se que os concretos pertencentes ao quinto e ao décimo segundo lance da escada do poço do muro central tiveram também emprego de sílica ativa, ambos em torno de 8% da massa de cimento, conforme apresentado no item 5.2.1. Desta forma, pode-se inferir que uma das características que pode estar auxiliando na integridade desses concretos é a presença dessas adições minerais (escória e sílica ativa). Conforme apresentado no BRE *digest* I (BRE, 2005), alguns trabalhos já comprovaram a eficiência da escória com relação ao ataque por sulfatos.

Em relação à UHE Mascarenhas e às UHEs do complexo de Paulo Afonso investigadas, nas inspeções de campo ficou constatada a manifestação da RAA, patologia esta também confirmada pelas análises visuais e microestruturais e já divulgada no meio técnico. Durante as inspeções em campo observou-se a presença de gel exsudado nessas usinas, com exceção da UHE Moxotó. Porém, pelas análises por MEV/EDS foi possível identificar produtos da RAA em todos os testemunhos analisados de Moxotó, além de ter sido também identificada a presença de trona (carbonato de sódio - $Na_3HCO_3CO_3 \bullet 2H_2O$) em um deles, indicando assim alto teor de álcalis disponíveis no sistema.

Em geral, todos os testemunhos de concretos da UHE Mascarenhas apresentam alterações sugestivas de processos químicos de deterioração. Algumas delas são devidas à RAA, como agregados com finas bordas envoltas, e outras relacionadas com alguma manifestação envolvendo ataque por sulfatos, como: poros com presença de material esbranquiçado, onde alguns destes possuíam perceptíveis morfologias aciculares, relativamente prolongadas e de cor branca.

Com relação às propriedades físicas dos concretos da UHE Mascarenhas, eles apresentaram resistências médias acima do esperado e o módulo de elasticidade não apresentou comportamento único, os valores ficaram dispersos, porém próximos ao esperado. Tal fato permite constatar, a princípio, que não se percebe comportamento anômalo ao esperado até o momento em relação às propriedades mecânicas.

No que tange às fases sulfatadas, pelas análises microestruturais dos concretos da UHE Mascarenhas identificou-se apenas a presença da etringita. Pôde-se inclusive confirmar que os produtos esbranquiçados de morfologia acicular observados nas argamassas durante as inspeções visuais tratavam-se de cristais de etringita pelo MEV.

Em Mascarenhas, pelas análises mineralógicas, o único tipo de sulfeto identificado nos agregados extraídos dos testemunhos e dos materiais rochosos foi a pirita, e em concentrações ínfimas, abaixo do limite de detecção da análise química que é de 0,01%. Nos fragmentos de sulfetos visualizados ao microscópico foi possível detectar raros fragmentos destes disseminados pela amostra e com alguns fragmentos de pirita apresentando borda corroída e início de alteração para material argilo-limonítico, sugerindo assim a existência de um processo de alteração, porém visualizado de forma não muito expressiva.

Além do exposto, pela morfologia e característica dos cristais de etringita detectados acredita-se que tratam-se de neoformações secundárias. Somando-se ao exposto, tem-se que diante dos dados da composição química do cimento empregado na UHE Mascarenhas, este possui um teor médio de $C_3A$ da ordem de 11,5% e 1,6% de $SO_3$. Assim, conforme discutido por Casanova *et al.* (1997), Matshei *et al.* (2007), para a relação gipsita[20]/$C_3A$ abaixo de 1 (nesta situação a relação obtida é de 0,24) as fases de monossulfato e aluminatos de cálcio hidratados são as mais estáveis neste sistema, ou seja, o sistema em questão não é propício para a formação de etringita primária, indicando assim que pode ter ocorrido aporte adicional de íons sulfato. Portanto, pode ter ocorrido a formação de etringita secundária em Mascarenhas além da RAA, porém a fonte desses íons ainda não é possível de indicar com precisão com base nos resultados da presente pesquisa, não podendo afirmar que tais sulfatos adicionais derivaram de processos de oxidação de minerais sulfetos.

Diante das análises realizadas, apesar das neoformações presentes, foi possível verificar que não houve reflexos negativos pronunciados nas propriedades mecânicas dos concretos da UHE Mascarenhas, apesar da idade média de aproximadamente 63 anos. Isto provavelmente ocorreu devido à presença de vazios nos concretos, que estão acomodando tais neoformações,

[20] A porcentagem de gipsita do cimento pode ser obtida pela conversão do $SO_3$ fornecido na análise química do cimento para a forma de sulfato de cálcio di-hidratado ($CaSO_4.2H_2O$) fazendo a multiplicação da porcentagem de $SO_3$ pelo fator de 2,1503.

podendo inclusive estes preenchimentos maximizar a resistência à compressão, justificando assim os valores obtidos acima do esperado.

Com relação às três usinas estudadas pertencentes ao complexo de Paulo Afonso (PA II, PA IV e Moxotó), os resultados das propriedades mecânicas obtidas para PAII e Moxotó são os que mais se afastam das estimativas, sendo os concretos da UHE Moxotó os que mais se distanciaram do esperado em termos de módulo de elasticidade, além de ser esta usina a que apresentou maiores indícios de alterações químicas. Tal fato encontra-se em consonância com o estudo de Silva (2007), que indicou esta usina como sendo a que possuía o maior índice de deterioração dentre as demais do complexo.

Dentre os concretos estudados, os extraídos da UHE Moxotó foram os que apresentaram consumo de cimento mais elevado, 360 kg/m³, fato este que conduziu a elevadas resistências à compressão. Os demais concretos apresentaram consumos médios entre 180 kg/m³ e 270 kg/m³, consumos estes em geral compatíveis com concretos massa.

Nessas usinas foi possível verificar que os agregados dos concretos apresentaram-se com fragmentos de minerais sulfetos alterados, que de forma geral, se apresentaram ligeiramente mais pronunciados do que os materiais rochosos coletados de mesma origem, podendo esses agregados no concreto ter tido um meio propício que acelerasse o seu processo de alteração. Com relação à alterabilidade dos minerais sulfetos presentes nos agregados e materiais rochosos analisados, de forma geral, ao se comparar todos os agregados analisados pelas análises mineralógicas, também foi possível constatar-se que dentre esses minerais identificados, a pirrotita, quando presente, apresentou-se predominantemente mais alterada e em segundo nível encontra-se a pirita.

Os outros sulfetos identificados (calcopirita, bornita, esfarelita e pentlandita) podem ser considerados mais estáveis no meio em que se encontravam, pois foram visualizados sempre inalterados ou com incipiente processo de alteração. Tem-se também que esses sulfetos estavam no mesmo ambiente que os demais (pirrotita e pirita), e apresentaram-se em fragmentos de menores dimensões, possuindo assim maior área superficial; deste modo, se fossem instáveis como os demais, teriam sido visualizados com maiores alterações.

Tal fato mencionado pode ter sido maximizado pela presença especificamente do sulfeto pirrotita nesses agregados. Conforme levantamento bibliográfico apresentado encontra-se vários trabalhos (DANA, 1981; NICHOLSON; SCHARER, 1994; TAYLOR, 1997;

MACHADO *et al.*, 2003; BELZILE *et al.*, 2004; GOMIDES, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2012 a, b; CHINCHÓN-PAYÁ *et al.*, 2012) relatando que a pirrotita é o tipo de sulfeto de ferro com maior potencial para se alterar.

Nestas três usinas, diante da identificação do sulfeto pirrotita com frequentes sinais de corrosão, além de este apresentar-se com alguns fragmentos com oxidação incipiente para limonita, e em determinados casos alterando-se e dando origem a neoformações que se apresentam como uma mistura de material argilo-limonítico no agregado, sugerindo assim que houve liberação de íons sulfato ao meio. Pelo exposto, acredita-se que essas alterações dos sulfetos podem ter ocorrido após o emprego do agregado no concreto, liberando assim íons sulfato à pasta cimentícia, podendo desta forma ter essa alteração sido a fonte de íons responsáveis pela formação das fases sulfatadas (gipsita, etringita, entre outros) identificadas pelas análises microestruturais.

Pelas análises de DRX foi possível identificar nos concretos da UHE PA II a presença de gipsita nas três amostras analisadas, além de possível taumasita na mesma amostra em que se visualizou etringita por MEV/EDS. Já nos concretos da UHE PA IV se detectou a presença de gipsita, etringita e mateucita (sulfato de sódio hidratado) em alguns dos testemunhos do vertedor e nos da tomada d'água identificaram-se apenas fases indicativas de monossulfato, hidroglauberita (espécie de sulfato de cálcio e sódio hidratado) e a mateucita (sulfato de sódio hidratado). Em Moxotó, houve a presença de gipsita nas três amostras analisadas e de monossulfato em uma das amostras.

Por MEV/EDS constatou-se, nos concretos da UHE PA II, incidência tanto de RAA como de determinado ataque por sulfatos, diante da identificação de produtos oriundos da manifestação da RAA, e também fases de etringita em um dos concretos. Com relação à UHE PA IV, identificou-se que nos concretos da tomada d'água, todos os testemunhos analisados possuíam indícios da RAA e em somente em um deles visualizou-se fases sugestivas da etringita. Já nos do vertedor, foi identificada a presença de etringita e RAA nos três concretos analisados. As análises microestruturais dos concretos de PA IV indicaram que os concretos do vertedor possuem maiores indícios de deterioração que os da tomada d'água. Com relação aos concretos da UHE Moxotó constatou-se nestes tanto a ocorrência de RAA como de fases remanescentes de determinado ataque por sulfatos.

Pelo exposto, percebe-se que as três usinas estudadas do complexo de Paulo Afonso (PA II, PA IV e Moxotó) possuem indícios de ataque por sulfatos, havendo, portanto a possibilidade de terem ataque combinado de RAA e sulfatos nos concretos dessas usinas e diante das constatações e observações tidas, acredita-se que os minerais sulfetos presentes nos agregados dos concretos contribuíram de certa forma como fontes de íons sulfato responsáveis pela formação das fases sulfatadas detectadas nas argamassas.

Além do observado por Araújo (2008), pesquisadores como Vázquez (1999), Hasparyk *et al*. (2003), Gomides (2009), dentre outros, já verificaram, por meio de estudos experimentais com agregados contendo sulfetos, a formação de cristais de etringita em regiões como na zona de transição entre o agregado e na pasta de cimento hidratada, como os visualizados nos concretos das UHEs citadas anteriormente

Conforme relatam Tian; Cohen (1999) e Mehta; Monteiro (2008), dentre outros, a presença de gipsita no concreto, esta identificada nos concretos extraídos das três usinas do complexo de Paulo Afonso, é um forte indício de deterioração química envolvendo o ataque por sulfatos. Além do exposto, conforme citado por pesquisadores como Czerewko *et al*. (2003) e Rodrigues *et al.* (2012a, b), a presença de gipsita e provável taumasita, conforme identificado na argamassa do concreto C1.PAIITa denota ataque mais acentuado nele.

No geral, no que tange a RAA, os agregados provenientes das usinas do Complexo de Paulo Afonso foram classificados como potencialmente reativos por meio das análises mineralógicas devido à presença de quartzo deformado, além também de ter sido identificada a presença de feldspatos alcalinos (microclínio), que podem também contribuir para a reação. Já o ensaio de expansão acelerada, indicou o denominado "**falso negativo**", uma vez que não diagnosticou a reatividade dos agregados e materiais rochosos, mantendo os valores de expansão abaixo do limite e com taxas de expansões similares. Corroborando como o exposto, cita-se o trabalho de Silva (2007) que também verificou comportamento semelhante ao relatado para os agregados estudados pertencentes ao Complexo de Paulo Afonso. O fato é que no diagnóstico feito por MEV, conforme discutido anteriormente, existem efetivamente produtos da RAA.

Com relação aos limites de compostos sulfatados, todos os testemunhos analisados suplantaram o limite exposto pelo Antigo Regulamento do Betão (1971) de 0,5% de $SO_3$ em relação ao cimento, considerando o concreto com emprego de cimento comum.

Destaca-se também que os concretos da UHE PA IV e Moxotó possuem idades próximas e em torno de 41 anos, e PA II possui os concretos mais velhos, com idade média aproximada de 58 anos. Tal fato indica que concretos com idades variadas podem apresentar as mesmas manifestações patológicas.

Salienta-se que considerando os cálculos estimativos complementares realizados para a verificação da possibilidade de ocorrência de DEF, somente os concretos da UHE Moxotó mostram elevadas temperaturas possíveis de terem sido atingidas, e acima do principal limite proposto na literatura (70ºC). Sendo assim, a única UHE que pode ter eventualmente sofrido DEF é Moxotó.

# CAPÍTULO 6

# CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 6.1 CONCLUSÕES

De forma geral, apresentam-se na sequência, as principais conclusões e considerações sobre os resultados e análises realizados para os concretos e materiais referentes às usinas estudadas. Destaca-se que tais conclusões referem-se apenas aos concretos extraídos, o que pode não representar, de forma global, o comportamento dos demais concretos das usinas, e de suas estruturas como um todo.

De forma específica, com relação aos concretos da UHE Corumbá, as resistências à compressão apresentaram-se com certa queda e os valores de módulo de elasticidade ficaram quase em sua totalidade abaixo das estimativas. Além disto, um dos testemunhos analisados apresentou-se com agregados com teor de sulfetos de 0,15%, tendo este extrapolado alguns limites preconizados na literatura. Em geral, as alterações vistas nestes minerais sulfetos foram incipientes e sendo similares entre os materiais rochosos coletados e os agregados dos testemunhos de concreto, sugerindo assim que o meio alcalino do concreto no qual estava inserido não acelerou o processo de alteração dos sulfetos.

Diante das análises mineralógicas dos agregados extraídos dos concretos verificou-se que eles apresentaram características que indicam potencialidade frente à RAA, fato confirmado pelo ensaio de expansão em barras de argamassa. Porém, pelas análises por MEV/EDS não se constatou nenhum indício da RAA ou ataque por sulfatos, comprovando desta forma boa integridade dos concretos dessa usina, e considerando o emprego da escória de alto-forno, que mitigou as expansões desta reação, tendo o monossulfato sido a única fase sulfatada identificada nas argamassas desses concretos por DRX e por MEV/EDS.

A boa integridade dos agregados, em geral, está relacionada à boa qualidade dos concretos, e provavelmente devido ao emprego de cimento com adição de escória de alto-forno, além do emprego de sílica ativa em alguns concretos. A UHE Corumbá encontra-se com idade aproximada de 31 anos e até o momento não apresentou indícios de manifestações patológicas nos concretos.

Em relação aos concretos da UHE Mascarenhas e das UHEs do complexo de Paulo Afonso investigados, considerando as inspeções de campo, conclui-se a ocorrência da manifestação da RAA, patologia também confirmada pelas análises visuais e microestruturais.

Com relação aos concretos da UHE Mascarenhas, eles apresentaram resistências médias acima do esperado e valores dispersos de módulo, porém próximos ao esperado e não percebendo assim comportamento anômalo ao previsto, até o momento.

Esses concretos apresentaram alterações sugestivas de processos químicos de deterioração tanto da RAA quanto da formação de etringita secundária. Porém em nenhum dos agregados foi quantificada, pela análise química gravimétrica, a presença de sulfetos, apesar de terem sido visualizados, na microscopia ótica, alguns fragmentos de pirita dispersas nas amostras, tendo algumas delas bordas corroídas e início de alteração para material argilo-limonítico. As argamassas apresentaram teores ínfimos de compostos sulfatados, onde o único limite extrapolado refere-se ao conteúdo total de $SO_3$ no concreto.

Pela análise mineralógica dos agregados graúdos confirmou-se sua reatividade, e ela também foi confirmada pelos ensaios de expansão acelerada. A ocorrência desta patologia nos concretos foi verificada mediante as análises por MEV/EDS. Porém, parece haver maior incidência por esta técnica de fases sulfatadas sugestivas de etringita, estas que foram também confirmadas por DRX, além de terem sido observadas nas inspeções visuais. Entretanto, a fonte de íons sulfato neste caso não foi possível indicar com precisão com base apenas nos resultados deste estudo.

De qualquer forma, apesar do exposto, pôde ser confirmado o bom estado de conservação dos concretos extraídos das estruturas da tomada d'água da UHE Mascarenhas diante dos resultados e verificações tidas, além da análise dos dados obtidos no levantamento de informações técnicas, que também indicaram o bom desempenho destes concretos.

Já com relação às três usinas estudadas pertencentes ao complexo de Paulo Afonso (PA II, PA IV e Moxotó), os resultados de módulo de elasticidade obtidos para PAII e Moxotó são os que mais se afastam das estimativas, sendo os concretos da UHE Moxotó os que mais se distanciaram do esperado, além de ser esta usina a que apresentou maiores indícios de alterações químicas. Já para os concretos da UHE PA IV, os módulos de elasticidade apresentaram-se com menores dispersões e próximos do esperado, apresentando os concretos da tomada d'água com menores indícios de anomalias.

Em geral, os agregados provenientes dessas usinas foram classificados como potencialmente reativos, por meio das análises mineralógicas. Porém no ensaio de expansão acelerada foram considerados potencialmente inócuos, concluindo-se assim que houve um resultado **falso negativo**.

Diante das análises de DRX identificou-se a presença de várias fases sulfatadas em todos os concretos analisados das usinas do Complexo de Paulo Afonso. Constatou-se também incidência tanto de RAA como de fases sulfatadas sugestivas de um ataque por sulfatos por MEV/EDS.

Considerando o exposto, as três usinas estudadas do complexo de Paulo Afonso apresentam alterações sugestivas de processos químicos de deterioração. As análises mineralógicas dos agregados e materiais rochosos sugerem que a fonte de íons sulfato esteja associada ao processo de alteração dos sulfetos presentes. Tal fato indica que os reflexos negativos nas propriedades dos concretos e as influências no desempenho das estruturas podem não ter sido apenas em decorrência da RAA.

De forma global, ao se comparar os agregados extraídos dos testemunhos de concretos das usinas do complexo de Paulo Afonso, há tendência de que os agregados com menores teores de minerais sulfetos apresentam-se mais alterados, e nos que apresentam teores mais elevados, os fragmentos de sulfetos se apresentam mais sãos, sugerindo assim que concentrações menores podem estar relacionadas com cristais que já se alteraram.

Pelas análises mineralógicas dos sulfetos, foi possível constatar que, de forma geral, comparando-se todos os agregados e materiais rochosos analisados, dentre os sulfetos identificados, a pirrotita, quando presente, apresentou-se predominantemente mais alterada, indicando, portanto, seu maior grau de alterabilidade em relação aos demais sulfetos, comportamento este esperado; em segundo nível de alteração encontra-se a pirita.

Diante do apresentado, os concretos das usinas estudadas pertencentes ao complexo de Paulo Afonso encontram-se com ataque combinado de RAA e sulfatos, sendo este último com indícios de ter sido desencadeado pela oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados.

Diante da análise do potencial de expansão dos concretos devido à oxidação de minerais sulfetos presentes nos agregados, verifica-se que: teores da ordem de 0,02% podem ser suficientes para causar expansões internas nos concretos que podem ser prejudiciais,

dependendo da sua composição e condições e exposição. Como exemplo, cita-se que de forma geral, concretos com as características destes estudados, mesmo possuindo porcentagens de minerais sulfetos nos agregados de apenas **0,02%**, na situação mais desfavorável, são capazes de produzir expansões acima do limite que é adotado para a DEF, em ensaios acelerados. Entretanto há que se considerar que a porosidade dos concretos pode amortizar estas expansões, diante da acomodação das neoformações nos vazios, minimizando assim os seus efeitos deletérios.

Tal fato, apesar de ser uma situação hipotética e simplificada, demonstra a grande necessidade de controle tecnológico e correta adoção de materiais na produção dos concretos, além de indicar o quanto pode ser perigoso o uso indiscriminado de agregados contendo sulfetos, mesmo em baixos teores.

## 6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No geral, em nenhuma dessas usinas foram verificados indícios que sugerissem a possibilidade de existência de fontes externas de sulfatos. Assim, acredita-se que em nenhuma das usinas houve ocorrência de ataque por sulfatos de origem externa, até o momento.

Por meio da análise dos históricos obtidos de intervenções e serviços realizados nas UHEs Corumbá e Mascarenhas, somadas às inspeções de campo realizadas em determinadas estruturas de concretos destas, foi possível verificar que nelas já foram realizados alguns serviços de reparos preventivos e existem algumas manifestações como presença de infiltrações, locais com lixiviações, dentre outras ocorrências; entretanto, estão dentro do esperado e encontram-se em funcionamento adequado e sem indicativos de anormalidades, além de não se apresentam, ao menos em nível de inspeção e análise dos dados, de forma que indicasse comprometimento da integridade dos concretos estudados.

Com relação às UHEs estudadas, pertencentes ao complexo de Paulo Afonso (PA II, PA IV e Moxotó), todas já foram submetidas a alguma intervenção nas unidades geradoras em consequência da expansão da RAA detectada anteriormente, porém a usina com maiores intervenções é a UHE Moxotó, com vários reparos já realizados também em sua estrutura de concreto. Estas usinas possuem monitoramento constante da manifestação da RAA, cujos reparos, quando necessários, são realizados de forma a manter o funcionamento destes empreendimentos.

Essas usinas pertencentes ao Complexo de Paulo Afonso possuem instrumentação instalada e passam por monitoramento, inspeções visuais e análises de desempenho de forma a analisar/avaliar o comportamento das estruturas, que até o momento encontram-se seguras.

## 6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para pesquisas futuras que sigam a mesma linha, e de forma a ampliar o entendimento dos fenômenos expansivos causados pela RAA e determinado ataque por sulfatos, além de sanar alguns pontos que não puderam ser afirmados de forma assertiva nesta pesquisa, apresentam-se as seguintes sugestões:

a) Realizar análises complementares extraindo-se mais testemunhos de concretos de cada usina estudada, além de proceder com amostragens em outras estruturas das usinas além das estudadas neste trabalho, de forma a obter-se maior amostragem, podendo-se assim confirmar se as ocorrências vistas nesta pesquisa encontram-se de forma pontual, ou se estão generalizadas ao longo das estruturas de concreto.
b) Realizar modelagem matemática para as usinas estudadas com os dados obtidos nesta pesquisa de forma a avaliar o comportamento das estruturas de concreto devido às expansões que podem ser geradas pela continuidade da RAA e também pela condução de ataque interno promovido pela oxidação dos minerais sulfetos quantificados nos agregados.
c) Realizar estudos em concretos passíveis de ocorrência da RAA e de ataque por sulfatos, por meio de modelagem matemática, para analisar os efeitos deletérios de cada patologia de forma separada e também conjuntamente, objetivando entender melhor a influência da ocorrência destas duas manifestações em conjunto.
d) Extrair testemunhos de rocha nas pedreiras exploradas durante a construção das usinas estudadas, em quantidades e profundidades suficientes, de forma a verificar se há diferença no teor de minerais sulfetos em diferentes profundidades, além de compará-los com as análises dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto.
e) Realizar estudos e análises que possibilitem avaliar os poros, vazios e permeabilidade dos concretos e suas correlações com os mecanismos de transporte de massa para avaliar se os concretos mais deteriorados tem relação direta com essas propriedades.
f) Realizar análises de microscopia ótica em seções polidas de argamassas dos concretos analisados em que foram quantificados enxofre na forma de sulfetos nas argamassas

para verificar se eles encontram-se presentes nos agregados miúdos ou na pasta de cimento, além de verificar a presença ou não de alterações destes sulfetos.

g) Realizar estudos em laboratório em argamassas confeccionadas com diferentes relações água/cimento, para verificar a influência deste parâmetro na formação de etringita primária e de monossulfato.

h) Realizar estudos de laboratório em concretos extraídos de estruturas hidráulicas para avaliar o conteúdo de álcalis presente no concreto e relacioná-los com os álcalis dos cimentos, de forma a identificar se está havendo contribuição dos agregados como fonte de íons alcalinos;

i) Estudar outras UHEs brasileiras com foco no presente estudo de forma a ampliar o conhecimento de possíveis manifestações patológicas em outras estruturas.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15577-1**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro: 2008.

ABNT_____.**NBR 15577-2**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - concreto. Rio de Janeiro: 2008.

ABNT_____.**NBR 15577-3**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro: 2008.

ABNT_____.**NBR 15577-4**: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: 2008.

ABNT_____. **NM 45:** agregados – determinação da massa unitária e dos espaços vazios. ABNT: Rio de Janeiro, mar. 2006. 8p.

ABNT_____. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. ABNT: Rio de Janeiro, jun. 1991. 5p.

ABNT_____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. ABNT: Rio de Janeiro, julho. 1991. 6p.

ABNT_____. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. ABNT: Rio de Janeiro, julho. 1999. 5p.

ABNT_____. **NBR 5737**: cimentos Portland resistentes a sulfatos. ABNT: Rio de Janeiro, jun. 1992. 4p.

ABNT _____. **NBR 5739:** Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT _____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT _____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 1º projeto de revisão da ABNT NBR 6118, Rio de Janeiro, 2013.

ABNT _____. **NBR 7211:** Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT _____. **NBR 7680:** Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT _____. **NBR 8522:** Concreto: determinação do módulo de deformação estática e diagrama - tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT _____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT _____.**NBR 9778:** Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT _____.**NBR 9779:** Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

ABNT _____.**NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997. 5p.

ABNT _____.**NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2006. 18p.

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

ABNT_____.**NBR 15577-4:** Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT_____.**NBR 15577-5:** Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R-01**: sumário. ACI Committee 201: New York, 2000. 41p.

ACI _____. **318-08**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, ACI, 2008.

ADAMOPOULOU, E.; PIPILIKAKI, P.; KATSIOTIS, M. S.; CHANIOTAKIS, M.; KATSIOTI, M. How sulfates and increased temperature affect delayed ettringite formation (DEF) in white cement mortars**. Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3583-3590, p. 2011.

AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; CÁNOVAS, M. F.; SALLA, J. M. Diagnóstico de daños y reparación de obras hidráulicas de hormigón. **Colegio de Ingenieros de Caminos**, Madrid, 1996.

AGUIAR, G.; SELMO, S.M.S. Estudo de Argamassas com Agregados Reciclados Contaminados por Gesso de Construção. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP** – Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/438. ISSN 0103-9830. São Paulo. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for potential expansion of Portland cement mortars exposed to sulfate. 1995. 3p.

ASTM_____. **C 1012:** Standard test method for length change of hydrauliccement mortars exposed to a sulfate solution. 2004.

ASTM _____. **C-1260/07.** Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2007.

ASTM _____. **C-1293/08**. Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. Philadelphia, 2008.

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. Granulats pour bétons hydrauliques **- NF P 18 541**. France, 1994.

AMO, D. G.; PÉREZ, C. B. Diagnosis of the alkali-silica reactivity potential by means of digital image analysis of aggregate thin sections. **Cement and Concrete Research**. v. 31, p.1449-1454, 2001.

ANDRADE, T.; SILVA, J. J. R.; HASPARYK, N. P.; SILVA, C. M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na Região Metropolitana do Recife. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 2006, Rio de Janeiro. "***Anais...***" São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

ARAÚJO, G. S. **La reacción sulfática de origen interno en presas de hormigón. Propuesta metodológica de análisis**. 2008. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d´Enginyeria de la Construcció, Barcelona, 2008.

ARAÚJO, G. S. CHINCHÓN, S. AGUADO, A. Evaluation of the behavior of concrete gravity dams suffering from internal sulfate attack. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. v. 1, n. 1, p. 84-112, 2008. (ISSN • ISSN 1983-4195).

ATAHAN, H. N.; DIKME, D. Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack. Construction and Building Materials, v. 25, p. 3450-3457, 2011.

AYORA, C.; CHINCHÓN, S.; AGUADO, A.; GUIRADO, F. Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyreness, Spain, **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 9, p. 1223-1235, 1998.

BATTAGIN, I. L. S.; BATTAGIN, A. F.; SBRIGHI NETO, C. A norma técnica brasileira de reação álcali-agregado faz seu primeiro aniversário. *In:* **CONCRETO & CONSTRUÇÕES**, 54º revista Ibracon, São Paulo, 2009. ISSN 1809-7197. Disponível em: www.ibracon.org.br, último acesso em agosto 2013.

BARBORAK, R.; FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M. D. A. Using lithium compounds to treat hardened concrete suffering from ASR: Preliminary laboratory results. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE (ICAAR), 12., 2004, China. **Proceedings…** China: International Academic Publishers Edited by Tang Mingshu e Deng Min, p. 483-489, 2004.

BATIC, O.; MAIZA, P.; SOTA, J.; Alkali sílica reaction in basaltic rocks NBRI method. **Cement and Concrete Composites**, n. 7, v. 24, p. 1317-1326, 1994.

BATISTA, D. G.; HASPARYK, N. P.; CARASEK, H.; SILVA, H. H. A. B.; ANDRADE, M. A. S. Um estudo sobre a incidência de sulfetos em agregados de rochas metamórficas existentes em concretos de UHE's. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto**, Gramados, 2013.

BEDDOE, R. E.; DORNER, H. W. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 2333-2339, 2005.

BELZILE, N.; GOLDSACK,D.; MAKI,S.; MCDONALD, A. Acid mine drainage in the Sudbury area. *In*: ENVIRONMENTAL GEOLOGY OF URBAN AREAS, GEOLOGICAL ASSOCIATION OF CANADA, Ontario, "***Proceedings…"*** Canada, p. 223-226, 1997.

BELZILE, N.; CHEN,Y.; CAI, M.; LI, Y. A review on pyrrhotite oxidation. **Geochemist Explorer**, v. 84, p. 65-76, 2004.

BENSTED, J. Mechanism of thaumasite sulphate attack in cements, mortars and concretes. **ZKG International Zement Kalk Gips**. v. 12, n.53, p. 704- 709, 2000.

BOGUE, R. H. **The chemistry of portland cement** , Editora Reinhold Pub. Corp, 1955. 793p (arquivo original digitalizado pela biblioteca da Universidade da Califórnia em 29 out. 2008).

BOUZABATA, H.; MULTON, S.; SELLIER, A.; HOUARI, H. Swellings due to alkali- silica reaction and delayed ettringite formation: Characterisation of expansion isotropy and effect of moisture conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 349-356, 2012.

BRITISH STANDARD. **BS EN 12620:2002 + A1:2008**: Aggregates for concrete. Europa, 58p, 2008.

BROWN, P. B. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, n.24, p. 301-303, 2002.

BRUNETAUD, X. **Etude de I'influence de different parameters et de leurs interactions sur la cinétique et I'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton**. 2005. 265 f. Tese (Tese de doutorado). Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Ecole Centrale Paris, France, 2005.

BRUNETAUD, X.; LINDER, R.; DIVET, L.; DURAGRIN, D.;DAMIDOT, D. Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation. **Materials and Structures**, v. 40, p. 567-578, 2007.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT - BRE SPECIAL DIGEST 1. **Concrete in aggressive ground**. England, BRE Centre for Concrete Construction - BRE Centre for Ground Engineering and Remediation, Construction Research Communications Ltd., 2005.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION: **CAN/CSA A23.2-14A-00**. Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C ). Mississauga, 2000a.

CSA _____.**CAN/CSA A23.1/A23.2** - Concrete materials and methods of concrete construction/ Methods of test and standard practices for concrete. 2000b.

CSA _____. **CAN/CSA A23.2-25A-00**. Detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. Mississauga, 2000c.

CÂNDIDO, W. F. **Estudo de tratamentos com lítio no combate da reação álcali-agregado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2009.

CANOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo, Ed. Pini, 1988.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 993-998, 1996.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation- II. Physico chemical modeling of sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 1627-1632, 1997.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ações de carbonatação no concreto. *In:* **CONCRETO: CIENCIA E TECNOLOGIA**. Editor Geraldo C. Isaia. 1ª Edição, v. 1, p. 849-902, 2011.

CAVALCANTI, A. J. C. T. Impacto da RAA nas Hidrelétricas Brasileiras. . 52º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** IBRACON, 2010. CD-ROM.

CAVALCANTI, A. J. C. T. Impacto da RAA nas hidrelétricas brasileiras. Anais do 52° Congresso Brasileiro do Concreto, 16p. 2010.

CHARLWOOD, R.; SCRIVENER, K.; SIMS, I. Recent developments in the management of chemical expansion of concrete in dams and hydro projects - Part 1: Existing structures. **Hidro-2012**, Bilbao, Espanha, 2012.

CHINCHÓN, J. S.; AYORA, C.; AGUADO, A.; GUIRADO, F. Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability. **Cement and concrete research**, v. 25, n. 6, p. 1264-1272, 1995.

COLLEPARDI, M. A. Damage by delayed ettringite formation. ACI Concrete International, v. 1, p. 69-74, 1999.

COLLEPARDI, M. A. State-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p.401-407, 2003.

CORRÊA, M. F. **Sistema de recuperação do maciço da barragem do rio Descoberto**. Monografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. 153f. Dissertação (Dissertação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2004.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, v. 1, 602p, 1997.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, 2008. 191p.

CRAMMOND, N. The occurrence of thaumasite in modern construction - a review, **Cement and Concrete Research**, v. 24, p. 393-402, 2002.

CZEREWKO, M.A; CRIPPS, J.C.; REID, J.M.; DUFFELL, C.G. Sulphur species in geological materials - sources and quantification, **Cement and Concrete Composites,** v. 25, n. 7, p. 657-671. 2003.

DAHER, C.H.S. **Avaliação do grau de influência de parâmetros de contorno no ensaio de reatividade potencial álacali-agregado pelo método acelerado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, UFPR, Curitiba, 2009.

DANA, J. K. **Manual of Mineralogy**. Editores: Klein, C.; Hurbult Jr, C. S. John Wiley & Sons, New York, 1981, 681p.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 5. p. 329-346. 1975.

DIVET, L.; DAVY, J. P. Étude des risques d'oxydation de la pyrite dans le milieu basique Du béton. **Bulletin Laboratoires des Ponts et Chaussées**, v. 204, p. 97-107, 1996.

DUARTE, M. G. **Ensaios laboratoriais para avaliação da drenagem ácida na barragem da UHE Irapé**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado), Mestrado profissional em engenharia geotécnica da UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2011.

DUCHESNE, J.; FOURNIER, B. Petrography of concrete deteriorated by weathering of sulphide minerals. *In*: 32th ANNUAL MEETING OF ICMA. Omni Royal Orleans. **Proceedings…** New Orleans, 2011.

ECL ENGENHARIA. **Constructing a diaphragm wall without dewatering a reservoir**, 2003, 2p. Disponível em: http://www.ecl.eng.br/ecl2012/wp-content/uploads/2011/11/hrw_2003.pdf , último acesso em setembro de 2013.

ESCADEILLAS, G.; AUBERT, J. E.; SEGERER, M.; W. PRINCE. Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1445-1452, 2007.

EUROPEAN STANDARD; FRENCH STANDARD. **NF EN 13242 + A1:2008**: Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. França. 2008. 41p.

FAQUINELI, C. R. **Estudo da Reatividade de Agregados Contendo Sulfetos em Concretos e Argamassas**. Belo Horizonte. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia Civil. 2010.

FERNANDES, I.; PERICÃO, M.; HAGELIA, P.; NORONHA, F.; RIBEIRO, M. A.; MAIA, J. Identification of acid attack on concrete of a sewage system. **Materials and Structures**, v. 45, p. 337-350, 2012.

FERNANDES, I.; SILVA A. S.; GOMES, J. P.; CASTRO, A. T.; NORONHA, F. Characterization of AAR in Fagilde Dam. 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions. Trondheim. p80-85. 2008

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e o seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. Goiânia. 2003. 225 f. Dissertação (Mestrado) – UFG, Escola de Engenharia Civil. 2003.

FIGUERÔA, J. P.; ANDRADE, T. **O ataque da reação álcali agregado sobre as estruturas de concreto: a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife,** Recife, Ed. Universitária da UFPE, 2007. 228p.

FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M. D. A. FOURNIER, B.; KURTIS, K. E.; IDEKER, J. H. **Interim recommendations for the use of lithium to mitigate or prevent alkali-silica reaction (ASR), Publication** No. FHWA-HRT-06-073, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, July 2006.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, p.167-191, 2000.

FU, Y.; BEAUDOIN, J. J. Mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cement system. **ACI Material Journal**, p. 327-333, 1996.

FU, Y.; GU, P.; XIE, P.; BEAUDOIN, J. J. A kinetic study of delayed ettringite formation in hydrated Portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 63-70, 1995.

FU, Y.; DING, J.; BEAUDOIN, J. J. Expansion of portland cement mortar due to internal sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 1299-1306, 1997.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. **Relatório DCT.T.8.229.94-R0**: Aproveitamento Hidroelétrico de Corumbá – Usina Corumbá I. Relatório Informativo Trimestral – Laboratório de Concreto. Agosto, 1994. 55 a.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. Relatório **DCT.T.8.231.94-R0**: Aproveitamento Hidroelétrico de Corumbá – Usina Corumbá I. Relatório Informativo – Laboratório de Concreto. Setembro, 1994. 71 b.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. **Relatório DCT.T.8.239.94-R0**: Aproveitamento Hidroelétrico de Corumbá – Usina Corumbá I. Relatório Informativo – Laboratório de Concreto. Setembro, 1994. 74 c.

FURNAS. Equipe de Laboratório de Concreto. **Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades**. Ed. PINI, São Paulo: Walton Pacelli de Andrade, 1997.

GAO, R.; LI, Q.; ZHAO, S. Concrete deterioration mechanisms under combined sulfate attack and flexural loading. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, p. 39-44, 2013.

GLASSER, F. P. Chemistry of the alkali-aggregate reaction. *In*: SWAMY, R. N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Glasgow, London: Blackie, New York: Van Nostrand Reinhold, p. 30-53, 1992.

GLASSER, F. P.; MARCHAND, J.; SAMSON, E. Durability of concrete - degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 226-246, 2008.

GODART, M. M. B.; DIVET. L. Recommendations for preventing disorders due to delayed ettringite formation. **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées**. Guide technique, techniques et methods des laboratoires des ponts et chausses. Lefebvre, Paris, 2010.

GOMIDES, M. J. **Investigação de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto**. Porto Alegre, 2009. 281 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia Civil. 2009.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali- Agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa**. 1999. 281 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. 1999.

HASPARYK, N. P.; MUNIZ, F. C.; ARMELIN, J. L.; NASCIMENTO, J. F. F.; SANTOS, M. C.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P.; CARASEK, H.; CASCUDO, O.; MINICUCCI, L. A. Contribuição ao estudo da influência de sulfetos presentes no agregado nas propriedades e durabilidade do concreto. **Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto**, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2002.

HASPARYK, N. P.; MUNIZ; NASCIMENTO, J. F. F.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M.; GOMIDES, M. J.; CARASEK, H. A deterioração de estruturas de concreto contendo agregados com sulfetos. *In*: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO. São Paulo, "***Anais…***" São Paulo: EPUSP, 2003. (1CD).

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

HASPARYK, N. P.; GOMIDES, M. J.; ANDRADE, M. A. S.; SILVA, H. H. A. B.; CARASEK, H. Estudos em laboratório de Concreto contendo Agregados com Sulfatos, **Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto**, Olinda, Pernambuco, 2005a.

HASPARYK, N. P.; GOMIDES, M. J.; SIGNINI, R.; SILVA, H. H. A. B.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M. Metodologias empregadas na investigação do teor de sulfetos. *In*: **Congresso De Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, III, 2005, Florianopólis: CITENEL, 2005b. (CD).

HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Determinação das expansões residuais em testemunhos de concreto e efeito do lítio na redução das expansões da RAA. *In:* SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. Setembro. **Anais...** Rio de Janeiro: editado por S. C. Kuperman e N. P. Hasparyk, 2006.

HASPARYK, N. P. Reação álcali-Agregado no Concreto. *In*: **CONCRETO: CIENCIA E TECNOLOGIA**. Editor Geraldo C. Isaia. 1ª Edição, v. 2, p. 933-1001, 2011.

HASPARYK, N. P.; SILVA, P. N.; BATISTA, D. G.; SILVA, H. H.A.B.; CAVALCANTI, A.J.C.T.; CARASEK, H.; ANDRADE. M.A.S. **Current studies on HPPs from the Paulo**

**Afonso Hydroelectric Complex in relation to the quality and durability of concretes.** In: 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2012, Maceió: DAM WOLD CONFERENCE, 2012a. (CD).

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. Estudo de caso envolvendo ataque combinado da RAA e DEF em concreto de fundação de edificação, **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**, Maceió, Alagoas, 2012b.

HOBBS, D. W.; TAYLOR, M. G. Nature of the thaumasite sulfate attack (TSA) mechanism in field concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 529- 533, 2000.

IBRACON. **Prática Recomendada IBRACON para Estruturas de Pequeno Porte (Edifícios nível 1).** São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto: Comitê Técnico CT-301 Concreto Estrutural, 2008. 39p.

INSTRUÇÃO ESPANHOLA. **UNE EN 1744-1**: Propriedades Tecnológicas De Los Materiales, Capítulo VI. 1999. 48p.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (*fib*). **Model Code 2010** (Final Version), *fib* Bulletins 65 & 66, Lausanne, 2012.

JANZEN, M. P., NICHOLSON, R. V.; SCHARER, J. N. Pyrrhotite reactions kinetics: reaction rates for oxidation by oxygen, ferric iron, and for nonoxidative dissolution. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 64, p. 1511-1522, 2000.

JENNIFER A. G.; HEMANT S. L.; ASHOK M. K. Testing pH of Concrete - Need for a standard procedure. **Concrete International**, 6p, abril, 2007.

JOHANSEN, V.; THAULOW, N.; SKALNY, J. Simultaneous presence of alkali-silica gel and ettringite in concrete. **Advances in Cement Research**, v. 17, p. 23-29, 1993.

KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; AGGELI, M. B. Hydration products of $C_3A$, $C_3S$ and Portland cement in the presence of $CaCO_3$. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1073-77, 2000.

KATAYAMA, T. How to identify carbonate rock reactions in concrete. **Materials Characterizations.** v. 53, p.85-104, 2004.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, n.1, São Paulo. ***Anais...*** São Paulo, Escola Politécnica da USP, p. 127-138, 1986.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO. São Paulo. "***Anais...***" São Paulo: ABCP, v. 1, p. 319-337, 1993.

KUBO, Y.; NAKATA, M. Effect of Types of Reactive Aggregate on Mechanical Propererties of Cocnrete Affected by Alkali-silica Reaction. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions. 10p. Austin, Texas - USA, 2012.

KUPERMAN, S. C.; VIEIRA, S. R. S.; FERREIRA, W. V. F.; TIBA, R. Tentativas para determinação do término da reação álcali-agregado na estrutura de uma tomada d'água. *In*:

SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia, "***Anais...***" CBGB/FURNAS, 1997.

KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. M.; PINFARI, J. C.; CARNEIRO, E. F. A CESP e a detecção da reação álcali-agregado. *In*: 26º SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2005, Goiânia, "***Anais...***" Rio de Janeiro: CBDB, 2005.

KUZEL, H. J. Initial reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 195-203, 1996.

KUZEL, H. J.; PÖLMANN, H. Hydration of $C_3A$ in the presence of $Ca(OH)_2$, $CaSO_4.2H_2O$ and $CaCO_3$. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 885-95, 1991.

LABORATTOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. Techniques et methods des laboratories des ponts et chausses. **Méthode d'essai des Ipc nº66**. Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne. Essai de performance. Boulevard Lefebvre, Paris, 2007.

LARIVE, C.; LOUARN, N. Diagnosis of alkali-aggregate reaction and sulphate reaction in French structures. Proceedings of 9th international conference AAR. **Concrete Society Publication**, London, v. 106, p. 587-598, 1992.

LIMA, A. L. C. **Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé - Vale do Jequitinhonha** - Minas Gerais. 2009. 206 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2009.

LOWSON, R. T. Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen. **Chemistry Reviews**, v. 82, p. 461-497, 1982.

MACHADO, F. B.; MOREIRA, C. A.; ZANARDO, A; ANDRE, A. C.; GODOY, A. M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A. J. R.; ARTUR, A. C.; OLIVEIRA, M. A. F. 2003. **Enciclopédia Multimídia de Minerais.** ISBN: 85-89082-11-3. Disponível em: http://www.rc.unesp.br/museudpm, último acesso em agosto de 2013.

MARINONI, N.; VOLTOLINI, M.; MANCINI, L.; CELLA, F. Influence of aggregate mineralogy on alkali-silica reaction studied by X-ray powder diffraction and imaging techniques. **Journal of Materials Science**, v. 47, n. 6, p. 2845-2855, 2012.

MARTIN, R. P.; RENAUD, J. C.; MULTON, S.; TOUTLEMONDE, F. STRUCTURAL Behavior of Plain and Reinforced Concrete Beams Affected by Combined AAR and DEF. **14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions.** 10p. Austin, Texas - USA, 2012.

MATSHEI, T.; LOTHENBACH, B. F.; GLASSER, P. The AFm phase in Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 118-130, 2007.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 286 f. Dissertação de mestrado, Mestrado em Geotecnia e Construção civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. 286p.

MEHTA, P. K. Scanning electron micrographic studies of ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 6, p. 169-182, 1976.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008. Revisores: Nicole P. Hasparyk, Paulo Helene & Vladimir A. Paulon, Tradução da 3ª edição em inglês sob o título Concrete: Microstructure, Properties and Materials.

MIKHLIN, YU. L.; KUKLINSKIY, A. V.; PAVLENKO, N. I.; VARNEK, V. A.; ASANOV, I. P.; OKOTRUB, A. V.; SELYUTIN, G. E.; SOLOVYEV, L. A. Spectroscopic and XRD studies of the air degradation of acid-reacted pyrrhotites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 66, n. 23, p. 4057-4067, 2002.

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Centro de Tecnologia Mineral. **Minerais aplicados à tecnologia ambiental: minerais verdes,** 2008. Disponível em: www.cetem.gov.br / publicacao / CTs/ CT2008-194-00.pdf , última acessado em março 2013.

MONTEIRO, J. P. M.; SHOMGLIN, K.; WENK, H.R.; HASPARYK, N.P. Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. ***ACI Materials Journal***, v. 98, n. 2, 2001.

MOURA, A. C. **Análisis numérico de presas de hormigón bajo acciones expansivas**. 2012. 307 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d´Enginyeria de la Construcció, Barcelona, 2012.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito das adições ativas na prevenção das reações álcali-sílica e álcali- silicato**. 2007. 166f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

NETO, C. S. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. *In*: **CONCRETO: CIENCIA E TECNOLOGIA**. Editor Geraldo C. Isaia. 1ª Edição, v. 1, p. 233-260, 2011.

NEVES, J. M. M. **Reacções Álcalis-sílica e Resistência aos Sulfatos em Betão – Ensaios**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) 2009. 57 f. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2ª edição, São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, I. **Reacción sulfática interna en presas de hormigón: cinética del comportamiento**. 2011. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d´Enginyeria de la Construcció, Barcelona, 2011.

OLIVEIRA, I.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 43, p. 95-104, 2013.

OLIVEIRA, I.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. New unreacted-core model to predict pyrrhotite oxidation in concrete dams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, p. 372-381, 2013.

PACHECO, R. F. R. **Análise do módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em centrais na grande vitória. Experimentos e estatística.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2006.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. 1981. 125 f. São Paulo, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1981.

PEIXOTO. Peixoto Analysis of Concrete Agregates. **Usina Marechal Mascarenhas de Moraes (Peixoto)**. Setembro. 1957. 1 p. (Documento digitalizado no Arqtec da biblioteca da Eletrobrás Furnas, sob o Número de Furnas RE3_107.515).

PEIXOTO H. E. DEVELOPMENT. Concrete Mixes Used 1 Cub YD Mix. **Usina Marechal Mascarenhas de Moraes (Peixoto)**. setembro. 1957b. 1f (folha A2). (Documento digitalizado no Arqtec da biblioteca da Eletrobrás Furnas, sob o Número de Furnas RE4_107.714).

PEIXOTO. Mistura para um metro cúbico de concreto. **Usina Marechal Mascarenhas de Moraes (Peixoto)**. Janeiro. 1959a. 1 p. (Documento digitalizado no Arqtec da biblioteca da Eletrobrás Furnas, sob o Número de Furnas RE4_107.710).

PEREIRA, W. J. L. **Impermeabilização das superfícies de contato para implantação de estruturas de concreto em maciço de rocha sulfetada - o caso da UHE Irapé**. 2008. 184 f. Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

POOLE, A.B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. *In*: SWAMY, R. N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Glasgow,London: Blackie, New York: Van Nostrand Reinhold, p. 1-29, 1992.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. The alkali-silica reaction, Part I: use of the Double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 1, p. 10-17, 1997.

PRISZKULNIK, S. Inspeção e diagnóstico de Estruturas de Concreto Afetadas pelas Reações Cimento-Agregado . In: ISAIA, G. C., **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Cap. 34, v. 2, 1ª edição, São Paulo: Ibracon, 2005.

PRISZKULNIK, S. Ações físicas e químicas de degradação do concreto. *In*: **CONCRETO: CIENCIA E TECNOLOGIA**. Editor Geraldo C. Isaia. 1ª edição, v. 2, p. 1003-1028, 2011.

QUARCIONI, V.A. Reconstituição de Traço de Argamassas: Atualização do Método IPT. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 188 p.

REES, G. N.; BALDWIN, D. S.; WATSON, G. O.; HALL, K. C. Sulfide formation in fresh water sediments, by sulfate-reducing microorganisms with diverse tolerance to salt. **The Science of the Total Environment**, 2010.

RESENDE, D. S.; SILVA, M. V. M. S.; FERREIRA, M. C. N. F.; BEZERRA, A. C. S. Expansibilidade por reação álcali-agregado (RAA) em concretos com adição de cinzas de cavaco de eucalipto (CCE). *In:* XXIX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Comitê Brasileiro de Barragens. **Anais…** Porto de Galinhas, 2013.

RITCHIE, A. I. M. Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport. **Mineralogical association of Canada**, short course Handbook on environmental geochemistry of sulfide mine wastes, Canadá, v. 22, p. 201-245, 1994.

DUCHESNE, J.; FOURNIER, B. Petrography of concrete deteriorated by weathering of sulphide minerals. *In*: 32th ANNUAL MEETING OF ICMA. **Proceedings…** San Francisco, Canadá, 2011.

RODRIGUES, A.; DUCHESNE, J.; FOURNIER, B.; DURAND, B.; RIVARD, P.; SHEHATA, M. Mineralogical and Chemical Assessment of Concrete Damaged by the Oxidation of Sulfide-Bearing Aggregates: Importance of Thaumasite Formation on Reaction Mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1336-1347 , 2012a.

RODRIGUES, A.; DUCHESNE, J.; FOURNIER, B. Microscopic analysis of the iron sulfide oxidation products used in concrete aggregates. *In*: 33th ANNUAL MEETING OF ICMA. **Proceedings…** San Francisco, Canadá, 2012b.

RODRIGUES, A.; DUCHESNE, J.; FOURNIER, B. Deterioration in concrete incorporating a sulfide-bearing aggregate: petrographic characteristics and evolution of the secondary reaction products. *In:* 14th EUROSEMINAR ON MICROSCOPY APPLIED TO BUILDING MATERIALS. Copenhagen. **Proceedings…** Society of Concrete Petrographers, EMABM, Denmark, 2013.

RUSSEL, J.B. **Química Geral**, Ed. Makron Books, 1994.

SARKAR, S.; MAHADEVAN, S.; MEEUSSEN, J. C. L.; SLOOT, H. V. D.; KOSSON, D. S. Numerical simulation of cementitious materials degradation under external sulfate attack. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 241-252, 2010.

SCHMIDT, T.; LEEMANN, A.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. Physical and microstructural aspects of iron sulfide degradation in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 41 , p. 263-269 , 2011.

SCHNEIDER, J. F.; HASPARYK, N. P.; SILVA, D. A.; MONTEIRO, P. J. M. Effect of lithium nitrate on the alkali-silica reaction gel. **Journal of the American Ceramic Society**, v.91, p. 3370-3374, 2008. Doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02638.x. Disponível em: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jace.2008.91.issue-10/issuetoc. Último acesso realizado em agosto, 2013.

SEIGNOL, J. F.; OMIKRINE-METALSSI, O.; BAGHDADI, N.; TOUTLEMONDE, F. From AAR to Def: Numerical Modeling of Structures Affected by Expansive Reactions in Concrete. **14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions.** 10p. Austin, Texas - USA, 2012.

SHAYAN, S. Deterioration of a concrete surface due to the oxidation of pyrite contained in pyritic aggregates, **Cement and Concrete Research**, v. 18, p. 723-730, 1988.

SHAYAN, A.; QUICK, G. W. Relative importance of deleterious reactions in concrete: formation of AAR products an secondary ettringite. **Advances in Cement Research**, v. 4, n. 16, p. 149-157, 1991.

SHAYAN, A.; QUICK, G.W. Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers. **ACI Mater**. p. 48-61, 1992.

SHAYAN, A.; AL-MAHAIDI, R.; XU, A. Durability and Strength Assessment of Aar-Affected Bridge Deck Planks. **14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions**. p.422-432. Trondheim. 2008

SILVA, C. M. **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado**. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

SILVA, G. A. **Recuperação de blocos de coroamento afetados pela reação álcali-agregado**. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Católica de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil, Pernambuco, 2007a.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso /CHESF**. Influência da reação nas propriedades do concreto. 2007. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de construção civil, São Paulo, 2007c.

SILVA, H. H. A . B.; GRAÇA, N. G.; RIBEIRO, E. E. W. A.; GOMIDES, M. J.; Metodologias para Investigação de Sulfetos em Agregados para Concreto - Experiências de Furnas utilizadas em Obras. **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2007b.

SILVA, H. H. A. B.; GRACA, N. G.; RIBEIRO, E. E. W. A.; GOMIDES, M. J. Metodologias para investigação de sulfetos em agregados para concreto - experiências de furnas utilizadas em obras. **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2007.

SILVA, P. N.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVA, A. C.; DAVID, D.; JULIANI, M. Verificação da qualidade do concreto da casa de força da UHE Paulo Afonso III por ensaios de ultrassom. **Anais do 50° Congresso Brasileiro do Concreto**, 15p. 2008.

SILVA, H. H. A. B.; CAROLINA, S. D.; SANTANA, C. R.; HASPARYK, N. P.; LOPES, A. D. Avaliação Comparativa entre Diferentes Métodos Analíticos para Quantificação de Sulfetos em Agregados. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**, Maceió, Alagoas, 2012.

SILVEIRA, A. L. Z. P. **Estudo da Reação Álcali-agregado em Rochas Carbonáticas**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Brasília, 2006.

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

SUN, C.; CHEN, J.; ZHU, J.; ZHANG, M.; YE, J. A new diffusion model of sulfate ions in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 39, p. 39-45, 2013.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2ª edição, New York, editor: Thomas Telford, 1997.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 683-93, 2001.

TAGNIT-HAMOU, A.; SARIC-CORIC, M.; RIVARD, P. Internal deterioration of concrete by oxidation of pyrrhotitic aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 99-107, 2005.

THAULOW, N.; JOHANSEN, V.; JAKOBSEN, U. H.; What causes delayed ettingite formation? *In:* MATERIALS RESERCH SOCIETY´S. Editores: SCRIVENER, K. L.; YOUNG, J. F. **Proceedings…** Mecanisms of chemical degradation of cement-based systems. Boston, USA, p. 219-226, 1997.

THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN, T. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. **Cement and Concrete Research,** v. 38, p.841-847, 2008.

TIAN, B.; COHEN, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 117-123, 2000.

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

TIECHER, F. **Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado**. 2010. 288 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre-RS, 2010.

TORRES, E.; AYORA, C.; CANOVAS, C.R.; GARCÍA-ROBLEDO, E.; GALVÁN, L.; SARMIENTO, A.M. Metal cycling during sediment early diagenesis in a water reservoir affected by acid mine drainage. **Science of the Total Environment**. p. 461-462, 2013.

TUOHY, B. **Report of the Pyrite Panel**. Report, 2012. Disponível em: http://www.environ.ie/en/PyriteReport/.

TUNG, W.S.; KUPERMAN, S. C.; MELO, I. A.; DARDIS, C.R. Assessment of Alkali-aggregate Reaction at Sabesp`s Dams. 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions. 9p. Austin, Texas - USA, 2012.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)-Universidade Estadual de Campinas. 2002. 213p.

VÁZQUEZ, E. Informe sobre la influencia de La presencia de pirita y de sus procesos degradativos en los materiales de construcción. **Relatório Técnico de Consultoria**. 1999.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; HASPARYK, N. P.; Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétricas. *In*: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. "***Anais...***" Goiânia: CBGB/FURNAS, p. 69-80, 1997.

VIVIAN, H. E. Alkalis in cement and concrete. In: THE EFFECT OF ALKALIES ON THE PROPERTIES OF CONCRETE, 1976, London. "***Proceedings…***"London: Cement and Concrete Association, p. 9-25, 1976.

VLAHOVIC, M. M.; MARTINOVIC, S. P., BOLJANAC, T. DJ.; JOVANIC, P. B.; VOLKOV-HUSOVIC, T. D. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3926-3934, 2011.

WANG, H.; GILLOTT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. **Cement and Concrete Research**. v. 21, n. 4, p. 647-654, 1991.

WAKIZAKA, Y.; ICHIKAWA, K.; KAKAMURA,Y.; ANAN, S. The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration **Cement and Concrete Research**. v. 4, p. 1-8, 2003.

WIGUM, B. J. "**Alkali-aggregate reaction in concrete -properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks**". 1995. 227 f. PhD. Thesis, University of Trondheim, the Norwegian Institute of Technology, Norway, 1995.

WUA, Y.; RIEFLERB, C.; WANGC, H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 987-993, 2005.

ZHENG, J. P.; GRIFFIN, W. L.; QI, L.; O'REILLY, S. Y.; SUN, M.; ZHENG, S.; PEARSON, N.; GAO, J. F.; YU, C. M.; SU, Y. P.; TANG H, Y.; LIU, Q. S.; WU, X. L. Age and composition of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts reflect Paleogene underplating beneath the North China Craton. **Chemical Geology**, v. 264, f. 1-4, p. 266-280, 2009.

# APÊNDICES

**APÊNDICE A** – Detalhes com as indicações das localizações dos serviços de extração de testemunhos de concreto das usinas estudadas.

**Figura A.1** – Arranjo Geral da UHE Corumbá.

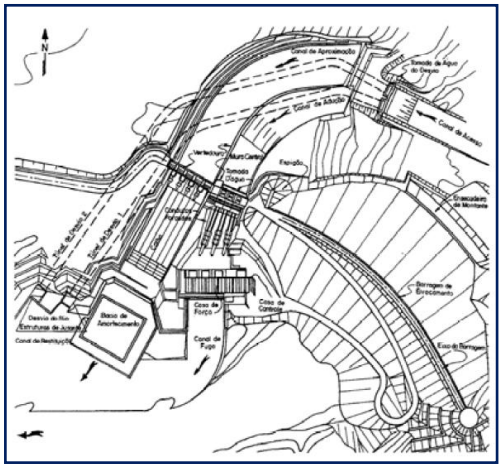


**Figura A.2** – Seção transversal do corpo da barragem em concreto da UHE Corumbá com o detalhe da localização da galeria de drenagem da tomada d'água – região de extração de testemunho de concreto.

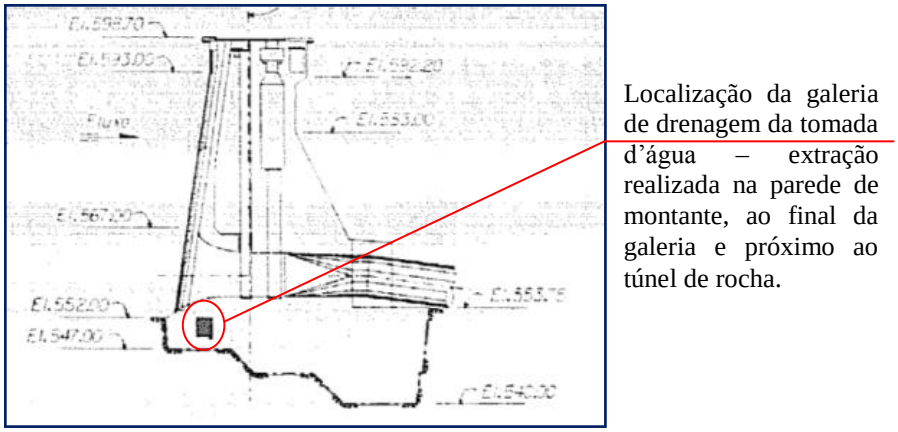



**Figura A.3** – Seção transversal do corpo da barragem em concreto da UHE Corumbá com indicação dos locais de extração de testemunhos realizadas na galeria de drenagem do vertedor três.

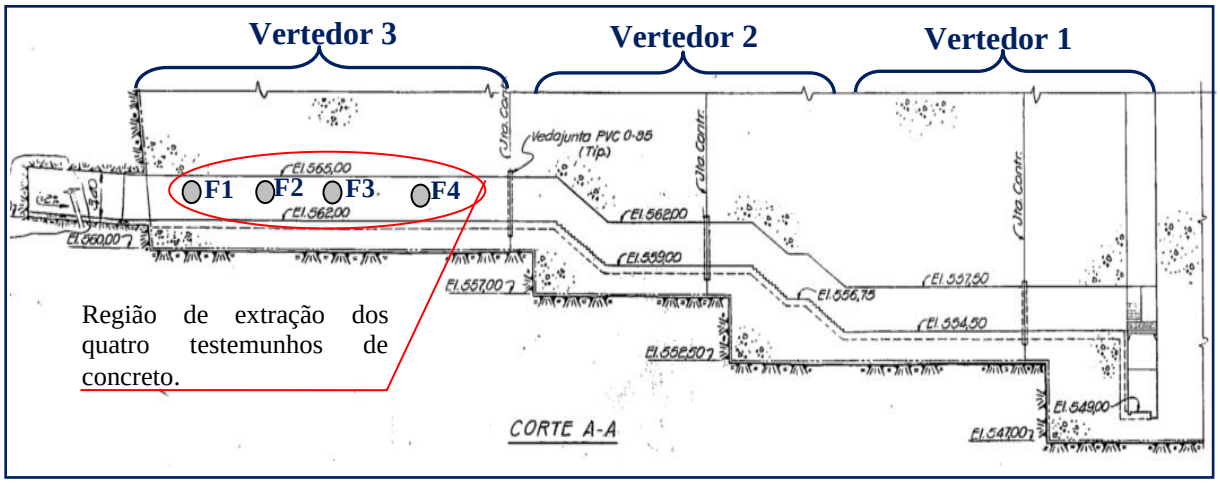


**Figura A.4** – Seção transversal do corpo da barragem em concreto da UHE Corumbá com a indicação dos locais de extração de testemunhos realizadas no poço da escada do muro central.

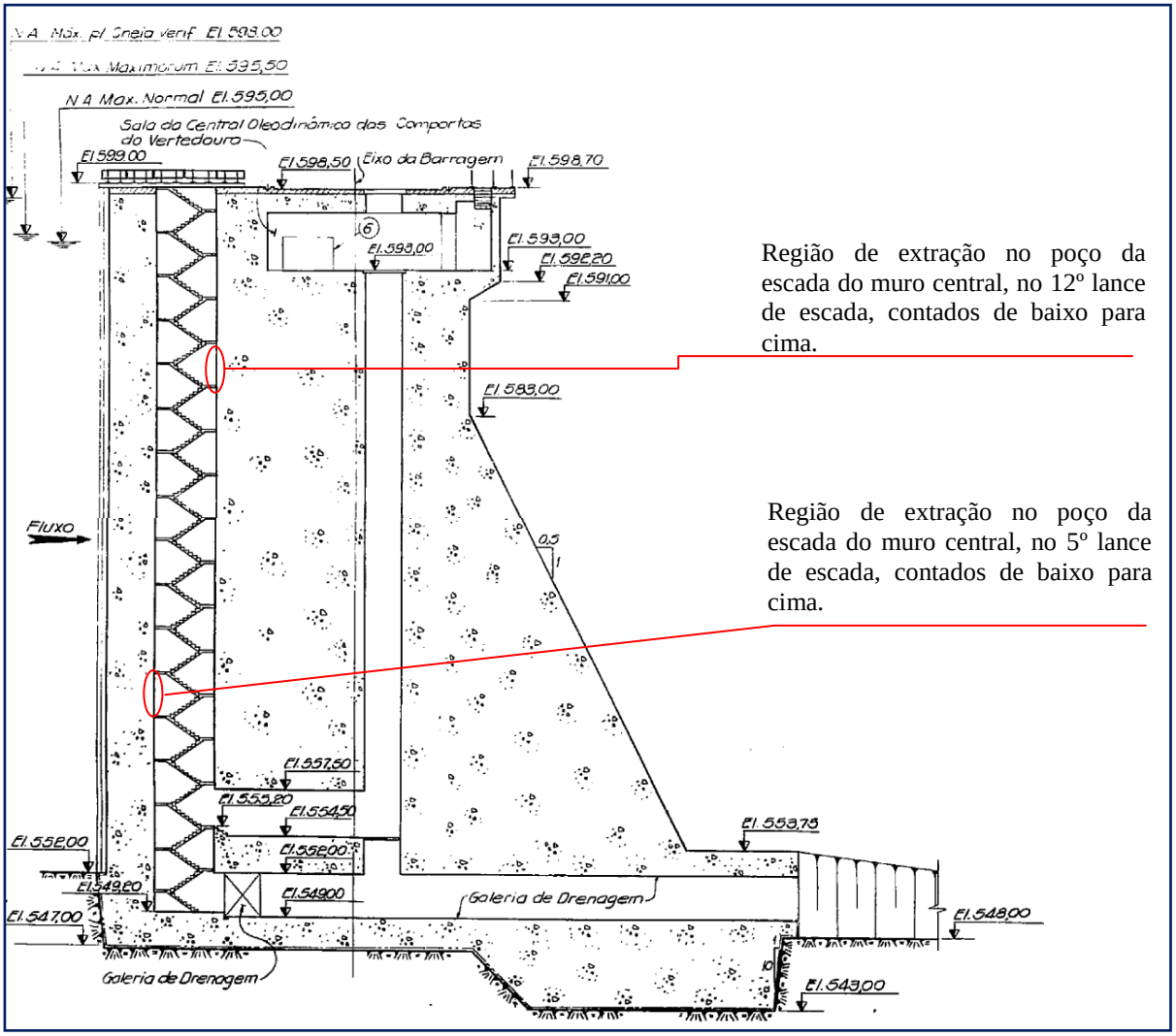



**Figura A.5** – Planta baixa da UHE Mascarenhas com indicação do local de extração dos testemunhos de concretos.

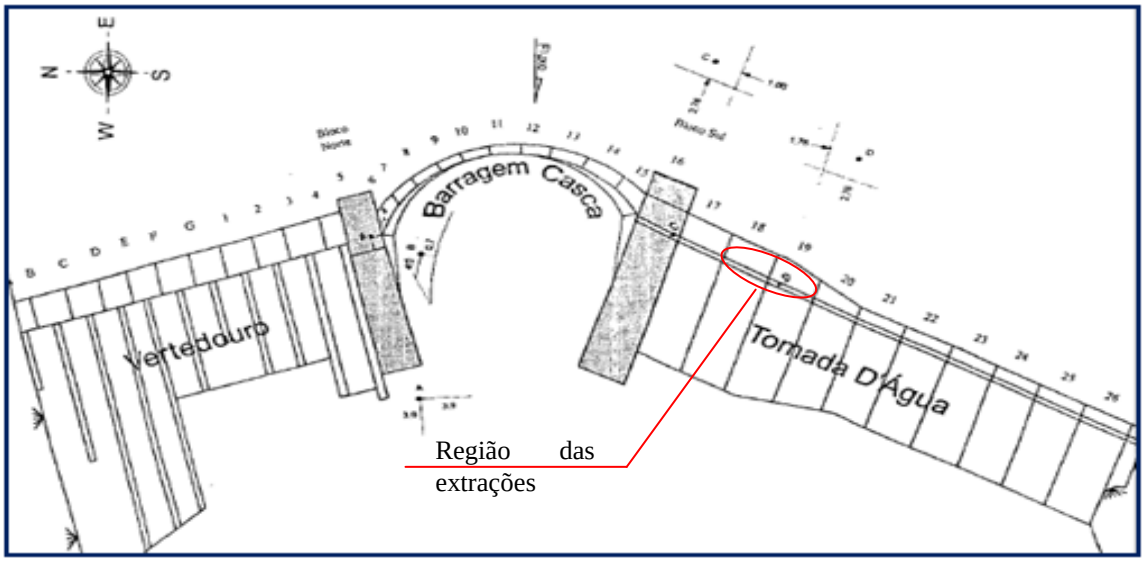


**Figura A.6** – Seção transversal típica da tomada d'água da UHE Mascarenhas, com indicação da localização da galeria de drenagem.

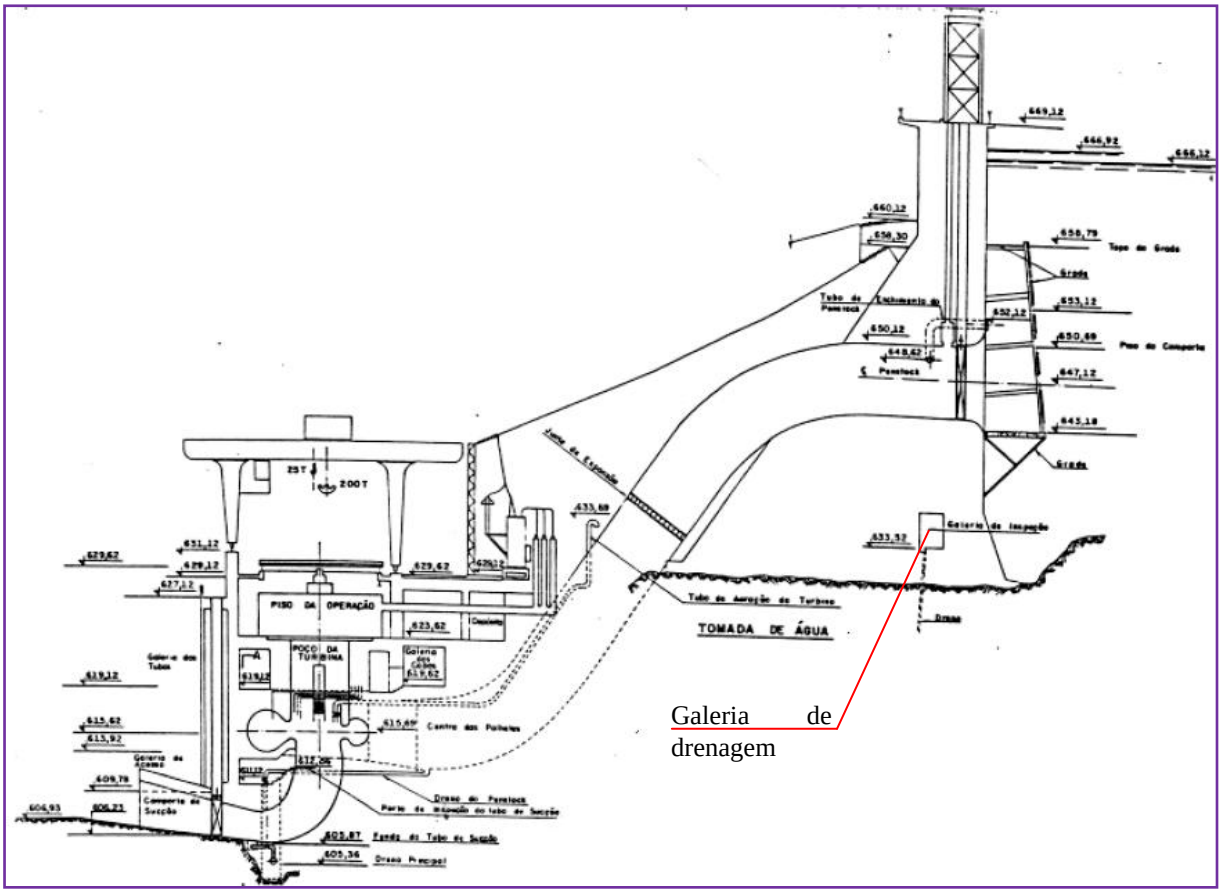



**Figura A.7** – Croqui das extrações de testemunhos de concreto realizadas na parede de montante do 19º bloco de concretagem da galeria de drenagem da tomada d'água da UHE Mascarenhas.

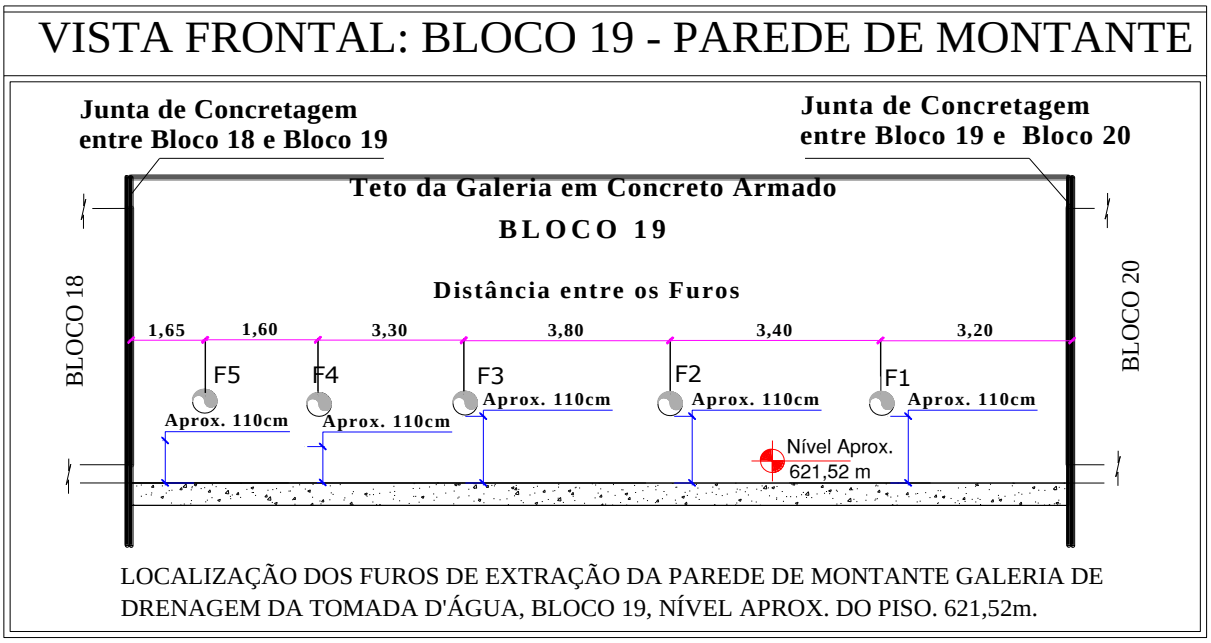


**Figura A.8** – Croqui das extrações de testemunhos de concreto realizadas na parede de montante do 18º bloco de concretagem da galeria de drenagem da tomada d'água da UHE Mascarenhas.

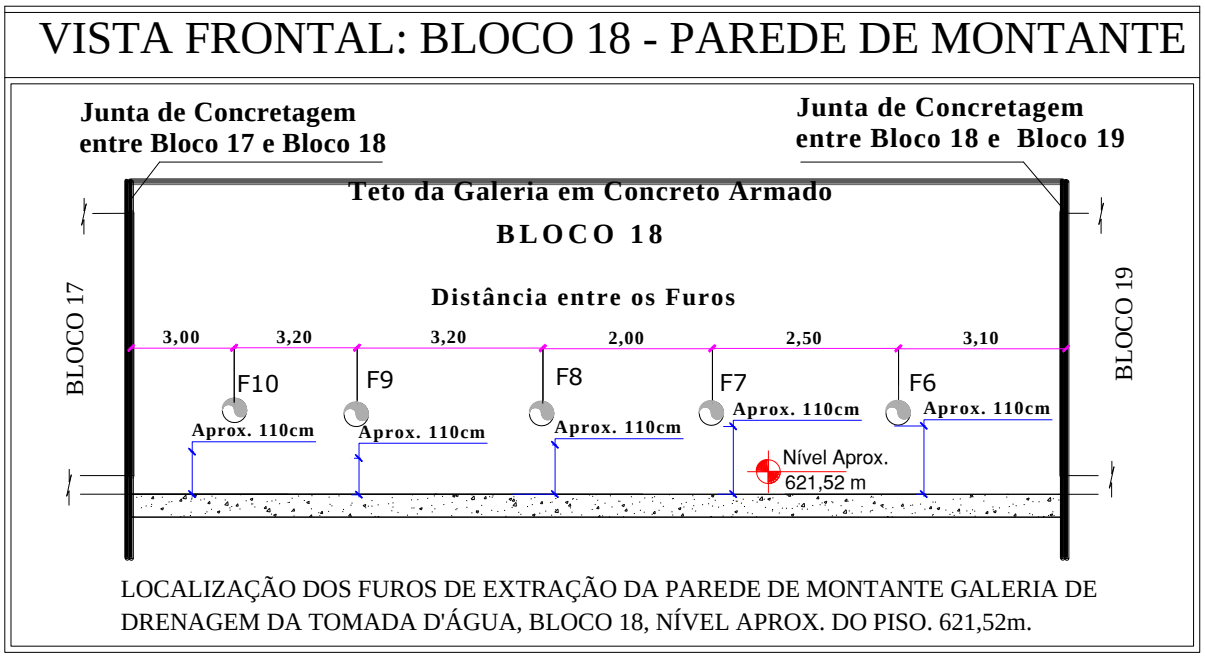



**Figura A.9** – Planta baixa com indicação da localização da UHE PA II (Cedido gentilmente pelo Eng. Alberto Cavalcanti da CHESF).

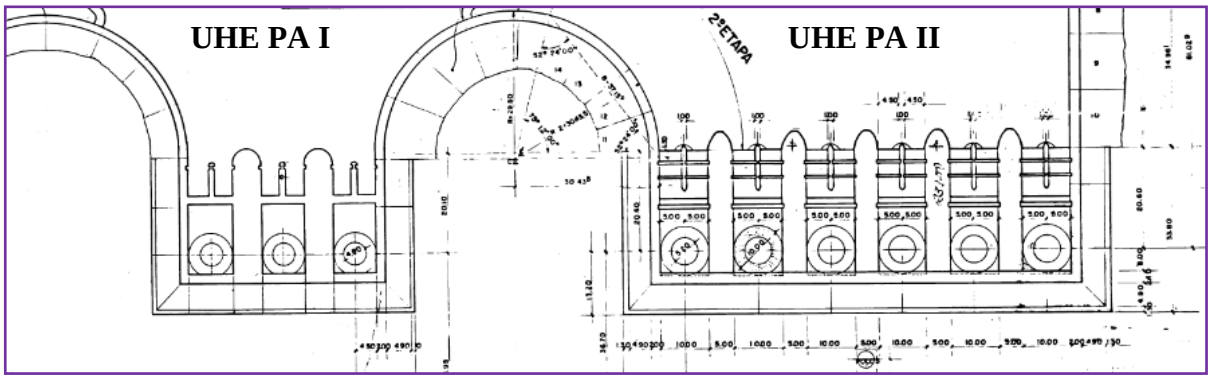


**Figura A.10** – Seção transversal típica da UHE PA II, com indicação da localização da galeria de drenagem I (Cedido gentilmente pelo Eng. Alberto Cavalcanti da CHESF).

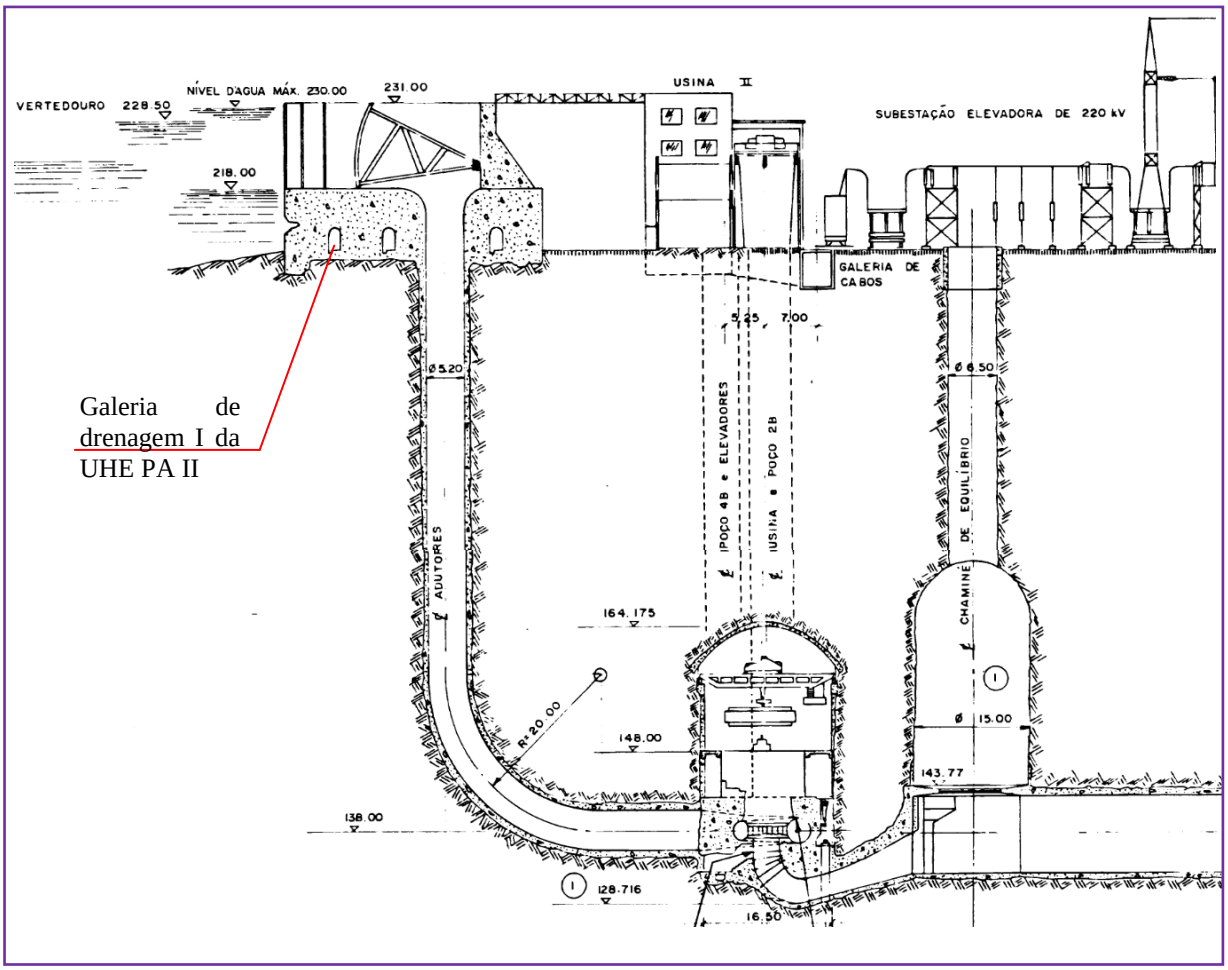



**Figura A.11** – Croqui das extrações de testemunhos de concreto realizadas na galeria de drenagem I da UHE PA II.

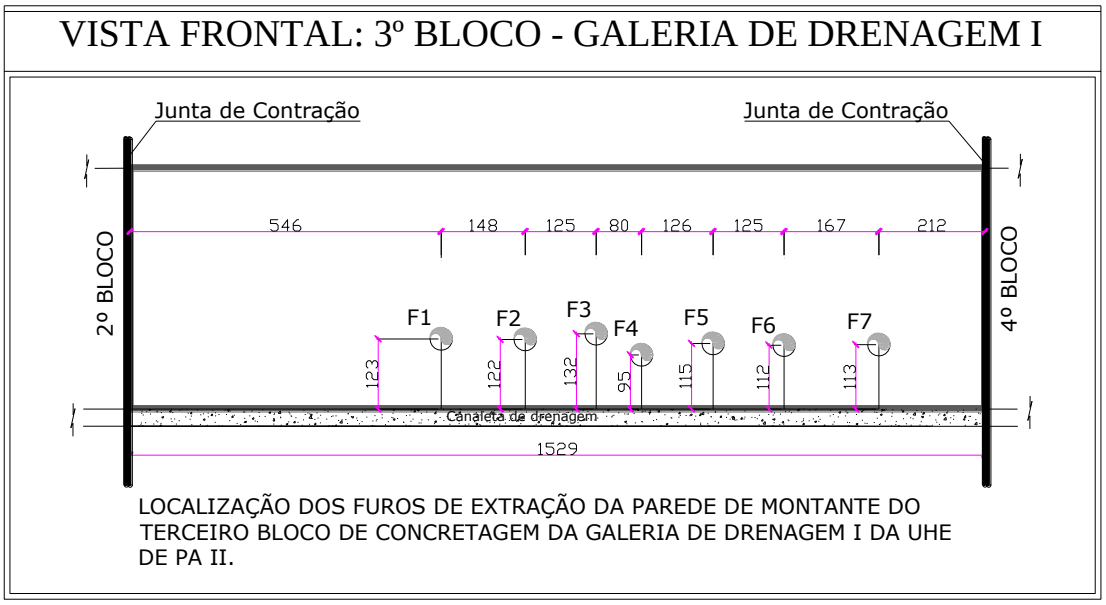


**Figura A.12** – Planta baixa da UHE PA IV (Cedido gentilmente pelo Eng. Alberto Cavalcanti da CHESF).

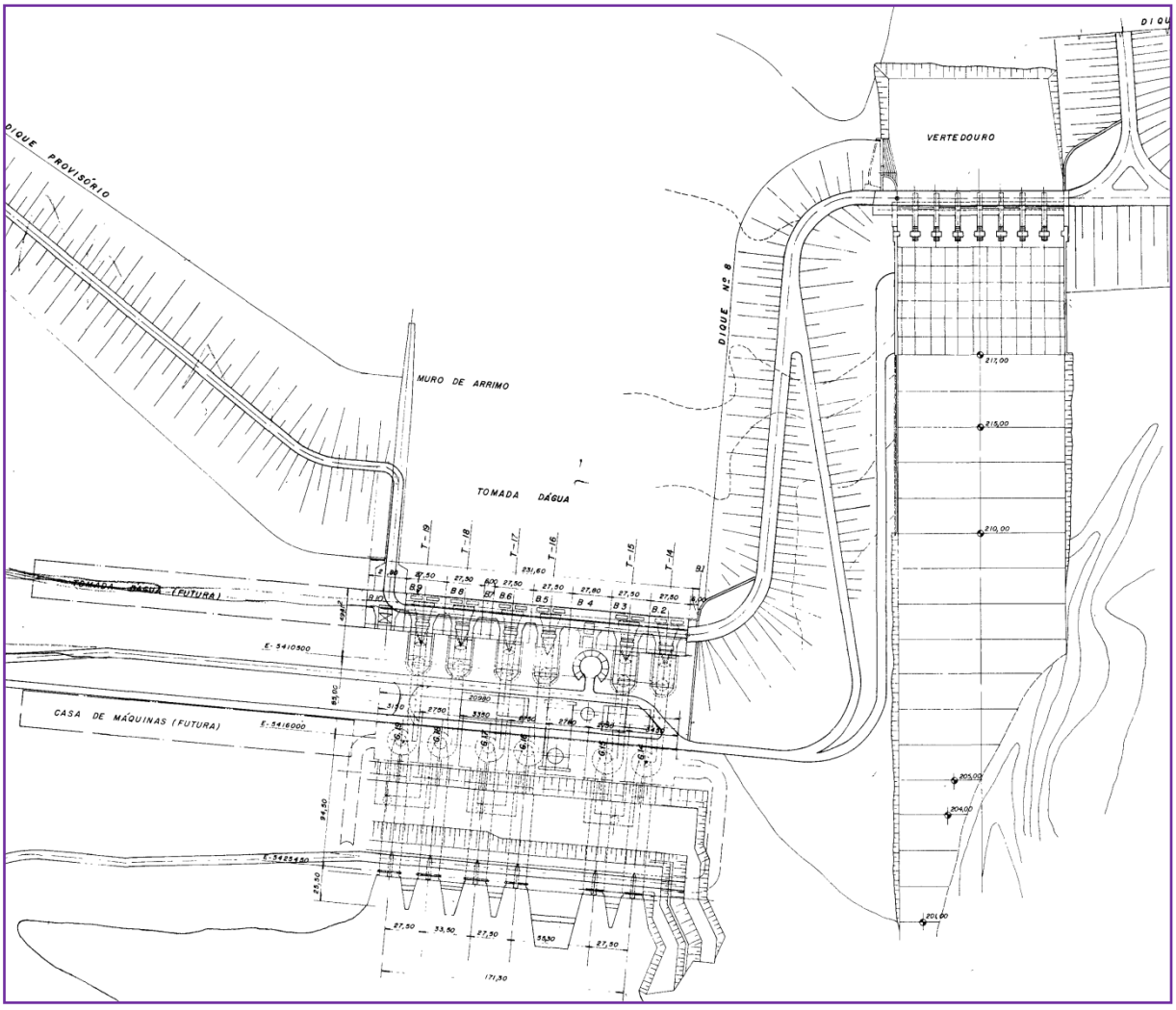


**Figura A.13** – Seção transversal típica do vertedor da UHE PA IV, com indicação da localização da galeria de drenagem (Cedido gentilmente pelo Eng. Alberto Cavalcanti da CHESF).

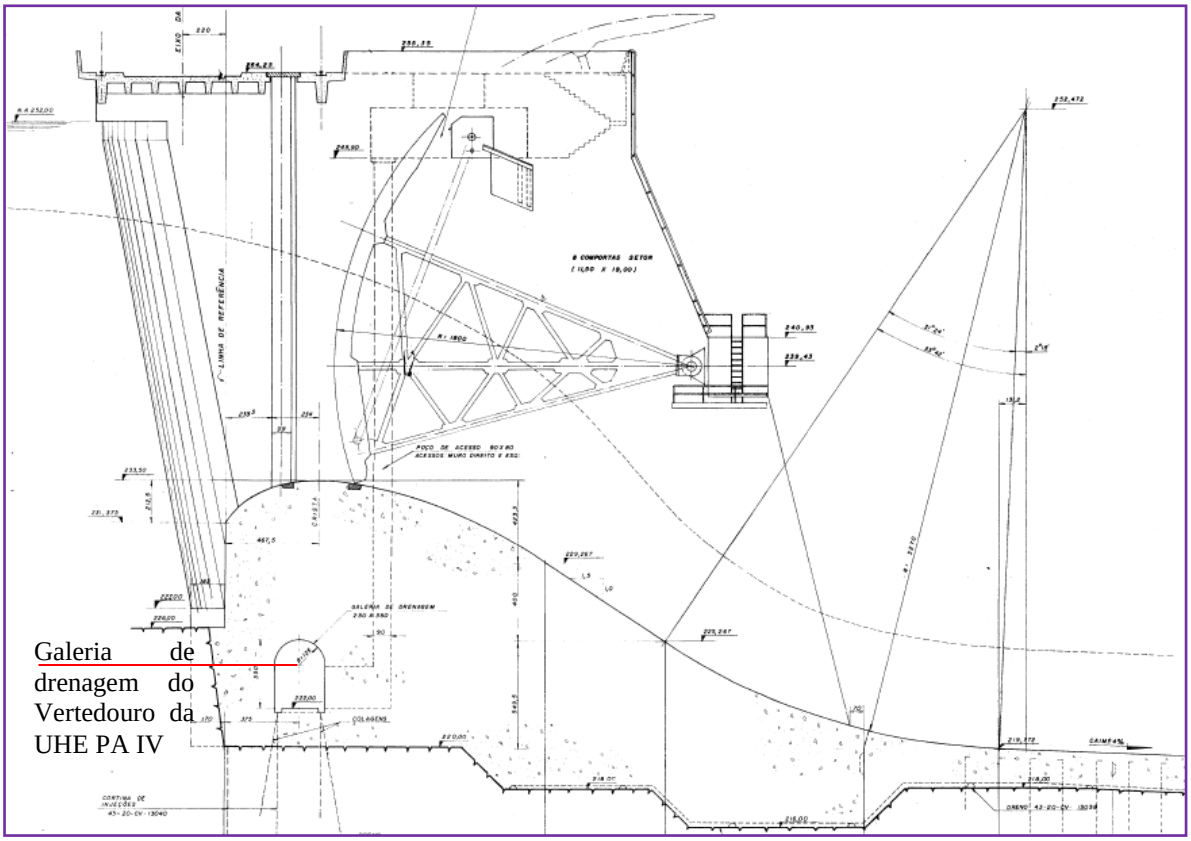



**Figura A.14** – Seção transversal típica da tomada d'água da UHE PA IV, com indicação da localização da galeria de drenagem (Cedido gentilmente pelo Eng. Alberto Cavalcanti da CHESF).

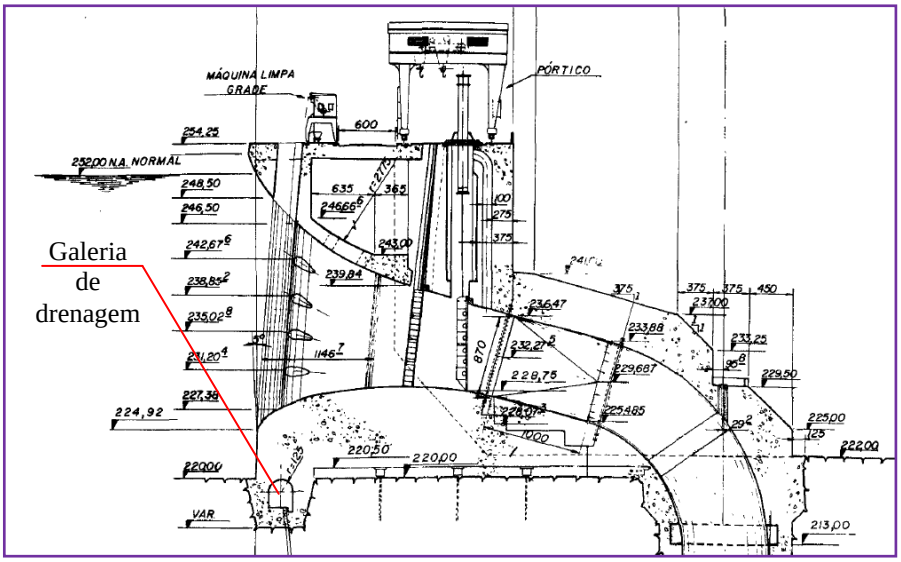


**Figura A.15** – Croqui das extrações de testemunhos de concreto realizadas na galeria de drenagem da tomada d'água da UHE PA IV.

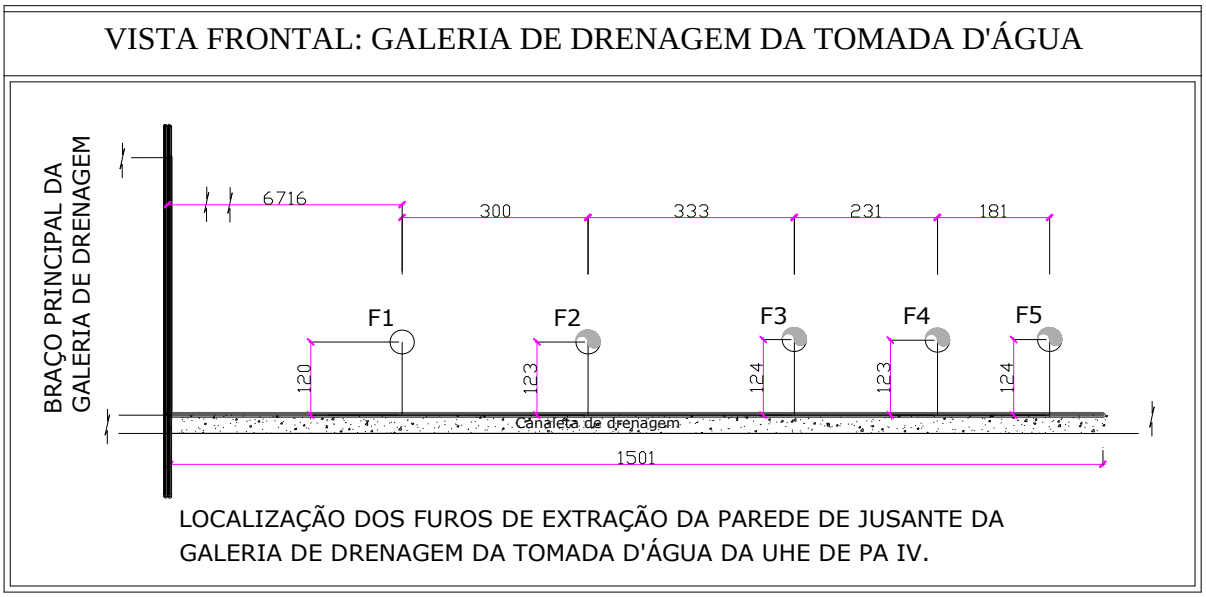



**Figura A.16** – Croqui das extrações de testemunhos de concreto realizadas na galeria de drenagem do vertedor da UHE PA IV.

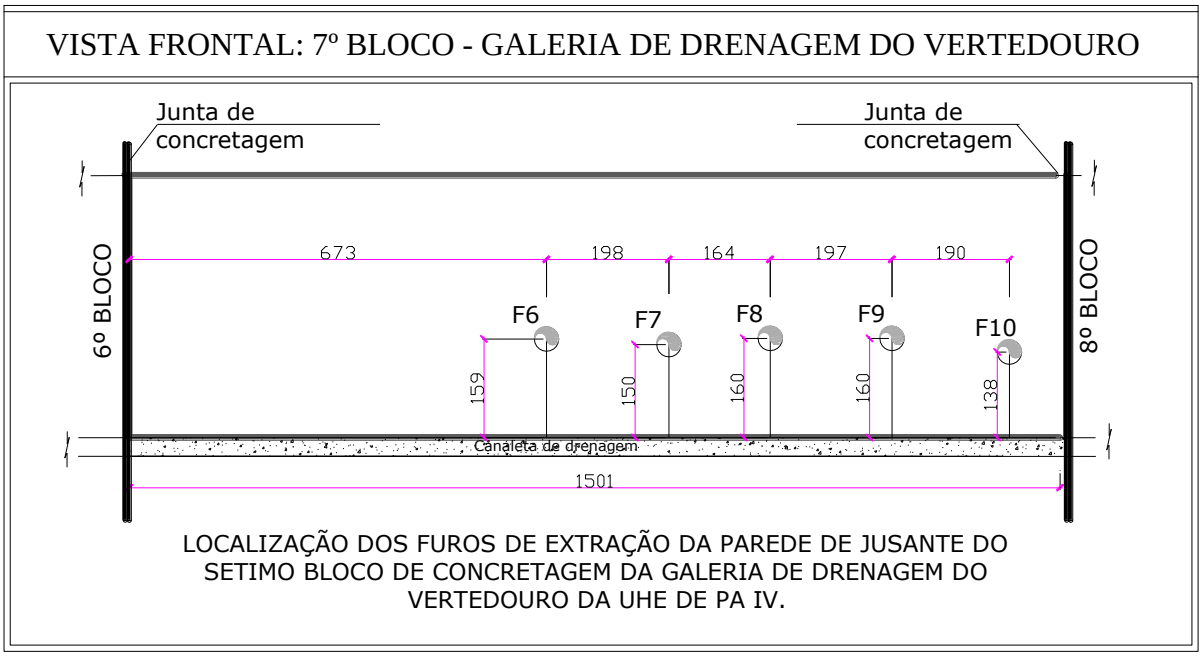


**Figura A.17** – Planta baixa da UHE Moxotó (Cedido gentilmente pelo Eng. Alberto Cavalcanti da CHESF).

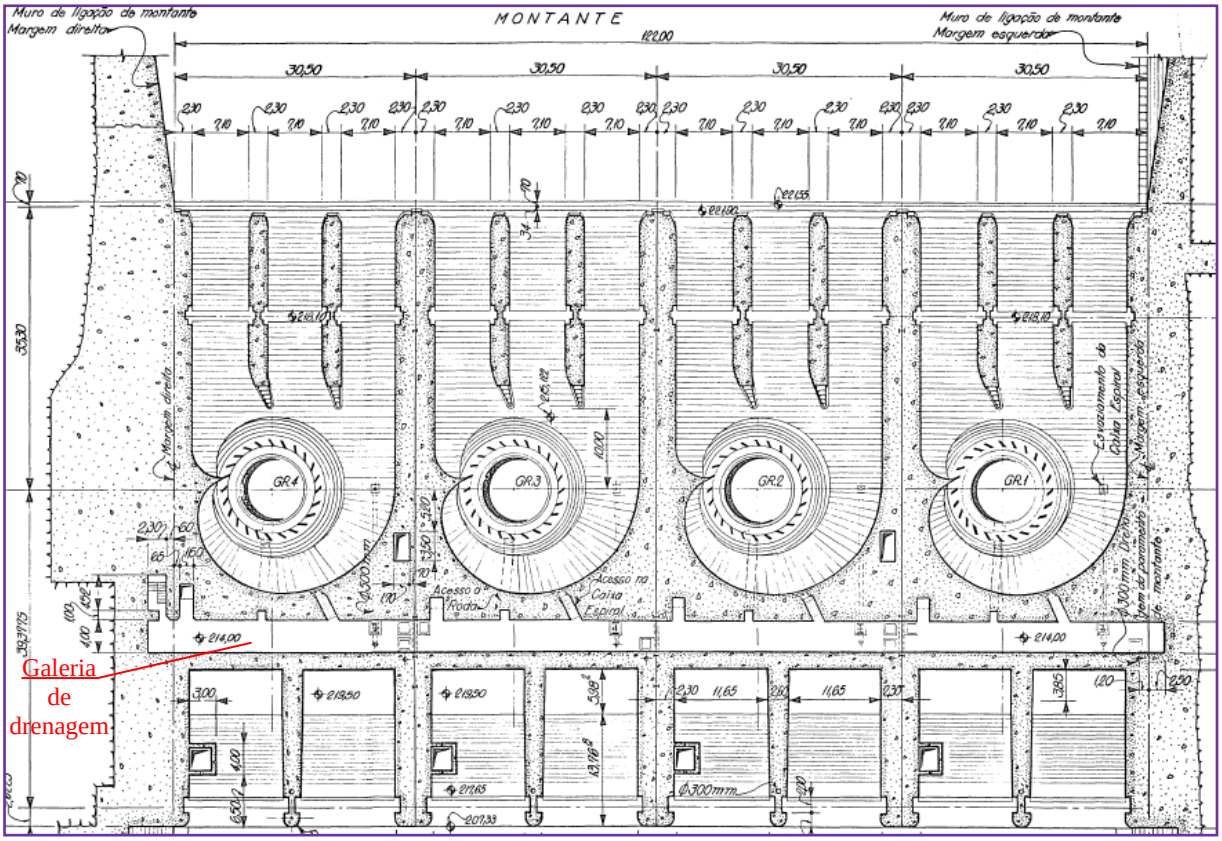



**Figura A.18** – Planta baixa da UHE Moxotó (Cedido gentilmente pelo Eng. Alberto Cavalcanti da CHESF).

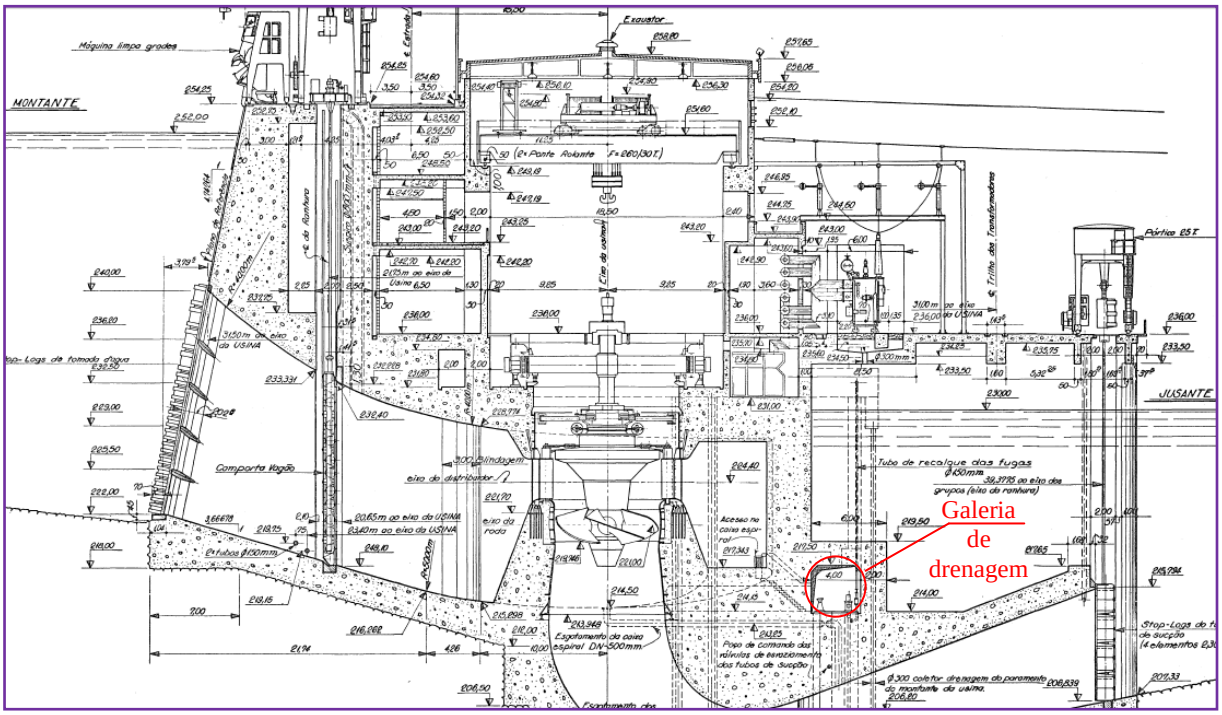
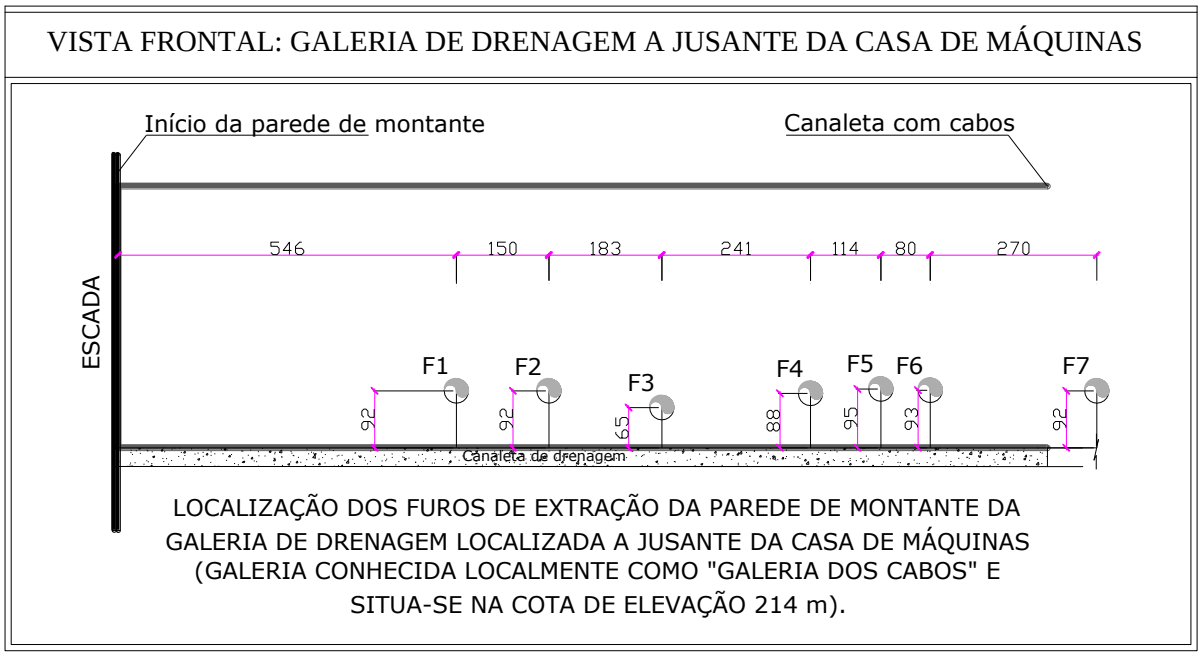


**Figura A.19** – Croqui das extrações de testemunhos de concreto realizadas na galeria de drenagem da UHE Moxotó.



**APÊNDICE B** – Dados das extrações e coleta de material rochoso das usinas estudadas.

**Tabela B.1** – Dados das extrações e coleta de material rochoso das usinas estudadas

| UHE | Testemunhos de concreto | | Material rochoso coletado | |
|---|---|---|---|---|
| | **Região de extração** | **N. de testemunhos** | **Tipo de material** | **Local da coleta/extração** |
| Corumbá | Ta | 1 | Testemunhos de rocha resultantes de sondagem rotativa (SR) da época da construção da usina | Galpão anexo à usina (local da estocagem) |
| | Vt | 4 | | |
| | El.5 | 2 | | |
| | El.12 | 2 | | |
| Masca-renhas | Ta.B18 | 5 | Testemunhos de rocha quartzítica | Extração realizada na pedreira já desativada e explorada durante a construção da UHE Mascarenhas |
| | Ta.B19 | 5 | | |
| PA II | Ta | 7 | Fragmentos de rocha granítica | Coleta realizada em escavação de uma trincheira na região dos transformadores da subestação de PA I, II e III, próximo à chaminé de equilíbrio de PA II. |
| PA IV | Ta | 5 | Fragmentos de rocha granítica | Coleta realizada no enrocamento do lado direito do vertedor da barragem de terra com núcleo de argila de PA IV |
| | Vt | 5 | | |
| Moxotó | GD | 7 | Fragmentos de rocha granítica | Coleta realizada ao longo do enrocamento, lado esquerdo da barragem de terra com núcleo de argila. |

**APÊNDICE C** – Ensaios físicos realizados com os concretos.

Os ensaios de caracterização física realizados foram: absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Os ensaios seguiram as diretrizes da NBR 9778 (ABNT, 2005).

O índice de absorção de água pelo concreto foi determinado após a sua imersão em água por um período de 72 horas. Conforme descrito pela NBR 9778 (ABNT, 2005), esta absorção refere-se ao incremento de massa do corpo sólido poroso do concreto devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco. Ainda de acordo com a norma referenciada, o índice de vazios refere-se à relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra de concreto ensaiada.

Segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005) a massa específica seca, referente à relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, já a massa específica após saturação e fervura do concreto é a massa específica real, sendo esta última a relação entre a massa do material seco e o seu volume, desconsiderando-se os seus poros permeáveis.

Os ensaios físicos compreenderam a determinação da absorção, índice de vazios, massa específica seca, massa específica após saturação e fervura, massa específica real do concreto.

Na Figura C.1, tem-se a ilustração de um fragmento de concreto obtido após o corte do testemunho extraído.

**Figura C.1** – Fragmentos de concreto obtidos após o corte do testemunho extraído

Encontram-se nas Tabelas C.1 a C.5 os valores obtidos para as propriedades físicas dos concretos extraídos das UHEs estudadas.

**Tabela C.1** – Valores obtidos para as propriedades físicas do concreto – UHE Corumbá.

| Identificação do corpo de prova | Absorção (%) | Índice de vazios (%) | Massa específica (kg/dm³) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Seca | Após saturação e fervura | Real |
| C3.CVt | 6,33 | 14,16 | 2,24 | 2,38 | 2,61 |
| C5.CVt | 6,2 | 13,73 | 2,22 | 2,35 | 2,57 |
| **Média aritmética** | **6,27** | **13,95** | **2,23** | **2,37** | **2,59** |
| **Desvio padrão** | **0,06** | **0,21** | **0,01** | **0,01** | **0,02** |
| **C.V (%)** | **1%** | **2%** | **0%** | **1%** | **1%** |
| C6.CEl.5 | 5,01 | 12,01 | 2,4 | 2,52 | 2,72 |
| C7.CEl.5 | 6,21 | 13,79 | 2,22 | 2,36 | 2,58 |
| **Média aritmética** | **5,61** | **12,90** | **2,31** | **2,44** | **2,65** |
| **Desvio padrão** | **0,60** | **0,89** | **0,09** | **0,08** | **0,07** |
| **C.V (%)** | **11%** | **7%** | **4%** | **3%** | **3%** |
| C8.CEl.12 | 6,27 | 14,39 | 2,29 | 2,44 | 2,68 |
| C9.CEl.12 | 5,38 | 12,53 | 2,33 | 2,46 | 2,66 |
| **Média aritmética** | **5,83** | **13,46** | **2,31** | **2,45** | **2,67** |
| **Desvio padrão** | **0,45** | **0,93** | **0,02** | **0,01** | **0,01** |
| **C.V (%)** | **8%** | **7%** | **1%** | **0%** | **0%** |

**Tabela C.2** – Valores obtidos para as propriedades físicas do concreto – UHE Mascarenhas.

| Identificação do Corpo de prova | Absorção (%) | Índice de Vazios (%) | Massa Específica (kg/dm³) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Seca | Após saturação e fervura | Real |
| **C1-MTa** | 5,38 | 11,99 | 2,23 | 2,35 | 2,53 |
| **C2.MTa** | 5,31 | 12,04 | 2,27 | 2,39 | 2,58 |
| **C3.MTa** | 6,45 | 14,06 | 2,18 | 2,32 | 2,54 |
| **C4.MTa** | 5,82 | 12,97 | 2,23 | 2,36 | 2,56 |
| **C5.MTa** | 5,12 | 11,69 | 2,28 | 2,40 | 2,59 |
| **Média aritmética** | **5,62** | **12,55** | **2,24** | **2,36** | **2,56** |
| **Desvio padrão** | **0,48** | **0,87** | **0,04** | **0,03** | **0,02** |
| **C.V (%)** | **8%** | **7%** | **2%** | **1%** | **1%** |
| **C6.MVt** | 6,38 | 13,53 | 2,12 | 2,26 | 2,45 |
| **C7.MVt** | 5,99 | 13,02 | 2,17 | 2,30 | 2,50 |
| **C8.MVt** | 5,17 | 11,59 | 2,24 | 2,36 | 2,53 |
| **C9.MVt** | 6,13 | 13,46 | 2,20 | 2,33 | 2,54 |
| **C10.MVt** | 5,17 | 11,72 | 2,27 | 2,38 | 2,57 |
| **Média aritmética** | **5,77** | **12,66** | **2,20** | **2,33** | **2,52** |
| **Desvio padrão** | **0,50** | **0,84** | **0,05** | **0,04** | **0,04** |
| **C.V (%)** | **9%** | **7%** | **2%** | **2%** | **2%** |

**Tabela C.3** – Valores obtidos para as propriedades físicas do concreto – UHE PA II.

| Identificação do Corpo de prova | Absorção (%) | Índice de Vazios (%) | Massa Específica (kg/dm³) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Seca | Após saturação e fervura | Real |
| **C1.PAIITa** | 4,3 | 10,5 | 2,42 | 2,52 | 2,70 |
| **C2.PAIITa** | 4,0 | 9,7 | 2,42 | 2,51 | 2,68 |
| **C4.PAIITa** | 5,0 | 11,7 | 2,34 | 2,46 | 2,65 |
| **C5.PAIITa** | 5,7 | 13,2 | 2,31 | 2,44 | 2,66 |
| **C6.PAIITa** | 3,9 | 9,4 | 2,44 | 2,53 | 2,69 |
| **Média aritmética** | 4,6 | 10,9 | 2,39 | 2,49 | 2,68 |
| **Desvio padrão** | 0,77 | 1,55 | 0,06 | 0,04 | 0,02 |
| **C.V (%)** | 16,7 | 14,2 | 2,40 | 1,59 | 0,77 |

**Tabela C.4** – Valores obtidos para as propriedades físicas do concreto – UHE PA IV.

| Identificação do Corpo de prova | Absorção (%) | Índice de Vazios (%) | Massa Específica (kg/dm³) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Seca | Após saturação e fervura | Real |
| **C1-PAIVTa** | 4,55 | 10,94 | 2,4 | 2,51 | 2,7 |
| **C2-PAIVTa** | 4,27 | 10,05 | 2,35 | 2,45 | 2,62 |
| **C3-PAIVTa** | 4,51 | 10,54 | 2,33 | 2,44 | 2,61 |
| **C4-PAIVTa** | 4,41 | 10,66 | 2,42 | 2,52 | 2,7 |
| **C5-PAIVTa** | 3,93 | 9,76 | 2,48 | 2,58 | 2,75 |
| **Média aritmética** | 4,33 | 10,39 | 2,40 | 2,50 | 2,68 |
| **Desvio padrão** | 0,22 | 0,43 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| **C.V (%)** | 5% | 4% | 2% | 2% | 2% |
| **C6-PAIVVt** | 4,22 | 10,06 | 2,38 | 2,48 | 2,65 |
| **C7-PAIVVt** | 4,92 | 11,39 | 2,31 | 2,43 | 2,61 |
| **C8-PAIVVt** | 4,78 | 11,14 | 2,33 | 2,44 | 2,62 |
| **C9-PAIVVt** | 4,24 | 10,04 | 2,37 | 2,47 | 2,63 |
| **C10-PAIVVt** | 4,83 | 11,27 | 2,33 | 2,45 | 2,63 |
| **Média aritmética** | 4,60 | 10,78 | 2,34 | 2,45 | 2,63 |
| **Desvio padrão** | 0,30 | 0,60 | 0,03 | 0,02 | 0,01 |
| **C.V (%)** | 7% | 6% | 1% | 1% | 1% |

**Tabela C.5**– Valores obtidos para as propriedades físicas do concreto – UHE Moxotó.

| Identificação do Corpo de prova | Absorção (%) | Índice de Vazios (%) | Massa Específica (kg/dm³) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Seca | Após saturação e fervura | Real |
| **C1.MxGD** | 4,95 | 11,5 | 2,33 | 2,44 | 2,63 |
| **C2.MxGD** | 5,95 | 13,32 | 2,24 | 2,37 | 2,58 |
| **C3.MxGD** | 5,66 | 13,78 | 2,43 | 2,57 | 2,82 |
| **C4.MxGD** | 5,39 | 13,3 | 2,47 | 2,6 | 2,85 |
| **C5.MxGD** | 6,15 | 13,96 | 2,27 | 2,41 | 2,64 |
| **Média aritmética** | 5,62 | 13,17 | 2,35 | 2,48 | 2,70 |
| **Desvio padrão** | 0,42 | 0,87 | 0,09 | 0,09 | 0,11 |
| **C.V (%)** | 8% | 7% | 4% | 4% | 4% |

**APÊNDICE D** – Resumo dos resultados obtidos pelo ensaio de reconstituição de traço do concreto endurecido.

**Tabela D.1** – Resultados obtidos no ensaio de reconstituição de traço.

| Identificação dos concretos | | Número de teste-munhos | Dimensão máxima provável (mm) | Resultados obtidos | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Proporção dos materiais (%) | | Traço do concreto (1:m) | Consumo de cimento (kg/m³) |
| Usina | Estrutura | | | Argamassa | Agregado graúdo | | |
| CORUMBÁ | Ta | 1 | 38 | 56% | 44% | 1 : 8,7 | 236 |
| | Vt | 4 | 76 | 48% | 52% | 1 : 9,5 | 216 |
| | El.5 | 2 | 19 | 60% | 40% | 1 : 7,8 | 261 |
| | El.12 | 2 | 38 | 33% | 67% | 1 : 11,0 | 190 |
| MASCARE-NHAS | Ta-Bl 19 | 5 | 152 | 36% | 64% | 1 : 9,9 | 186 |
| | Ta-Bl 18 | 5 | 152 | 34% | 66% | 1 : 9,4 | 193 |
| PA II | Ta | 7 | 152 | 34% | 66% | 1 : 7,3 | 239 |
| PA IV | Ta | 5 | 76 | 27% | 73% | 1 : 10,6 | 182 |
| | Vt | 5 | 76 | 31% | 69% | 1 : 10,0 | 190 |
| MOXOTÓ | GD | 7 | 38 | 43% | 57% | 1 : 5,3 | 360 |

**APÊNDICE E** – Valores individuais de pH determinados para os concretos em estudo.

**Tabela E.1** – Valores de pH determinados para os concretos em estudo

| Identificação dos concretos | | Testemunho | Temperatura da ambiente durante ensaio (ºC) | Valor do pH |
|---|---|---|---|---|
| **Usina** | **Estrutura** | | | |
| **CORUMBÁ** | Ta | C1.CTa | 22,3 | 12,3 |
| | Vt | C3.CVt | 22,3 | 11,8 |
| | El.5 | C7.CEl.5 | 22,3 | 12,3 |
| | El.12º | C8.CEl.12 | 22,3 | 12,2 |
| **MASCARE-NHAS** | Ta-Bl 19 | C3.MTa | 22,2 | 12,2 |
| | Ta-Bl 19 | C5.MTa | 22,8 | 11,9 |
| | Ta-Bl 18 | C10.MTa | 21,8 | 12,1 |
| **PA II** | Ta | C1.PAIITa | 22,6 | 12,4 |
| | | C2.PAIITa | 22,6 | 11,5 |
| | | C5.PAIITa | 22,5 | 12,0 |
| **PA IV** | Ta | C1-PAIVTa | 22,6 | 12,4 |
| | | C2-PAIVTa | 24,3 | 12,4 |
| | | C4-PAIVTa | 24,1 | 12,3 |
| | Vt | C6-PAIVVt | 22,7 | 12,3 |
| | | C9-PAIVVt | 22,5 | 12,3 |
| | | C10-PAIVVt | 22,5 | 12,4 |
| **MOXOTÓ** | GD | C1.MxGD | 22,5 | 12,4 |
| | | C3.MxGD | 22,5 | 12,3 |
| | | C5.MxGD | 22,5 | 12,3 |

**APÊNDICE F** – Valores obtidos na quantificação dos teores de enxofre por meio da análise química gravimétrica e por meio de análise por combustão (LECO) para os materiais estudados.

**Tabela F.1** – Teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica dos agregados extraídos dos concretos e dos materiais rochosos coletados.

| Usina | Amostra | Teor de enxofre (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Na forma de sulfetos | Na forma de sulfatos | Total |
| CORUMBÁ | R1.C | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| | R2.C | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | R3.C/R4.C | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C1.CTa | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C3.CVt | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C7.CEl.5 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| | C8.CEl.12 | 0,15 | 0,06 | 0,21 |
| MASCARENHAS | R1.M | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | R2.M | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | R3.M | ND | 0,01 | 0,01 |
| | C3.MTa | ND | 0,00 | 0,00 |
| | C5.MTa | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C10.MTa | ND | 0,01 | 0,01 |
| PA II | R1.PAII | 0,09 | 0,00 | 0,09 |
| | C1.PAIITa | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C2.PAIITa | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C5.PAIITa | 0,07 | 0,00 | 0,07 |
| PA IV | R1.PAIV | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | C1-PAIVTa | 0,06 | 0,01 | 0,06 |
| | C2-PAIVTa | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| | C4-PAIVTa | 0,03 | 0,01 | 0,03 |
| | C6-PAIVVt | 0,04 | 0,01 | 0,04 |
| | C9-PAIVVt | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| | C10-PAIVVt | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| MOXOTÓ | R1.Mx | 0,02 | 0,01 | 0,03 |
| | C1.MxGD | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C3.MxGD | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | C5.MxGD | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

**Nota:** os valores obtidos na análise química gravimétrica são arredondados, ao final do ensaio, para duas casas decimais; portanto, em função disto, a soma dos valores, já arredondados, de enxofre na forma de sulfetos e sulfatos pode não ser igual ao valor do enxofre total devido ao arredondamento. **ND -** Volume insuficiente de resíduo obtido durante ensaio para quantificar ou deduzir a existência do elemento nesta forma, devido provavelmente a baixa concentração deste na amostra.

**Tabela F.2** – Teores de enxofre obtidos pela análise química gravimétrica das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto.

| Usina | Amostra | Teor de enxofre (%) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Na forma de sulfetos | Na forma de sulfatos | Total |
| CORUMBÁ | C1.CTa | 0,03 | 0,29 | 0,32 |
| | C3.CVt | 0,03 | 0,31 | 0,34 |
| | C7.CEl.5 | 0,01 | 0,31 | 0,32 |
| | C8.CEl.12 | 0,03 | 0,35 | 0,38 |
| MASCARENHAS | C3.MTa | 0,01 | 0,11 | 0,12 |
| | C5.MTa | 0,01 | 0,10 | 0,11 |
| | C10.MTa | 0,01 | 0,10 | 0,11 |
| PA II | C1.PAIITa | 0,03 | 0,12 | 0,15 |
| | C2.PAIITa | 0,00 | 0,13 | 0,13 |
| | C5.PAIITa | 0,01 | 0,11 | 0,12 |
| PA IV | C1-PAIVTa | 0,11 | 0,21 | 0,32 |
| | C2-PAIVTa | 0,01 | 0,24 | 0,25 |
| | C4-PAIVTa | 0,21 | 0,21 | 0,42 |
| | C6-PAIVVt | 0,15 | 0,25 | 0,40 |
| | C9-PAIVVt | 0,05 | 0,15 | 0,20 |
| | C10-PAIVVt | 0,04 | 0,31 | 0,35 |
| MOXOTÓ | C1.MxGD | 0,05 | 0,29 | 0,34 |
| | C3.MxGD | 0,01 | 0,27 | 0,28 |
| | C5.MxGD | 0,02 | 0,28 | 0,30 |

**Tabela F.3** – Teores de enxofre total obtidos por meio de análise por combustão (LECO) das argamassas e agregados extraídos dos testemunhos de concreto.

| Usina | Amostra | Teor de enxofre total dos agregados (%) | Teor de enxofre total das argamassas (%) |
|---|---|---|---|
| CORUMBÁ | C1.CTa | 0,02 | 0,45 |
| | C3.CVt | 0,02 | 0,45 |
| | C7.CEl.5 | 0,04 | 0,43 |
| | C8.CEl.12 | 0,07 | 0,49 |
| MASCARENHAS | C3.MTa | 0,03 | 0,23 |
| | C5.MTa | 0,02 | 0,19 |
| | C10.MTa | 0,02 | 0,25 |
| PA II | C1.PAIITa | 0,15 | 0,41 |
| | C2.PAIITa | 0,14 | 0,45 |
| | C5.PAIITa | 0,14 | 0,38 |
| PA IV | C2-PAIVTa | 0,05 | 0,32 |
| | C4-PAIVTa | 0,04 | 0,34 |
| | C9-PAIVVt | 0,03 | 0,50 |
| MOXOTÓ | C1.MxGD | 0,04 | 0,47 |
| | C3.MxGD | 0,05 | 0,46 |
| | C5.MxGD | 0,05 | 0,52 |

**APÊNDICE G** – Resumo das análises mineralógicas para a identificação de minerais reativos.

De forma a seguir uma representação mais enxuta, será adotado nas Tabelas G.1 a G.5, apresentadas na sequência, as seguintes siglas: PR - Potencialmente reativo, PI - Potencialmente inócuo, EO - Extinção ondulante de ângulo.

**Tabela G.1** – Resumo das análises mineralógicas para a identificação de minerais reativos – UHE Corumbá.

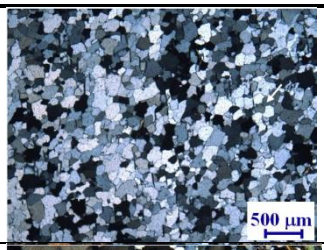
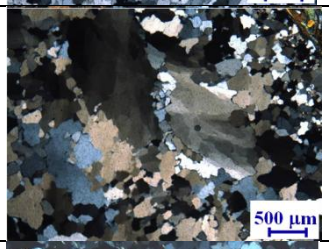
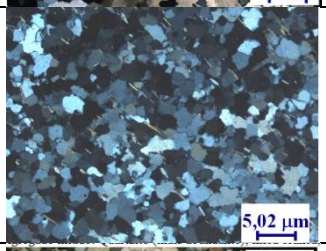
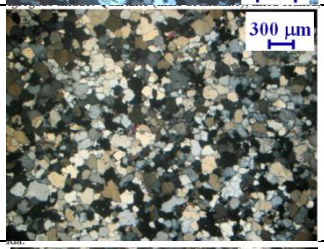
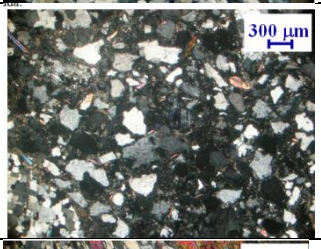
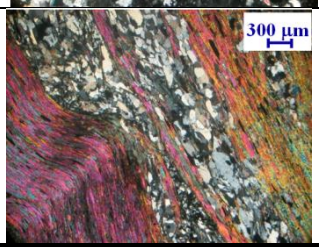
| Amostra | Litotipo | Características RAA | | Imagem |
|---|---|---|---|---|
| | | Minerais reativos | Potencialidade | |
| R1.C | Quartzito | < 5% dos cristais de quartzo com EO < 10º. | PI |   |
| R3.C | Granada-mica-quartzo xisto | Vênulas de quartzo são formadas por grandes cristais de quartzo, onde 60% destes possuem EO de 10º a 30º. | PR |   |
| C1.CTa | Quartzito | Cerca de 10% dos cristais de quartzo com EO entre 10º e 15º. | PI |   |
| C3.CVt | | Cerca de 85% dos cristais de quartzo com EO entre 15º e 25º e 15% com EO 30º | PR |   |
| C7.CEl.5 | | Os cristais de quartzo possuem formas muito irregulares e EO fraca (30% possui EO de 10º a 30º, porém valores ~ de 20º são mais comuns. | PR |   |
| C8.CEl.12 | Granada-mica-quartzo xisto | 20% dos cristais de quartzo com EO de 10º a 15º | PR |   |

**Tabela G.2** – Resumo das análises mineralógicas para a identificação dos minerais reativos – UHE Mascarenhas.

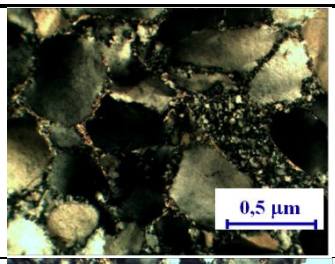
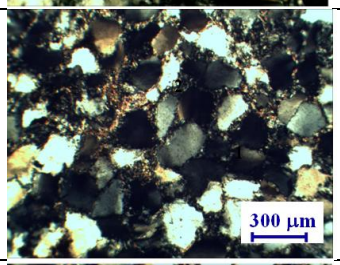
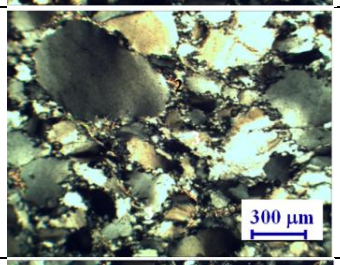
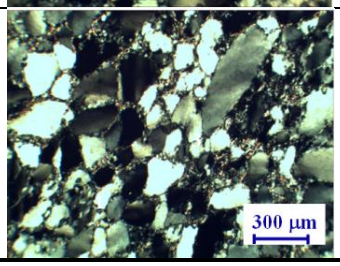
| Amostra | Litotipo | Características RAA | | Imagem |
|---|---|---|---|---|
| | | Minerais reativos | Potencialidade | |
| R1.M | | Cristais de quartzo com EO em torno de 20º a 30º. | PR |   |
| C3.MTa | Quartzito | 90% dos cristais de quartzo com EO em torno de 30º. Presença de 5% a 15% de quartzo microgranular. | PR |   |
| C5.MTa | | 90% dos cristais de quartzo com EO de 30º, e presença de 5% a 15% de quartzo microgranular. | PR |   |
| C10.MTa | | 90% dos cristais de quartzo com EO de 30º. Presença de 5% de quartzo microgranular. | PR |   |

**Tabela G.3** – Resumo das análises mineralógicas para a identificação dos minerais reativos – UHE PA II.

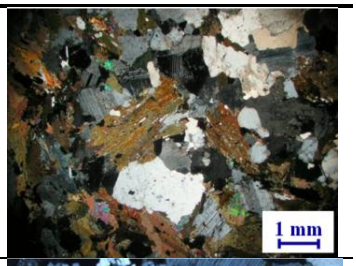
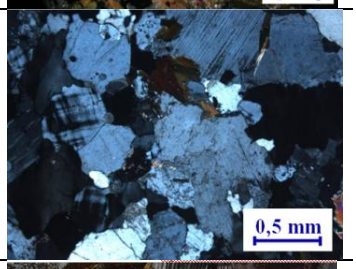
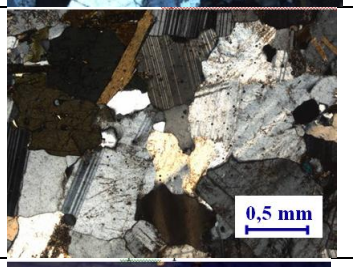
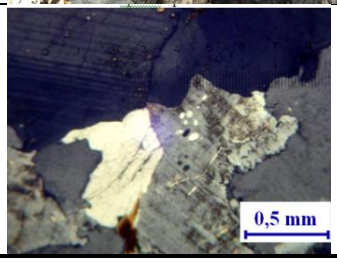
| Amostra | Litotipo | Características RAA | | Imagem |
|---|---|---|---|---|
| | | Minerais reativos | Potencialidade | |
| R1.PAII | Migma-tito | 90% dos cristais de quartzo com EO de 20º a 30º. | PR |   |
| C1.PAIITa | Biotita granito | O quartzo ocorre em agregados de cristais irregulares com 15% contendo EO de 15º a 30º. | PR |   |
| C2.PAIITa | Diorito | O quartzo é restrito, sendo que 30% destes apresentam-se com EO de 25º | PR |   |
| C5.PAIITa | Granodi-orito | O quartzo ocorre em cristais intersticiais muito irregulares, com 30% com EO de 15º e 30º. | PR |   |

**Tabela G.4** – Resumo das análises mineralógicas para a identificação dos minerais reativos – UHE PA IV.

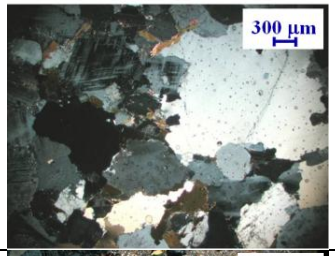
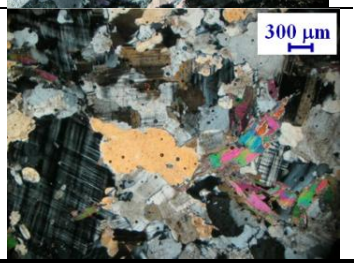
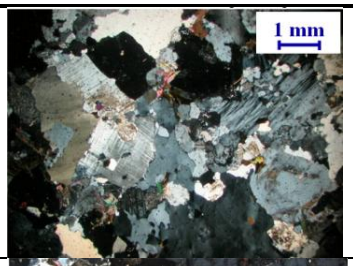
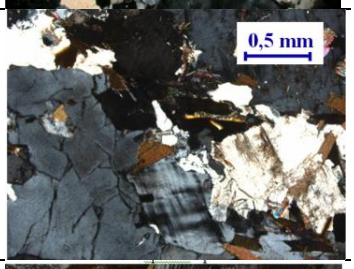
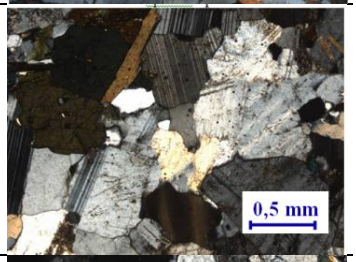
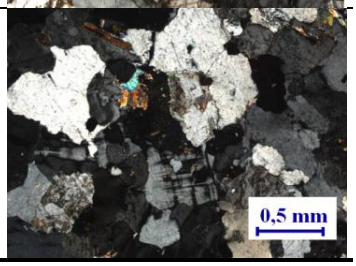
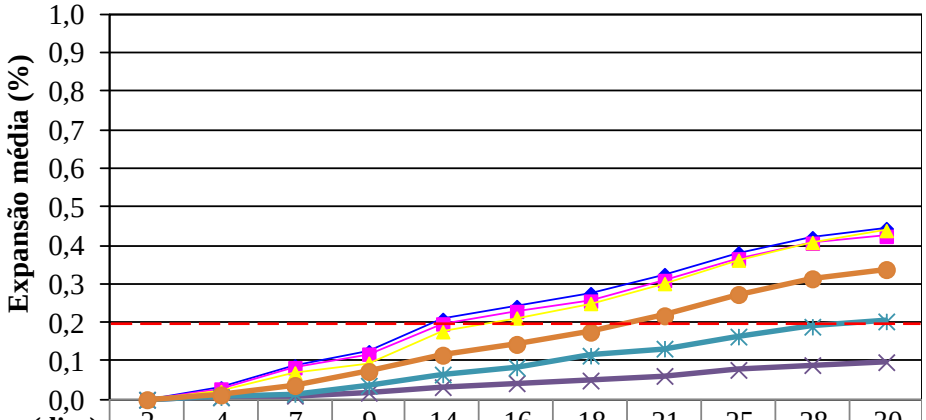
| Amostra | Litotipo | Características RAA | | Imagem |
|---|---|---|---|---|
| | | Minerais reativos | Potencialidade | |
| R1.PAIV | Migma-tito | > 95% dos cristais de quartzo com EO de 15º a 30º. | PR |   |
| C2.PAIV Ta | Biotita granito | 85% a 90% do quartzo com EO de 20º a 30º. | PR | |
| C9.PAIV Vt | Leuco-granito | 80% a 85% do quartzo com EO de 30º. | PR |   |

**Tabela G.5** – Resumo das análises mineralógicas para a identificação dos minerais reativos – UHE Moxotó.

| Amostra | Litotipo | Características RAA | | Imagem |
|---|---|---|---|---|
| | | Minerais reativos | Potencialidade | |
| R1.Mx | Migma-tito | > 98% dos cristais de quartzo com extinção ondulante de 20º a 30º. | PR |   |
| C1.MxGD | Biotita granito | O quartzo ocorre em cristais irregulares, com 15% possuindo EO de 10º a 20º. | PI |   |
| C3.MxGD | Grano-diorito | O quartzo ocorre em cristais irregulares de dimensões reduzidas; 30% com EO de 15º e 25º. | PR |   |
| C5.MxGD | Biotita granito | O quartzo ocorre em cristais irregulares, com 60% contendo EO de 20º e 30º. | PR |   |

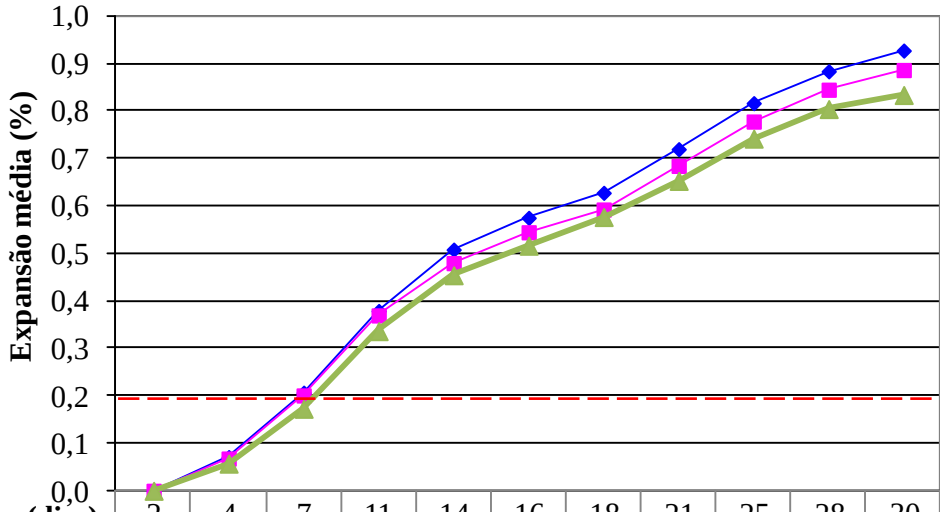
**APÊNDICE H** – Gráficos dos valores do ensaio de expansão em barras de argamassa para avaliar a reatividade dos agregados

**Figura H.1**- Valores médios da expansão em barras de argamassa – UHE Corumbá.



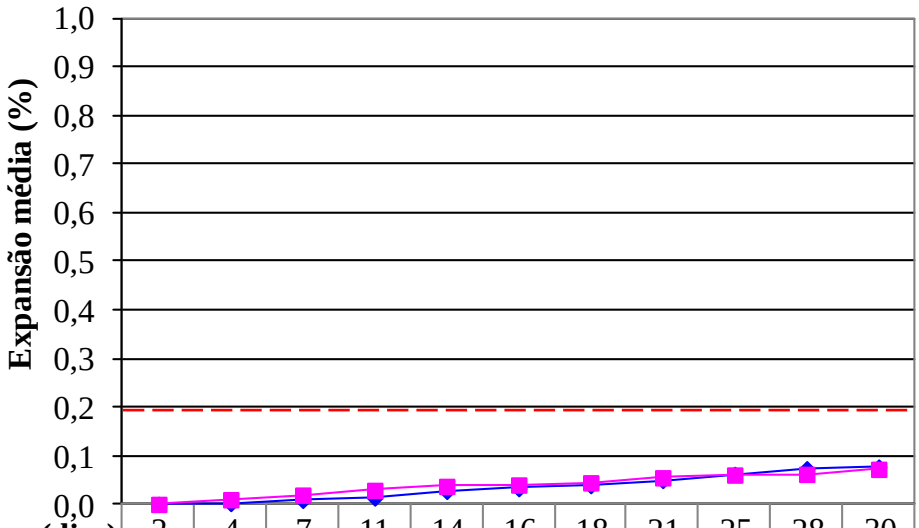

| Tempo (dias) | 2 | 4 | 7 | 9 | 14 | 16 | 18 | 21 | 25 | 28 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Agregados dos testemunhos da Ta | 0,00 | 0,03 | 0,09 | 0,12 | 0,21 | 0,24 | 0,28 | 0,32 | 0,38 | 0,42 | 0,44 |
| Agregados dos testemunhos da El.5 | 0,00 | 0,03 | 0,08 | 0,12 | 0,20 | 0,23 | 0,26 | 0,31 | 0,37 | 0,41 | 0,42 |
| Agregados dos testemunhos da El.12 | 0,00 | 0,02 | 0,07 | 0,09 | 0,18 | 0,21 | 0,25 | 0,30 | 0,36 | 0,41 | 0,44 |
| R1.C | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
| R2.C | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,07 | 0,08 | 0,11 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,20 |
| R3.C | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,07 | 0,12 | 0,14 | 0,18 | 0,22 | 0,27 | 0,31 | 0,34 |

**Figura H.2** - Valores médios da expansão em barras de argamassa – UHE Mascarenhas.



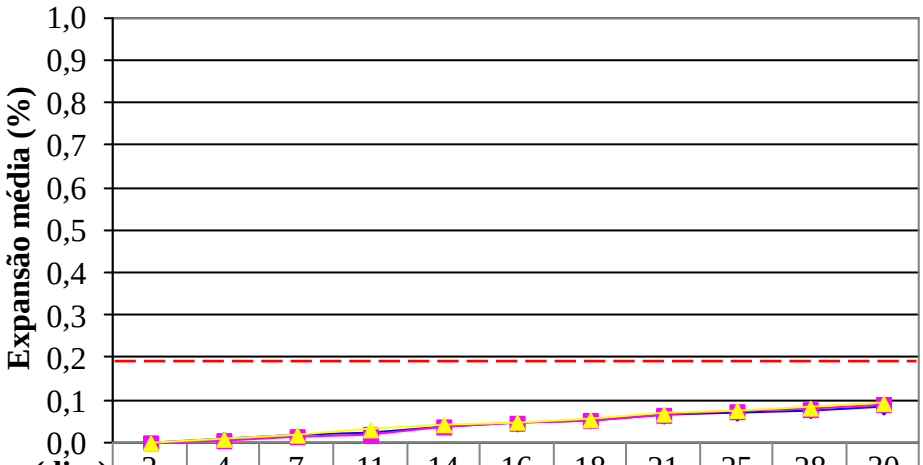

| Tempo (dias) | 2 | 4 | 7 | 11 | 14 | 16 | 18 | 21 | 25 | 28 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Agregados dos concretos do bloco 19 | 0 | 0,07 | 0,21 | 0,38 | 0,51 | 0,57 | 0,63 | 0,72 | 0,82 | 0,88 | 0,93 |
| Agregados dos concretos do bloco 18 | 0 | 0,07 | 0,20 | 0,37 | 0,48 | 0,54 | 0,59 | 0,68 | 0,78 | 0,84 | 0,89 |
| R1.M/R2.M | 0 | 0,06 | 0,17 | 0,34 | 0,45 | 0,52 | 0,58 | 0,65 | 0,74 | 0,80 | 0,83 |

**Figura H.3** - Valores médios da expansão em barras de argamassa – UHE PA II.



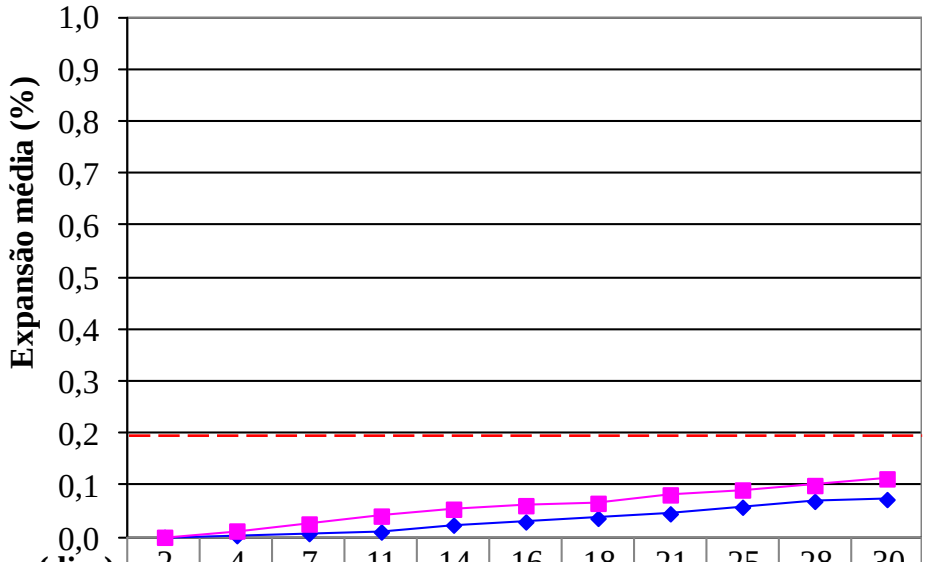

| Tempo (dias) | 2 | 4 | 7 | 11 | 14 | 16 | 18 | 21 | 25 | 28 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Agregados dos concretos da Ta | 0 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 |
| R1.PAII | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |

**Figura H.4** - Valores médios da expansão em barras de argamassa – UHE PA IV.




| Tempo (dias) | 2 | 4 | 7 | 11 | 14 | 16 | 18 | 21 | 25 | 28 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Agregados dos concretos da Ta | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,08 |
| Agregados dos concretos do Vt | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
| R1.PAIV | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,09 |

**Figura H.5 -** Valores médios da expansão em barras de argamassa – UHE Moxotó.



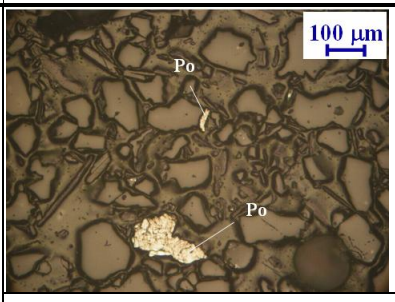
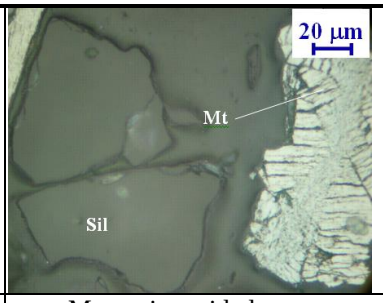
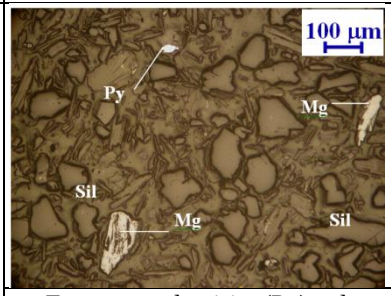
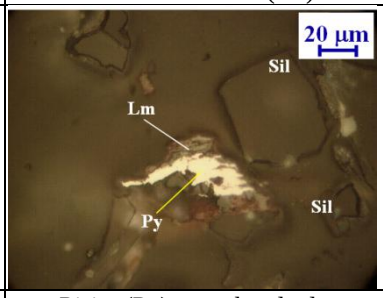
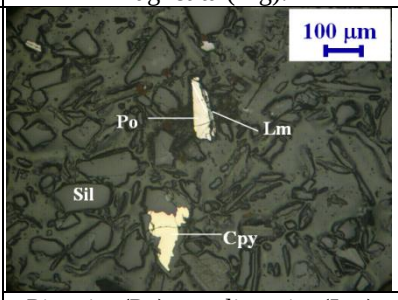
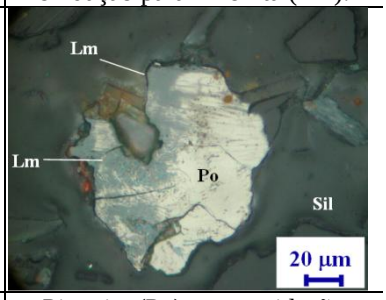

| Tempo (dias) | 2 | 4 | 7 | 11 | 14 | 16 | 18 | 21 | 25 | 28 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Agregados dos concretos | 0 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,07 |
| R1.Mx | 0 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,11 |

**APÊNDICE I** – Detalhamento das análises mineralógicas dos materiais rochosos e dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto para a identificação dos sulfetos.

De forma a melhor elucidar o exposto nas Tabelas de I.1 a I.5, apresentadas na sequência, ilustram-se inicialmente as fórmulas moleculares dos compostos que serão citados: Pipirita ($FeS_2$); pirrotita ($Fe_7S_8$-FeS); calcopirita ($CuFeS_2$); marcassita ($FeS_2$); bornita; ($Cu_5FeS_4$); pentlandita ($(Fe,Ni)_9S_8$); magnetita ($Fe_3O_4$); hematita ($Fe_2O_3$), ilmenita ($FeTiO_3$), limonita ($FeO(OH).nH_2O$.

Destaca-se também que martita refere-se ao produto oriundo da martitização, onde o óxido de ferro magnetita ($Fe_3O_4$), oxidam-se para hematita ($Fe_2O_3$), e no final desse processo acontece com a transformação da hematita em limonita.

**Tabela I.1** – Detalhamento das análises mineralógicas dos materiais rochosos para a identificação dos sulfetos – UHE Corumbá

| Amos-tra | Composição mineralógica | Descrição | Fotomicrografias | |
|---|---|---|---|---|
| **R1.C** | Sulfeto: Pirrotita; óxidos: magnetita e hematita; hidróxido de ferro: limotita; e, minerais transparentes. | A pirrotita apresenta oxidação para limonita. O óxido de ferro observado foi magnetita, oxidando-se para hematita. |   Fragmentos de pirrotita (Po). |   Magnetita oxidada para hematita – martita (Mt). |
| **R2.C** | Sulfetos: pirita; óxidos: magnetita e hematita; hidróxido de Ferro: limonita; e silicatos. | A pirita apresenta incipiente oxidação para limonita |   Fragmento de pirita (Py) e de magnetita (Mg). |   Pirita (Py), com borda de oxidação para limonita (Lm). |
| **R3.C** | Sulfetos: pirita, pirrotita e calcopirita; óxidos: ilmenita; e, minerais transparentes. | Tanto a pirrotita, quanto a pirita apresentam incipiente oxidação para limonita. A calcopirita apresenta-se inalterada. |   Pirrotita (Po) com limonita (Lm) na borda e, calcopirita (Cpy). |   Pirrotita (Po), com oxidação para limonita (Lm). |

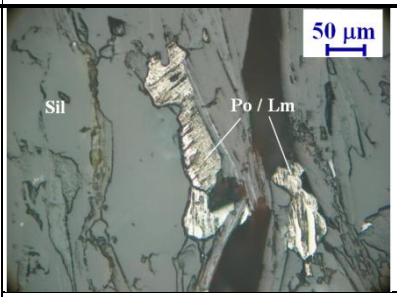
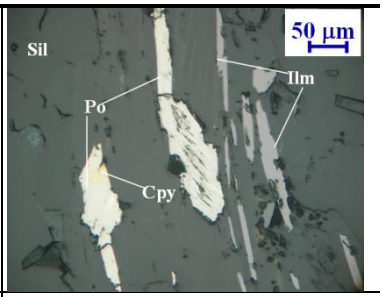
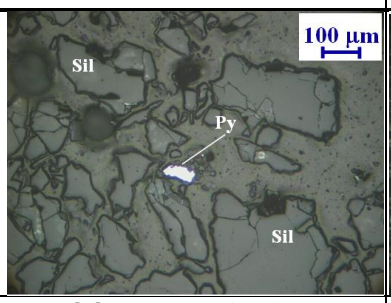
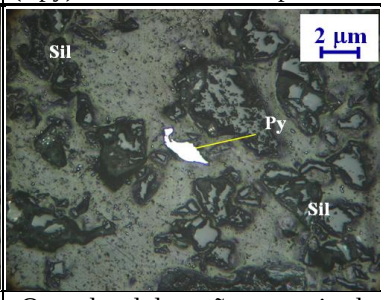
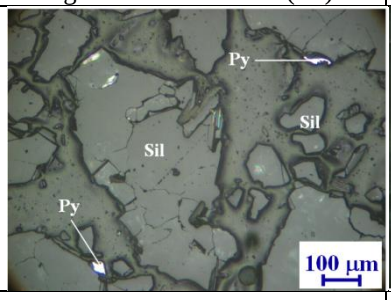
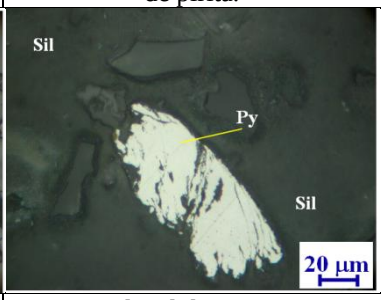
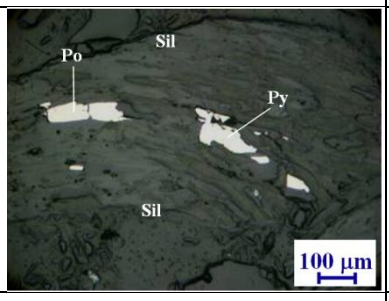
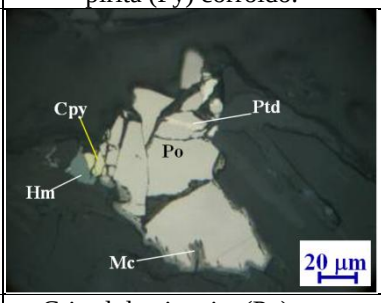
| Amos-tra | Composição mineralógica | Descrição | Fotomicrografias | |
|---|---|---|---|---|
| **R4.C** | Sulfetos pirrotita, pirita e calcopirita; Óxidos (magnetita, hematita e ilmenita); e silicatos. | Vários cristais de pirrotita alterados: início para marcassita, ou borda de oxidação para limonita, ou adiantado grau de alteração para limonita. A pirita e a calcopirita se mostraram inalteradas. |  Local com cristais de pirrotita (Po) alterando-se para limonita (Lm). |  Cristais de pirrotita (Po) com alteração para marcassita e limonita e um cristal de calcopirita (Cpy) intercrescido com pirrotita. |
| **C3.CVt** | Sulfeto: pirita; óxidos: hematita e ilmenita; hidróxido de ferro: limonita; e silicatos. | O óxido de ferro mais comum é a hematita, seguida por ilmenita e alguma limonita, como produto de alteração dos óxidos de ferro e de algumas piritas. |  Cristal de Hematita (Hm) junto a fragmentos de silicatos (Sil). |  Outro local da seção com cristal de pirita. |
| **C7.CEl.5** | Sulfetos: pirita; óxidos: hematita e ilmenita; hidróxido de ferro: limonita; e silicatos. | Alguns fragmentos de pirita apresentaram-se corroídos indicando instalação do processo de alteração para limonita. |  Fragmentos de pirita (Py) junto a fragmentos de silicatos (Sil). |  Outro local da seção com ampliação de fragmento de pirita (Py) corroído. |
| **C8.CEl.12** | Sulfetos: pirrotita, pirita, calcopirita, pentlandita e marcassita; óxidos: hematita e ilmenita; hidróxido de ferro: limonita; e silicatos. | Os sulfetos estão alinhados ao longo da foliação da rocha e se apresentam predominante-mente sãos ou inalterados, porém alguns cristais de pirrotita possuem borda de alteração para marcassita. |  Cristais de pirrotita (Po) e pirita (Py) alinhados segundo a foliação da rocha, como os silicatos (Sil). |  Cristal de pirrotita (Po) com borda de alteração para marcassita (Mc), lamela de exsolução para pentlandita (Ptd) e intercrescido com calcopirita (Cpy) e hematita (Hm) |

**Tabela I.2** – Detalhamento das análises mineralógicas para a identificação dos sulfetos - UHE Mascarenhas

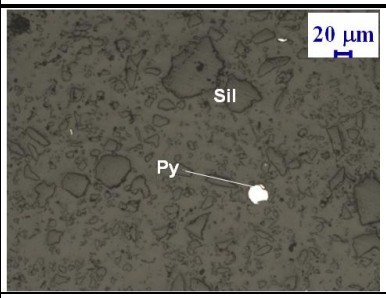
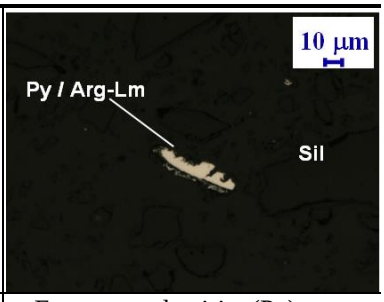
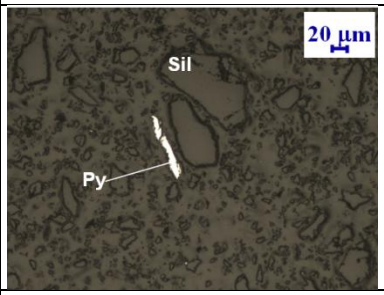
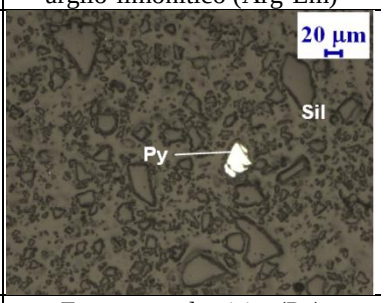
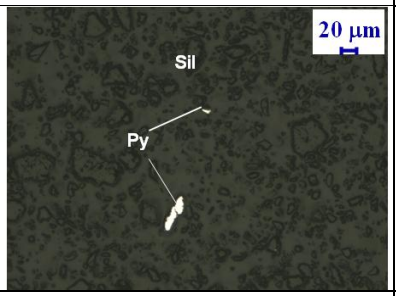
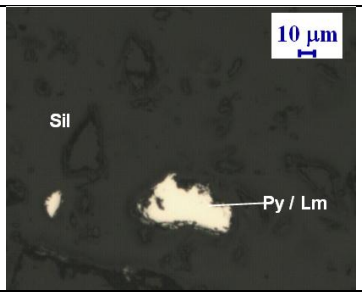
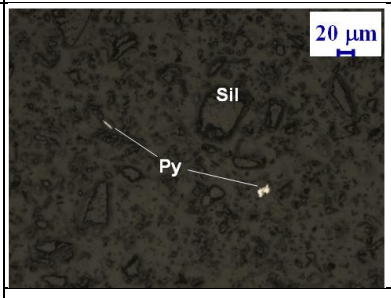
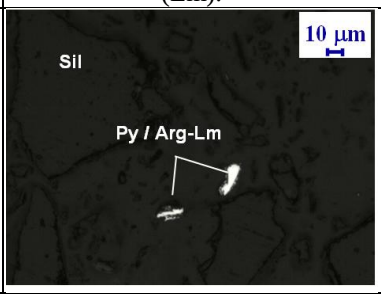
| Amos-tra | Composição mineralógica | Descrição | Fotomicrografias | |
|---|---|---|---|---|
| **R1.M** | Sulfeto: pirita; óxido de ferro: hematita. | A pirita ocorre preferencial-mente com borda de corrosão e início de alteração para material argilo-limonítico. |  Fragmento de pirita (Py) sã em meio aos silicatos. |  Fragmento de pirita (Py) com início de oxidação para material argilo-limonítico (Arg-Lm) |
| **C3.MTa** | Sulfeto: pirita | A pirita ocorre preferencial-mente com borda de corrosão, indicando início de alteração para material argilo-limonítico |  Fragmento de pirita (Py) sã em meio aos silicatos. |  Fragmento de pirita (Py) inalterada. |
| **C5.MTa** | Sulfeto: pirita | A pirita ocorre com borda de corrosão e início de oxidação de alteração para material argilo-limonítico |  Fragmento de pirita (Py) sã em meio aos silicatos. |  Fragmentos de pirita (Py) com borda de alteração para limonita (Lm). |
| **C10.MTa** | Sulfeto: pirita | A pirita ocorre preferencial-mente com borda de corrosão e início de alteração para material argilo-limonítico. |  Fragmentos de pirita (Py) sã em meio aos silicatos. |  Fragmentos de pirita (Py) com início de oxidação para material argilo-limonítico (Arg-Lm). |

**Tabela I.3** – Detalhamento das análises mineralógicas para a identificação dos sulfetos - UHE PA II

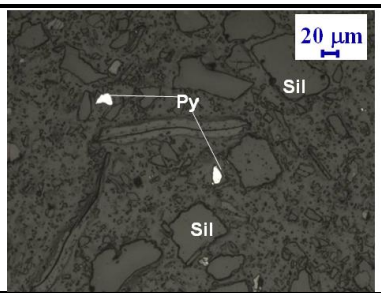
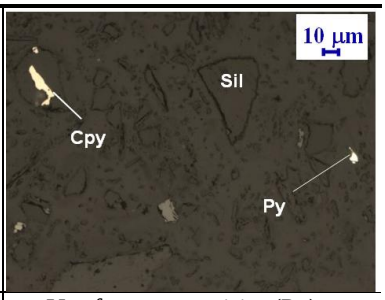
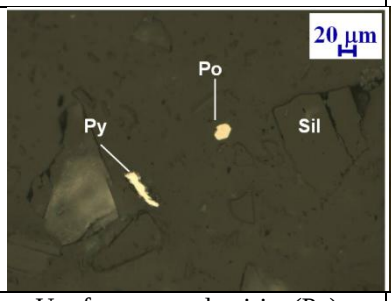
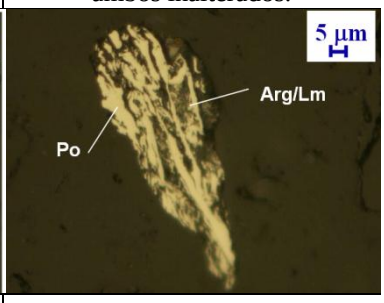
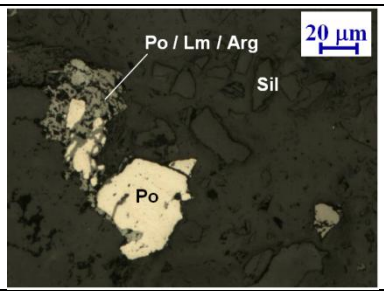
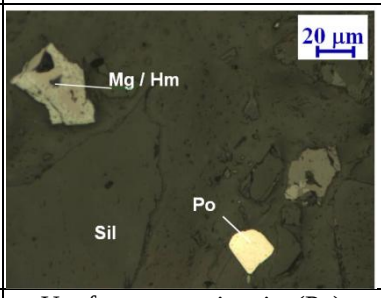
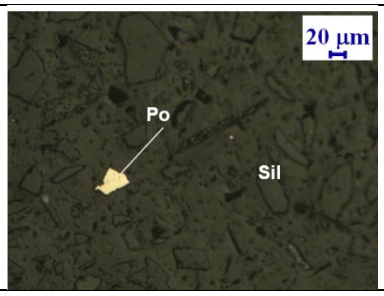
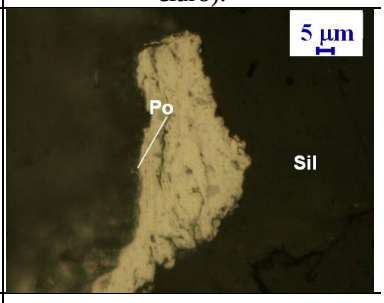
| Amos-tra | Composição mineralógica | Descrição | Fotomicrografias | |
|---|---|---|---|---|
| **R1.PAII** | Sulfetos: pirita e calcopirita; óxidos de ferro: magnetita. | Ambos os sulfetos se apresentaram inalterados. O único óxido de ferro identificado foi a magnetita, assim mesmo de ocorrência muito restrita e que ocorre inalterada. |  Fragmentos de pirita (Py) inalterada. |  Um fragmento pirita (Py) e outro de calcopirita (Cpy), ambos inalterados. |
| **C1.PAIITa** | Sulfetos: pirrotita e pirita; óxidos de ferro: magnetita, hematita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta frequentes sinais de corrosão e oxidação incipiente. A pirita se apresentou predominante mente inalterada. |  Um fragmento de pirita (Py) sendo substituído para limonita (Lm) e outro de pirrotita (Po) inalterado. |  Ampliação de fragmento de pirrotita (Po) sendo substituída por argilo-limonítico (Arg/Lm). |
| **C2.PAIITa** | Sulfetos: pirrotita; óxidos de ferro: magnetita, hematita e ilmenita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta frequentes sinais de corrosão e oxidação incipiente para limonita ou uma mistura de material argilo-limonítico. |  Um fragmento de pirrotita (Po) oxidando-se para limonita (Lm) e argila (Arg). |  Um fragmento pirrotita (Po) inalterado e um de magnetita (Mg – marrom) oxidando-se para hematita (Hm – cinza claro). |
| **C5.PAIITa** | Sulfetos: pirrotita; óxidos de ferro: magnetita, hematita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta frequentes sinais de corrosão e oxidação incipiente para limonita ou uma mistura de material argilo-limonítico. |  Um fragmento de pirrotita (Po) com sinais de corrosão em meio aos silicatos (Sil) |  Um fragmento pirrotita (Po) inalterado |

**Tabela I.4** – Detalhamento das análises mineralógicas para a identificação dos sulfetos - Tomada d'água da UHE PA IV.

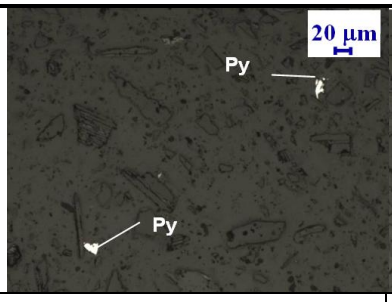
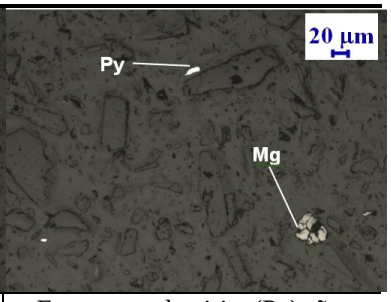
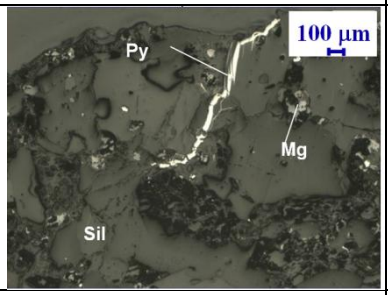
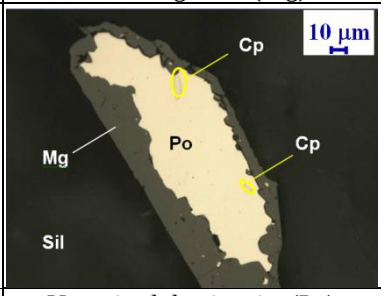
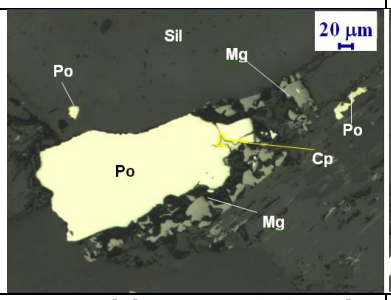
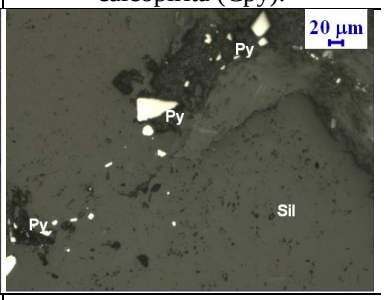
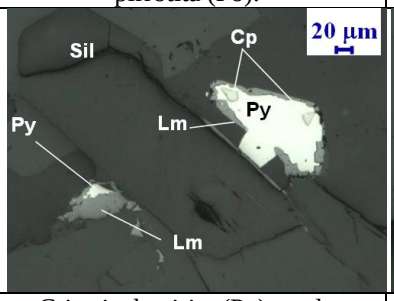
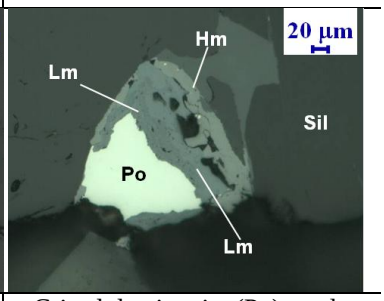
| Amos-tra | Composição mineralógica | Descrição | Fotomicrografias | |
|---|---|---|---|---|
| **R1.PAIV** | Sulfeto: pirita; óxido de ferro: magnetita. | A pirita apresenta-se predominantemente inalterada, raramente com corrosão superficial. |   |   |
| | | | Fragmentos de pirita (Py) sã. | Fragmento de pirita (Py) sã e um de magnetita (Mg). |
| **C1.PAIVTa** | Sulfetos: pirrotita, pirita calcopirita e bornita; óxidos de ferro: magnetita, hematita; ilmenita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta frequentes sinais de corrosão, porém com poucos cristais com oxidação para magnetita e a pirita para limonita. A calcopirita se apresentou inalterada. |   |   |
| | | | Pirita (Py) em veio e cristal de magnetita (Mg). | Um cristal de pirrotita (Po) sendo substituído por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cpy). |
| **C2.PAIVTa** | Sulfetos: em ordem decrescente de frequência: pirrotita, pirita calcopirita; óxidos de ferro: magnetita, hematita | A pirrotita apresenta frequentes sinais de corrosão, porém com poucos cristais com oxidação para magnetita. Tanto a pirita, quanto a calcopirita se apresentaram inalteradas. |   |   |
| | | | Um cristal de pirrotita (Po) sendo substituído por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cp) ao lado de cristais menores de pirrotita (Po). | Cristais sãos de pirita (Py) |
| **C4.PAIVTa** | Sulfetos: em ordem decrescente de frequência: pirita, pirrotita, calcopirita; óxidos de ferro: magnetita e hematita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita têm frequentes sinais de corrosão, porém com poucos cristais com oxidação p/ limonita. A pirita está predomi-nantemente sã. A calcopirita se apresentou inalterada. |   |   |
| | | | Cristais de pirita (Py) sendo substituído por limonita (Lm), sendo um deles com inclusões de calcopirita (Cpy). | Cristal de pirrotita (Po) sendo oxidado para limonita (Lm – cinza azulada) e esta para hematita (Hm – cinza mais clara). |

**Tabela I.5** – Detalhamento das análises mineralógicas para a identificação dos sulfetos - Vertedor da UHE PA IV.

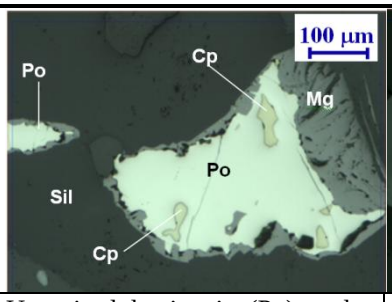
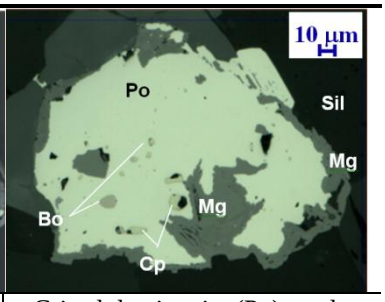
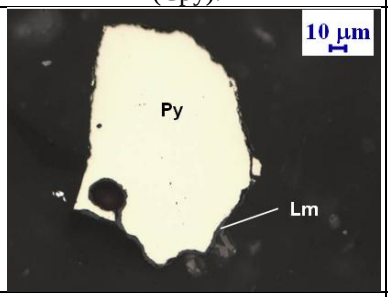
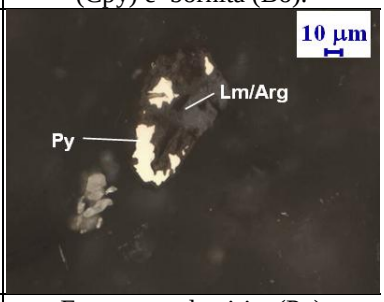
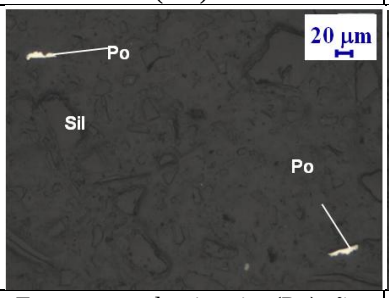
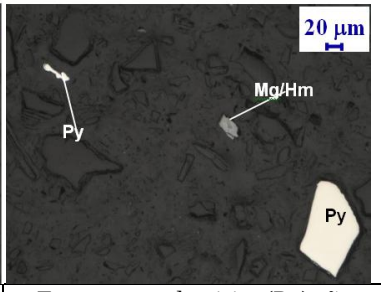
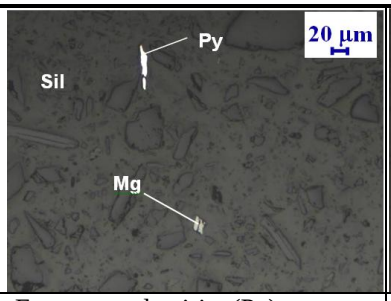
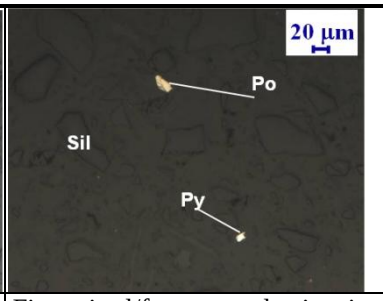
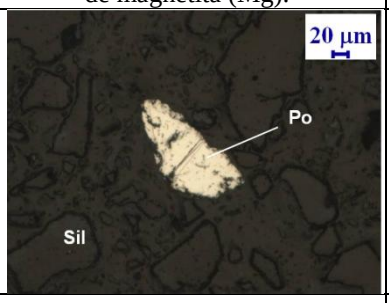
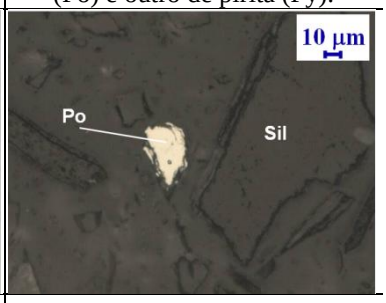
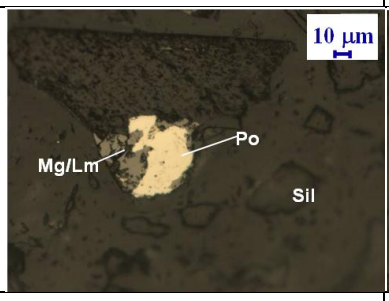
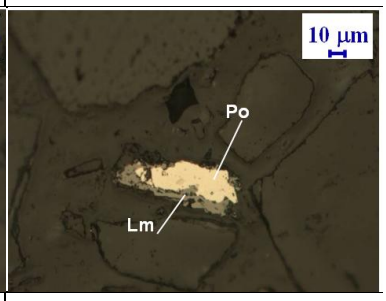
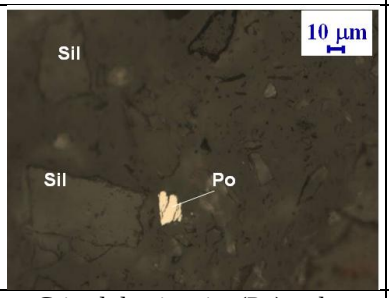
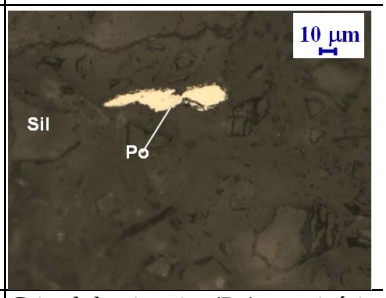
| Amos-tra | Composição mineralógica | Descrição | Fotomicrografias | |
|---|---|---|---|---|
| **C6.PAIVTa** | Sulfetos: pirrotita, pirita calcopirita e bornita; óxidos de ferro: magnetita, hematita; ilmenita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta frequente oxidação para magnetita e a pirita para limonita. Os sulfetos de cobre se apresentam inalterados. |   Um cristal de pirrotita (Po) sendo substituído por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cpy). |   Cristal de pirrotita (Po) sendo substituído por magnetita (Mg) e com inclusões de calcopirita (Cpy) e bornita (Bo). |
| **C9.PAIVTa** | Sulfeto: pirita e calcopirita; óxidos de ferro: magnetita e hematita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirita apresenta-se predominante-mente com corrosão superficial e várias com oxidação para material argilo-limonítico. A calcopirita ocorre inalterada. |   Fragmento de pirita (Py) com bordas de oxidação para limonita (Lm). |   Fragmento de pirita (Py) alterando-se para material argilo-limonítico. |
| **C10.PAIVTa** | Sulfeto: pirita e calcopirita; óxidos de ferro: magnetita e hematita; hidróxido de ferro: limonita. | Ambos os sulfetos visualizados ocorrem inalterados |   Fragmentos de pirrotita (Po) sã. |   Fragmentos de pirita (Py) sã. |

**Tabela I.6** – Detalhamento das análises petrográficas microscópica em seção polida para identificação de minerais sulfetos presentes nos agregados extraídos dos testemunhos de concreto e do material rochoso coletado no entorno da UHE Moxotó.

| Amos-tra | Composição mineralógica | Descrição | Fotomicrografias | |
|---|---|---|---|---|
| **R1.Mx** | Sulfeto: pirita; pirrotita; óxidos de ferro: magnetita e hematita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta-se predominante mente com corrosão superficial e a pirita geralmente não apresenta indícios de oxidação. |   Fragmento de pirita (Py) e outro de magnetita (Mg). |   Fino cristal/fragmento de pirrotita (Po) e outro de pirita (Py). |
| **C1.MxGD** | Sulfeto: pirrotita; óxidos de ferro: magnetita e hematita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita se apresenta predominante-mente com corrosão superficial, o que indica início do processo de alteração, e um fragmento com alteração para limonita nas bordas. |   Fragmento de pirrotita (Po) todo corroído. |   Fragmento de pirrotita (Po) todo corroído e com início de alteração para limonita nas bordas. |
| **C3.MxGD** | Sulfeto: pirrotita; óxidos de ferro: magnetita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta-se predominante-mente com corrosão superficial, raras com alteração para magnetita e várias com alteração para limonita nas bordas. |   Fragmento de pirrotita (Po) alterando-se para magnetita (Mg) e limonita (Lm). |   Fragmento de pirrotita (Po) com bordas de oxidação para limonita (Lm). |
| **C5.MxGD** | Sulfeto: pirrotita; óxidos de ferro: magnetita e hematita; hidróxido de ferro: limonita. | A pirrotita apresenta-se predominante mente com corrosão superficial. |   Cristal de pirrotita (Po) todo corroído. |   Cristal de pirrotita (Po) com início de alteração para limonita. |

**APÊNDICE J** – Resumo das análises por difração de raios X.

**Tabela J.1** – Resumo das fases identificadas nas argamassas por difração de raios X.

| UHE | Testemunho | Compostos sulfatados identificados | | | | | Outros Compostos da Pasta | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **G** | **E** | **M** | **T** | **Outros atípicos** | **C** | **CH** | **Outros compostos na pasta de cimento** |
| **CORUMBÁ** | C1.CTa | | | | | | X | X | Silicato de cálcio, C-S-H e $C_3S$. |
| | C3.CVt | | | X | | | X | X | Silicato de Cálcio, C-S-H, Aluminato de cálcio hidratado, $C_2S$ e $C_3S$. |
| | C7.CEl.5 | | | | | | X | X | Sílico aluminato de cálcio, C-S-H, $C_2S$, $C_3S$ |
| | C8.CEl.12 | | | X | | | X | X | Aluminato de cálcio hidratado, $C_2S$, $C_3S$. |
| **MASCARE-NHAS** | C3.MTa | | | | | | | X | Sílico aluminato de cálcio; Silicato de cálcio; Sericita; Larnita |
| | C5.MTa | | | | | | | X | Silicato de cálcio; Larnita |
| | C10.MTa | | X | | | | | X | Silicato de cálcio; Larnita |
| **PA II** | C1.PAIITa | X | | | X | Yelimita[1] | X | X | Larnita |
| | C2.PAIITa | X | | | | | X | | Larnita |
| | C5.PAIITa | X | | | | Yelimita [1] | X | X | Larnita |
| **PA IV** | C1-PAIVTa | | | X | | | X | X | Gismondina; Silicato de cálcio; C-S-H + Sjogrenite + Vaterite |
| | C2-PAIVTa | | | | | Hidroglauberita[1], Mateu-cita[1] | X | X | Gismondina; Silicato de cálcio; C-S-H; Vaterite; |
| | C4-PAIVTa | | | X | | Mateucita[1] | X | X | Gismondina; Silicato de cálcio; C-S-H; Vaterite; |
| | C6-PAIVVt | | | | | Mateucita[1] | X | X | Gismondina; Silicato de cálcio; C-S-H |
| | C9-PAIVVt | | X | | | Mateucita[1] | X | X | Silicato de Cálcio, C-S-H, |
| | C10-PAIVVt | X | X | | | | X | X | Larnita, Silicato de Cálcio, C-S-H, Rankinita |
| **MOXO-TÓ** | C1.MxGD | X | | X | | | X | X | Larnita; C-A-S-H; |
| | C3.MxGD | X | | | | | | X | Larnita |
| | C5.MxGD | X | | | | | X | | Larnita |

**Nota:** [1] – Fases identificadas empregando-se ficha catalográfica do banco de dados de produtos cimentícios de 2009 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

# ANEXOS

**ANEXO A** – Difratrogramas obtidos nas análises de difração de Raios X para a argamassa.

**Figura A.1** – Difratrograma da argamassa do concreto C1.CTa – UHE Corumbá.

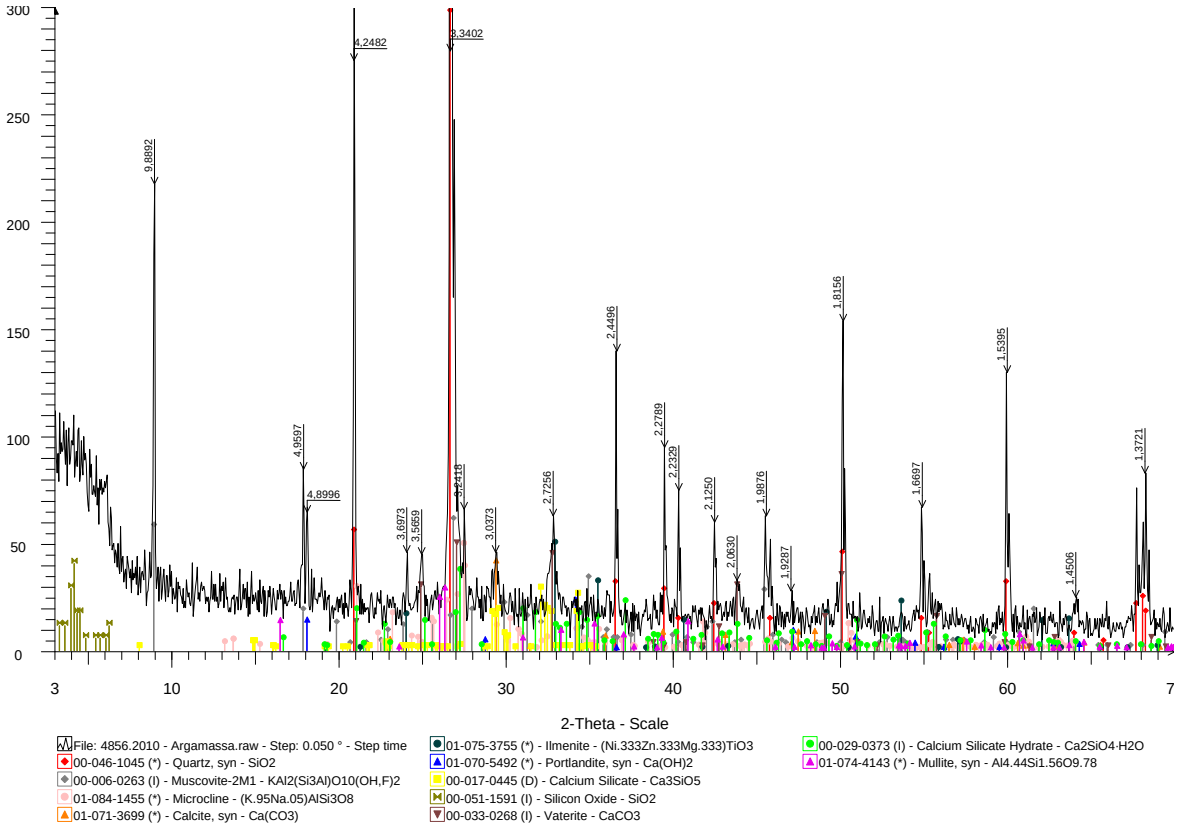



**Figura A.2** – Difratrograma da argamassa do concreto C3.CVt – UHE Corumbá.

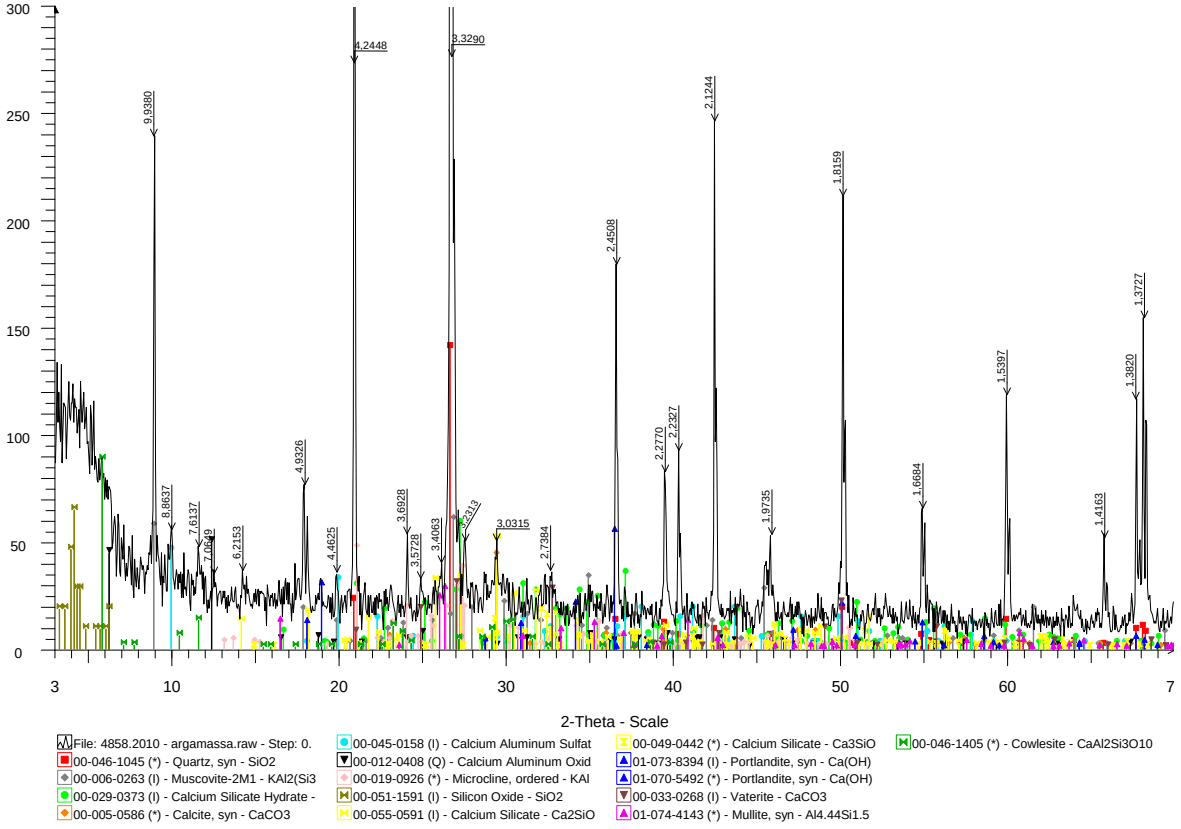


**Figura A.3** – Difratrograma da argamassa do concreto C7.CEl.5 – UHE Corumbá.

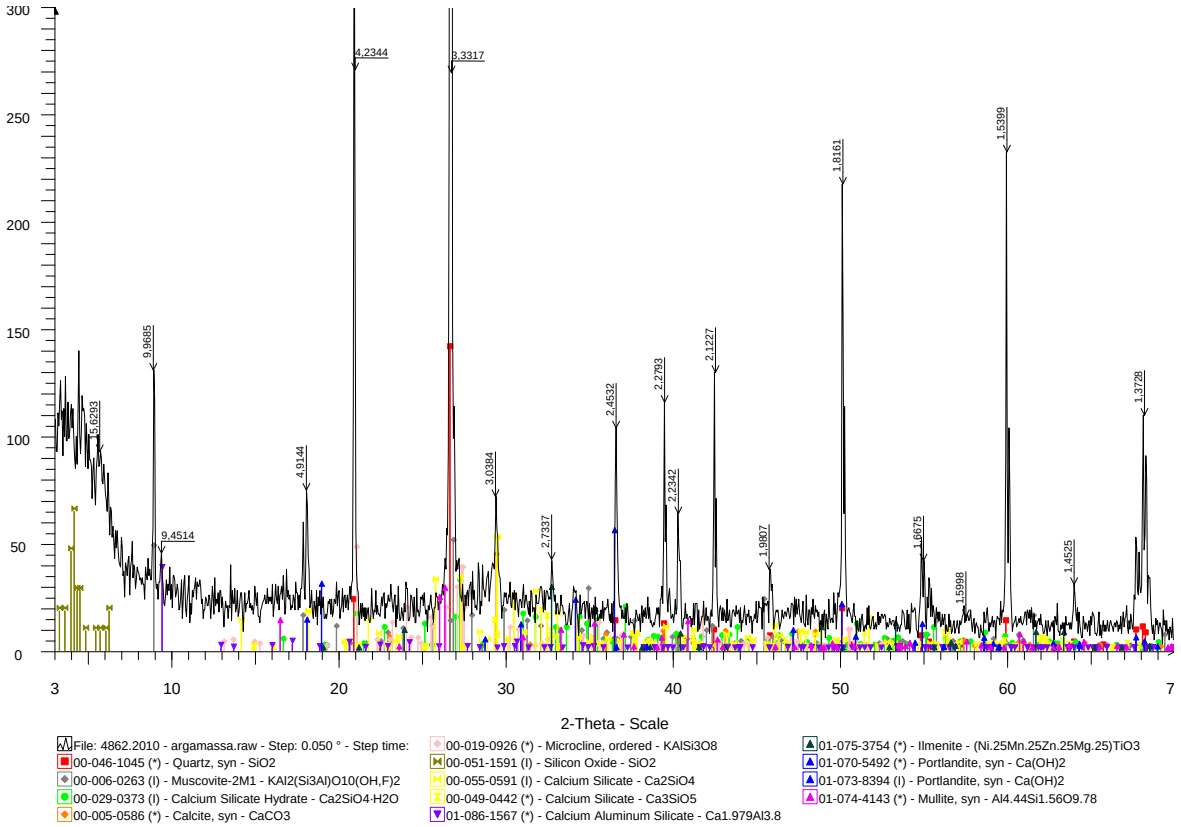



**Figura A.4** – Difratrograma da argamassa do concreto C8.CEl.12 – UHE Corumbá.

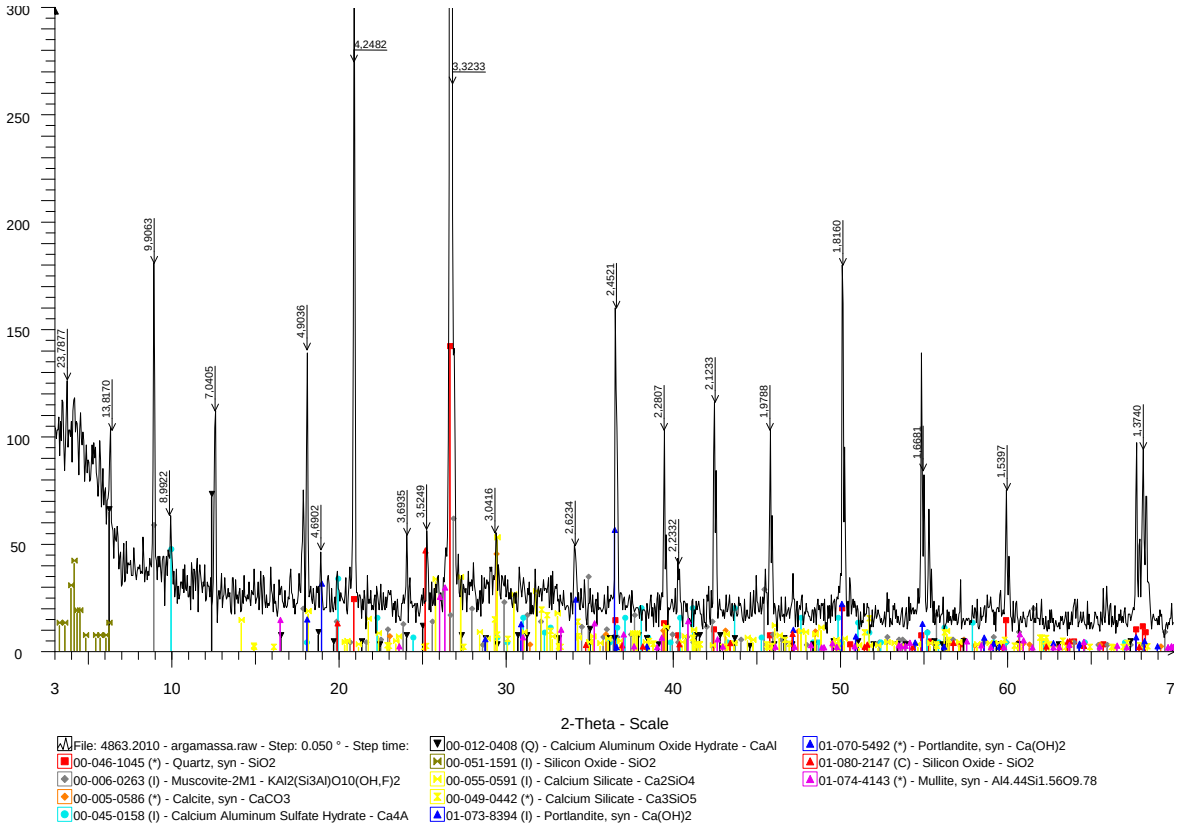


**Figura A.5** – Difratrograma da argamassa do concreto C3.MTa – UHE Mascarenhas.

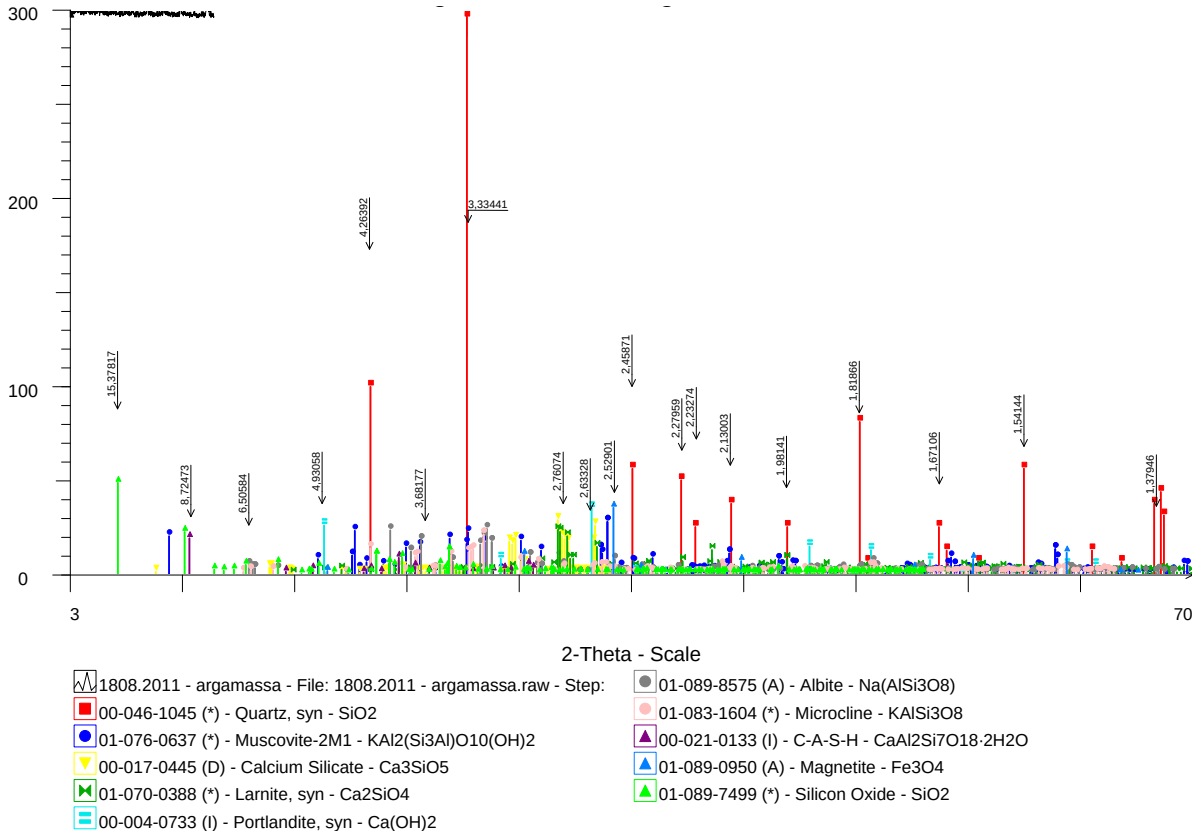



**Figura A.6** – Difratrograma da argamassa do concreto C5.MTa – UHE Mascarenhas.

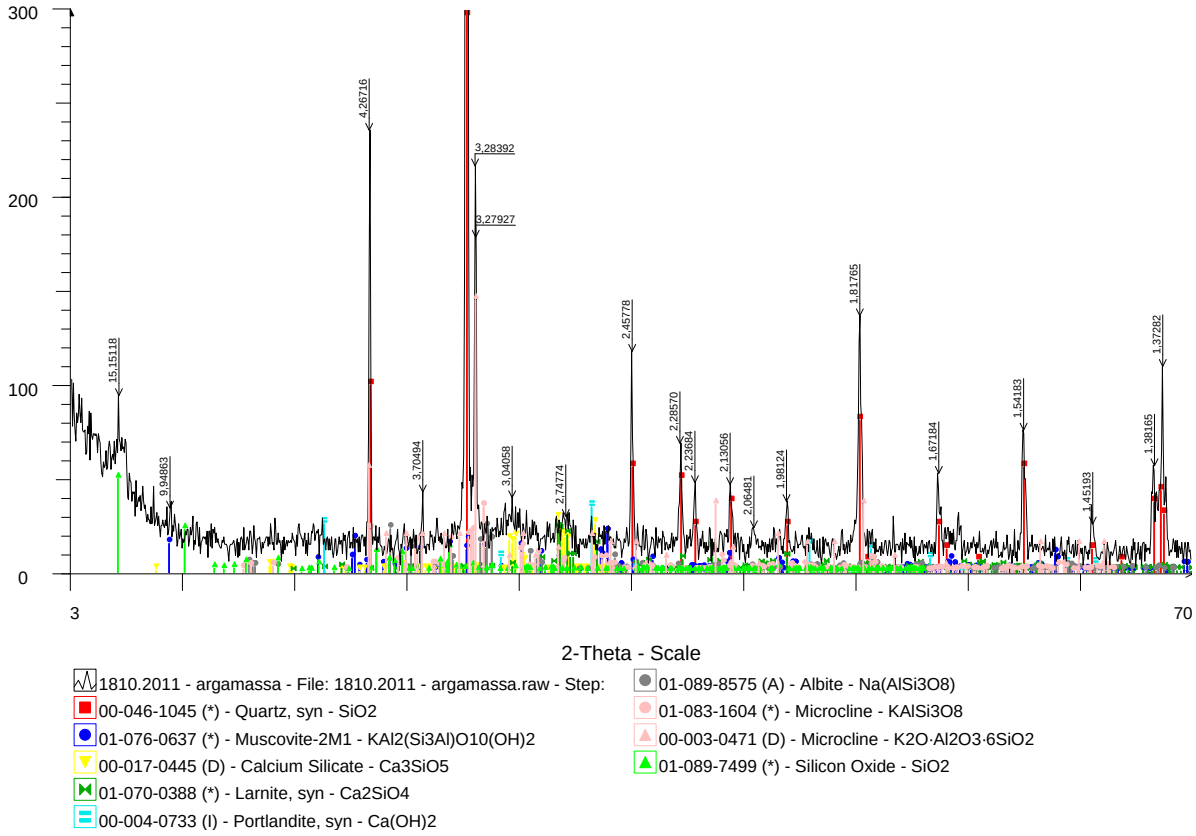


**Figura A.7** – Difratrograma da argamassa do concreto C10.MTa – UHE Mascarenhas.

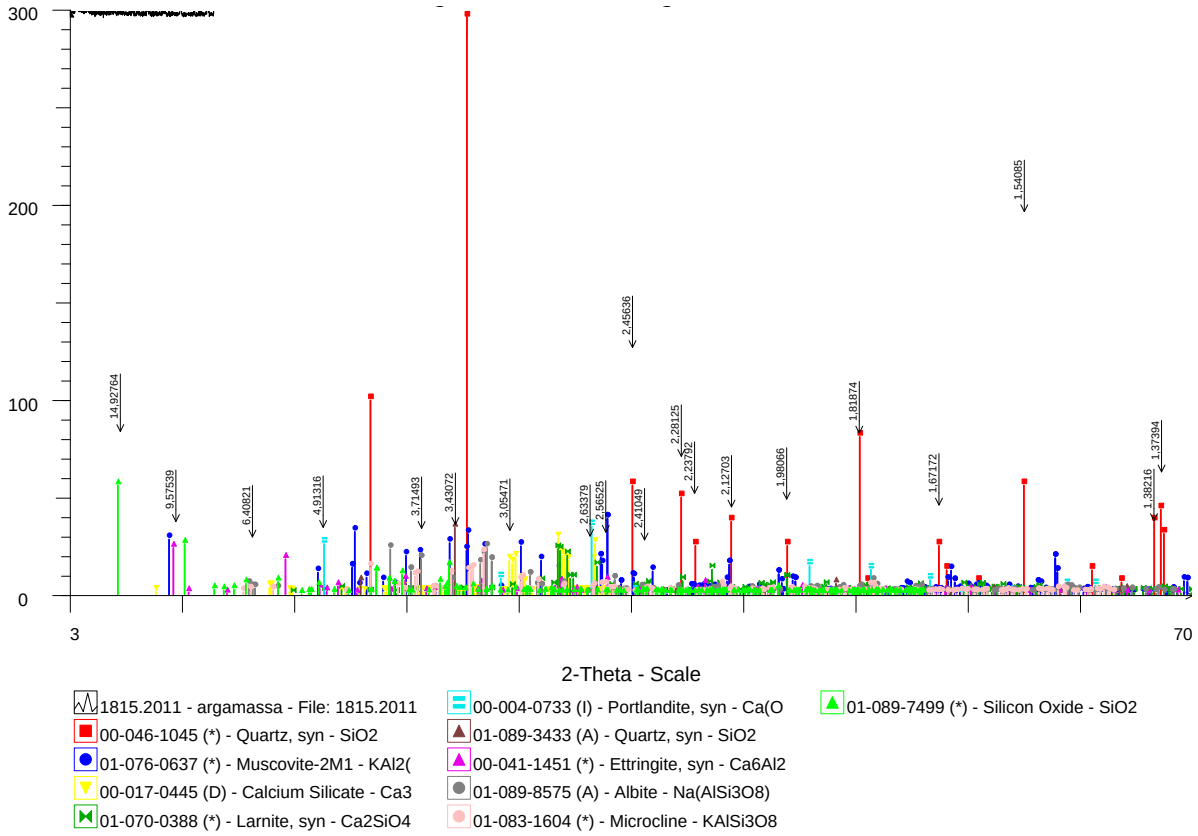



**Figura A.8** – Difratrograma da argamassa do concreto C1.PAIITa – UHE PA II.

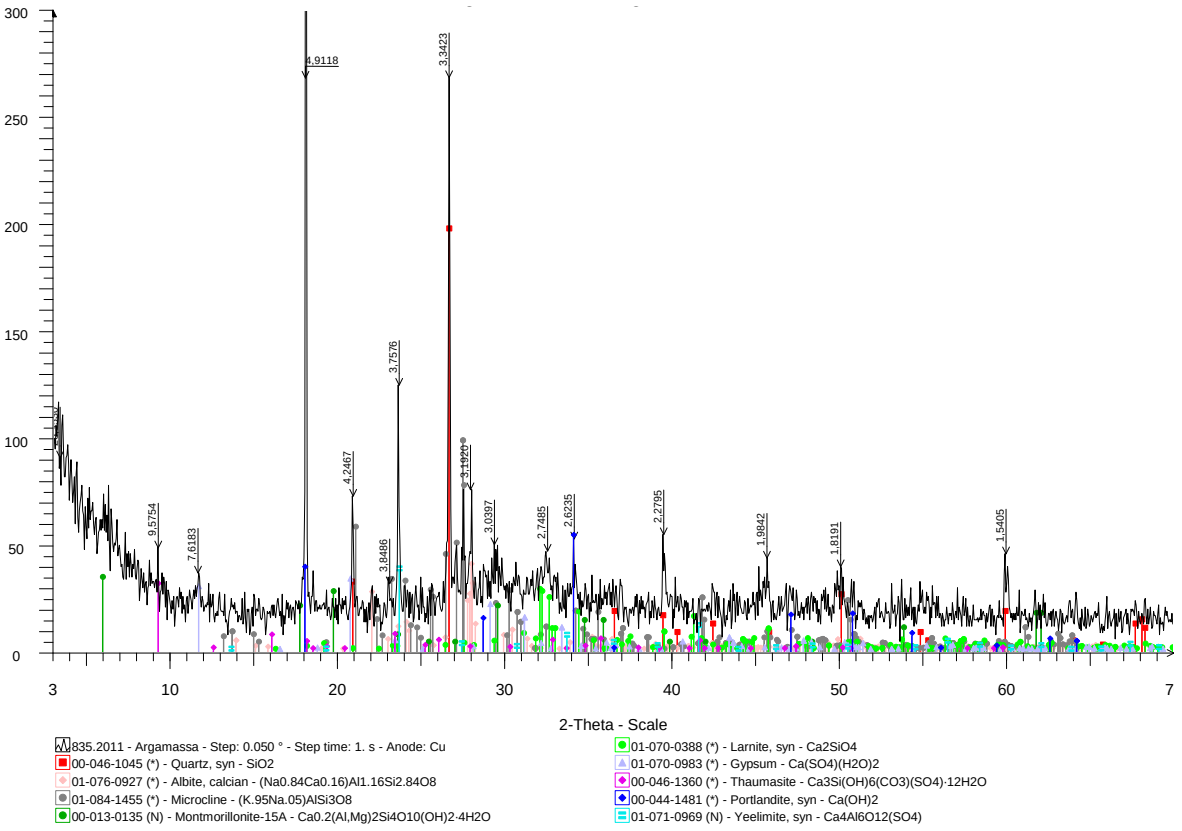


**Figura A.9** – Difratrograma da argamassa do concreto C2.PAIITa – UHE PA II.

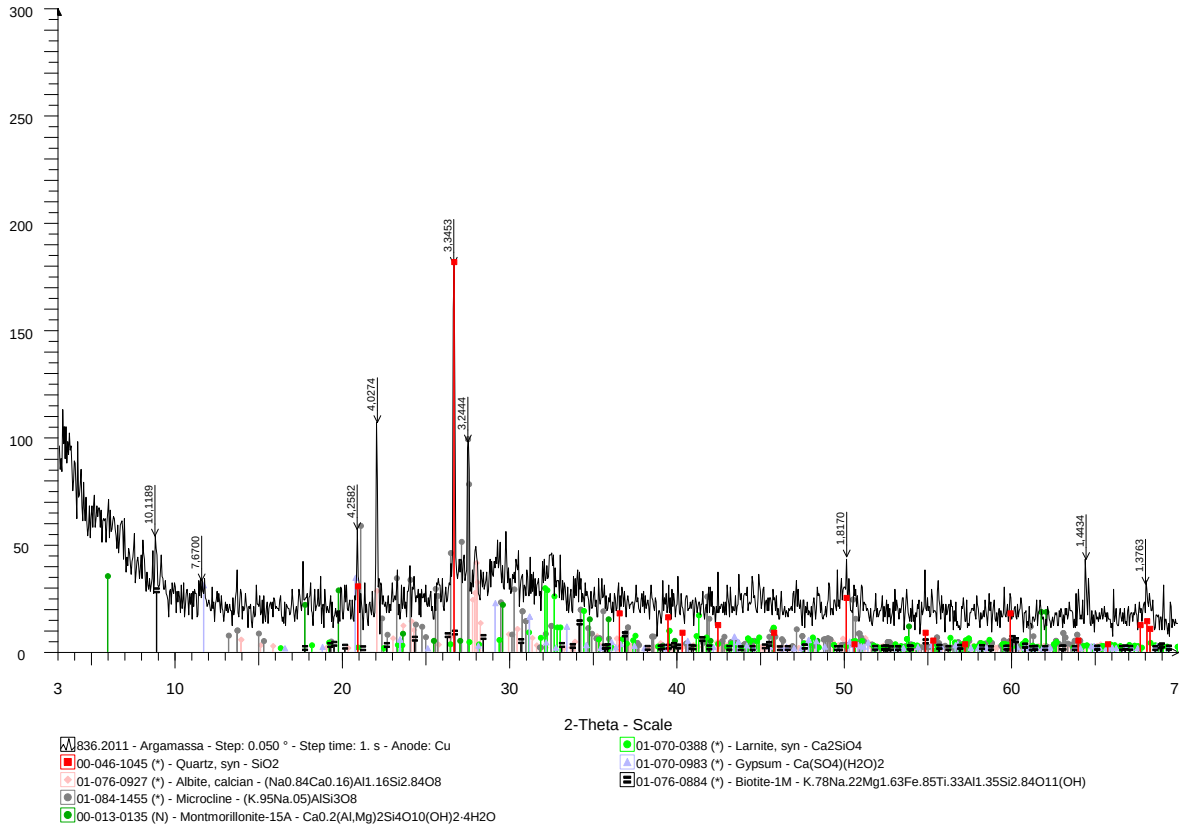



**Figura A.10** – Difratrograma da argamassa do concreto C5.PAIITa – UHE PA II.

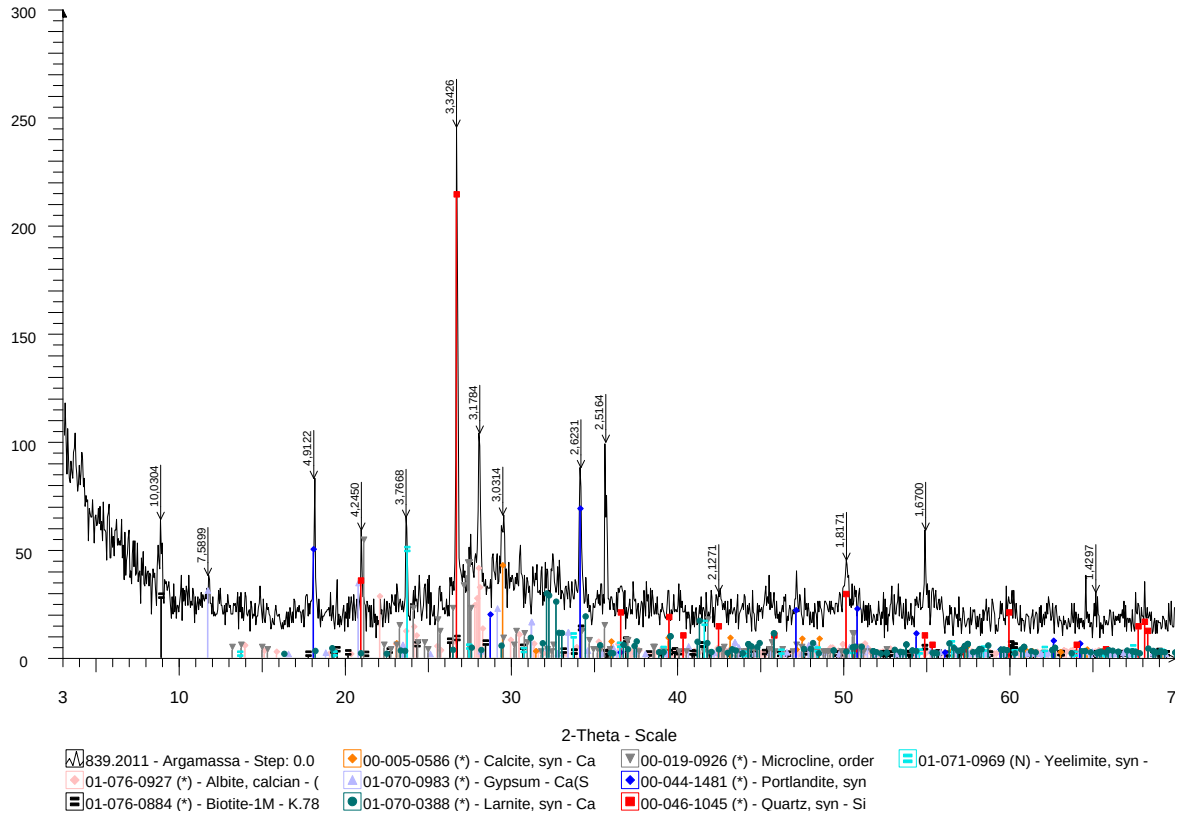


**Figura A.11** – Difratrograma da argamassa do concreto C1.PAIVTa – UHE PA IV.

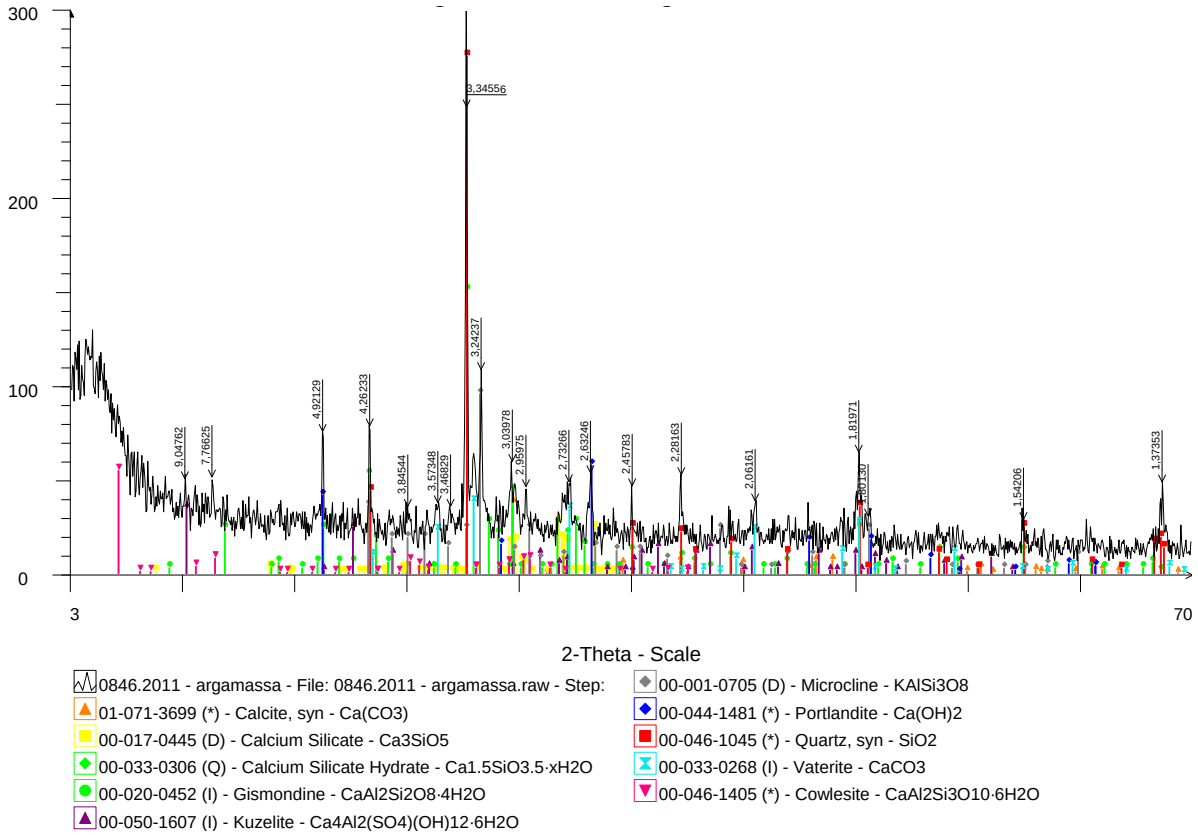



**Figura A.12** – Difratrograma da argamassa do concreto C2.PAIVTa – UHE PA IV.

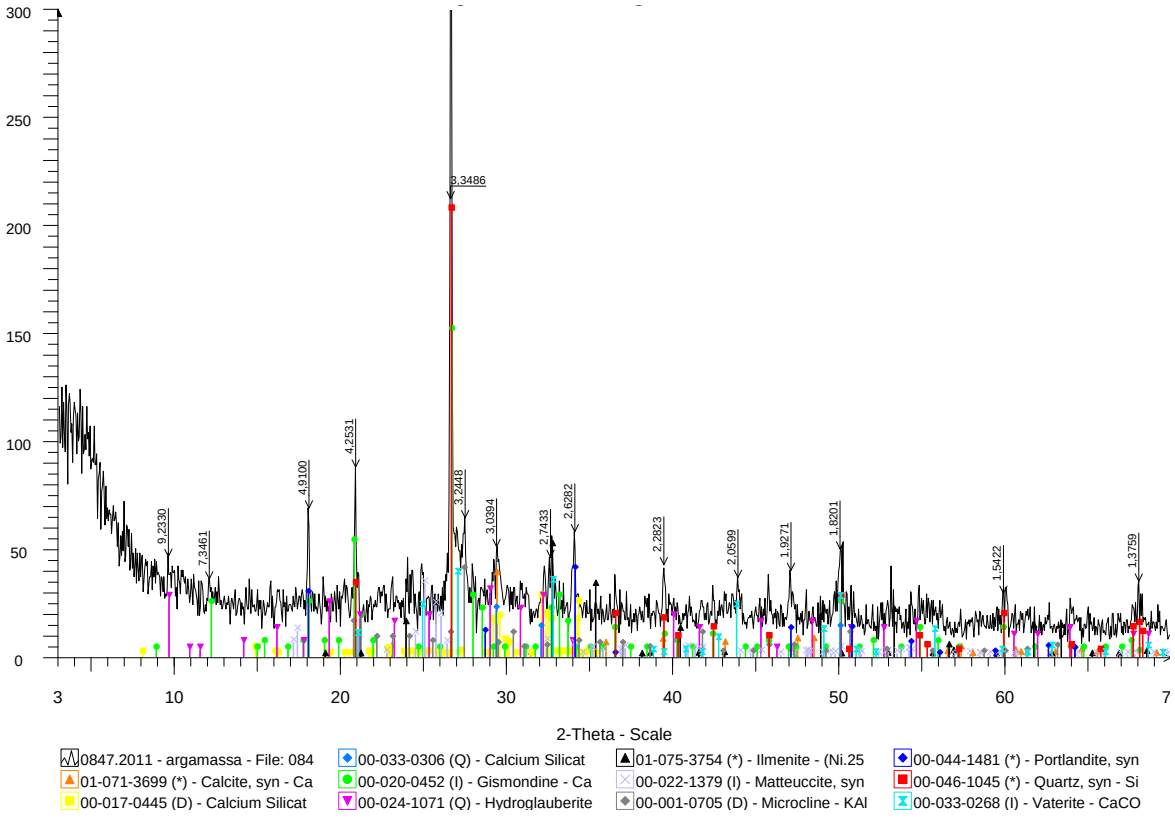


**Figura A.13** – Difratrograma da argamassa do concreto C4.PAIVTa – UHE PA IV.

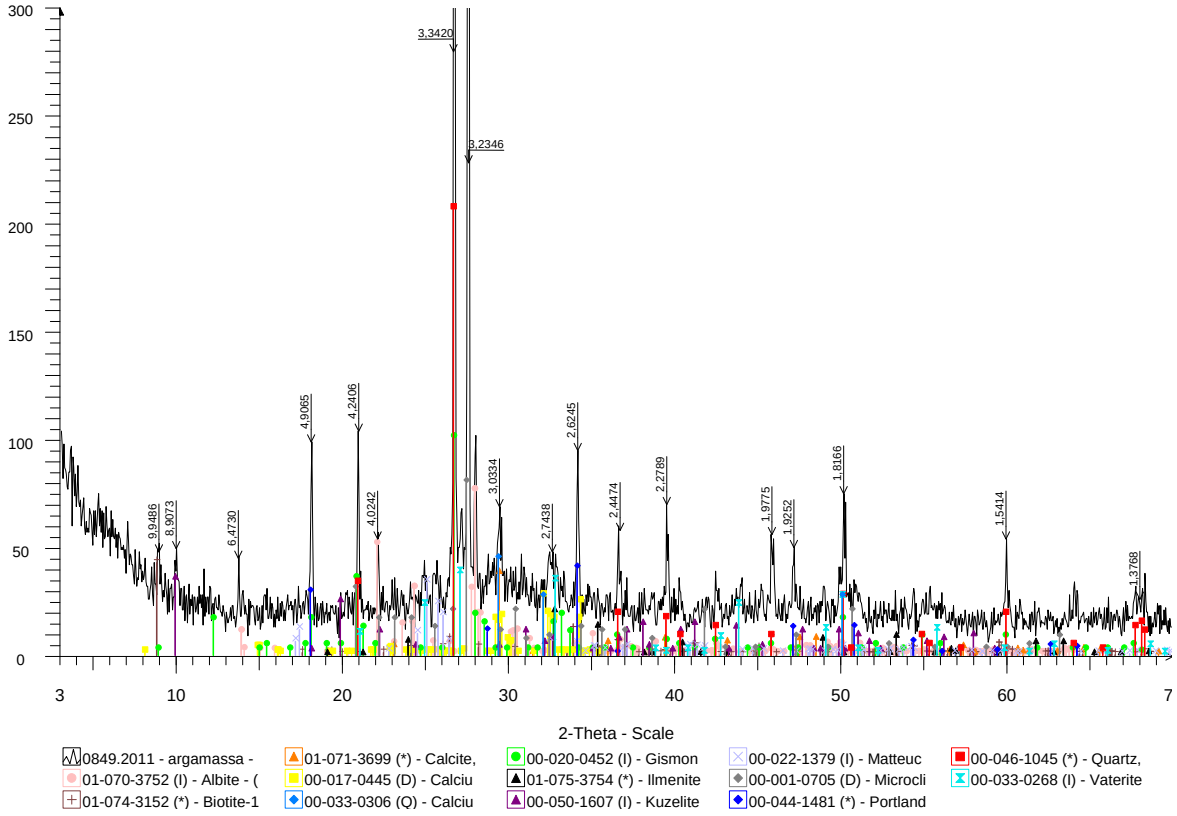



**Figura A.14** – Difratrograma da argamassa do concreto C6.PAIVVt – UHE PA IV.

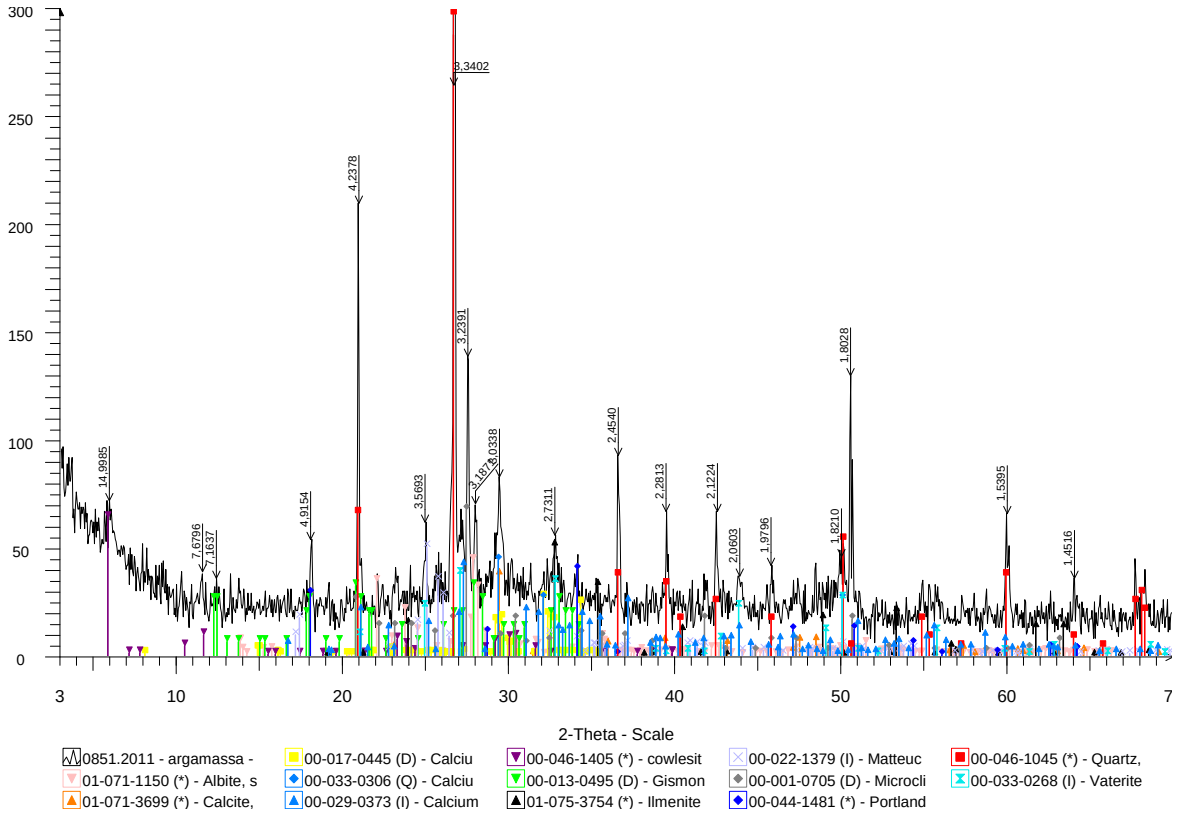


**Figura A.15** – Difratrograma da argamassa do concreto C9.PAIVVt – UHE PA IV.

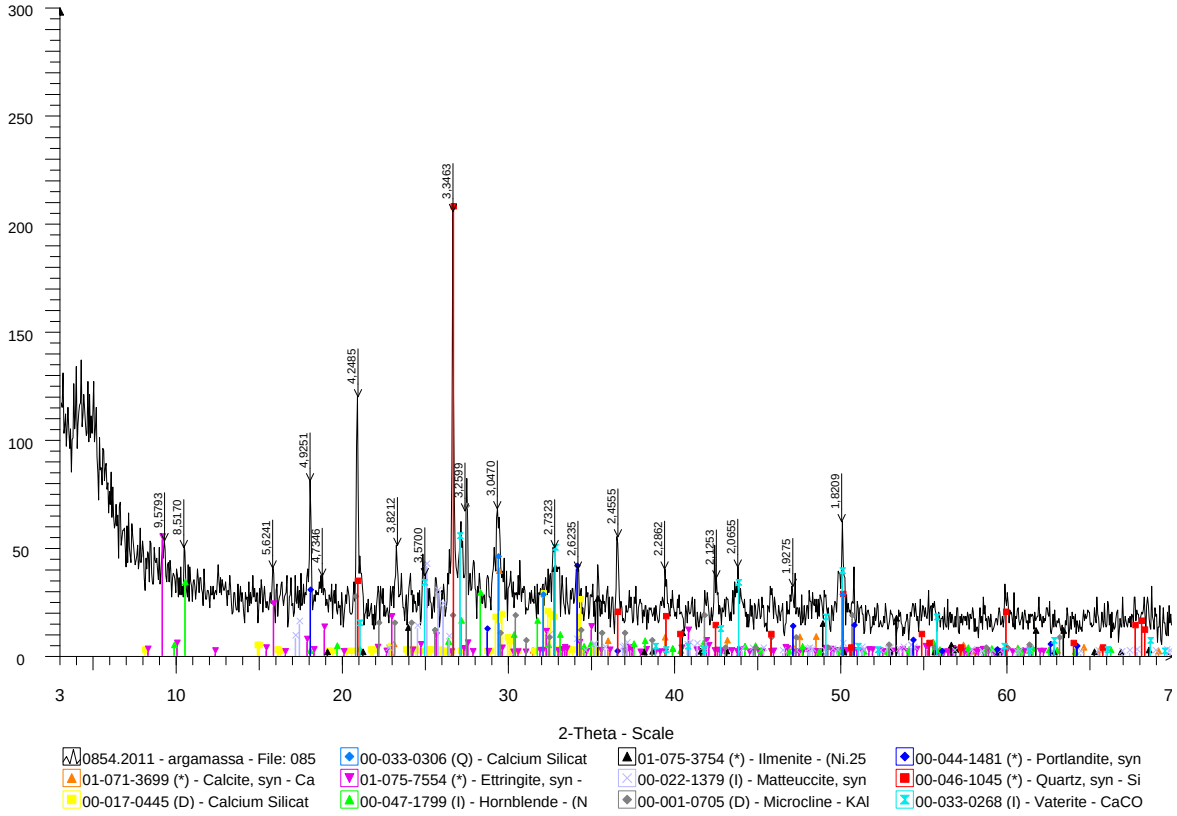



**Figura A.16** – Difratrograma da argamassa do concreto C10.PAIVVt – UHE PA IV.

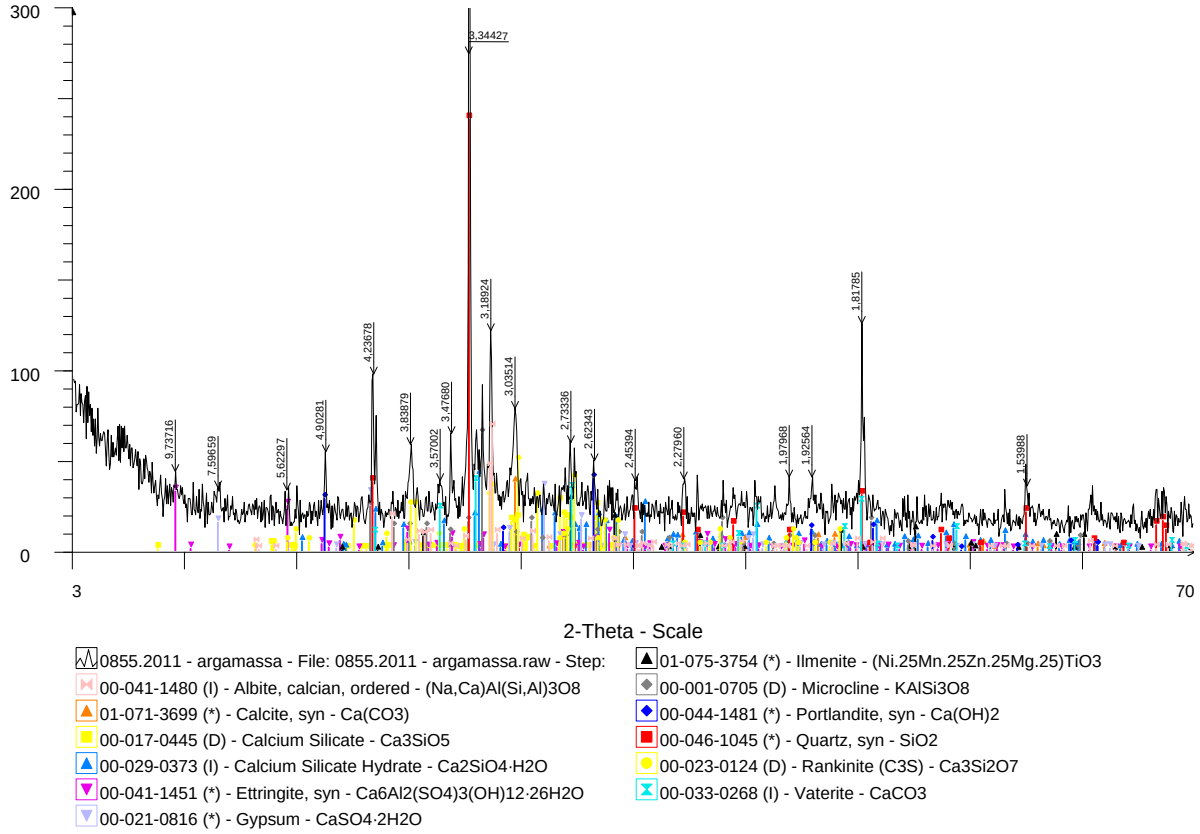


**Figura A.17** – Difratrograma da argamassa do concreto C1.MxGD – UHE Moxotó.

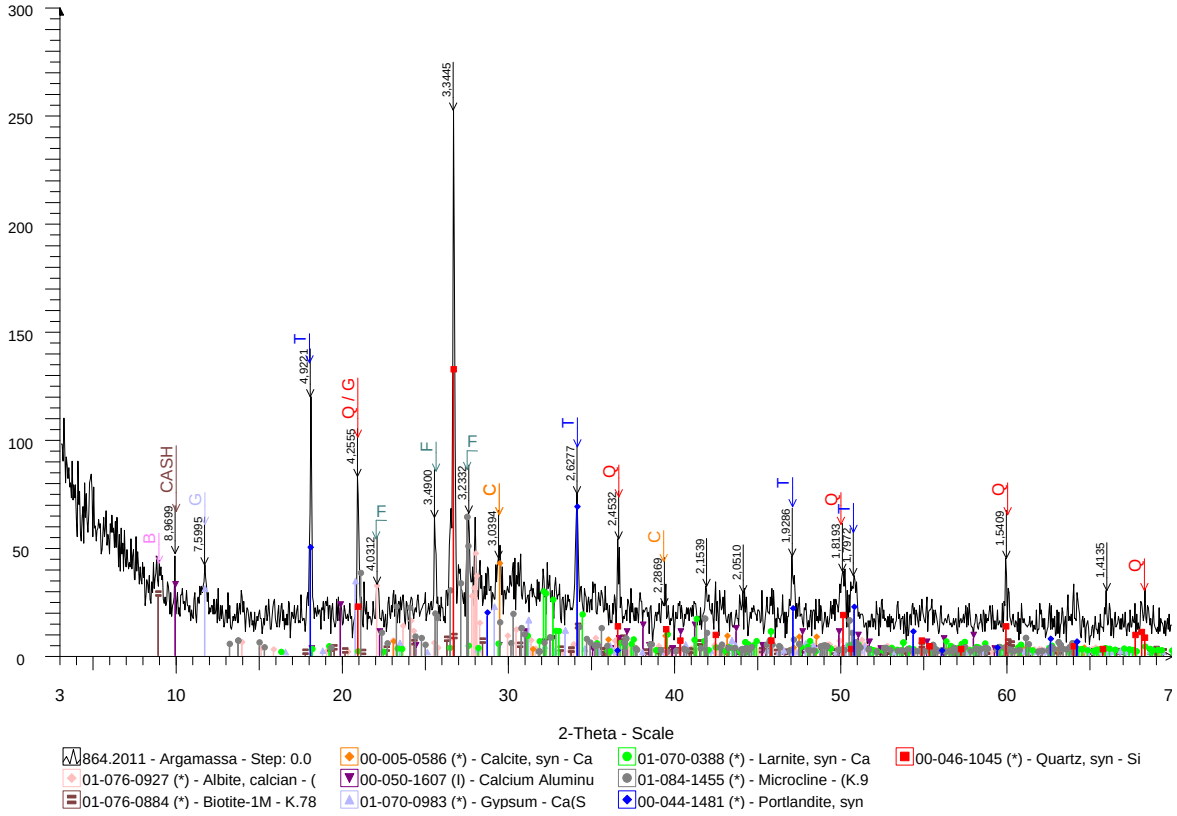



**Figura A.18** – Difratrograma da argamassa do concreto C3.MxGD – UHE Moxotó.

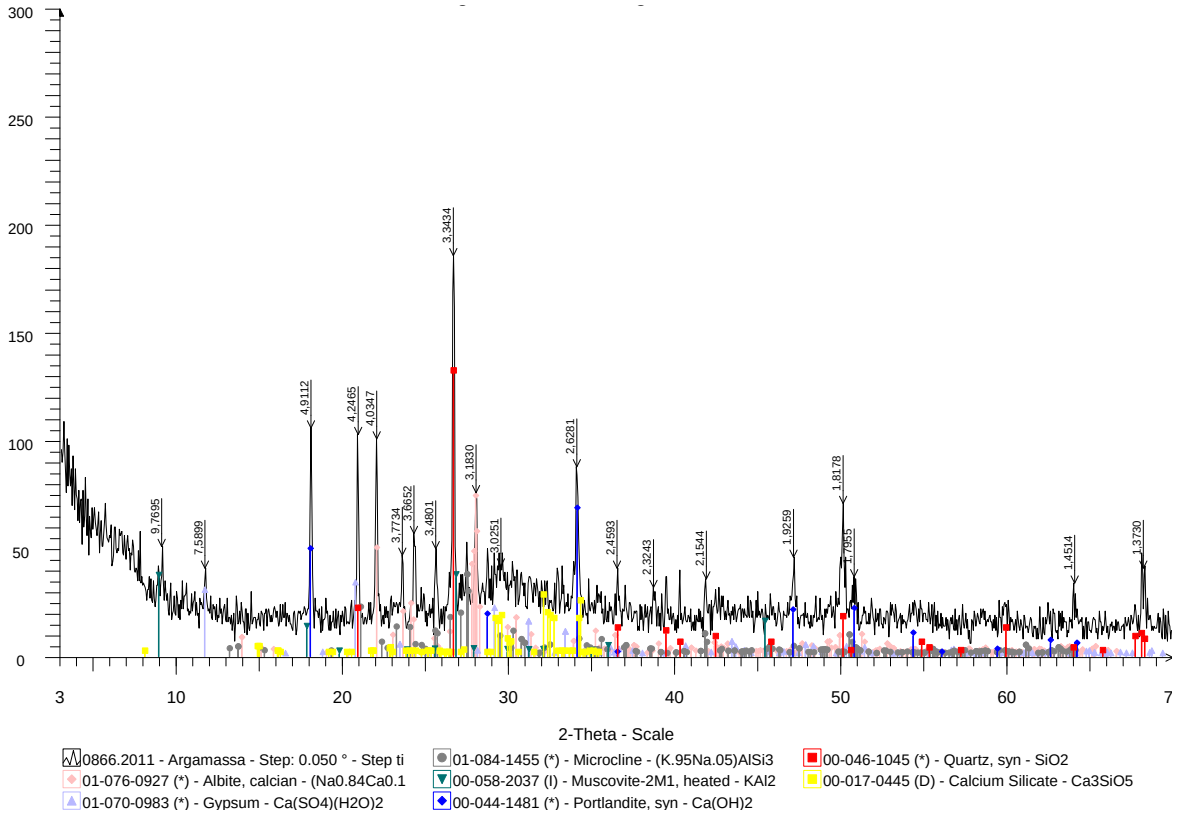
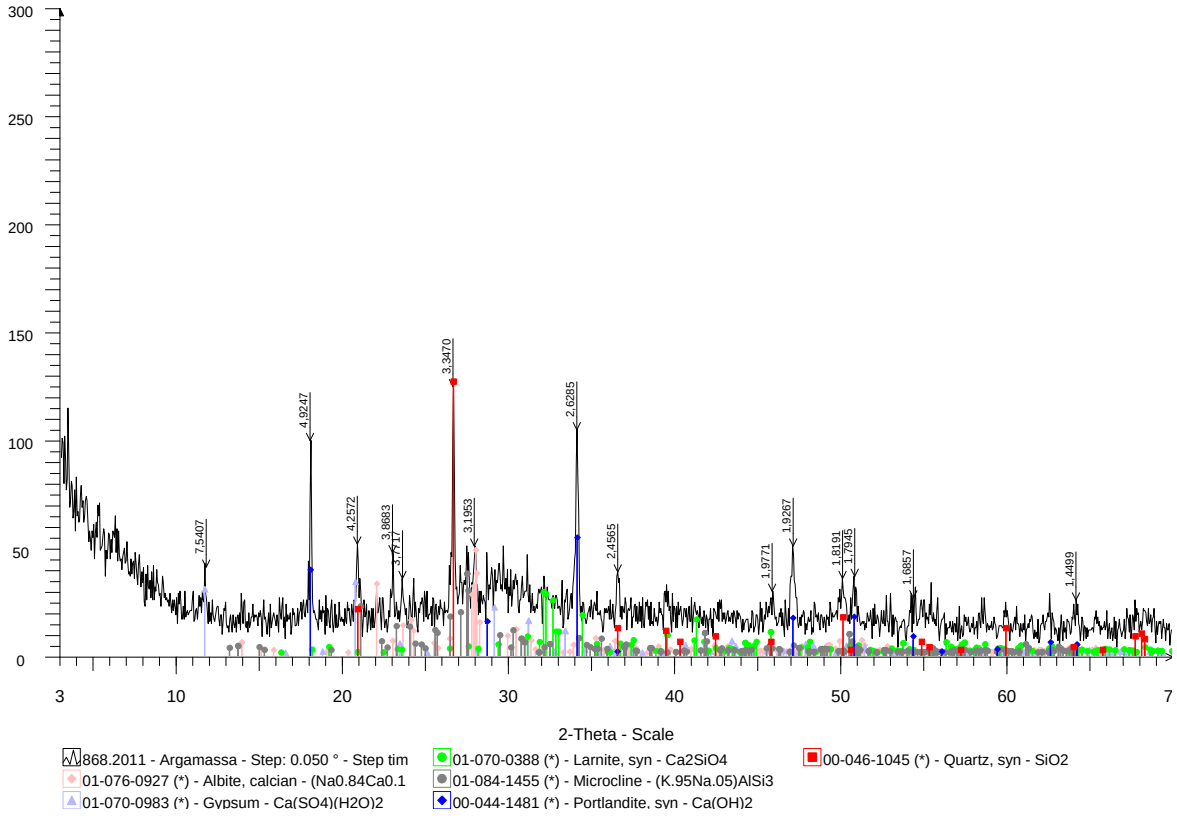


**Figura A.19** – Difratrograma da argamassa do concreto C5.MxGD – UHE Moxotó.



**ANEXO B** – Dados climatológicos obtidos no banco de dados da EMBRAPA (2013).

**Figura B.1** – Dados climatológicos obtidos para o município de Goiânia - GO.

**Latitude:** 16,67 S **Longitude:** 49,25 W **Altitude:** 741 m **Período:** 1961-1990

| Mês | T (°C) | P (mm) | ETP | ARM (mm) | ETR (mm) | DEF (mm) | EXC (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Jan | 23,8 | 270 | 110 | 100 | 110 | 0 | 160 |
| Fev | 23,8 | 213 | 100 | 100 | 100 | 0 | 113 |
| Mar | 23,9 | 210 | 109 | 100 | 109 | 0 | 101 |
| Abr | 23,6 | 121 | 98 | 100 | 98 | 0 | 23 |
| Mai | 22,1 | 36 | 81 | 64 | 72 | 9 | 0 |
| Jun | 20,8 | 9 | 64 | 37 | 36 | 28 | 0 |
| Jul | 20,8 | 6 | 66 | 20 | 23 | 44 | 0 |
| Ago | 22,9 | 13 | 88 | 9 | 24 | 65 | 0 |
| Set | 24,6 | 48 | 108 | 5 | 52 | 56 | 0 |
| Out | 24,6 | 171 | 116 | 60 | 116 | 0 | 0 |
| Nov | 24,0 | 220 | 109 | 100 | 109 | 0 | 71 |
| Dez | 23,5 | 259 | 109 | 100 | 109 | 0 | 150 |
| **TOTAIS** | **278,4** | **1.576** | **1.159** | **795** | **958** | **201** | **618** |
| **MÉDIAS** | **23,2** | **131** | **97** | **66** | **80** | **17** | **52** |

**Legenda:** T = Temperatura; P = Intensidade pluviométrica; ETP = Evapotranspiração potencial; ARM = Armazenamento da água no solo; ETR = Evapotranspiração real; DEF = Deficiência; EXC = Excedente. **Fonte:**INMET. Disponível em: http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/balanco.php?UF=&COD=60. Último acesso em setembro de 2013.

**Figura B.2** – Dados climatológicos obtidos para o município de Ribeirão Preto - SP.

**Latitude:** 21,18 S **Longitude:** 47,80 W **Altitude:** 521 m **Período:** 1961-1990

| Mês | T (°C) | P (mm) | ETP | ARM (mm) | ETR (mm) | DEF (mm) | EXC (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Jan | 24,1 | 267 | 118 | 100 | 118 | 0 | 149 |
| Fev | 24,4 | 217 | 111 | 100 | 111 | 0 | 106 |
| Mar | 24,1 | 159 | 114 | 100 | 114 | 0 | 45 |
| Abr | 22,6 | 80 | 89 | 92 | 88 | 0 | 0 |
| Mai | 20,3 | 54 | 66 | 82 | 64 | 2 | 0 |
| Jun | 19,2 | 31 | 53 | 65 | 47 | 6 | 0 |
| Jul | 19,2 | 28 | 54 | 50 | 43 | 11 | 0 |
| Ago | 21,3 | 25 | 73 | 31 | 44 | 29 | 0 |
| Set | 22,9 | 57 | 90 | 22 | 66 | 24 | 0 |
| Out | 23,6 | 139 | 106 | 55 | 106 | 0 | 0 |
| Nov | 23,8 | 174 | 110 | 100 | 110 | 0 | 19 |
| Dez | 23,7 | 298 | 116 | 100 | 116 | 0 | 182 |
| **TOTAIS** | **269,2** | **1.529** | **1.099** | **898** | **1.027** | **72** | **502** |
| **MÉDIAS** | **22,4** | **127** | **92** | **75** | **86** | **6** | **42** |

**Legenda:** T = Temperatura; P = Intensidade pluviométrica; ETP = Evapotranspiração potencial; ARM = Armazenamento da água no solo; ETR = Evapotranspiração real; DEF = Deficiência; EXC = Excedente. **Fonte:**IAC. Disponível em: http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/balanco.php?UF=&COD=440. Último acesso em setembro de 2013.

**Figura B.3** – Dados climatológicos obtidos para o município de Paulo Afonso - BA.

**Latitude:** 9,40 S **Longitude:** 38,22 W **Altitude:** 253 m **Período:** 1961-1990

| Mês | T (°C) | P (mm) | ETP | ARM (mm) | ETR (mm) | DEF (mm) | EXC (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Jan | 27,4 | 61 | 159 | 0 | 61 | 98 | 0 |
| Fev | 27,2 | 55 | 143 | 0 | 55 | 88 | 0 |
| Mar | 27,1 | 93 | 154 | 0 | 93 | 61 | 0 |
| Abr | 25,5 | 81 | 118 | 0 | 81 | 37 | 0 |
| Mai | 24,2 | 55 | 99 | 0 | 55 | 44 | 0 |
| Jun | 23,6 | 61 | 87 | 0 | 61 | 26 | 0 |
| Jul | 23,0 | 53 | 82 | 0 | 53 | 29 | 0 |
| Ago | 23,5 | 25 | 89 | 0 | 25 | 64 | 0 |
| Set | 24,9 | 18 | 108 | 0 | 18 | 90 | 0 |
| Out | 26,4 | 15 | 139 | 0 | 15 | 124 | 0 |
| Nov | 27,7 | 18 | 162 | 0 | 18 | 144 | 0 |
| Dez | 27,3 | 47 | 162 | 0 | 47 | 115 | 0 |
| **TOTAIS** | **307,8** | **582** | **1.502** | **0** | **582** | **920** | **0** |
| **MÉDIAS** | **25,7** | **49** | **125** | **0** | **49** | **77** | **0** |

**Legenda:** T = Temperatura; P = Intensidade pluviométrica; ETP = Evapotranspiração potencial; ARM = Armazenamento da água no solo; ETR = Evapotranspiração real; DEF = Deficiência; EXC = Excedente. **Fonte:**INMET. Disponível em: http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/balanco.php?UF=&COD=33. Último acesso em setembro de 2013.