

MARIA RAQUEL DE ANDRADE SANTI

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA EM BARRAGEM DE
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)**

**CURITIBA
2008**

MARIA RAQUEL DE ANDRADE SANTI

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA EM BARRAGEM DE
CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós
Graduação em Construção Civil , Área de
Concentração - Materiais – Departamento de
Construção Civil, Setor de tecnologia,
Universidade Federal do Paraná, como parte
das exigências para a obtenção do título de
Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella.

**CURITIBA
2008**

Aos meus três grandes
amores que me ensinaram a
sempre seguir em frente e
não desistir, Luciano, Pedro
e Felipe.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela vida, pelo incentivo e amor incondicional.

Ao Professor Kleber pelo incentivo, amizade, paciência, dedicação e por ter me aceito como orientada, ajudando e estimulando a conclusão da dissertação.

Ao Professor Cerri por ter me mostrado o caminho da pesquisa e ajudando a dar os primeiros passos.

Aos PPGCC por ter me aceito no programa e aos colegas pelo incentivo e apoio.

Ao LACTEC pelas análises e acompanhamento do desenvolvimento dos trabalhos. Ao Alex e Galvão pelo apoio nas coletas.

À COPEL pela disponibilidade do trabalho e oportunidade. Ao Marcos e Gilvan que me acompanharam em várias jornadas. Aos colegas Dequech e Marco Aurélio pelo apoio na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVO.....	2
1.3 HIPÓTESE	2
1.4 JUSTIFICATIVA	2
1.4.1 Manutenção do parque gerador.....	3
1.4.2 Pesquisa e Desenvolvimento.....	4
1.5 DEFINIÇÃO DO MÉTODO.....	4
1.6 LIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	5
1.7 PROTOCOLO	6
1.8 ESTRATÉGIA DE ANÁLISE.....	6
1.9 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 CONCRETO.....	8
2.2 CONCRETO-MASSA	9
2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO – CCR.....	9
2.4 CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS	11
2.4.1 Resistência	12
2.4.2 Estabilidade dimensional	12
2.4.3 Durabilidade.....	13
2.4.4 Permeabilidade.....	14
2.4.5 Deterioração do concreto.....	16
2.5 CIMENTO PORTLAND	20

2.5.1	Hidratação do cimento	22
2.6	AGREGADOS	26
2.7	ÁGUA DE AMASSAMENTO	27
2.8	ADIÇÕES E ADITIVOS	28
2.9	BARRAGENS.....	28
2.9.1	Barragem Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ)	31
2.9.2	Características técnicas de construção	35
2.9.3	Traços médios de concreto utilizados na UHE DRJ	40
2.10	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NAS ÁGUAS PERCOLADAS	46
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1	HISTÓRICO DAS COLETAS DE ÁGUA E TÉCNICAS DE ANÁLISE	49
3.2	METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA	50
3.3	CAMPANHAS DE COLETA	54
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
4.1	VAZÕES NOS PONTOS DE COLETA.....	56
4.2	CONCENTRAÇÃO IÔNICA MÉDIA e pH NAS ÁGUAS DO RESERVATÓRIO E PERCOLADA	57
4.3	CONDUTIVIDADE.....	60
4.4	DUREZA.....	61
4.5	ALCALINIDADE À FENOLFTALEINA E ALCALINIDADE TOTAL	62
4.6	CONCENTRAÇÃO IÔNICA.....	64
4.7	SÓLIDOS TOTAIS, SUSPENSOS E DISSOLVIDOS.....	74
4.8	PERDA DE MASSA ESTIMADA NOS DRENOS, MEDIDORES DE VAZÃO E FISSURAS ANALISADAS NO PERÍODO DE DOIS ANOS NA UHE DRJ.....	76
5.	CONCLUSÃO.....	81
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
7.	TRABALHOS FUTUROS RECOMENDADOS	85
8.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TIPOS DE REAÇÕES QUÍMICAS RESPONSÁVEIS PELA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO.....	25
FIGURA 2 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE DRJ.....	32
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO.....	32
FIGURA 4 - VISTA GERAL DA UHE DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO.....	34
FIGURA 5 - PLANTA DA UHE DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO	34
FIGURA 6 - VISTA LATERAL ESQUEMÁTICA DA UHE DRJ.....	35
FIGURA 7 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM.....	36
FIGURA 8 – VOLUMES CONCRETADOS NA BARRAGEM.....	38
FIGURA 9 – PONTOS DE COLETA DE ÁGUA NA BARRAGEM DA UHE DRJ – MARGEM DIREITA – SEÇÃO LONGITUDINAL – VISTA DE JUSANTE	52
FIGURA 10 – PONTOS DE COLETA DE ÁGUA NA BARRAGEM DA UHE DRJ – MARGEM ESQUERDA – SEÇÃO LONGITUDINAL – VISTA DE JUSANTE	53
FIGURA 11 – GRÁFICO COM AS VAZÕES POR BLOCOS PROVENIENTES DE DRENOS E FISSURAS.....	57
FIGURA 12 – ANÁLISE DO PH DO RESERVATÓRIO NOS PONTOS DENOMINADOS SUPERFÍCIE, 20 E 40 m DE PROFUNDIDADE	59
FIGURA 13 – ANÁLISE DO PH DA ÁGUA PERCOLADA NA BARRAGEM EM FUNÇÃO DOS PONTOS DE COLETA.....	60
FIGURA 14 – CONDUTIVIDADE IÔNICA DA ÁGUA ANALISADA NA UHE DRJ.....	61
FIGURA 15 – DUREZA DAS ÁGUAS ANALISADAS NA UHE DRJ, CORRESPONDENTES AOS PONTOS DE PERCOLAÇÃO E DO RESERVATÓRIO	62

FIGURA 16 – ALCALINIDADE À FENOLFTALEÍNA MEDIDA NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	63
FIGURA 17 – ALCALINIDADE TOTAL MEDIDA NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ.....	63
FIGURA 18 – CÁLCIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	65
FIGURA 19 – MAGNÉSIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	67
FIGURA 20 – SÓDIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	68
FIGURA 21 – POTÁSSIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	68
FIGURA 22 - FERRO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	69
FIGURA 23 – SILÍCIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	69
FIGURA 24 – ALUMÍNIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	70
FIGURA 25 – FLUORETO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	70
FIGURA 26 – CLORETO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	71
FIGURA 27 – NITRATO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	71
FIGURA 28 – NITRITO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	72
FIGURA 29 – SULFATO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	72
FIGURA 30 – BROMETO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	73

FIGURA 31 – FOSFATO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	73
FIGURA 32 – SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	74
FIGURA 33 – SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	75
FIGURA 34 – SÓLIDOS TOTAIS MEDIDOS NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	75
FIGURA 35 – PERDA DE MASSA MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	78
FIGURA 36 – TOTAIS DE ÍONS LIXIVIADOS MEDIDOS NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS COMPOSTOS DO CIMENTO PORTLAND.....	21
TABELA 2 – SIGLAS USUAIS DOS COMPONENTES QUÍMICOS DO CIMENTO.....	21
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA UHE DRJ	37
TABELA 4 - VOLUME DE CONCRETO CCR E CCV ENTRE A FACE DE MONTANTE E A CORTINA DE DRENAGEM DAS GALERIAS	39
TABELA 5 – QUANTIDADE DE MATERIAL UTILIZADO NO TRATAMENTO DA FISSURA NO BLOCO 19.....	39
TABELA 6 – RESUMO DOS TRATAMENTOS REALIZADOS NA FACE DE MONTANTE	40
TABELA 7 - QUANTIDADE DE MATERIAL PELOS TRAÇOS MÉDIOS DO CCR DA BARRAGEM.....	41
TABELA 8 - QUANTIDADE DE MATERIAL PELOS TRAÇOS MÉDIOS DO CCV DA BARRAGEM	42
TABELA 9 - QUANTIDADE DE MATERIAL POR TRAÇO DE CCR + CCV ENTRE A FACE DE MONTANTE E A CORTINA DE DRENAGEM DAS GALERIAS	42
TABELA 10 –TEOR QUÍMICO MÉDIO DO CIMENTO CP IV UTILIZADO NA UHE DRJ.....	43
TABELA 11 –COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DOS BASALTOS	44
TABELA 12 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS FINOS – AREIA, POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	45
TABELA 13 –CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS QUANTO A DUREZA.....	47
TABELA 14 –PONTOS DE COLETA DE ÁGUA NA BARRAGEM DA UHE DRJ	54
TABELA 15 –DATAS DAS CAMPANHAS DE COLETA 2007/2008	55

TABELA 16 –PROPORÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS PONTOS NA VAZÃO TOTAL DA BARRAGEM EM PORCENTAGEM.....	56
TABELA 17 –RESULTADO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO – VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO.....	58
TABELA 18 –MÉDIA INDIVIDUAL DOS RESULTADOS DO pH DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO NOS TRÊS PONTOS ANALISADOS	58
TABELA 19 –VALORES DE PERDA DE MASSA PELA ÁGUA PERCOLADA NA ESTRUTURA DE CONCRETO DA UHE DRJ, ENTRE 2007 E 2008.....	77
TABELA 20 –PERDA DE MASSA NA ÁGUA PERCOLADA NA BARRAGEM DA UHE DRJ.....	79
TABELA 21 –TEOR DE MASSA PERCOLADA NO PERÍODO POR COMPONENTE QUÍMICO ANALISADO NA ÁGUA PERCOLADA.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	- Espectrometria de Absorção Atômica
a/c	- água/cimento ASTM
ACI	- American Concrete Institute
ANNEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	- American Society for Testing and Materials
BIG	- Banco de Informação de Geração
CCR	- Concreto Compactado com Rolo
CCV	- Concreto Convencional
CI	- Cromatografia de Íons
DRX	- difratometria de raios X
EDS	- sistema de energia e dispersivas
MV	- Medidor de vazão
UHE DRJ	- Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão
UHE GNB	- Usina Hidrelétrica Governador Ney Aminthas de Barros Braga
PCH	- Pequena Central Hidrelétrica
PZ	- Piezômetro
MS	- Marcos superficiais
DRC	- Drenos de cortina
DF	- Drenos de fundação
MV	- Medidores de vazão
TE –	- Termômetro de concreto

RESUMO

A necessidade energética do país vem aumentando com o crescimento econômico e, conseqüentemente, o número de novas unidades geradoras vem crescendo para atender a demanda. O Brasil é um país rico em recursos hídricos, sendo a geração hidrelétrica a mais utilizada. A tecnologia atual de construção de novas barragens é a de concreto compactado com rolo por ser um processo rápido e relativamente econômico frente a outros materiais. Manter estas estruturas em bom estado, garantindo uma vida útil mais longa é o objetivo de profissionais de projeto, construção e manutenção civil. Ataques químicos são as principais causas de degradação das estruturas de concreto, sendo a lixiviação por percolação ou fluxo de água a responsável por danos em barragens com evidente perda de massa. Neste contexto, a presente dissertação visa o estudo dos meios de degradação de uma barragem de concreto compactado com rolo, considerando os materiais constituintes, sob o ponto de vista da perda de massa. O objeto do estudo é a barragem da Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão, UHE DRJ, situada a 5 km a montante da foz, entre os municípios de Reserva do Iguaçu e Foz do Jordão, no estado do Paraná. A barragem, construída em concreto compactado com rolo, está há mais de 10 anos em operação. A técnica de avaliação consiste em coletar amostras de água do reservatório bem como em vários pontos no interior da barragem (medidores de vazão, drenos de cortina, junta e fundação). A água coletada foi analisada nos parâmetros de dureza, sólidos (totais, dissolvidos e suspensos), metais (ferro, alumínio e silício), cátions (cálcio, magnésio, sódio e potássio), ânions (fluoretos, cloretos, nitratos, nitritos, sulfatos, brometos e fosfatos) e demais propriedades físico-químicas (pH, condutividade, alcalinidade à fenolftaleína, alcalinidade total e turbidez). Como resultado pode-se observar que os cátions que mais contribuíram para o processo de perda de massa foram os íons sódio e potássio mostrando que podem ser provenientes da dissolução dos agregados artificiais utilizados, os plagioclásios, seguidos de outros componentes da pasta, tais como os íons silício, cálcio, magnésio, alumínio e ferro. Os íons sulfatos foram encontrados em maior concentração pela análise dos ânions, podendo ser resultante dos agregados artificiais contidos na estrutura ou da fase gipsita e de outros sulfatos adicionados ao cimento. O uso desta técnica mostrou ser um bom indicador para a análise da perda de massa em estruturas de barragens submetidas à infiltração de água.

Palavras-chaves: Barragem. Concreto Compactado com Rolo. Perda de Massa.

ABSTRACT

The energetic demand of the country has been increasing in view of its economical growth, therefore new power generating units have been under construction so as to fulfill its energy needs. Brazil is a country rich in hydraulic resources and thereof has hydraulic plants as the main source of electric power generation. The most recent technology applied in the construction of new dams has been the roller compacted concrete for being a speedy process and relatively economical amongst other types of material. Maintaining the structures of this type in adequate conditions along with an extended life span is the objective of professionals related to the project, construction and civil maintenance. Chemical attack is the main degrading cause on concrete structures, being the leaching by percolation or water flow the agent responsible for damages on dams bringing about evident mass losses. Within this context, the present dissertation focuses on the study of the degrading means upon roller compacted concrete dams, taking into account the composing materials, under the viewpoint of mass loss. The object of this study is the dam of Usina Hidreletrica Derivacao do Rio Jordao, UHE DRJ, (Rio do Jordao Diversion Hydro-Power Plant), located 5km upstream the mouth, between the municipalities of Reserva do Iguacu and Foz do Jordao, in the State of Paraná. The dam was roller compacted built and has been in operation for over 10 years. The evaluation technique consists in collecting samples of the reservoir water as well as from the inside of the dam (flow meters, curtain drains, joints and foundation). The collected water is analyzed on the parameters of hardness, solids (dissolved and suspended totals), metals (iron, aluminum and silicon), cations (calcium, magnesium, sodium and potassium), anions (fluoride, chloride, nitrate, nitrite, sulfate, bromide and phosphate), and other physical-chemical properties (pH, conductivity, alkalinity to phenolphthalein, alkalinity total and turbidity). As a result, it can be noted that cations that mostly contributed for the mass loss process were the sodium and potassium ions, indicating that that it might be originated from the dissolution of artificial aggregates used, the plagioclase, followed by other elements of the compound such as the ions of silicon, calcium, magnesium, aluminum, and iron. The ionic sulfates were found in greater concentrations by the analysis of anions, which might have derived from the artificial aggregates in the structure or from the gypsum phase and other sulfates added into the cement. The application of this technique has shown to be a good indicator for analyzing mass losses in dam structures subjected to water infiltration.

Key words: Dam. Roller Compacted Concrete. Mass Loss.

1. INTRODUÇÃO

Manter as barragens de usinas hidrelétricas em bom estado, garantindo sua integridade e aumentando a sua vida útil é essencial para a continuidade da sua principal função, gerar energia elétrica.

Atualmente, muitas barragens estão sendo construídas de concreto compactado com rolo (CCR), motivadas pela rapidez do método construtivo, pelo baixo consumo de cimento, entre outros fatores. A possibilidade de construção deste tipo de barragem depende se as condições geológicas, hidrológicas, técnicas e econômicas locais são favoráveis.

O corpo de uma barragem de uma usina hidrelétrica está na maior parte do tempo em contato direto com a água do reservatório. Estas águas podem conter vários componentes agressivos ao concreto, tais como os resíduos provenientes de indústrias instaladas às margens do reservatório, defensivos agrícolas de plantações e matéria-orgânica proveniente da decomposição da vegetação existente no local antes do enchimento do reservatório e, também, da própria água do manancial.

Uma barragem de concreto, em muitos casos, é constituída de materiais abundantes e de fácil aquisição no local de construção, utilizando algumas matérias primas, como as britas, das escavações para implantação da obra. São necessárias várias análises prévias destes materiais quanto a sua composição química e física e sua interação com o próprio agente aglomerante ou cimento. Uma análise de seu desempenho em longo prazo se faz necessária para a manutenção das características de projeto da estrutura.

O tema da dissertação foi escolhido baseado na busca do conhecimento do comportamento dos materiais componentes de uma barragem de CCR ao longo de seus anos de operação. Buscou-se, com isto, identificar outros meios de se parametrizar e listar as patologias existentes de forma a prevenir situações similares em novos empreendimentos que possam interferir na sua segurança e durabilidade.

1.1 PROBLEMA

Garantir uma maior vida útil às barragens em CCR, com face de montante de concreto convencional (CCV), considerando os materiais utilizados em sua construção, estando inseridos em ambientes naturais a agressivos sob o ponto de vista da perda de massa.

1.2 OBJETIVO

Verificar quais os fatores físico-químicos que podem levar à degradação do concreto de barragens do tipo CCR, baseado nos cálculos de perda de massa em solução, considerando os materiais utilizados na sua construção e a interação entre estes e o meio agressivo, principalmente, sob umidade constante, percolação de água e temperatura, na qual muitas reações são intensificadas.

1.3 HIPÓTESE

Verificar quais são os meios de degradação de uma barragem de CCR, considerando os seus materiais constituintes.

Investigar a interação entre os materiais (aglomerante e agregados) em CCR sob ação constante de umidade e após 10 anos de operação.

1.4 JUSTIFICATIVA

A durabilidade e a segurança estrutural das barragens a gravidade são, também, influenciadas pela hidrólise dos componentes do concreto. Esta, pode ser monitorada pela medida da perda de massa na água percolada pelo seu interior ao longo do tempo de sua operação. Diversos são os fatores, causas e conseqüências desta patologia e, por isso, a

necessidade de se investigar, além da fonte de degradação, a quantidade e o tipo de material extraído pelo risco potencial de efeitos deletérios na sua estabilidade.

1.4.1 Manutenção do parque gerador

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANNEE, 2007) em seu Banco de Informação de Geração (BIG) o Brasil possui no total 1.662 empreendimentos em operação entre pequenas, médias e grandes usinas hidrelétricas, termoelétricas, termonucleares e centrais geradoras eólicas e solar, gerando um total de 100.112.439 kW de potência. Deste total, 658 são referentes a usinas hidrelétricas representando uma capacidade instalada de 70,90% do total da geração. Para os próximos anos, haverá um aumento na capacidade de geração do País, proveniente dos 112 empreendimentos atualmente em construção e mais 493 outorgadas. Isto representará um aumento de 27,6% em relação à capacidade de geração instalada até o fim de 2007, ano de referência dos estudos.

O aumento do uso de CCR para a construção de novas barragens é visível devido à rapidez de sua execução propiciada pela evolução das técnicas de dosagem, transporte, adensamento e cura, bem como dos equipamentos utilizados para este fim. Seu custo final pode ser diminuído, também, em função da disponibilidade de materiais quando comparado com barragens similares construídas em concreto convencional (CCV). Outro fator determinante para esta difusão do uso do CCR é o número de pesquisas desenvolvidas quanto à fabricação e ao comportamento das barragens antes, durante e depois de sua construção. Estas informações puderam ser comprovadas pela realização em setembro de 2008 do Simpósio Internacional sobre Concreto Compactado com Rolo em Salvador, no Brasil, e do 5º Simpósio Internacional de Barragens em Concreto Compactado com Rolo em novembro de 2007 na China em comemoração aos 30 anos de uso deste material na construção de barragens, com muitos trabalhos de pesquisa publicados.

Em 1986, na Paraíba, com a construção da barragem de Saco de Nova Olinda e, em 1990, no Paraná, com a construção da Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ), deu-se início ao uso do CCR no Brasil, consolidando tal tecnologia. Estima-se que mais de 70 barragens em CCR já possuem mais de 10 anos e podem apresentar o mesmo comportamento que a barragem da UHE DRJ, caso que é estudado neste trabalho. As patologias identificadas nesta barragem podem ser fatores de estudo para a prevenção em barragens em construção e em projeto melhorando a qualidade das estruturas.

1.4.2 Pesquisa e Desenvolvimento

Conforme o Banco Mundial, quase metade das diferenças entre os países, quanto à renda *per capita* e ao crescimento, está associada com o progresso tecnológico. A geração de renda e o conseqüente progresso estão vinculados ao gasto em pesquisa e desenvolvimento. De acordo com levantamentos feitos no mundo inteiro, um dos parâmetros de desenvolvimento de um país é a quantidade de patente e de pesquisa científica produzida.

Faz parte do projeto a divulgação do trabalho científico e tecnológico em fóruns e periódicos especializados, nacionais e internacionais, como o Congresso Brasileiro do Concreto, Congresso Brasileiro de Grandes Barragens, Congresso Internacional de Grandes Barragens e Conferência Internacional do “American Concrete Institute – ACI”.

1.5 DEFINIÇÃO DO MÉTODO

Yin (2005) define como ponto base para o desenvolvimento de uma pesquisa a escolha da estratégia de pesquisa. O autor caracteriza várias estratégias para a pesquisa, sendo elas: o experimento, o levantamento (*survey*), a análise de arquivos, a pesquisa histórica e o estudo de casos. Para se definir esta estratégia, três condições devem ser analisadas: o tipo

de questão de pesquisa proposta, o controle que o pesquisador tem sobre os eventos e no grau de enfoque em acontecimentos contemporâneos e históricos. A “*survey*” é adotada quando muitas questões precisam se respondidas e não se podem controlar os eventos comportamentais. O estudo de caso é a estratégia escolhida quando se examinam acontecimentos contemporâneos, não podendo manipular comportamentos relevantes. São utilizadas duas ou mais fontes de evidências e é necessário responder a questões do tipo como e por que analisando o fenômeno estudado. No experimento, o pesquisador pode manipular as variáveis, por ser desenvolvido dentro de laboratório, assim como as variáveis.

Na presente pesquisa o estudo de caso é o indicado, pois não requer controle e manipulação das variáveis (ROBSON, 1993).

Como critério para a seleção de estudo de caso, foi escolhida a barragem de CCR de UHE DRJ, por ser de fácil acesso, pelo método construtivo, os materiais utilizados, o tempo de construção, os seus dados históricos (banco de informações) e pela existência de um sistema complementar de monitoramento estruturado. A barragem não apresenta nenhuma sinalização de comprometimento de sua segurança e vida útil.

1.6 LIMITAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo de caso, objeto desta pesquisa, visa exclusivamente verificar por intermédio de análises físico-químicas de amostras coletadas de pontos específicos na barragem, a perda de massa por alguns pontos de percolação pela barragem da UHE DRJ, no período de sua construção até 05/2008. Os pontos analisados foram distribuídos de maneira a garantir um campo amostral significativo. Os ensaios físico-químicos realizados foram pré-selecionados possibilitando ao desenvolvimento do estudo e ao conhecimento das atuais condições da estrutura e estão descritos no subitem ‘Protocolo’.

1.7 PROTOCOLO

Os ensaios físico-químicos executados nas amostras de água, foram implementados a partir de metodologias recomendadas pelo manual da APHA – “Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater” 20th ed, Washington,1988; já, as análises de Al, Si e Fe foram efetuadas por espectrofotometria de absorção atômica com atomização em chama em um equipamento Perkin-Elmer, modelo 4110; e as análises dos íons foram efetuadas por cromatografia iônica de alta eficiência - HPIC em um equipamento CI Dionex modelo 2010 I, estando relacionados na seqüência:

- determinação da dureza total em cálcio e magnésio;
- determinação dos ânions, fluoretos, fosfatos, sulfatos, cloretos, brometos, sulfito, nitratos e nitritos;
- determinação dos cátions, lítio, sódio, potássio, cálcio, magnésio e amônio;
- determinação de alcalinidade total e à fenolftaleína
- determinação de condutividade iônica;
- determinação do pH;
- determinação de turbidez;
- determinação de sólidos totais, dissolvidos e suspensos;
- determinação dos metais (lítio, sódio, cálcio, berílio,magnésio, bário, titânio, vanádio, cromo total, cromo hexavalente, molibdênio, ferro, cobalto, níquel, cobre, prata, ouro, zinco, cádmio, alumínio, silício, estanho, chumbo, antimônio, bismuto, manganês, potássio).

1.8 ESTRATÉGIA DE ANÁLISE

Como estratégia de análise, os resultados foram analisados por

intermédio de ferramentas estatísticas definidas na etapa de planejamento da pesquisa. Em todos os experimentos, estas ferramentas foram úteis para a análise e a comparação dos dados, bem como para a escolha da amostra.

A validade de *constructo* foi feita pelas análises estatísticas dos resultados das amostras.

1.9 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em 05 capítulos a fim de alcançar os objetivos propostos, como descritos a seguir.

O Primeiro Capítulo está composto pela definição da pesquisa e das ferramentas utilizadas para alcançar os resultados e suas limitações.

O Segundo Capítulo contém a revisão bibliográfica com os conceitos dos tipos de desgaste que podem ocorrer em estruturas hidráulicas de concreto de barragens. Na continuidade, há uma descrição dos materiais utilizados e de seus comportamentos neste tipo de estrutura.

No Terceiro Capítulo, estão descritas as características dos materiais utilizados na construção das barragens de CCR em estudo (Derivação do Rio Jordão).

No Quarto Capítulo, estão apresentados os resultados da caracterização físico-química das amostras e a análise dos resultados.

Os últimos capítulos foram reservados às conclusões, considerações finais e recomendação para trabalhos futuros. A referência bibliográfica encontra-se em um capítulo a parte, finalizando a presente dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O contexto deste estudo está apresentado nos subitens seguintes, servindo de base para a investigação do efeito da perda de massa pela estrutura UHE DRJ.

2.1 CONCRETO

Os materiais cimentícios podem ser considerados como os mais importantes de todas as épocas da civilização humana. A sua utilização, desde a antiguidade, proveu segurança (casas), higiene (obras sanitárias), transporte (rodovias), ensino e saúde (escolas), lazer (teatro), religião (templos) e obras públicas (museus) (ISAIA, 2005).

O concreto é consistido de uma mistura de cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, água e aditivos. Possui uma excelente resistência à água em comparação aos outros materiais de construção. Por não apresentar, no seu dia-a-dia, deteriorações sérias, é considerado ideal para a utilização em estruturas destinadas a controlar, estocar e conduzir água, como é o caso de barragens e vertedouros de usinas hidrelétricas (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As propriedades do concreto tais como resistência, módulo de deformação, retração, fluência e durabilidade estão diretamente relacionadas com a estrutura e a microestrutura do material. Macroscopicamente, este é considerado um material bifásico, constituído de partículas de agregado dispersas em uma matriz de cimento homogênea, sendo que, microscopicamente, verifica-se que esta massa de pasta apresenta tanto as áreas densas como os agregados quanto aquelas altamente porosas nas pastas dos CCVs e CCRs. O concreto deve ser analisado sob a existência da zona de transição (região interfacial entre as partículas de agregado e a pasta), a natureza multifásica do agregado e da pasta compostos por

diferentes tipos e quantidades de sólidos, poros e microfissuras e as modificações a que estão sujeitos, devidas, ao tempo, umidade e a temperatura a que estão expostos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.2 CONCRETO-MASSA

Segundo definição do Comitê ACI 116 *apud* Mehta e Monteiro (1994), concreto massa é aquele utilizado em grandes estruturas (viga, pilar, estaca, comporta ou barragem) e, por isso, sua produção requer meios especiais de combater a geração de calor e a mudança de volume que a acompanha.

2.3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO – CCR

O CCR é fabricado a partir de uma metodologia aceita para a construção de barragens e pavimentos, tanto por fatores econômicos quanto construtivos. Obter um adensamento adequado para o tipo e a função da estrutura é essencial para atingir as propriedades desejadas do material endurecido. Este é influenciado pelos materiais utilizados, métodos de mistura e transporte, práticas de descarga e espalhamento, equipamentos e procedimentos de consolidação e espessura das camadas e estrutura, tendo um melhor resultado quando está livre de segregação (ACI, 2000).

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o CCR é um concreto sem abatimento, transportado, lançado e compactado com os mesmos equipamentos de construção que são utilizados para barragens de terra e enrocamento, podendo satisfazer as especificações de projeto de concreto-massa convencional.

As misturas de CCR devem ter, durante a sua execução, uma consistência que permita a utilização de rolos vibratórios para a sua compactação e para comportar todos os equipamentos necessários a sua confecção. A quantidade de pasta utilizada deve proporcionar uma consistência que permita uma distribuição uniforme de toda a massa durante

a mistura, lançamento e adensamento. No estado fresco a pasta deve fornecer uma melhor trabalhabilidade e coesão e no estado endurecido deve proporcionar uma melhor resistência, com redução na sua permeabilidade e aumento da durabilidade (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

A necessidade de tornar competitivas as construções de concreto para barragens de aproveitamentos hidráulicos, fez com que o concreto massa evoluísse para o CCR, visando o aumento de produtividades, em função da velocidade de construção e do baixo consumo de cimento (MARQUES FILHO, 2005).

Para a construção de diques, barragens e outros tipos de estruturas hidráulicas, o CCR ganhou uma melhor aceitação de utilização do que o CCV. Ele pode ser utilizado para todas as aplicações onde haja acesso aos equipamentos utilizados para o seu lançamento, espalhamento e adensamento, manutenção e, também, para que possam trafegar (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

O uso de CCR foi difundido nos anos 80 após as pesquisas de Cannon (1972), Dunstan (1977), Hall e Houghton (1974), além do desenvolvimento do método para a construção de barragens no Japão nos anos 70 (ACI, 2000). O desenvolvimento da tecnologia do CCR vem crescendo desde então, com a aplicação principal na construção de barragens. Este veio a competir diretamente com as tradicionais barragens de concreto-massa convencional, substituindo muitas vezes as barragens de terra e de enrocamento, seja com núcleo impermeável ou com face de concreto (ANDRADE, 1997).

A utilização de materiais com propriedades cimentícias capazes de melhorar o desempenho do CCR vem proporcionando economia e garantia de qualidade das misturas. Conforme indicado por Andrade (1997), as adições utilizadas, assim como, a escória de alto forno moída e a cinza volante, buscam propriedades que:

- apresentem características pozolânicas necessárias ao combate à reação álcali-agregado; e
- completem a composição da mistura de forma a obter a

quantidade de finos que possibilite melhor trabalhabilidade e resultados nas propriedades do concreto endurecido, como a redução da permeabilidade.

As propriedades importantes para o CCV também o são para o CCR, quando utilizados os mesmos materiais, ficando as diferenças aos menores teores de água e de pasta quando empregado o CCR (Oliveira e Salles, 1995). Conforme documento do “Corps of Engineers (2000)” as propriedades do CCR endurecido são similares às do CCV. As diferenças existentes são devidas ao baixo consumo de água no CCR, no momento da sua dosagem, gerando um maior índice de vazios devido à falta de água para formar a pasta. Com o CCR não é possível a confecção de estruturas delgadas como quando utilizado o CCV. Este fato decorre da granulometria dos agregados, da dificuldade no processo de adensamento, do baixo consumo de cimento e do uso de materiais minerais utilizados como adições em alguns projetos (BERRA *et al.*, 2007).

As barragens de gravidade construídas utilizando o CCR representam uma economia significativa sobre o uso do CCV quanto aos materiais, principalmente sobre o consumo de cimento, em complementação às técnicas de construção. O desafio está em tornar as barragens deste tipo seguras, duráveis e com bom desempenho ao longo de toda a sua existência, o que vem acontecendo com a evolução no processo construtivo. Em função da redução no tempo de construção, de 1 a 2 anos, de uma barragem de CCR quando comparado com uma barragem de terra, esta se torna mais econômica com redução também das dimensões da estrutura (CORPS OF ENGINEERS, 1995).

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS

As características desejáveis para o concreto são a resistência, a estabilidade dimensional e a durabilidade. Estas características são influenciadas pelo proporcionamento dos materiais e pelas propriedades da pasta dependendo dos aspectos microestruturais como tipo, quantidade e

distribuição de sólidos e vazios (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

2.4.1 Resistência

A resistência de um material, segundo Mehta e Monteiro (1994), é a capacidade que este tem de resistir à tensão sem ruptura. Esta propriedade é importante para os projetos de estruturas de concreto. As tensões que o concreto pode estar submetido são de compressão, cisalhamento e tração. Nesta pesquisa não foi analisada a resistência do CCR.

Em geral, conforme Mehta e Monteiro (1994), há uma relação fundamental inversa entre a porosidade e a resistência dos materiais sólidos, como mostrado na Equação 1.

$$S = S_0 e^{-kp} \quad (1)$$

Em que: S é a resistência do material a uma dada porosidade p; S₀ é a resistência intrínseca para a porosidade zero; e, K, uma constante. Em CCVs a porosidade presente é proveniente da pasta ou da argamassa de cimento endurecido, da zona de transição entre os agregados e a matriz e dos agregados. Por ser um material de baixo consumo de cimento, o CCR possui uma porosidade diferenciada, fugindo dos padrões adotados para o CCV.

2.4.2 Estabilidade dimensional

Dentre os motivos que levam uma estrutura de concreto à fissuração são as deformações ocorridas em resultado à carga externa e ao meio ambiente sobre o material (MEHTA; MONTEIRO, 1994). As variações volumétricas devido às reações exotérmicas do concreto é outro ponto que pode interferir nos parâmetros de resistência de concretos. É, por intermédio do controle da temperatura de lançamento, do modo de cura, do proporcionamento da dosagem, da limitação da altura das camadas e do

dimensionamento das juntas de contração que se pode fazer o controle das variações volumétricas de origem térmica (MARQUES FILHO, 2005). Estruturas de concreto estão sujeitas às variações volumétricas provenientes da reação dos materiais cimentícios, das condições ambientais, de seu peso próprio, do empuxo de água e dos esforços gerados pela percolação da água, além dos efeitos sísmicos (MARQUES FILHO, 2005).

2.4.3 Durabilidade

A durabilidade do concreto está relacionada com a capacidade do material resistir às ações de intempéries, ataques químicos, abrasão ou a qualquer outro tipo de processo de deterioração. Um concreto é durável quando mantém suas formas originais, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente. Nenhum material é eternamente durável devido à interação ambiental, microestrutura e propriedades que se modificam com o passar do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Para Isaia (2005), um concreto é durável quando num intervalo de tempo o desempenho mínimo ou o desgaste máximo, não for ultrapassado. Um concreto que resista às condições para que foi projetado, sem se deteriorar por muitos anos é considerado durável (NEVILLE, 1982). Um material atingiu o fim de sua vida útil, quando as suas propriedades, deterioraram-se a tal ponto que sua recuperação é considerada como insegura ou antieconômica (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A durabilidade do concreto de cimentos hidráulicos se define como a capacidade de resistir a ações meteorológicas, ataques químicos, abrasão e qualquer outro processo de deterioração. Um concreto durável conserva suas formas, qualidades e uso originais ao estar exposto ao seu ambiente (ACI, 2001).

A durabilidade das estruturas de concreto vem se tornando um dos fatores determinantes nos grandes projetos, como pontes, barragens e outras obras especiais. Em geral, pretende-se prolongar a vida útil destas estruturas de modo que elas possam gerar mais benefícios e, em longo prazo, não

apresentar problemas que comprometam a sua utilização (PINHO *et al.*, 2005). Esta característica é muito ampla, pois envolve critérios que vão desde a capacidade estrutural até o aspecto estético, incluindo as fissuras, eflorescências e manchas, podendo causar algum dano físico ou simplesmente sendo inaceitável pelo mercado consumidor (PINHEIRO, 2003).

O CCR, assim como o CCV, está sujeito à deterioração devido aos efeitos de abrasão e erosão, a ação de gelo e degelo e a outros fatores tais como a expansão de reação álcali-agregados e ataque por sulfatos (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

A durabilidade do CCR depende da resistência, da qualidade, dos materiais cimentícios, agregados e do seu grau de compactação. A resistência do CCR aos efeitos de águas agressivas, de produtos químicos, de gases ou da lixiviação dos constituintes solúveis pela água está relacionado, primeiramente, à permeabilidade do concreto. Para a proteção do corpo da estrutura normalmente é feita uma proteção externa com camada de concreto mais rico em aglomerante, um revestimento em CCV ou o uso de membranas impermeáveis (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

2.4.4 Permeabilidade

Permeabilidade é a propriedade que indica a facilidade com que um fluido, neste caso a água, tem ao passar pela estrutura interna de um determinado corpo. A permeabilidade é uma propriedade importante quando se refere à durabilidade de uma estrutura de concreto. A facilidade com que a água penetra, transportando agentes agressivos ao concreto, ocorre principalmente na região da interface pasta-agregado, sendo que, em concretos com baixo consumo de aglomerante, como o CCR, a interface é delicada (ANDRADE, 1997).

Segundo Andrade (1997), há três métodos pelos quais a água pode percolar pelo concreto ou outros materiais semiporosos:

- sob pressão para forçar o líquido da superfície exposta para a

superfície livre através dos espaços vazios;

- pela difusão através dos poros capilares, devido a diferença de pressão de vapor nas faces opostas do concreto; e
- pela capilaridade e evaporação na superfície livre.

A determinação da permeabilidade consiste em avaliar a passagem de um fluxo de água através do material, sendo conhecidas as suas dimensões e condições. Pode-se determinar o coeficiente de permeabilidade “Kc”, segundo os conceitos da Lei de Darcy, pela Equação 2.

$$K_c = \frac{Q \times L}{A \times H} \quad (2)$$

Em que:

- Kc – coeficiente de permeabilidade do concreto (m/s);
- Q – vazão (m³/s);
- L – comprimento do corpo de prova (m);
- H - altura da coluna de água (m); e,
- A – a área da seção transversal do corpo de prova (m²).

Dados experimentais indicam que a adição de agregados a uma pasta de cimento ou argamassa aumenta consideravelmente a permeabilidade, sendo que, quanto maior o tamanho do agregado maior será o coeficiente de permeabilidade, apesar dos agregados possuírem baixa permeabilidade. Isto acontece devido às microfissuras que estão presentes na zona de transição, entre o agregado e a pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A permeabilidade das estruturas em CCR e das superfícies externas é o ponto chave para estruturas hidráulicas, como as barragens. Esta propriedade é controlada por um melhor proporcionamento dos componentes constituintes, do maior índice de material aglomerante e da argamassa da mistura e pelo grau de compactação do concreto no momento do lançamento. Um concreto com permeabilidade baixa possui, normalmente, uma relação água/cimento (a/c) baixa e um proporcionamento adequado dos constituintes com quantidade de argamassa suficiente para preencher os vazios

produzidos pelo uso de agregados de grandes dimensões. As misturas que utilizam um maior índice de material aglomerante tendem a ter a permeabilidade mais baixa do que os concretos produzidos com baixo consumo, dependendo da curva granulométrica utilizada (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

As junções entre as camadas de CCR devem ser bem executadas para fornecer uma baixa permeabilidade, reduzindo o potencial de danos causados pela água que infiltra no corpo da estrutura. As estruturas de CCR são executadas, geralmente, com elevada relação água/cimento, sendo que os efeitos desta, em longo prazo no corpo de estruturas hidráulicas, no que se refere à durabilidade e aos efeitos nos poros ainda são desconhecidos (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

2.4.5 Deterioração do concreto

Os materiais de construção passam por distintos processos de corrosão e de degradação devido às suas estruturas atômicas e moleculares, suas propriedades físicas, químicas e mecânicas e, em função das condições de fabricação, das cargas de serviço atuantes e das ações ambientais. Estas ações podem causar problemas como descoloramento, escamações e fissurações, até mesmo, a perda parcial ou total das suas propriedades mecânicas (ISAIA, 2007).

Como citado por Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1982), as causas físicas de deterioração do concreto podem ser classificadas em duas categorias: desgaste superficial ou perda de massa (abrasão, erosão e cavitação) e fissuração (gradiente de temperatura e umidade). Da mesma maneira, foram classificadas as causas químicas, separadas em três categorias: hidrólise dos componentes da pasta de cimento, trocas iônicas; e reações de produtos expansivos. Os autores relatam que as duas maneiras de deterioração, física e química, freqüentemente se sobrepõem e que as conseqüências dos efeitos deletérios dos fenômenos químicos são físicos.

O concreto é um material poroso e os fenômenos de deterioração

físico-químicos são, normalmente, associados à ação da água em movimento. A grandeza desse ataque é controlada pelos mecanismos de transporte nos poros do concreto. No caso de ação química a água é o agente de transporte dos íons agressivos (HELENE *et al.*, 2006).

A porosidade é um dos principais fatores para o envelhecimento e deterioração de barragens de concreto conforme diversos pesquisadores e tecnólogos (BATISTA *et al.*, 2003). O concreto é um material dinâmico e extremamente heterogêneo dependendo do ambiente em que está inserido, ocorrendo continuamente uma interação entre os componentes e a água infiltrada nos poros (SAGRADO, 1995 *apud* BATISTA *et al.*, 2003).

A resistência do CCR depende da relação a/c e do grau de compactação de modo que a estrutura fique consolidada. A relação é determinada previamente em laboratório e aplicada no momento da execução, considerando a resistência de projeto e a durabilidade almejada (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

Em geral, estruturas de concreto são muito duradouras, existindo elementos de tempos muito remotos que estão em condições normais de uso. A corrosão do concreto pode estar ligada a apenas um determinado fenômeno como a ação de vários fatores simultaneamente, dependendo dos meios em que estão inseridos, as concentrações de seus ácidos, bases ou sais e das propriedades do próprio concreto. A magnitude da corrosão depende das substâncias agressivas do meio exterior (rochas de contato, condições climatológicas, microbiológicas, etc.) em combinação com a composição mineral, forma de fabricação, tipo de estrutura, idade e de fatores físicos externos como temperatura, velocidade das correntes de água e subpressão (BICZOK, 1968). Por corrosão do concreto entende-se a degradação em função de um agente interno ou externo a este.

Segundo Biczok (1968), a corrosão pode ser física, causada por desgaste mecânico, efeitos de gelo e degelo, e por ações químicas ou físico-químicas. Dentre as reações químicas três tipos de ações podem ser destacadas:

- corrosão por lixiviação por ação extrativa ou por lavagem que

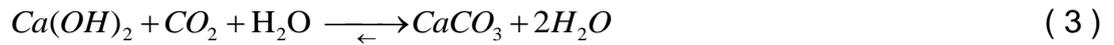
comprometem certos componentes da pasta de cimento;

- corrosão por reação de troca iônica e separação dos componentes solúveis da pasta de cimento endurecida; e,
- corrosão por expansão devido, geralmente, a formação de novos compostos da massa de cimento endurecido.

A corrosão por lixiviação pode ocorrer devido à ação de águas agressivas ou no contato permanente da estrutura com a água infiltrada sob determinada velocidade por dentro do concreto, sendo as estruturas porosas as mais susceptíveis (BICZOK, 1968).

A corrosão causada por águas brandas, com dureza abaixo de 8, consiste, essencialmente, na dissolução e conseguinte lixiviação do Ca(OH)_2 liberado na formação dos produtos de hidratação do cimento (BICZOK, 1968).

Água dura como as águas subterrâneas, lagos e rios que contém em sua composição cloretos, sulfatos e bicarbonatos de cálcio e magnésio não atacam os constituintes da pasta de cimento ao contrário das águas moles (condensação da neblina ou vapor, chuva ou fusão de neve e gelo) que podem conter poucos ou nenhuns íons de cálcio. Estas águas tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio quando em contato com a pasta de cimento Portland até atingirem o equilíbrio químico, quando este processo cessa. O hidróxido de cálcio é o constituinte do cimento Portland mais suscetível à hidrólise quando em contato com água corrente ou infiltração sob pressão, devido a sua solubilidade relativamente alta em água pura. A hidrólise da pasta de cimento continua até que a maior parte do hidróxido de cálcio tenha sido retirado por lixiviação, deixando para trás géis de sílica e alumina com pouca ou nenhuma resistência. A eflorescência é outro dano estético que a lixiviação do hidróxido de cálcio pode causar a superfície de concreto, pois o produto lixiviado interage com o CO_2 presente no ar formando um precipitado branco de carbonato de cálcio na superfície da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 1994), conforme a seguinte reação de eflorescência na superfície do concreto (BICZOK, 1968):



Outros minerais podem alterar a cor desta precipitação. A calcificação é benéfica no fechamento de pontos de infiltração, mas, também, pode obstruir drenos, deixando o piso da galeria no interior da barragem escorregadio e ocasionando mudanças indesejáveis no pH da água. A quantidade de carbonato de cálcio disponível para a reação diminui com o tempo, embora a precipitação em algumas barragens continue por muitos anos.

As estruturas de CCR podem ser menos suscetíveis a precipitação do carbonato de cálcio devido ao baixo consumo de cimento quando comparada com as estruturas em CCV. O uso de materiais pozolânicos retém os componentes solúveis do cimento variando conforme o tipo de cimento utilizado, o tipo de pozolana e as proporções da mistura (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

De modo geral, a grandeza da quantidade de material lixiviado produzida por ação das águas moles depende dos seguintes fatores, segundo Biczok (1968):

- dureza;
- estado de repouso ou movimento;
- quantidade sob pressão;
- temperatura;
- classe do cimento;
- compacidade do concreto;
- estado da superfície do concreto;
- dimensão da estrutura de concreto e idade da mesma.

A agressividade da água aumenta quando ela infiltra por efeito de pressão no concreto. Em determinadas construções, a infiltração através do concreto diminui progressivamente até cessar o processo. Como norma geral,

pode-se considerar que a intensidade das infiltrações não é constante aumentando e diminuindo continuamente. As infiltrações podem ser evitadas ou dificultadas pelo aumento da compacidade do concreto, mediante tratamento superficial e pela impermeabilização.

Conforme comenta Biczok (1968) alguns fatores podem tornar as estruturas de concreto menos suscetíveis a infiltrações. Em estruturas de CCR como a da Usina DRJ, a compacidade está normalmente limitada ao baixo teor de cimento utilizado, à utilização de agregado de grande granulometria e ao uso do rolo vibratório para o adensamento. A impermeabilização da barragem de CCR fica a cargo da parede vertical em CCV, com o uso de maior quantidade de cimento e de tratamentos superficiais realizados antes do enchimento do reservatório. Caso haja o aparecimento de fissuras após a construção e durante a operação, novos tratamentos podem ser necessários.

A lixiviação se produz rapidamente a princípio e logo com velocidade progressivamente menor. À medida que há uma redução da cal hidratada por lixiviação, destroem-se as restantes combinações hidratadas, que só são estáveis numa solução de hidróxido de cálcio e com um pH elevado. A lixiviação do hidróxido de cálcio do concreto endurecido conduz à destruição lenta dos compostos hidratados restantes como os silicatos, aluminatos e ferroaluminatos hidratados. Como conseqüência, o concreto perde sua resistência mecânica devido a um fenômeno químico (BICZOK, 1968).

2.5 CIMENTO PORTLAND

Segundo definição da ASTM C 150 *apud* Mehta e Monteiro (1994) cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem de nódulos de 5 a 25 mm de diâmetros, constituídos essencialmente de silicatos de cálcio hidráulico, usualmente com adição de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio, denominado clínquer.

Para a fabricação do cimento Portland as matérias primas se constituem de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, sendo que estas

substâncias reagem entre si no forno, durante sua fabricação, dando origem a uma série de produtos mais complexos. Quatro compostos gerados são considerados os principais componentes do cimento, conforme a Tabela 1 e na Tabela 2 estão descritos as siglas e os nomes usuais dos principais componentes químicos.

TABELA 1 – PRINCIPAIS COMPOSTOS DO CIMENTO PORTLAND

Compostos	Constituição	Símbolo
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

FONTE: NEVILLE (1981)

TABELA 2 – SIGLAS USUAIS DOS COMPONENTES QUÍMICOS DO CIMENTO

Nome	Fórmula	Símbolo
Óxido de cálcio	CaO	C
Óxido de silício	SiO_2	S
Óxido de alumínio	Al_2O_3	A
Óxido de ferro	Fe_2O_3	F
Água	H_2O	H

FONTE: FREIRE (2005)

Além dos compostos citados na Tabela 1, são gerados outros compostos que representam uma porcentagem reduzida, como o MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O . Dois destes compostos, os óxidos de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O), conhecidos como álcalis, podem reagir com alguns agregados e produzir reações expansivas no concreto. As quantidades efetivas dos compostos variam de cimento para cimento e a partir da dosagem e tipos de materiais empregados.

O uso de pozolanas pode ser benéfico na fabricação do CCR como

um complemento mineral, melhorando o quesito trabalhabilidade do concreto fresco e tempo de pega. O uso de pozolanas contribui para uma baixa geração de calor, necessária em estruturas de concreto-massa como em barragens, podendo ser utilizado como substituto de parte do cimento, reduzindo os custos. Há benefícios também no processo de adensamento, com o aumento da quantidade de finos, reduzindo conseqüentemente a permeabilidade (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

2.5.1 Hidratação do cimento

O cimento Portland é composto de uma mistura heterogênea de vários componentes, como citado anteriormente. Com a adição de água inicia-se o processo de hidratação com reações simultâneas dos compostos anidros. Estes compostos não se hidratam na mesma velocidade, sendo que o aluminato se hidrata mais rapidamente que os silicatos, responsável pela pega (solidificação) e enrijecimento (perda da consistência). Os silicatos determinam o endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência) e apresentam-se em maior quantidade nos cimentos comuns (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Durante a hidratação do cimento Portland, formam-se produtos menos solúveis em água se comparado ao cimento na forma original, havendo a liberação de energia e aumento da resistência mecânica final. É na pasta composta de água e cimento que ocorrem as reações de transformação do cimento Portland em material ligante, sendo que na presença de água os silicatos e aluminatos componentes formam produtos de hidratação que com o decorrer do tempo dão origem à pasta de cimento endurecida, uma massa firme e resistente (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O silicato tricálcico (alita) e o silicato dicálcico (belita) são os componentes responsáveis, durante a hidratação, de fornecer a resistência. O produto gerado, com características de um gel, é conhecido pela sigla C-S-H, sendo a alita a responsável pela resistência inicial em argamassas e concretos e a belita em idades avançadas. Maiores quantidades de C_2S

produzem elementos com maior resistência. Maiores quantidades de C_3S produzem concretos e argamassas menos resistentes à corrosão e degradação. As reações químicas para a formação da alita e belita estão apresentadas esquematicamente na seqüência (NEVILLE, 1981; MEHTA; MONTEIRO, 1994).



formando 61% de CSH e 39% de hidróxido de cálcio;



formando 82% de CSH e 18% de hidróxido de cálcio.

A hidratação do C_3A (aluminato) é imediata e forma hidratos cristalinos como C_3AH_6 , C_4AH_9 e C_2AH_9 , com grande liberação de calor. Tanto os aluminatos cálcicos como os hidratos são produtos muito reativos e com freqüência são a origem da corrosão e degradação do concreto, sendo eles o principal responsável pela retração. Sua presença está ligada à etapa de fabricação do cimento, por estar presente nas argilas e por ser importante para a melhora da plasticidade e para a diminuição da granulometria do cimento.

O ferroaluminato tetracálcico (ferrita), ao contrário de outros componentes, gera pouco calor de hidratação tendo uma pequena tendência à retração. Este componente resiste bem à ação de águas sulfatadas e proporciona um aumento da estabilidade do concreto e das argamassas.

A presença de óxido de magnésio está associada a impurezas dos calcários e sua presença pode causar reações expansivas podendo levar a deterioração ou a imperfeições. Sua presença, por outro lado, amplia a resistência das águas sulfatadas. Os óxidos de cálcio provenientes do mau proporcionamento das matérias primas, moagem e homogeneização inadequada são responsáveis por expansões após a hidratação. Sua presença também está associada à temperatura e ao tempo de permanência

insuficiente na zona de calcinação dos fornos no momento de fabricação do cimento.

A Portlandita (Ca(OH)_2), resultante das reações de hidratação do cimento em água, pode ser atacada facilmente por águas correntes com presença de sólidos em suspensão, tendo uma baixa resistência ao desgaste por abrasão.

Algumas reações de deterioração do concreto encontram-se apresentadas esquematicamente no fluxograma da Figura 1.

O calor gerado no momento da hidratação do cimento é um ponto de controle no momento da definição do tipo de material a ser utilizado. Cimentos com mais C_3A e C_3S apresentam maior calor de hidratação. Como citado anteriormente, uma das funções da pozolana adicionada no cimento é baixar o calor gerado no momento da hidratação quando comparado ao CCV. Como consequência, a estrutura fica menos suscetível a geração de fissuras de origem térmica.

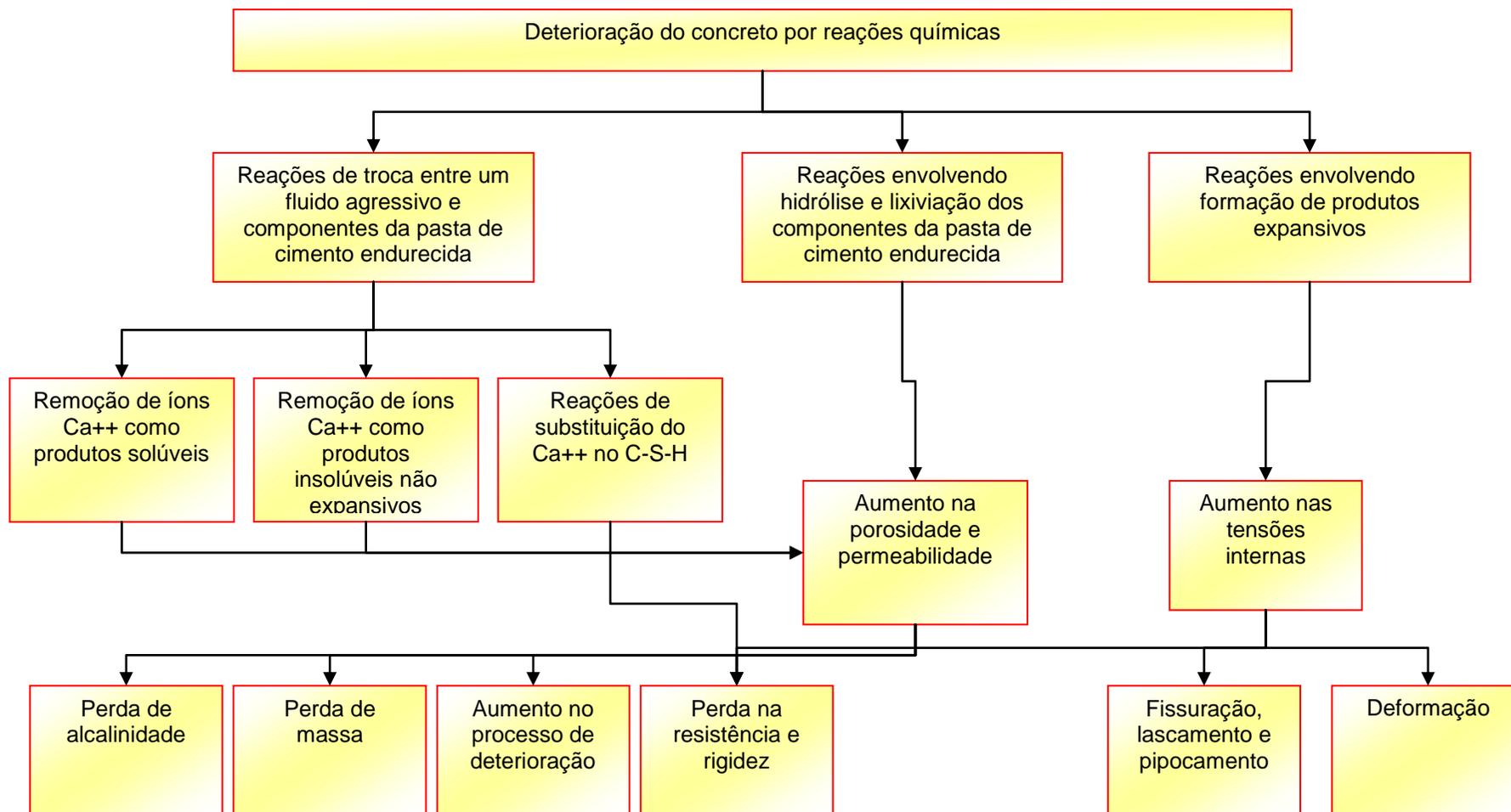


FIGURA 1 - TIPOS DE REAÇÕES QUÍMICAS RESPONSÁVEIS PELA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

FONTE: MEHTA; MONTEIRO (1994)

2.6 AGREGADOS

Um dos fatores que determinam a qualidade e a economia do concreto é a seleção da fonte dos agregados. A granulometria do agregado a ser utilizada deverá ser determinada em laboratório por intermédio de experimentos prévios e aplicada em protótipos, simulando condições de campo. No CCR é apropriado o uso de agregados de grande granulometria, diferente do normalmente aplicado ao CCV, em função do processo construtivo e do tipo de estrutura que se aplica (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

Os padrões de qualidade dos agregados devem ser os mesmos utilizados para o CCV. Um proporcionamento com a utilização de agregados maiores se faz necessário pelo volume utilizado. O uso de agregados menores exige um maior volume de pasta para se obter a trabalhabilidade necessária e maior volume de água devido à absorção, o que pode provocar um maior número de vazios, tornando o concreto menos durável e de menor resistência (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

Em concreto-massa, devem-se utilizar agregados o mais graúdo possível, selecionando dois ou mais grupos de tamanho que, quando combinados, produzam uma maior agregação com a máxima massa específica em função do menor teor de vazios (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Um dos fatores de deterioração do concreto é a desintegração das rochas (agregados), que consiste na perda de coesão e na progressiva individualização dos minerais constituintes, sem que ocorra, necessariamente, a modificação da natureza dos minerais. A decomposição corresponde à modificação progressiva da natureza dos minerais, sem, necessariamente, ocorrer desintegração. Entende-se por desagregação, o mecanismo pelo qual ocorre a redução da resistência mecânica e o aumento da produção de finos. Este mecanismo envolve processos físicos e/ou químicos (MAIA, 2001).

Devido à alteração pode ocorrer a redução da capacidade de aderência das partículas (adesividade), tanto a ligantes hidráulicos, quanto a betuminosos. Durante o processo de britagem, na superfície de fratura dos fragmentos, ocorre a quebra de algumas das ligações interatômicas dos elementos constituintes da rocha. Nos silicatos, que são os principais constituintes das rochas, na superfície de ruptura dos fragmentos ocorre a concentração de íons positivos (Ca^{2+} , Na^{2+} , K^+ , Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , etc.) e íons negativos (O^{2-}). Na presença da água, estes íons são neutralizados pela fixação de OH^- aos íons positivos e de H^+ aos íons negativos. Posteriormente, os elementos formados na superfície dos fragmentos são lixiviados. A dissolução de Ca^{2+} , Na^+ e do K^+ é mais rápida que a da sílica e da alumina. A concentração de sílica e de alumina torna a superfície do fragmento cada vez mais ácida. Este tipo de superfície é desfavorável à adesividade dos ligantes. Deste modo, a acidificação progressiva da superfície dos fragmentos pode conduzir a riscos de baixa adesividade (MAIA, 2001).

Nos basaltos brasileiros, os argilominerais normalmente observados são do grupo da esmectita e da clorita. Estes argilominerais apresentam-se, geralmente, como material de preenchimento de vesículas e/ou microvesículas nos basaltos. Podem, também, estar presente como material de preenchimento de microfissuras (MAIA, 2001).

2.7 ÁGUA DE AMASSAMENTO

Para a fabricação do concreto é necessário utilizar uma água apropriada, não devendo conter substâncias prejudiciais, podendo ser utilizadas todas as águas potáveis existentes na natureza e não contaminadas, incluindo a água da chuva e dos pântanos e, excluindo águas com teor igual ou superior a 3% de sal, 0,5% de sulfatos, pH inferior a 4 e com mais de 3% de sódio (Na_2O). Não se podem utilizar, também, águas minerais e provenientes de processos industriais ou que contenham substâncias orgânicas ou algas. Vários estudos são executados para verificar

a possibilidade do uso de diferentes águas de amassamento, porém estes estudos utilizam, em sua maioria, teores de cimento na ordem de 380 kg/m³. Neste patamar parte do cimento pode ser inutilizada devido à ação da água sem prejudicar as propriedades do concreto. No estudo do CCR a água a ser utilizada em sua fabricação deve ser analisada considerando o baixo consumo de cimento (BICZOK, 1981).

2.8 ADIÇÕES E ADITIVOS

Os desenvolvimentos recentes na tecnologia de adições progrediram muito no controle da hidratação do cimento. Com isso permitiu-se um maior controle na produção sem alterar as propriedades finais do concreto proporcionando redução de custos quanto aos desperdícios (PAOLINI e KHURANA, 1998).

As adições e aditivos podem ser utilizadas no CCR para modificar a trabalhabilidade, o tempo de pega e outras propriedades que conduzam a uma melhora na durabilidade final da mistura. O uso de aditivo é maior no CCR se comparado ao CCV em função de sua composição, onerando muito o custo final da estrutura.

Paolini e Khurana (1998) realizaram experimentos com uso de adições em CCR com sucesso, considerando as propriedades mecânicas e a durabilidade quando comparados com o CCV.

O uso destes componentes deve sempre ser previamente estudado verificando a interação entre os compostos do CCR e os aditivos e adições de modo que o resultado final atenda os requisitos de projeto (CORPS OF ENGINEERS, 2000).

2.9 BARRAGENS

As barragens são construídas para fins de navegação, controle de cheias, irrigação, abastecimento, depósito de resíduos industriais ou para a

produção de energia elétrica. Algumas são construídas para um determinado fim e são aproveitadas para outro simultaneamente denominando-se barragens de finalidades múltiplas (SCHREIBER, 1978).

Na produção de energia elétrica elas podem ser construídas para a concentração do desnível de um rio para produzir uma queda, formação de um grande reservatório para regularização do deflúvio ou elevação do nível de água para possibilitar a entrada de água num canal, túnel ou tubulação que a aduza para a casa de força, onde estarão instalados todos equipamentos necessários à geração de energia elétrica (SCHREIBER, 1978).

As barragens podem ser classificadas segundo o tipo de material componente, podendo ser de terra, enrocamento, concreto ou misto, este último uma combinação entre dois tipos de materiais. A escolha do tipo está ligada a dois fatores: técnico e econômico. O principal fator técnico é a geologia, sendo que o tipo de barragem depende da qualidade dos materiais sobre os quais ou com os quais deverá ser construída. A meteorologia pode influenciar também na decisão, seja pelo regime hidrológico dos rios ou pelo fator de congelamento da água, este último não sendo aplicado no Brasil. Dentre os tipos tecnicamente viáveis será escolhido aquele que resultar em investimentos menores, considerando o tipo de material encontrado na região e o custo com transporte e armazenamento (SCHREIBER, 1978).

Conforme descrição da Eletrobrás barragem é uma estrutura que tem a função de represar água com intuito de elevar o nível de água de um rio possibilitando a alimentação da tomada de água, sendo que em locais de baixa queda, a barragem tem a função, também, de criar o desnível necessário à produção de energia desejada. Para aproveitamentos hidrelétricos a barragem pode ser de terra em seção homogênea em solo, em enrocamento e em CCV ou CCR, em seção tipo gravidade.

Barragem de gravidade são todas aquelas cuja estabilidade é garantida principalmente por seu peso, sendo que seu perfil clássico é o triangular, tendo o vértice oposto ao menor cateto na altura do nível de água máximo (SCHREIBER, 1978).

Basicamente, barragens de gravidade são estruturas concretas contínuas que mantêm sua estabilidade quando submetida às cargas de projeto, sendo que, em geral, são construídas sobre uma linha central reta podendo ser ligeiramente curvada para se acomodar às condições do local de construção (CORPS OF ENGINEERS, 1995).

Um sistema de galerias é inserido geralmente dentro do corpo da barragem para fornecer meios de acesso e prover espaço para possíveis perfurações, inspeção, manutenções, monitoramento e realização de serviços. Este sistema serve também para coletar e conduzir as águas de drenagem do corpo e da fundação da barragem. A localização da galeria deve ser próxima ao leito do rio, perto e acima da superfície da rocha (CORPS OF ENGINEERS, 1995).

Uma barragem do tipo gravidade, como a estudada, mantém a estabilidade em função de seu peso e da largura da base, bem como pela adequada resistência da fundação. Dentre as principais ações atuantes estão o peso do concreto, pressão da água no paramento de montante, a pressão da água no paramento de jusante, o peso da água sobre paramento de jusante e a subpressão. A atuação ou não destas forças podem causar as rupturas ou de deslizamento da barragem.

O projeto de uma barragem gravidade deve obedecer aos seguintes requisitos:

- a fundação e as ombreiras devem ser homogêneas e suficientemente resistentes para suportar o peso da barragem (LANÇA, 2001);
- a união entre o concreto e a rocha deve ser perfeita (LANÇA, 2001);
- a obtenção de uma estrutura uniforme sem sinais de reação termogênica por intermédio do controle da qualidade do concreto (MARQUES FILHO, 2005);
- o conhecimento dos materiais constituintes a fim de evitar reações deletérias, como a reação álcali-agregado (MARQUES FILHO, 2005);

- a previsão dos efeitos provocados por sismos no caso de barragens instaladas em regiões sujeitas a tremores de terra (LANÇA, 2001); e
- a adequada resistência ao cisalhamento entre as camadas de CCR e entre o concreto e a fundação a fim de garantir uma adequada segurança da estrutura (MARQUES FILHO, 2005).

2.9.1 Barragem Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ)

A barragem está situada no rio Jordão a 5 km à montante da sua foz, entre os municípios de Reserva do Iguaçu e Foz do Jordão, no estado do Paraná, no sul do Brasil e a, aproximadamente, 380 km de Curitiba, capital do estado (Figura 2). Construída em CCR a barragem foi concebida para derivar parte da vazão do rio Jordão para o reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Ney Aminthas de Barros Braga (UHE GNB). As obras foram iniciadas em maio de 1994 pela construtora Ivaí Engenharia de Obras S/A e a concessão de geração de energia pertencente à COPEL Geração e Transmissão. A usina foi concluída em outubro de 1996, sendo que a pequena central hidrelétrica (PCH) instalada no aproveitamento entrou em operação em dezembro de 1997.

Como a princípio a UHE GNB, situada no rio Iguaçu, era para ser construída à jusante da foz do rio Jordão e em função das cotas de operação de uma usina situada mais à jusante no rio Iguaçu, a UHE GNB teve de ser deslocada para a montante, ficando sem a contribuição do rio Jordão. Apesar desta modificação em termos de localização, toda a sua estrutura de geração havia sido projetada para uma vazão maior, o que viabilizou o projeto da barragem de Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ), desviando o mesmo até a parte montante da UHE GNB no rio Iguaçu, conforme informações técnicas da COPEL. Toda esta representação pode ser melhor visualizada na Figura 3.

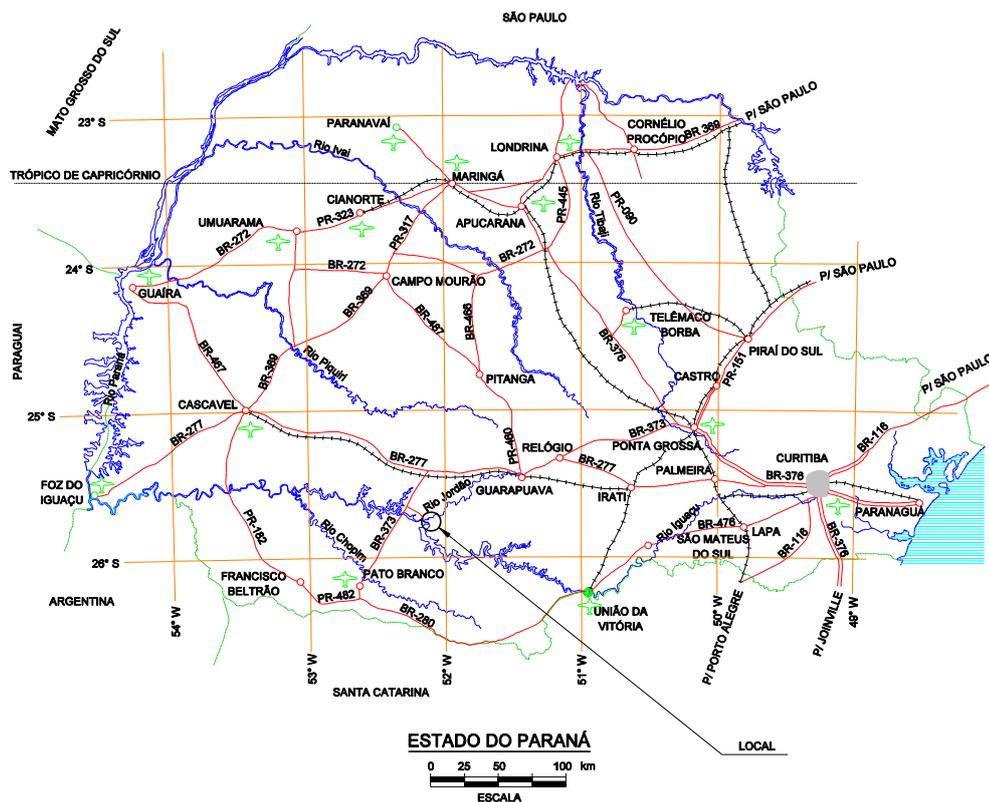


FIGURA 2 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE DRJ

FONTE : Banco de dados COPEL

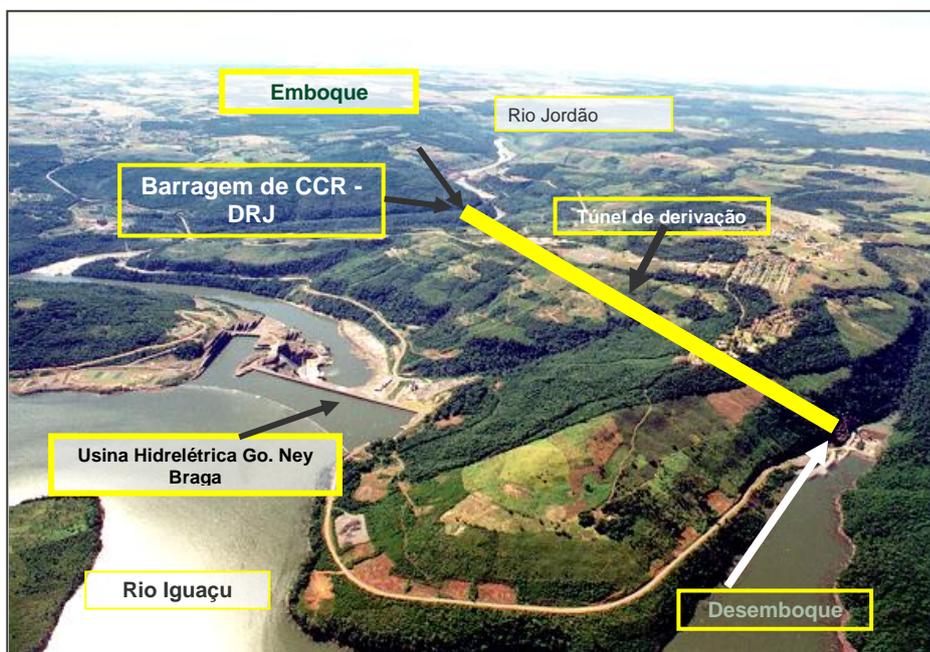


FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO

FONTE: SOARES; LEVIS; ANDRADE (1999) adaptado pela autora

A barragem da UHE DRJ é do tipo gravidade constituída em CCR com membrana impermeabilizante em CCV na face de montante, tendo 95 m de altura máxima, na seção das adufas de desvio e 67 m de altura em relação ao leito do rio; 550 m de extensão na crista e 49,5 m de largura na base e, no topo, 5 m. Uma vista geral da barragem está apresentada na Figura 4 e sua planta na Figura 5. É constituída de 28 blocos de 20 m cada, com talude de montante vertical e jusante 1V:0,74H, possuindo em 300 m do seu comprimento (entre os blocos 6 a 20) uma calha vertente, inserida no próprio corpo da barragem, revestida de CCV. O restante da barragem (blocos 1 a 5 e 21 a 28) é composta, em sua face jusante, de degraus em CCR aparente. A barragem possui uma galeria de inspeção e drenagem situada na parte inferior em toda sua extensão e uma galeria na parte superior entre os blocos 3 e 26, sendo que estas duas galerias são comunicáveis nas duas extremidades conforme perfil apresentado na Figura 6. As galerias possuem 2,50 m de largura e 2,80 m de altura sendo dotadas de sistema de esgotamento por gravidade, escoando as águas percoladas pelos drenos incorporados na laje da face e/ou infiltradas no maciço. Pelas galerias foi executada a cortina principal de drenagem. Também, estas servem de acesso ao interior do maciço para monitoramento da barragem, sendo que, na galeria inferior, encontra-se o painel de instrumentação. A barragem é monitorada pelo uso de um conjunto de instrumentos de auscultação composta de piezômetros (PZ), marcos superficiais (MS), drenos de cortina (DRC), drenos de fundação (DF), drenos de junta (DJ), medidores de vazão (MV), e termômetros internos de concreto (TE).



FIGURA 4 - VISTA GERAL DA UHE DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO
 FONTE: SOARES; LEVIS; ANDRADE (1999)

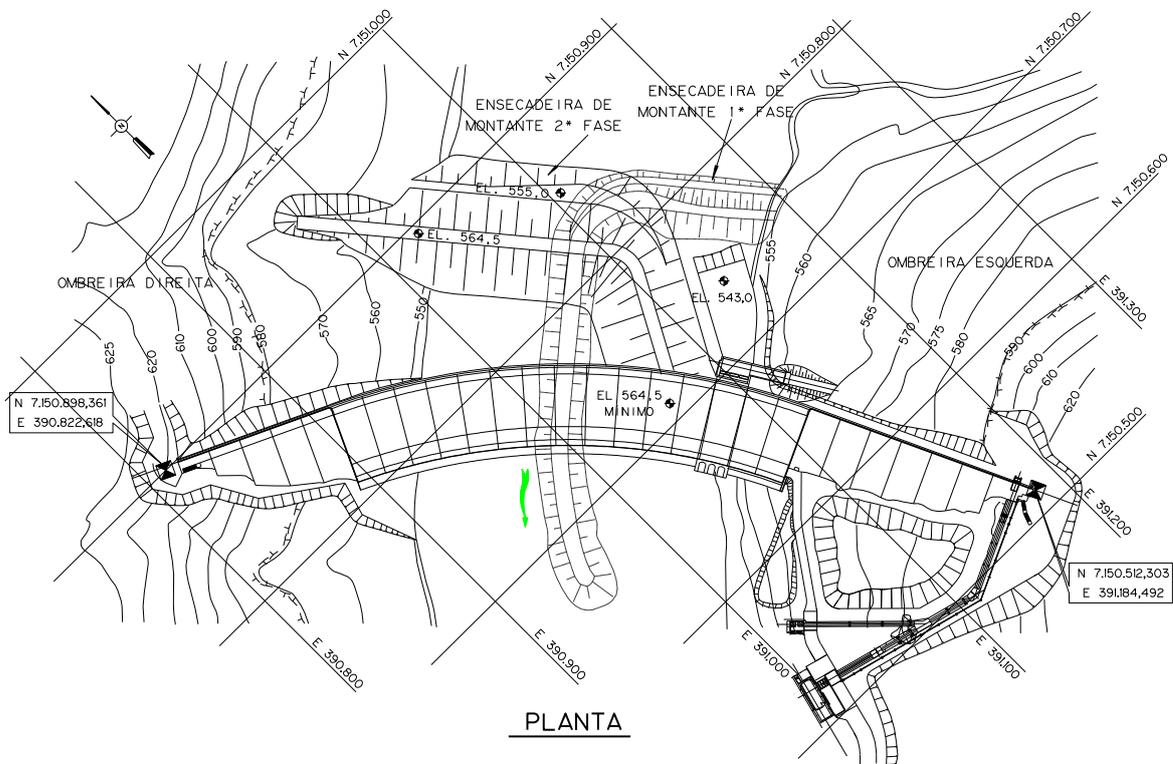


FIGURA 5 - PLANTA DA UHE DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO
 FONTE : Banco de dados COPEL

A usina possui casa de força do tipo semi-abrigada com uma turbina tipo Francis com 6,50 MW de potência nominal. Para perenizar o trecho final do rio Jordão à jusante da barragem até sua foz no rio Iguaçu, foi mantida uma vazão remanescente mínima de 10 m³/s, que é aproveitada para gerar energia a partir de uma queda líquida de 71,5 m.

Em 1994, começaram as obras da usina, sendo que de janeiro de 1995 a julho de 1996 a barragem foi construída consumindo aproximadamente 576.000 m³ de concreto compactado com rolo e 88.875 m³ de concreto convencional. O enchimento do reservatório deu-se a partir de abril de 1996.

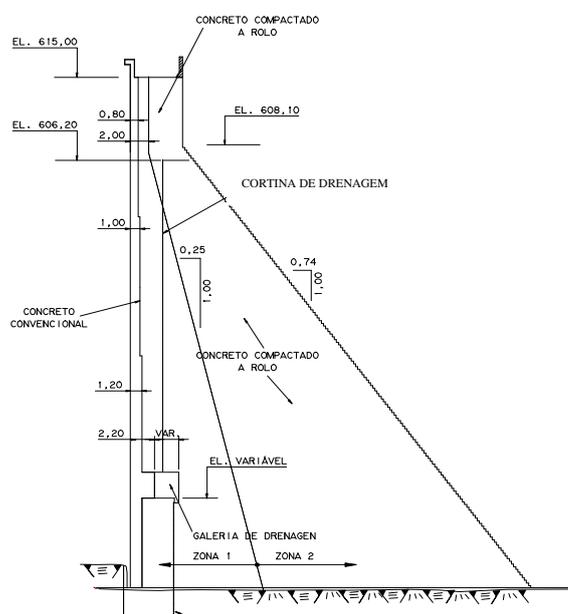


FIGURA 6 - VISTA LATERAL ESQUEMÁTICA DA UHE DRJ

FONTE : Banco de dados COPEL

2.9.2 Características técnicas de construção

A barragem foi construída sobre rocha basáltica em forma de derrames sub-horizontais de espessura superiores a 50 m, sendo que as seções mais altas são de basalto são, existindo algumas brechas somente

nas ombreiras e com pequenas alturas. A caracterização do local de implantação está representada na Figura 7.

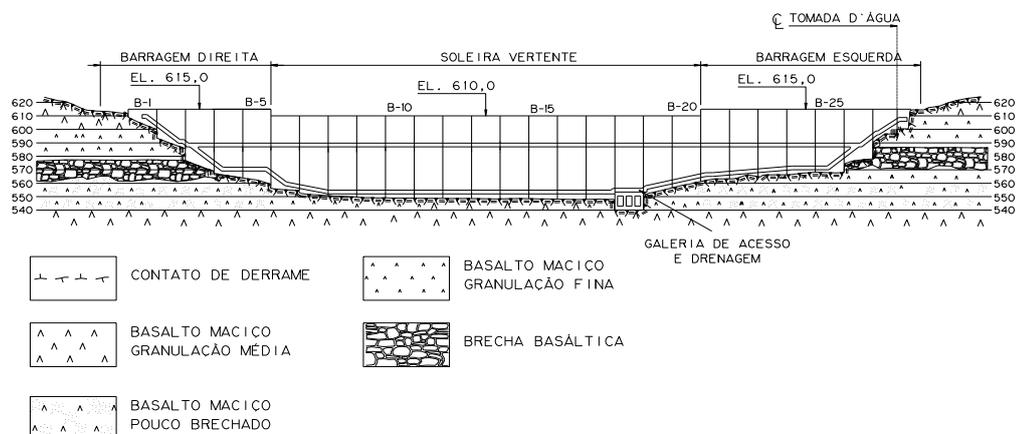


FIGURA 7 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM

FONTE: SOARES; LEVIS (2001)

As características técnicas da barragem encontram-se reunidas na Tabela 3.

O corpo da barragem em CCR foi executado em camadas de 0,40 m utilizando, em média, 80 kg/m^3 de cimento pozolânico compactado com rolo vibratório auto-propelido. Já, a face de montante em CCV, foi executada com espessura variando de 1,40 m a 0,80 m da base ao topo, servindo de impermeabilização à barragem de CCR. O principal parâmetro de projeto, que foi controlado durante a execução da barragem de concreto foi a massa específica do CCR, que foi projetado para ser de 2.550 kg/m^3 . Como resultado obteve-se em média 2.570 kg/m^3 , sendo controlado por meio de um densímetro nuclear de uma haste, que permitiu leituras de até 30 cm de profundidade na massa de concreto. Na Figura 8, está representada a seqüência de concretagem da barragem com as respectivas datas e volumes de lançamento.

Em análise realizada em 2000, com a extração de testemunhos do corpo da barragem em pontos superficiais, foi verificada uma massa específica média de $(2.490 \pm 230) \text{ kg/m}^3$. Na Tabela 4, estão representadas as quantidades de CCV e CCR utilizadas entre a cortina de drenagem situada no interior da barragem e a face de montante. É nesta porção da barragem

que se concentra a análise deste estudo por ser a área de maior incidência de água estando sujeita a lixiviação.

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA UHE DRJ

HIDROLOGIA E HIDRÁULICA	
Área total da bacia do rio Jordão	4.750 km ²
Vazão máxima diária registrada	3.600 m ³ /s
Vazão pelo túnel de derivação (desnível de 0,90 m)	184 m ³ /s
Vazão remanescente no rio Jordão	10 m ³ /s
Queda líquida	1,50 m
Túnel de derivação	
Diâmetro	9 m
Comprimento	4.704 m
Tomada d'água	
Largura	4 m
Altura	19,50 m
Comporta tipo vagão (1,90 x 2,70 m)	1 unidade
Conduto forçado	
Tramo principal - ϕ 1,90 m	206 m
Ramificação - ϕ 1,60 m	82 m
Casa de força – tipo abrigada	
Comprimento	32,60 m
Altura (até o piso principal)	27,40 m
Turbina (Francis de eixo horizontal)	1 unidade
Potência nominal da turbina	6,54 MW
Velocidade	600 rpm
Quantidades principais	
Escavação comum	460.000 m ³
Escavação em rocha	912.000 m ³
Escavação subterrânea	340.000 m ³
CCV	88.875 m ³
CCR	576.000 m ³
Aço aplicado	2.292.000 kg

FONTE: Banco de dados COPEL

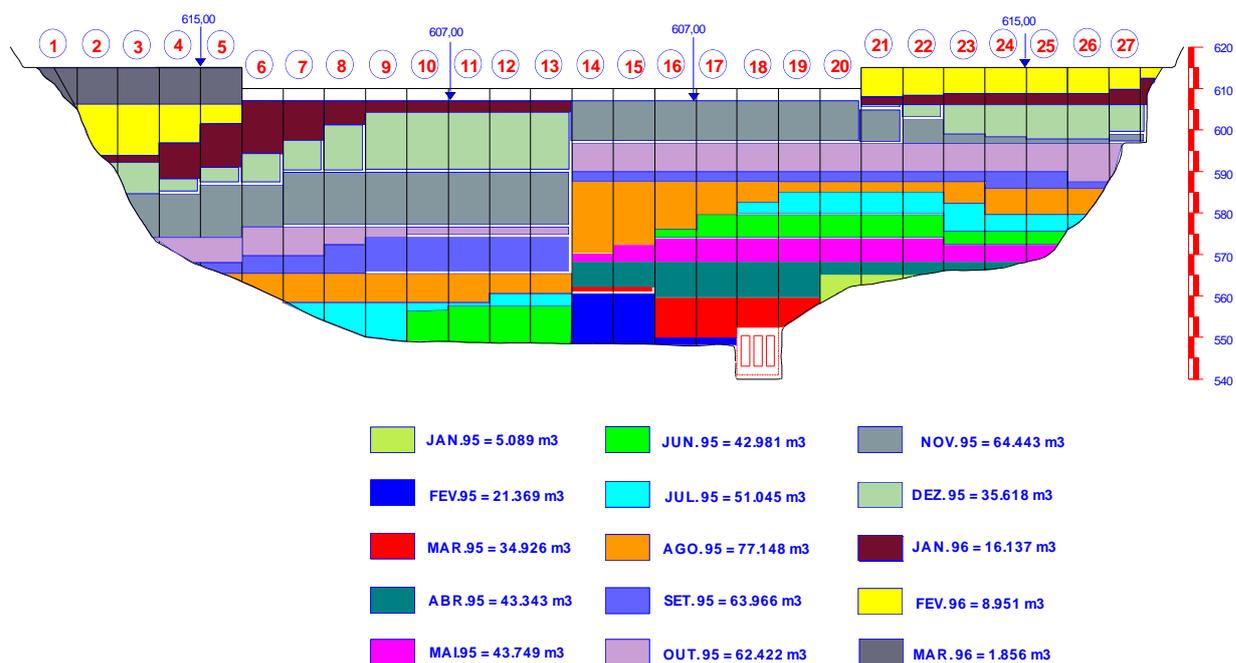


FIGURA 8 – VOLUMES CONCRETADOS NA BARRAGEM

FONTE: Banco de dados COPEL

Em agosto de 1996, devido a um aumento do volume de infiltrações pelas juntas, houve a necessidade de executar injeção de calda de cimento nos drenos de junta de alguns blocos. Este aumento das infiltrações foi detectado pelo controle feito nos drenos de cortina instalados ao longo da galeria de inspeção e drenagem situada no interior da barragem. Em maio de 1997, foram executados trabalhos de lançamento e injeção de vários materiais na face de montante da barragem com o objetivo de vedar uma infiltração na parede de montante na altura da galeria inferior no bloco 19. Foram lançadas a partir da crista e do reservatório calda de cimento, cinza volante e serragem, em quantidades mostradas na Tabela 5.

Outros materiais, cinza volante, carvão em pó, pó de serra e serragem, foram lançados junto à sua face de montante para amenizar e/ou reduzir as infiltrações medidas no interior da estrutura entre maio e junho de 1996. O resumo destes lançamentos pode ser visualizado na Tabela 6.

TABELA 4 - VOLUME DE CONCRETO CCR E CCV ENTRE A FACE DE MONTANTE E A CORTINA DE DRENAGEM DAS GALERIAS

CÁLCULO DO VOLUME DE CONCRETO À MONTANTE DA CORTINA DE DRENAGEM			
BLOCO	VOLUME DE CCR (m³)	VOLUME DE CCV (m³)	TOTAL CCR+CCV (m³)
01	169,51	116,94	286,45
02	958,95	486,53	1.445,48
03	1.731,70	925,00	2.656,70
04	1.885,04	1.086,88	2.971,92
05	2.109,10	1.087,94	3.197,04
06	2.586,81	1.489,01	4.075,82
07	2.814,94	1.618,72	4.433,66
08	2.925,42	1.653,39	4.578,81
09	2.979,42	1.674,68	4.654,10
10	3.017,76	1.689,80	4.707,56
11	3.026,84	1.693,39	4.720,23
12	3.038,56	1.698,01	4.736,57
13	3.046,16	1.701,01	4.747,17
14	3.051,30	1.703,04	4.754,34
15	3.056,95	1.704,98	4.761,93
16	3.075,91	1.712,74	4.788,65
17	3.081,51	1.714,95	4.796,46
18	2.715,30	1.563,58	4.278,88
19	2.501,44	1.472,99	3.974,43
CÁLCULO DO VOLUME DE CONCRETO À MONTANTE DA CORTINA DE DRENAGEM			
BLOCO	VOLUME DE CCR (m³)	VOLUME DE CCV (m³)	TOTAL CCR+CCV (m³)
20	2.408,02	1.418,14	3.826,16
21	2.337,20	1.770,91	4.108,11
22	2.219,62	1.115,51	3.335,13
23	2.140,95	1.081,92	3.222,87
24	2.068,97	1.053,03	3.122,00
25	2.011,33	1.057,11	3.068,44
26	1.718,83	789,63	2.508,46
27	553,27	294,22	847,49
28	165,23	95,02	260,25
TOT. PARCIAL	63.396,04	35.469,07	98.865,11
TOT. GERAL	570.000,00	77.000,00	647.000,00
PERCENTUAL	11,12%	46,06%	15,28%

FONTE: Banco de dados COPEL

TABELA 5 – QUANTIDADE DE MATERIAL UTILIZADO NO TRATAMENTO DA FISSURA NO BLOCO 19

MATERIAL	QUANT.	QUANT. UTILIZADA.
Cimento Portland Pozolânico - CP IV-32	10.500 kg	210 sacos de 50 kg
Cinza volante - "fly-ash"	17.500 kg	5 containers de 3500 kg
Pó de serra e serragem	3.900 l	18 barris de 220 litros

FONTE: SOARES; LEVIS (2001).

TABELA 6 – RESUMO DOS TRATAMENTOS REALIZADOS NA FACE DE MONTANTE

Data	Lançamento nos blocos	Material lançado	Quantidade (Total)	Local
14/05/96	02 e 03	Cinza volante + Carvão + Pó de serra	± 300 kg	Pré-moldado (teto) Drenos verticais
28/05/96	25 e 26	Cinza volante	± 1800 kg	Pré-moldado (teto) Drenos 117 - 118 e 119
28/05/96	08 e 09	Cinza volante	± 300 kg	
30/05/96	02	Cinza volante	± 1800 kg	Pré-moldado (teto)
30/05/96	04 e 05	Cinza volante	± 1800 kg	Pré-moldado (teto) – falha de concretagem bl. 04
30/05/96	18 e 19	Cinza volante	± 1000 kg	Pré-moldado (teto)
30/05/96	23 e 24	Cinza volante +Pó de serra	não controlado	Juntas
31/05/96	24 e 24	Cinza volante	± 1000 kg	
01/06/96	23 e 24	Estopa +Cinza + Carvão +Pó de serra	não controlado	Dreno junta 23/24

FONTE: SOARES; LEVIS (2001).

Na seqüência, entre os dias 25 de julho a 28 de agosto de 1996, foram realizados trabalhos de injeção nos drenos de junta entre os blocos 5/6, 6/7, 8/9, 9/10, 11/12, 12/13, 13/14, 23/24, 25/26, 26/27, todos a partir da galeria inferior, com calda na proporção de 1:1 em volume de cimento CP IV-Z e sílica ativa, totalizando 9.440 kg de cimento e 944 kg de sílica ativa, em volume equivalente a 9.673 l de calda.

2.9.3 Traços médios de concreto utilizados na UHE DRJ

Conforme Mehta e Monteiro (1994), a consistência é uma das principais diferenças nas propriedades do concreto fresco em dosagens de CCR e CCV, sendo necessária a adequação para receber a compactação pelo rolo vibratório, produzindo um concreto mais seco. Para permitir uma distribuição adequada da pasta por todo o material durante a mistura e compactação do CCR, foi necessária a adição de água durante sua dosagem e sua aplicação, não sendo válida a minimização do fator a/c para obter máxima resistência, como ocorre com o CCV. Em função destes parâmetros

uma adequada seleção dos materiais, do procedimento de cura e dos traços se fez necessária para a obtenção de um CCR de boa qualidade, mesmo procedimento adotado para o CCV.

Os traços utilizados para a execução do CCR e do CCV da barragem encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 7 e 8, sendo os valores em kg denominados quantidade parcial por traço. A parte à montante, entre a face e a cortina de drenagem situada na galeria de drenagem corresponde ao CCV. Os valores denominados quantidade total referem-se à massa total de concreto da barragem. Uma breve descrição do tipo de material e suas características individuais estão relacionadas na seqüência. Na Tabela 9 está representado um resumo das informações contidas nas duas tabelas anteriores.

Apesar de não ter sido desenvolvido no presente trabalho, as informações contidas nas Tabelas 7 a 9 são relevantes do ponto de vista de que a perda de massa pela água percolada através da barragem está relacionada à quantidade de pasta que pode ser extraída pelos processos químicos e físicos de dissolução e lixiviação.

TABELA 7 - QUANTIDADE DE MATERIAL PELOS TRAÇOS MÉDIOS DO CCR DA BARRAGEM

MATERIAIS	QUANT. UNIT. POR TRAÇO MÉDIO (kg/m³)	QUANT. PARCIAL POR TRAÇO (kg)	QUANT. TOTAL (kg)	TRAÇO PROPORCIONAL (kg)
Cimento	74,90	4.748.363	42.693.000	1
Água	92,30	5.851.454	52.611.000	1,23
Areia artificial	1288,60	81.692.137	734.502.000	17,20
Pó de calcário	21,10	1.337.656	12.027.000	0,28
Brita 25 mm	714,70	45.309.150	407.379.000	9,54
Brita 50 mm	512,40	32.484.131	292.068.000	6,84

FONTE : dados técnicos da usina modificado pela autora (2008)

TABELA 8 - QUANTIDADE DE MATERIAL PELOS TRAÇOS MÉDIOS DO CCV DA BARRAGEM

MATERIAIS	QUANT. POR TRAÇO MÉDIO (kg/m ³)	QUANT. PARCIAL POR TRAÇO (kg)	QUANT. TOTAL POR TRAÇO (kg)	TRAÇO PROPORCIONAL (kg)
Cimento	185,30	6.572.419	14.268.100	1
Água	138,30	4.905.372	10.649.100	0,75
Areia artificial	1039,40	36.866.551	80.033.800	5,61
Pó de calcário				
Brita 25 mm	583,40	20.692.655	44.921.800	3,15
Brita 50 mm	583,40	20.692.655	44.921.800	3,15

FONTE : dados técnicos da usina modificado pela autora (2008)

TABELA 9 - QUANTIDADE DE MATERIAL POR TRAÇO DE CCR + CCV ENTRE A FACE DE MONTANTE E A CORTINA DE DRENAGEM DAS GALERIAS

CCR + CCV _{face}		
MATERIAIS	QUANT. PARCIAL POR TRAÇO MÉDIO (kg)	QUANT. TOTAL POR TRAÇO (kg)
Cimento	11.320.782	56.961.100
Água	10.756.827	63.260.100
Areia artificial	118.558.689	814.535.800
Pó de calcário	1.337.656	12.027.000
Brita 25 mm	66.001.805	452.300.800
Brita 50 mm	53.176.786	336.989.800

FONTE : dados técnicos da usina modificado pela autora (2008)

CIMENTO

Conforme o banco de dados de construção da usina, o cimento utilizado na construção da UHE DRJ foi do tipo CP IV - 32, marca Votorantim, em um teor médio de 74,90 kg/m³ para a produção do CCR e de 185,30 kg/m³ para o CCV. Com isso, foi utilizado um total de 56.961.000 kg de cimento.

De acordo com Paulon *et al.* (2004) o CCR da barragem DRJ é classificado como pobre, considerando que o teor médio de cimento utilizado ficou abaixo dos 100 kg/m³. Conforme o autor, pode ser produzida uma estrutura razoavelmente permeável, geralmente pouco homogênea ao longo da camada, podendo apresentar caminhos preferenciais de percolação.

O cimento utilizado foi analisado, sendo seus principais óxidos representados na Tabela 10, a título de informação adicional.

TABELA 10 – TEOR QUÍMICO MÉDIO DO CIMENTO CP IV UTILIZADO NA UHE DRJ

	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
Amostras	54	54	54	54	54	54	50	50
Média	9,72	26,42	3,83	47,95	4,29	2,95	0,07	0,64
Desvio padrão	0,62	3,50	0,40	1,46	0,31	0,22	0,09	0,23

FONTE: SOARES; LEVIS (2001).

AGREGADOS

Na construção da barragem de DRJ foram utilizados agregados britados *in-loco*, oriundos da escavação do próprio local. Os agregados foram provenientes de rocha basáltica, sendo utilizada areia artificial proveniente do processo de britagem e brita com dimensões de 25 e 50 mm de diâmetro. No total, foram utilizados 80.768.302 kg de areia artificial, 452.300.800 kg de brita 25 mm e 336.99.800 kg de brita 50 mm.

O basalto é uma rocha de origem vulcânica, formado por derrames extensos de lava em muitas regiões do planeta. É uma rocha ígnea formada pelo resfriamento e posterior solidificação do magma o qual é constituído por, principalmente, óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio e magnésio, sódio e potássio. A sua composição química é muito constante, variando o teor de SiO_2 geralmente entre 45 e 55%. O basalto utilizado na construção da UHE DRJ, na forma de agregados miúdos e graúdos foi do tipo toleítico e sua composição aproximada encontra-se na Tabela 11 (DICIONÁRIO LIVRE DE GEOCIÊNCIAS). Os valores são correspondentes a uma média global, podendo ser usada para comparação aproximada, pois este tipo de rocha possui pouca variabilidade. Os basaltos maciços utilizados apresentam a mineralogia usual para esta rocha. Nos ensaios realizados antes e durante a construção da barragem, as rochas basálticas utilizadas apresentaram

alguma reatividade aos álcalis sem comprometer sua utilização em função do uso de cimento pozolânico, segundo informações técnicas de construção, encontradas nos arquivos da empresa proprietária.

TABELA 11 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DOS BASALTOS

Composição de basaltos	Basalto Toleítico (% EM PESO)
SiO ₂	51,38
TiO ₂	1,55
Al ₂ O ₃	16,30
Fe ₂ O ₃	3,23
FeO	7,41
MnO	0,17
MgO	5,60
CaO	9,75
Na ₂ O	2,53
K ₂ O	0,78

FONTE: DICIONÁRIO LIVRE DE GEOCIÊNCIAS

Com testemunhos retirados da face de jusante da barragem no ano de 2000, foi feita a identificação das fases do agregado miúdo utilizado, por difratometria de raios X, destacando-se a presença da albita com cálcio, diopsita e anortita (LACTEC 2000).

A composição química quantitativa dos finos utilizados foi determinada pela técnica de fluorescência de raios X, sendo identificados os compostos químicos listados na Tabela 12. Basicamente, o material foi referido como constituído de marga (argila carbonatada) rica em ferromagnesiana. Pela análise complementar, pelo próprio banco de dados do equipamento, dois prováveis compostos encontrados foram a albita e a ilita (LACTEC, 2000).

TABELA 12 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS FINOS – AREIA, POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

AREIA – PRINCIPAIS ÓXIDOS IDENTIFICADOS E TEOR, (% EM PESO)			
SiO₂	52,03	MgO	4,47
Al₂O₃	13,22	CaO	8,59
TiO₂	1,66	Na₂O	2,76
Fe₂O₃	14,10	K₂O	1,23
MnO	0,21	P₂O₅	0,20

FONTE: LACTEC (2000)

ADIÇÕES

Na construção da barragem foram utilizados finos de calcários como adição mineral nos traços de CCR. Estes finos foram adicionados em alguns traços da barragem em substituição aos finos provenientes da britagem do basalto. A sua utilização provocou um aumento de material precipitado devido à percolação, sendo bem visível no interior das galerias da barragem e identificado em algumas amostras.

Análises das cinzas volantes utilizadas em traços do concreto da barragem indicaram a presença majoritária das fases químicas mulita e quartzo. A composição química elementar revelou a presença de Fe, Mg, Al, Na, K, Si e Ca (RELATÓRIO LACTEC, 2000).

ÁGUA

A água utilizada na produção do concreto da barragem foi previamente analisada de forma a atender os padrões exigidos sem prejudicar a qualidade e a vida útil da estrutura, conforme a norma ABNT NBR 12655:2006.

Para a verificação da perda de massa pela água percolada, neste trabalho, foram coletadas amostras da mesma no reservatório e internamente à barragem em pontos pré-determinados, sendo estas coletas periódicas em intervalos de 2 a 3 meses consecutivos. Dois pontos básicos foram considerados, o do reservatório, com coletas nas regiões superficial, intermediária e profunda (junto ao fundo, mas, evitando-se o lodo); e dos medidores de vazão denominados MV1 e MV2, onde há convergência de toda

a água percolada para o interior das galerias de inspeção e drenagem proveniente dos drenos e fissuras.

2.10 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NAS ÁGUAS PERCOLADAS

Segundo Biczok, 1968, a determinação dos parâmetros físico-químicos das águas pode indicar um efeito de arraste ou carreamento de materiais, ataques químicos e, principalmente, de dissolução e precipitação de sais. Assim, de uma forma geral tem-se, resumidamente, um enfoque dos principais parâmetros analisados:

- o pH é um parâmetro fundamental para caracterização da água percolada, representando a intensidade do caráter ácido ou básico da solução analisada. A pasta de cimento hidratada possui um pH elevado, em torno de 12,5 ou seja, alcalino. A carbonatação propicia uma redução deste pH devido a reação do hidróxido de cálcio com o gás carbônico produzindo o carbonato de cálcio que tem o pH em torno de 9. O seu acompanhamento nas amostras de água percolada pode indicar a perda de elementos básicos do concreto, alcalinos ou ácidos.
- a dureza é determinada pelos íons Ca e Mg e suas combinações. A dureza das águas fluviais é função tanto dos mananciais do rio como a superfície coberta por vegetações, sendo que os compostos minerais dissolvidos dependem da estação do ano e da altura do nível do rio. No inverno e na primavera as águas dos rios se tornam mais brandas, uma vez que tem influência a temperatura na dissolução dos sais. Quanto mais alta a temperatura maior a solubilidade dos sais. Alguns pesquisadores classificam as águas por sua dureza em carbonato em grupos conforme listado na Tabela 13, sendo que 1 grau de dureza alemã (°d.H.) é igual a 1 parte de CaO em peso por 100.000 partes em peso de água. A dureza indica a concentração de

cátions multivalentes em solução na água. Os cátions mais freqüentemente associados à dureza são os de cálcio e magnésio (Ca^{2+} , Mg^{2+}) e, em menor escala, ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), estrôncio (Sr^{2+}) e alumínio (Al^{3+}). A dureza da água é expressa em mg/L de equivalente em carbonato de cálcio (CaCO_3) (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

TABELA 13 – CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS QUANTO A DUREZA

Classificação	Dureza total
Muito branda ou mole	0 a 4
Branda	4 a 8
Semidura	8 a 12
Bastante dura	12 a 18
Dura	18 a 25
Muito dura	25 a 50
Extremamente dura	Mais de 50

FONTE: BICZOK (1968)

- a alcalinidade à fenolftaleína é a medida do teor de hidróxido e de carbonatos alcalinos cáusticos da amostra sendo expressa em termos de mg/l de CaCO_3 e, a alcalinidade total é a medida do teor de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos da amostra expressa, também, em termos de mg/l de CaCO_3 . Representa a capacidade em neutralizar ácidos sendo a soma das bases. O ataque por álcalis pode ser provocada pela troca iônica com outros componentes do cimento ou pela cristalização dos poros ocasionando uma reação expansiva.
- os sólidos suspensos representam todos os íons que se encontram suspensos e não precipitam na água.
- a condutividade elétrica, é a propriedade inerente aos materiais de conduzir ou não corrente elétrica, sendo que os condutores

apresentam alta condutividade ao contrário dos isolantes. Esta medição leva em conta o total de sólidos dissolvidos na amostra de água. A condutividade da água é determinada pela presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions, sendo estes sais dissolvidos e ionizados presentes na água transformando num eletrólito capaz de conduzir a corrente elétrica. Há uma relação de proporcionalidade entre o teor de sais totais dissolvidos e a condutividade elétrica, podendo-se estimar o teor de sais pela medida de condutividade elétrica de uma água. Pode indicar, também, a presença de material orgânico e sua unidade é $\mu\text{Siemens/cm}$. Valores igual ou maior que 1000 mS/cm indicam que a água está salobra ou poluída.

- a investigação da concentração dos cátions e ânions tanto na água percolada quanto do reservatório é a base para a medida da perda de massa da estrutura em função do tempo e da vazão pelos pontos de coleta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, encontram-se descritas as principais metodologias utilizadas na pesquisa para o diagnóstico do comportamento da barragem pelos parâmetros físico-químicos da UHE DRJ.

3.1 HISTÓRICO DAS COLETAS DE ÁGUA E TÉCNICAS DE ANÁLISE

As análises físico-químicas da água percolada da UHE DRJ foram, inicialmente, realizadas no período de 07/1997 a 03/1999, sendo acompanhadas pela inspeção visual e extração de testemunhos na superfície da barragem.

A segunda fase do projeto foi de 09/2000 a 11/2001 com análise dos pontos MV1 e MV2. Já, a terceira fase de coleta e análise da água percolada foi de 01/2002 a 11/2003, também, nos pontos dos medidores de vazão.

Uma quarta fase ocorreu entre 01/2005 e 03/2006.

As análises atuais correspondem ao período de 05/2007 a 05/2008, sendo um trabalho contínuo de parte de um estudo do comportamento dos materiais constituintes da barragem, servindo futuramente para uma possível manutenção e, também, como histórico para novos projetos de barragens.

A partir de dados históricos de percolação da barragem provenientes de drenos de maciço, fundação e junta, bem como fissuras, foram determinados os pontos de coleta de água até a data atual, de maneira que o seu comportamento devido à sazonalidade não influenciasse nesta pesquisa. Outro fator considerado na determinação dos pontos de análise foi um campo amostral significativo, de maneira que abrangesse todos os meios de percolação e toda a estrutura física da mesma. Assim, foram determinados 18 pontos de coleta, os quais estão representados nas Figuras 9 e 10 e descritos na Tabela 14.

3.2 METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA

Para a identificação dos principais elementos químicos presentes na água do reservatório e percolada pelos drenos e fissuras e em testemunhos, foram utilizadas as seguintes técnicas analíticas (método – “STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 20TH ED. WASHINGTON, 1998”):

- a. **espectrofotometria de absorção atômica (AA)**. Análise dos principais elementos metálicos presentes (lítio, sódio, cálcio, berílio, magnésio, bário, titânio, vanádio, cromo total, cromo hexavalente, molibdênio, ferro, cobalto, níquel, cobre, prata, ouro, zinco, cádmio, alumínio, silício, estanho, chumbo, antimônio, bismuto, manganês, potássio). Equipamento Perkin Elmer modelo 4100.
- b. **cromatografia de íons (CI)**. Análise efetuada para a identificação de cátions e ânions contidos na água – (ânions, fluoretos, fosfatos, sulfatos, cloretos, brometos, sulfitos, nitratos e nitritos; cátions, lítio, sódio, potássio, cálcio, magnésio e amônio). Equipamento, Cromatografia Iônica de Alta Eficiência – HPIC com equipamento marca: Dionex 2010 I.
- c. **propriedades físico-químicas**. Análise de: dureza total em cálcio e magnésio; turbidez; alcalinidade total e à fenolftaleína; condutividade elétrica; sólidos totais, suspensos e dissolvidos; e o pH.
- a. **análises estruturais e de composição química elementar**. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Philips, modelo XL30, com detetor do tipo microssonda analítica por raios X, marca EDAX (sistema de energia dispersiva, EDS).

Em cada ponto foram coletados 3,5 l de água para análise, sendo 2 l em 2 frascos sem preservantes destinados a análise físico-química e de sólidos; 1 l em frasco contendo 2 ml/l de H₂SO₄ (ácido sulfúrico) para análise de fósforo e 0,5 l em frasco contendo 1 ml/l de HNO₃ (ácido nítrico) para análise de metais.

Em cada ponto de coleta foi analisada a vazão em l/min e a temperatura da água. Os resultados foram obtidos a partir de análises individuais reduzindo a concentração equivalente dos íons a partir da medida da concentração iônica na água do reservatório. Em função da vazão verificada na data de coleta, foi estimada a vazão no ponto por mês e calculada a perda de massa dos íons conforme apresentado nas Equações 3 e 4.

$$V \text{ (l/mês)} = (I/\text{minuto}) \times 43200 \text{ (minutos por mês)} \quad (\text{Equação 3})$$

$$I \text{ (kg/mês)} = [(mg/l) - MED \text{ (mg/l)}] \times V \text{ (l/mês)} / 1.10^6 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

- i) MED é a média dos valores obtidos no reservatório considerando os três pontos de análise (superfície, 20 e 40 m);
- ii) I é o resultado do ponto de coleta correspondente ao íon analisado; e,
- iii) V é a vazão no ponto de análise.

Os dados resultantes foram apresentados na forma gráfica, em função do tempo e da vazão da água no local considerado.

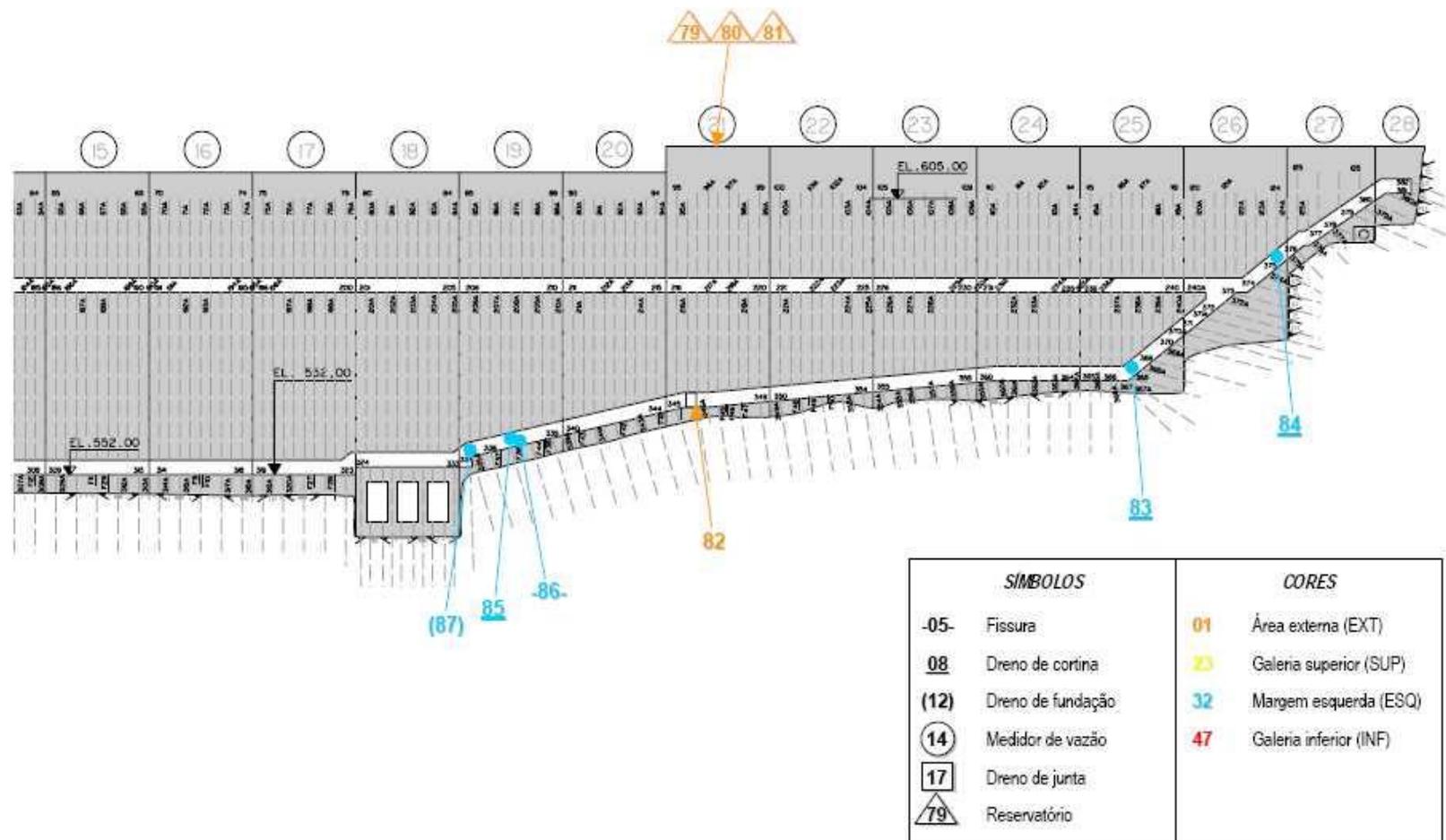


FIGURA 9 – PONTOS DE COLETA DE ÁGUA NA BARRAGEM DA UHE DRJ – MARGEM DIREITA – SEÇÃO LONGITUDINAL – VISTA DE JUSANTE

FONTE: LACTEC - RELATÓRIO DE ATIVIDADE MENSAL (2008)

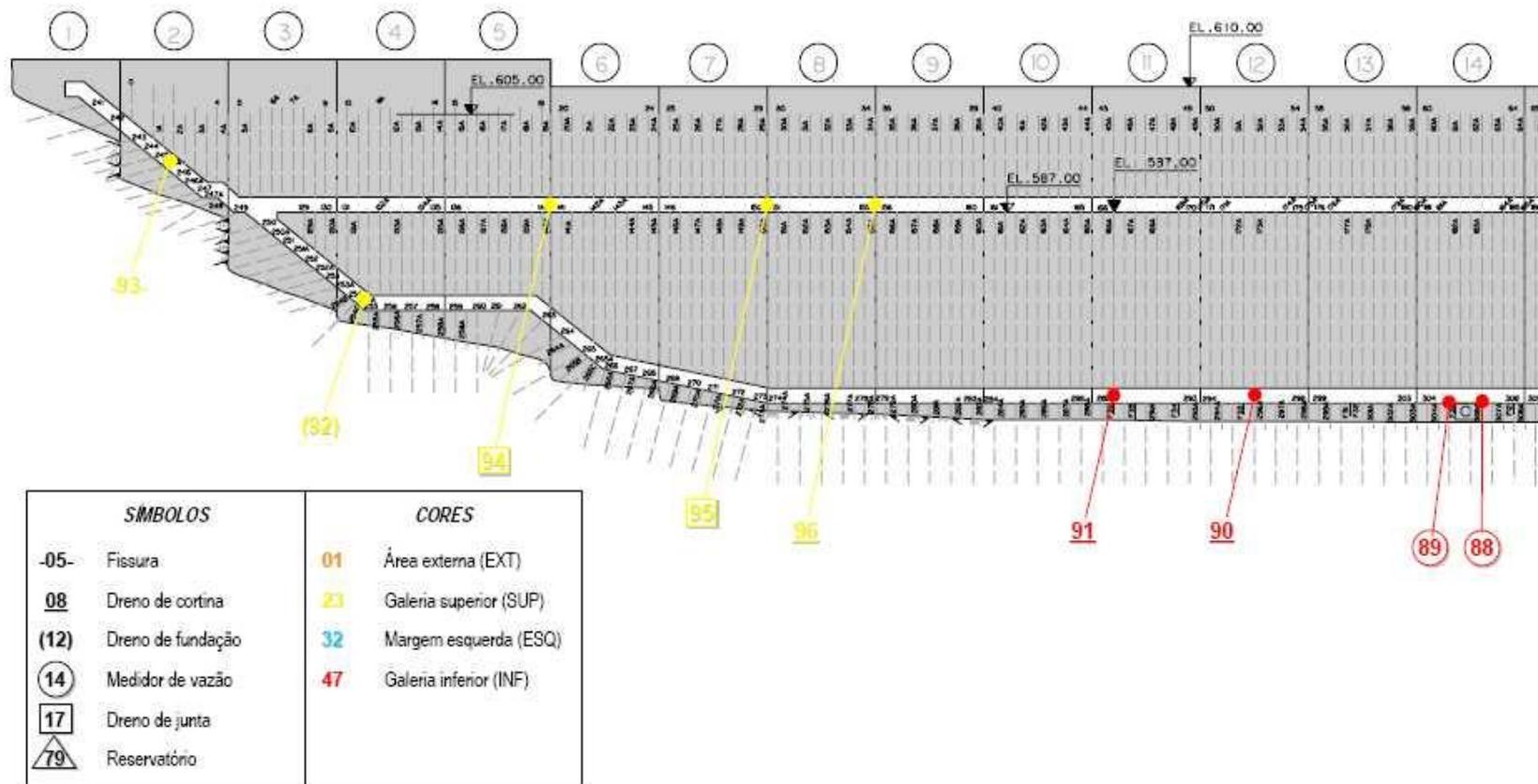


FIGURA 10 – PONTOS DE COLETA DE ÁGUA NA BARRAGEM DA UHE DRJ – MARGEM ESQUERDA – SEÇÃO LONGITUDINAL – VISTA DE JUSANTE

FONTE: LACTEC - RELATÓRIO DE ATIVIDADE MENSAL (2008)

TABELA 14 – PONTOS DE COLETA DE ÁGUA NA BARRAGEM DA UHE DRJ

PONTO DE COLETA	DRENO	BLOCO	GALERIA	PROFUNDIDADE (m)	VAZÃO (l/min)
DRENOS DA CORTINA SUPERIOR					
84	DRC 124	26	superior	11	instável
96	DRC 34A	8	superior	15	0,65
DRENOS DA CORTINA INTERMEDIÁRIA					
83	DRC 238	25	inferior	12	0,43
90	DRC 173	12	inferior	32	3,04
85	DRC 208	19	inferior	26	3,04
91	DRC 166A	11	inferior	32	0,11
DRENOS DA CORTINA INFERIOR					
92	DRC 254A (FUNDAÇÃO)	4	inferior	18	0,94
87	DRC 335 (FUNDAÇÃO)	19	inferior	16	1,52
DRENOS DA GALERIA DE ACESSO					
82	DRC ACESSO	22	de acesso	18	1,36
MEDIDORES DE VAZÃO					
88	MV 01	14	inferior		49,0
89	MV 02	14	inferior		32,5
DRENOS DE JUNTA					
95	B07/B08	07/08	superior		0,28
94	B05/B06	05/06	superior		0,38
FISSURAS					
86	FB 19	19	inferior		34,0
93	FB 02	02	superior		0,18
RESERVATÓRIO					
81	Superfície	---	---	0,5	---
80	Intermediário	---	---	20	---
79	Fundo	---	---	40	---

FONTE: a autora (2008)

3.3 CAMPANHAS DE COLETA

Neste trabalho foram considerados os resultados de análises referentes às campanhas de coletas programadas para serem realizadas a cada dois meses. Em função de problemas fortuitos foram necessários

ajustes nesta periodização. As coletas foram feitas nas datas apresentadas na Tabela 15, sendo as mesmas enumeradas.

TABELA 15 – DATAS DAS CAMPANHAS DE COLETA 2007/2008

Número da campanha	Data de coleta
1	06/03/2007
2	08/05/2007
3	17/06/2007
4	18/09/2007
5	20/11/2007
6	31/01/2008
7	19/03/2008
8	29/05/2008

FONTE: a autora (2008)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentadas as análises dos parâmetros levantados na pesquisa e as principais constatações levantadas sobre a percolação de água e a perda de massa nos locais de análise.

4.1 VAZÕES NOS PONTOS DE COLETA

Na Figura 11, encontra-se apresentado o gráfico referente às vazões nos pontos de coleta dos medidores de vazão (MV) da UHE DRJ. Observou-se que ao longo dos anos houve uma redução acentuada nos respectivos valores, mantendo-se a partir de então, praticamente constantes. Contribuiu mais significativamente o ponto fissura do bloco 19 que manteve altas vazões. Já, os drenos de junta vêm apresentando alterações dentro da sazonalidade reduzindo o valor nos períodos de verão. Como consta na Tabela 16, os pontos analisados representam 64% do total da vazão do MV1 e 22% do MV2 demonstrando que a maioria dos pontos de influência do MV2 não está sendo contemplada nesta pesquisa. Trata-se de um número grande de drenos, mas com baixas vazões. A água coletada no ponto da galeria de acesso foi proveniente de pequenas fissuras e infiltrações que ocorrem ao longo desta, não tendo influência de água proveniente de drenos.

TABELA 16 – PROPORÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS PONTOS NA VAZÃO TOTAL DA BARRAGEM EM PORCENTAGEM

	MV1	MV2
DRC	5%	6%
DF	5%	3%
DJ		2%
Fissura	54%	1%
Outros pontos não analisados	36%	78%

FONTE: a autora (2008)

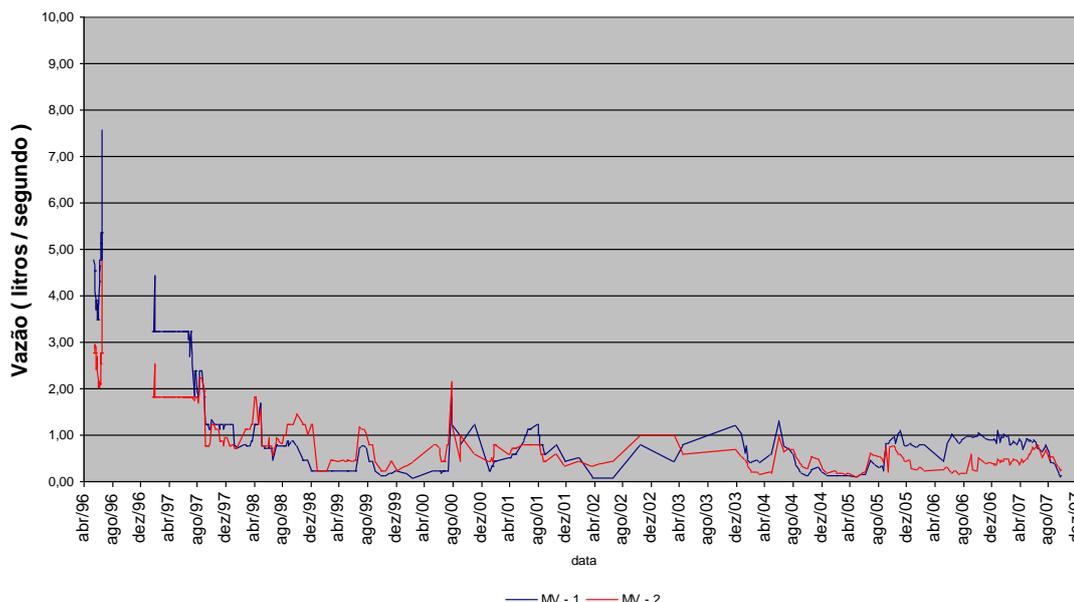


FIGURA 11 – GRÁFICO COM AS VAZÕES POR BLOCOS PROVENIENTES DE DRENOS E FISSURAS

FONTE: a autora (2008)

4.2 CONCENTRAÇÃO IÔNICA MÉDIA e pH NAS ÁGUAS DO RESERVATÓRIO E PERCOLADA

Na Tabela 17, encontram-se listados os resultados médios da concentração iônica de Ca^{2+} , Si^{4+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , SO_4^{2-} , Cl^- e pH obtidos na campanha de 2007/2008 referente às análises do reservatório nos pontos denominados superfície, 20 e 40 m de profundidade.

Conforme critérios apresentados por Biczok (1968), os resultados apresentados correspondem a uma qualidade de água praticamente não agressiva. A dureza da água do reservatório ficou em média de $(8,9 \pm 2,1)$ mg/l de carbonato, podendo ser classificada como semidura, com pouco ou nenhum efeito de ataque químico aos componentes do concreto (BICZOK, 1968). Comparado com os resultados obtidos nas campanhas anteriores não houve mudanças significativas.

TABELA 17 – RESULTADO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO – VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO

Concentração média (mg/L) e pH na água do reservatório			
Ca²⁺	2,2±0,7	K⁺	1,0±0,3
Si⁴⁺	5,0±1,9	Fe³⁺	0,6±0,7
Al³⁺	0,3±0,2	SO₄²⁻	0,6±0,3
Mg²⁺	0,9±0,2	Cl⁻	1,3±1,0
Na⁺	2,0±0,9	pH	7,1±0,2

FONTE: a autora (2008)

O pH das amostras do reservatório estão apresentados na Tabela 18 e Figura 12. A partir dos resultados obtidos, observou-se o aumento do caráter mais ácido da água na medida em que a coleta se aproximou do fundo do reservatório. Esta vem a ser a região de maior probabilidade de agressividade ao concreto da barragem (BICZOK, 1968).

O elevado desvio padrão dos resultados de superfície foi em função do aumento do pH na 6ª coleta influenciado provavelmente por uma fonte externa (excesso ou escassez de chuvas no período).

TABELA 18 – MÉDIA INDIVIDUAL DOS RESULTADOS DO pH DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO NOS TRÊS PONTOS ANALISADOS

pH	Superfície	20 m	40 m
pH médio	7,43±0,6	6,86±0,1	6,85±0,2

FONTE: a autora (2008)

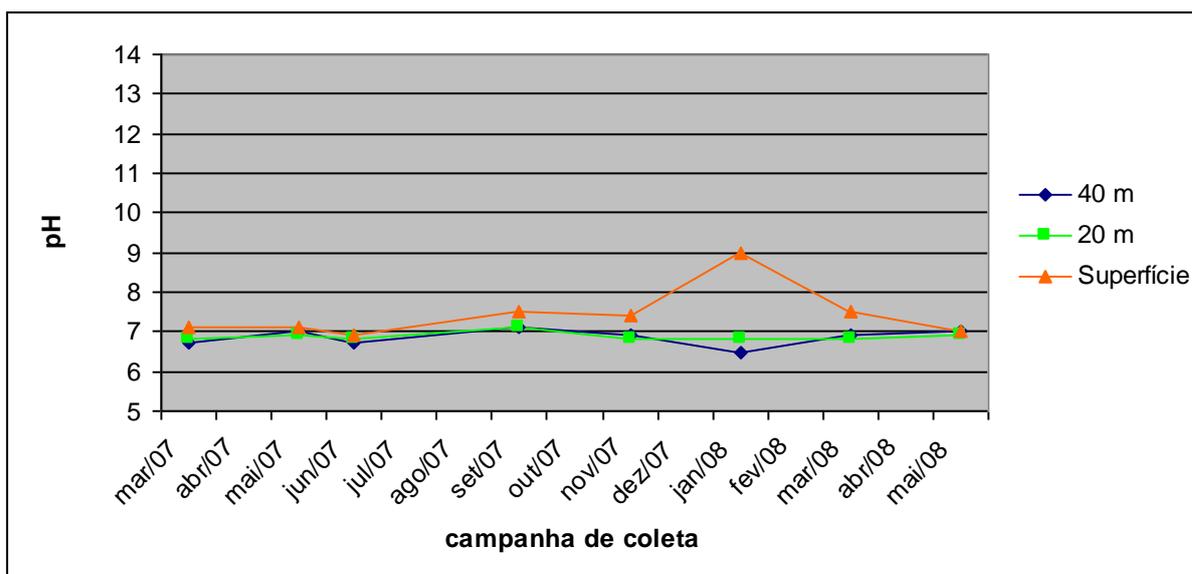


FIGURA 12 – ANÁLISE DO PH DO RESERVATÓRIO NOS PONTOS DENOMINADOS SUPERFÍCIE, 20 E 40 m DE PROFUNDIDADE

FONTE: a autora (2008)

Na Figura 13 pode ser observado que o pH das amostras foi um indicador de perda de massa pela estrutura. O pH variou em função da quantidade de álcalis ou ácidos dissolvidos nesta. Pode-se observar que os pontos de coleta da cortina superior, DRC 124 e 34A e, também, da galeria de acesso e do dreno da cortina intermediária DRC 238, foram os que apresentaram os maiores valores, indicando, com isto, maior arraste de material pela água. Os outros valores ficaram na faixa intermediária, entre o da água contida nos poros da estrutura em concreto e do reservatório, limite inferior estabelecido pela análise. Pode-se observar nos gráficos que os valores comparativos do reservatório corresponderam a uma média entre os valores medidos na superfície, a 20 m e 40 m de profundidade.

O dreno de fundação DRC 254A foi o que apresentou no período de análise o pH bastante alcalino. A água deste dreno vem da parte rochosa, com pouca ou nenhuma pasta de cimento contida no caminho. O que pode estar acontecendo é um desvio no sentido de percolação da água, sendo que esta se encontra atingindo parte da estrutura concretada. Outra provável hipótese é da mesma ser proveniente de uma das fontes de água mineral

existente na região, sem possibilidade de análise.

O valor do pH médio da água dos pontos denominados fissura e drenos de junta foi similar ao da água do reservatório. Tal resultado indica que a água tem pouco ou nenhum efeito de lixiviação ou dissolução de sais na região de análise. Alguns pontos onde o pH apresentou-se ligeiramente superior ao da água do reservatório, podem ter sido consequentes da baixa vazão ou de uma maior permanência desta no interior do dreno.

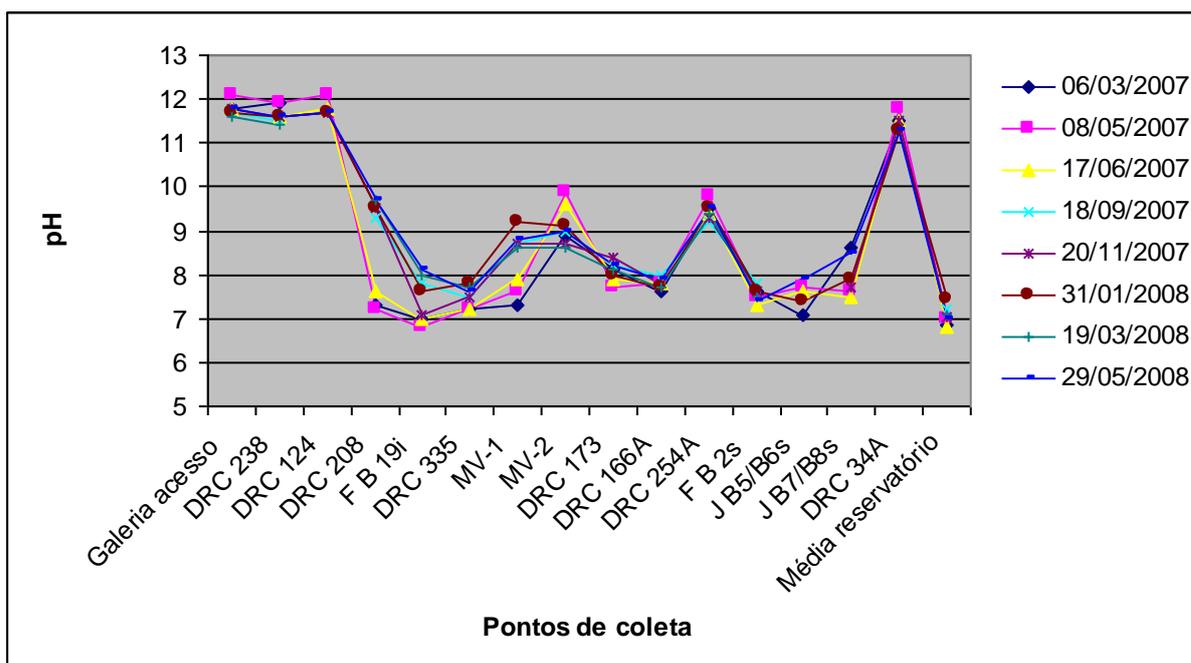


FIGURA 13 – ANÁLISE DO PH DA ÁGUA PERCOLADA NA BARRAGEM EM FUNÇÃO DOS PONTOS DE COLETA

FONTE: a autora (2008)

4.3 CONDUTIVIDADE

Na Figura 14, encontram-se apresentados na forma gráfica os resultados da condutividade iônica medida nas amostras de cada ponto de coleta e em função do tempo. Percebeu-se uma estreita relação com a quantidade de álcalis e sais dissolvidos na água. Praticamente, as curvas mantiveram o mesmo comportamento observado na análise do pH. A elevada condutividade nos pontos Galeria de acesso, DRC 238, DRC 124 e DRC 34 A

deve-se à dissolução de sais como pode ser verificado em outras análises apresentadas na seqüência.

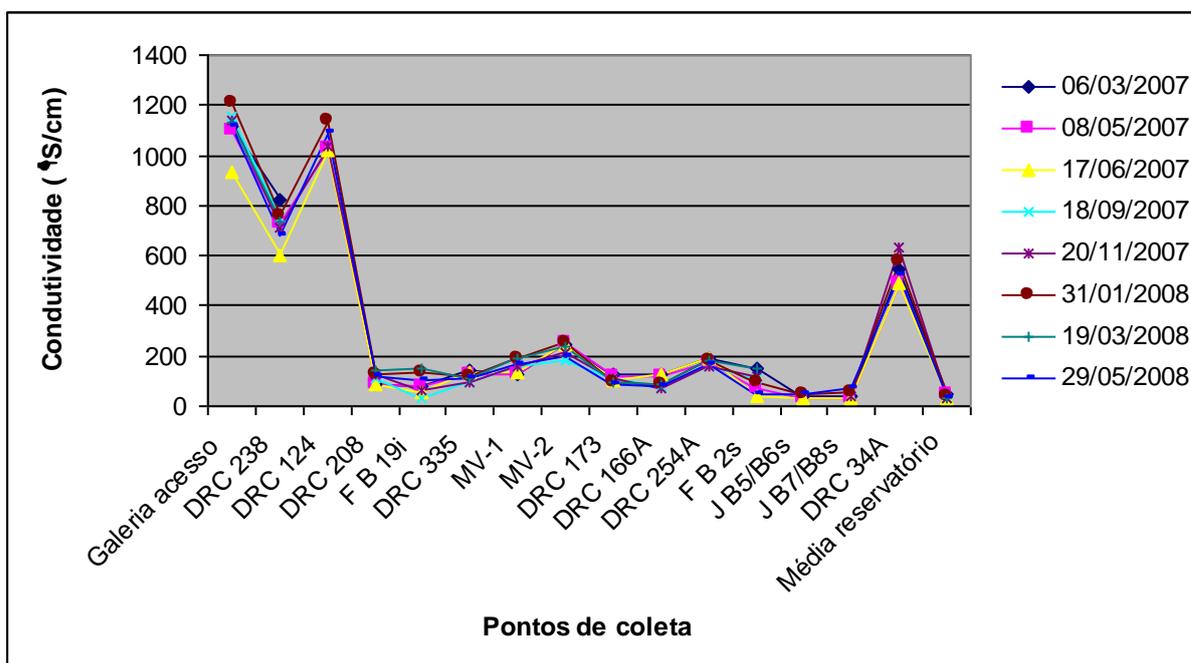


FIGURA 14 – CONDUTIVIDADE IÔNICA DA ÁGUA ANALISADA NA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

4.4 DUREZA

Conforme ilustrado na Figura 15 os pontos com dureza mais elevada são na galeria de acesso, DRC 238, DRC 124 e DRC 34A indicando a maior concentração de cátions dissolvidos, conforme citado anteriormente e corroborado pelas análises do pH e da condutividade.

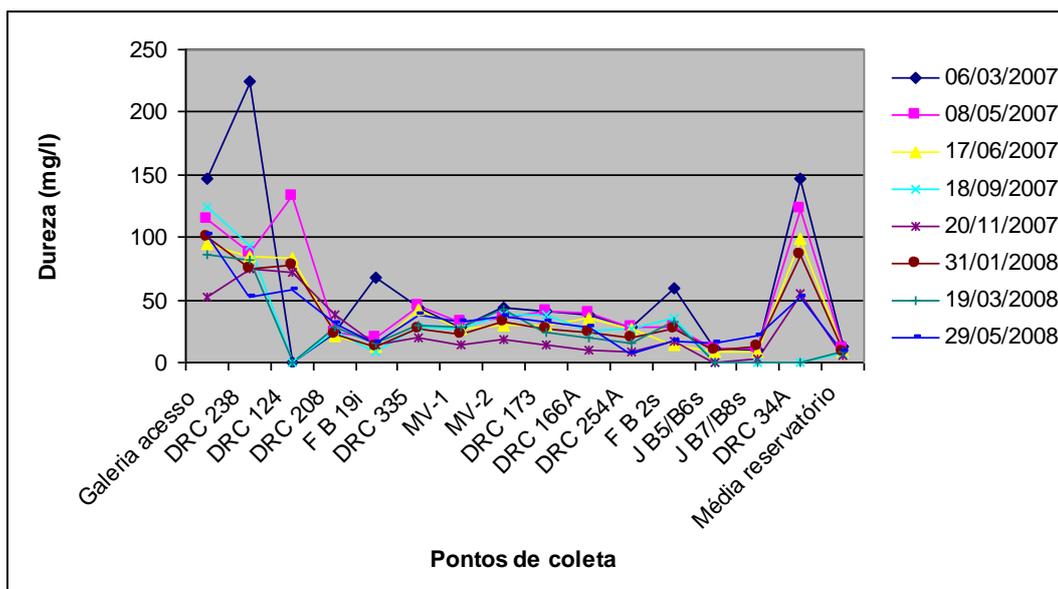


FIGURA 15 – DUREZA DAS ÁGUAS ANALISADAS NA UHE DRJ, CORRESPONDENTES AOS PONTOS DE PERCOLAÇÃO E DO RESERVATÓRIO

FONTE: a autora (2008)

4.5 ALCALINIDADE À FENOLFTALEINA E ALCALINIDADE TOTAL

Os resultados obtidos pelas análises das águas percoladas nestas coletas podem ser visualizados nas Figuras 16 e 17, representando respectivamente a alcalinidade à fenolftaleína e a alcalinidade total comparativa com a média dos valores da água encontrada no reservatório.

Conforme os resultados apresentados verificou-se que nos pontos denominados galeria de acesso, MV1, MV2, DRC 238, DRC 124 e DRC 34A foram encontrados os maiores valores. No ponto galeria de acesso houve um acúmulo de material carbonatado ao longo da canaleta e paredes que puderam ter influência nos resultados locais, bem como nos resultados obtidos nos MVs. Nos demais pontos os resultados conduziram a uma provável perda dos compostos alcalinos.

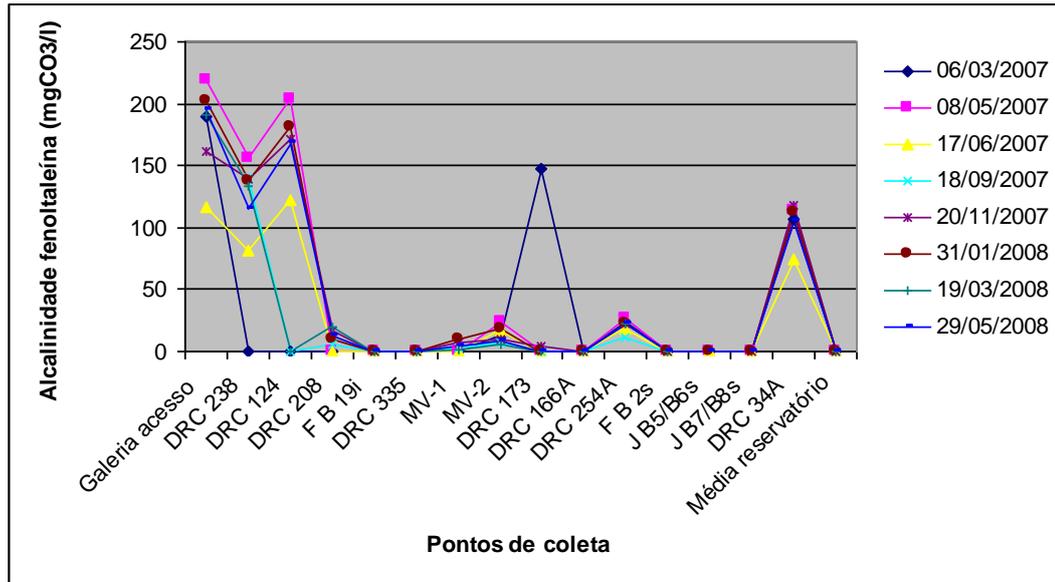


FIGURA 16 – ALCALINIDADE À FENOLFTALEÍNA MEDIDA NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

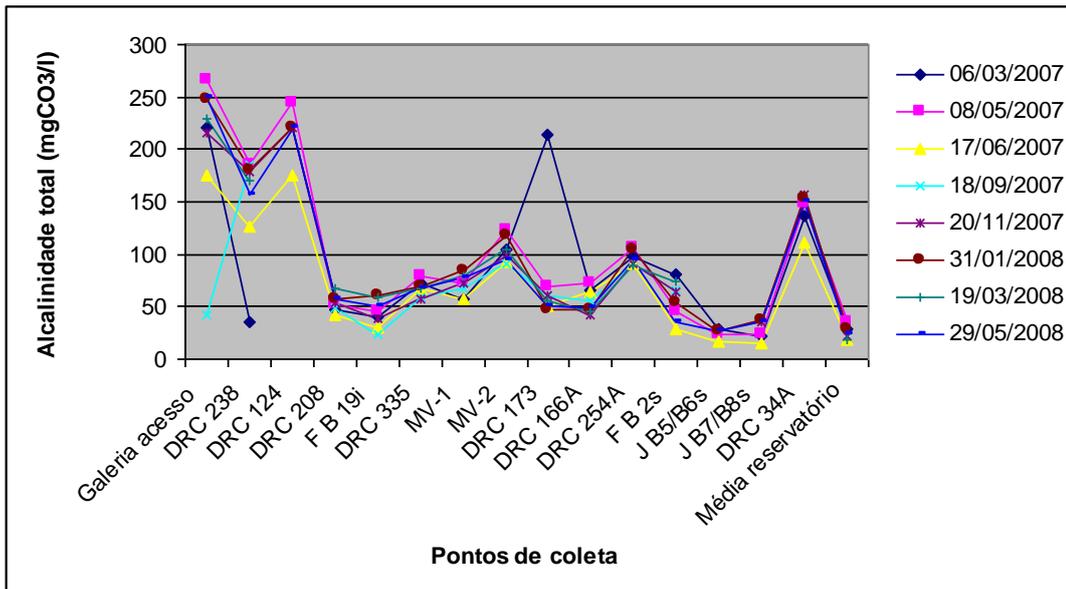


FIGURA 17 – ALCALINIDADE TOTAL MEDIDA NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

4.6 CONCENTRAÇÃO IÔNICA

Nas Figuras 18 a 31 estão representadas as análises dos pontos de coleta em função dos cátions cálcio, magnésio, sódio, potássio, ferro, alumínio e silício e dos ânions fluoreto, fosfato, sulfato, cloreto, brometo, nitrato e nitrito.

A dissolução do cálcio (Figura 18) foi mais acentuada na fissura do bloco 19, isto ocorreu, provavelmente, pelo grande volume de água que passa neste ponto arrastando os compostos do concreto. Durante as coletas dos meses 03, 05 e 06 de 2007 ocorreram as maiores vazões registradas no período, elevando conseqüentemente o teor de cálcio lixiviado. Analisando a Figura 18 pode-se observar que em março de 2007 a fissura do bloco 19 apresentou índices de cálcio dissolvido maiores que no MV1. Isto ocorreu, provavelmente, devido à sua sedimentação ao longo da canaleta de drenagem influenciando nos resultados posteriores. A análise do íon Ca^{2+} é importante por ele ser um dos responsáveis diretos pela resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Durante o período de análise compreendido entre 03/2007 e 05/2008 cerca de 61 mg/l de Ca^{2+} foram dissolvidos na água percolada nos pontos de saída da barragem (MV1, MV2 e Galeria de acesso), totalizando nestes três pontos 21 kg/mês considerando a vazão em cada ponto, com uma estimativa de 254 kg/ano de cálcio.

Cabe ressaltar que este material pode ter lixiviado do corpo da barragem e ter se depositado sobre as canaletas, sendo arrastado pela vazão no momento da coleta.

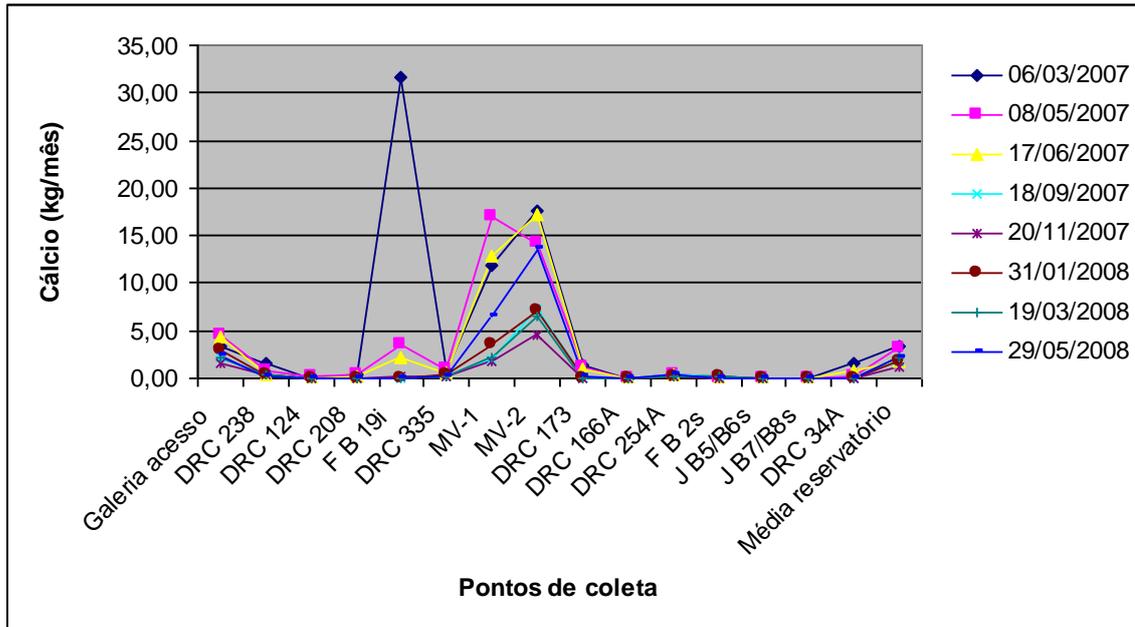


FIGURA 18 – CÁLCIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

Em análises anteriores foi observada uma elevada concentração do íon Mg^{2+} nos blocos 11, 14, 15, 17, 18 e 19 provavelmente devido a utilização de finos de calcário contendo carbonatos duplos $CaMg(CO_3)_2$, além do próprio cimento. Este comportamento ainda está presente conforme descrito na Figura 19. O íon magnésio quando combinado com o íon sulfato é perigoso, pois provoca a degradação dos componentes hidratados do cimento (corrosão magnesiana). Quando em contato com cimento pozolânico, como no caso estudado, ocorrem mais rapidamente que nos concretos com cimento comum (BICZOK, 1968).

O total de álcalis dissolvidos durante o período de análise (Figura 20 e 21) correspondeu a 45% do total de íons dissolvidos, considerando a média dos valores encontrados, sendo estes valores correspondentes a 143 mg/l de água percolada e 731 kg/ano calculando-se por extrapolação com base na vazão correspondente nos pontos MV1, MV2 e na galeria de acesso. Estes componentes são os principais do concreto provenientes da dissolução do cimento.

Na maioria das análises de água o íon Fe não foi detectado pois o

metal precipita no meio devido ao pH alcalino, como pode ser visualizado na Figura 22. A sua presença junto à fissura (pH menor) e ao MV1 (pH mais elevado) corrobora o exposto, pois a concentração é maior no primeiro ponto. Os íons Fe foram arrastados quando os drenos e fissuras apresentaram maiores valores de vazão, referentes às campanhas de coleta nos meses de março e maio de 2007. No ponto de coleta FB 19i (fissura bloco 19) houve depósito de Fe^{3+} junto da parede na galeria de drenagem.

A dissolução do silício normalmente representa a dissolução dos agregados e do basalto presente, na forma de silicatos alcalinos de maior solubilidade em toda subestrutura da barragem, conforme análise apresentada anteriormente, assim como a dissolução do cimento (Figura 23).

O alumínio (Figura 24) está presente na composição dos agregados e do cimento em aproximadamente 15%, portanto as concentrações constantes nas análises são oriundas da dissolução destes dois elementos presentes no concreto, apesar da baixa concentração (0,22%).

A concentração de fluoreto, conforme mostrado na Figura 25, não é muito significativa, sendo representativa nos pontos da galeria de acesso e MVs. Os fluoretos, quando combinados com outros compostos do concreto, atuam de forma benéfica elevando o grau de dureza. Na forma ácida pode reagir com os silicatos presentes, destruindo suas ligações químicas.

Os cloretos, quando presentes, podem também reagir com os metais da armadura provocando a degradação da pasta de cimento endurecida, ocasionando a lixiviação de alguns componentes. Conforme mostrado na Figura 26 a maior concentração de cloretos analisada pertence ao reservatório.

Os nitratos quando presentes degradam o concreto sem causar expansão, formando novos compostos solúveis por troca iônica. A concentração de nitratos presentes nas amostras (Figura 27) é baixa, sendo mais significativa nos MVs e reservatório. Sua origem pode vir de adubos e defensivos utilizados nas inúmeras propriedades agrícolas instaladas nas margens do reservatório.

Os nitritos (Figura 28), assim como os nitratos atuam mediante troca iônica transformando-se em outros compostos que podem ou não atacar o concreto. A concentração de nitritos é baixa, acentuando-se apenas nos MVs quando a vazão da galeria estava elevada devido à abertura de juntas e fissuras, indicando a livre comunicação entre o reservatório e o ponto de coleta, nestes casos.

A maioria dos processos de degradação, causados por formação de sais, é devida a ação agressiva dos sulfatos. Íons negativos como o SO_4^{2-} e Cl^- são considerados agressivos ao concreto, dependendo da concentração e composição química (BICZOK, 1968). Os cloretos estão presentes na água do reservatório em baixas concentrações. Os sulfatos mais perigosos para o concreto a base de cimento Portland são os de amônia, cálcio, magnésio e sódio. Os sulfatos de potássio e alumínio são menos prejudiciais. A concentração de sulfatos presente nas amostras está representada na Figura 29. Infelizmente, a concentração encontrada não foi suficiente para a determinação da fase química presente na água, por difratometria de raios X.

As Figuras 30 e 31 representam os íons brometos e fosfatos e mostram uma baixa dissolução destes na água percolada.

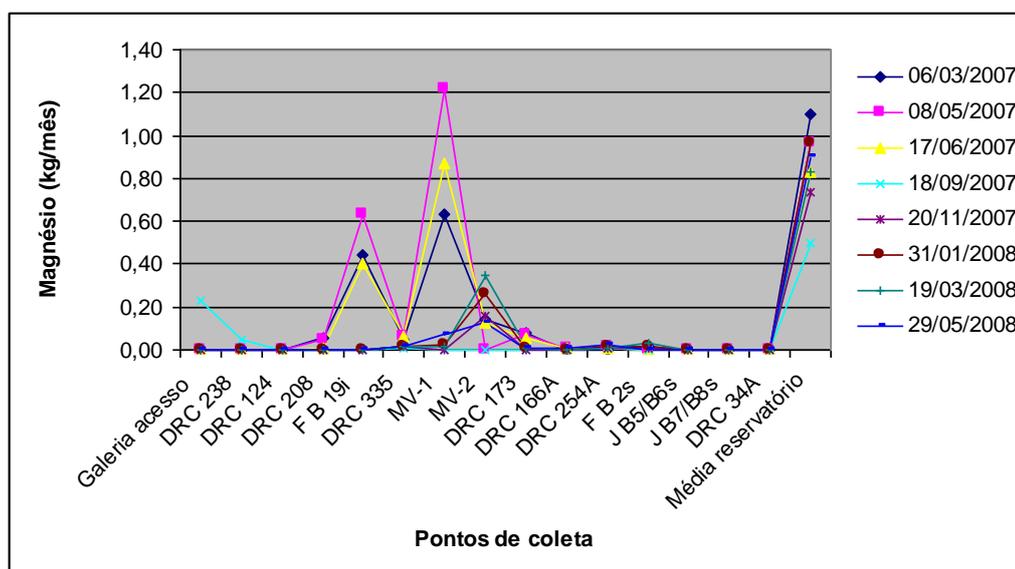


FIGURA 19 – MAGNÉSIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

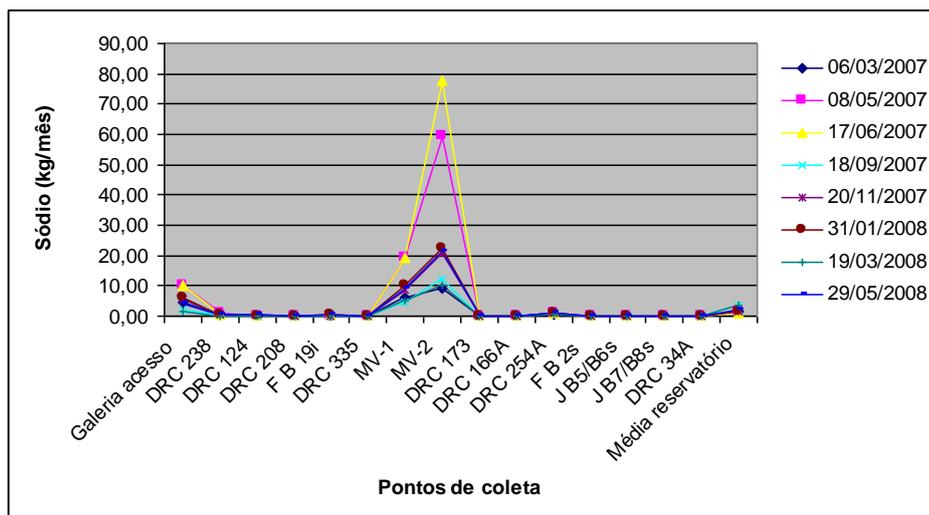


FIGURA 20 – SÓDIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

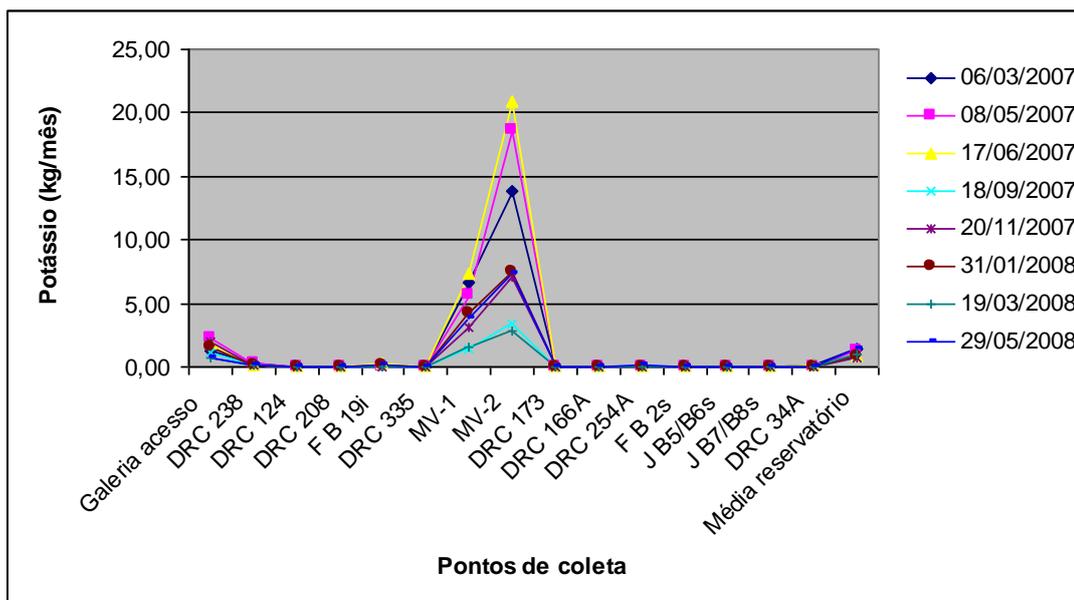


FIGURA 21 – POTÁSSIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

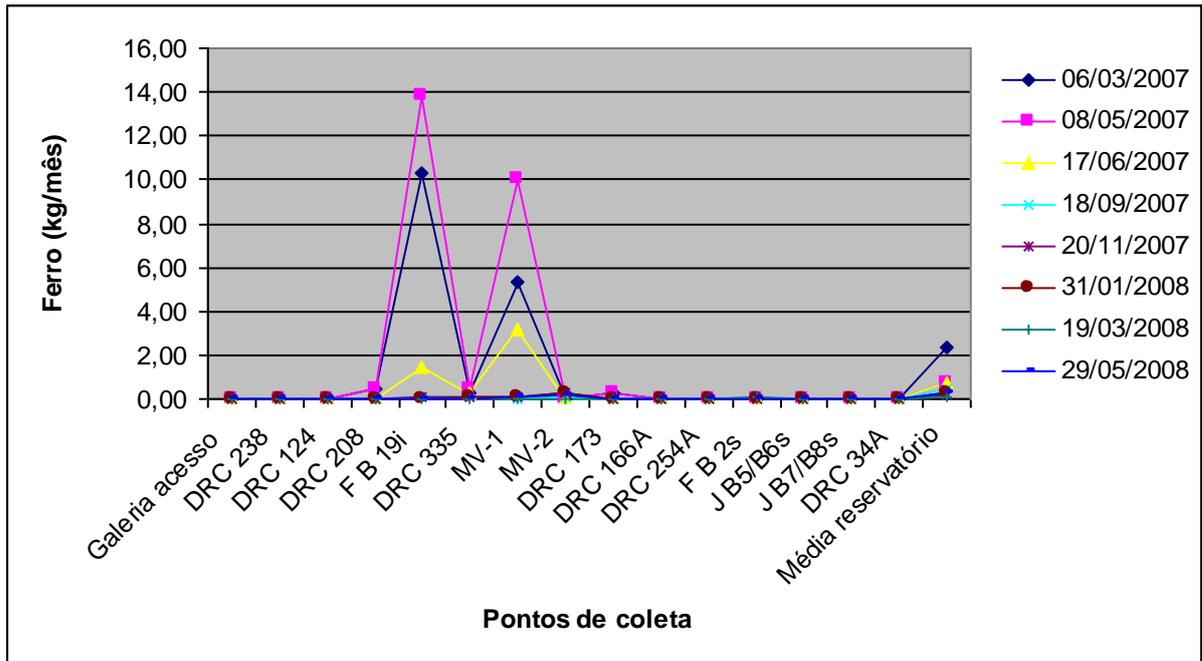


FIGURA 22 - FERRO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

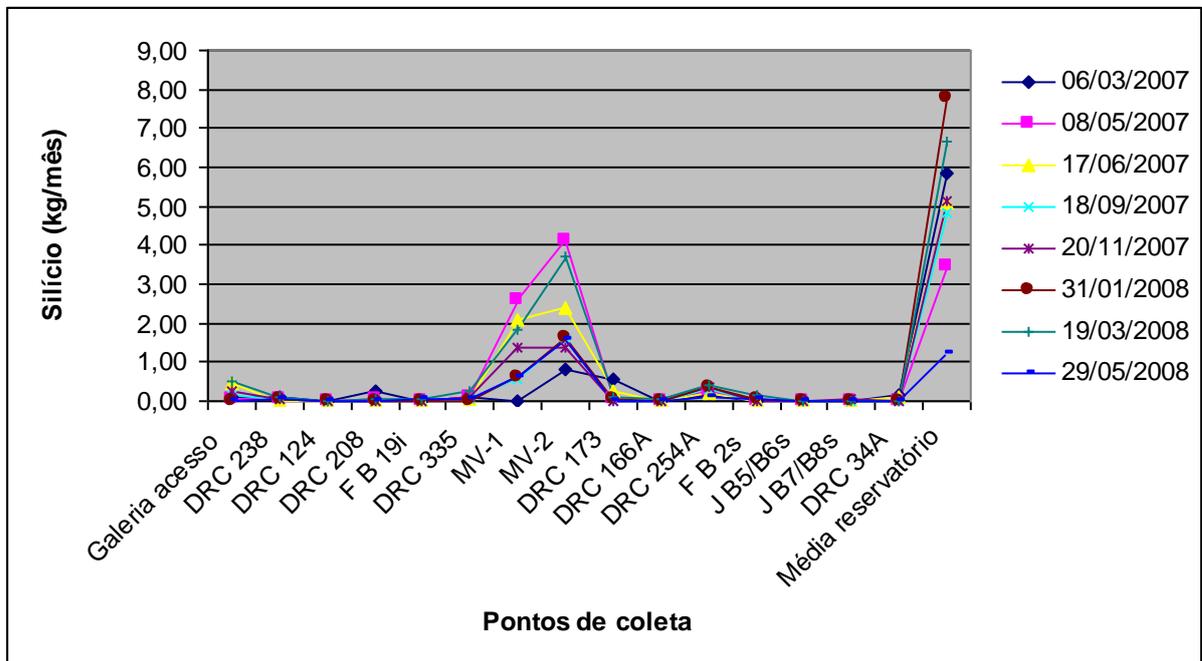


FIGURA 23 – SILÍCIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

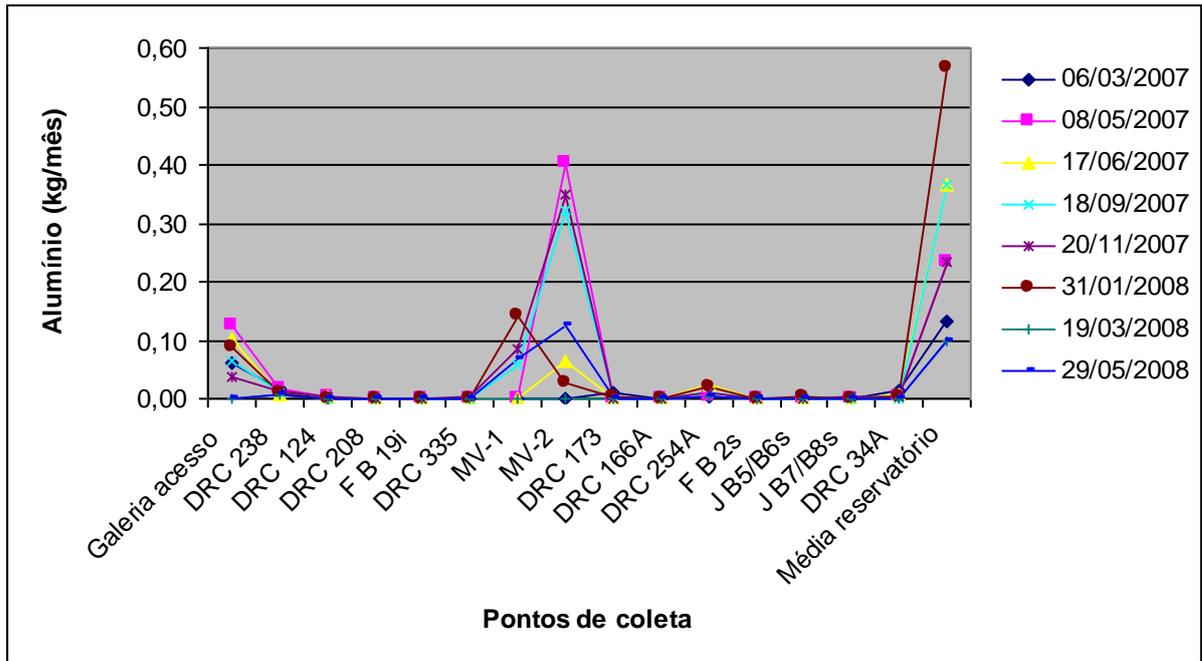


FIGURA 24 – ALUMÍNIO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

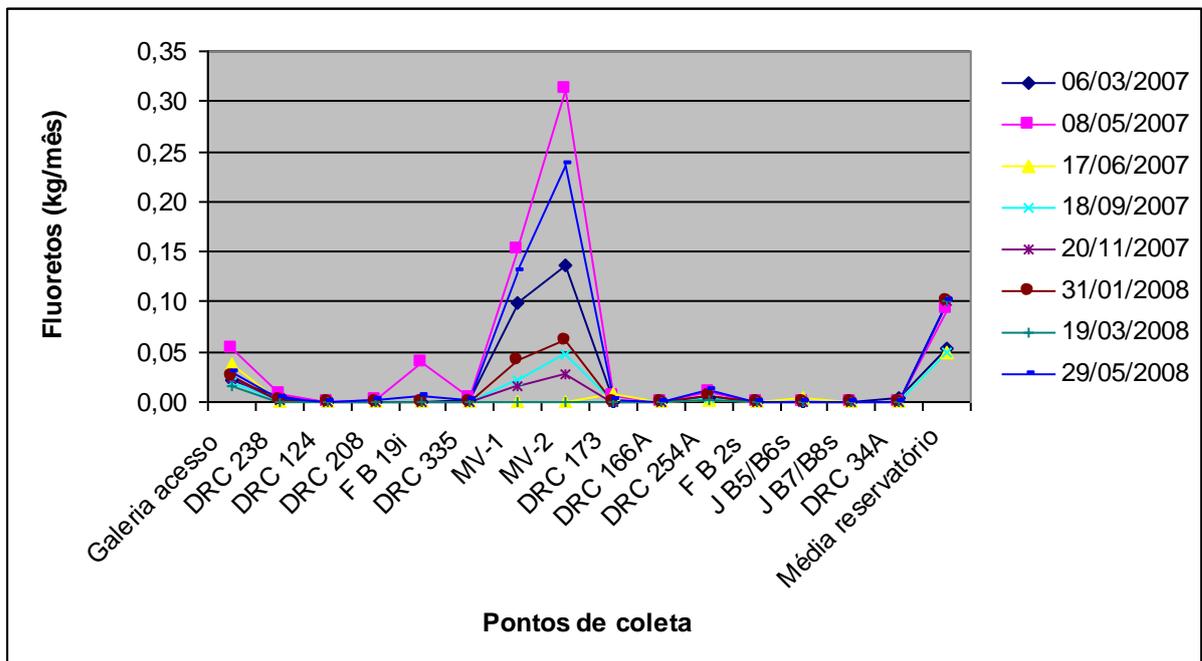


FIGURA 25 – FLUORETO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

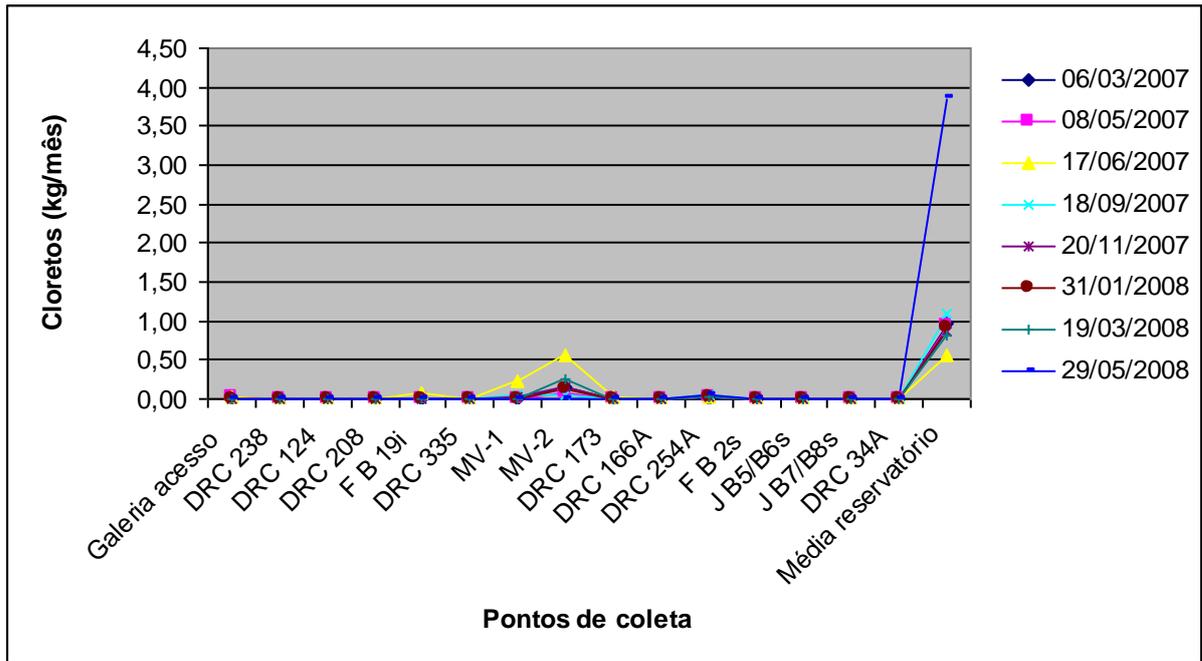


FIGURA 26 – CLORETO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

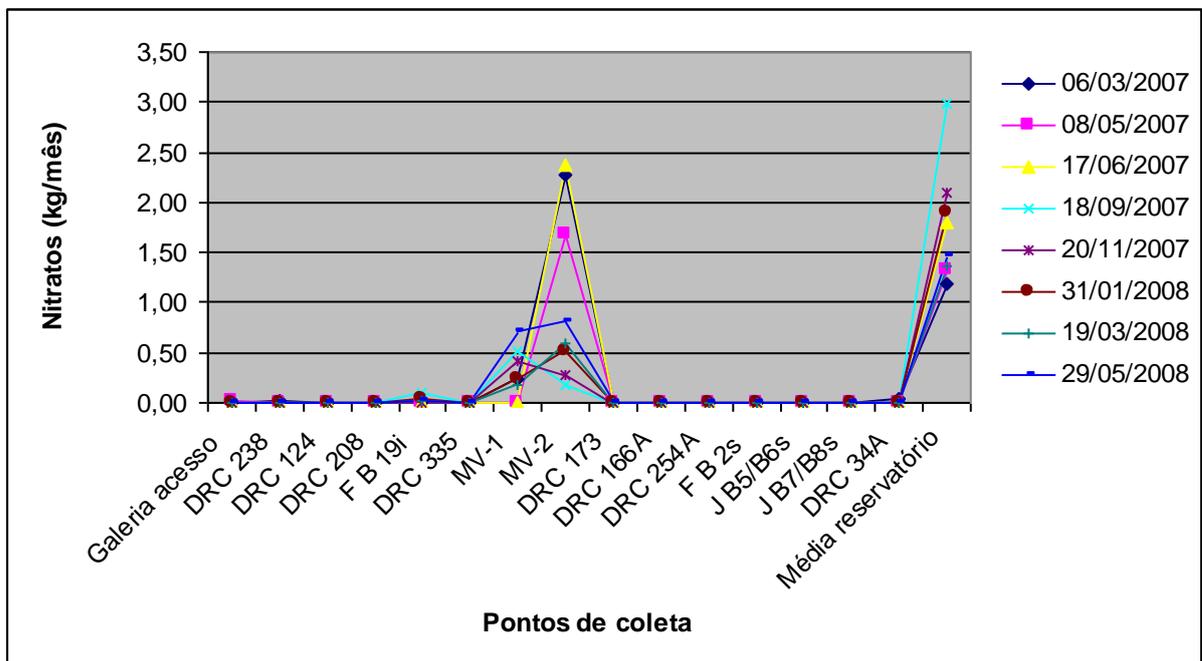


FIGURA 27 – NITRATO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

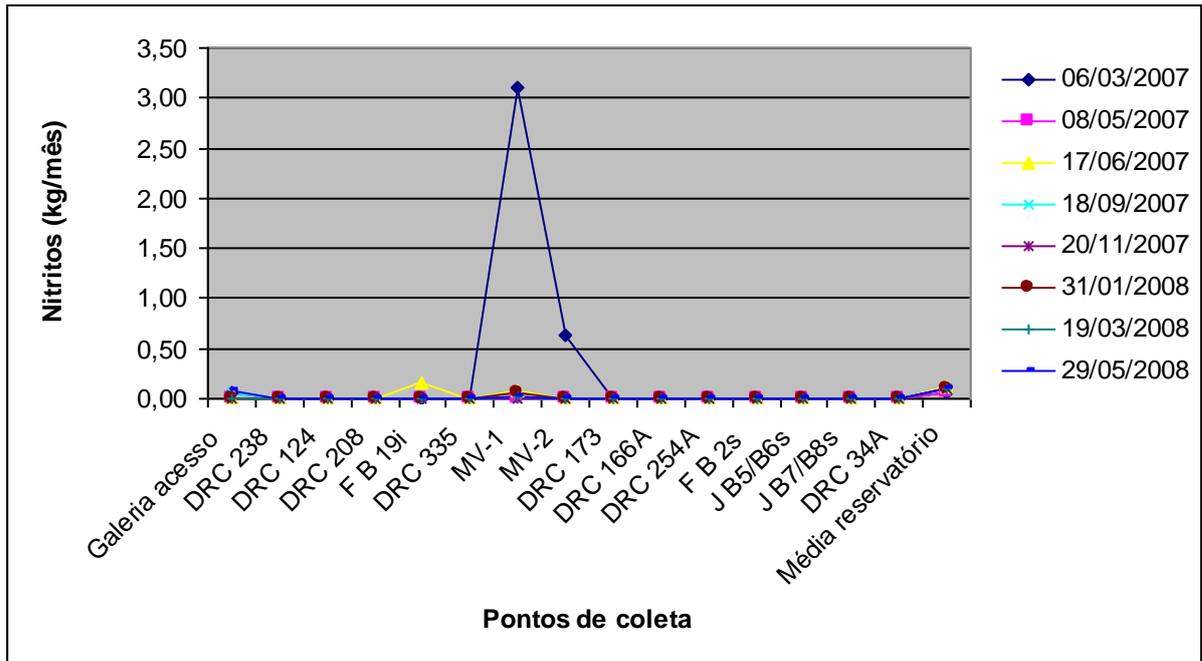


FIGURA 28 – NITRITO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

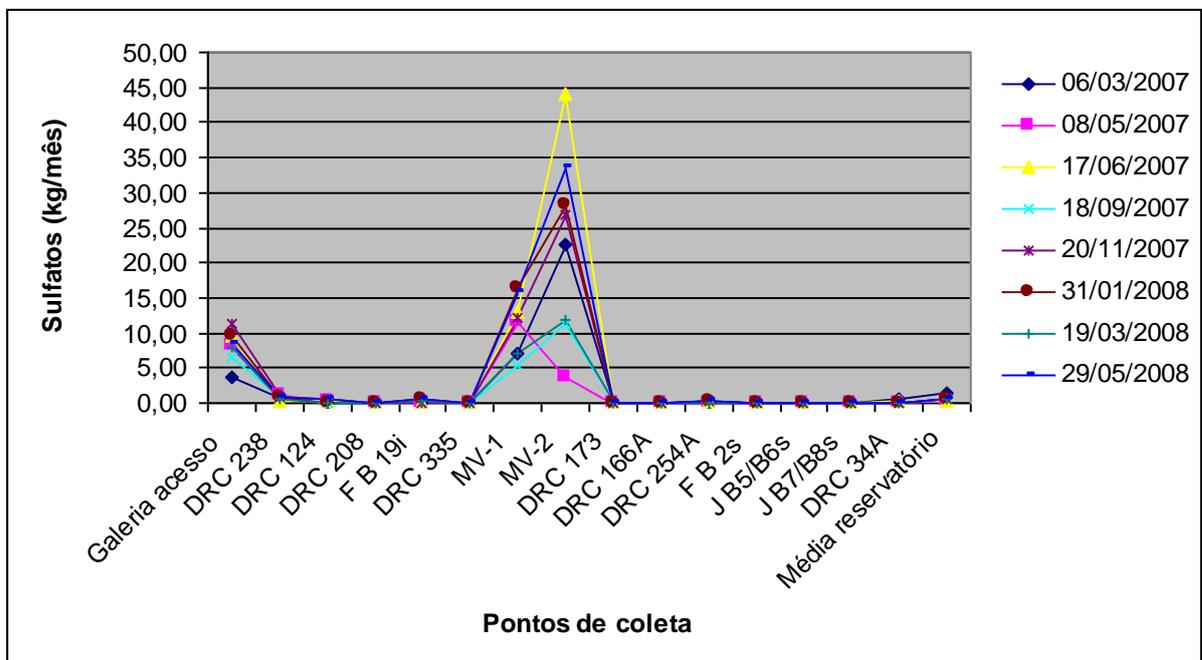


FIGURA 29 – SULFATO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

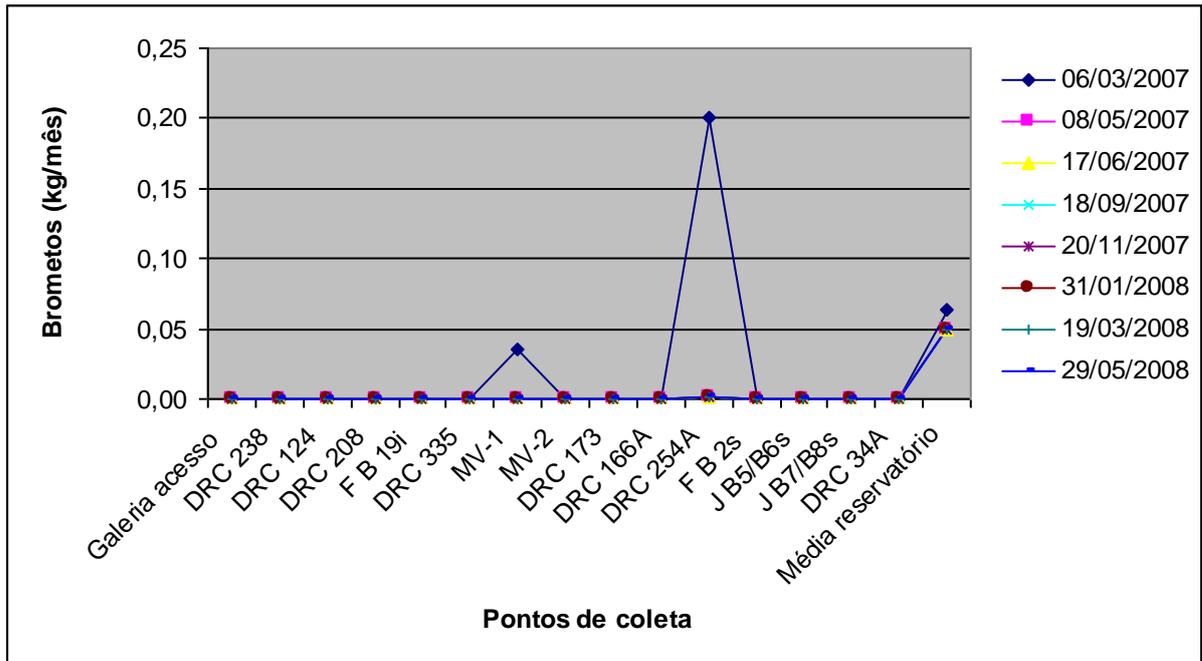


FIGURA 30 – BROMETO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

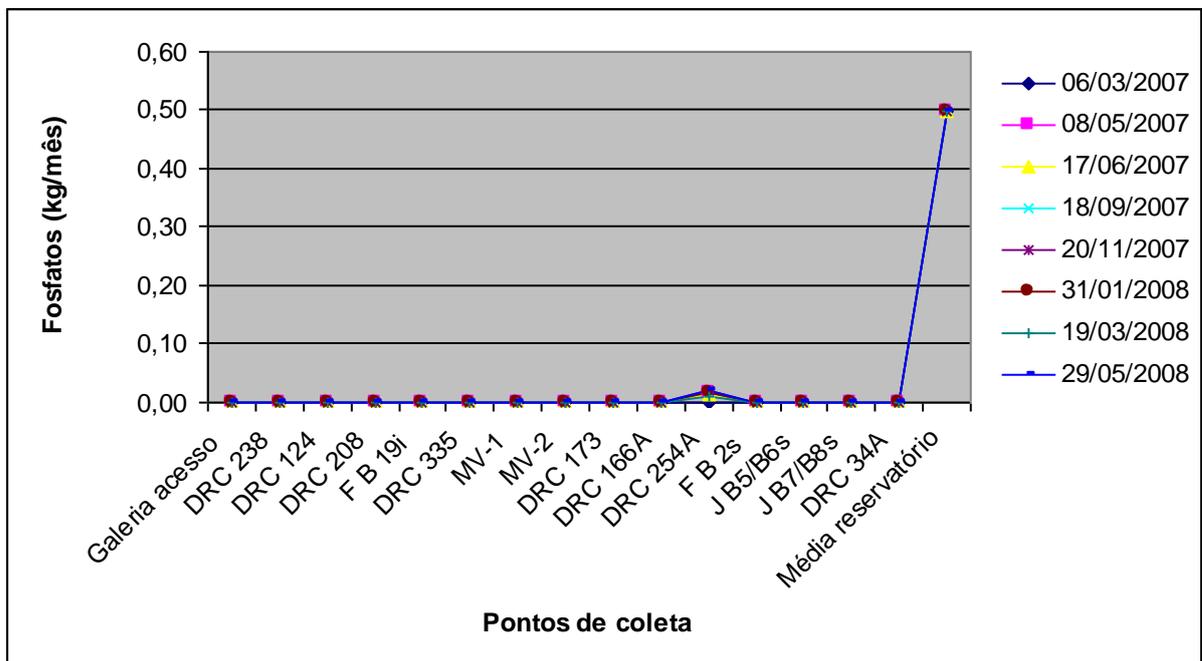


FIGURA 31 – FOSFATO MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

4.7 SÓLIDOS TOTAIS, SUSPENSOS E DISSOLVIDOS

Os valores mostrados na Figura 32 são baixos sendo mais representativos em função da fissura do bloco 19. Estes sólidos provavelmente sejam provenientes do reservatório.

Como se pode visualizar na Figura 33, os sólidos dissolvidos totais estão presentes em maior quantidade juntos aos MVs, galeria de acesso e fissura do bloco 19. Este resultado é consequente do arraste dos íons precipitados ao longo do tempo presentes nas canaletas e a força que a água exerce ao passar por estes pontos.

Assim como nos casos anteriores, na Figura 34 estão representadas as curvas da concentração de sólidos encontrados nas amostras. Os valores resultantes não foram significativos. A Figura 34 é a somatória dos resultados obtidos nas Figuras 32 e 33.

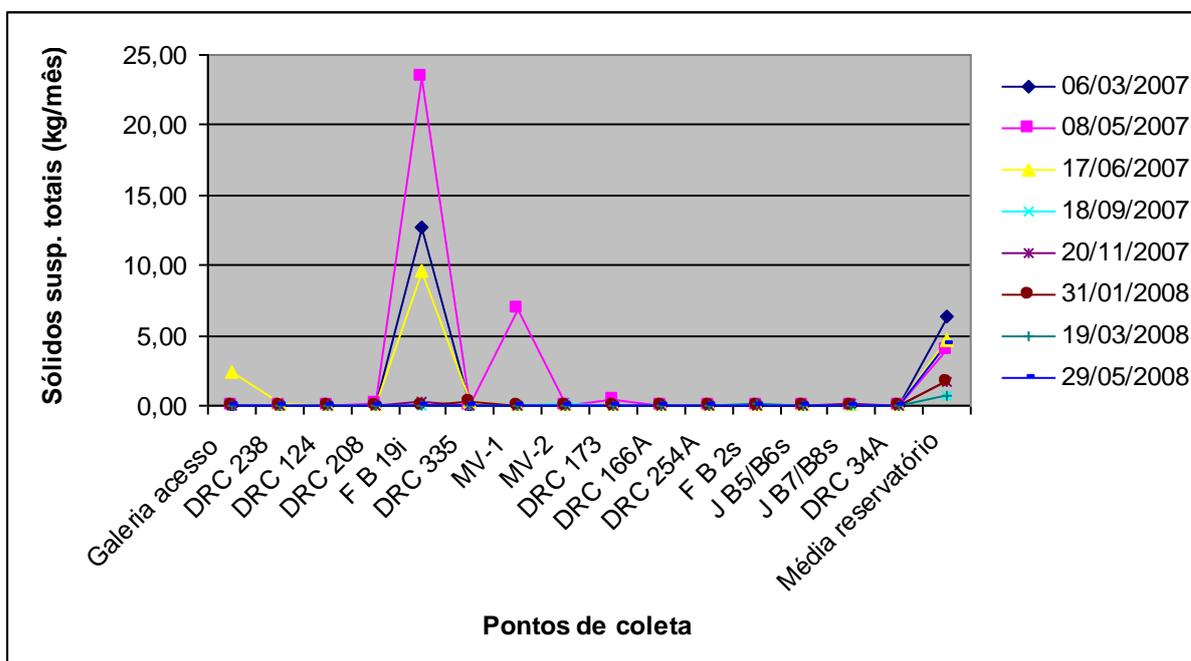


FIGURA 32 – SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

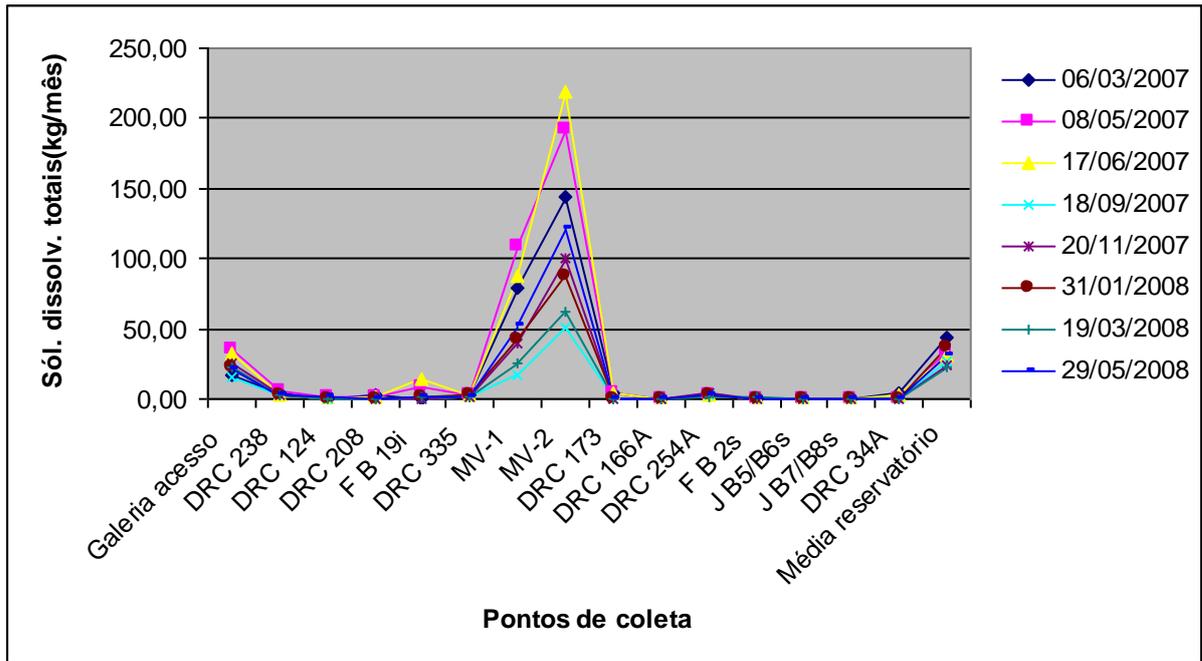


FIGURA 33 – SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS MEDIDO NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

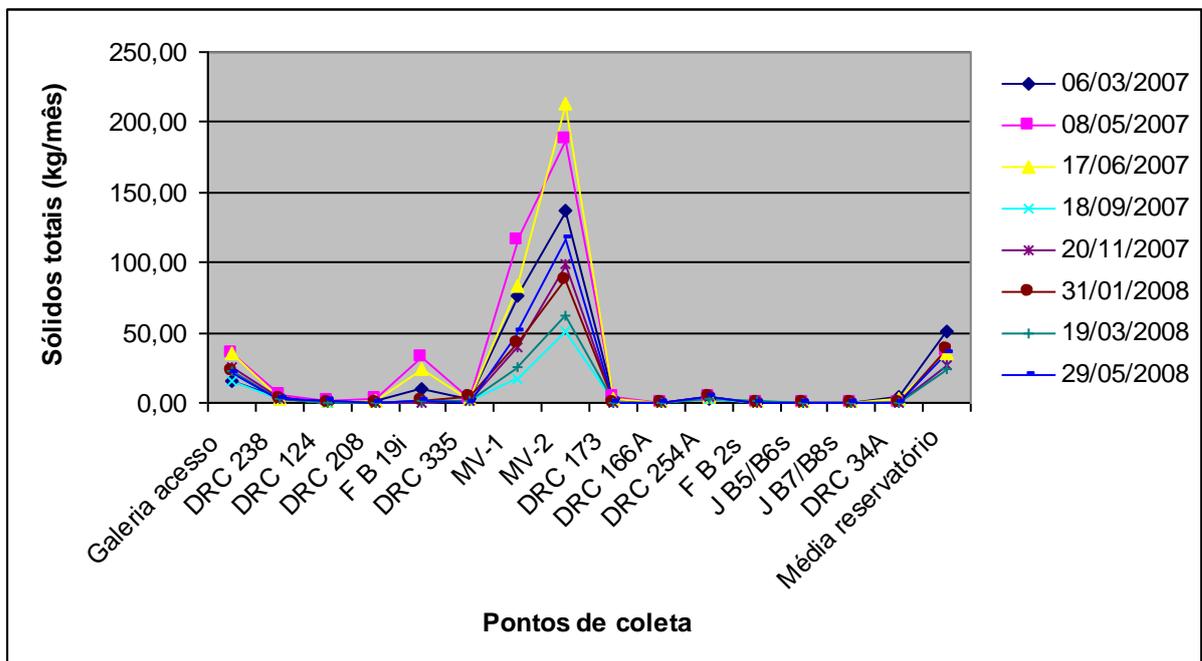


FIGURA 34 – SÓLIDOS TOTAIS MEDIDOS NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

4.8 PERDA DE MASSA ESTIMADA NOS DRENOS, MEDIDORES DE VAZÃO E FISSURAS ANALISADAS NO PERÍODO DE DOIS ANOS NA UHE DRJ

A perda de massa média pelos pontos de coleta da UHE DRJ encontra-se apresentada por data de amostragem na Tabela 19 e Figura 35. Os valores apresentados foram calculados a partir do valor obtido pela análise do ponto, descontados os respectivos valores da água do reservatório.

Em destaque, encontram-se os dois pontos de confluência de toda a água percolada pelos drenos e fissuras, pontos MV1 e MV2 da barragem. Pode-se observar que a somatória individual dos pontos analisados não é equivalente aos respectivos MVs (esquerda e direita hidráulica), sendo, na sua maioria, menores. Esta diferença diz respeito à impossibilidade de se analisar todos os pontos de contribuição, devido às suas pequenas vazões diárias, sendo considerados e analisados somente os pontos mais representativos (com maior vazão e/ou localização fundamental).

O valor médio das perdas de massa pelo tipo de ponto de coleta está apresentado na Tabela 20.

Considerando-se o valor médio da perda de massa por ambos os pontos de confluência, MV1 e MV2, extraindo-se aqueles característicos dos drenos de fundação, por, teoricamente, não corresponder à uma perda de massa direta da estrutura e extrapolando para 12 meses de análise, a partir de 06/03 até 19/03, teve-se um resultado equivalente a, aproximadamente, 980 kg/ano, após 12 anos de operação.

A quantidade de massa considerada pode ser analisada em função do tipo de íon dissolvido e lixiviado, conforme apresentado na Tabela 21.

Os cátions extraídos em concentrações mais expressivas, foram: Na⁺, Ca²⁺, K⁺, Si⁴⁺, Fe²⁺; e, para os ânions, destaca-se o íon sulfato. Este último pode ser conseqüente dos sulfatos alcalinos e gipsita presentes no cimento,

bem como nos próprios agregados. A Figura 36 representa o total de íons lixiviados em cada campanha de coleta e análise.

O íon cálcio, por ser o maior responsável pela manutenção da estrutura monolítica e resistência mecânica é o mais preocupante, devendo ser acompanhado da sua extração ao longo do tempo (BICZOK, 1968).

TABELA 19 – VALORES DE PERDA DE MASSA PELA ÁGUA PERCOLADA NA ESTRUTURA DE CONCRETO DA UHE DRJ, ENTRE 2007 E 2008

PONTOS	ANO 2007					ANO 2008		
	06/03	08/05	17/06	18/09	20/11	31/01	19/03	29/05
Galeria acesso	13,09	25,55	26,45	12,09	22,01	21,50	14,29	16,21
DRC 238	3,40	3,19	1,66	1,72	2,31	2,56	1,57	1,98
DRC 124	-	0,64	0,11	-	0,83	0,16	-	1,25
DRC 208	1,27	1,09	0,33	0,17	0,12	0,10	0,28	0,36
F B19 i	42,72	18,25	4,90	0,25	0,66	1,94	0,87	1,56
DRC 335	1,30	1,66	1,17	0,50	1,16	1,32	1,37	0,62
MV-1	15,50	25,42	27,17	16,03	22,42	28,34	19,22	29,37
MV-2	72,74	81,18	136,59	22,55	50,11	47,35	23,68	55,53
DRC 173	2,45	1,70	1,41	0,12	0,07	0,47	0,49	0,37
DRC 166A	0,07	0,13	0,10	0,04	0,04	0,06	0,14	0,14
DRC 254A	1,08	1,53	1,61	1,51	1,81	1,74	1,35	1,82
F B2 s	0,17	0,06	0,05	0,15	0,18	0,54	0,82	0,39
J B5/B6 s	0,03	0,01	0,04	-	-	0,09	-	0,11
J B7/B8 s	0,01	0,02	0,01	-	0,94	0,09	-	0,01
DRC 34A	2,64	0,40	1,55	-	0,23	0,25	-	0,19

FONTE: a autora (2008)

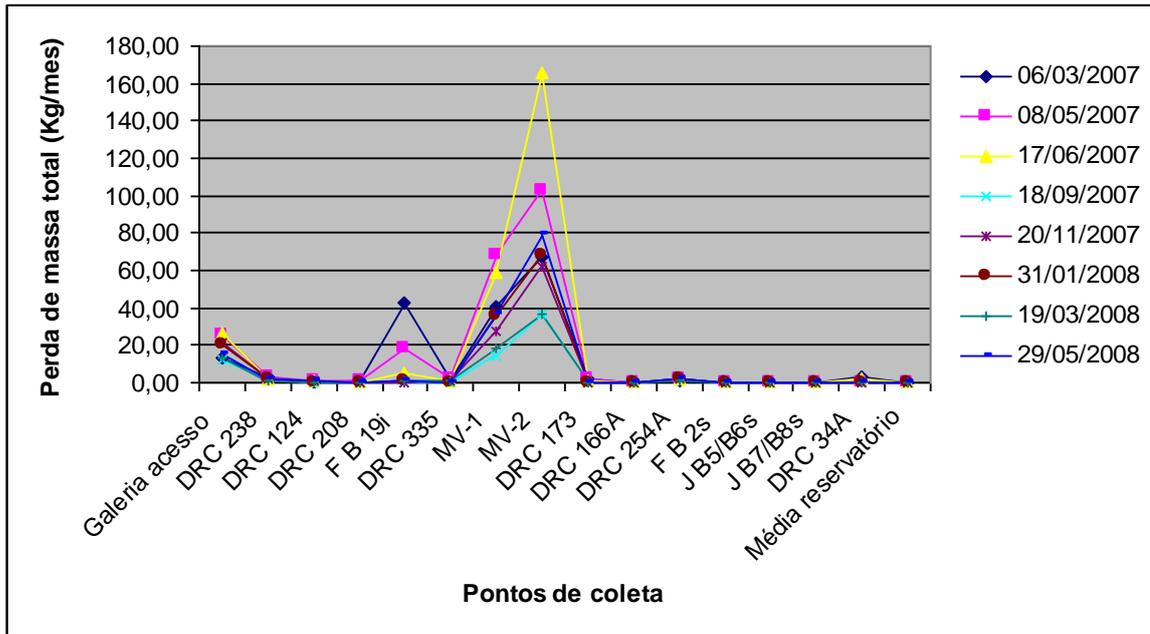


FIGURA 35 – PERDA DE MASSA MEDIDA NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

TABELA 20 – PERDA DE MASSA NA ÁGUA PERCOLADA NA BARRAGEM DA UHE DRJ

PONTO DE COLETA	BLOCO	GALERIA	VAZÃO (l/min)	VALOR MÉDIO DA PERDA DE MASSA NO PERÍODO (kg)
DRENOS DA CORTINA SUPERIOR				
DRC 124	26	superior	instável	(0,60 ± 0,48)
DRC 34A	8	superior	0,65	(0,88 ± 1,00)
DRENOS DA CORTINA INTERMEDIÁRIA				
DRC 238	25	inferior	0,43	(2,30 ± 0,70)
DRC 173	12	inferior	3,04	(0,89 ± 0,87)
DRC 208	19	inferior	3,04	(0,47 ± 0,45)
DRC 166A	11	inferior	0,11	(0,09 ± 0,04)
DRENOS DA CORTINA INFERIOR				
DRC 254A (FUNDAÇÃO)	4	inferior	0,94	(1,55 ± 0,25)
DRC 335 (FUNDAÇÃO)	19	inferior	1,52	(1,14 ± 0,39)
DRENOS DA GALERIA DE ACESSO				
DRC ACESSO	22	acesso	1,36	(18,90 ± 5,69)
MEDIDORES DE VAZÃO				
MV 01	14	inferior	49,0	(22,93 ± 5,50)
MV 02	14	inferior	32,5	(61,22 ± 36,77)
DRENOS DE JUNTA				
B07/B08	07/08	superior	0,28	(0,18 ± 0,37)
B05/B06	05/06	superior	0,38	(0,06 ± 0,04)
FISSURAS				
FB 19	19	inferior	34,0	(8,89 ± 14,91)
FB 02	02	superior	0,18	(0,29 ± 0,27)

FONTE: a autora (2008)

TABELA 21 – TEOR DE MASSA PERCOLADA NO PERÍODO POR COMPONENTE QUÍMICO ANALISADO NA ÁGUA PERCOLADA

CÁTIONS						
Cálcio (kg/mês)	Magnésio (kg/mês)	Sódio (kg/mês)	Potássio (kg/mês)	Ferro (kg/mês)	Alumínio (kg/mês)	Silício (kg/mês)
12,75	0,62	28,22	10,66	1,08	0,25	4,23
ÂNIONS						
Fluoretos (kg/mês)	Cloretos (kg/mês)	Nitratos (kg/mês)	Nitritos (kg/mês)	Sulfatos (kg/mês)	Brometos (kg/mês)	Fosfatos (kg/mês)
0,15	0,57	1,86	0,29	23,24	0,02	0,22

FONTE: a autora (2008)

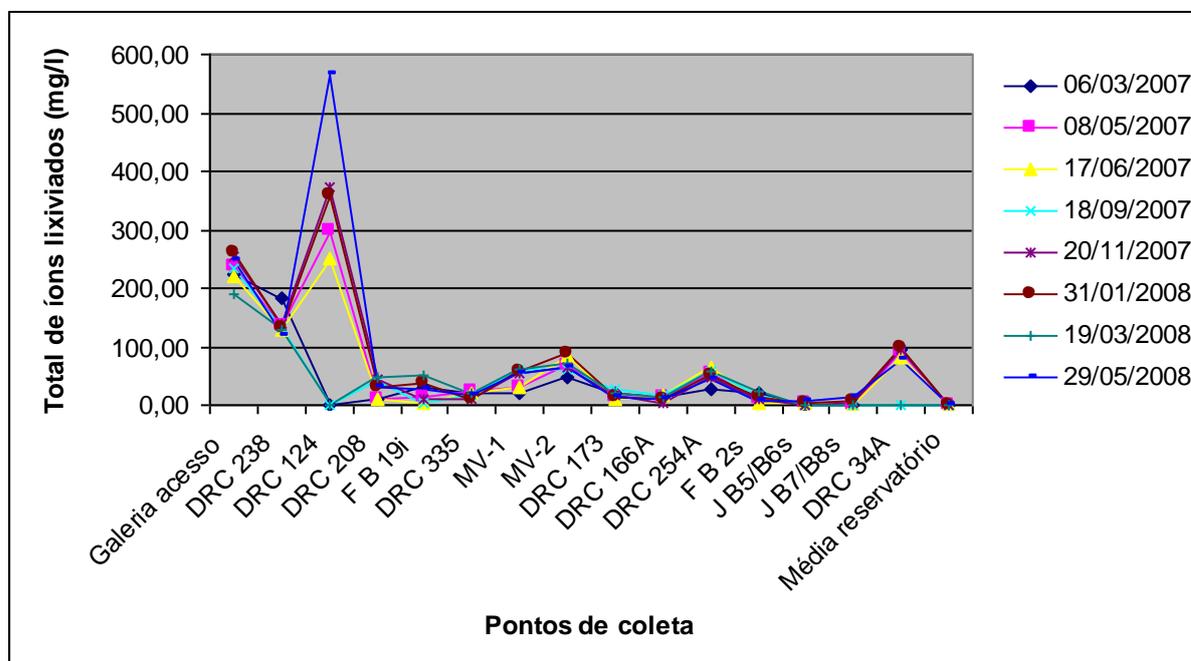


FIGURA 36 – TOTAIS DE ÍONS LIXIVIADOS MEDIDOS NA ÁGUA PERCOLADA E DO RESERVATÓRIO DA UHE DRJ

FONTE: a autora (2008)

5. CONCLUSÃO

Uma nova metodologia de pesquisa foi investigada para diagnosticar e avaliar o desempenho de estruturas de concreto sujeitas à infiltração contínua e sob pressão de águas fluviais, como diversas barragens de usinas hidrelétricas. Destaca-se que este estudo foi e tem caráter complementar, não é decisório e não engloba a análise da segurança ou da vida útil de uma barragem. A UHE DRJ é um exemplo típico de barragem que vem sendo monitorada por outros sistemas analíticos e equipes de engenharia correspondentes, com pareceres periódicos em painéis de consultores internacionais que vem comprovando que a estrutura mantém suas condições de segurança e tem a durabilidade assegurada.

Foram propostos no estudo diversos parâmetros físico-químicos:

- a) pH e alcalinidades das amostras de água. Os seus acompanhamentos simultâneos na água percolada e do reservatório revelaram suas eficácias para diagnosticar de forma rápida a participação de álcalis dissolvidos e lixiviados pela estrutura. Valores mais elevados foram identificados em alguns pontos de coleta, sendo corroborados com a medida da concentração iônica no local de análise, como em alguns drenos da cortina superior e intermediária.
- b) a condutividade elétrica ou iônica também indicou nos mesmos drenos de cortina superior e intermediária a maior concentração de sais presentes.

A vantagem de ambos os métodos é que foram rápidos de serem realizados, podendo ser efetuados localmente. Foram parâmetros que puderam ser utilizados para detectar locais de maior ou menor problemas de agressividade local, seja por meio de álcalis, ácidos ou sais dissolvidos.

- c) os sólidos suspensos, dissolvidos e totais. Em conjunto com os parâmetros já discutidos e a análise química da água mostraram na pesquisa poder auxiliar no diagnóstico. Maiores concentrações de

sólidos dissolvidos foram identificadas em pontos de coleta com maior quantidade de massa iônica (como por exemplo, nos medidores de vazão, drenos de cortina superior e intermediária). Foram detectadas concentrações mais elevadas de sólidos suspensos na água coletada em um ponto de fissura, que indicou pelo pH e outros parâmetros físico-químicos ter comunicação direta com o reservatório. Este resultado pode ser consequente da maior turbidez (ou sólidos em suspensão) na referida água. O sólido total é, normalmente, uma somatória dos sólidos dissolvidos e suspensos.

- d) as análises químicas dos cátions e ânions. O seu balanço de massa multiplicado pela vazão média mensal pôde dar um diagnóstico do poder de dissolução da água percolada. Um total médio de aproximadamente 58 kg/mês de cátions e 26 kg/mês de ânions analisados foram dissolvidos durante as 08 campanhas. A perda dos sais aumenta o volume de vazios no interior da barragem podendo provocar uma possível diminuição de resistência mecânica da estrutura. Para o caso, nenhuma outra patologia foi identificada como consequência deste resultado. Supõe-se que boa parte dos sais dissolvidos estava presente nas regiões de poros pelo interior da estrutura.

Finalmente, pela inspeção visual e baseado nos dados provenientes da leitura em campo da vazão dos drenos e fissuras, que apresentaram uma significativa redução ao longo do tempo, inferiu-se estar havendo colmatção da estrutura provavelmente devido ao processo de carbonatação em diversos pontos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alguns pontos de coleta tiveram ao longo do tempo uma redução da vazão dificultando, impossibilitando a coleta e prejudicando os resultados finais de análise.

Os pontos denominados MV1 e MV2 podem ser influenciados pela dissolução dos íons ao longo da canaleta de drenagem e não necessariamente do corpo da barragem. Pode haver influência dos íons procedentes da rocha de fundação, interferindo nos resultados de perda de massa da barragem, já que a região onde está instalada a barragem possui diversas fontes minerais.

Uma limpeza e desobstrução dos drenos e canaletas faz-se necessário para não haver influência do material colmatado ao longo destes sobre os resultados. A comparação antes e após este serviço mostrará esta influência.

Em função da temperatura o concreto se comporta de maneira diferente, como pode ser observado ao longo das análises, aumentando as vazões no período de frio (inverno) em função da abertura das juntas e fissuras ao longo da barragem. Este processo pode arrastar sais precipitados em períodos de baixa vazão influenciando os resultados nos períodos de alta vazão nos pontos MV1 e MV2.

Os valores encontrados nas análises de alcalinidade foi um bom indicativo da perda de sais pela estrutura concretada. O problema se evidencia na quantidade de sais de cálcio que podem ser extraídos sem alterar significativamente a resistência mecânica do concreto, quando este termina por fissurar, podendo ser lixiviado ou, então, ser dissolvido em maior velocidade, pelo aumento da área superficial resultante.

As análises foram feitas em kg/ mês devido à variação de vazão em cada ponto de coleta. Uma vazão muito elevada pode arrancar material ao longo do dreno no momento da passagem, alterando o resultado. Ao

contrário, uma vazão muito baixa pode ficar maior tempo em contato com os íons e alterar a concentração, não pela perda de massa, mas pela dissolução em função do tempo de contato.

Sugere-se a continuidade dos estudos de forma a se revelar se o comportamento presenciado pelas análises irá continuar ou seja, a dissolução iônica cessará no tempo ou se haverá reversão do processo podendo, então, haver perda de sais importantes, como do próprio íon cálcio, para a manutenção da resistência do concreto nos locais analisados.

7. TRABALHOS FUTUROS RECOMENDADOS

Para uma investigação mais acurada recomenda-se a tentativa de extração de testemunho com as análises dos mesmos e reconstituição de traço. Em uma tentativa logo após a usina entrar em operação não foi possível devido à segregação dos testemunhos. Com a carbonatação da estrutura ao longo do tempo, pode ter ocorrido uma maior compacidade dos componentes do concreto facilitando a retirada atualmente.

Uma limpeza aprofundada nas galerias da barragem e em suas canaletas se faz necessária para diminuir a influência do material precipitado nos resultados das análises da água percolada. Desta maneira pode-se obter um resultado mais claro e preciso.

Comparações dos resultados com outras barragens com o mesmo método construtivo como a barragem da Usina Hidrelétrica Gov. José Richa – Usina de Caxias que mantém programa de análise similar ao adotado na UHE DRJ em função do tamanho da barragem, vazão e superfície exposta à água do reservatório.

Estudo de material de reparo e injeção compatível com a estrutura e componentes que ainda restam no interior de barragens de CCR, quando for necessária alguma intervenção.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 12655:2006 Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 309.5R-00 compaction of Roller-Compacted concrete, 2000 – ACI Committee 309.
- ACI, Guia para concreto durável – ACI 201.2R-01, 2001.
- ANDRADE, W. P. – Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo, 1997, Editora Pini – São Paulo – SP.
- BATISTA, E. L., GRAÇA, N. G., FARIAS, L. A., BITTENCOURT, R. M., ANDRADE, W. P., CARASEK, H. CASCUDO, O. - Porosity studies for roller compacted concrete = roller compacted concrete dams, - Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete(Rcc) Dams. 2003 – MADRID.
- BICZOK, I. Corrosion y proteccion del hormigon, URMO S.A. de Ediciones, Espana, 1968.
- CABRERA, J. G.;AL-HASAN, A. S. Performance properties of concrete repair materials, Construction and Building Materials, Vol. 11, n. 5-6, pp. 283-290, 1997.
- CALLISTER, W. D., Ciência e engenharia de materiais: uma introdução – LTC Editora – Rio de Janeiro, RJ (2002)
- CORPS OF ENGINEERS - EM 1110-2-2200 – GRAVITY DAM DESIGN, 1995.
- CORPS OF ENGINEERS - EM 1110-2-2006 – Roller-Compacted Concrete, 2000.
- FAGURY, S. C.;LIBORIO, J. B. L. .Concretos e pastas de elevado desempenho : contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concretos novo e velho, com tratamento da zona de interface. 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.
- FIGUEIREDO, C. R., Estudo da retração em materiais para reparos estruturais com adição de sílica ativa e fibras – 44º Ibracon, Belo Horizonte, BH , 2002.
- FREIRE, K. R. R. - Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto – dissertação de mestrado – UFPR 2005.
- GALDÁMEZ, E. V. C., Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. Dissertação de Mestrado, São Carlos,2002.
- HELENE, P. R. L. Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto. São Paulo, PINI, 1992.
- HELENE, P.; FIGUEIREDO, A.;DJANIKIAN, J. G.; SELMO, S.; JOHN, V. – Vida útil das estruturas, São Paulo, 2006. apostila de aula.

HORSZCZARUK, E. , The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures, 256 . p.787-796, 2004.

HU, X. G.; MOMBER, A. W.; YIN, Y. G., Hydro-abrasive erosion of steel-fiber reinforced hydraulic concrete. Wear 253 p. 848-854. 2002.

KUILMAN, C. The fiber Concrete advantage. Plant Engineering. Vol.42, p.52 e 53. 1988.

LACTEC – Dois anos de acompanhamento da percolação de água pela barragem de desvio do Rio Jordão. Relatório técnico AMAT 2437/99. Curitiba, 1999.

LACTEC – Análise físico-química e avaliação dos efeitos da percolação de água na barragem de derivação do Rio Jordão. Estudo da concentração iônica na água percolada. Relatório técnico AMAT 4251/2001. Curitiba, 2001.

LACTEC – Análise físico-química e avaliação dos efeitos da percolação de água na barragem de Derivação do Rio Jordão. Estudo da concentração iônica na água percolada. Relatório técnico 10.536?2004. Curitiba, 2004.

LACTEC – Efeito da percolação de água pela estrutura de concreto da barragem de Derivação do Rio Jordão: período de investigação – novembro/2000 a março/2006. Relatório técnico 20.621. Curitiba, 2006.

LACTEC – Acompanhamento da percolação de água em barragens de concreto compactado com rolo (CCR): análise e diagnóstico da perda de massa da estrutura pelos parâmetros físico-químicos das amostras da água percolada. Estudo de caso da barragem de Derivação do Rio Jordão e da barragem da UHE Governados José Richa (Salto Caxias) Relatório de atividades mensais nº 15 – abril / 2008.

LANÇA, R. M. M. - apostila de hidráulica aplicada - núcleo de hidráulica e ambiente – FARO, 2001.

LI, H.; ZHANG, M.; OU, J., Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. WEAR, 2005.

MAIA, P. C. A. - Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos – tese de doutorado, Rio de Janeiro 2001.

MAILVAGANAM, N. P. Concrete repair and rehabilitation: issues and trends . e-Mat, Vol. 1, n.1, p. 1-9, Maio 2004.

MARQUES FILHO, J. – Maciços experimentais de laboratório de concreto compactado com rolo aplicado às barragens – tese de doutorado, Porto Alegre, 2005.

MCDONALD, J. E.; LIU, T. C. Repair of concrete surfaces subjected to abrasion erosion damage. In: Annual Convention, Milwaukee, Wisconsin, 1979.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. 2ª edição. São Paulo: Pini, 1994.

MINISTÉRIO DA SAÚDE - Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano. – Brasília : Ministério da Saúde, 2006.

NEVILLE, A. M., Propriedades do concreto – 1ª edição, Ed.Pini, São Paulo, SP, 1982.

OLIVEIRA, P. J. R.; SALLES, F. – Concreto Compactado à Rolo – características e propriedades – 1º Simpósio de obras em concreto compactado com rolo, São Paulo, 1995.

PAOLINI, M.; KHURANA, R. - Admixtures for recycling of waste concrete Cement and Concrete Composites Volume 20, Issues 2-3, 1998, Pages 221-229.

PAREDES, M. A. L. – Método para diagnóstico, avaliação e controle da fissuração em barragens de concreto, dissertação UFPR 2002

PAULON,V.A.; DALMOLIN,D.; MARQUES FILHO, J.; ANDRADE, W. P. – caracterização do concreto compactado com rolo em laboratório – Revista de Ciência e tecnologia de Materiais de Construção Civil, Vol.1, n.1,p. 66-78, maio 2004.

PINHEIRO, S. M. M. - Impacto da colonização do fungo cladosporium sphaerospermum sobre a argamassa do concreto , Dissertação de Mestrado Espírito santo, 2003.

PINHO, J. R. S.; BITENCOURT JR, L. A. G.; ALBUQUERQUE, N. G. B.; PINHEIRO, G.; BARATA, M. S.; SOUZA, R. M., Avaliação do desempenho de argamassas cimentícias como reparo em estruturas de concreto de usinas hidrelétricas sujeitas à abrasão hidráulica. 47ª Congresso Brasileiro do Concreto. Vol. VII, p.99-112, 2005.

PORTELLA, K. F.;GARCIA, C. M; ESMANHOTO, E;.CANTÃO, M. P.; SOUZA, G. P.; KOSEL, O. Avaliação e degradação de estruturas de concreto usadas no setor elétrico - II Encontro Técnico de Manutenção de usinas; Cascavel – 1998

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T.,Projeto de experimentos – FEENG/UFRGS – Porto Alegre, 2001.

SANTOS,A. B. S.;PELISSER, F.;ROVERE, H. L.;PINTO, R. C. A., Influence of polupropylene fiber on concrete plastic shrinkage cracking, IV HPC, Paper IV, p.401-419, 2005.

SCHREIBER, G. P. – Usinas Hidrelétricas, 1978, Editora Edgar Blücher Ltda, Engevix – São Paulo, SP.

SCHIAVON, M. A.; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. – Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto – Cerâmica – vol53, n 326, São Paulo 2007.

SILVA, D. A.;BETIOLI, A. M.;GLEIZE,J.P.;ROMAN,H. R.;GOMEZ, L. A.; RIBEIRO,J. L. D.. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. Cement and Concrete Research, Vol. 35 , pp 1741– 1746, 2005.

SILVA,E. L.; MENEZES,E. M., Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis : Laboratório de Ensino a distância da UFSC, 2000.

SOARES, M.A.; LEVIS, P. - RELATÓRIO TÉCNICO DA JUNTA DE CONSULTORES DA BARRAGEM DE CCR , 2001

SOUZA, J. M. C., “ Materiais compósitos”, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Cidade do Porto , 2003.

SPAINMAIA, P. C. A. - Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos. Tese de doutorado - PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. 2001.

WOO,L.Y.-WANSOM,S.;OZYURT,N.;MU,B.;SHAH,S.P.;MASON,T.O.,
Characterizing fiber dispersion in cement composites using AC-Impedance Spectroscopy. Cement & Concrete Composites, vol. 27, p.627–636, 2005.

www.aneel.gov.br , acessado em 12/10/2007

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>,
acessado em 30/08/2008

www.cbdb.org.br, acessado em 15/11/2005.

www.cempre.org.br, acessado em 17/11/2005.

www.copel.com, acessado em 20/12/2007

www.mme.gov.br, acessado em 16/11/2005.

www.obancomundial.org.br, acessado em 20/11/2005.

YIN, R. K. - Estudo de caso: planejamento e métodos – 3º Ed. – Porto Alegre : Bookman, 2005.