

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ESTUDO DA REATIVIDADE DE AGREGADOS CONTENDO SULFETOS
EM CONCRETOS E ARGAMASSAS"**

Cristiane Raposo Faquineli

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. José Marcio Fonseca Calixto
DEES - UFMG - (Orientador)

Profª. Dra. Carmem Couto Ribeiro
DEMC - UFMG

Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos
DEMET - UFMG

Profª. Dra. Joana Darc da Silva Pinto
PUC - MG

Belo Horizonte, 05 de abril de 2010

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Nilton e Francis, minhas irmãs, Lu e
Si, ao meu querido e amado Leandro
e a todos que contribuíram para a sua
realização.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por minha vida e força diante dos desafios enfrentados durante esta etapa.

Ao meu grande mestre e exemplo profissional, Nilton Faquinesi, por sua presença e ensinamentos durante todas as etapas deste trabalho.

A minha mãe, Francislene Raposo, que por diversas vezes leu e corrigiu erros de português e redação sem nem mesmo conhecer os conceitos técnicos e nunca me faltou nos momentos de cansaço me dando força e incentivo.

Ao Prof. José Márcio Calixto, que além de um ótimo orientador contribuindo com seus comentários e sugestões para o aprimoramento deste com muita competência, sempre me apresentou caminhos também como amigo.

Ao Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da UFMG, em especial ao técnico Geraldo Evaristo, pela grande ajuda prestada ao longo de toda a pesquisa.

À CEMIG Geração e Transmissão S.A. em especial aos Engenheiros Tibiriçá Gomes de Mendonça e Maria Cecília Novaes Firmo Ferreira, à Geóloga Ana Luisa Cosso e à equipe do Laboratório de solos e concreto.

Aos Departamentos de Metalurgia e Materiais e de Minas pela disponibilidade de equipamentos e mão de obra para preparação de amostras e realização de metodologias científicas.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivo.....	5
1.4	Descrição resumida da dissertação.....	5
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	Agregados.....	7
2.2	Deterioração do concreto por reações químicas com sulfetos.....	9
2.3	Técnicas de instrumentação.....	13
2.3.1	Fluorescência de raios X.....	13
2.3.2	Análise química.....	14
2.3.3	Difração de raios X.....	15
2.3.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	16
3	Programa Experimental	19
3.1	Materiais constituintes dos concretos e argamassas.....	20
3.1.1	Cimento.....	20
3.1.2	Agregados.....	21
3.1.3	Água.....	30
3.1.4	Aditivo.....	30
3.2	Dosagem dos concretos e argamassas.....	30
3.3	Moldagem e cura dos corpos de prova de concreto e argamassa.....	31
3.4	Ensaio mecânicos das argamassas e dos concretos.....	33
3.4.1	Ensaio de expansão dos concretos e argamassas.....	33
3.4.2	Ensaio de resistência dos concretos e argamassas.....	34
3.5	Caracterização da microestrutura das argamassas e dos concretos.....	35

4	Apresentação e Análise dos Resultados	36
4.1	Introdução.....	36
4.2	Propriedades mecânicas.....	37
4.2.1	Resistência à compressão.....	37
4.2.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	39
4.3	Ensaio de expansão em barras.....	41
4.3.1	Argamassa.....	41
4.3.2	Concreto.....	46
4.4	Avaliação da microestrutura.....	52
4.4.1	Análise química.....	52
4.4.2	Microscopia eletrônica de varredura – MEV.....	55
4.5	Macro versus micro análise.....	59
4.5.1	Argamassa fabricada com agregado de xisto-sulfetado.....	59
4.5.2	Concreto fabricado com agregado de xisto-sulfetado.....	60
5	Conclusões e Sugestões	61
5.1	Introdução.....	61
5.2	Conclusões.....	62
5.3	Sugestões para estudos futuros.....	63
	Referências Bibliográficas	65
	Anexo A	70
	Anexo B	72
	Anexo C	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Difração de raios X em um cristal. (Fonte: SKOOG <i>et al.</i> , 2002).....	16
FIGURA 2.2 – Tipos de elétrons gerados pelo MEV (Fonte: DAL MOLIN, 2007).....	17
FIGURA 3.1 - Representação da granulométrica do agregado de gnaisse.....	22
FIGURA 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo de gnaisse.....	23
FIGURA 3.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo de gnaisse.....	24
FIGURA 3.4 - Fotos de testemunhos de sondagem da usina de Irapé.....	25
FIGURA 3.5 - Representação da granulométrica do agregado com sulfeto de Irapé.....	26
FIGURA 3.6 - Curva granulométrica do agregado miúdo de Irapé.....	27
FIGURA 3.7 - Curva granulométrica do agregado graúdo de Irapé.....	28
FIGURA 3.8 – Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos.....	32
FIGURA 3.9 – Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.....	32
FIGURA 3.10 - Equipamento de medida da expansão nas barras de concreto e argamassa.....	33
FIGURA 3.11 – Prensa usada para os ensaios de resistência à compressão e tração.....	35
FIGURA 4.1 – Resultados médios da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição.....	37
FIGURA 4.2 – Resultados médios da resistência à tração das argamassas ao longo do tempo em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição.....	39
FIGURA 4.3 – Resultados médios da resistência à tração do concreto ao longo do tempo em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição.....	40

FIGURA 4.4 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com gnaiss e imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C.....	41
FIGURA 4.5 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com gnaiss e imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida na temperatura ambiente.....	42
FIGURA 4.6 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com gnaiss e mantidas em câmara úmida.....	42
FIGURA 4.7 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com xisto sulfetado imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C.....	43
FIGURA 4.8 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com xisto sulfetado imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida na temperatura ambiente.....	44
FIGURA 4.9 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com xisto sulfetado mantidas em câmara úmida.....	44
FIGURA 4.10 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de argamassa imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C..	45
FIGURA 4.11 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de argamassa imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida na temperatura ambiente.....	45
FIGURA 4.12 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de argamassa mantidas em câmara úmida.....	46
FIGURA 4.13 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com gnaiss e, imersas na solução de hidróxido de cálcio e mantida a 40°C.....	47
FIGURA 4.14 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com gnaiss e, imersas na solução de hidróxido de cálcio e mantida na temperatura ambiente.....	47
FIGURA 4.15 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com gnaiss e mantidas em câmara úmida.....	48
FIGURA 4.16 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com xisto sulfetado, imersas na solução de hidróxido de cálcio e mantida a 40°C.....	49

FIGURA 4.17 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com xisto sulfetado imersas na solução de hidróxido de cálcio na temperatura ambiente.....	49
FIGURA 4.18 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com xisto sulfetado e mantidas em câmara úmida.....	50
FIGURA 4.19 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de concreto imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C.....	51
FIGURA 4.20 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de concreto imersas na solução de hidróxido de cálcio na temperatura ambiente.....	51
FIGURA 4.21 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de concreto mantidas em câmara úmida.....	52
FIGURA 4.22 – Micrografias de uma amostra de argamassa mantida na solução de Ca(OH)_2 em temperatura ambiente.....	56
FIGURA 4.23 – Micrografia de uma amostra de argamassa mantida a 40°C na solução de Ca(OH)_2	57
FIGURA 4.24 – Micrografia de outra amostra de argamassa mantida a 40°C na solução de Ca(OH)_2	57
FIGURA 4.25 – Micrografia, com ampliação de 2000x, mostrando a formação de acículas de etringita fibro radiada em um poro. Região de contato do concreto projetado com o maciço rochoso da área de implantação da Usina Hidrelétrica de Irapé.....	58
FIGURA 4.26 – Micrografia de uma amostra de concreto mantida na solução de hidróxido de cálcio em temperatura ambiente.....	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Caracterização física do cimento CP III 40 RS.....	20
TABELA 3.2 - Caracterização química do cimento CP III 40 RS.....	20
TABELA 3.3 - Caracterização dos agregados de gnaïsse.....	21
TABELA 3.4 - Resultado da composição granulométrica do agregado miúdo de gnaïsse.....	22
TABELA 3.5 - Resultado da composição granulométrica do agregado graúdo de gnaïsse.....	23
TABELA 3.6 - Caracterização dos agregados com sulfeto de Irapé.....	26
TABELA 3.7 - Resultado da composição granulométrica do agregado miúdo de Irapé.....	27
TABELA 3.8 - Resultado da composição granulométrica do agregado graúdo de Irapé.....	28
TABELA 3.9 - Resultados da fluorescência de raios X para agregado de Irapé...	29
TABELA 3.10 - Resultados da análise química.....	29
TABELA 3.11 – Características do aditivo.....	30
TABELA 3.12 – Nomenclatura e dosagens dos traços de argamassa e concreto..	31
TABELA 4.1 - Resultados das análises químicas nos concretos e argamassas.....	52
TABELA 4.2 – Teor de Stotal nos materiais constituintes.....	53
TABELA 4.3 – Análise comparativa dos teores de Stotal nos concretos e argamassas.....	54

ABREVIações E SIGLAS

Å	Angstrom
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
<i>c</i>	Velocidade da luz
C ₂ S	Silicato bicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AFe	Ferro-aluminato tetracálcico
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CETEC	Centro tecnológico de Minas Gerais
CO ₂	Dióxido de carbono (gás carbônico)
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
cp	Corpo-de-prova
CPIII RS	Cimento Portland III – Resistente a sulfatos
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
<i>d</i>	Distância entre planos cristalográficos
DRX	Difração de raios X
eV	Elétron-Volt
<i>E</i> ₀	Energia do estado mais baixo
<i>E</i> ₁	Energia do estado mais alto
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
Fe(OH) ₃	Hidróxido de ferro
FeS	Pirrotita (sulfeto de ferro)
FeS ₂	Pirita (dissulfeto de ferro)
FRX	Fluorescência de raios X
<i>h</i>	Constante de Planck

H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
KBr	Brometo de potássio
L ₀	Comprimento inicial
LTNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal
L _t	Comprimento ao fim do tempo t de exposição
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgO	Óxido de magnésio
mol	Unidade para a grandeza quantidade de matéria ou substância
NBR	Norma brasileira
Ni	Níquel
NM	Norma Mercosul
SiO ₂	Dióxido de silício (sílica ativa)
MPa	MegaPascal
nm	Nanometro (=10 ⁻⁹ metros)
PbS	Galena
pH	Grandeza que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução aquosa
P&D	Projeto de pesquisa e desenvolvimento
UHE	Usina Hidroelétrica
ZnS	Esfarelita
ν	Frequência de radiação
λ	Comprimento de onda
θ	Ângulo incidente
μm	Micrometro
°C	Grau Celsius
°	Graus
%	Porcentagem
ε	Deformação específica

RESUMO

A falta de consenso mundial quanto ao valor deletério do teor de enxofre em estruturas de concreto tem motivado a realização de várias pesquisas em todo o mundo. Neste sentido, esta dissertação apresenta os resultados de um estudo sobre o comportamento de concretos e argamassas fabricados com agregados contendo compostos de enxofre. Foram utilizados neste estudo agregados extraídos de testemunhos de sondagem do maciço rochoso da área de implantação da UHE de Irapé, Minas Gerais. Agregados de referencia também foram empregados para efeito de comparação. Corpos-de-prova de concreto e argamassa foram expostos a uma solução de hidróxido de cálcio diluído em água mantida em duas temperaturas distintas: temperatura ambiente e 40°C. A avaliação do desempenho estrutural foi feita por meio de medidas de expansão ao longo do tempo, de acordo com a Especificação LNEC E-251 (1985), e da resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Microscopia eletrônica de varredura e determinação química do teor de enxofre total também foram realizadas. A análise dos resultados revelou que o tamanho dos agregados reativos e a temperatura do meio de exposição têm influencia significativa no comportamento.

Palavras-chave: Agregados contendo enxofre, concreto, argamassa, comportamento

ABSTRACT

The lack of consensus on the amount of sulfur compounds on reinforced concrete structures has resulted into a large number of investigations worldwide. In this scenario, the goal of this investigation is to evaluate the performance of concrete and mortar produced with aggregates containing sulfides. Aggregates from the surroundings of Irapé water power plant as well as gneiss (reference) were used in the study. Mortar and concrete bar specimens were exposed to a calcium hydroxide solution dissolved in water kept at room temperature and 40°C as prescribed by LNEC E-251 specification (1985). Measurements of each bar length were taken from 7 to 365 days after exposition. Concrete and mortar compressive and splitting tensile strength were also evaluated. The microstructure analysis included scanning electron microscopy and chemical determination of the sulfur content. The test results indicate that the aggregate size and the environmental temperature have significant influence in the behavior.

Keywords: aggregates, sulfides, concrete, mortar, behavior

1

Introdução

1.1 - Considerações Iniciais

A durabilidade das estruturas de concreto está cada vez mais presente em discussões acerca do comportamento deste material de construção. Ela se relaciona com as propriedades químicas e físicas dos produtos de hidratação do Cimento Portland, assim como com os materiais constituintes do concreto e com o ambiente no qual a estrutura de concreto estará exposta.

A qualidade do material e sua composição influenciam de forma decisiva nas possíveis patologias que podem ocorrer ao longo da vida útil das estruturas de concreto. Agregados constituídos de compostos de sulfeto podem tornar-se uma fonte nociva do ataque ao concreto por sulfato. Rochas caracterizadas morfologicamente com presença de sulfetos, em meio propício, oxidam liberando sulfato que em contato com a pasta de cimento Portland reagirá formando neoprodutos e causando patologias.

Os sulfetos são compostos inorgânicos de enxofre, elemento não-metálico conhecido desde a antiguidade. Ele está distribuído na crosta terrestre em vastos leitos subterrâneos

como enxofre livre e em muitos sulfetos como galena (PbS), pirita (FeS₂), esfalerita (ZnS) e em vários sulfatos de cálcio e magnésio entre outros (RUSSEL, 1994).

“O enxofre na forma de sulfetos constitui uma classe importante de minerais metálicos que inclui parte dos minérios. A identificação e quantificação de sulfetos ao microscópio são feitas através de observação de seções polidas ou lâminas polidas utilizando-se luz refletida, uma vez que a luz transmitida os sulfetos tornam-se opacos impossibilitando sua identificação” (FUGIMORI e FERREIRA, 1987 apud SIGNINI *et al.*, 2003).

CHINCHÓN *et al.* (1995) justificam, através da análise de reações e produtos da decomposição de piritas (FeS₂ – dissulfeto de ferro) e pirrotitas (FeS – sulfeto de ferro) presentes no maciço, exposto a intempéries, do monte Palau na Espanha, o inadequado uso destes minerais como agregado para concreto. Segundo o autor os produtos desta decomposição têm grande volume em relação a seus precursores sendo fonte de expansão em concretos.

Alguns relatos de casos de manifestações patológicas envolvendo a presença de “pirita” na Espanha são apresentados por VAZQUEZ (1999) *apud* HASPARYK *et al.* (2002): várias estruturas de concreto na região de Maresme na Catalunha ficaram totalmente deterioradas e acabaram sendo demolidas entre 1970 e 1972; a ponte sobre o Rio Tordesa (Barcelona-Gerona), que também foi demolida (1990) e barragens de Graus e Tabescán, na província de Lérida, construídas na década de sessenta, onde a partir de 1981 foram detectados comportamentos anômalos, tais como deslocamentos estruturais, fissuras superficiais mapeadas e alteração da coloração do concreto.

AGUADO *et al.* (1996) citam um exemplo de oxidação da pirita pela ação de bactérias em uma barragem da Austrália. Neste caso foi identificada a ação das bactérias púrpuras *Chromatium* e *Chorobium*, as quais aceleraram a oxidação da pirita presente no agregado (um quartzito) causando a desintegração do concreto de um túnel de desvio daquela barragem.

No Brasil, são poucas as publicações no meio técnico sobre os agregados sulfetados. Na década de 70, foi observada a presença de pirita em agregados utilizados em concretos durante a construção da Barragem do Rio Descoberto localizada em Brasília/DF. Entretanto, segundo CORREA (2001), a baixa experiência com problemas de

reatividade de pirita, naquele momento, permitiu a utilização de materiais com baixos teores de sulfeto de ferro para a construção da barragem. Relatos do colapso da barragem de Fonsagrada na Espanha despertaram o meio técnico para os problemas que a pirita, mesmo em baixos níveis de concentração, poderia causar em estruturas hidráulicas.

CORREA (2001) relata que alguns anos após o enchimento do reservatório da barragem do Rio Descoberto, vazamentos já podiam ser observados. Ao final da década de 70, podiam-se observar também longas fissuras a jusante. Desde então, até o início da recuperação da barragem, os vazamentos de água aumentaram bastante, passando a ser observados planos de percolação e lixiviação ao longo do corpo da barragem em diversos blocos.

SILVA *et al.* (2007) enfatizam que “o conhecimento do problema de sulfetos é relativamente recente no Brasil e, somente durante a construção da Usina Hidrelétrica de Irapé, onde o sulfeto se encontrava presente em altos teores na rocha de fundação, é que se passou a preocupar com esta possível ocorrência. Esta usina, situada no vale do Jequitinhonha, com uma barragem de 208 m de altura (a mais alta do Brasil) e com estruturas de concreto em contato com um maciço sulfetado, tem sido tema de diversos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, em parceria com as universidades. Com base nos resultados das pesquisas desenvolvidas durante os estudos de viabilidade, projeto básico e projeto executivo, definiu-se pela não utilização do material de escavação obrigatória contendo teor de sulfeto variando de 2 a 9% como agregado para concreto”.

1.2 - Justificativa

Argamassas e concretos fabricados com cimento Portland, quando em contato com águas sulfatadas, podem sofrer alterações que comprometem sua durabilidade. Tais alterações são, em geral, atribuíveis à reação da alumina proveniente do cimento e contida nos compostos das argamassas e concretos com os sulfatos existentes na água e o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento. Desta reação origina a Etringita que é acompanhada de forte expansão do material provocando sua degradação. Situação mais danosa ocorre quando se utilizam na fabricação de concretos e argamassas agregados contendo compostos de enxofre.

Em função dos resultados danosos que podem ser causados às estruturas de concreto através da utilização de agregados contendo substâncias deletérias como o sulfeto, principalmente pirrotita e pirita, cresce a importância do aprimoramento de técnicas que permitam sua identificação e quantificação antes do seu emprego em obras de engenharia.

É importante despertar o meio técnico para o estudo desta patologia, tanto no campo da determinação do teor de enxofre quanto na investigação dos danos que se pode causar à estrutura de concreto, e o estudo do limite máximo de enxofre permitido em agregados para concreto.

É de grande valia estudos no sentido de adotar medidas efetivas para a obtenção de um concreto com desempenho adequado perante os agentes agressivos que poderão se fazer presentes em um cenário real de ataque por sulfato devido a agregados contendo sulfeto.

A motivação deste estudo relaciona-se também com a construção da Usina Hidrelétrica de Irapé, de concessão da CEMIG – Geração e Transmissão S.A. A Usina de Irapé foi implantada num sítio geológico onde a rocha apresenta em sua composição teores de sulfetos acima de 5%. Os estudos, pesquisas e análises preliminares de viabilização do empreendimento mostraram a incompatibilidade das rochas contendo sulfetos com os componentes resultantes da hidratação do cimento, alertando o corpo técnico da CEMIG para a necessidade de conhecer o comportamento desses materiais.

Em função da complexidade dos problemas envolvidos, das dimensões e do porte do empreendimento de Irapé foi realizado o projeto de pesquisa e desenvolvimento CEMIG/ANEEL - P&D 122 – Investigação do Comportamento do Concreto e da Calda de Cimento em Contato com Rocha Sulfetada (2007). Os resultados do P&D 122 indicam primeiramente que o material inicial de escavação da rocha do sítio geológico de Irapé não atende aos limites do teor de enxofre total preconizados pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens e pelo Regulamento Português do Betão; por isso, ele não foi utilizado com fonte de produção de agregados para utilização nas estruturas de concreto. Para as regiões de interface das estruturas de concreto com o maciço rochoso sulfetado foram especificados e utilizados diferentes métodos de proteção. As análises de microscopia eletrônica de varredura, realizadas até 2007, não evidenciam indícios de deterioração do concreto em função do aporte de sulfatos proveniente do

contato dessas estruturas de concreto com o maciço rochoso sulfetado. É importante frisar que estas análises da microestrutura não foram acompanhadas pela determinação química do teor de sulfetos ou de enxofre total das referidas amostras de concreto, o que não permitiu definir teores químicos mínimos a partir dos quais poderia haver comprometimento da durabilidade dessas estruturas de concreto. Por causa disso, o relatório do P&D 122 propõe o prosseguimento dos estudos para definir os teores deletérios mínimos que possam causar patologias a essas estruturas de concreto.

1.3 - Objetivo

Dentro deste cenário, o objetivo desta dissertação é analisar o comportamento de concretos e argamassas fabricados com agregados contendo compostos de enxofre. Os agregados utilizados foram extraídos de testemunhos de sondagens realizadas no maciço rochoso da área de implantação da Usina Hidrelétrica de Irapé. Dentro deste objetivo, os seguintes aspectos serão analisados:

1. Análise da microestrutura da rocha, utilizada na fabricação dos agregados, para avaliação dos compostos contendo enxofre e do teor do mesmo.
2. Análise da expansão causada pelo agregado contendo enxofre em concretos e argamassas fabricados com o mesmo. Avaliação da resistência à tração destes mesmos concretos e argamassas.
3. Análise da microestrutura desse concreto e argamassa visando qualificar os compostos contendo enxofre e do teor do mesmo.
4. Estudo comparativo com relação a concretos e argamassas fabricados com agregados de gnaiss.

Para acelerar o processo de deterioração, o concreto e a argamassa estarão expostos a uma solução de hidróxido de cálcio diluído em água em duas temperaturas distintas.

1.4 - Descrição Resumida da Dissertação

A presente dissertação se desenvolve em cinco capítulos. Este primeiro capítulo apresenta uma introdução ao estudo realizado, englobando a justificativa e objetivos do trabalho. O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica, a qual descreve

principalmente os efeitos de agregados contendo compostos de enxofre em concretos e argamassas. No capítulo 3 são apresentadas as análises dos materiais utilizados na fabricação dos concretos e das argamassas. Foram realizados ensaios de caracterização macro e microscópico dos agregados graúdo e miúdo, como granulometria, massa unitária, massa específica, absorção e umidade superficial, teor de enxofre, e de ferro total fluorescência e difração de raios X, entre outros. Com base nesta caracterização são descritos os traços dos diferentes concretos e argamassas analisados, bem como as metodologias empregadas na realização dos ensaios de caracterização mecânica (expansão e resistência à tração) bem como de métodos de análise da microestrutura. Os resultados dos ensaios e sua respectiva análise constam do capítulo 4. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para investigações futuras.

2

Revisão Bibliográfica

Algumas substâncias encontradas no meio ambiente podem penetrar na massa do concreto endurecido e, sob condições propícias de umidade e temperatura, provocar reações químicas com efeitos nocivos. O maior problema é quando a substância agressora está internamente no concreto. Um caso particular de ataque por sulfato é a deterioração do concreto pelo emprego de agregados contendo sulfetos.

2.1 - Agregados

Sendo responsáveis pela maior parte do volume de concretos e argamassas, a qualidade dos agregados é de considerável importância. Os agregados têm grande influência na resistência dos concretos, e deve se considerar que quando na presença de propriedades indesejáveis eles podem não apenas produzir um concreto pouco resistente, mas também comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do mesmo.

Até pouco tempo os agregados eram considerados elementos inertes aos compostos da pasta de cimento, mas o que se observa na atualidade é que muitos pesquisadores já têm este conceito alterado. Nesta linha, NEVILLE (1977) enfatiza que “o agregado não é

inerte na exata acepção da palavra e suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes químicas têm influência no desempenho do concreto”.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), “agregados são relativamente baratos e não entram em reações químicas complexas com a água; portanto, têm sido usualmente tratados como um material de enchimento inerte no concreto. Entretanto, devido à crescente compreensão do papel desempenhado pelos agregados na determinação de muitas propriedades importantes do concreto, este ponto de vista tradicional, dos agregados como materiais inertes, esta sendo seriamente questionado”.

Sulfetos de ferro, tais como, pirita, marcassita e pirrotita, são freqüentemente encontrados em agregados de origem natural. A gipsita (sulfato de cálcio dihidratado) e a anidrita (sulfato de cálcio anidro) são os minerais sulfatados mais abundantes, que podem estar presentes como impurezas em rochas carbonáticas, folhelhos e feldspatos (ASTM C294 *apud* MEHTA e MONTEIRO, 1994).

HASPARYK *et. al.* (2002) apresentam os sulfetos de ferro mais comuns encontrados em rochas empregadas na fabricação de agregados para concreto:

Pirita (FeS_2): ou pirita de ferro, é o nome comum do dissulfeto de ferro. Sendo encontrado em muitas regiões, a pirita é o sulfeto mineral mais comum e geralmente está associado à outros sulfetos ou óxidos em veios de quartzo, rocha sedimentar ou rocha metamórfica, em leitos de carvão e também como mineral de reposição nos fósseis. A pirita em presença de ar e umidade oxida alterando – se para sulfato e eventualmente hidróxido de ferro e hidratos.

Pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$): é um sulfeto de ferro típico, que apresenta uma composição variável de ferro em sua fórmula (com x variando 0 a 0,2). É também chamada de pirita magnética, por causa de sua cor similar à da pirita e seu magnetismo.

Segundo AGUADO *et al.* (1996), quanto maior o conteúdo de ferro presente nos sulfetos, maior será a velocidade de oxidação e, conseqüentemente, maior o perigo do uso desse material como agregado. Devido a isto, estes autores consideram a pirita e a pirrotita as fases potencialmente deletérias ao concreto.

2.2 - Deterioração do Concreto por Reações Químicas com Sulfetos

Os mecanismos de deterioração química são desencadeados por agentes químicos que penetram no interior de concretos e argamassas, através da superfície dos elementos ou estão presentes internamente ao concreto e argamassa. Para ser agressivo, o agente químico deve se apresentar em concentrações acima de determinados limites de tolerância. Para uma dada concentração, os danos causados pelos agentes agressivos podem ser de diferentes magnitudes dependendo de outros fatores como alta porosidade, permeabilidade, tipo de cimento, ciclo molhagem/secagem, altas temperaturas, dentre outros.

O ataque químico a concretos e argamassas endurecidos pode formar produtos expansivos que geram efeitos deletérios nas estruturas. Este processo pode inicialmente não se apresentar como uma patologia real; mas com o ataque continuado podem surgir tensões internas de tração provocando instabilidade dimensional e fissuração excessiva, que, por conseguinte, podem comprometer a resistência, elasticidade e durabilidade do material bem como potencializar corrosão nas armaduras.

Um fenômeno associado às reações expansivas e deletérias é o ataque por sulfato em concretos e argamassas. A presença do elemento agressor pode ocorrer principalmente em águas sulfatadas e solos com presença de sulfatos. No caso particular deste estudo, o agressor encontra-se em agregados provenientes de um maciço rochoso contendo sulfetos de ferro em sua composição mineralógica.

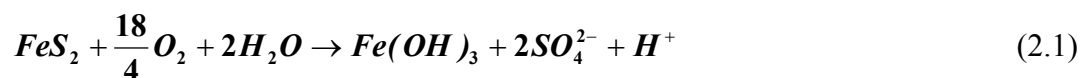
Os minerais sulfetados sofrem alterações químicas quando em presença de oxigênio e umidade. Os produtos desta reação e a estabilidade dos mesmos no ambiente dependem da quantidade de água presente. Entre estes produtos estão os hidróxidos e sulfatos de ferro que em seguida formarão ácido sulfúrico (H_2SO_4) que influenciará na acidificação da água dependendo da quantidade da mesma e da permeabilidade do ambiente no qual ocorre a reação (PEREIRA, 2008).

O ataque se dá pelas reações dos sais de sulfato com o hidróxido de cálcio livre $Ca(OH)_2$ e com os aluminatos de cálcio hidratados (C_3A) resultantes da hidratação do cimento. Os produtos dessas reações são o gesso ($CaSO_4 \times 2H_2O$) e o sulfoaluminato de cálcio conhecido por etringita ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$). Estes produtos

crystalizam-se com a água num processo acompanhado por aumento de volume. Esta expansão é seguida de fissuração progressiva de configuração irregular e desprendimento de lascas. O concreto adquire uma aparência esbranquiçada característica.

Segundo NEVILLE (1997), “piritas ferrosas e marcasitas representam as principais oclusões expansivas nos agregados. Estes sulfetos reagem com água e oxigênio do ar formando sulfato ferroso que depois se decompõe resultando hidróxido, enquanto os íons sulfato reagem com os aluminatos de cálcio do cimento. Também pode se formar ácido sulfúrico, que ataca a pasta de cimento. Podem ocorrer manchamento da superfície do concreto e desagregação (estouros) da pasta de cimento, particularmente em condições úmidas e quentes”.

As reações químicas que ocorrem no interior do concreto envolvendo pirita e pirrotita são respectivamente:



CASANOVA *et al.* (1997) revelam que a variação volumétrica do concreto devido ao ataque por sulfatos oriundos da oxidação de sulfetos presentes em agregados ocorre em duas etapas:

1º Etapa: ocorrência de aumento de volume entre 3,05 cm³ (2,5 %) e 6,04 cm³ (5,0 %) por mol de sulfeto devido a formação do hidróxido de ferro (Fe(OH)₃) por oxidação dos sulfetos. Este acréscimo de volume é considerado relativamente pequeno.

2º Etapa: expansão secundária devido à formação de etringita promovendo um aumento de volume da ordem de 172cm³/mol de sulfeto (143 %), valor este muito maior que aquele observado na primeira etapa.

CASANOVA *et al.* (1998) chamam a atenção que a alcalinidade do concreto tem grande influência no mecanismo de oxidação dos sulfetos. Em ambientes com pH acima de 10, ou seja, ambiente básico, os sulfetos tornam se instáveis; com pH na faixa de 7,5

a 8,5, a oxidação não irá depender da alcalinidade, mas sim da oxigenação e do tamanho dos grãos do mineral. Estes autores enfatizam também que a superfície específica do agregado com sulfeto tem um papel importante na ocorrência e velocidade da reação, ou seja, quanto maior a superfície específica do sulfeto mais rápida será a sua dissolução acompanhada pelo processo de expansão.

NEVILLE (1997) e COUTINHO (1997) citam que as partículas de pirita que provavelmente causam patologias são as de tamanho entre 5 e 10 mm.

CASANOVA *et al.* (1996) enfatizam o quanto difícil é evitar o emprego de agregados contendo sulfetos na preparação de concretos. Primeiro, em função da variedade de sulfetos presentes em maciços rochosos não ser pequena. Segundo, porque existem locais onde a disponibilidade de outra fonte de material é economicamente inviável ou inexistente, tornando-se um enorme problema para a construção de estruturas, como no caso de barragens, nas quais grandes volumes de agregados são necessários.

HASPARYK *et al.* (2002) revelam ainda que os efeitos desta patologia podem se apresentar após vários anos da ocorrência inicial das reações. As regiões mais afetadas são as mais permeáveis, de maior temperatura e umidade e as zonas carbonatadas, devido à oxidação dos sulfetos pela redução do pH da matriz.

Ainda não há consenso sobre a forma ideal para expressar o limite máximo do teor de sulfeto de ferro na rocha que será utilizada para produção de agregado para concreto. O primeiro limite registrado na literatura data de 1955 e fixava o teor de FeS_2 . Outros limites encontrados estão expressos em termos de SO_3 ou S_{total} , conforme descrito a seguir:

- Teor máximo de 1% de FeS_2 (principalmente pirita), (HAGEMAN e ROOSARR, 1955 *apud* HASPARYK *et al* 2002);
- Comitê Internacional de Grandes Barragens, 1965: sulfatos e sulfetos determinados pelo método da química analítica e calculados em SO_3 equivalente não devem passar de 0,5% em massa dos agregados graúdos;
- O Regulamento Português do Betão (1971) estabelece para o concreto de cimento Portland a quantidade máxima de 0,2% de sulfeto em relação à massa de cimento; para o concreto de cimento pozolânico ou com adição de pozolana a quantidade

máxima de 0.5% em relação à massa de ligante para o concreto simples, 0,2% para o concreto armado e 0,05% para o concreto protendido. Para o concreto com cimento de alto-forno não se tolera a presença de sulfeto no agregado. (COUTINHO, 1997).

Uma das primeiras ocorrências no Brasil, segundo CORREA (2001), se deu no concreto da barragem do Rio Descoberto, localizada a cerca de 50 km a oeste de Brasília, construída no início dos anos 70. Entretanto, a pouca experiência com problemas de reatividade de pirita naquela ocasião, permitiu que fossem utilizados agregados contendo baixos teores de sulfeto. Alguns anos após o enchimento do reservatório, ocorrido em 1974, alguns vazamentos começaram a ser observados no paramento de jusante. Ao final da década de 70 já se podiam observar também longas fissuras, e os vazamentos de água aumentaram bastante, passando a ser observados planos de percolação e lixiviação ao longo do corpo da barragem.

A construção da Usina Hidrelétrica de Irapé, localizada num sítio geológico onde a rocha apresenta em sua composição teores de sulfetos acima de 5%, motivou também novos estudos. As análises preliminares de viabilização do empreendimento mostraram a incompatibilidade das rochas contendo sulfetos com os componentes resultantes da hidratação do cimento. Em função da complexidade dos problemas envolvidos, das dimensões e do porte do empreendimento de Irapé foi realizado o projeto de pesquisa e desenvolvimento CEMIG/ANEEL - P&D 122 – Investigação do Comportamento do Concreto e da Calda de Cimento em Contato com Rocha Sulfetada (2007).

De acordo com o relatório final do P&D 122 (2007), o critério de controle do teor de sulfeto de ferro no agregado utilizado para produção dos concretos da UHE de Irapé foi a determinação do teor de enxofre total (S_{total}), adotando-se os seguintes fatores de conversão:

- Teor S_{total} (%) \cong teor de SO_3 (%) x 0,40;
- Teor S_{total} (%) \cong teor de Sulfeto de Ferro ($Fe_{n-1}S_n$)(%) x 0,521;
- Teor de sulfeto (%) \cong teor S_{total} (%) x 1,9.

Com base nos teores de enxofre total (S_{total}) determinados, verificou-se que primeiramente o material inicial de escavação da rocha do sítio geológico de Irapé não atendia aos limites preconizados pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens e pelo Regulamento Português do Betão; por isso, ele não foi utilizado com fonte de produção

de agregados para utilização nas estruturas de concreto. Para as regiões de interface das estruturas de concreto com o maciço rochoso sulfetado foram especificadas e utilizadas diferentes métodos de proteção. As análises de microscopia eletrônica de varredura, realizadas até 2007, não evidenciam indícios de deterioração do concreto em função do aporte de sulfatos proveniente do contato das estruturas de concreto com o maciço rochoso sulfetado. É importante frisar que estas análises da microestrutura não foram acompanhadas pela determinação química do teor de sulfetos ou de enxofre total das referidas amostras de concreto, o que não permitiu definir teores químicos mínimos a partir dos quais poderia haver comprometimento da durabilidade dessas estruturas de concreto. Por causa disso, o relatório do P&D 122 propõe o prosseguimento dos estudos para definir os teores deletérios que possam causar patologias a essas estruturas de concreto. Nesta linha de pensamento, o presente estudo vem tentar dar uma resposta a esta questão.

2.3 - Técnicas de instrumentação

2.3.1 - Fluorescência de raios X

A teoria quântica proposta em 1900 por Max Planck para explicar as propriedades da radiação emitida por corpos aquecidos inclui dois postulados importantes:

1. Átomos, íons e moléculas podem existir somente em certos estados discretos, caracterizados por quantidades definidas de energia. Quando uma espécie altera seu estado, absorve ou emite uma quantidade de energia exatamente igual à diferença de energia entre os estados.
2. Quando átomos, íons ou moléculas absorvem ou emitem radiação ao efetuar uma transição de um estado de energia para outro, a radiação de frequência ν ou de comprimento de onda λ está relacionada com a diferença de energia entre os dois estados pela equação

$$E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.3)$$

onde E_1 é a energia do estado mais alto e E_0 é a energia do estado mais baixo. Os termos c e h são a velocidade da luz e a constante de Planck, respectivamente.

Para átomos ou íons no estado elementar, a energia de um dado estado provém do movimento dos elétrons em torno do núcleo positivamente carregado. Como consequência, os vários estados energéticos são chamados de estados eletrônicos. O estado de menor energia de um átomo é o estado fundamental. Os estados de energia mais altos são os estados excitados.

A absorção de raios X produz átomos ou íons eletronicamente excitados que retornam ao estado fundamental por transições que envolvem elétrons de níveis de mais alta energia. Nesse processo, são emitidos raios X (fluorescência) de comprimentos de onda idênticos àqueles que resultaram da excitação produzida pelo bombardeamento de elétrons. Os comprimentos de onda das linhas de fluorescência são sempre um pouco maiores do que o comprimento de onda correspondente à borda de absorção. Isto ocorre porque a absorção requer a remoção completa do elétron (ou seja, a ionização), enquanto a emissão envolve transições de um elétron de um nível de energia mais alto do átomo.

A fluorescência de raios X (FRX) é um dos métodos analíticos mais usados na identificação qualitativa dos elementos com número atômico maior que o oxigênio (>8). Os elementos na amostra são excitados pela absorção do feixe primário e emitem suas linhas características de fluorescência de raios X. Essa técnica é também freqüentemente empregada em análise elementar semiquantitativa ou quantitativa. Uma vantagem particular da FRX é que, em contraste com a maioria das outras técnicas de análise elementar, é uma técnica não destrutiva da amostra (SKOOG *et al.*, 2002).

2.3.2 – Análise química

Análise química é o conjunto de técnicas de laboratório utilizadas na identificação dos elementos envolvidas em uma reação, como também a quantidade desses. Como discutido anteriormente ainda não existe consenso sobre a forma ideal para expressar o limite máximo do teor de sulfetos na rocha que será utilizada para produção de agregado para concreto. Porém o critério de controle do teor de sulfeto no agregado utilizado para produção dos concretos da UHE de Irapé foi a determinação do teor de enxofre total (S_{total}). Portanto, no caso deste estudo, a análise química foi realizada no intuito de identificar e quantificar algumas espécies químicas, enxofre e ferro, bem

como alguns compostos tanto nos materiais constituintes quanto nos concretos e argamassas.

2.3.3 – Difração de raios X

Todos os tipos de radiação eletromagnética sofrem difração, um processo no qual um feixe paralelo de radiação é deformado ao passar por uma barreira de borda definida ou através de uma abertura estreita.

A radiação X é espalhada ao passar por um material em decorrência da interação entre seu campo elétrico e os elétrons do respectivo material. Quando os raios X são espalhados pela estrutura atômica bem ordenada de um cristal, surgem interferências (construtivas e destrutivas) entre os raios espalhados. Isso ocorre porque as distâncias entre os centros espalhadores são da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação, sendo o resultado de tal efeito a difração.

Quando um feixe de raios X atinge a superfície de um cristal em um ângulo θ , uma parte é espalhada pela camada dos átomos na superfície. A porção não espalhada penetra a segunda camada de átomos onde novamente uma fração é espalhada, e o restante passa para a terceira camada, como mostra a FIG 2.1. O efeito acumulado do espalhamento da radiação pela estrutura atômica do cristal é a difração do feixe. As condições necessárias para os raios X sofrerem difração são (SKOOG *et al.*, 2002):

1. O espaçamento entre as camadas de átomos deve ser da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação;
2. Os centros espalhadores devem estar espacialmente distribuídos em um arranjo altamente regular.

Este evento é descrito pela lei Bragg (1912), conforme apresentado na expressão abaixo:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta, \quad (2.4)$$

onde n é um número inteiro, λ o comprimento de onda, d a distância entre os planos cristalográficos e θ o ângulo incidente.

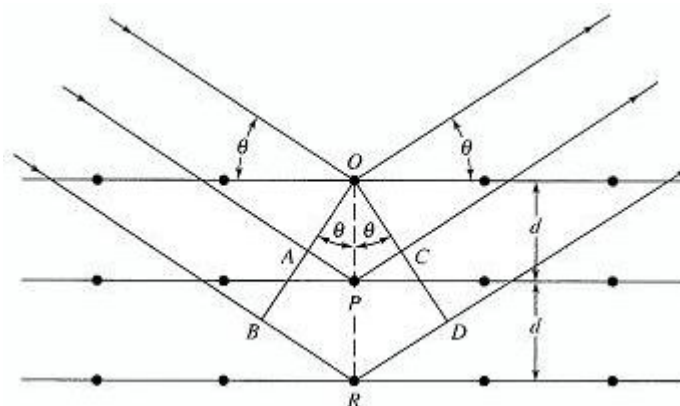


FIGURA 2.1 - Difração de raios X em um cristal. (Fonte: SKOOG *et al.*, 2002)

A difração de raios X (DRX) fornece um meio conveniente e prático para a identificação qualitativa de compostos cristalinos. O método de difração de raios X, usando amostra policristalina ou método do pó, é único, porque somente este método analítico é capaz de fornecer informação qualitativa e quantitativa sobre os compostos presentes em uma amostra sólida. No método do pó a amostra deve estar moída na granulação máxima de 80 μm (RIBAS, 1996) e se baseia no fato de que o padrão de difração de raios X é único para cada substância cristalina. Assim, se é encontrada uma concordância exata entre o padrão produzido pela amostra desconhecida e o de uma amostra conhecida, então a identidade química da amostra desconhecida pode ser atribuída (SKOOG *et al.*, 2002).

2.3.4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para o conhecimento da microestrutura de um material, podem ser usados três tipos de microscopia: a microscopia ótica (MO), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia eletrônica de transmissão (MET), sendo que cada uma possui seu campo de aplicação específico.

Será descrito, aqui, apenas o método referente ao MEV, que será usado na parte experimental deste estudo.

As informações estruturais e químicas de amostras podem ser obtidas através do microscópio eletrônico de varredura, que apresenta como vantagem, em relação ao microscópio óptico, a sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nm (atualmente já existem instrumentos com até 1 nm), sendo que neste último é da ordem de 0,5 μm . Comparado

ao MET – microscopia eletrônica de transmissão, a grande vantagem do MEV está na facilidade de preparação das amostras (DAL MOLIN, 2007).

Segundo KESTENBACH e BOTTA FILHO (1994), a interação que ocorre na microscopia eletrônica de varredura de um feixe de elétrons de alta energia com a superfície da amostra resulta na emissão de elétrons e raios X com uma faixa de distribuição de energia e, em alguns casos, com emissão de radiação catodoluminescente (emissão de luz visível) que possui menor energia que os raios X. Os elétrons gerados pela interação do feixe primário com a amostra podem ser divididos em três tipos: retroespalhados, secundários e Auger, indicados na FIG. 2.2.

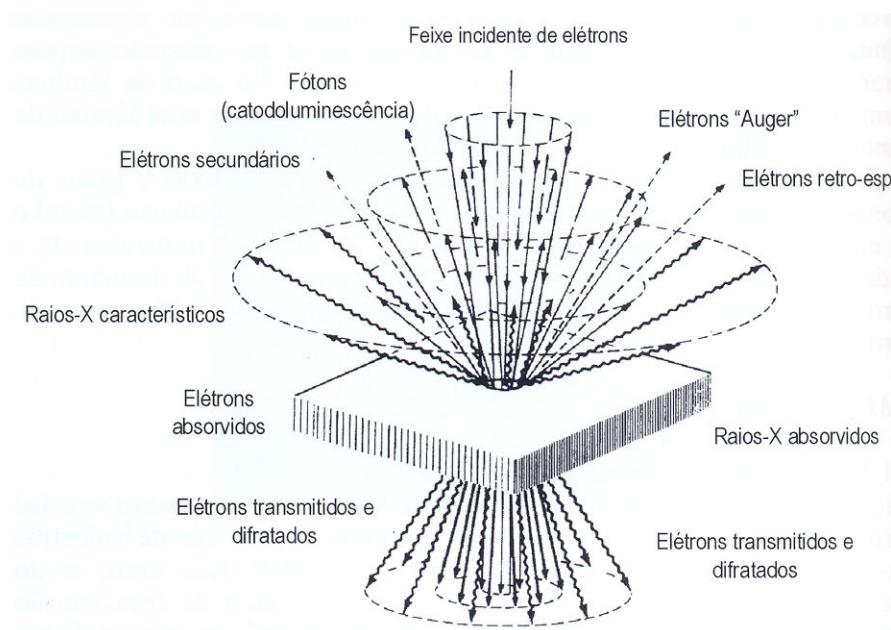


FIGURA 2.2 – Tipos de elétrons gerados pelo MEV. (Fonte: DAL MOLIN, 2007)

Os elétrons Auger possuem energia variável, profundidade de escape entre 2 e 20 Å e carregam informação sobre a natureza química da amostra. São elétrons formados após a produção de um elétron secundário e não são muito utilizados na microscopia eletrônica de varredura, sendo os elétrons secundários e retroespalhados os sinais de maior interesse para a formação da imagem.

Os elétrons secundários possuem baixa energia (50 eV), emergem de uma profundidade de 100 a 200 Å e fornecem imagem de topografia da superfície da amostra, sendo responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução e aconselháveis para aumentos entre 10 e 100.000 vezes (PADILHA e AMBROZIO FILHO, 2004).

Os elétrons retroespalhados são refletidos por colisões de profundidade entre 300 e 400 Å, obtidos pelo espalhamento elástico dos elétrons cuja trajetória foi desviada em mais de 90° em relação à direção do feixe incidente e fornecem imagem característica de variação de composição, sendo indicados para aumentos de até 2.000 vezes. Há dependência entre a intensidade do feixe e o número atômico, sendo que os tons claros correspondem aos elementos com número atômico médio relativamente maior do que aqueles com tons mais escuros. A resolução da imagem de elétrons retroespalhados é menor que a de elétrons secundários, pois as regiões de liberação de elétrons retroespalhados abrangem uma área maior que aquelas de liberação de elétrons secundários na superfície analisada (DAL MOLIN, 2007).

Com relação à amostra, SKOOG *et al.* (2002) mencionam que amostras condutoras de eletricidade são mais fáceis de serem estudadas, pois o fluxo livre de elétrons para terra minimiza artefatos associados com o acúmulo de carga. Além disso, amostras boas condutoras de eletricidade são também boas condutoras de calor, o que minimiza a possibilidade de degradação térmica.

Para se obter imagens de microscopia eletrônica de amostras não condutoras, são necessários outros procedimentos, como o recobrimento da superfície com um filme metálico fino produzido por bombardeio ou evaporação em vácuo (SKOOG *et al.*, 2002).

3

Programa Experimental

O avanço da Ciência e da Engenharia dos Materiais levou a um reconhecimento, por parte de estudiosos, da relação direta entre as propriedades de um material e sua estrutura interna. Concretos e argamassas apresentam estruturas bastante heterogêneas e complexas. Em estudos que têm como base estes materiais, a previsão de certos comportamentos pode ser realizada por meio da análise das estruturas e propriedades de seus constituintes, bem como as relações entre elas.

Macroscopicamente uma amostra de concreto pode ser identificada por partículas de rocha com formas e tamanhos variados, aglutinadas por uma massa de pasta de cimento endurecida. “A nível macroscópico, conseqüentemente, o concreto pode ser considerado como um material composto de dois constituintes, consistindo de partícula de agregado dispersa em uma matriz de cimento” (METHA e MONTEIRO, 1994).

Em escala microscópica o concreto é um material constituído por regiões: uma matriz de pasta de cimento, agregados e uma zona de transição interfacial (ZTI) entre as regiões mencionadas. Cada uma destas regiões é subdividida em elementos com naturezas diversas. “A nível microscópico, começam a aparecer as complexidades da estrutura do concreto. É obvio que estas fases da estrutura não estão distribuídas homogeneamente, uma em relação a outra, nem são em si mesmas homogêneas” (METHA e MONTEIRO, 1994).

Com base nestes aspectos, além de uma análise macro, foi realizado, nesta pesquisa, um estudo da natureza interna tanto dos constituintes quanto dos concretos e argamassas fabricados com agregados contendo compostos de enxofre e com agregados de referencia.

3.1- Materiais Constituintes dos Concretos e Argamassas

3.1.1- Cimento

Um único tipo de cimento foi utilizado na produção dos diversos concretos e argamassas: cimento Portland CP-III 40 RS, fabricado por Cimento Cauê. A escolha do cimento CP III se deve ao fato dele ser o tipo mais indicado para o estudo em questão e por isso ter sido largamente utilizado na construção da Usina de Irapé. Além disto, o cimento CP III tem baixo calor de hidratação, reduzindo, portanto, o aumento da temperatura no interior da massa de concreto e em consequência evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica. As TAB. 3.1 e 3.2 apresentam as características químicas e físicas do cimento, fornecidas pelo fabricante do mesmo, Camargo Corrêa Cimentos.

TABELA 3.1 - Caracterização física do cimento CP III 40 RS

PROPRIEDADES FÍSICAS		CP III-40-RS	Limites	Norma
Massa Específica (g/cm ³)		3,00	-	NM 23/01
Finura	Resíduo na peneira 200 mm (%)	0,26	≤ 8	NBR 11579
	Área específica (cm ² /g)	4599	-	NBR 7224
Tempo de pega (min)	Início de pega	191	> 60	NM 65/03
	Fim de pega	248	< 7200	NM 65/03
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	22,7	> 12	NBR 5737
	7 dias	31,1	>23	NBR 5737
	28 dias	45,2	>40	NBR 5737

Como um dos objetivos do estudo é de caracterizar e quantificar o teor de enxofre nos concretos e argamassas foi realizada uma análise química para determinação da quantidade inicial do mesmo no cimento utilizado. O teor de enxofre foi determinado por combustão direta utilizando o equipamento LECO, CS 632. O resultado encontrado foi de 1,61%.

TABELA 3.2 - Caracterização química do cimento CP III 40 RS

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	CP III-40 RS	Limites	Norma
Óxido de Cálcio (CaO)	54,40	-	NBR 5742
Dióxido de Silício (SiO ₂)	24,61	-	NBR 5742
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	7,32	-	NBR 5742
Óxido de Magnésio (MgO)	0,0	-	NBR 5742
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,78	<4,0	NBR 5745
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	1,90	-	NBR 5742
Resíduo insolúvel	0,46	<1,5	NBR 5744
Perda ao fogo	3,4	<4,5	NBR 5743
Óxido de Cálcio Livre (CaO)	-	<0,25	NM 12

3.1.2 - Agregados

Agregado de referência - Gnaisse

Para o estudo foi escolhido como agregado de referência uma brita de gnaisse comumente utilizada na região metropolitana de Belo Horizonte. Este agregado foi moído de modo a satisfazer o critério da especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal, especificação esta utilizada nos ensaios de expansão dos concretos e argamassas. Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados de gnaisse, após sua moagem, estão apresentados nas TAB. 3.3, 3.4 e 3.5 bem como nas FIG. 3.1, 3.2, e 3.3.

TABELA 3.3 - Caracterização dos agregados de gnaisse

Ensaio realizado	Agregado gráudo	Limites NBR 7211 / 05	Agregado miúdo	Limites NBR 7211 / 05
Massa unitária (kg/dm³)	1,35	-	1,61	-
Massa específica (kg/dm³)	2,66	-	2,70	-
Absorção	0,13	-	1,12	-
Material pulverulento (%)	10,72	1,00 a 12,00	13,30	3,00 a 12,00
Teor de argila em torrões (%)	0,00	1,00 a 3,00	0,00	1,00 a 3,00



FIGURA 3.1 - Representação da granulométrica do agregado de gnaisse

A quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo de material fino que passa através da peneira 75 μm por lavagem (material pulverulento), quando o agregado miúdo for constituído totalmente de grãos gerados por meio de britagem de rocha, deve ser inferior a 10% para concretos submetidos a desgaste superficial e a 12% para concretos protegidos do desgaste superficial (NBR 7211:2005). Observa-se que o agregado miúdo utilizado possui teor de material pulverulento de 13,3 %, superando os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005). A análise mineralógica da fração fina analisada anteriormente por MAGALHÃES (2007) não indica a presença de fases mineralógicas capazes de interferir de forma inadequada nas propriedades do concreto. Os traços de concreto dosados com tal material, também não requereram consumo excessivo de água, nem apresentaram problemas de exsudação.

TABELA 3.4 - Resultado da composição granulométrica do agregado miúdo de gnaisse

Composição Granulométrica - Agregado Miúdo de Gnaisse			
Peneiras (mm)	Material retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
2,36	147,6	14,8	14,8
1,18	10,9	1,1	15,9
0,60	231,8	23,2	39,1
0,30	59,0	5,9	45,0
0,15	338,0	33,9	78,9
Fundo	211,0	21,1	100,00
Total	998,3	100,0	
Dimensão máxima característica (mm)			4,75
Módulo de finura			1,94

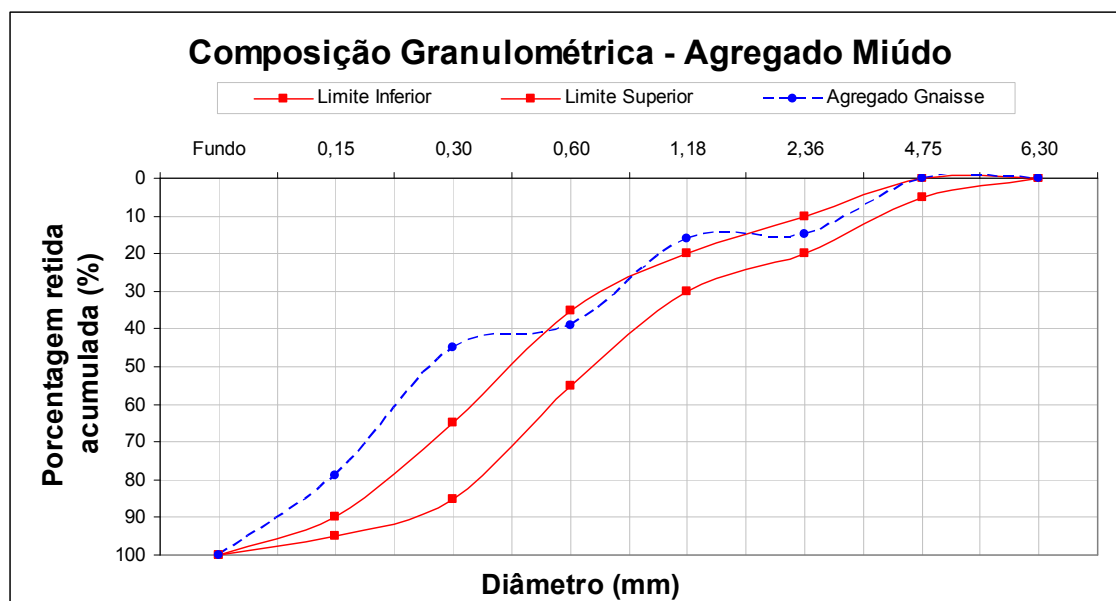


FIGURA 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo de gnaiss.

TABELA 3.5 - Resultado da composição granulométrica do agregado graúdo de gnaiss

Composição Granulométrica - Agregado Graúdo de Gnaiss			
Peneiras (mm)	Material retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
6,30	529,00	52,92	52,92
4,75	413,80	41,40	94,34
Fundo	56,80	5,68	100,00
Total	999,60	100,00	-
Dimensão máxima característica (mm)			9,50
Módulo de finura			5,66

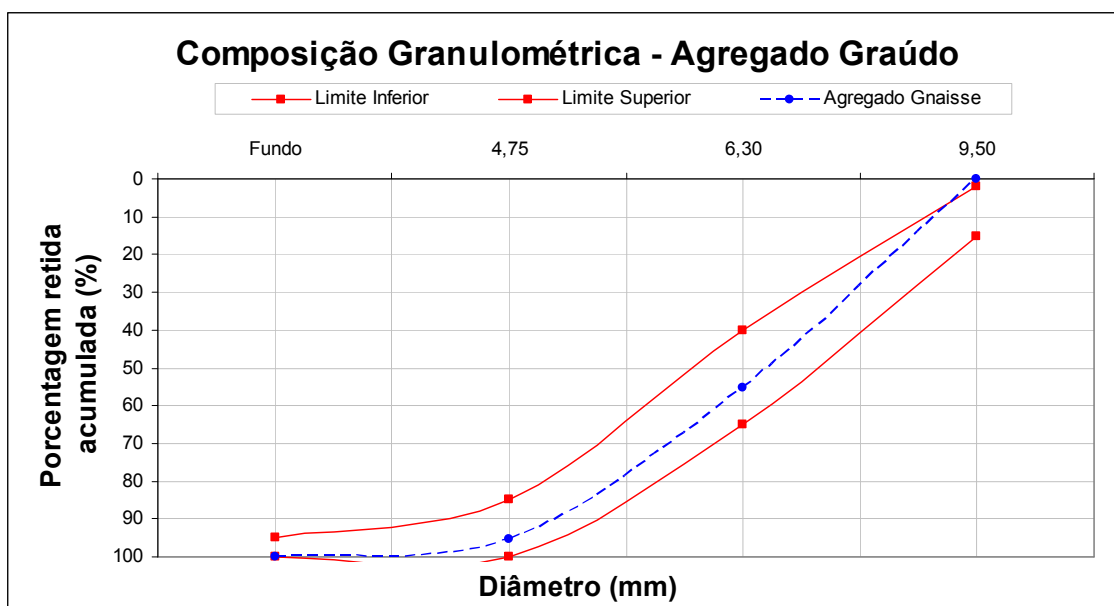


FIGURA 3.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo de gnaíse.

A avaliação da estrutura do agregado de gnaíse consistiu apenas na determinação do teor de enxofre por meio de análise química. O teor foi determinado por combustão direta utilizando o equipamento LECO – CSA 17V. O resultado da análise, realizada em duas amostras, indica um teor abaixo de 0,01%, valor este considerado como limite mínimo para este tipo de ensaio.

Agregado contendo sulfetos de ferro

Os agregados com presença de sulfeto foram retirados de testemunhos de sondagem da região onde existe hoje a casa de força da usina hidrelétrica de Irapé. Foram descartadas as partes iniciais dos testemunhos quando se observou grande lixiviação dos minerais de sulfeto. A FIG. 3.4a é representativa da maioria dos testemunhos de sondagem: xistos com presença de sulfetos de ferro seguindo a foliação do maciço e alguns pequenos veios de quartzo. As FIG. 3.4b, 3.4c e 3.4d mostram grandes veios de quartzo onde há ocorrência de cristais de sulfetos de ferro, menos comum em toda a amostra coletada.

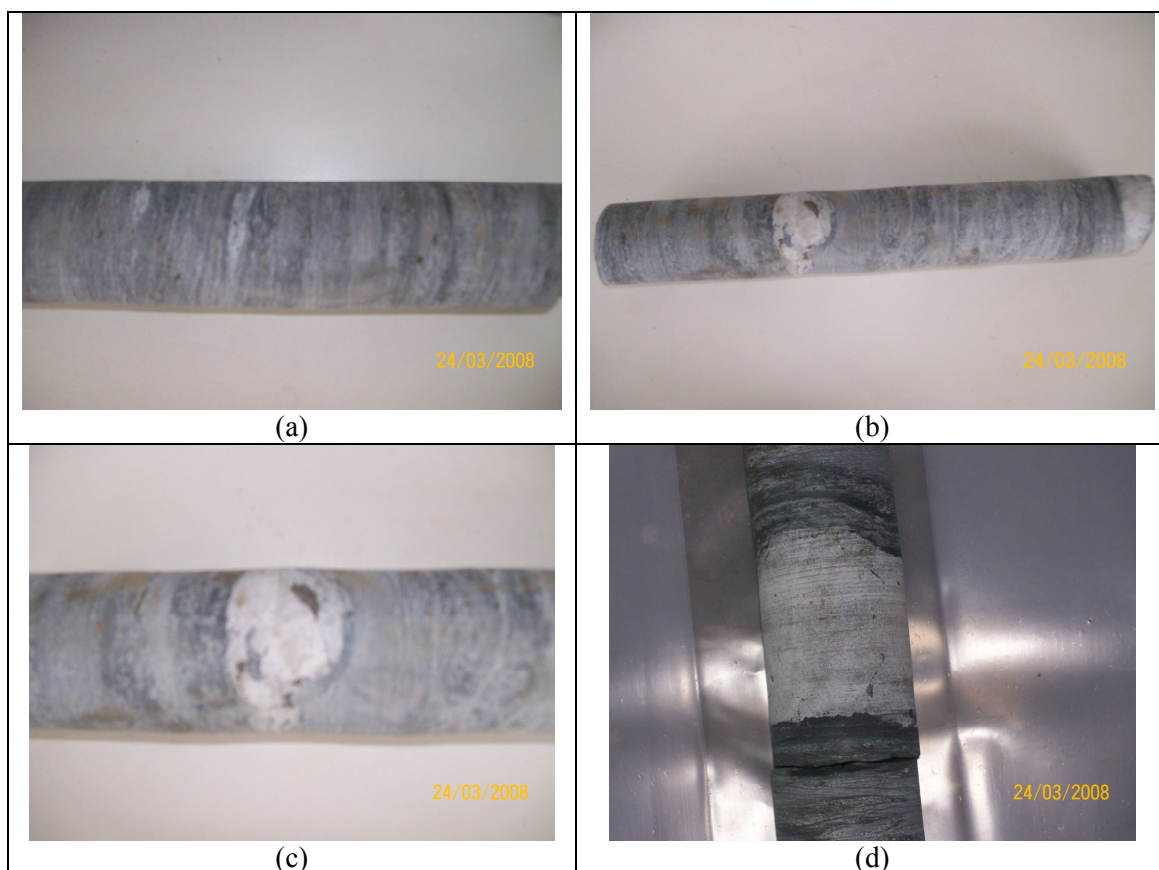


FIGURA 3.4 - Fotos de testemunhos de sondagem da usina de Irapé

Este material foi coletado durante a construção da usina hidrelétrica de Irapé e estava estocado em um galpão próprio para este fim, protegido de intempéries. Apesar disto, pode ser observado nas FIG. 3.4b e 3.4c a presença de manchas de ferrugem em certos pontos do testemunho, mostrando que houve superficialmente um início de oxidação do sulfeto.

A moagem dos testemunhos para obtenção dos agregados e posterior preparo das amostras para as análises da microestrutura foram realizados no laboratório de minério da Escola de Engenharia da UFMG. Esta moagem foi realizada de modo a satisfazer o critério da especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal, especificação esta utilizada nos ensaios de expansão dos concretos e argamassas. Os resultados dos ensaios de caracterização da macroestrutura desses agregados podem ser vistos nas TAB. 3.6 a 3.8 e nas FIG. 3.5 a 3.7.

TABELA 3.6 - Caracterização dos agregados com sulfeto de Irapé

Ensaio realizado	Agregado gráudo	Limites NBR 7211/05	Agregado miúdo	Limites NBR 7211/05
Massa unitária (kg/dm ³)	1,30	-	1,51	-
Massa específica (kg/dm ³)	2,86	-	2,82	-
Absorção	0,13	-	1,12	-
Material pulverulento (%)	10,72	1,0 a 10,0	13,30	3,0 a 12,0
Teor de argila em torrões (%)	0,00	1,00	0,00	3,00



FIGURA 3.5 - Representação da granulométrica do agregado com sulfeto de Irapé

A quantidade de material pulverulento do agregado contendo sulfetos de ferro também excede os limites prescritos pela NBR 7211 (2005). Este maior teor é devido ao processo de britagem dos testemunhos da rocha para se obter a quantidade necessária de material na granulometria requerida pelos critérios da especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal.

TABELA 3.7 - Resultado da composição granulométrica do agregado miúdo de Irapé

Composição Granulométrica - Agregado Miúdo de Irapé			
Peneiras (mm)	Material retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
2,36	119,20	11,93	11,93
1,18	88,70	8,88	20,81
0,60	229,90	23,02	43,83
0,30	36,00	3,60	47,44
0,15	184,40	18,46	65,90
Fundo	340,60	34,10	100,00
Total	998,80	100,00	
Dimensão máxima característica (mm)			4,75
Módulo de finura			1,90

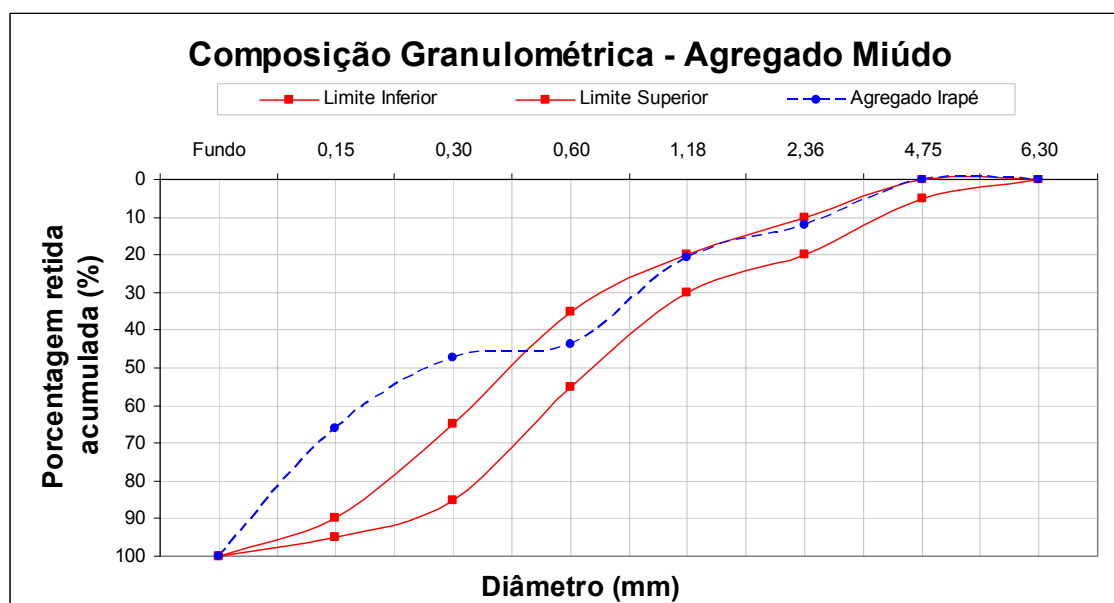


FIGURA 3.6 - Curva granulométrica do agregado miúdo de Irapé

TABELA 3.8 - Resultado da composição granulométrica do agregado graúdo de Irapé

Composição Granulométrica - Agregado Graúdo de Irapé			
Peneiras (mm)	Material retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
6,30	749,40	75,48	75,48
4,75	223,80	22,54	98,03
Fundo	19,60	1,97	100,00
Total	992,80	100,00	
Dimensão máxima característica (mm)			9,50
Módulo de finura			5,88

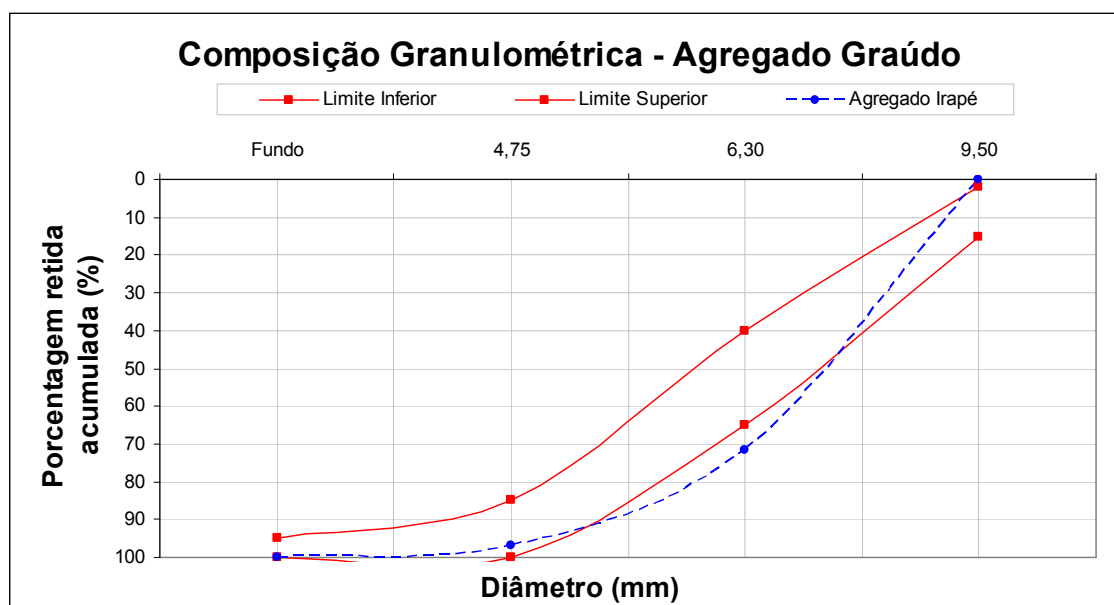


FIGURA 3.7 - Curva granulométrica do agregado graúdo de Irapé

A fluorescência de raios X foi realizada no laboratório de análise por raios X do departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, utilizando um espectrômetro PHILIPS PW-2400. Este ensaio foi o primeiro a ser feito, devido à necessidade do conhecimento dos elementos presentes no analito para a realização dos demais ensaios de microestrutura. O Anexo B bem como a TAB. 3.9 apresentam os resultados do ensaio de fluorescência de raios X para o agregado de Irapé.

TABELA 3.9 - Resultados da fluorescência de raios X para agregado de Irapé

Teor	Elementos
Alto	<i>Si, O</i>
Médio	<i>Al, Fe</i>
Baixo	<i>S, K, Mg, Na, Mn</i>
Traço	<i>Ni, Zn, Cr, Ti, Ca, P, Ba</i>

Como um dos objetivos do estudo é de caracterizar e quantificar os sulfetos de ferro, principalmente pirita e pirrotita, foi realizada uma análise química para a quantificação de teor de ferro e enxofre e não para todos os elementos apresentados no resultado da fluorescência de raios X. Esta análise química foi realizada no laboratório de análises químicas (NOVAS) do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG. O teor de enxofre foi determinado por combustão direta utilizando o equipamento LECO, CS 632 e o ferro total foi identificado por Espectrometria de absorção atômica, utilizando um equipamento AAnalyst 300 fabricado pela Perkin Elmer. A TAB. 3.10 apresenta os resultados desta análise.

TABELA 3.10 - Resultados da análise química

Elemento	Teor
Ferro	4,16 %
Enxofre	1,88 %

Os valores encontrados para os teores de ferro e enxofre (TAB. 3.10) confirmam os resultados da fluorescência de raios X, que indicam teores médio e baixo para estes elementos respectivamente.

A difração de raios X fornece um meio conveniente e prático para a identificação qualitativa de compostos cristalinos. Foi utilizado o método do pó empregando uma amostra moída do agregado na granulação máxima de 80 µm. O ensaio de difração de raios X foi realizado no laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG e foi utilizado um Difrátômetro de raios X PHILIPS. Esses resultados podem ser vistos no Anexo C.

Um fator que gerou dúvidas para a análise dos compostos minerais foi que como pirita e pirrotita são compostos minoritários, suas raia no resultado da difração de raios X não estão bem definidas no espectro e por isso pode ter ocorrido interferências de outros compostos ali presentes.

3.1.3- Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária de Belo Horizonte, COPASA, apresentando-se dentro dos limites normais de potabilidade. A COPASA não avalia o teor de enxofre na água mais o teor de sulfato. De acordo com um laudo do laboratório de análise da COPASA, apresentado no Anexo A, o teor médio de sulfato no período de janeiro de 2009 a dezembro do mesmo ano foi 18 mg/litro, correspondendo a 0,0018%. Este percentual é extremamente pequeno e, portanto não foi considerado nas análises do teor de enxofre nos concretos e argamassas.

3.1.4- Aditivo

Para os traços de concreto foi utilizado o aditivo Viscocrete 3535 aditivo redutor de água de altíssima eficiência. Sua composição é à base de policarboxilato. As características fornecidas pelo fabricante são mostradas na TAB. 3.11.

TABELA 3.11 – Características do aditivo

Característica	Valor do Lote
Aspecto	Líquido
Densidade (g/cm ³)	1,04 a 1,08
pH	3,5 a 5,5
Base Química	Policarboxilato
Cor	Castanho claro

3.2 – Dosagem dos Concretos e Argamassas

As argamassas analisadas foram dosadas de acordo com os critérios da especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal. O traço especificado tem relação em peso 1:5 (cimento:areia) e relação água/cimento igual a 1. A amostra da areia empregada é obtida após sua moagem utilizando-se apenas o material retido na peneira de 300 µm de abertura.

A dosagem dos concretos teve como ponto de partida as composições utilizadas nas estruturas de concreto da usina hidrelétrica de Irapé [Pereira (2008)]. Estes traços tinham com características básicas um consumo de cimento da ordem de 400 kg/m³ e uma relação água/ cimento de 0,45. Em função destes parâmetros básicos e das demais características dos agregados, elaborou-se dois traços, ambos para concreto bombeável,

nas seguintes proporções em peso: 1:0,33:2,34:1,96 (cimento: filer calcítico: areia de gnaisse: brita de gnaisse) e 1:0,50:1,97:2,08 (cimento: filer calcítico: areia com xisto sulfetado: brita com xisto sulfetado). O filer calcítico foi utilizado em função do elevado teor de finos contido nos agregados e para manter o consumo de cimento e a relação água/ cimento nos valores pré-estabelecidos. Para garantir a trabalhabilidade necessária empregou-se o aditivo plastificante Viscocrete 3535, nas proporções de 3,28 e 4,1 litros/m³ para os concretos com gnaisse e xisto sulfetado respectivamente.

A TAB. 3.12 apresenta as características básicas dos traços das argamassas e concretos fabricados e analisados. A denominação de cada traço se inicia com **ARG** para argamassa e **CONC** para concreto seguido do tipo de agregado utilizado: **GN** para gnaisse e **XSUL** para xisto sulfetado. As proporções dos componentes estão em peso e seguem o formato cimento: areia para as argamassas e cimento: filer: areia: brita para os concretos.

TABELA 3.12 – Nomenclatura e dosagens dos traços de argamassa e concreto

Denominação do traço	Tipo de agregado	Consumo de Cimento (Kg/m ³)	Relação a/c	Proporção
ARG - GN	гнаisse	391	1,00	1 : 5,0
ARG - XSUL	xisto sulfetado	391	1,00	1 : 5,0
CONC - GN	гнаisse	410	0,45	1 : 0,33 : 2,34 : 1,96
CONC - XSUL	xisto sulfetado	410	0,45	1 : 0,50 : 1,97 : 2,08

3.3 – Moldagem e Cura dos Corpos de Prova de Concreto e Argamassa

Para a execução dos ensaios foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos 50 x 100 mm e prismáticos com dimensões de 24 x 24 x 280mm. Para cada traço de argamassa foram moldados 36 corpos-de-prova sendo 9 prismáticos e 27 cilíndricos. Como houve sobra de agregados com maior diâmetro, foram moldados, para cada traço de concreto, 63 corpos-de-prova sendo 9 prismáticos e 54 cilíndricos. O adensamento foi feito de forma manual em duas camadas conforme mostram as FIG. 3.8 e 3.9. O acabamento da face superior dos corpos-de-prova foi feito por alisamento da superfície. Em seguida os corpos-de-prova foram cobertos com sacos de linhagem bastante umedecidos por 48 horas, sendo então desformados, identificados e levados à câmara úmida, onde permaneceram até a idade de 7 dias.



FIGURA 3.8 – Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos



FIGURA 3.9 – Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos

3.4 – Ensaio Mecânico das Argamassas e dos Concretos

Os ensaios mecânicos realizados nas argamassas e concretos fabricados foram de resistência à tração por compressão diametral e de expansão. Medidas de resistência à compressão também foram feitas nos concretos.

3.4.1 - Ensaio de expansão dos concretos e argamassas

A expansão dos concretos e argamassas foi avaliada por meio da medida do comprimento dos corpos-de-prova prismáticos em diversas idades, de acordo com a especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal. Completado 7 dias após a moldagem dos corpos-de-prova, realizou-se uma leitura do comprimento (denominado comprimento inicial L_0) de cada uma das barras de cada traço fabricado utilizando o equipamento apresentado na FIG. 3.10. O comprimento básico de referencia corresponde a uma barra de alumínio também mostrada na figura. Após a medida deste comprimento inicial, as barras foram submetidas a três condições distintas de exposição: ambiente da câmara úmida e imersão numa solução de hidróxido de cálcio diluído em água [10 a 20 g/L - conforme COUTINHO e GONÇALVES (1988)], água esta mantida a temperatura ambiente e a 40°C. A escolha desta última, relaciona-se a temperatura normalmente encontrada na casa de força da UHE Irapé. A solução de hidróxido de cálcio diluído em água foi renovada periodicamente mantendo-se sempre constante a concentração.



FIGURA 3.10 - Equipamento de medida da expansão nas barras de concreto e argamassa

As leituras dos comprimentos das barras foram repetidas nas idades de 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150, 250 e 442 dias contadas a partir do início da exposição às diferentes condições ambientais no caso das argamassas. Para os concretos, estas medidas foram feitas nas idades de 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 e 320 dias.

A deformação de cada barra em cada idade foi avaliada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{L_t - L_o}{L_o}, \quad (3.1)$$

onde

L_t é o comprimento de cada barra ao fim do tempo t de exposição, em cm;

L_o é o comprimento inicial de cada barra, em cm; e

ε é a deformação específica da barra.

De acordo com a especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), os agregados apresentam comportamento satisfatório, quando ao final de um a dois meses de exposição, as deformações medidas não excedam 3×10^{-4} ou quando ao final de seis meses, essas deformações não ultrapassam 5×10^{-4} e as barras não apresentem fendilhamento.

3.4.2 - Ensaio de resistência dos concretos e argamassas

A avaliação da resistência das argamassas foi realizada com base na resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222:1994). Para cada idade avaliada foram empregados três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 5 x 10 cm. Estes ensaios foram executados aos 28, 91 e 150 dias contados a partir do início da exposição às diferentes condições ambientais mencionadas anteriormente.

Para os concretos foram analisadas as resistências à compressão (NBR 5739:1994) e à tração por compressão diametral (NBR 7222:1994). Três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 5 x 10 cm, foram utilizados para cada idade analisada em ambos os casos. Os ensaios foram também executados aos 28, 91 e 150 dias contados a partir do início da exposição às diferentes condições ambientais.

Para todos os ensaios de avaliação de resistência, utilizou-se uma máquina de ensaio modelo HD com capacidade de 2000 kN fabricada pela Contenco Indústria e Comércio

Ltda. Esta prensa foi calibrada pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, certificado número 120623, de 18 de fevereiro de 2008; ela está localizada no Laboratório de Concreto da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG.



FIGURA 3.11 – Prensa usada para os ensaios de resistência à compressão e tração

3.5 – Avaliação da Microestrutura das Argamassas e dos Concretos

Os métodos para caracterização da microestrutura das argamassas e dos concretos fabricados foram a microscopia eletrônica de varredura e a análise química. Por questões de custos e prazo, estes ensaios foram realizados nas idades de 442 (argamassas) e 320 (concretos) dias contadas a partir do início da exposição às diferentes condições ambientais mencionadas anteriormente.

4

Apresentação e Análise dos Resultados

4.1 - Introdução

O propósito do presente capítulo é apresentar e analisar os resultados dos ensaios realizados nos concretos e argamassas fabricados com agregados de xisto sulfetado bem como de referência (gnaisse).

Conforme mencionado na parte experimental, a macroestrutura foi avaliada através dos ensaios de resistências à compressão e à tração por compressão diametral, além do estudo de expansão em amostras prismáticas. A microscopia eletrônica de varredura e a análise química foram as técnicas utilizadas para a avaliação da microestrutura do material.

4.2 - Propriedades mecânicas

4.2.1 - Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma propriedade mecânica importante na avaliação de materiais à base de cimento. Embora o desempenho desses materiais dependa de vários outros fatores, ela fornece um indicativo da qualidade do produto. Valores baixos de resistência indicam que a argamassa (ou concreto) apresenta problemas em sua estrutura, que podem vir desde a utilização de materiais inadequados até uma má formação interna da estrutura por falta de adensamento ou por ausência de cura, por exemplo.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado apenas em amostras de concreto devido à quantidade de agregado de xisto sulfetado ser limitada. Esta propriedade foi avaliada em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição: ambiente da câmara úmida e imersão numa solução de hidróxido de cálcio diluído em água mantida a temperatura ambiente e a 40°C. A FIG. 4.1 ilustra os resultados médios encontrados em cada uma das idades avaliadas: 28, 91 e 150 dias.

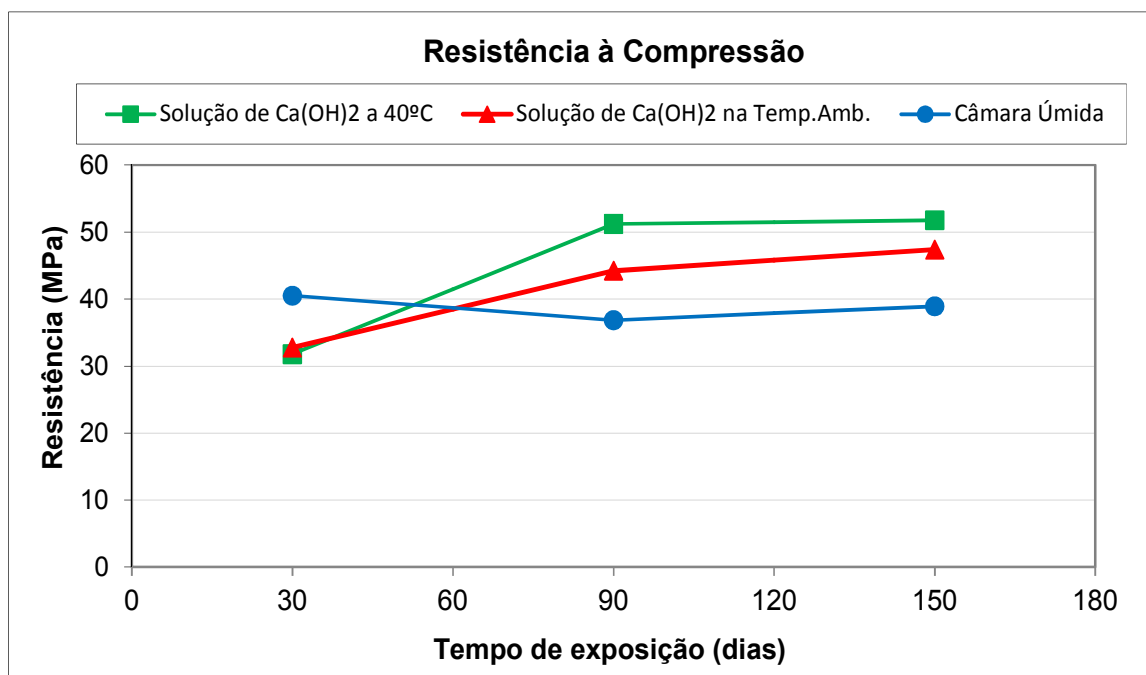


FIGURA 4.1 – Resultados médios da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição

A análise dos resultados revela uma tendência variável, mas não significativa, na resistência dos corpos-de-prova mantidos em câmara úmida, com valores próximos a 40 MPa. Por outro lado os concretos submetidos à solução de hidróxido de cálcio mostram aumentos de resistência sendo este ganho ainda maior na temperatura de 40°C.

O aumento da resistência à compressão, ocorrido até 150 dias nos corpos de prova submetidos à solução de hidróxido de cálcio, pode estar diretamente relacionado com a formação de produtos decorrentes das reações químicas entre os íons sulfatos, provenientes do processo de alteração dos sulfetos, com os constituintes da pasta de cimento e a solução de hidróxido de cálcio. Estes produtos neoformados (etringita) podem ter propiciado, ao longo do tempo, a colmatação dos poros, o que ocasionou uma densificação da matriz e, o conseqüente aumento da resistência à compressão. Além disto, deve ser lembrado que meios alcalinos e elevadas temperaturas aceleram o processo de formação dos neoprodutos, o que explica a resistência à compressão nos corpos-de-prova mantidos a 40°C ser superior aos colocados na temperatura ambiente.

Resultado similar foi observado nos estudos preliminares para a construção da usina de Irapé realizados no Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., relatório DCT.T.106.99-R2 (1999) apud da Tabela 4.3.2.5 do relatório CEMIG/ANEEL P&D 122 (2007). Os resultados deste estudo mostram ganhos significativos de resistência à compressão de amostras de concreto fabricadas com a rocha sulfetada do sítio geológico de Irapé quando submetidas à percolação de hidróxido de cálcio (valor médio de resistência igual a 7,1 MPa após 83 dias de exposição) em relação a corpos-de-prova deste mesmo concreto sob percolação de água natural (valor médio de resistência igual a 5,1 MPa após 83 dias de exposição).

No entanto é esperado que ocorra, em longo prazo, uma queda de resistência à medida que não exista mais espaço para os produtos formados, a partir da reação expansiva, se acomodarem causando pressões internas elevadas. Portanto para uma confiabilidade maior dos resultados encontrados seria interessante a realização de ensaios durante um período maior de tempo de exposição.

4.2.2 - Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com o objetivo de verificar o desempenho de argamassas e concretos fabricados com agregados de xisto sulfetado. Estes ensaios foram realizados em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição: ambiente da câmara úmida e imersão numa solução de hidróxido de cálcio diluído em água mantida a temperatura ambiente e a 40°C.

Argamassa

A FIG. 4.2 representa os resultados do ensaio resistência à tração por compressão diametral. Nota-se a igualdade dos valores de resistência aos 28 e 150 dias para os corpos-de-prova imersos na solução de hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e mantidos na câmara úmida. Em ambos os casos houve um aumento de resistência aos 91 dias em relação às demais idades.

As argamassas imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C apresentaram um crescimento de resistência à tração ao longo do tempo diferentemente do encontrado para as demais argamassas. Além disso, os valores médios de resistência encontrados foram no geral maiores.

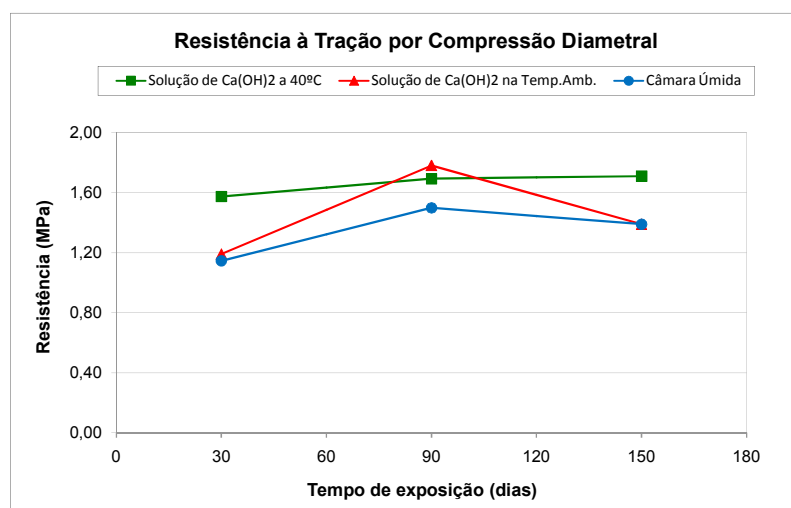


FIGURA 4.2 – Resultados médios da resistência à tração das argamassas ao longo do tempo em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição.

Também neste caso esperava-se uma queda de resistência ao longo do tempo na medida em que não exista mais espaço para acomodação dos produtos formados a partir da reação expansiva levando a pressões internas elevadas. Portanto para uma maior confiabilidade destes resultados encontrados seria interessante a realização de ensaios durante um período maior de tempo de exposição.

Concreto

A FIG. 4.3 apresenta os resultados obtidos para a resistência média à tração do concreto quando submetido a diferentes condições de exposição. Primeiramente pode-se observar a inexistência do valor médio de resistência para o concreto mantido em câmara úmida aos 28 dias. Esta resistência foi medida, porém os valores encontrados em cada corpo-de-prova apresentaram grandes discrepâncias inviabilizando sua consideração. Nas demais idades medidas este fato não ocorreu.

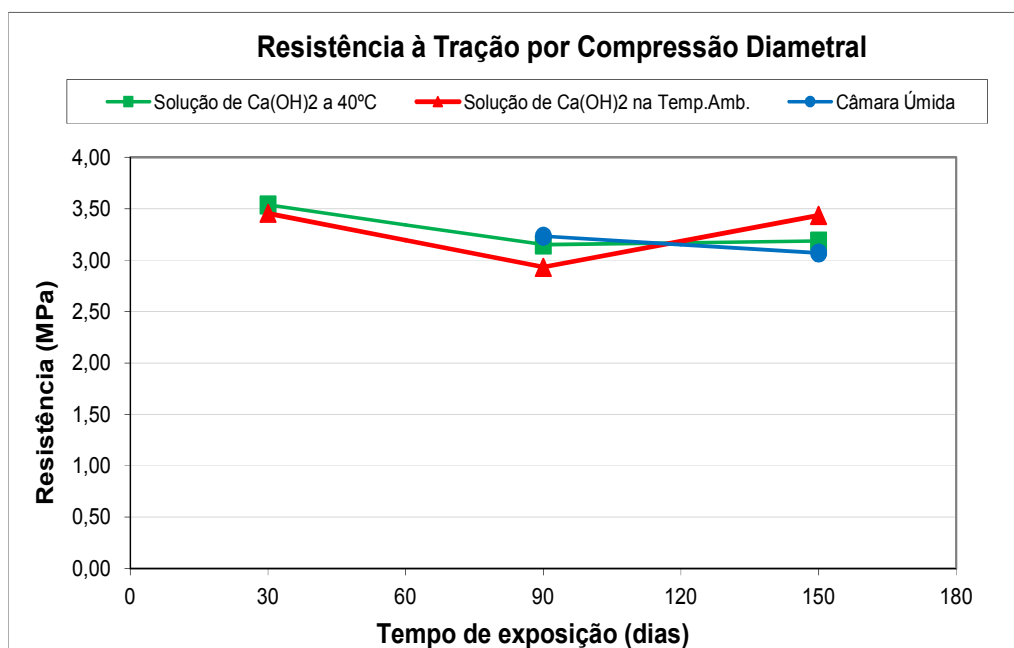


FIGURA 4.3 – Resultados médios da resistência à tração do concreto ao longo do tempo em corpos-de-prova submetidos a três situações distintas de exposição.

Os valores médios de resistência em cada idade são bastante próximos para todas as condições de exposição.

Diferentemente do observado para a argamassa, o concreto apresentou uma tendência de redução de resistência ao longo do tempo independente do meio de exposição. Este fato

sugere que a composição granulométrica dos agregados pode influenciar o comportamento mecânico visto que neste caso os agregados possuem diferentes tamanhos enquanto que, nas argamassas, suas dimensões eram basicamente constante. Vale frisar que a composição das misturas – relações cimento:agregado e água/cimento - foi também distinta sendo que nas argamassa aquela foi 1: 5 e 1,00 e no concreto 1: 4 e 0,45 respectivamente.

4.3 – Ensaios de expansão em barras

4.3.1 – Argamassa

Argamassa fabricada com agregado de referencia (gnaisse)

As FIG. 4.4 a 4.6 apresentam os resultados das medidas das deformações em cada uma das barras de argamassa fabricadas com gnaisse submetidas às diferentes condições de exposição. A deformação positiva corresponde a expansão enquanto que negativa a retração.

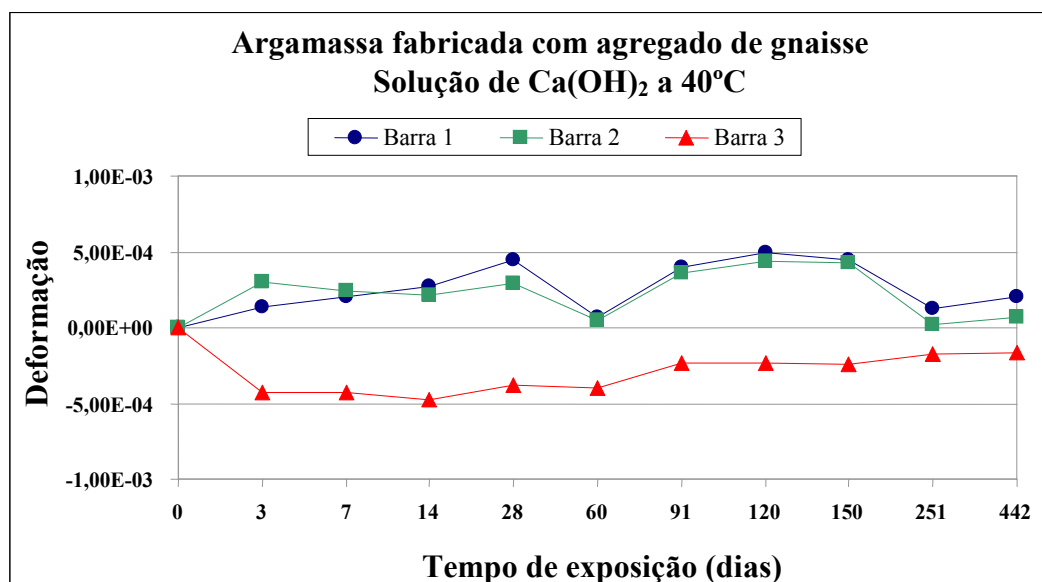


FIGURA 4.4 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com gnaisse imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C.

Primeiramente, observa-se, independente da condição de exposição, valores de deformação na faixa entre -5×10^{-4} (retração) e 5×10^{-4} (expansão). Deformações dentro da faixa mencionada não são significativas no que diz respeito à patologia analisada neste estudo.

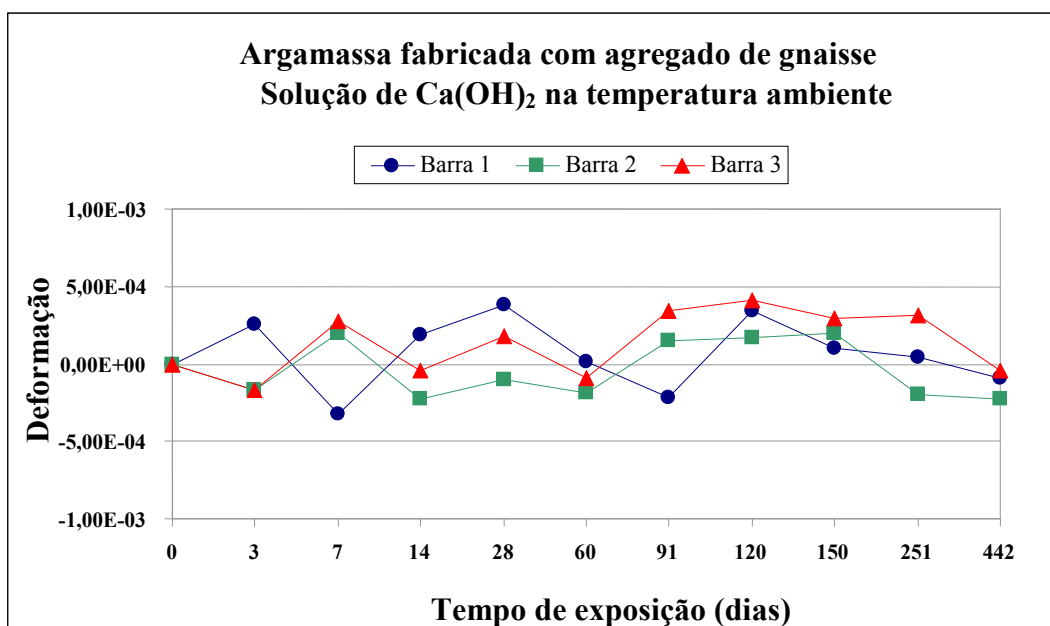


FIGURA 4.5 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com gnaise imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida na temperatura ambiente.

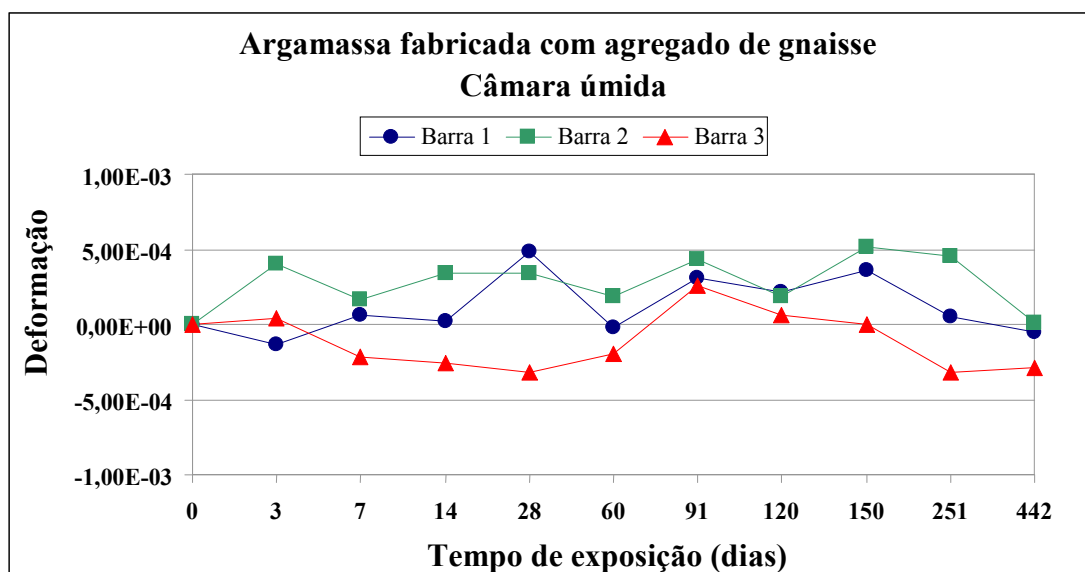


FIGURA 4.6 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com gnaise mantidas em câmara úmida

As barras imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C (FIG. 4.4) apresentaram comportamento distinto. As barras 1 e 2 expandiram ao longo do tempo enquanto que na barra 3 ocorreu encurtamento. O comportamento das barras mantidas na solução de hidróxido de cálcio na temperatura ambiente (FIG. 4.5) foi mais similar principalmente no caso das barras 2 e 3.

Não se observam deformações significativas ao longo do tempo no caso das barras mantidas na câmara úmida (FIG. 4.6).

Argamassa fabricada com agregado de xisto sulfetado

As deformações medidas em argamassas fabricadas com agregado contendo sulfetos estão apresentadas nas FIG. 4.7 a 4.9. As barras foram mantidas nas diferentes situações de exposição com o mesmo rigor das argamassas fabricadas com o agregado de referência.

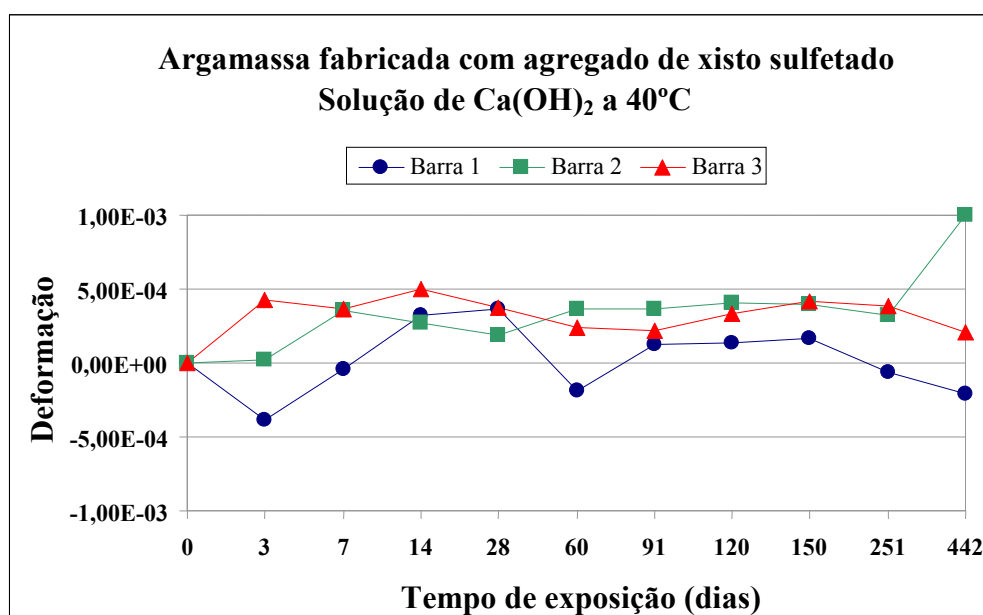


FIGURA 4.7 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com xisto sulfetado imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C.

As barras mantidas na solução de hidróxido de cálcio diluído em água a uma temperatura de 40°C (FIG. 4.7) apresentaram valores de deformações na faixa entre -5×10^{-4} (encurtamento) e 5×10^{-4} (expansão) com exceção da barra 2 que se alongou mais no período entre 251 e 442 dias. O comportamento das barras mantidas na solução de hidróxido de cálcio na temperatura ambiente (FIG. 4.8) foi mais similar. As barras mantidas em câmara úmida (FIG. 4.9), por outro lado, apresentaram comportamento distinto. As barras 1 e 2 apresentaram encurtamento ao longo do tempo enquanto que na barra 3 ocorreu expansão.

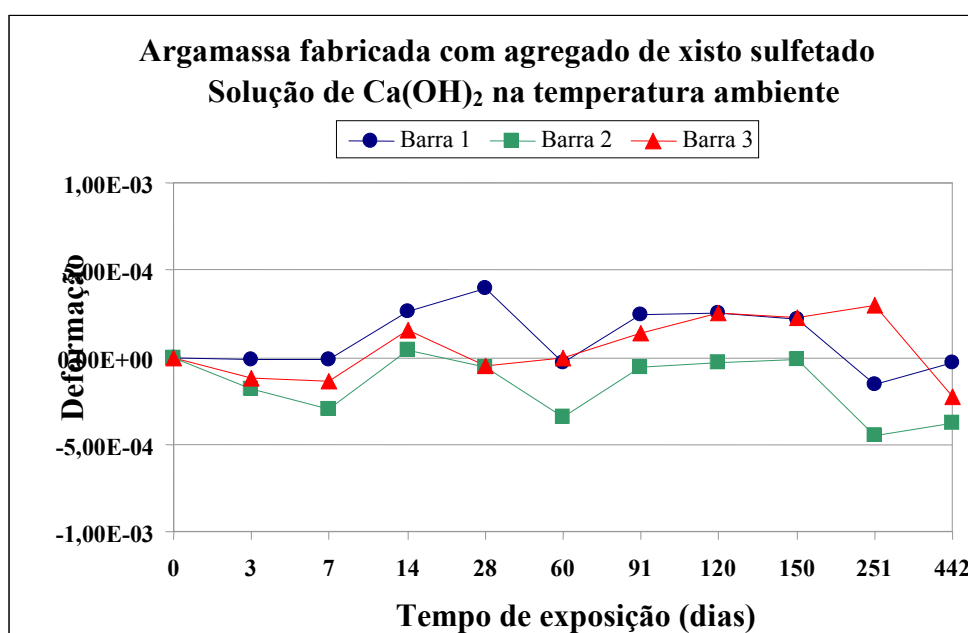


FIGURA 4.8 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com xisto sulfetado imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida na temperatura ambiente.

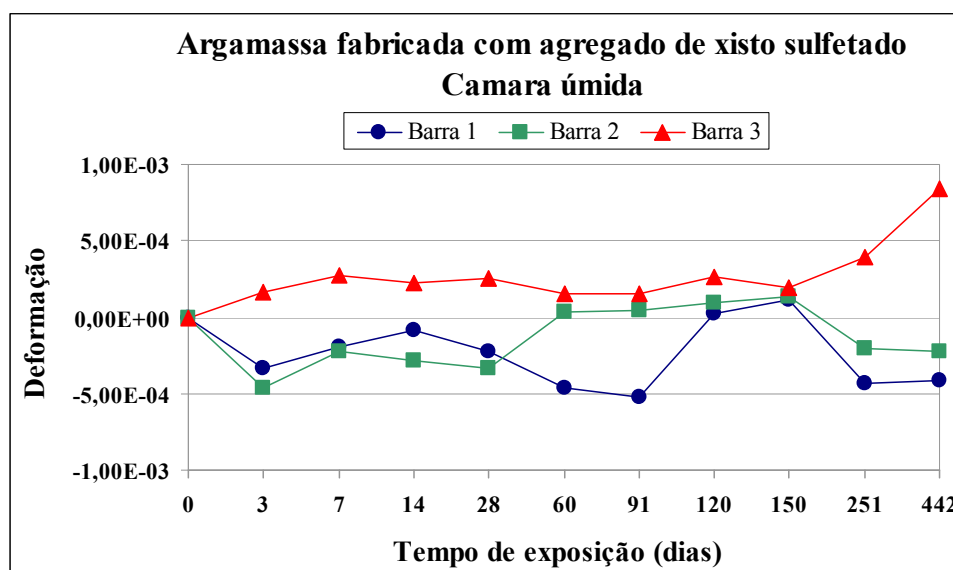


FIGURA 4.9 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de argamassa fabricada com xisto sulfetado mantidas em câmara úmida

Observa-se ainda que a barra 2, imersa na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C (Fig. 4.7), e a barra 3, colocada na câmara úmida (Fig. 4.9), apresentaram valores de deformação de expansão acima do limite de 5×10^{-4} no período entre 251 e 442 dias. Estes valores de deformação são significativos no que diz respeito à patologia analisada neste estudo.

Análise comparativa entre as diferentes argamassas

Os gráficos comparativos das deformações médias das barras de argamassas fabricadas com agregados de gnaiss e de xisto sulfetado mantidas nas diferentes situações de exposição estão mostrados nas FIG. 4.10 a 4.12. Em cada gráfico apresenta-se também o valor limite desta deformação preconizado pela especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal.

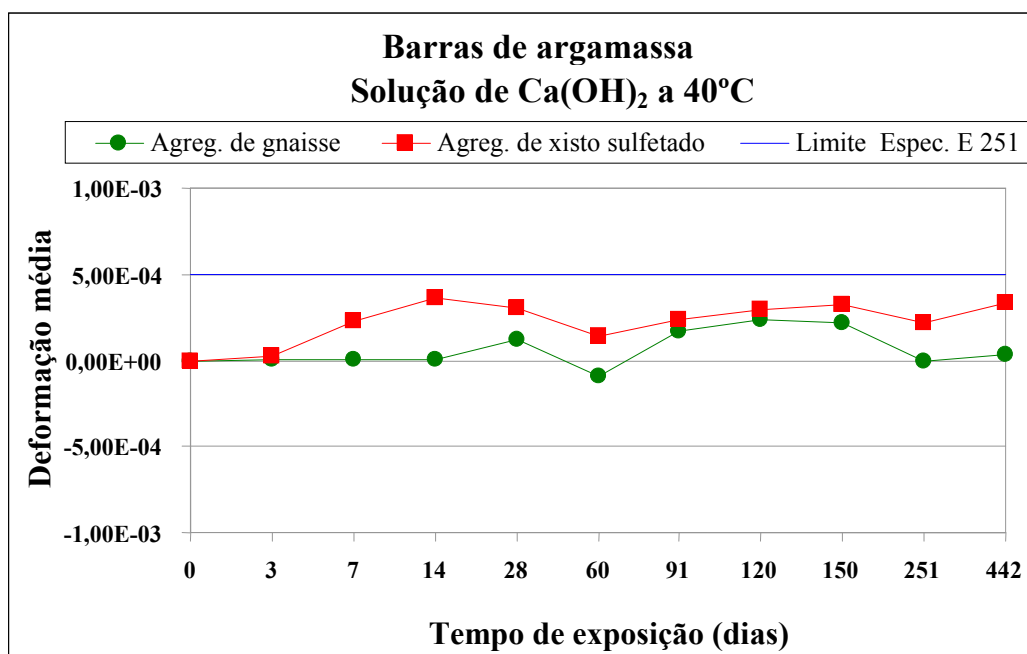


FIGURA 4.10 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de argamassa imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C.

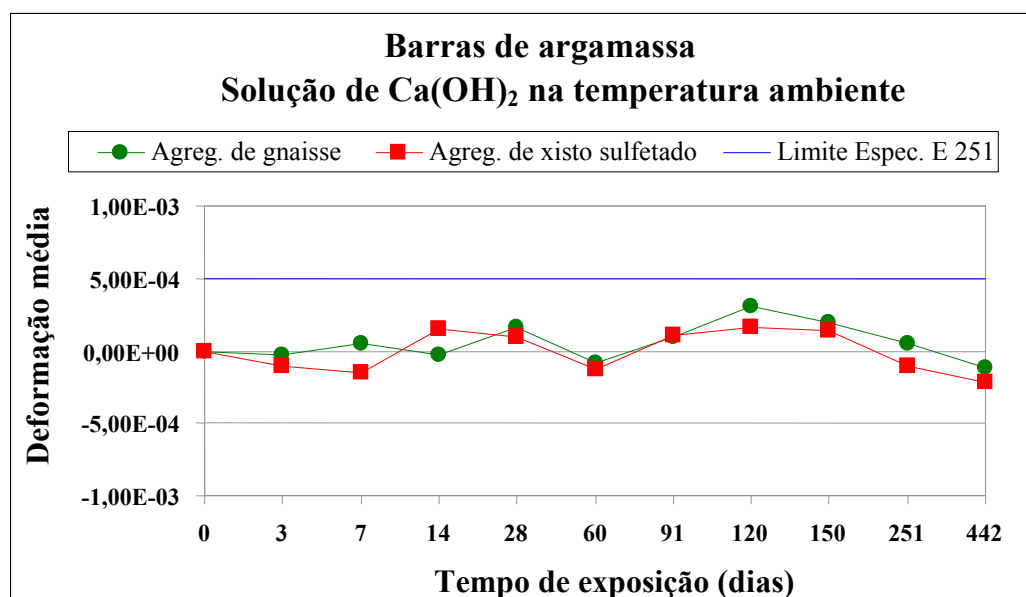


FIGURA 4.11 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de argamassa imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida na temperatura ambiente.

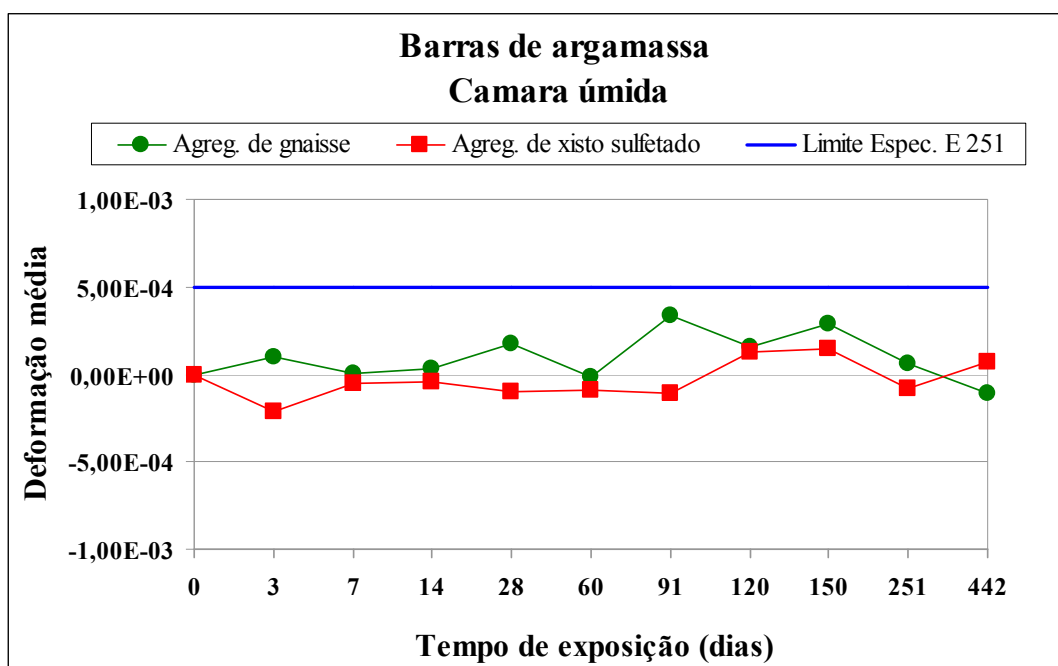


FIGURA 4.12 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de argamassa mantidas em câmara úmida

A deformação média das barras contendo xisto sulfetado acondicionadas na solução de hidróxido de cálcio diluído em água a uma temperatura de 40°C foi sempre maior em relação às barras fabricadas com agregados de gnaisse. Porém até 442 dias de exposição, estas deformações não ultrapassaram o limite.

Para as demais situações de exposição, observa-se um comportamento mais similar entre as argamassas fabricadas com gnaisse e com xisto sulfetado. Também para estas situações os valores médios encontrados não excederam o limite preconizado pela especificação E 251 (1985) do LNEC de 5×10^{-4} .

A análise global revela ainda que para o agregado de xisto sulfetado, a temperatura da solução de hidróxido de cálcio tem influência nos resultados. O valor da deformação média encontrada em cada uma das idades avaliadas é sempre maior ou igual aos valores médios obtidos para a situação na temperatura ambiente.

4.3.2 – Concreto

Concreto fabricado com agregado de referencia (гнаisse)

As FIG. 4.13 a 4.15 apresentam os resultados das deformações medidas em barras de concreto, fabricada com gnaisse e submetidas às diferentes situações de exposição

estudadas. Nas três situações de exposição analisadas, as deformações ao longo do tempo foram semelhantes, não excedendo em nenhum caso o limite preconizado pela especificação LNEC E 251 (1985) de 5×10^{-4} .

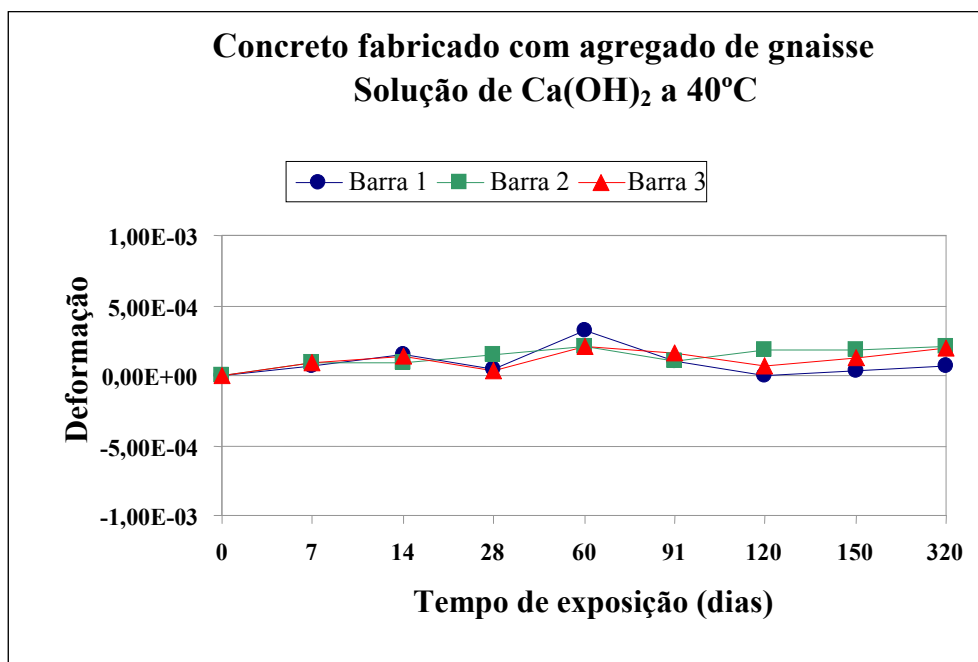


FIGURA 4.13 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com gnaiss, imersas na solução de hidróxido de cálcio e mantida a 40°C .

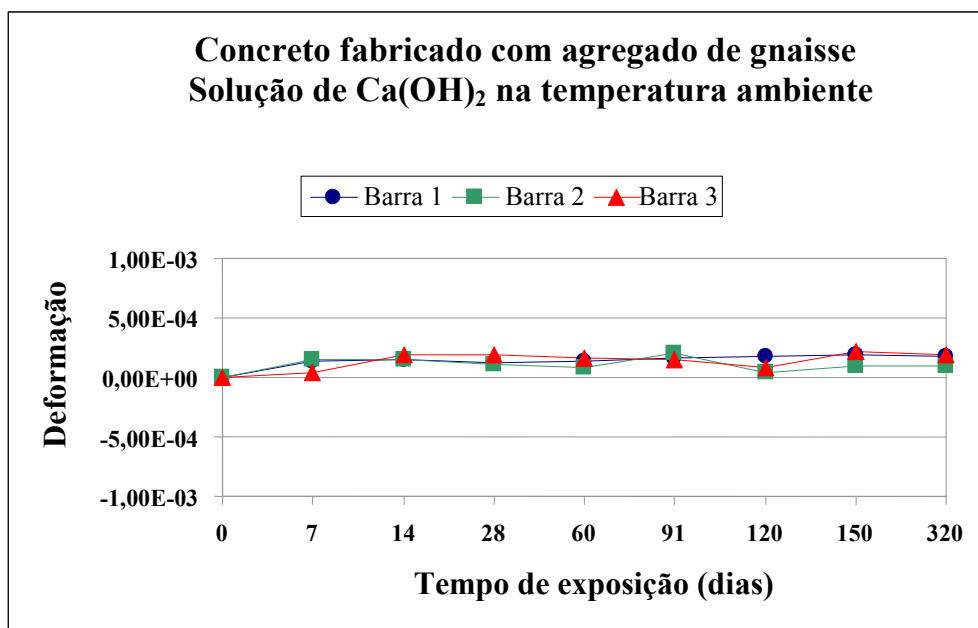


FIGURA 4.14 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com gnaiss, imersas na solução de hidróxido de cálcio e mantida na temperatura ambiente.

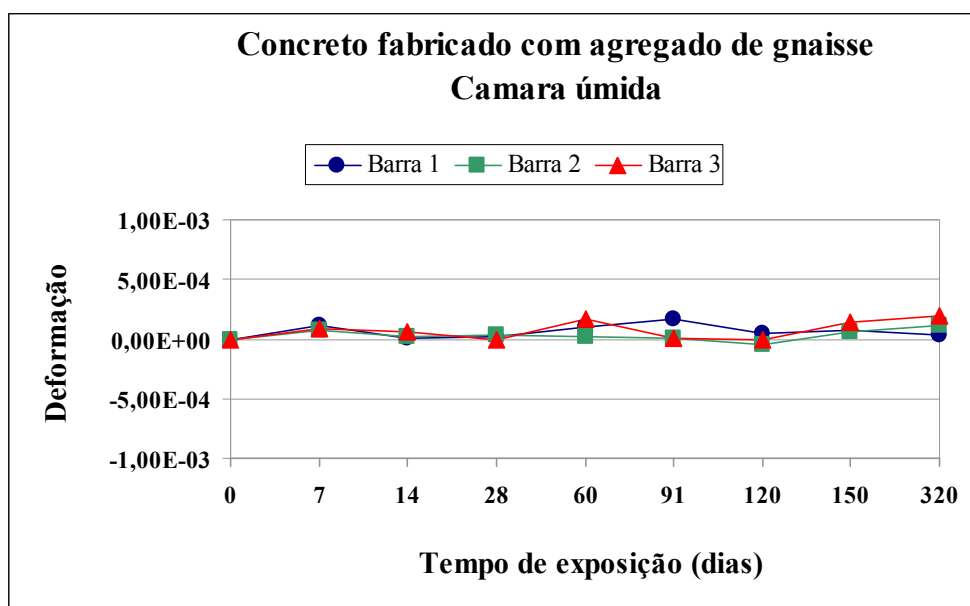


FIGURA 4.15 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com gnaiss e mantidas em câmara úmida.

Concreto fabricado com agregado de xisto sulfetado

As deformações ocorridas, ao longo do tempo, em barras de concreto contendo agregado de xisto sulfetado e submetidas às três diferentes condições de exposição estão apresentadas nas FIG. 4.16 a 4.18. Devido a dificuldades no momento da desforma uma das barras ficou bastante danificada; por isso foram para a câmara úmida apenas duas barras.

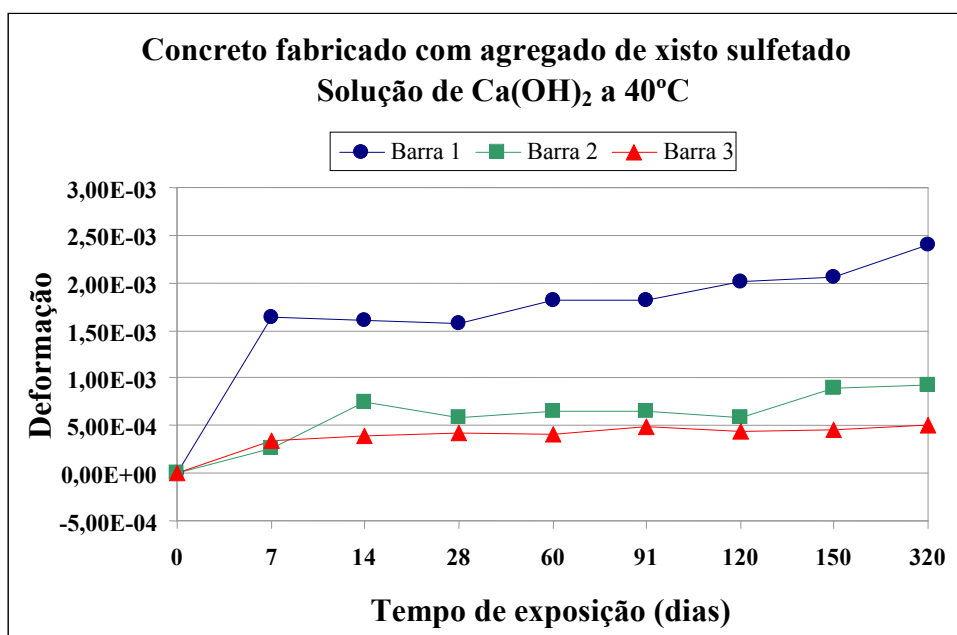


FIGURA 4.16 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com xisto sulfetado, imersas na solução de hidróxido de cálcio e mantida a 40°C.

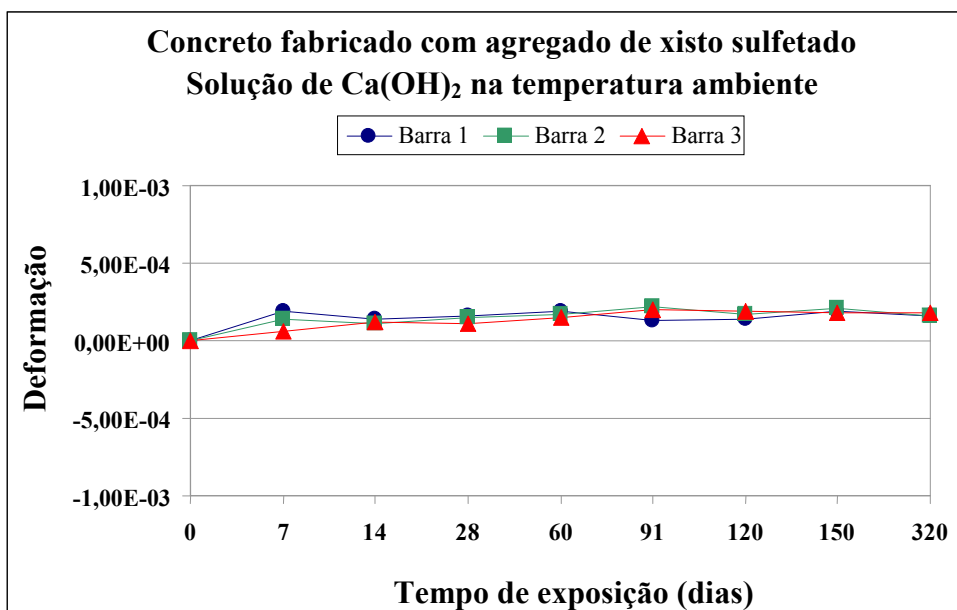


FIGURA 4.17 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com xisto sulfetado imersas na solução de hidróxido de cálcio na temperatura ambiente.

As barras imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C (FIG. 4.16) apresentaram expansão em todas as idades, porém com valores diferentes. As deformações na barra 1 foram sempre significativamente maiores. Vale frisar que, os valores encontrados, após 28 dias de exposição, foram iguais ou maiores que o limite preconizado pela especificação LNEC E 251 (1985) de 5×10^{-4} . Isto significa que o

inerte em questão pode causar danos estruturais caso seja usado para a fabricação de concretos sujeitos a temperaturas mais elevadas.

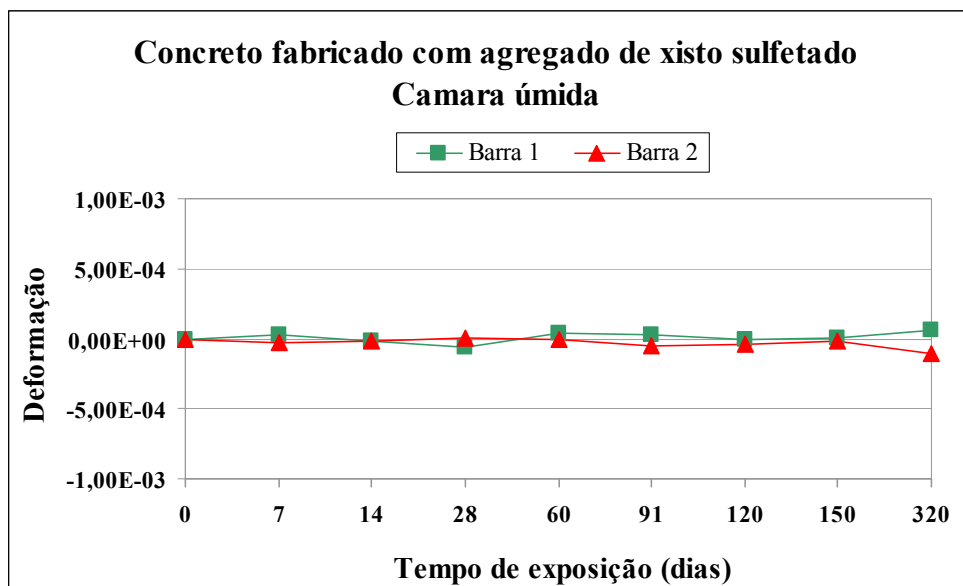


FIGURA 4.18 – Resultados das deformações ao longo do tempo em barras de concreto fabricado com xisto sulfetado e mantidas em câmara úmida.

O comportamento das barras imersas na solução de hidróxido de cálcio mantido na temperatura ambiente (FIG. 4.17) foi bastante similar sendo que os valores de expansão medidos estiveram sempre abaixo do limite de 5×10^{-4} .

Os corpos de prova prismáticos mantidos na câmara úmida (FIG. 4.18) praticamente não se deformaram até 320 dias de exposição.

Neste caso, a análise revela ainda que a temperatura da solução de hidróxido de cálcio tem influência significativa nos resultados. Os valores de deformação encontrados em cada uma das idades avaliadas foram sempre maiores que os obtidos para a situação na temperatura ambiente.

Análise comparativa entre os diferentes concretos

A análise comparativa das deformações médias das barras de concreto fabricadas com agregados de gnaiss e de xisto sulfetado mantidas nas diferentes situações de exposição está apresentada nas FIG. 4.19 a 4.21. Em cada gráfico apresenta-se também o valor limite desta deformação preconizado pela especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal.

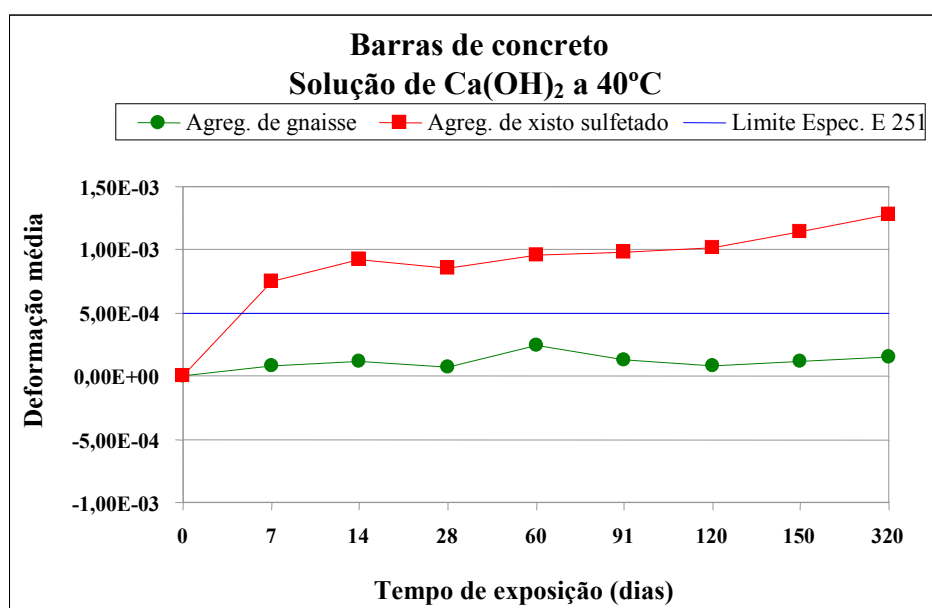


FIGURA 4.19 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de concreto, imersas na solução de hidróxido de cálcio mantida a 40°C.

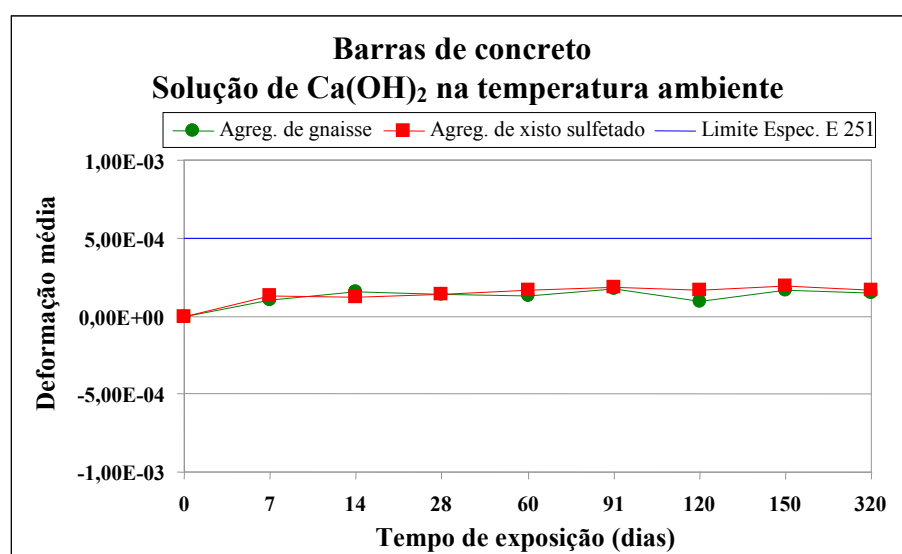


FIGURA 4.20 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de concreto, imersas na solução de hidróxido de cálcio na temperatura ambiente.

Primeiramente, observa-se um comportamento bastante distinto entre as barras de concreto, fabricadas com diferentes agregados, imersas na solução de hidróxido de cálcio mantido a 40°C. A deformação média devida à expansão das barras contendo xisto sulfetado foi crescente no período de exposição analisado, sendo inclusive significativamente superior ao limite preconizado pela especificação LNEC E 251.

Nas demais situações de exposição, praticamente não houve diferença nas deformações de expansão nas barras fabricadas com os dois agregados. Em nenhum caso, os valores foram maiores que o limite de 5×10^{-4} prescrito pela especificação LNEC E 251.

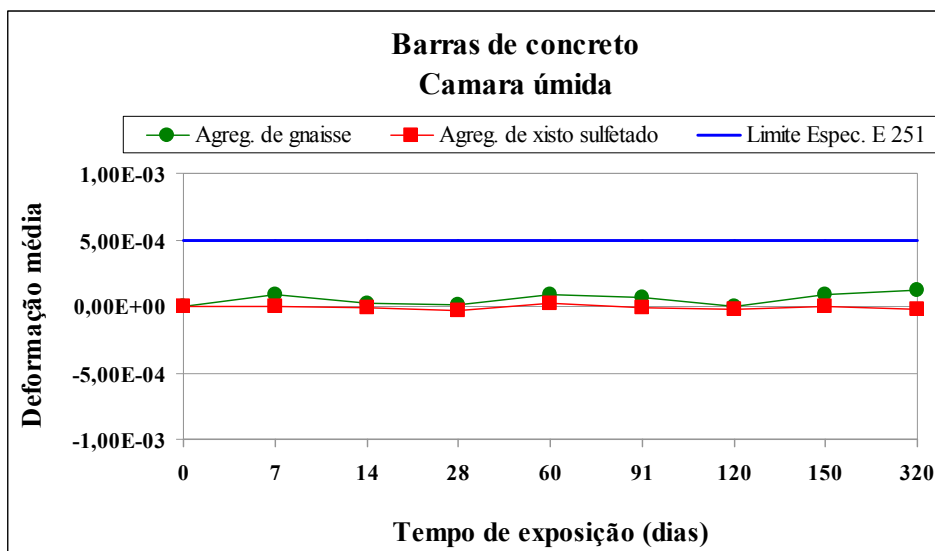


FIGURA 4.21 – Resultados das deformações médias ao longo do tempo em barras de concreto mantidas em câmara úmida.

4.4 – Avaliação da microestrutura

4.4.1 – Análise química

A análise química teve por objetivo a determinação dos teores de enxofre total nas amostras de argamassa e concreto após extensos períodos de imersão na solução de hidróxido de cálcio e em câmara úmida. Estes teores foram determinados por combustão direta utilizando o equipamento LECO – CSA 17V. A TAB. 4.1 apresenta estes resultados.

TABELA 4.1 - Resultados das análises químicas nos concretos e argamassas.

Denominação do traço	Tipo de agregado	Situação de exposição	Tempo de exposição (dias)	Teor total de enxofre (%)
ARG - XSUL	xisto sulfetado	Solução de Ca(OH)_2 a 40°C	442	1,82
		Solução de Ca(OH)_2 na temp. ambiente	442	1,84
		Câmara úmida	442	-----
CONC - XSUL	xisto sulfetado	Solução de Ca(OH)_2 a 40°C	320	1,52
		Solução de Ca(OH)_2 na temp. ambiente	320	1,56
		Câmara úmida	320	1,47
ARG - GN	gnaisse	Solução de Ca(OH)_2 a 40°C	442	0,17
CONC - GN	gnaisse	Solução de Ca(OH)_2 a 40°C	320	0,21

A análise destes resultados revela primeiramente que a temperatura da solução de hidróxido de cálcio não afetou o teor de S_{total} tanto nas argamassas quanto nos concretos. Os valores encontrados foram praticamente os mesmos.

O ambiente de exposição causou uma pequena diferença no teor de enxofre no caso do concreto. A imersão na solução de hidróxido de cálcio proporcionou um acréscimo de 4% neste teor para um mesmo período de exposição.

Por outro lado, nota-se que os teores de S_{total} presente nas argamassas foi sempre um pouco maior que os valores encontrados nos concretos para uma mesma situação de exposição. Porém, o tempo de exposição no caso das argamassas foi 38% maior: 442 dias versus 320. Este maior tempo de exposição pode ser uma das causas destas diferenças de teores encontradas. Portanto para uma maior confiabilidade destes resultados, seria interessante a realização destes ensaios durante um período maior de tempo de exposição.

Foi realizada também uma estimativa teórica do teor de enxofre total com base nas análises químicas dos materiais constituintes e na proporção destes materiais na composição dos concretos e argamassas. Este teor foi calculado como demonstrado a seguir:

Teor teórico de S_{total} no concreto ou argamassa (%) = $\left[(\text{Consumo de cimento} \times S_{total} \text{ no cimento}) + (\text{Consumo de agregados} \times S_{total} \text{ no agregado}) \right] / (\text{massa específica do concreto ou da argamassa}) \times 100$.

TABELA 4.2 – Teor de S_{total} nos materiais constituintes.

Material		S_{total} (%)
Cimento Cauê CP III 40 RS	Item 3.1.1	1,61
Agregado de xisto sulfetado	Tabela 3.10	1,88
Agregado de gnaïsse	Item 3.1.2	< 0,01

Concreto contendo gnaïsse - tabela 3.12

- ⇒ Consumo de cimento = 410 Kg/m³
 - ⇒ Consumo de agregado = 1763 Kg/m³
 - ⇒ Massa específica = 2493 Kg/m³
- Substituindo os valores na relação ⇒ $S_{total} = 0,26 \%$

Concreto contendo xisto sulfetado - tabela 3.12

- ⇒ Consumo de cimento = 410 Kg/m³
 - ⇒ Consumo de agregado = 1661 Kg/m³
 - ⇒ Massa específica = 2460 Kg/m³
- Substituindo os valores na relação ⇒ $S_{total} = 1,54 \%$

Argamassa contendo gnaïsse - tabela 3.12

- ⇒ Consumo de cimento = 391 Kg/m³
 - ⇒ Consumo de agregado = 1955 Kg/m³
 - ⇒ Massa específica = 2737 Kg/m³
- Substituindo os valores na relação ⇒ $S_{total} = 0,23 \%$

Argamassa contendo xisto sulfetado - tabela 3.12

- ⇒ Consumo de cimento = 391 Kg/m³
 - ⇒ Consumo de agregado = 1955 Kg/m³
 - ⇒ Massa específica = 2737 Kg/m³
- Substituindo os valores na relação ⇒ $S_{total} = 1,57 \%$

A TAB. 4.3 apresenta um estudo comparativo dos teores totais de S_{total} medidos em relação aos valores teóricos. A análise destes resultados revela valores praticamente iguais no caso do concreto. Na argamassa, porém, o teor medido foi significativamente maior (16,5 %) que o valor teórico calculado. Vale lembrar que o período de imersão na solução de hidróxido de cálcio foi maior para a argamassa o que pode ter propiciado o acréscimo de S_{total} .

TABELA 4.3 – Análise comparativa dos teores de S_{total} nos concretos e argamassas.

Denominação do traço	Situação de exposição	Teor de enxofre total (%)	Teor teórico de enxofre total (%)
ARG - XSUL	Solução de $Ca(OH)_2$ a 40°C	1,82	1,57
	Solução de $Ca(OH)_2$ na temp. ambiente	1,84	
	Câmara úmida	-----	
CONC - XSUL	Solução de $Ca(OH)_2$ a 40°C	1,52	1,54
	Solução de $Ca(OH)_2$ na temp. ambiente	1,56	
	Câmara úmida	1,47	
ARG - GN	Solução de $Ca(OH)_2$ a 40°C	0,17	0,23
CONC - GN	Solução de $Ca(OH)_2$ a 40°C	0,21	0,26

4.4.2 – Microscopia eletrônica de varredura - MEV

Essa técnica fornece imagens microscópicas da estrutura do produto estudado, além de indicar a topografia existente no material. Através dela, é possível identificar os materiais presentes, desde a morfologia da pasta até o detalhe dos produtos formados pela hidratação do cimento.

Argamassa fabricada com agregado de xisto sulfetado

Micrografias, com diferentes ampliações, de amostras de argamassas fabricadas com xisto-sulfetado e submetidas a diferentes condições de exposição são apresentadas a seguir.

As análises com microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostraram que na maioria das amostras havia presença de produtos aciculares semelhantes morfologicamente à etringita. Nas micrografias das argamassas mantida a temperatura ambiente na solução de hidróxido de cálcio (FIG. 4.22) observa-se a formação de agulhas de tamanhos variados nas imagens ampliadas em 2500 vezes. Já nas argamassas mantidas a 40°C nesta mesma solução (FIG. 4.23) as agulhas puderam ser percebidas em imagens com ampliações de apenas 500 vezes. As micrografias retiradas de uma outra amostra (FIG. 4.24) reforçam a presença acentuada de bastões de etringita nas argamassas mantidas na solução de $Ca(OH)_2$ na temperatura de 40°C.

A micrografia mostrada na FIG. 4.25, retirada do relatório CEMIG/ANEEL P&D 122 (2007), apresenta estruturas bastante semelhantes em morfologia às encontradas neste estudo. Os bastões vistos nesta figura foram considerados pelos autores do relatório como formação de acículas de etringita fibro radiada em um poro.

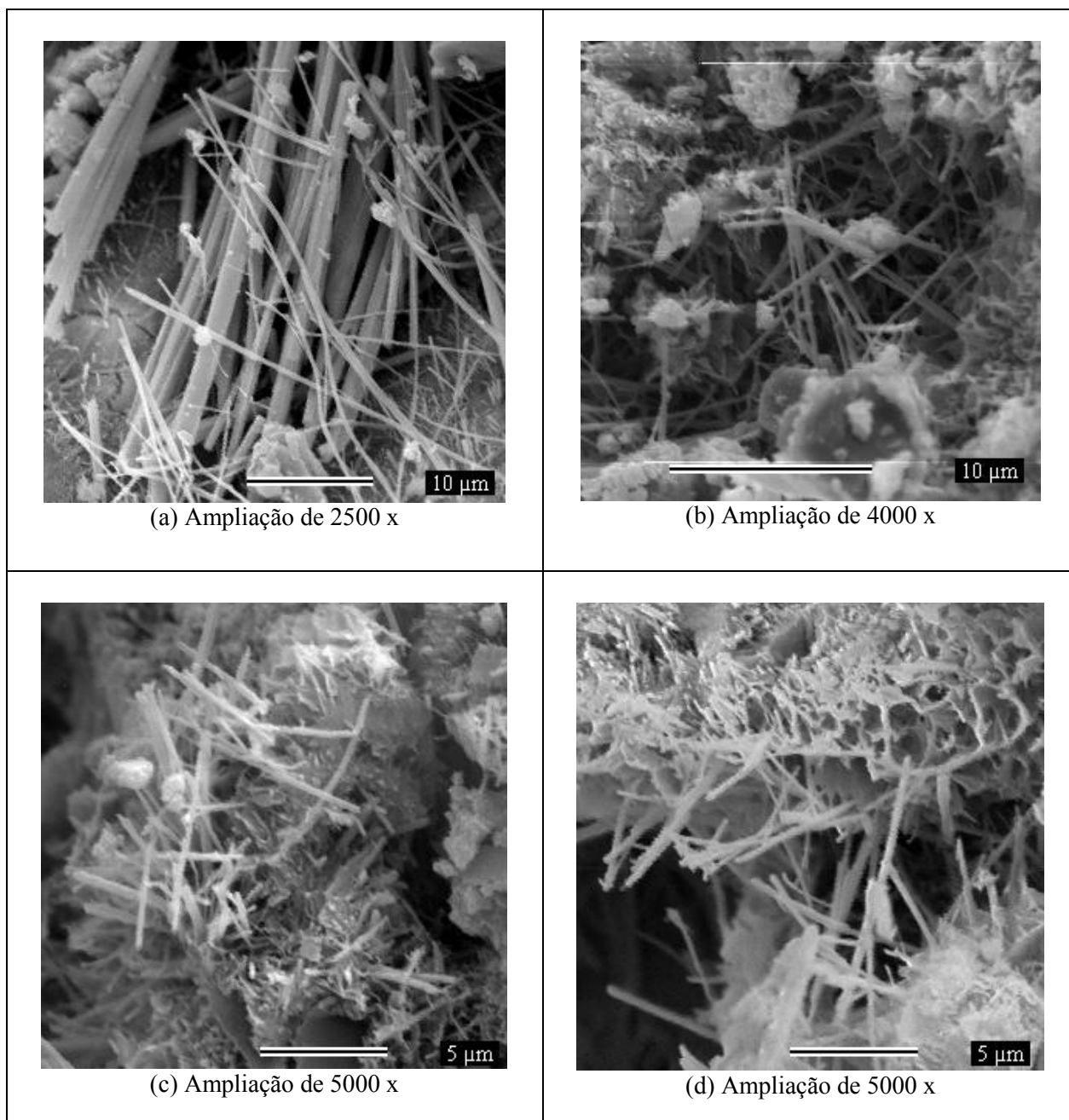


FIGURA 4.22 – Micrografias de uma amostra de argamassa mantida na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em temperatura ambiente.

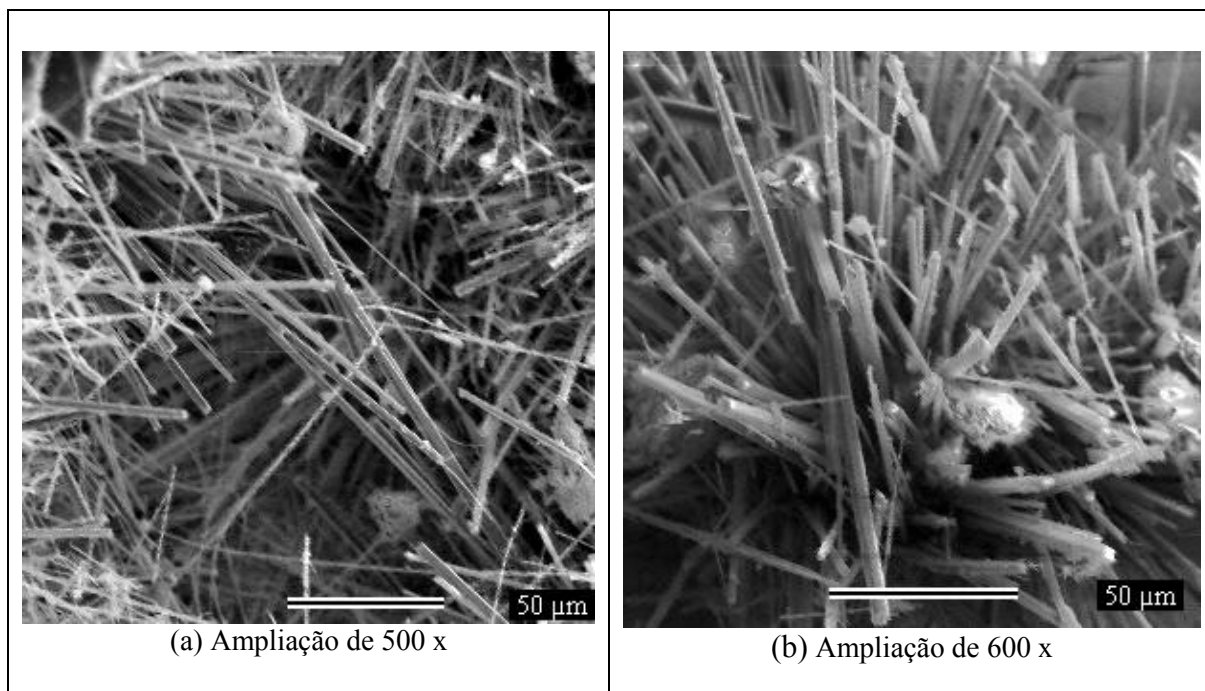


FIGURA 4.23 – Micrografia de uma amostra de argamassa mantida a 40°C na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

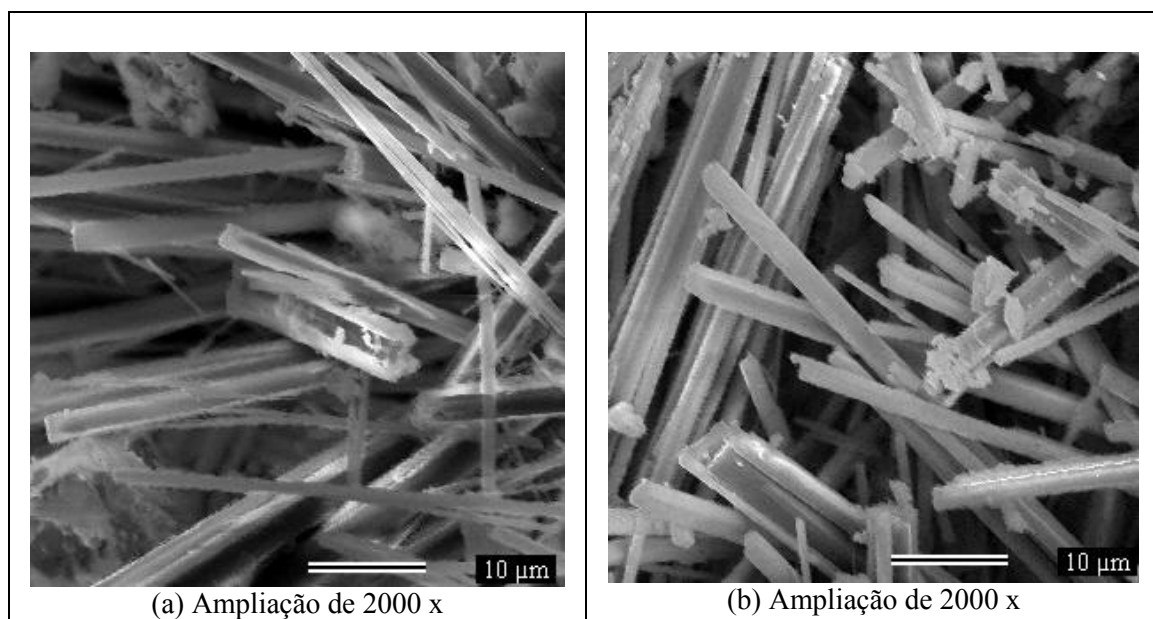


FIGURA 4.24 – Micrografia de outra amostra de argamassa mantida a 40°C na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

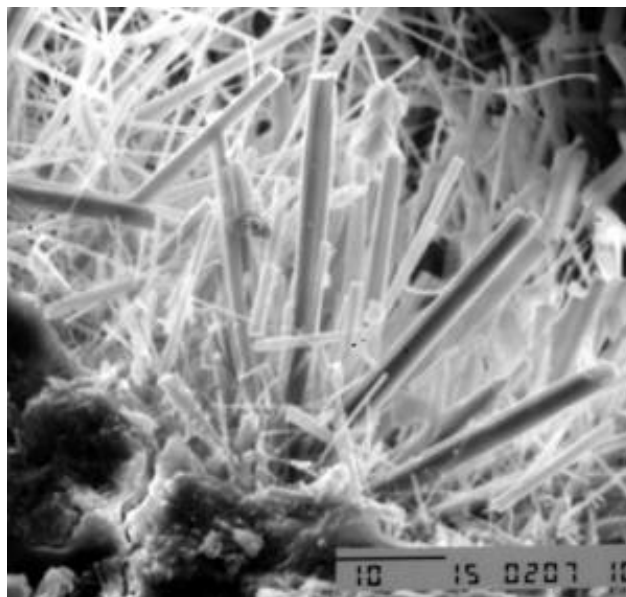


FIGURA 4.25 –Micrografia, com ampliação de 2000x, mostrando a formação de acículas de etringita fibro radiada em um poro. Região de contato do concreto projetado com o maciço rochoso da área de implantação da Usina Hidrelétrica de Irapé

Concreto fabricado com agregado de xisto sulfetado

As imagens da microscopia eletrônica de varredura não mostraram, em nenhuma das amostras de concreto, bastões que caracterizam morfologicamente a formação de etringita. As micrografias apresentadas na FIG. 4.26 são de uma amostra de concreto mantido na solução de hidróxido de cálcio na temperatura ambiente de onde se pode ver o processo de microfissuração da matriz. Imagens semelhantes foram obtidas das demais amostras de concreto mantidas na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à temperatura de 40°C.

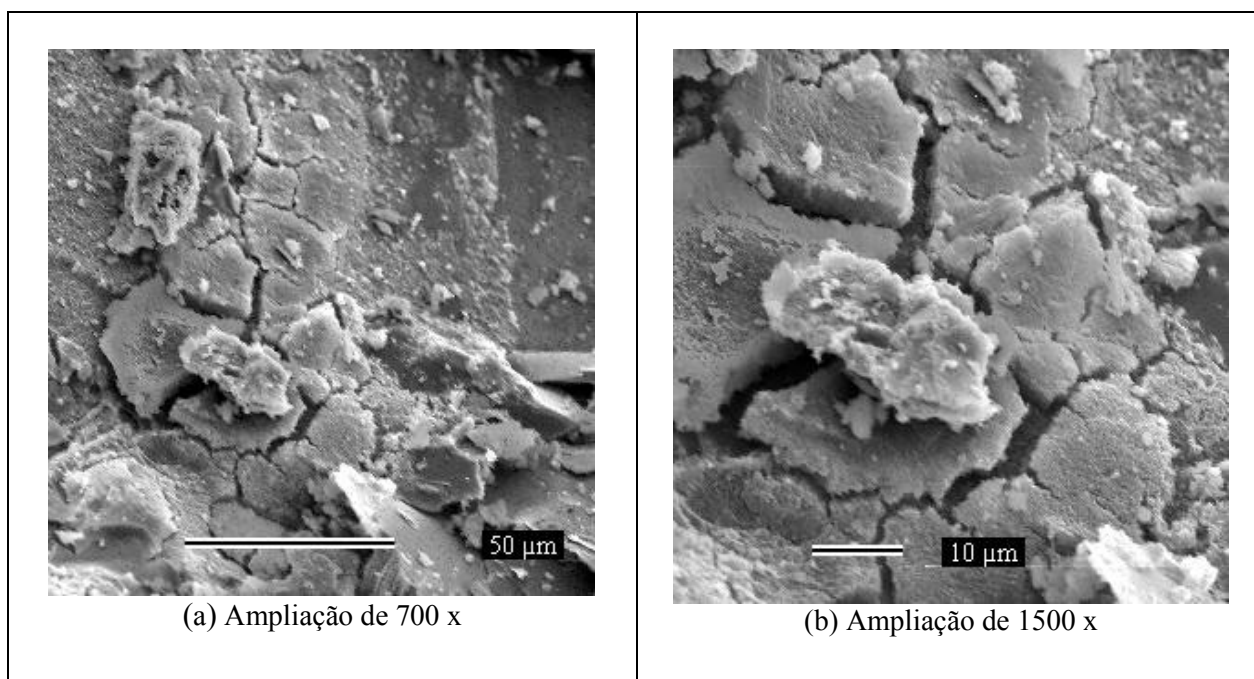


FIGURA 4.26 – Micrografia de uma amostra de concreto mantida na solução de hidróxido de cálcio em temperatura ambiente

4.5 – Macro versus micro análise

Neste item é realizado um estudo comparativo dos resultados da análise da microestrutura (teor de enxofre total e MEV) em relação ao ensaio de expansão em barras. Os resultados de avaliação da resistência mecânica não foram considerados neste estudo comparativo em função do período de exposição quando da execução destes ensaios: 150 dias de exposição nos testes de resistência contra 320 (concreto) e 442 (argamassas) de exposição nos ensaios de microestrutura.

4.5.1 – Argamassa fabricada com agregado de xisto sulfetado

Os resultados da microestrutura das argamassas contendo agregado de xisto-sulfetado revelam um aporte, da ordem de 16,5%, no teor de S_{total} em relação ao valor teórico calculado ou inicial. As micrografias por sua vez mostram uma quantidade expressiva acículas de etringita. As deformações de expansão nas barras, porém, não revelaram valores significantes ($< 5 \times 10^{-4}$). Existe, portanto, uma discrepância entre estes resultados. Um fator que pode explicar esta discrepância é o elevado valor da relação água/cimento (igual a 1) utilizado na composição das argamassas.

4.5.2 – Concreto fabricado com agregado de xisto sulfetado

No caso do concreto, os resultados do ensaio de expansão revelaram valores significativos quando da exposição em solução de hidróxido de cálcio mantida a 40° C. A análise da microestrutura, por outro lado, não revelou aumento no teor de S_{total} e nem a presença de acículas de etringita. As micrografias mostram microfissuração da matriz sugerindo a existência de algum processo expansivo o qual poderia explicar os valores de deformação de expansão medidos.

5

Conclusões e Sugestões

5.1 - Introdução

O principal objetivo do estudo foi analisar o comportamento de concretos e argamassas fabricados com agregados contendo compostos de enxofre. Os agregados utilizados foram extraídos de testemunhos de sondagens realizadas no maciço rochoso da área de implantação da Usina Hidrelétrica de Irapé. Agregados de referencia também foram empregados para efeito de comparação. Corpos-de-prova de concreto e argamassa foram expostos a uma solução de hidróxido de cálcio diluído em água mantida em duas temperaturas distintas: temperatura ambiente e 40°C. A avaliação do desempenho estrutural foi feita por meio de medidas de expansão ao longo do tempo, de acordo com a Especificação LNEC E-251 (1985), e da resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Microscopia eletrônica de varredura e determinação química do teor de enxofre total foram realizadas a fim de se obterem informações complementares sobre a microestrutura dos concretos e argamassas bem como na formação dos neoprodutos.

5.2 – Conclusões

As conclusões descritas neste capítulo estão intimamente ligadas às características dos concretos e argamassas estudados. Com base nos resultados e análises apresentados no capítulo 4, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- A associação de meios alcalinos e altas temperaturas mostrou ser influente na resistência a compressão de concretos fabricados com agregados contendo sulfeto. Esta resistência não variou significativamente em corpos-de-prova mantidos em câmara úmida, com valores próximos a 40 MPa, conforme esperado. No entanto, os concretos submetidos à solução de hidróxido de cálcio apresentaram aumentos de resistência sendo este ganho ainda maior na temperatura de 40°C. Os corpos de prova mantidos na solução a 40°C chegaram a valores médios de 52 MPa de resistência e as amostras expostas ao hidróxido de cálcio e a temperatura ambiente alcançaram aproximadamente 48 MPa.
- O ambiente de exposição mostrou-se propício para o aumento do teor de enxofre em concretos. A imersão na solução de hidróxido de cálcio proporcionou um acréscimo de 4% no teor de enxofre total para um mesmo período de exposição. A realização de ensaios durante um período maior de tempo de exposição poderá explicitar mais este efeito.
- O tamanho dos agregados de xisto-sulfetado utilizados na composição das misturas também influenciou os resultados. Nas argamassas houve aporte de enxofre total de aproximadamente 16,5% em relação ao valor teórico e formação de acículas de etringita, mas sem expansão significativa. Nos concretos, nos quais foram utilizados agregados maiores, não houve acréscimo no teor de enxofre total e nem surgimento de bastões de etringita; porém ocorreram valores de expansão três vezes maiores que o limite preconizado pela especificação E 251 (1985) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal.
- A temperatura da solução de hidróxido de cálcio foi também um fator influente nos resultados. Observou-se nos concretos, mantidos nesta solução a 40°C, um aumento da resistência à compressão e da deformação de expansão em relação

às amostras mantidas na temperatura ambiente. Nas argamassas ocorreu o mesmo com respeito às deformações de expansão.

- O sulfeto, em temperatura mais elevada, foi mais reativo no que diz respeito à expansão; porém esta expansão não pode ser relacionada apenas à formação dos sulfoaluminatos. O concreto, fabricado com o agregado xisto-sulfetado e mantido a 40°C, apresentou a maior expansão; porém a determinação química do teor de enxofre total e a microscopia eletrônica de varredura não revelaram formação de etringita.
- Os resultados da microestrutura das argamassas contendo agregado de xisto-sulfetado revelam um aporte, da ordem de 16,5%, no teor de enxofre total em relação ao valor teórico calculado. As micrografias por sua vez mostram uma quantidade expressiva acículas de etringita. As deformações de expansão nas barras, porém, não revelaram valores significantes ($< 5 \times 10^{-4}$). Existe, portanto, uma discrepância entre estes resultados. Um fator que pode explicar esta discrepância é o elevado valor da relação água/cimento (igual a 1) utilizado na composição das argamassas.
- No caso do concreto, os resultados do ensaio de expansão revelaram valores significativos quando da exposição em solução de hidróxido de cálcio mantida na temperatura de 40° C. A análise da microestrutura, por outro lado, não revelou aumento no teor de enxofre total e nem a presença de acículas de etringita. As micrografias mostram microfissuração da matriz sugerindo a existência de algum processo expansivo o qual poderia explicar os valores de deformação de expansão medidos.

5.3 – Sugestões para estudos futuros

Para pesquisas futuras que sigam a mesma linha, sugere-se primeiramente a utilização de composições similares (fator a/c, relação cimento:agregados) para argamassas e concretos, além de estudos comparativos entre concretos com diferentes diâmetros de agregados. A realização de ensaios mecânicos e de métodos de avaliação da

microestrutura em datas coincidentes e após um período de tempo de exposição maior também são fatores a serem considerados.

A realização de métodos de difração de raios x, ao longo do período de exposição, associados à determinação do teor de enxofre total e às micrografias com EDS se apresenta como uma metodologia promissora na avaliação da formação dos neoprodutos.

Referências Bibliográficas

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, Canales y Puertos, Almagro, Madrid, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR NM 26: Agregado – Amostragem”, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório”, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água”, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem”, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR-NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente”, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica”, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR 5737 – Cimentos Portland resistentes a sulfatos - Especificação”, Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR 7211: Agregado para concreto – Especificação”, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR 7222: Concreto – Ensaio de compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR 7251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária”, Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR 9775: Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman”, Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “NBR 9939: Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo”, Rio de Janeiro, 1987.

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. Physical-chemical modeling of sulphate attack”, Cement and Concrete Research, v.27, n.11, 1997.

CASANOVA, I.; LÓPEZ, C.M.; AGUADO, A.; AGULLÓ, L., “Micro and mesoscale modeling of expansion in concrete dams”, In: Proceedings of Internacional Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety, Barcelona, 1998.

CEMIG GERAÇÃO e TRANSMISSÃO S.A., “UHE Irapé - P&D 122 - Investigação do comportamento do concreto e da calda de cimento em contato com rocha sulfetada” Relatório Final, Belo Horizonte, junho de 2007.

CHINCHÓN, J. S., LOPEZ, A., SORIANO, J., VAZQUEZ, E., “La cantera de Mont Palau II Formación de compuestos expansivos generados en la reacción árido-hormigón”, Ingeniería Civil (72), 1995.

CORREA, M.F. “Sistema de recuperação do maciço da barragem do rio Descoberto”, Monografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

COUTINHO, A.S. “Fabrico e propriedades do betão – volume II”, 3º edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

COUTINHO, A.S., GONÇALVES, A., “Fabrico e propriedades do betão – volume I”, 2º edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1988.

DAL MOLIN, D.C., “Técnicas experimentais para estudo da microestrutura”. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. cap. 14, p.403-436.

HASPARYK, N.C., 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., 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, 2005.

KESTENBACH, H.J., BOTTA FILHO, W.J., “Microscopia eletrônica transmissão e varredura”. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1994. 104 p.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC), “Especificação E 251: Inertes para argamassas e betões – Ensaio de reatividade com os sulfatos em presença de hidróxido de cálcio”, Lisboa, Portugal 1985.

MAGALHÃES, A. G., “Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., “Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais”, Ed. PINI, 1994.

NEVILLE, A.M., “Propriedades do Concreto”, Ed. PINI, 1997.

PADILHA, A.F., AMBROZIO FILHO, F., “Técnicas de Análise Microestrutural”. São Paulo: Hemus Livraria, Distribuidora e Editora, 2004. 190 p.

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”, Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

RIBAS SILVA, M. “Técnicas de observação e análise”. Brasília: UNB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 1996. 22 p. (Notas de Aula)

RUSSEL, J.B. “Química Geral”, Ed. Makron Books, 1994.

SIGNINI, R., HASPARYK, N.P., SILVA, H.H.A.B., SANTOS, M.C., LOPES, A.D., BRITO, A.A., COSTA, A.J., ANDRADE, M.A.S., “Métodos alternativos para

determinação de sulfetos em agregados para uso em concreto”, Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória, Espírito Santo, 2003.

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, 2007.

SKOOG, D.A., HOLLER, F.J., NIEMAN, T.A., “Princípios de Análise Instrumental”, 5ª Edição – Trad. Caracelli, I., Isolani, P.C., Santos, R.H.A., Francisco, R.H.P. – Porto Alegre: Bookman, 2002.

Anexo A

Laudo do laboratório de análise da COPASA.



SICQA - Sistema de Controle de Qualidade de Água
 Histórico da Qualidade de Água - Resumo de ETA

Localidade: 3144-80 NOVA LIMA

Ponto de Coleta: ETA-Rio das Velhas -
 Local de Coleta: Calha Parshall de Saída

Período: 01/01/2009 a 14/01/2010

Parâmetros	FeTot / mg/L Fe	Sulfa / mg/L					
Média	0,06937	18,19163					
Máximo	0,6200	30,60					
Mínimo	<0,0390	7,01					
Desvio Padrão	0,08220	8,84041					
Total Negativo	120	16					
Total Positivo	3	0					
Positivo Qualitativo	---	---					
Total de Amostras	123	16					
% FDP	2,43902	0,00000					

Final de Relatório

.: A linha "Positivo Qualitativo" representa a quantidade de resultados positivos que são qualitativos (presença/ausência - P/A).
 Para os valores de Coliformes Totais e Escherichia Coli não foram consideradas as amostras extras (recoletas).

QA934

Visto por:

Daniel Adolpho Cerguei
 Mat.: 5347-1

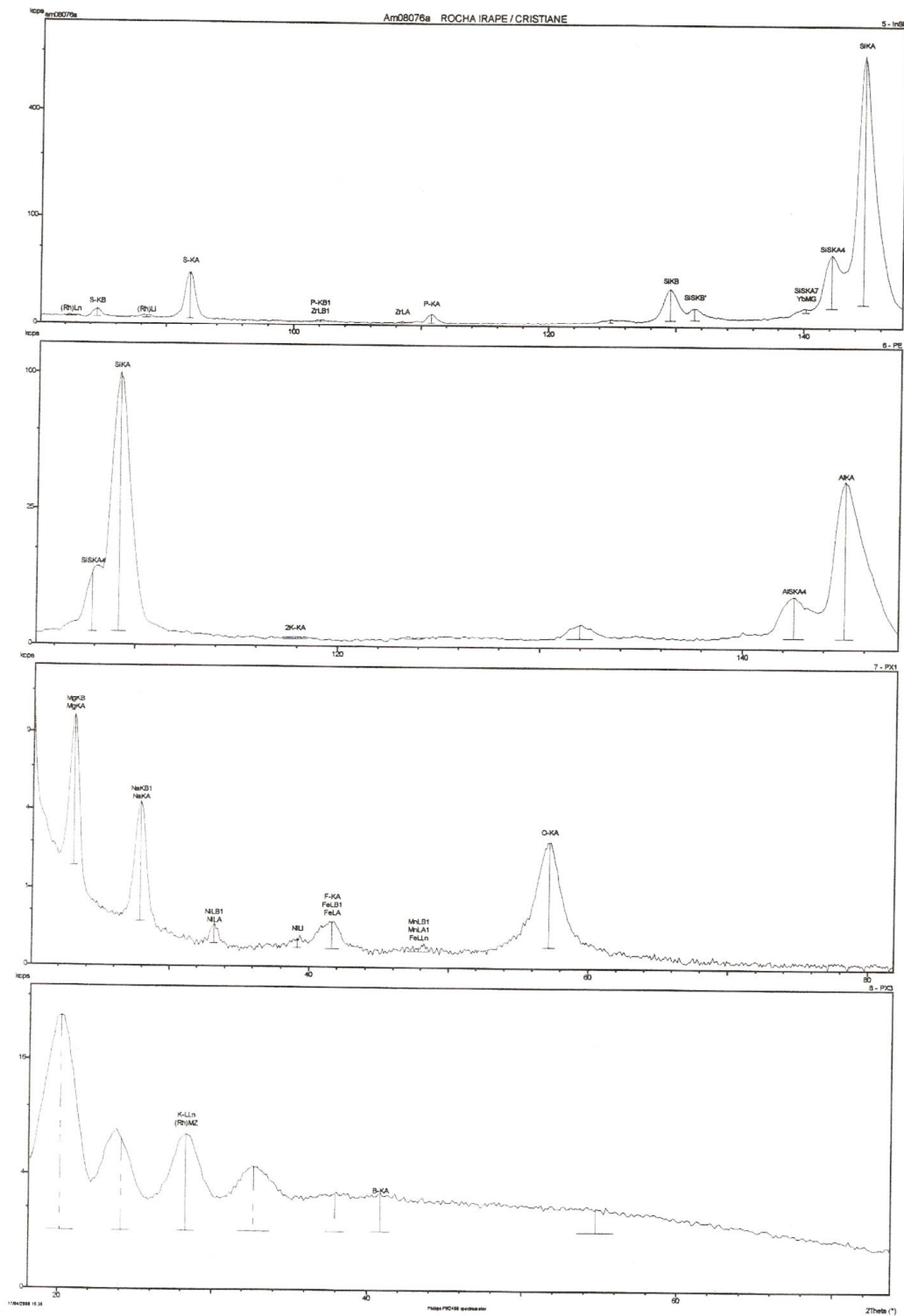
Aprovado por:

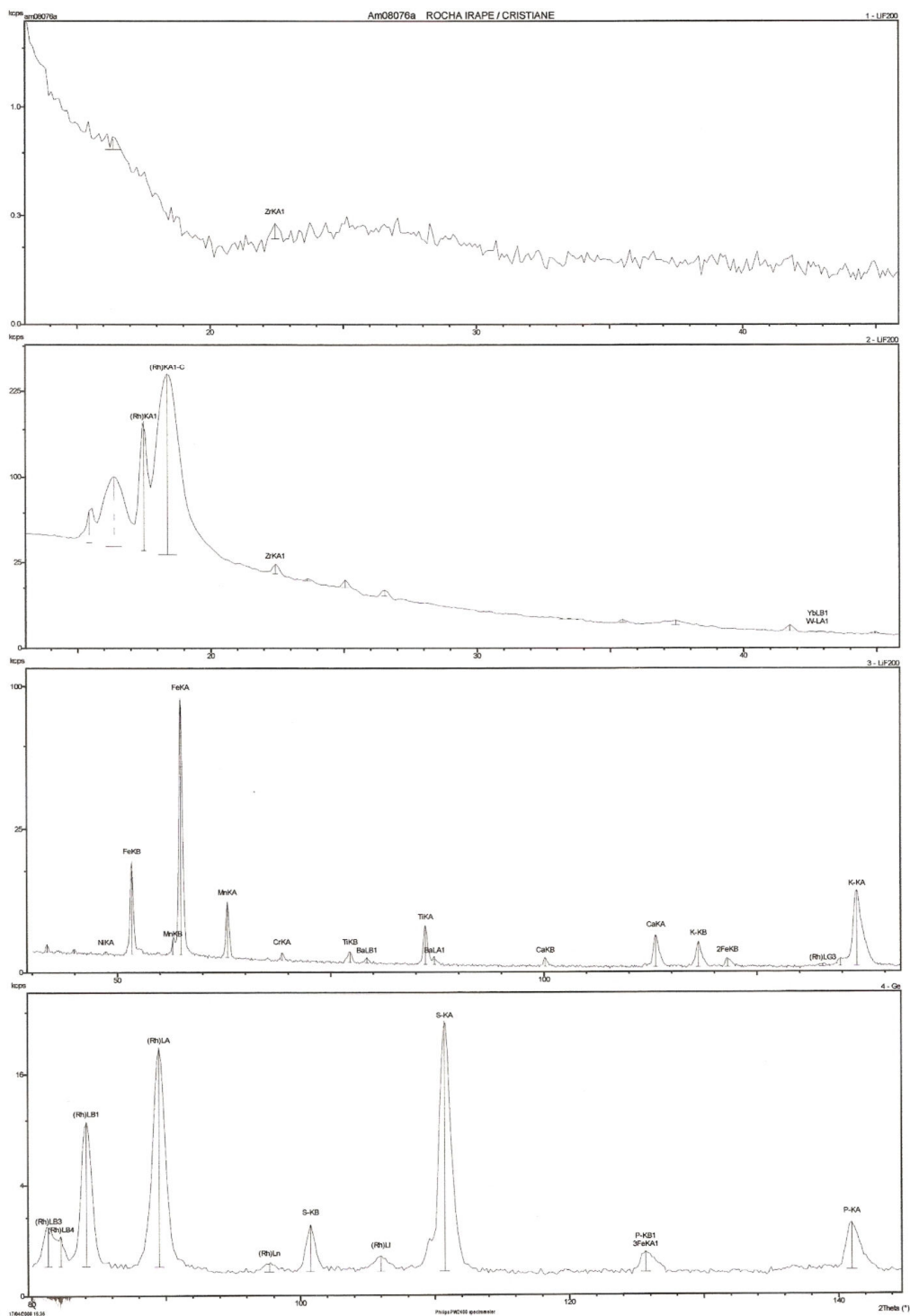
Daniel Adolpho Cerguei
 Mat.: 5347-1

Emissão: 14/01/2010 10:16:16 Página: 1

Anexo B

Resultado da fluorescência de raios X do agregado de Irapé.





Alto: Si, O
 Medio: Al, Fe
 Baixo: S, K, Mg, Na, Mn
 Traco: Ni, Zn, Ba, Ti, Ca, P, Ba

Anexo C

Resultado da difração de raios X do agregado de Irapé.

