

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Roberto Arsego Zuch**

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS EM  
CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS:  
LEVANTAMENTO DE OCORRÊNCIAS E ESTRATÉGIAS DE  
REPARO UTILIZADAS**

Porto Alegre  
junho 2008

**ROBERTO ARSEGO ZUCH**

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS EM  
CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS:  
LEVANTAMENTO DE OCORRÊNCIAS E ESTRATÉGIAS DE  
REPARO UTILIZADAS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**

Porto Alegre  
junho 2008

**ROBERTO ARSEGO ZUCH**

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS EM  
CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS:  
LEVANTAMENTO DE OCORRÊNCIAS E ESTRATÉGIAS DE  
REPARO UTILIZADAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2008

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
PhD. University of Leeds  
Orientador

Prof. Inácio Benvegnu Morsch  
Chefe do DECIV

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)**  
PhD. University of Leeds

**Prof. João Luiz Campagnolo (UFRGS)**  
Msc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)**  
Dr. Escola Politécnica USP

Dedico este trabalho as pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais Paulo e Jacinta, e meus irmãos Nicole e Lucas, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família por ser a minha base de sustentação e estar sempre ao meu lado me apoiando e dando força.

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, orientador deste trabalho, que nos momentos fundamentais, quando mais necessitava de auxílio, esteve presente com a sua brilhante e iluminada cabeça. Além, é claro, da grande ajuda fornecendo materiais de acesso restrito e indicando contatos de suma importância para a realização deste trabalho.

Agradeço à Prof. Carin que com tanta paciência e competência acompanhou e auxiliou, durante todo o processo, a realização do trabalho de diplomação. Na esperança que seja em tempo de reconhecer o seu grande esforço, fez valer com maestria o ditado “treino difícil, jogo fácil”.

Agradeço ao Prof. Campagnolo que foi a primeira pessoa a ouvir a idéia sobre o tema que eu gostaria de desenvolver no meu trabalho de diplomação e fez uma excelente indicação para me auxiliar na escolha do orientador deste trabalho.

Agradeço à empresa Toniolo, Busnello S.A. e aos colegas de trabalho, onde estagiei durante todo o período em que estava realizando o trabalho de diplomação, e sempre tive todo o apoio necessário para desempenhar ambas as atividades, em paralelo, com muita tranquilidade.

Agradeço ao Gilmar Fabro de Itaipu pela presteza em ajudar, fornecendo material de grande qualidade para este trabalho.

Agradeço aos meus colegas e grandes amigos que fiz na engenharia civil da UFRGS pela ajuda e companheirismo durante toda a faculdade.

Procure ser uma pessoa de valor ao invés de buscar o  
sucesso, o sucesso é consequência.

*Albert Einstein*

## RESUMO

ZUCH, R. A. **Manifestações Patológicas nas Estruturas em Concreto de Usinas Hidrelétricas: Levantamento de Ocorrências e Estratégias de Reparo Utilizadas.** 2008. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho versa sobre manifestações patológicas que podem ocorrer nas estruturas em concreto, nos diversos elementos que compõem uma usina hidrelétrica. A matriz energética brasileira está distribuída de maneira que, aproximadamente 80% da energia produzida no País, provem de usinas hidrelétricas, sendo que em todas as usinas existem estruturas em concreto. Nas usinas hidrelétricas as estruturas em concreto estão expostas a ambientes extremamente agressivos para estes materiais, uma vez que a maior parte dessas estruturas encontra-se submersa. Em função da condição de utilização, as estruturas em concreto estão sujeitas a sofrerem diversas manifestações patológicas. Os danos mais comuns ocorridos nas usinas hidrelétricas são a erosão em função da abrasão e cavitação, reação álcali-agregado e fissuração. Neste estudo serão apresentados casos reais de patologias nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas, e medidas que foram tomadas para reparar estes problemas. Os casos apresentados foram selecionados a partir de um levantamento das ocorrências de patologias, nas obras de usinas hidrelétricas, em bibliografia especializada, anais de congressos e principalmente consultando profissionais experientes que tenham tido experiências anteriores e participaram dos estudos para reparar essas patologias. Este estudo poderá auxiliar no mapeamento das patologias mais comuns ocorridas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas e os locais de maior incidência, e também indicar os mecanismos de reparo mais utilizados em cada caso. Estes dados ajudarão, durante a concepção do projeto, a evitar as patologias mais frequentes, auxiliar para um melhor posicionamento das instrumentações e melhorar a qualidade dos reparos das patologias que não forem evitadas.

Palavras-chave: patologia das estruturas, usinas hidrelétricas, concreto.

## ABSTRACT

ZUCH, R. A. **Manifestações Patológicas nas Estruturas em Concreto de Usinas Hidrelétricas: Levantamento de Ocorrências e Estratégias de Reparo Utilizadas.** 2008. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

### **Pathologies in Concrete Structures of Hydroelectric Plants: Survey of Frequent Occurrences and Repair Strategies**

This paper reports on pathologies that may occur in the concrete structures of various elements of a hydroelectric power plant. The Brazilian energy matrix is distributed so that approximately 80% of the energy produced in Brazil comes from hydroelectric plants, and in all of them there are concrete structures. In hydroelectric plants, concrete structures are frequently exposed to harsh environments, since several parts of these structures are submerged. Depending on the type of use and exposure, the concrete structures may suffer from various pathologies. According to the literature, the most common deterioration mechanisms acting on the concrete elements of hydroelectric plants are erosion due to abrasion and cavitation, alkali-silica reaction and cracking. This study will discuss some real cases of pathologies found in Brazilian hydroelectric plants, and analyses the repair measures taken to remedy these problems. The cases presented were selected from a survey of registered pathologies extracted from the specialized literature, conference proceedings and interviews with experienced professionals who have dealt with these problems. The study aims to assist in mapping the most common pathologies that occur in the concrete structures of Brazilian hydroelectric plants, pointing out the places of highest incidence and indicating the repair strategies most used in each case. The data might help identify prevention measures during the design phase of new projects, guide the positioning of instrumentation and select adequate repair techniques for instances when pathologies cannot be avoided.

Keywords: pathologies, hydroelectric plants, concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: potencial tecnicamente aproveitável para geração de energia hidrelétrica no mundo .....	18
Figura 2: potencial hidrelétrico brasileiro por bacia hidrográfica .....	20
Figura 3: arranjo geral em planta baixa UHE Furnas .....	23
Figura 4: corte esquemático do sistema de geração de energia de uma UHE .....	23
Figura 5: efeitos da abrasão no tubo de sucção – Itaipu .....	28
Figura 6: efeitos da cavitação no vertedouro de Itaipu .....	29
Figura 7: gel sílico-alcalino formado pela reação entre os agregados reagentes e o cimento .....	30
Figura 8: esquematização do processo de iteração da reação álcali-agregado com a estrutura de concreto .....	31
Figura 9: detalhe do rebaixamento na justaposição entre lajes – juntas de dilatação .....	40
Figura 10: vista geral dos blocos de dissipação – julho/2001 .....	41
Figura 11: perfil indicativo das estruturas chute-block e end-sill do vertedor da UHE Porto Colômbia .....	50
Figura 12: perfil indicativo da remoção dos chute- blocks e end-sills do vertedor da UHE Porto Colômbia .....	51
Figura 13: vista frontal das trincas ocorridas na UHE Campos Novos .....	65
Figura 14: detalhe das trincas e flambagem das armaduras na UHE Campos Novos .....	65
Figura 15: remoção do concreto rompido .....	65
Figura 16: recomposição da armadura e da junta de cobre .....	65
Figura 17: aspecto da face após remoção do concreto rompido .....	66
Figura 18: recuperação das lajes rompidas .....	66
Figura 19: trechos rompidos já recuperados .....	66
Figura 20: corte das juntas de compressão .....	66

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: tipos principais de fissuração .....	34
Quadro 2: casos de manifestações patológicas relacionados no presente trabalho .....	36
Quadro 3: resistências à compressão axial das argamassas dosadas em campo .....	44
Quadro 4: traços-base das argamassas – UHE Furnas .....	46
Quadro 5: resistências à compressão axial da argamassa – UHE Furnas .....	46
Quadro 6: resistências obtidas nos ensaios – UHE Furnas .....	47
Quadro 7: traços-base das argamassas – UHE Marimbondo .....	47
Quadro 8: resistências à compressão axial da argamassa – UHE Marimbondo .....	48
Quadro 9: traços-base das argamassas – UHE Chapéu d’uvas .....	49
Quadro 10: resistências à compressão axial da argamassa – UHE Chapéu d’uvas .....	49
Quadro 11: traço do concreto utilizado na recuperação da superfície do vertedouro – UHE Porto Colômbia .....	50
Quadro 12: resistências à compressão axial do concreto – UHE Porto Colômbia .....	51
Quadro 13: traços-base das argamassas – UHE Porto Colômbia .....	52
Quadro 14: resistências à compressão axial da argamassa – UHE Porto Colômbia .....	52
Quadro 15: casos de ocorrência de RAA em usinas hidrelétricas brasileiras .....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	14
2.2 OBJETIVOS .....	14
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	14
<b>2.2.2 Objetivos Secundários</b> .....	14
2.3 PREMISSAS .....	15
2.4 DELIMITAÇÕES .....	15
2.5 LIMITAÇÃO .....	15
2.6 DELINEAMENTO .....	15
<b>3 A IMPORTÂNCIA DA ENERGIA HIDRÁULICA</b> .....	17
3.1 DISPONIBILIDADE DE RECURSOS HIDRÍCOS .....	17
3.2 POTENCIAL HIDRÁULICO BRASILEIRO .....	19
<b>4 USINAS HIDRELÉTRICAS</b> .....	21
4.1 ONDE CONSTRUIR UMA USINA HIDRELÉTRICA? .....	21
4.2 COMO É GERADA A ENERGIA? .....	22
4.3 PRINCIPAIS ESTRUTURAS E SUAS FUNÇÕES .....	22
<b>4.3.1 Barragem</b> .....	24
<b>4.3.2 Estrutura de descarga de excesso de vazão</b> .....	24
<b>4.3.3 Sistema de captação e de adução</b> .....	24
<b>4.3.4 Casa de força</b> .....	25
<b>4.3.5 Sistema de restituição</b> .....	25
<b>5 PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE ESTRUTURAS EM CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS</b> .....	26
5.1 EROÇÃO .....	27
<b>5.1.1 Abrasão</b> .....	27
<b>5.1.2 Cavitação</b> .....	28
5.2 REAÇÕES DELETÉRIAS .....	30
<b>5.2.1 Reação Álcali-Agregado</b> .....	30
5.3 TRINCAS E FISSURAS .....	33
<b>6 ANÁLISE DE CASOS REAIS DE OCORRÊNCIA DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS EM CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS</b> .....	36
6.1 CASOS RELACIONADOS À EROÇÃO POR ABRASÃO .....	37

<b>6.1.1 UHE Ilha Solteira</b> .....	37
<b>6.1.2 UHE Engenheiro Souza Dias (Jupiá)</b> .....	38
<b>6.1.3 UHE Capivara</b> .....	39
<b>6.1.4 UHE Furnas</b> .....	45
<b>6.1.5 UHE Marimbondo</b> .....	47
<b>6.1.6 UHE Chapéu d’uvas</b> .....	48
<b>6.1.7 UHE Porto Colômbia</b> .....	49
<b>6.1.8 UHE Camargos</b> .....	52
<b>6.1.9 UHE Porto Primavera</b> .....	53
<b>6.2 CASOS RELACIONADOS À EROÇÃO POR CAVITAÇÃO</b> .....	54
<b>6.2.1 UHE Ilha Solteira</b> .....	54
<b>6.2.2 UHE Engenheiro Souza Dias (Jupiá)</b> .....	56
<b>6.3 CASOS RELACIONADOS À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO</b> .....	57
<b>6.3.1 UHE Furnas</b> .....	59
<b>6.3.2 UHE Moxotó</b> .....	63
<b>6.4 CASOS RELACIONADOS AO DESENVOLVIMENTO DE SOLICITAÇÕES NÃO USUAIS COM O APARECIMENTO DE TRINCAS E FISSURAS NÃO ESPERADAS</b> .....	64
<b>6.4.1 UHE Campos Novos</b> .....	64
<b>6.4.2 UHE Porto Primavera</b> .....	67
<b>6.4.3 UHE Itaipu</b> .....	68
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	71
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	74



## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui grandes recursos hídricos e, tanto nas décadas de 70 e 80, com o concreto massa, quanto na última década, com o concreto compactado a rolo, executou várias construções de barragens para aproveitamento do potencial hidrelétrico de geração de energia, consumo de água, controle de cheias e lazer. As execuções destas grandes obras fizeram com que o País se tornasse pioneiro no planejamento, elaboração de projetos e, principalmente, na construção de unidades de aproveitamento hidrelétrico.

Apesar de o Brasil possuir grande capacidade de execução de projetos hidrelétricos e equipes técnicas com capacidade comprovada, o mesmo demonstra não possuir o hábito de utilizar os conhecimentos acumulados sobre as dificuldades e problemas encontrados e superados nas várias etapas de construção de uma obra: planejamento, projeto, execução, comissionamento e operação. Esta postura acaba por não gerar uma cultura voltada para a prevenção de problemas, que resulte em maior durabilidade e segurança das obras, com menores custos de manutenção.

Este trabalho de diplomação busca colaborar no sentido de coletar e disponibilizar dados sobre os problemas patológicos mais freqüentes registrados em barragens de concreto e as soluções empregadas para lidar com os mesmos. Para tanto, efetuou um levantamento da literatura e consultou especialistas da área, buscando informações sobre processos de deterioração importantes ocorridos em obras reais de usinas hidrelétricas. O objetivo foi verificar qual a natureza das manifestações patológicas mais freqüentes, onde as mesmas se manifestaram e quais soluções estão sendo adotadas para solucionar estes problemas.

A importância do assunto para a sociedade reforça-se em função do crescente interesse, por parte do governo e de empresas privadas, em investir em empreendimentos hidrelétricos. Preservar este considerável e estratégico investimento é fundamental, já acidentes em barragens podem acarretar grandes custos econômicos e, eventualmente, perdas de vidas humanas e danos ambientais irreparáveis. Além do risco inaceitável às populações ribeirinhas e ao meio ambiente gerados por uma possível falha, agregam-se os custos de parada de produção de energia durante os processos de reparos.

Deve ser lembrado que, mesmo no caso de problemas menores, a simples interrupção da operação de uma usina para execução de reparos pode ter um impacto estratégico, devido ao grande consumo do país. Falhas repentinas podem causar problemas de confiabilidade em todo o sistema, pois o abastecimento de energia está cada vez mais interligado.

Estes fatores justificam a preocupação com a integridade e funcionalidade das barragens brasileiras e deixam clara a importância da realização de análises preventivas e estudos sobre os principais mecanismos de deterioração e sobre os reparos mais eficientes e de rápida aplicação.

O trabalho foi dividido em sete capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução, contemplando a importância e relevância do tema.

O segundo capítulo explicita a metodologia de trabalho adotada, apresentando a questão de pesquisa, os objetivos, as premissas, delimitações, limitações e delineamento do trabalho.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a questão da importância da energia hidráulica no Brasil, com destaque para a disponibilidade e potencial hidráulico.

No capítulo 4 são apresentadas informações gerais sobre usinas hidrelétricas, explicando onde e como é gerada a energia elétrica nestes empreendimentos, seguida de uma sucinta explicação sobre as principais estruturas que compõem uma usina hidrelétrica.

O capítulo 5 consiste numa revisão da literatura sobre as principais manifestações patológicas encontradas nas estruturas de concreto de usinas hidrelétricas.

No capítulo 6 são descritos os casos reais de ocorrências de manifestações patológicas encontrados na literatura e mencionados por profissionais da área.

No capítulo 7 são colocadas as considerações finais deste trabalho.

## **2 METODOLOGIA**

A metodologia de pesquisa empregada teve caráter exploratório, sendo baseada na extração de conhecimento da literatura e de especialistas.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa proposta para este trabalho foi: quais as principais manifestações patológicas registradas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas existentes no Território Nacional, e quais os mecanismos de reparo mais freqüentes adotados na solução das mesmas?

### **2.2 OBJETIVOS**

Os objetivos do trabalho foram divididos entre objetivo principal e objetivos secundários.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal consiste em um levantamento descrevendo as principais manifestações patológicas ocorridas nos elementos em concreto de algumas das principais usinas hidrelétricas existentes no Brasil.

#### **2.2.2 Objetivos Secundários**

A coleta e sistematização de dados disponíveis na literatura buscando a contribuição para o entendimento dos mecanismos de degradação atuantes nos elementos em concreto de usinas hidrelétricas nacionais e das estratégias de recuperação mais usuais.

## 2.3 PREMISSAS

São premissas deste trabalho:

- a) existem manifestações patológicas importantes nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas nacionais;
- b) os tratamentos exitosos empregados na solução de manifestações patológicas em casos anteriores, registrados na literatura da área ou referidos por especialistas, são bons indicativos das melhores práticas para tratamento das mesmas;
- c) a opinião de especialistas e os registros encontrados na literatura especializada são bons indicativos da situação prevalente na área.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

São delimitações deste trabalho:

- a) foco em estruturas nacionais, pois deseja-se que o trabalho possa impactar a realidade brasileira;
- b) análise somente das principais manifestações patológicas, em termos de incidência ou importância, de acordo com a opinião de especialistas ou referências da literatura.

## 2.5 LIMITAÇÃO

Dadas às limitações de tempo, o presente trabalho se focou somente na análise de manifestações patológicas associadas aos elementos em concreto armado ou compactado à rolo, especialmente aqueles associados ao corpo das barragens e estruturas de desvio.

## 2.6 DELINEAMENTO

As etapas do projeto foram definidas da seguinte forma:

- a) pesquisa bibliográfica: inicialmente, foi realizado um levantamento da existência e quantidade de material referente ao tema do trabalho. Verificada a existência de material adequado, iniciou-se a busca para se ter acesso ao material disponível, e a leitura deste. Cabe ressaltar que esta etapa, de pesquisa bibliográfica, foi realizada durante todo o período de realização do trabalho;
- b) entrevista com especialistas: um dos aspectos fundamentais para a realização desse trabalho era o contato com profissionais e pessoas com experiência nesta área. Essas conversas informais, com pessoas que vivenciaram os problemas pesquisados, contribuíram muito para o desenvolvimento do trabalho. Esta etapa foi realizada de maneira descontínua ao longo do desenvolvimento do trabalho;
- c) organização dos dados: após a conversa com profissionais da área, a coleta do material e o respectivo estudo do mesmo, foi feita uma triagem do material e montada uma seqüência da disposição que este material seria apresentado no texto;
- d) redação: de posse do material organizado, procedeu-se à redação do trabalho;
- e) montagem da apresentação: em paralelo à execução do trabalho escrito, foi sendo realizada também a montagem do trabalho para a apresentação oral.

### 3. A IMPORTÂNCIA DA ENERGIA HIDRÁULICA

O uso da energia hidráulica foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico, particularmente para bombeamento de água e moagem de grãos. Tinha a seu favor, para tanto, as seguintes características: disponibilidade de recursos, facilidade de aproveitamento e, principalmente, seu caráter renovável.

A energia hidráulica resulta da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, que provocam a evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre. Ao contrário das demais fontes renováveis, representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento adequadamente consolidadas. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica para diversos países e responde por cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no Mundo (BRASIL, 2005).

A contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional representa quase 83% de toda a energia elétrica gerada no País. Apesar da tendência de aumento de outras fontes, devido a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e aos avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil. Embora os maiores potenciais remanescentes estejam localizados em regiões com fortes restrições ambientais e distantes dos principais centros consumidores, estima-se que, nos próximos anos, pelo menos 50% da necessidade de expansão da capacidade de geração seja de origem hídrica (OPERADOR NACIONAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS, 2003).

#### 3.1 DISPONIBILIDADE DE RECURSOS HÍDRICOS

A precipitação média anual na Terra é da ordem de 1.017 kg e a altura média da superfície terrestre (em relação ao nível do mar) é de 800 m. Portanto, de forma simplificada, se poderia estimar que a energia hidráulica potencial seria da ordem de 200 mil TWh por ano, o que equivaleria a duas vezes o consumo médio anual atual de energia primária no mundo (BOYLE, 1996 apud BRASIL, 2005).

Essa estimativa simplista, entretanto, é pouco realista. Na prática, é impossível o aproveitamento de todo o volume de água precipitado. Primeiramente, em virtude da inacessibilidade de parte desse volume, sendo que parte dele re-evapora antes que possa ser utilizado. Em segundo lugar, porque há perdas de energia devido à turbulência e fricção da água nos canais e tubulações, de modo que a altura efetiva tende a ser bastante inferior à altura média real. Há, ainda, perdas no processo de conversão, embora o sistema **turbo-gerador** seja um dos métodos mais eficientes de aproveitamento de energia primária (os modelos mais eficientes, disponíveis atualmente, chegam a atingir um índice 90%) (BRASIL, 2005).

Devido às razões anteriormente citadas, estima-se que a energia hidráulica efetivamente disponível na Terra, isto é, o potencial tecnicamente aproveitável, varie de 10.000 TWh a 20.000 TWh por ano (ONU, 1992 apud BRASIL, 2005).

A Figura 1 ilustra o potencial tecnicamente aproveitável da energia hidráulica no Mundo para geração de energia elétrica. Como se observa, os maiores potenciais estão localizados na América do Norte, na antiga União Soviética, na China, na Índia e no Brasil, regiões de grande extensão, com precipitação elevada e geografia favorável à formação de rios caudalosos ou com grandes quedas de água. O Continente Africano é o que apresenta os menores potenciais de energia hidrelétrica.

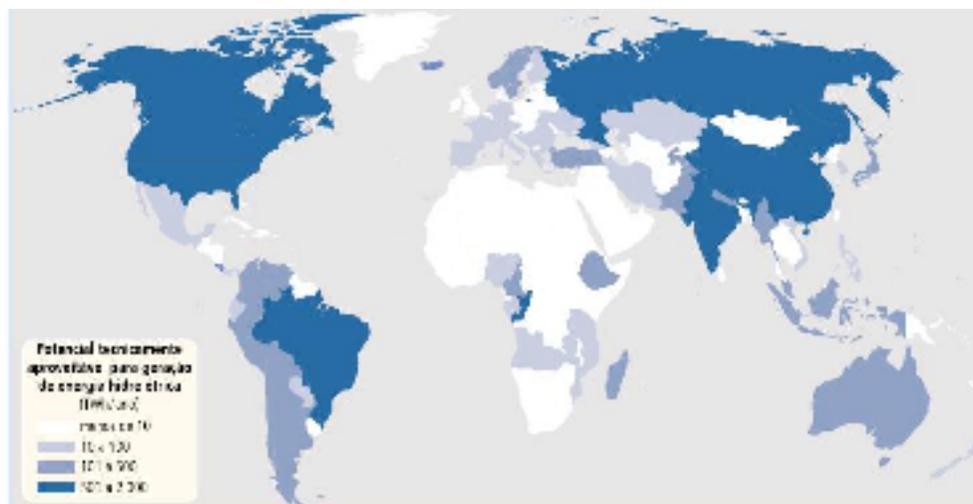


Figura 1: potencial tecnicamente aproveitável para geração de energia hidrelétrica no mundo (BRASIL, 2005)

### 3.2 POTENCIAL HIDRAÚLICO BRASILEIRO

O Brasil é fortemente dependente da energia proveniente de usinas hidrelétricas, a mais abundante no país devido à sua geografia acidentada e à abundância de recursos fluviais. Assim, o País, naturalmente, voltou grande parte dos seus recursos e conhecimento para o desenvolvimento desta fonte de energia.

Segundo os dados da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2008), o Brasil apresenta 1.706 (mil setecentos e seis) empreendimentos produtores de energia elétrica em operação, sendo que 159, ou seja, 9,32% desses empreendimentos, são usinas hidrelétricas.

Para avaliarmos a importância das usinas hidrelétricas na matriz energética brasileira, basta verificar que essas 159 usinas hidrelétricas são responsáveis por 74,44% de toda a potência de geração instalada no Brasil. Ou seja, do total de 100.786.074 kW de potência instalada, contabilizando todas as fontes de energia utilizadas no país, 75.023.597 kW provém de usinas hidrelétricas.

Se a importância das usinas hidrelétricas for analisada em função da energia gerada fica ainda mais evidente a dependência destes empreendimentos. As usinas hidrelétricas são responsáveis por mais de 80% da energia gerada anualmente, porque alguns empreendimentos geradores de energia, como as usinas termoeletricas, são fontes não renováveis e emitem gases poluentes para a atmosfera, portanto entram em operação apenas nos períodos de escassez de chuvas, quando os reservatórios das usinas hidrelétricas estão muito baixos. Já os empreendimentos hidrelétricos, em geral, operam continuamente o ano inteiro.

Cabe destacar que os locais com potencial de aproveitamento hidrelétrico somente são considerados para fins estatísticos, sendo enquadrados nos estágios de **inventário**, **estudo de viabilidade** ou **projeto básico**, se os respectivos estudos tiverem sido aprovados pelo poder competente.

O potencial hidrelétrico brasileiro situa-se ao redor de 260 GW. Contudo apenas 68% desse potencial foi inventariado, como indicado na figura 2. Verifica-se, analisando os dados constantes da figura, que, dentre as bacias com maior potencial destacam-se as do Rio Amazonas e do Rio Paraná (BRASIL, 2003).

Bacia	Código	Estimado		Inventariado		Total (MW)	
		(MW)	% em relação ao total	(MW)	% em relação ao total	(MW)	% em relação ao total
Bacia do Rio Amazonas	1	64.164,49	78,8	40.883,07	23,0	105.047,56	40,6
Bacia do Rio Tocantins	2	2.018,80	2,5	24.620,65	13,9	26.639,45	10,3
Bacia do Atlântico Norte/Nordeste	3	1.070,50	1,3	2.127,85	1,2	3.198,35	1,2
Bacia do Rio São Francisco	4	1.917,28	2,4	24.299,84	13,7	26.217,12	10,1
Bacia do Atlântico Leste	5	1.779,20	2,2	12.759,81	7,2	14.539,01	5,6
Bacia do Rio Paraná	6	7.119,29	8,7	53.783,42	30,3	60.902,71	23,5
Bacia do Rio Uruguai	7	1.151,70	1,4	11.664,16	6,6	12.815,86	5,0
Bacia do Atlântico Sudeste	8	2.169,16	2,7	7.296,77	4,1	9.465,93	3,7
<b>Total</b>	-	<b>81.390,42</b>	<b>100</b>	<b>177.435,57</b>	<b>100</b>	<b>258.825,99</b>	<b>100</b>

Figura 2: potencial hidrelétrico brasileiro por bacia hidrográfica (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005)

Na Bacia do Amazonas, destaca-se a sub-bacia 18 (Rio Xingu), com 12,7% do potencial inventariado no País. Outras sub-bacias do Amazonas, cujos potenciais estimados são consideráveis, são a do Rio Tapajós (17%), a do Rio Madeira (15%) e a do Rio Negro (14%). O Programa de Aceleração do Crescimento, lançado em 2006 pelo Governo Federal, prevê o aproveitamento de vários destes pontos, com destaque para a construção das hidrelétricas do rio madeira (Santo Antônio e Jirau).

Na Bacia do Tocantins, destaca-se a sub-bacia 29 (Rio Itacaiunas e outros), que representa 6,1% do potencial brasileiro inventariado.

Na Bacia do São Francisco, o destaque vai para a sub-bacia 49, que representa 9,9% do potencial inventariado (OPERADOR NACIONAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS, 2003).

Na Bacia do Paraná, existem várias sub-bacias com grandes potenciais, entre elas a 64 (Paraná, Paranapanema e outros), com 8,1% do potencial hidrelétrico inventariado no País.

Cabe lembrar que ainda existem pontos não inventariados, que podem incrementar o potencial hidrelétrico brasileiro. Dada a fartura e importância deste potencial, a conservação das barragens que auxiliam a operacionalizar seu aproveitamento é fundamental.

## 4 USINAS HIDRELÉTRICAS

Uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica, através de aproveitamento do potencial hidráulico existente num rio.

A geração hidrelétrica está associada à vazão do rio, isto é, à quantidade de água disponível em um determinado período de tempo e à altura de sua queda. Quanto maiores são os volumes e sua queda, maior é seu potencial de aproveitamento na geração de eletricidade. A vazão de um rio depende de suas condições geológicas, como largura, inclinação, tipo de solo, obstáculos e quedas. É determinada, ainda, pela quantidade de chuvas que o alimentam, o que pode fazer com que sua capacidade de produção de energia varie bastante ao longo do ano (SCHREIBER, 1978).

O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão hidráulica e pela concentração dos desníveis existentes ao longo do curso de um rio. Isto pode ocorrer de uma forma natural, quando o desnível está concentrado numa cachoeira, através de uma barragem, quando pequenos desníveis são concentrados na altura da barragem ou através de desvio do rio de seu leito natural, concentrando-se os pequenos desníveis nesses desvios (SOUZA, 1992).

Basicamente, uma usina hidrelétrica compõe-se das seguintes partes: barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e sistema de restituição de água ao leito natural do rio. Cada parte se constitui em um conjunto de obras e instalações projetadas harmoniosamente para operar eficientemente em conjunto.

### 4.1 ONDE CONSTRUIR UMA USINA HIDRELÉTRICA?

A definição do local onde será construída uma usina hidrelétrica resulta dos estudos de inventário, de viabilidade e do projeto básico, obedecidas às legislações vigentes, entre elas as de meio ambiente, além de fatores técnicos como (SOUZA, 1992):

- a) vazão de água compatível;
- b) altura de queda d'água favorável;

- c) condições topográficas e geológicas aceitáveis;
- d) materiais de construção disponíveis;
- e) mercado consumidor de energia definido;
- f) infra-estrutura de implantação estudada.

Após a verificação de todos esses itens, se a relação custo/benefício for favorável, dá-se continuidade ao processo.

## 4.2 COMO É GERADA A ENERGIA?

Para aproveitar o potencial hidrelétrico de um determinado rio, geralmente interrompe-se seu curso normal através da instalação de uma barragem, que provoca a formação de um lago artificial, chamado reservatório. A água captada no lago formado pela barragem é conduzida até a casa de força através de canais, túneis e/ou condutos metálicos. Após passar pela turbina hidráulica, na casa de força, a água é restituída ao leito natural do rio, através do canal de fuga. A energia hidráulica é transformada em energia mecânica quando a água passa pela turbina, fazendo com que esta gire. No gerador, que gira acoplado mecanicamente à turbina, a energia mecânica é transformada em energia elétrica (SCHREIBER, 1978).

A energia assim gerada é levada através de cabos ou barras condutoras, dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão (voltagem) elevada, para facilitar sua condução, através de linhas de transmissão, até os centros de consumo. Daí, através de transformadores abaixadores, a energia tem sua tensão levada a níveis adequados para utilização pelos consumidores (SOUZA, 1992).

## 4.3 PRINCIPAIS ESTRUTURAS E SUAS FUNÇÕES

Uma usina hidrelétrica é constituída por diversas estruturas construídas separadamente. No final, o conjunto dessas estruturas interligadas, funcionando em sincronia, produz o resultado final, que é a energia elétrica. A figura 3 apresenta o exemplo de um arranjo geral em planta baixa de uma usina hidrelétrica, onde é possível observar as estruturas que formam a usina.

As principais estruturas de uma usina hidrelétrica são: barragem, estrutura de descarga de excesso de vazão (vertedouro ou adufa), sistema de captação e adução, casa de força e sistema de restituição. Já a figura 4 apresenta um corte esquemático do sistema de geração de energia.

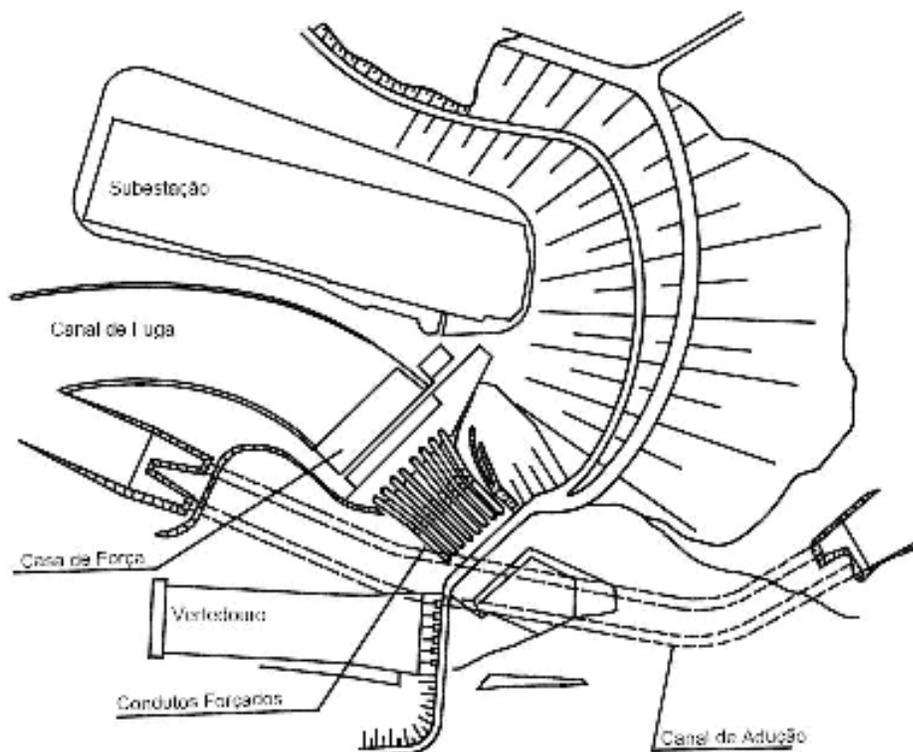


Figura 3: arranjo geral em planta baixa da UHE Furnas (HASPARYK, 2005)

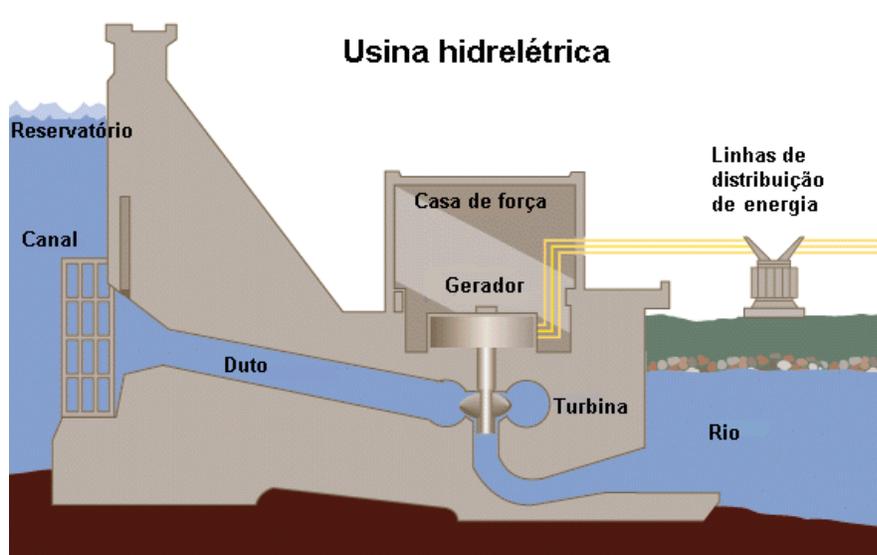


Figura 4: corte esquemático do sistema de geração de energia de uma UHE.

Nos próximos itens as estruturas componentes de uma usina hidrelétrica são apresentadas em maior detalhe.

### **4.3.1 Barragem**

A barragem, elemento mais importante do ponto de vista de obra civil, no contexto de uma usina hidrelétrica apresenta duas funções básicas. Primeiramente, serve para elevar o nível d'água, para aumentar a altura de queda, elevando assim, a capacidade de produção de energia da usina. Em segundo lugar, atua para reter água, acumulando-a para formar um reservatório, que irá manter a usina em funcionamento nos períodos de escassez de chuvas. Uma barragem, quando concluída, deve satisfazer, fundamentalmente, duas condições: ser estável em qualquer condição e apresentar um grau de estanqueidade compatível com seus objetivos (SOUZA, 1992). Dependendo de seu porte e função, as barragens podem ser construídas com terra, enrocamentos ou concreto. Para os fins do presente trabalho são de interesse as barragens de concreto.

### **4.3.2 Estrutura de descarga de excesso de vazão**

Também conhecido como vertedouro, a estrutura em questão, é construída normalmente junto ao corpo da barragem. Dificilmente é construída qualquer obra hidráulica sem a presença de um vertedouro, pois se trata de uma estrutura de segurança, que tem a finalidade de descarregar a água em excesso que chega ao reservatório durante uma cheia, ultrapassando a capacidade de descarga das turbinas, o que evita o transbordamento e a conseqüente passagem de água por cima da barragem, quando esta não está prevista para tal solicitação (SCHREIBER, 1978).

### **4.3.3 Sistema de captação e adução**

O sistema de captação e adução é constituído pela tomada d'água e túneis de baixa e alta pressão. A tomada d'água tem a finalidade de captar e conduzir a água aos órgãos adutores,

impedir a entrada de corpos flutuantes, que possam danificar as turbinas, e fechar a entrada d'água, quando for necessário. Os túneis de baixa e alta pressão conduzem e direcionam a água que é captada na tomada d'água até as turbinas (SCHREIBER, 1978).

#### **4.3.4 Casa de força**

Na casa de força é onde ficam instalados os equipamentos responsáveis pela produção de energia, as turbinas e os geradores. Neste local, também, localizam-se todos os equipamentos que controlam o funcionamento da usina, e as salas dos operários responsáveis pela operação e manutenção da mesma (SOUZA, 1992).

#### **4.3.5 Sistema de restituição**

O sistema de restituição é formado pelo tubo de sucção e o canal de restituição. O tubo de sucção é o local por onde a água escoia imediatamente após a passagem pelas turbinas. Em seguida essa água encontra o canal de restituição que a direciona de volta ao leito natural do rio (SCHREIBER, 1978).

## **5 PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE ESTRUTURAS EM CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

As manifestações patológicas de estruturas em concreto podem ter origem em qualquer uma das etapas da construção (planejamento/projeto, materiais, execução e utilização).

Aranha (1994) destaca que os fatores que determinam a velocidade de execução da obra, em geral, estão mais relacionados ao prazo e ao custo do empreendimento, a seleção dos materiais e a mão-de-obra, acabam sendo deixados em segundo plano, configurando-se então um quadro favorável à incidência de patologias diversas. Isto também acontece em obras de barragens, visto que, normalmente, existem cláusulas contratuais bastante onerosas para o caso de atraso na entrega das obras.

Os problemas patológicos são, normalmente, provocados pela ação de agentes agressivos, pelo desenvolvimento de esforços internos e/ou externos não previstos em projeto, ou pelo emprego de processos equivocados ou inadequados nas etapas de execução e utilização.

Como na maioria dos quadros patológicos, as estruturas normalmente estão sujeitas à atuação de um conjunto de agentes agressivos, que atuam de forma sinérgica, se constituindo em um processo evolutivo, ligado a uma série de causas, e não a uma única causa.

As estruturas em concreto que compõe uma usina hidrelétrica estão submetidas a ambientes consideravelmente agressivos, visto que a maioria destas estruturas irá desempenhar a sua função em condição submersa.

Neste capítulo procurou-se agrupar as principais manifestações patológicas encontradas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas, quanto às suas origens e características de funcionamento, a partir de informações retiradas da literatura especializada da área. Verificou-se que as estruturas em concreto das usinas hidrelétricas estão frequentemente sujeitas a desgastes superficiais devido à passagem de fluxos de água em alta velocidade ou contendo detritos, que provocam erosão por cavitação ou abrasão. Além disto, muitas obras sofrem deterioração devido a processos químicos expansivos associados à reação álcali-agregado, agravada pela presença de elevada umidade. Finalmente, os registros encontrados na literatura apontam, ainda, para a ocorrência de fissuras e trincas indesejadas devido ao aparecimento de solicitações não previstas na fase de projeto.

Cabe salientar que, dadas às limitações de abrangência de um trabalho de conclusão de curso, as discussões apresentadas nesse capítulo fornecem apenas uma noção geral sobre a natureza dos danos existentes neste tipo de estruturas. Para aprofundamento sobre o tema, recomenda-se que sejam consultadas as referências bibliográficas listadas ao final do trabalho, onde podem ser encontradas informações complementares.

## 5.1 EROSÃO

A erosão é um processo de desgaste superficial comum em estruturas sujeitas à passagem de fluxos de água. Pode ser decorrente do impacto de material em suspensão ou da formação e explosão de bolhas de ar, configurando, respectivamente, os mecanismos de abrasão e cavitação, discutidos em maior detalhe a seguir.

### 5.1.1 Abrasão

A abrasão é definida como o desgaste de uma superfície devido a um processo de atrito ou fricção. Pode ser genericamente definida como uma deterioração causada pela ação abrasiva de fluidos ou sólidos em movimento. (LATORRE, 2002).

A abrasão é um processo de desgaste que ocorre quando partículas são transportadas pela água e entram em choque com a superfície de concreto. Este impacto causa atrito, esfolamento e ranhuras na superfície, causando fissuras e agravando a extensão de prováveis microfissuras existentes na pasta de cimento e deixando os agregados aparentes (KORMANN, 2002).

Segundo Latorre (2002), a previsão da intensidade da ação abrasiva é de difícil avaliação, visto que existem algumas variáveis envolvidas, como os tipos de partículas transportadas, dureza, tamanho e quantidades das mesmas, assim como a qualidade do concreto.

Além de provocar o desgaste superficial, a abrasão pode ainda contribuir para o surgimento de outras manifestações patológicas, pois torna as superfícies de concreto mais porosas, como se observa na figura 5, o que facilita a penetração da água e de agentes nocivos.



Figura 5: efeitos da abrasão no tubo de sucção da UHE Itaipú (LATORRE, 2002)

No presente trabalho será considerada a abrasão como o desgaste produzido na superfície do concreto pelo transporte de materiais sólidos em suspensão, como silte, areia, cascalho e demais sólidos levados pelas águas a grande velocidade. A erosão no concreto, causada pela abrasão, pode ser tão severa quanto à causada pela cavitação.

### **5.1.2 Cavitação**

Segundo Kormann (2002), a cavitação é um processo de deterioração derivado da formação de bolhas de vapor e de seu subsequente colapso junto à superfície do concreto, com liberação de uma grande quantidade de energia. As bolhas de vapor podem se formar na água em escoamento quando a pressão num ponto é reduzida à pressão de vapor à temperatura ambiente. Quando estas bolhas, ao escoar, entram numa região de alta pressão, elas colapsam (implodem) com alto impacto. A energia liberada pelo colapso causa os danos por cavitação.

A cavitação, normalmente, é produzida em regiões onde o fluxo da água se separa da superfície do concreto, seja pela mudança brusca de direção ou pela passagem de água em grande velocidade da água sobre uma superfície de escoamento com irregularidades superficiais.

Em canais abertos, a água apresenta um fluxo não-linear. Quando escoar com uma velocidade superior a 12 m/s, a mesma pode causar uma erosão progressiva da superfície de concreto, devido ao desenvolvimento da cavitação. Em condutos fechados estes danos podem ocorrer em fluxos com velocidade a partir de 7,5 m/s (NEVILLE, 1997).

As erosões causadas pela cavitação são facilmente distinguíveis, pois se apresentam como pequenos furos, ou crateras, com bordas irregulares, que se desenvolvem na superfície do concreto como mostrado na figura 6.



Figura 6: efeitos da cavitação no vertedouro de Itaipu (LATORRE, 2002)

As erosões causadas por abrasão apresentam, normalmente, superfície regular e plana na região de deterioração. Segundo Scandiuzzi e Andriolo (1986) “[...] a superfície erodida por cavitação é áspera, rugosa, deixando os agregados à vista, dando o aspecto de uma ‘bicheira’.

Uma das melhores maneiras de proteger o concreto do efeito da cavitação é por meio da previsão da sua ocorrência na fase de projeto e nos procedimentos de construção, produzindo-se um fluxo tranquilo e uniforme na estrutura hidráulica.

## 5.2 REAÇÕES DELETÉRIAS

Além da erosão, outro mecanismo de degradação que se desenvolve com frequência em estruturas de concreto de barragens são as reações deletérias, especialmente a reação álcali-agregado, uma reação expansiva que se desenvolve entre os compostos de sílica ou carbonatos presentes no agregado e os álcalis do cimento, como descrito a seguir.

### 5.2.1 Reação Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado (RAA) é um dos fenômenos patológicos mais importantes que interferem na durabilidade do concreto de estruturas hidráulicas. Resumidamente, pode-se definir a RAA como uma reação química em que alguns constituintes do agregado reagem com os hidróxidos alcalinos derivados da hidratação do cimento, que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto (SABBAG, 2003), formando um gel expansivo, como mostrado na figura 7, que na presença de umidade pode expandir-se consideravelmente.



Figura 7: gel sílico-alcálico formado pela reação entre os agregados reagentes e o cimento (HASPARYK, 2005)

Se o gel estiver confinado pela pasta de cimento, seu inchamento implica na introdução de tensões internas que, eventualmente, podem causar fissuras (conforme esquema apresentado na figura 8) da matriz do concreto e afetar sua durabilidade e várias de suas propriedades mecânicas.

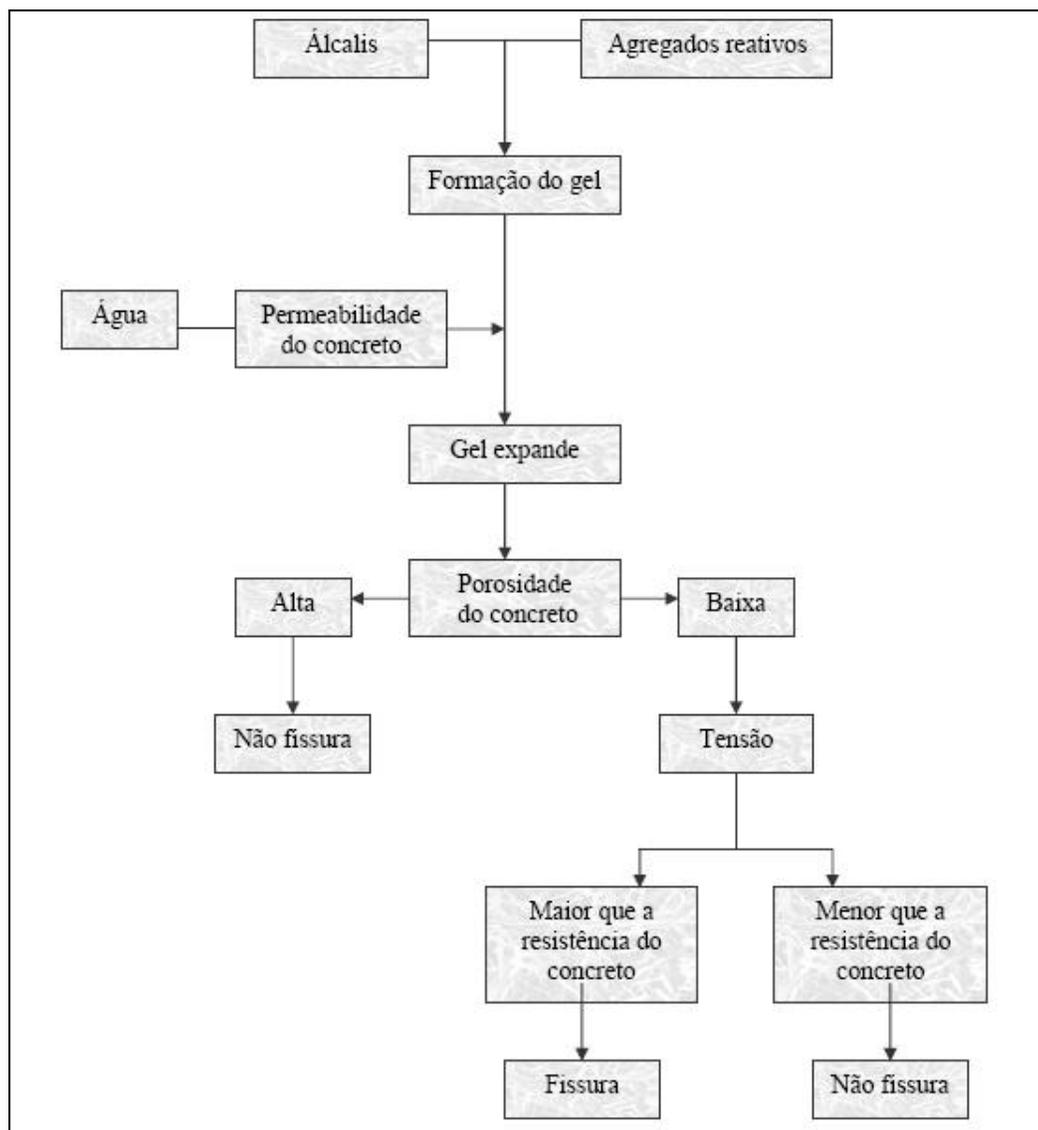


Figura 8: esquematização do processo de iteração da reação álcali-agregado com a estrutura de concreto (SILVA, 2007)

As reações tipo álcali-agregado podem ser divididas em dois tipos básicos: a reação álcali-silica e a reação álcali-carbonato. Um caso particular da reação álcali-silica é a reação álcali-silicato.

Dentre os tipos de RAA, a que mais ocorre no Brasil é a reação álcali-silicato, que ocorre entre os álcalis disponíveis na solução dos poros do concreto e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas (SILVA, 2007).

A fissuração ocorrida no concreto devido à RAA pode contribuir com outros problemas que afetam a durabilidade das estruturas, como por exemplo, a corrosão de armaduras. Segundo o CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens, 1999), a microfissuração junto à superfície dos agregados e a perda de aderência podem levar a perdas de resistência e à redução do módulo de elasticidade do concreto. As mesmas considerações constam do estudo de Mehta e Monteiro (1994), que comentam que a reação álcali-agregado pode causar expansões e fissurações, levando à perda de resistência, de elasticidade e de durabilidade do concreto.

Diante dos fatores que influenciam o desenvolvimento da RAA, apesar da reação poder se manifestar em qualquer estrutura de concreto, se nota que as barragens apresentam condições particularmente favoráveis ao aparecimento da RAA, uma vez que envolvem grandes volumes de concreto massa e apresentam condições de temperatura e umidade extremamente variáveis e favoráveis ao desenvolvimento da manifestação patológica. Conforme Hasparyk (2005), se têm hoje relatado no meio técnico mundial mais de 140 casos de barragens afetadas pela RAA.

O CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens, 1999) relata que há países em que cerca de 25% das estruturas de barragens está afetada pela RAA. A África do Sul, por exemplo, entre 1970 e 1996 gastou cerca de US\$ 350.000.000,00 (trezentos e cinquenta milhões de dólares americanos) no reparo e manutenção de estruturas de concreto, em geral, afetadas pela reação.

O interesse na reação álcali-agregado em estruturas de concreto aumentou significativamente nas últimas décadas em função do aparecimento, cada vez mais intenso, de novos casos de manifestações patológicas, do risco relacionado à segurança de barragens e dos elevados custos de reparos e manutenção. Muitas vezes, os elevados custos de reparos e manutenções estão relacionados a diagnósticos incorretos, medidas reparadoras inadequadas e, até mesmo, desconhecimento sobre o assunto, o que não é muito incomum.

Apesar de a RAA ter sido divulgada a partir da década de 40, uma das grandes dificuldades em dominar o mecanismo da reação álcali-agregado está relacionada à utilização de um universo cada vez maior de tipos de rochas potencialmente reativas.

A velocidade de desenvolvimento e magnitude das deformações depende de um grande número de fatores, sendo os principais: a natureza e quantidade disponível de agregados reativos, teor de álcalis no cimento, temperatura ambiente, disponibilidade de umidade e de eventuais restrições (SILVA, 2007).

### 5.3 TRINCAS E FISSURAS

O processo de projeto de uma estrutura civil é naturalmente cauteloso. Quando calculada corretamente, uma estrutura tem uma reserva de segurança. Pequenas alterações na intensidade ou distribuição de cargas, produzidas por fatores internos ou externos, não chegam a comprometer a sua segurança. Todavia, podem causar o aparecimento de trincas e fissuras, que comprometem a durabilidade e podem afetar negativamente a estanqueidade de estruturas de barragens.

Segundo Figueiredo (1989), problemas como sobrecargas não previstas, deslocamentos excessivos, recalques diferenciados do terreno ou reações químicas expansivas, podem levar ao desenvolvimento de esforços não previstos em projeto, que podem levar a estrutura a um estado de fissuração intenso, comprometendo a segurança ou estanqueidade da mesma.

O quadro 1 apresenta uma classificação das origens dos principais tipos de fissuras apresentada pelo COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON (CEB). Além destas, em obras hidráulicas, é importante considerar a possibilidade de falhas na interface entre camadas de concreto rolado e os danos provenientes de impactos ou movimentações estruturais globais devido à ação da água sobre a estrutura.

No caso das estruturas hidráulicas, a determinação da abertura das fissuras ou trincas pode ser um fator determinante para avaliar a gravidade do problema, pois se houver fluxo de umidade através da fissura podem-se ter sérios problemas de estanqueidade e erosão, além de dificultar o processo de recuperação da mesma.

Estágio	Classificação	Origem
Concreto Fresco	Físicas	congelamento precoce
	Plásticas	assentamento plástico ou retração plástica
	Movimentos durante a construção	cedimento de formas ou movimentação / assentamento do solo ou fundações
Concreto Endurecido	Físicas	variação volumétrica dos agregados; retração por secagem e mapeamento
	Químicas	corrosão da armadura; reação álcali-agregado e retração por carbonatação
	Térmicas	ciclos de gelo/degelo; variações térmicas sazonais e contração térmica
	Estruturais	Sobrecarga acidental; carregamento normal e deformação lenta

Quadro 1: tipos principais de fissuração (COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1992 apud SILVA FILHO, 1994)

Normalmente, em estruturas submersas, a correção das fissuras é efetuada através da injeção de materiais que conseguem se polimerizar em ambientes úmidos, tais como o poliuretano. Os sistemas de injeção de fissuras atualmente empregados em obras hidráulicas envolvem a utilização de uma espuma de poliuretano que faz um preenchimento inicial, e que pode ser preenchida por uma calda de poliuretano, para maior resistência e impermeabilidade. Quando a abertura da fissura é pequena e o fluxo de água não é intenso, podem-se efetuar injeções de calda de cimento ou, quando o acesso às fissuras é complicado, pode-se tentar colmatar a mesma com lançamento de material granular, tal como pó carvão.

Em qualquer caso, é indispensável o conhecimento das causas da deterioração, da sua extensão e da sua atividade, para que se possa efetuar uma escolha bem fundamentada do tipo de intervenção e terapia mais adequada para cada caso (ARANHA, 1994). Para estabelecer uma estratégia de intervenção é necessário, antes de tudo, determinar, por exemplo, se a fissura é ativa ou passiva. Caso a mesma seja ativa, recomenda-se que se busque atuar sobre o mecanismo de indução da fissura, antes de proceder à sua recuperação.

Qualquer que seja a estratégia de intervenção selecionada, a análise da viabilidade de um determinado reparo das fissuras e trincas passa fundamentalmente pela consideração de aspectos econômicos e técnicos. Sendo a fissura, freqüentemente, um fator desencadeante de outros problemas, a postergação da solução do problema causa um incremento nos recursos necessários à sua correção.

É necessário, também, considerar o aspecto estético e a sensação de falta de estabilidade que decorre da observação de uma estrutura fissurada, o que gera insatisfação psicológica, quando as fissuras são visíveis (FIGUEIREDO, 1989).

Analisando sob um âmbito econômico maior, constata-se, ainda, que o valor patrimonial de uma estrutura decresce à medida que o seu tempo de vida útil é reduzido, o que pode acontecer se uma fissura não for tratada. Esta visão de longo prazo pode justificar algumas intervenções que aparentemente seriam muito onerosas.

## 6 ANÁLISE DE CASOS REAIS DE OCORRÊNCIA DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS EM CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS

A seguir serão apresentados alguns casos reais de ocorrência das principais manifestações patológicas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas. Os casos foram dispostos neste trabalho em função do mecanismo patológico apresentado.

O quadro 2 apresenta, resumidamente, os casos e as respectivas manifestações patológicas registradas, que serão descritas a seguir.

<b>Manifestação Patológica</b>	<b>Empreendimento</b>	<b>Local do Aparecimento da Manifestação Patológica</b>
Abrasão	UHE Ilha Solteira	Bacia de dissipação
	UHE Jupia	Tubo de sucção
	UHE Capivara	Soleira do vertedouro
	UHE Campos Novos	Estrutura de concreto da comporta do túnel de desvio
	UHE Furnas	Calha do vertedouro
	UHE Marimbondo	Calha do vertedouro e na bacia de dissipação
	UHE Chapéu d'uvas	Soleira do vertedouro
	UHE Porto Colômbia	Bacia de dissipação
	UHE Camargos	Na calha submersa
	UHE Porto Primavera	Soleira do vertedouro
Cavitação	UHE Ilha Solteira	Blocos dissipadores do vertedouro de superfície
	UHE Jupia	Concreto interface com o tubo blindado
Reação Álcali-Agregado	UHE Furnas	Pilares do vertedouro, blocos de ancoragem dos condutos forçados e na casa de força
	UHE Moxotó	Na casa de força
Trincas, Fissuras e Infiltrações	UHE Campos Novos	Face de concreto do barramento
	UHE Porto Primavera	Locais da casa de força
	UHE Itaipu	Viga Munhão

Quadro 2: casos de manifestações patológicas relacionados no presente trabalho

## 6.1 CASOS RELACIONADOS À EROÇÃO POR ABRASÃO

### 6.1.1 UHE Ilha Solteira

A usina hidrelétrica Ilha Solteira está localizada no rio Paraná, no município de Três Lagoas/MS. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à CESP (Companhia Energética de São Paulo). A construção deste empreendimento, com 3.230 MW de potencia instalada, foi executada pela construtora Camargo Corrêa, com projeto da Themag (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982).

Logo após a inauguração da UHE Ilha Solteira – com cerca de um ano de operação – foram constatadas erosões no concreto da bacia de dissipação. Verificou-se que as erosões foram provocadas pela ação abrasiva da passagem de rochas do enrocamento de jusante, que foram carregadas para o interior da estrutura em consequência das operações assimétricas de comportas do vertedouro de superfície (SALLES, 1980).

Essa situação exigiu um grande reparo na bacia de dissipação, que apresentava cavidades no concreto de até 15 cm de profundidade, armadura exposta e locais com ruptura do vedajuntas. O reparo foi realizado baixando o nível do reservatório de montante para que as comportas do vertedouro fossem fechadas e a vazão do rio Paraná passasse exclusivamente pelas turbinas, sendo construída uma ensecadeira a jusante para permitir a realização do trabalho a seco (SALLES, 2001).

Como as cavidades verificadas no concreto eram bastante irregulares, foram feitas elevações de 20 cm na cota de projeto da parte horizontal e de 10 cm na cota da superfície inclinada do bloco de saída da água, para simplificar a execução e garantir melhor qualidade da restauração (SALLES, 2001).

Os materiais utilizados na restauração das zonas erodidas foram argamassa epóxídica, aplicada com ponte de aderência de resina epóxi, e concreto convencional. A argamassa epóxídica é bastante utilizada em regiões onde as solicitações mecânicas são altas pois a matriz epóxi apresenta grande resistência à tração e excelente resistência química.

Na recuperação da obra, segundo Salles (1980), se utilizou um volume total de concreto de 5.900m<sup>3</sup> e uma massa total de resina epóxi de 8.150kg, que foram aplicados em 60 dias. Os materiais utilizados apresentavam as seguintes características:

- a) argamassa epóxica: 75,50 MPa aos 3 dias – traço 1:6
- b) concreto relação A/C= 0,39 e 44,30 MPa aos 28 dias de idade.

### **6.1.2 UHE Engenheiro Souza Dias (Jupiá)**

A usina hidrelétrica Engenheiro Souza Dias está localizada no rio Paraná, no município de Três Lagoas/MS. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à CESP. A construção deste empreendimento, com 1.411,2 MW de potência instalada, foi executada pela construtora Camargo Corrêa e projetada pela Themag (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982).

Durante as paradas programadas das turbinas são realizadas inspeções visuais no interior do tubo de sucção da casa de força. Essas inspeções procuravam identificar anomalias no concreto das estruturas e avaliar a necessidade e urgência das recuperações (SALLES, 2001).

A partir de 1976, foram observadas erosões no concreto dos tubos de sucção, sendo identificada a necessidade de reparos. Por critérios específicos, esse trabalho precisa ser executado durante o período de parada da máquina, que em condições normais é breve (SALLES, 2001).

Para reparar as erosões existentes nessas estruturas da casa de força foi empregado argamassa epoxídica com ponte de aderência de resina epóxi, em razão do curto prazo para a execução, da localização e das dimensões das erosões, da alta resistência nas primeiras idades, da facilidade para desforma e acabamento superficial conferido às misturas epoxídicas (SALLES, 2001).

Estudos desenvolvidos no Laboratório CESP comprovaram também a eficiência de argamassa com sílica ativa nesse tipo de aplicação, porém esta alternativa tem emprego limitado pelo reduzido tempo disponível para execução dos reparos e liberação da operação das máquinas (SALLES, 2001).

### 6.1.3 UHE Capivara

Construída na década de 70, a Usina Hidrelétrica Escola de Engenharia Mackenzie, conhecida como UHE Capivara, está situada no Rio Paranapanema, entre a divisa dos estados do Paraná e de São Paulo (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982).

Conforme descrito por Leite e Abbud (1996), devido à alta velocidade que o fluxo d'água atinge ao descer pelo rápido do vertedor, de cerca de 28 m/s, o fenômeno de cavitação foi uma das principais preocupações a serem tratadas na fase de projeto.

Para se evitar o aparecimento do fenômeno de cavitação, as estruturas hidráulicas da UHE Capivara foram projetadas evitando-se curvaturas abruptas e o acabamento das juntas de dilatação das lajes dos vertedores foi feito seguindo recomendação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC (Lisboa), que sugere rebaixamento na justaposição entre as lajes (KORMANN, 2002).

Além da otimização hidráulico-geométrica da estrutura, para que a cavitação fosse evitada, considerou-se que seria importante obter uma superfície lisa e resistente, que reduziria a probabilidade de cavitação e abrandaria eventuais efeitos da abrasão.

Para obter superfícies lisas e resistentes, foi considerado que a aplicação de argamassa epoxídica seria uma boa solução, além de blindagem com chapas de aço chumbadas no concreto em arestas específicas. Porém, ambas as soluções não foram adotadas por serem consideradas onerosas (KORMANN, 2002).

A Companhia Energética de São Paulo/CESP decidiu que a solução mais prática e econômica para efetuar o acabamento liso e resistente, seria o emprego de concreto de alta resistência, com  $f_{ck}$  compatível com a velocidade e grau de aeração do fluxo. Para tanto foi estipulado que a relação água/cimento (a/c) deveria ser menor ou igual a 0,40.

Leite e Abbud (1996) ressaltaram que o termo utilizado para descrever o concreto, acertadamente, foi "alta resistência" e não "alto desempenho", visto que na época não se dispunham de materiais como a sílica ativa e os aditivos superplastificantes. A alta resistência foi alcançada controlando a relação a/c, aumentando o consumo de cimento e utilizando refrigeração dos agregados e da água de amassamento.

Após a análise dos ensaios das amostras de concreto coletadas durante a execução, verificou-se que a resistência à compressão para três regiões do vertedor da UHE Capivara foi de:

- a) 30 MPa em lajes da região inicial e mais alta do rápido, onde a água atingia velocidades médias de até 16 m/s;
- b) 35 MPa, nas lajes da região média do rápido, onde a água atingia velocidades médias de 16 a 24 m/s; e
- c) 40 MPa, nas lajes da região mais baixa do rápido, junto aos blocos de dissipação de energia, onde a velocidade média da água variava de 24 a 28 m/s e onde ocorria o impacto do fluxo sobre os blocos dissipadores.

As camadas de acabamento, executadas com o concreto de alta resistência, ficaram com espessura média de 20 cm, na qual foi inserida uma malha metálica Q138, com abertura de 10x10cm e diâmetro de fio de 4,2mm (CA-60), posicionada no eixo médio da camada, segundo Leite e Abbud (1996).

Nos trechos inclinados do rápido do vertedouro, para proporcionar um bom desempenho das juntas de dilatação, foi feito um rebaixamento na justaposição entre as lajes, conforme mostrado no esquema da Figura 9.

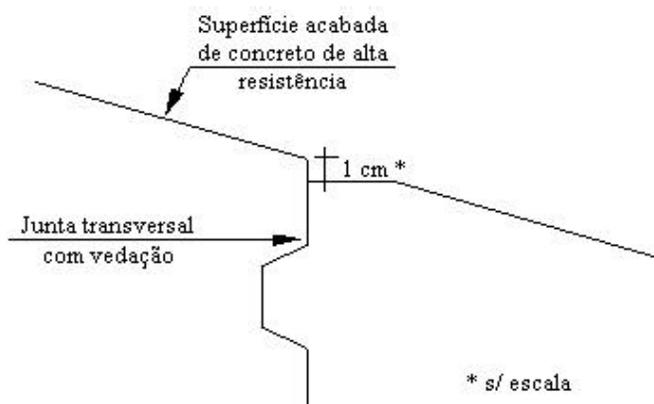


Figura 9: detalhe do rebaixamento na justaposição entre lajes – juntas de dilatação (LEITE; ABBUD, 1996)

Como observado na Figura 10, ao final das lajes do rápido do vertedor, estão dispostos os dez blocos de dissipação de energia, convenientemente orientados, de modo a abrir o fluxo d'água em forma de leque permitindo a sua aeração e evitando a cavitação na região.



Figura 10: vista geral dos blocos de dissipação – julho/2001 (KORMANN, 2002).

O concreto do trecho rápido do vertedouro da UHE Capivara começou a apresentar desgastes por abrasão no final da década de 70. Estudos indicaram que estes desgastes ocorreram devido à passagem do fluxo em alta velocidade, à exposição às intempéries e às variações de clima e temperatura inerentes às estações do ano na região.

Nas várias inspeções técnicas realizadas, foi detectado que a região mais afetada da estrutura abrangia a metade longitudinal direita, englobando as lajes, principalmente as juntas. A erosão também foi detectada nos muros laterais e pilares de sustentação das comportas, inclusive com sinais de exposição da armadura (KORMANN, 2002).

No trabalho realizado por Salles e Almeida Júnior (2000), algumas considerações foram feitas quanto aos trabalhos de recuperação realizados na UHE Capivara, considerando a seleção dos materiais, os estudos de dosagens, a metodologia executiva, o controle tecnológico dos serviços e os ensaios de desgaste à abrasão em situação real de funcionamento do vertedouro. Este trabalho descreve as condições em que se encontravam o rápido e o canal de fuga do vertedouro da usina quanto à fissuras e erosões, em agosto de 1982. As erosões ocorreram tanto nas lajes do vertedouro quanto nas margens da bacia de dissipação. Em comparação com inspeção realizada em 1979, esta vistoria comprovou que houve agravamento do problema de abrasão e fissuração.

Após análise dos desgastes, das condições das estruturas e alternativas de MRs, optou-se pelo uso de argamassas de alta resistência para efetuar os reparos. Para orientar a definição destas

argamassas foram previamente analisados em laboratório, os parâmetros requeridos das composições, em termos de trabalhabilidade e resistência mecânica.

As argamassas utilizadas foram:

- a) argamassa epoxídica: foi produzida com resina epóxi bi-componente encontrada comercialmente e dosada conforme instruções do fabricante, misturada mecanicamente com areia da região, seca e peneirada. O traço desta argamassa variou numa proporção de 1 de resina para 4,5 a 5 de areia, em peso.
- b) argamassa de cimento: foi dosada em betoneira e utilizou-se areia da região. Seu traço ficou estipulado em 1: 2: 0,35 (cimento: areia: a/c). O cimento utilizado foi o CP II – 32.

Em 1997, Salles e Almeida Júnior (2000), durante inspeções programadas para verificação da segurança das estruturas da UHE Capivara, constataram degradações, principalmente nas juntas entre as lajes. Observaram-se também algumas trincas nas lajes e que alguns reparos que haviam sido feitos anteriormente estavam soltos ou arrancados. Também nesta ocasião se optou pelo uso de argamassas de alta resistência para realização dos reparos, sendo empregados os seguintes materiais e composições:

- a) argamassa epoxídica com cimento: o traço foi estipulado em 1: 1: 3 (resina: cimento: areia). O cimento CP II – 32 foi introduzido para aumentar o tempo durante o qual a resina permanece em estado de ser usada, depois de misturada com seu catalisador (pot life);
- b) argamassa de cimento com sílica: o traço foi especificado em 1: 3: 0,1 (cimento: areia: sílica ativa), com adição de 0,2% de aditivo plastificante. As porcentagens são em relação ao peso de cimento.

Tanto em 1984 quanto em 1997, a execução dos reparos obedeceu à mesma ordem de procedimentos, variando somente quanto ao tipo de área a ser reparada: lajes, juntas, muros e pilares. A seqüência básica de procedimentos foi:

- a) retirada do material deteriorado: em todas as regiões foram utilizados martelos pneumáticos para corte e retirada do concreto deteriorado, até encontrar-se a região de concreto resistente, deixando a superfície rugosa. Ao longo das trincas, o concreto foi quebrado e cortado em canaleta com formato em "V", com aberturas na superfície de 10 a 15 cm e profundidade

que resultasse em concreto firme e rugoso. Nas juntas, muros e pilares, os recortes foram delimitados com disco de corte, definindo figuras geométricas com cantos vivos sendo o concreto no interior das figuras removido com o martetele;

- b) limpeza das áreas, canaletas e armaduras: os restos de material solto e poeira foram retirados com ar comprimido e escovas de aço, utilizadas também para a limpeza das armaduras. Estas ficaram livres de maneira que a distância ao substrato permitisse seu completo envolvimento e preenchimento pelo material de reparo;
- c) execução de ensecadeira e fôrmas: para desviar a água que passava pela vedação das comportas das regiões dos reparos, foi feita uma ensecadeira de proteção com argila reforçada com argamassa de cimento, que permitiu que os serviços fossem realizados em ambiente seco. Fôrmas de madeira untadas com óleo ou de chapas galvanizadas foram montadas nas regiões de reparos onde houve necessidade;
- d) aplicação da pintura de base primer: para melhorar a aderência entre o substrato e a argamassa de reparo, foi empregada pintura a base de resina epóxi, a mesma utilizada na composição da argamassa, cuidando para que toda área a ser reparada estivesse seca, limpa e rugosa, recebendo a pintura de maneira uniforme;
- e) aplicação das argamassas de reparo: as argamassas foram transportadas até os locais de reparo por carrinhos de mão e baldes. O tratamento das juntas foi feito isolando-se as lajes vizinhas, deixando-as livres e bem definidas. Para isto, utilizaram-se placas de isopor e tiras de papelão, para posterior aplicação das argamassas. O adensamento das argamassas epoxídicas foi feito manualmente por meio de socamento em camadas, tanto para as áreas reparadas quanto para as juntas, para a eliminação dos vazios e para melhorar a aderência com o substrato. O adensamento das argamassas de cimento foi feito por meio de vibrador elétrico. Posteriormente, ambos os tratamentos recebiam acabamento liso. As placas de isopor e as tiras de papelão foram retiradas ou cortadas rentes à superfície;
- f) reparos das trincas nas lajes: as trincas nas lajes foram mantidas como juntas, para que permitissem o trabalho efetuado pelas lajes. Os reparos foram efetuados em duas etapas, uma com fôrmas de chapa galvanizada, dispostas sobre o desenho da trinca, aplicando-se argamassa de reparo em um dos lados e, na outra, aplicando-se produto graxo na face vertical da argamassa, para evitar aderência. Em seguida, foi preenchida a cavidade. Também foram utilizadas placas de isopor para isolar as lajes;
- g) desforma: o período para a desforma das argamassas foi de 6 horas para a argamassa epoxídica e de 24 horas para as de cimento. Após este período, foram feitas correções de acabamento no local;
- h) acabamento: após a cura das argamassas, o acabamento foi realizado com lixadeiras e ar comprimido, e onde foi necessário, nova pintura com resina

foi feita com o intuito de se obter uma superfície lisa, isenta de rugosidades;

- i) correções: nos locais onde houve necessidade de correção, os passos anteriores foram realizados e novo MR foi aplicado. Desbastes e concordâncias locais foram feitas com lixadeira pneumática, seguida de sopro com ar comprimido para a limpeza e, na seqüência, pintura final com resina epóxi para proteção superficial.

Leite e Abbud (1996) comentam que, durante os trabalhos de reparo, a variação térmica foi acentuada e provavelmente este fator ocasionou o reaparecimento de fissuras nos locais onde foi aplicada a argamassa epoxídica, nas primeiras 24 horas. Estas fissuras foram mais amenas e trabalharam como juntas de dilatação, sendo que o procedimento adotado foi de mantê-las com tal função. Estes autores citam os locais reparados, bem como quais as argamassas utilizadas para cada situação. Todas as aplicações seguiram os procedimentos anteriormente descritos. Nas lajes do vertedouro, onde se apresentou a maior parte das deteriorações, foram aplicadas as argamassas epoxídicas e de cimento com sílica ativa. Nos pilares, a aplicação foi definida em função da localização das erosões: na superfície hidráulica foi aplicada a argamassa epoxídica e acima desta, foi aplicada a argamassa de cimento.

Os muros laterais apresentavam erosões localizadas nas juntas dos blocos e nos próprios blocos. Tal como nos pilares, na região da superfície hidráulica houve reparo com argamassa epoxídica e fora desta, foi utilizada a argamassa de cimento. E nos blocos de dissipação houve aplicação de argamassa epoxídica.

Houve controle de resistência à compressão dos materiais dosados em campo, com moldagem de corpos-de-prova de controle com dimensões de 5x10cm para posterior ensaio em diversas idades. Os valores médios de resistência obtidos nestes ensaios podem ser observados no quadro 3 (SALLES; ALMEIDA JÚNIOR, 2000).

IDADE (dias)	ARGAMASSA		
	Epoxídica	Cimento	Cimento + Sílica
7	67,6	24,3	41,1
28	-	35,2	49,8

Quadro 3: resistências médias à compressão axial das argamassas dosadas em campo.

Os autores comentam que os reparos nas superfícies hidráulicas de concreto foram feitos com argamassas de alta resistência, pois são os mais eficientes frente a solicitações mecânicas e aos efeitos de abrasão provocados pelo fluxo de água em alta velocidade.

A conclusão de Salles e Almeida Júnior (2000), a respeito dos materiais e técnicas utilizadas, é que os mesmos foram adequados aos tipos de estruturas e solicitações, apresentando bom acabamento. As técnicas utilizadas para aumentar a aderência entre o substrato e os materiais de reparo foram bem sucedidas.

Em nova inspeção, efetuada em março de 2000 por consultores, foi observado que as regiões reparadas permaneciam íntegras e com aspecto firme e consistente, assegurando o bom desempenho do vertedouro (SALLES; ALMEIDA JÚNIOR, 2000).

#### **6.1.4 UHE Furnas**

A UHE de Furnas está localizada no curso médio do Rio Grande, no trecho denominado "Corredeiras das Furnas", entre os municípios de São José da Barra e São João Batista da Glória, em Minas Gerais. A primeira unidade da usina entrou em operação em 1963. A construção dessa usina, uma das maiores da América Latina, permitiu que se evitasse o colapso energético do País na década de 60 (KORMANN, 2002).

A calha de seu vertedouro apresentou regiões desgastadas por abrasão, inclusive com exposição de armadura. Os procedimentos para recuperação iniciaram com a escarificação da superfície erodida com rock-bit adaptado a um martelo pneumático e limpeza da área, com remoção total de material solto e poeira. O rock-bit é um dispositivo escarificador que remove incrustações existentes e faz corte adicional para garantia da execução de recobrimento (GOULART NETO et al., 1995).

O material de reparo utilizado foi argamassa com sílica ativa, com substituição de 10% da quantidade de cimento por sílica (KORMANN, 2002). O cimento utilizado foi o CP III e não foi utilizado nenhum tipo de primer na aplicação, pois a intenção foi a de verificar o desempenho real do material sem qualquer outra variável.

Goulart Neto et al. (1995) descrevem que os serviços de reparo ocorridos nas superfícies hidráulica de concreto da calha do vertedor da UHE de Furnas compreenderam 4000 m<sup>2</sup> de área, com espessura média de 2 cm. De acordo com este autor, a argamassa foi dosada em betoneira e transportada aos locais de aplicação por carrinho de mão. A aplicação foi executada manualmente, com soquete metálico, sobre superfície saturada seca. O acabamento realizado foi condizente ao requerido por superfícies hidráulicas e a cura foi úmida, realizada por 14 dias. Os dois traços-base utilizados para as argamassas aplicadas na UHE de FURNAS, estão apresentados no quadro 4 (KORMANN, 2002).

ARGAMASSA	a/C <sub>eq</sub>	COMPOSIÇÃO (kg/m <sup>3</sup> )				
		Cimento	Areia	Sílica Ativa	Água	Aditivo Superplastificante
A - 1	0,40	485	1425	60 (12,37%)	228	5,70 (1,175%)
A - 2	0,37	548	1288	69 (12,6%)	242	6,44 (1,175%)

NOTA: os percentuais de sílica ativa e aditivo superplastificante são em relação ao peso de cimento.

Quadro 4: traços-base das argamassas – UHE Furnas.

Os valores dos ensaios de resistência à compressão axial simples estão dispostos no quadro 5.

ARGAMASSA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
A - 1	27,16	44,5	51,5
A - 2	35,5	53,6	63,8

Quadro 5: resistências à compressão axial da argamassa – UHE Furnas.

Os ensaios de resistência de aderência foram realizados paralelamente às atividades executadas na UHE de Furnas. Houve aplicação da argamassa em uma das lajes do vertedouro, sem aplicação de adesivo epoxídico e outra com aplicação de adesivo. Posteriormente, foram extraídos testemunhos para os seguintes ensaios:

- a) tração simples da argamassa;
- b) tração simples no contato argamassa/concreto;
- c) tração simples no contato argamassa/adesivo epóxi/concreto;
- d) resistência à tração por compressão diametral; e
- e) resistência à compressão axial simples.

Os valores médios obtidos nos ensaios citados encontram-se no quadro 6:

RESISTÊNCIAS (MPa)					
ARGAMASSA		CONCRETO		ENSAIOS DE ADERÊNCIA	
Tração Simples	Tração Diametral	Compressão	Tração Simples	Argamassa/Concreto	Argamassa/Adesivo Epóxi/Concreto
1,40	4,34	27,9	1,90	0,33	1,23

Quadro 6: resistências obtidas nos ensaios – UHE Furnas.

### 6.1.5 UHE Marimbondo

A UHE de Marimbondo está localizada no Rio Grande, entre as cidades de Icem-SP e Fronteira-MG. A primeira unidade entrou em operação comercial em outubro de 1975 (Comitê Brasileiro de Barragens, 1982). Houve abrasão generalizada na calha de seu vertedouro e bacia de dissipação, com exposição de armadura em algumas regiões. Inspeções subaquáticas também indicaram que havia ocorrido abrasão com exposição de armadura na calha submersa da bacia de dissipação. Para a correção dos problemas foram utilizados reparos de concreto e argamassa, ambos com adição de sílica ativa (KORMANN, 2002).

A UHE de Marimbondo também serviu de parâmetro para análise da argamassa com sílica ativa efetuada por Goulart Neto et al. (1995), porque a superfície hidráulica do vertedouro apresentou maior desgaste que a estrutura da UHE de Furnas. O preparo da superfície foi efetuado por meio de jateamento de areia e limpeza completa. Segundo o autor, a área reparada de laje do vertedouro atingiu 2500 m<sup>2</sup>, com espessura média de 2,7 cm. Os tipos de cimentos utilizados foram o CP II-E e o CP III. Também não foi utilizado nenhum adesivo de base epóxi na aplicação. Foram dosados dois traços-base na UHE de Marimbondo e seus valores estão expostos no quadro 7.

ARGAMASSA	CIMENTO	a/Ceq	COMPOSIÇÃO (kg/m <sup>3</sup> )				
			Cimento	Areia	Sílica Ativa	Água	Aditivo Superplastificante
A - 2	CP III	0,37	548	1288	69 (12,6%)	242	6,44 (1,175%)
A - 3	CP II-E	0,40	580	1288	46 (7,93%)	257	6,44 (1,11%)

NOTA: os percentuais de sílica ativa e aditivo superplastificante são em relação ao peso de cimento.

Quadro 7: traços-base das argamassas – UHE Marimbondo.

Os valores médios de resistência à compressão axial simples registrados nos ensaios das amostras de controle estão dispostos no quadro 8.

ARGAMASSA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
A - 2	47,7	66,2	76,1
A - 3	61,0	69,9	78,7

Quadro 8: resistências à compressão axial da argamassa – UHE Marimbondo.

### 6.1.6 UHE Chapéu d’uvas

A UHE Chapéu D’Uvas pertencia ao antigo Ministério da Integração Regional, hoje Ministério da Integração Nacional. Apesar de suas obras terem iniciado no ano de 1960, com o intuito de gerar energia, as mesmas ficaram paradas durante muitos anos devido a problemas institucionais. Posteriormente, devido à implantação de indústrias na região, foi necessário regularizar a vazão do Rio Paraibuna, sendo suas obras retomadas e concluídas no ano de 1994 (KORMANN, 2002).

Apresentando problemas de abrasão em seu vertedouro, houve necessidade de intervenção para reparos. Goulart Neto et al. (1995) também avaliaram a execução de reparos com argamassa com sílica ativa na UHE Chapéu D’Uvas.

A área reparada atingiu 283 m<sup>2</sup> de laje com 2,5 cm de espessura. Foi necessário fazer um plano de recuperação, dividindo o vertedouro em 4 trechos. A área mais danificada ficava localizada na parte baixa do túnel de descarga, onde a abrasão era mais acentuada, deixando a armadura exposta, com ocorrências de deslocamentos do teto do túnel (KORMANN, 2002).

O tratamento das superfícies foi realizado com corte com disco diamantado, remoção das partes danificadas, lavagem com jato de água e ar sob pressão e saturação mínima de 24 horas. O cimento utilizado foi o CP III e o preparo da argamassa foi feito com um misturador acoplado à bomba de projeção via úmida. O acabamento foi apropriado à superfície hidráulica e, a cura química, feita por intermédio de uma membrana, pois era mais favorável às condições locais (GOULART NETO et. al., 1995).

As características do traço-base produzido encontram-se no quadro 9.

ARGAMASSA	a/Ceq	COMPOSIÇÃO (kg/m <sup>3</sup> )				
		Cimento	Areia	Sílica Ativa	Água	Aditivo Superplastificante
A - 4	0,38	580	1320	80 (13,8%)	264	6,00 (1,034%)

NOTA: os percentuais de sílica ativa e aditivo superplastificante são em relação ao peso de cimento.

Quadro 9: traços-base das argamassas – UHE Chapéu d’uvas.

Para os ensaios de resistência à compressão axial simples foram extraídos testemunhos das placas moldadas pelo processo de projeção via úmida. Os valores médios dos ensaios de resistência à compressão registrados nos ensaios estão dispostos no quadro 10.

ARGAMASSA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)	
	28 dias	90 dias
A - 4	32,3	41,8

Quadro 10: resistências à compressão axial da argamassa projetada – UHE Chapéu d’uvas.

### 6.1.7 UHE Porto Colômbia

A UHE de Porto Colômbia está localizada no rio Grande, entre os municípios de Planura-MG e Guairá-SP, e foi construída para aproveitar o alto grau de regularização de descargas promovido pela UHE de Furnas. A UHE de Porto Colômbia é a única usina de baixa queda do Sistema FURNAS, um tipo raro no Brasil. A operação comercial da usina foi iniciada em junho de 1973 (Comitê Brasileiro de Barragens, 1982).

Em 1983, a equipe técnica da CESP realizou inspeções subaquáticas na bacia de dissipação, que revelaram pequenos desgastes nas superfícies de concreto. Em 1990, nova inspeção mostrou que o problema de desgaste havia se agravado (KORMANN, 2002).

Estudos em modelo reduzido feitos por FURNAS indicaram que havia necessidade de se corrigir imediatamente o problema de abrasão e que uma modificação no perfil hidráulico do vertedouro auxiliaria na diminuição ou extinção da incidência de processos abrasivos nas estruturas. A princípio, o vertedouro continha chute-blocks e end-sills, que são estruturas que auxiliam na diminuição do impacto do fluxo d’água. Na Figura 11, um detalhe da acomodação destes componentes é exposto para melhor compreensão da disposição estrutural (GOULART NETO et. al., 1995).

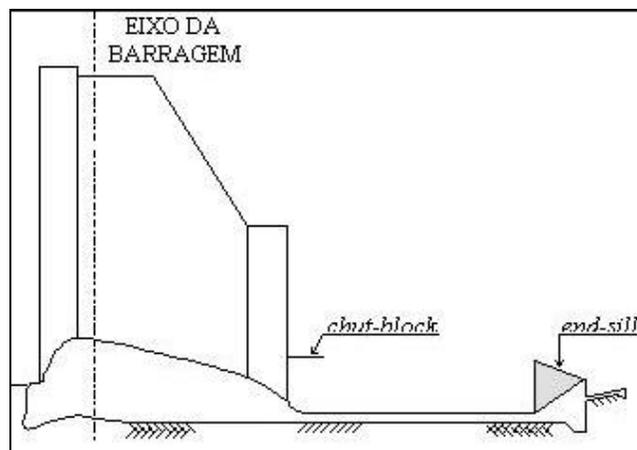


Figura 11: perfil indicativo das estruturas chute-block e end-sill do vertedor da UHE Porto Colômbia.

Os autores comentam que, após o estudo do modelo hidráulico reduzido, foi decidido modificar o perfil hidráulico para melhoria no desempenho hidráulico do escoamento. Para tal, decidiu-se pela remoção dos chute-blocks e alteração na inclinação dos end-sills. Os chute-blocks totalizavam o número de 36 e apresentavam alto grau de desgaste provocados por vórtices, com exposição de armadura, sendo que, em alguns locais as mesmas já haviam sido perdidas. Os end-sills, também em quantidade de 36, apresentavam menor desgaste, mas tiveram sua configuração modificada para melhorar o desempenho da bacia de dissipação.

Tanto para a demolição dos chute-blocks quanto para a dos end-sills, foram utilizados explosivos para remoção inicial, com análise sismográfica das demais estruturas do vertedouro. O uso de rompedores pneumáticos para o corte rente à superfície da calha do vertedouro complementou os serviços de demolição. Em ambas as estruturas, o corte foi feito deixando-se 5 cm de armadura livre para completo envolvimento do material de reparo que seria aplicado. O volume total de demolição dos chute-blocks foi de 788 m<sup>3</sup> e dos end-sills foi de 706 m<sup>3</sup>, aproximadamente. O traço do concreto para o reparo utilizado na recuperação da superfície do vertedouro nas regiões dos chute-blocks e end-sills é mostrada no quadro 11 (GOULART NETO et. al., 1995).

a/c+s	COMPOSIÇÃO (kg/m <sup>3</sup> )					
	Cimento ( c )	Areia	Brita 1	Sílica Ativa (s)	Água	Aditivo Superplastificante
0,455	370	703	1147	30 (8,11%)	182	4,1 (1,11%)

NOTA: os percentuais de sílica ativa e aditivo superplastificante são em relação ao peso de cimento.

Quadro 11: traço do concreto utilizado na recuperação da superfície do vertedouro – UHE Porto Colômbia.

A execução dos reparos na região dos chute-blocks foi feita com superfície saturada seca e posterior aplicação de adesivo à base epóxi. O adensamento foi mecânico com vibrador de imersão. Na bacia de dissipação, não foi utilizado adesivo, sendo que o material foi descarregado por equipamento mecânico na superfície saturada seca, executado em duas camadas. Por se tratar de superfície inclinada, foram feitas fôrmas de madeira como suporte para vibração (KORMANN, 2002).

O acabamento em ambas as regiões, foi feito com sarrafeamento com réguas de madeira, configurando geometricamente o padrão e a superfície para superfícies hidráulicas sujeitas a altas velocidades. A cura foi feita com aspersão de água na região dos end-sills e com membrana química na região dos chute-blocks. Os resultados dos ensaios das amostras de controle de resistência à compressão do concreto de reparo são mostrados no quadro 12 (GOULART NETO et. al., 1995).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)		
7 dias	28 dias	90 dias
30,61	48,11	54,31

Quadro 12: resistências à compressão axial do concreto – UHE Porto Colômbia.

Após a realização dos serviços de demolição e reparo das superfícies, o perfil do vertedouro ficou como indicado na Figura 12.



Figura 12: perfil indicativo da remoção dos chute-blocks e end-sills do vertedor da UHE Porto Colômbia.

A área recuperada neste caso foi menor, ficando em torno de 500 m<sup>2</sup>, com espessura média de 2 cm. O preparo da superfície foi efetuado por meio de jateamento de água e areia sob alta pressão, com desgaste regular. Posteriormente, foi realizada limpeza completa da área a ser reparada. Também não foi utilizado nenhum adesivo de base epóxi na aplicação.

O tipo de cimento utilizado foi o CP III e somente um tipo de traço foi dosado. As características do traço produzido encontram-se no quadro 13.

ARGAMASSA	a/c	COMPOSIÇÃO (kg/m <sup>3</sup> )				
		Cimento	Areia	Sílica Ativa	Água	Aditivo Superplastificante
A - 3	0,37	548	1288	69 (12,6%)	242	9,66 (1,763%)

NOTA: os percentuais de sílica ativa e aditivo superplastificante são em relação ao peso de cimento.  
Quadro 13: traços-base da argamassa – UHE Porto Colômbia.

A aplicação do material de reparo foi feita com equipamento específico para projeção de argamassa via úmida. O acabamento proporcionou à superfície hidráulica as características necessárias para o bom vertimento do fluxo sob alta velocidade. A cura úmida foi mantida por 14 dias. Os valores dos ensaios de resistência à compressão axial simples estão dispostos no quadro 14 (GOULART NETO et. al., 1995).

ARGAMASSA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (Mpa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
A - 3	39,0	54,4	67,7

Quadro 14: resistências à compressão axial da argamassa – UHE Porto Colômbia

### 6.1.8 UHE Camargos

A UHE Camargos situa-se entre os municípios de Itutinga e Nazareno, no Alto Rio Grande, estado de Minas Gerais e teve suas atividades iniciadas em 1960 (Comitê Brasileiro de Barragens, 2002).

Após algumas inspeções subaquáticas verificaram a existência de danos por abrasão na calha submersa com progressão da deterioração entre 1984 e 1991. Foram descobertas cavidades de até 2,5 m de profundidade com regiões apresentando armaduras expostas.

Estudos feitos por especialistas na época das inspeções demonstraram que o processo abrasivo ocorreu devido ao transporte de detritos trazidos à calha por correntes de retorno. Outro fator agravante para a abrasão nas estruturas foi a utilização de um concreto com agregado superior a 19 mm (KORMANN, 2002).

Para a recuperação da calha foram usados concretos e argamassas mais resistentes aos efeitos de alta pressão e velocidade causados pela operação das comportas e válvulas de fundo. Os concretos e argamassas foram elaborados com sílica ativa, baixa relação a/c, alto consumo de cimento e uso de aditivos superplastificantes. Tais características de dosagem resultaram em materiais de reparo com boa aderência, baixa permeabilidade, alta resistência a poucas idades, além de boas condições de trabalhabilidade.

O uso de argamassa epoxídica foi cogitado, porém pela falta de conhecimento de seu desempenho e pela necessidade de urgência na execução dos reparos e economia, optou-se pelo uso da sílica ativa (GOULART NETO et. al., 1995).

Os serviços de recuperação incluíram a retirada de entulhos e material solto da calha, remoção do concreto deteriorado e limpeza da região com jato de areia. O período de trabalho foi de agosto a novembro de 1991. O desempenho do material de reparo foi verificado em inspeção subaquática posterior (março de 1992). Foram observadas pequenas erosões em uma superfície de 1 m<sup>2</sup>, com cavidades de até 15 cm de profundidade. Também se verificou a ocorrência de deslocamentos da argamassa de alta resistência em área de 60 m<sup>2</sup>. Apesar destes pequenos danos, concluiu-se que os reparos tiveram bom desempenho e que os defeitos observados foram causados por problemas de execução durante a aplicação (KORMANN, 2002).

### **6.1.9 UHE Porto Primavera**

A usina hidrelétrica Porto Primavera está localizada no rio Paraná, 130 km a jusante de Presidente Epitácio/SP. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à CESP. A construção deste empreendimento, com 1.854 MW de potência instalada, foi executada pela construtora Camargo Corrêa, a partir de projeto da Themag (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982).

O desvio de 2ª etapa foi feito através de 06 vãos do vertedouro de superfície com soleira rebaixada: 7 m abaixo da crista na elevação definitiva. A remoção das ensecadeiras de montante do vertedouro e da tomada de água e o fechamento do canal de desvio da 1ª fase direcionaram o caudal para o vertedouro.

Por ocasião do fechamento do primeiro vão para alteamento da soleira, após meses da passagem da água pelos vertedouros, foi constatada grande quantidade de material proveniente da ensecadeira de montante. Esse material sólido – seixo rolado, fragmentos de basalto e arenito – carregado pelo fluxo, causou erosões por abrasão no concreto, disseminadas pela soleira e paredes da calha. Essas erosões tinham profundidades de até 0,20 m, com zonas onde a armadura exposta mostrava perda de seção (SALLES, 2001).

Segundo o autor, todos os vãos com soleira rebaixada apresentaram a mesma situação. Feita a remoção dos materiais, substituídas as barras de aço danificadas, passou-se à recuperação da soleira do vertedouro, que atendeu a procedimentos especificados pela projetista, onde foram empregados concreto convencional e argamassas à base de resina epóxi e sílica ativa. A ponte de aderência foi feita com aplicação de pintura com a própria resina epoxídica.

## 6.2 CASOS RELACIONADOS À EROSÃO POR CAVITAÇÃO

### 6.2.1 UHE Ilha Solteira

A usina hidrelétrica Ilha Solteira está localizada no rio Paraná, no município de Três Lagoas/MS. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à CESP. A construção deste empreendimento, com 3.230 MW de potência instalada, foi executada pela construtora Camargo Corrêa e projetada pela Themag (CBDB, 1982).

Com a passagem da água, os blocos dissipadores de energia do vertedouro de superfície provocam sub-pressão na soleira, em regiões adjacentes a eles. Causando nestes locais o fenômeno da cavitação (SALLES, 1980).

Durante a execução dos serviços de recuperação da bacia de dissipação em 1974, mencionados anteriormente, foram feitos os primeiros reparos na soleira dos blocos dissipadores. No entanto o problema continuou depois do período de chuvas que seguiu, quando os reparos foram arrancados (LEITE et al., 1990). Suportados por pesquisas de laboratório e pareceres de consultores, novos reparos foram realizados, porém sem efeito satisfatório e definitivo (SALLES, 1980).

As séries de reparos que se seguiram, com o emprego das mais modernas tecnologias disponíveis na época de suas aplicações, não apresentaram resultados satisfatórios. Isso evidencia a dificuldade de se obter materiais que resistam aos efeitos da cavitação e indica que, mantidas as condições geométricas existentes no vertedouro, dificilmente um problema deste tipo pode ser solucionado com eficácia (LEITE et al., 1990).

Há alguns anos se iniciaram estudos para definir alterações na geometria do perfil vertente e dos dissipadores de energia, que contornassem o problema existente naquele vertedouro (SALLES, 2001).

A CESP, através da Diretoria de Geração Oeste, realizou no segundo semestre de 2002, a construção de um dispositivo em concreto armado, denominado anti-vórtice, sobre as soleiras dos vãos do vertedouro da UHE Ilha Solteira, bem como a realização de reparos na superfície do concreto. A construção do dispositivo anti-vórtice nas soleiras foi a solução adotada para a eliminação do fenômeno da cavitação (zona de baixa pressão que provoca a formação de vórtices tipo ferradura em torno dos blocos dissipadores instalados sobre as soleiras) de ação progressiva e incessante, causando a degeneração do concreto, resultando em erosões na superfície vertente, junto às laterais dos blocos dissipadores (PINFARI et. al., 2003).

Segundo Salles (2001), a Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) foi contratada para estudar o problema da cavitação, através de um modelo reduzido, elaborado na escala 1:20, representando um vão e meio do vertedouro.

Duas soluções foram apresentadas, a saber: a construção de aerador e a construção de dispositivo anti-vórtice. As alternativas foram implantadas para testes in loco e apresentaram resultados satisfatórios, confirmando os experimentos realizados. Considerando os aspectos construtivos e os custos envolvidos, a CESP decidiu pela construção dos dispositivos anti-vórtice em Concreto de Alto Desempenho (CAD). Os dispositivos, que têm formato de asa delta, foram construídos sobre os blocos dissipadores e as soleiras de 17 vãos do vertedouro. As obras foram executadas a jusante do vertedouro, com auxílio de flutuantes e plataformas metálicas que possibilitavam o acesso ao local. A equipe de mergulhadores da CESP realizou reparos nas áreas erodidas submersas das soleiras.

Segundo Pinfari et al. (2003), a metodologia empregada para a realização dos serviços de reparo e construção do dispositivo anti-vórtice atendeu plenamente às especificações e exigências da CESP. Visando o monitoramento das pressões d'água, foram ainda instalados aparelhos transdutores de pressão dinâmica na região próxima ao dispositivo anti-vórtice na soleira do vertedouro – vão 1 da UHE Ilha Solteira, o que possibilita a comparação dos valores de pressão atuantes sobre a superfície da soleira, para diferentes vazões de água, com os valores apresentados no modelo de laboratório da FCTH.

No final de fevereiro de 2003, o vertedouro de Ilha Solteira entrou em operação por um período de 10 dias, com vazão vertida de 1.500 m<sup>3</sup>/s. Nas inspeções visuais de superfície realizadas nos dispositivos anti-vórtice e nos reparos na soleira, não foram observadas ainda anomalias.

Para a construção do dispositivo anti-vórtice, foram lançados 42,5 m<sup>3</sup> de concreto de alto desempenho, com  $F_{ck} = 30$  MPa. Nos reparos no vertedouro foram lançados 60 m<sup>3</sup> de concreto de alto desempenho na superfície acima do nível de água de jusante e 11 m<sup>3</sup> de argamassa auto-adensável na superfície abaixo do nível de água de jusante. O controle tecnológico do concreto e os materiais empregados na execução da obra foram executados pelo Laboratório de Engenharia Civil da CESP (PINFARI et. al., 2003).

### **6.2.2 UHE Engenheiro Souza Dias (Jupiá)**

A usina hidrelétrica Engenheiro Souza Dias está localizada no rio Paraná, no município de Três Lagoas/MS. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à CESP. A construção deste empreendimento, com 1.411,2 MW de potência instalada, foi executada pela construtora Camargo Corrêa, a partir de projeto da Themag (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982).

As blindagens das unidades geradoras exigem ações corretivas de manutenção, por parte da engenharia mecânica. Nas paradas das máquinas, elas são inspecionadas e se necessário é feito o trabalho de correção, que consiste na troca de trechos de blindagem e de aço-carbono que sofreram os efeitos da cavitação.

Os efeitos da cavitação observados nesta obra são bastante agressivos, chegando a provocar o arrancamento de partes da blindagem e do concreto adjacente, deixando cavidades na estrutura (SALLES, 2001).

Para averiguar o estado da estrutura foi frequentemente realizada uma verificação da existência de vazios entre a chapa metálica e o concreto que a suporta. Através da análise do eco de uma batida com um martelo na blindagem, é possível delimitar as áreas que apresentam vazios.

Era atribuição do Laboratório da CESP executar os serviços para o preenchimento e a consolidação da blindagem sobre o concreto. Por concepção, a chapa de aço está fixada a perfis metálicos e esses fixados no concreto. Existe um espaço vazio entre a chapa e o concreto contornado pelos perfis, com travessas horizontais. Feitas as substituições das chapas, esses espaços têm sido fechados com graute, pelo rendimento, facilidade de aplicação e resistência mecânica apresentada.

Associada à aplicação do graute, é feita injeção de calda de cimento e posteriormente de resina epóxi, garantindo total solidarização da blindagem ao concreto, condição para que o revestimento metálico resulte perfeitamente estável.

Os serviços realizados e os materiais empregados têm se mostrado adequados às situações encontradas e reparadas, segundo Salles (2001).

### 6.3 CASOS RELACIONADOS À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A partir de uma análise de trabalhos publicados pelo Comitê Brasileiro de Barragens ou apresentados no Simpósio sobre Reatividade Alkali-Agregado em Estruturas de Concreto, ocorrido em 2005, foram localizados e serão apresentados a seguir, no quadro 15, registros referentes ao desencadeamento da reação álcali-agregado (RAA) em uma série de estruturas hidráulicas, ocorridas no cenário nacional. Nos itens seguintes serão discutidas as circunstâncias especificadas associadas a alguns destes relatos.

Companhia	UHE/Barragem	Situação/Ocorrência	Construção/ Evidência da RAA	Tipo de Reparo ou Recuperação
CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco	Paulo Afonso I	Juntas abertas	1955/1978	-
	Paulo Afonso II	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás	1962/1978	-
	Paulo Afonso III	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás	1973/1978	-
	Paulo Afonso IV	Fissuração, inclinação dos eixos das turbinas, ovalização do poço da turbina, redução de folgas no desnívelamento da tampa da turbina	1979/1985	Em estudo
	Moxotó	Fissuração, ovalização da casa de força e vertedouro de fundo e roçamento de pás e turbina	1974/1978	Corte de juntas
CEMIG - Cia. Energética de Minas Gerais	Jaguara	Alteamento da crista	1971/1988	-
	Peti	Fissuração e alteamento da crista	1945/1964	Injeção de cimento, substituição do concreto superficial danificado, tratamento das fissuras, impermeabilização da face montante, em 1975; nova impermeabilização da face de montante em 1984; permanência de vazamentos (1997)
FURNAS - Centrais Elétricas	Furnas	Fissuração nos topos dos pilares do vertedouro, blocos de ancoragem dos condutos forçados, superfície do salto de esqui, casa de força, desnívelamento do coroamento entre muro central e blocos adjacentes	1963/1976	Monitoramento
	Mascarenhas de Moraes	Fissuração na crista, exsudação de gel e diminuição de folgas de máquinas	1957/1996	Recentragem de máquinas e ajustes do mancal
	Estreito (em avaliação)	Exsudação de gel	-/1996	-
	Porto Colômbia (em avaliação)	Exsudação de gel e ovalização do poço da turbina	1973/1985	Esmerilhamento de anéis

ELETROPAULO	Traição	Fissuração, infiltrações, desalinhamento do eixo das bombas, ovalização de poços, aquecimento e desgaste de mancais-guia e travamento da comporta	1940/1980	-
	Billing-Pedras	Fissuração e expansão dos pilares do vertedouro	1936/1992	Em estudo
SABESP - Cia. De Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A.	Pedro Beicht	Fissuração, infiltração, lixiviação	1933/1991	-
	Sistema Cantareira	Ocorrência de RAA na tomada d'água do túnel 6	1974/1989	Ajuste e recuperação das guias das grades, modificação nas comportas ensecadeiras
LIGHT - Serviços de Eletricidade S.A.	Ilha dos Pombos	Fissuração nos pilares do vertedouro e paredão do canal adutor	1924/1991	Injeção de cimento, recomposição do concreto segregado, impermeabilização de superfícies em contato com água através de concreto projetado
CBA - Cia. Brasileira de Alumínio	Jurupará	Fissuração e vazamentos	1937/-	Atirantamento, injeção de fissuras, impermeabilização com concreto a montante
ACESITA S.A.	Sá Carvalho	-	-	-
EMBASA - Empresa Baiana de Água e Saneamento	Joanes II	Fissuração	1971/1988	-

Quadro 15: casos de ocorrência de RAA em usinas hidrelétricas brasileiras (SABBAG, 2003)

### 6.3.1 UHE Furnas

A Usina Hidrelétrica de Furnas está situada no Rio Grande, município de Alpinópolis (MG). Furnas é proprietária desta usina, sendo a sua construção iniciada em 1958 e o enchimento do reservatório, em 1963. As seis unidades de geração entraram em operação entre 1963 e 1965. Em 1972 a usina foi ampliada, colocando em funcionamento mais duas unidades geradoras entre 1973 e 1974. Desta forma a capacidade instalada ficou igual a 1.216.000 kW.

A construção das obras civis da UHE Furnas foi feita pela Construtora Anglo Brasileira de Construções, a partir de projeto de autoria da Companhia Internacional de Engenharia S.A. e da International Company Incorporation (Comitê Brasileiro de Barragens, 1982).

Na época da construção, foi instalado na obra um laboratório de concreto de Furnas, com o objetivo de efetuar o controle de qualidade dos materiais e concretos aplicados. O canteiro industrial era composto por uma central de britagem de rocha, um sistema de lavagem e classificação de areia, duas centrais de concreto (uma com capacidade de 90 m<sup>3</sup>/h e outra de 40 m<sup>3</sup>/h), um pátio de armação e carpintaria, um sistema de ar comprimido e uma seção de fabricação de pré-moldados. O lançamento do concreto foi feito através de guindastes (MESQUITA FILHO, 2000).

No controle tecnológico, ficou definida a utilização de um cimento limitando-se o teor de álcalis em 0,60%, segundo a ASTM C-150. Como agregado miúdo, foram utilizadas areias natural e artificial (subproduto da britagem do quartzito), sendo a percentagem média de areia artificial em relação ao agregado miúdo total igual a 35%. Como agregado graúdo foi utilizado o quartzito britado, obtido a partir das escavações obrigatórias. Foram empregados também aditivos incorporadores de ar para alcançar valores entre 3% e 6% de ar. Eram moldados corpos-de-prova para execução do controle de qualidade do concreto endurecido, sendo realizadas amostragens a cada 265 m<sup>3</sup> de concreto aplicado (HASPARYK, 2005).

As primeiras observações da instalação da reação álcali-agregado na UHE Furnas ocorreram em 1976, após cerca de 13 anos do término da construção, a partir principalmente da observação de deslocamentos verticais nos marcos altimétricos instalados nas estruturas. As principais ocorrências que surgiram, de uma maneira geral, foram: fissuração nos pilares do vertedouro, nos blocos de ancoragem dos condutos forçados e na casa de força, bem como desnivelamento do coroamento entre o muro central e os blocos adjacentes.

A partir deste momento, as estruturas de concreto da UHE Furnas passaram a ser monitoradas mais intensamente, sendo necessário instalar novos instrumentos de monitoramento ao longo do tempo, para que se pudesse efetuar um acompanhamento criterioso da evolução dos problemas (MESQUITA FILHO, 2000).

As investigações petrográficas macroscópicas, por microscopia ótica e eletrônica de varredura, foram realizadas posteriormente, a partir de 1994, sendo avaliados vários concretos

provenientes de algumas estruturas da usina, destacando os pilares do vertedouro e blocos de transição. Os resultados indicaram a presença de poros com material branco, porcelânico ou cristalizado no seu interior, bordas claras e vítreas freqüentes de reação em torno dos agregados e gel preenchendo algumas fissuras na argamassa. Os agregados apresentaram-se, na maioria das vezes, bastante deformados, com estrutura orientada. Os grãos de quartzo apresentavam-se estirados, recristalizados e com granulometria fina. Os produtos da RAA foram observados tanto nas interfaces da pasta com o agregado e no interior dos agregados como nos poros e dispersos na argamassa (HASPARYK, 2005).

A partir do diagnóstico e parecer das estruturas, as recomendações envolveram a implantação de sistemas de monitoramento, como medidores de convergência nos vãos das comportas, rede geodésica para medição dos deslocamentos horizontais absolutos, linha de nivelamento de 1ª ordem no coroamento e medidores triortogonais nas galerias de drenagem, em todas as juntas de dilatação na parede de montante. Também foi indicada a necessidade de furos de sondagem para definição do padrão de fraturamento do maciço rochoso. Destacou-se a necessidade de mapeamento de toda e qualquer fissura dos pilares incluindo inspeções subaquáticas. Na ocasião, definiram-se os reparos a serem feitos nos pilares deteriorados. A campanha de extração de testemunhos, com o objetivo de caracterizar em laboratório os concretos, foi mantida como previamente definido (MESQUITA FILHO, 2000).

De acordo com Silveira (1996), as regiões mais críticas eram os pilares do vertedouro (topo e laterais), uma vez que o nível de fissuração podia refletir na intensificação do nível de tensões das armaduras e do sistema de ancoragem das comportas e os blocos de ancoragem, uma vez que caso as armaduras fossem afetadas, poderia comprometer a segurança e colocar em risco a operação dos equipamentos de geração da usina. Outro ponto também identificado como crítico foi a região do vertedouro, justaposta à tomada de água, uma vez que o empuxo transmitido já havia provocado o esmagamento do concreto na região de contato entre os blocos adjacentes, gerando deslocamentos. Deslocamentos diferenciais irreversíveis foram observados nos medidores triortogonais instalados nas juntas de contração entre blocos na crista da barragem, sendo característica típica de concretos com ocorrência da RAA. Outra observação importante feita na ocasião foi a incidência de fissuras entre camadas de concretagem nas galerias de drenagem, devido à expansão diferencial entre camadas em função da RAA e gel exsudado nas paredes e teto das galerias de drenagem. Foi também

levantada a necessidade de investigação quanto à possível corrosão de armaduras nos concretos armados.

Apesar das várias manifestações da RAA, Silveira (1996) comenta que as taxas de expansão observadas anualmente na UHE Furnas representam uma das mais baixas quando comparada com outras barragens mais afetadas, como Moxotó, por exemplo, onde as taxas são cerca de sete vezes superiores. Porém, apesar das constatações que o concreto não evidenciava sinais de grande movimentação, até que ocorresse a estabilização por completo das expansões, ainda existia a possibilidade de problemas operacionais. Sendo assim, definiu-se a instalação de medidores triortogonais de junta, que em conjunto com medidas de verticalidade do eixo da turbina e gerador, folga dos anéis de desgaste da turbina e folgas do entreferro do gerador, auxiliariam no acompanhamento da RAA.

Após as várias inspeções e monitoramento, foram definidos e realizados os reparos necessários nos blocos de apoio e de ancoragem dos condutos forçados e nos pilares do vertedouro. Os reparos envolveram injeção das fissuras com calda de cimento, sílica ativa e superplastificante e aplicação de argamassa projetada de alto desempenho na superfície do concreto sobre tela de aço soldada. Nos pilares do vertedouro foi utilizada fibra de polipropileno na argamassa, sendo que as recuperações foram realizadas em três etapas, duas acima do nível d'água e uma sub-aquática (MESQUITA FILHO, 2000).

Dados mais recentes da posição atual da reação na usina indicam tendência de estabilização das taxas de expansão, que ficam hoje em cerca de 0,13 mm/ano, conforme constatado a partir dos dados da instrumentação na região da barragem. Porém, estão sendo notadas novas frentes da reação na região da tomada d'água e da casa de força, já tendo se iniciado o processo de ovalização no anel de desgaste inferior da máquina 6 na casa de força. Nestes pontos se observa a presença de fissuras na superfície do concreto e sinais de constante exsudação de gel na galeria mecânica. A usina encontra-se hoje em processo de modernização e, em paralelo, estão sendo adotados procedimentos de ajuste e de reparo dos danos (SILVEIRA, 1996). Uma solução definitiva para o problema, todavia, ainda não foi encontrada.

### 6.3.2 UHE Moxotó

A usina hidrelétrica Moxotó está localizada no rio São Francisco, na divisa dos estados da Bahia e Alagoas. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à CHESF. A construção deste empreendimento, com 439,2 MW de potência instalada, foi executada pela construtora CHESF – Mendes Junior, a partir de projeto da Sofrelec (Comitê Brasileiro de Barragens, 1982).

Os primeiros indícios da existência de anomalias nas estruturas de concreto do complexo Paulo Afonso apareceram logo após o comissionamento da primeira unidade geradora da usina Moxotó, em 1977. Desde a fase de comissionamento, a operação das unidades geradoras apresentou perturbações que se acentuaram ao longo do tempo, culminando com o roçamento do rotor da turbina do gerador GR – 3 no anel de descarga, em 1981, apenas 4 anos após o comissionamento da primeira unidade geradora. Nesta época, a folga inicial de 6 mm já havia sido esgotada, apareceram fissuras nas estruturas de concreto e se observava a tendência de fechamento das juntas de contração entre os blocos na parte inferior da casa de força e a abertura das mesmas nos níveis superiores da usina (SILVEIRA, 1996).

A fim de descobrir os problemas que estavam acarretando o mau funcionamento dos equipamentos hidromecânicos, a CHESF implementou, no início dos anos 80, um programa de investigações tecnológicas que culminou com a constatação da presença da reação álcali-agregado na usina Moxotó, através do resultado da análise petrográfica, sendo diagnosticado como principal mineral reativo o quartzo deformado. A partir da evidência de que os problemas observados no concreto da usina estavam relacionados à RAA, foram promovidas algumas investigações com a intenção de estimar o potencial de expansão produzido pela reação e para avaliar o que poderia ser feito para minimizar os danos causados nas estruturas de concreto (SILVA, 2007).

Como as estruturas de concreto de Moxotó não eram instrumentadas, foi elaborado um programa de monitoração com a intenção de acompanhar as deformações das estruturas com o tempo, de forma a conhecer as taxas de expansão do concreto. No período de 1982 a 1984 também foram realizados os primeiros estudos através de modelagem matemática tridimensional de um bloco típico da usina. Posteriormente, em 1996, transferiu-se a

geometria do modelo para um programa mais completo, o que permitiu uma análise acoplada do modelo do conjunto turbina/gerador (SILVEIRA, 1996).

Em 1983, a fim de minimizar emergencialmente os efeitos da RAA no concreto que envolvia as unidades geradoras, decidiu-se realinhar todos os equipamentos.

Com a evolução da expansão observada através dos dados da instrumentação e da simulação do modelo matemático, ficou mostrado que a abertura de juntas proporcionaria a redução de tensões de tração nos elementos da turbina. A solução adotada foi a abertura de três juntas de expansão entre os blocos utilizando a técnica de circulação de fios de aço impregnados com abrasivo, para obter uma abertura de 30mm. Se a taxa de expansão do concreto permanecesse com a mesma evolução, não haveria possibilidade de um novo alinhamento das máquinas. Estudos realizados posteriormente mostram que a taxa de expansão vertical foi reduzida em 25% no concreto da casa de força e 50% no concreto da tomada de água, após a abertura de juntas (SILVA, 2007).

## 6.4 CASOS RELACIONADOS AO DESENVOLVIMENTO DE SOLICITAÇÕES NÃO USUAIS COM O APARECIMENTO DE TRINCAS OU FISSURAS NÃO ESPERADAS

### 6.4.1 UHE Campos Novos

A usina hidrelétrica Campos Novos está localizada no município de Campos Novos/SC. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à ENERCAN. A construção deste empreendimento, com 880 MW de potência instalada, foi executada pela construtora Camargo Corrêa, a partir de projeto da Engevix (Comitê Brasileiro de Barragens, 2007).

A construção, iniciada em agosto de 2001, da usina hidrelétrica Campos Novos seguia, desde aquela data, dentro do cronograma. Com a conclusão da barragem, foram iniciadas as complexas operações para o fechamento das comportas e o enchimento do reservatório, que começou a ser feito no dia 10 de outubro de 2005.

Tudo progredia naturalmente, até que houve, na explicação técnica do engenheiro responsável, “a conjunção do efeito da deformação da estrutura com o efeito do vale confinado sobre a barragem”, o que provocou as trincas na face de concreto, como podem ser verificadas nas figuras 13 e 14 (Comitê Brasileiro de Barragens, 2007).



Figura 13: vista frontal das trincas ocorridas na UHE Campos Novos.



Figura 14: detalhe das trincas e flambagem das armaduras na UHE Campos Novos.

Em decorrência de outros fatores isolados ocorreu o esvaziamento do reservatório, desta maneira foi possível visualizar a extensão das trincas ocorridas na laje de concreto. Devido ao esvaziamento do reservatório puderam-se realizar os serviços de reparo a seco. As etapas e métodos de reparo utilizados estão apresentados nas figuras 15 a 20 (Comitê Brasileiro de Barragens, 2007):



Figura 15: remoção do concreto rompido



Figura 16: recomposição da armadura e da junta de cobre



Figura 17: aspecto da face após remoção do concreto rompido



Figura 18: recuperação das lajes rompidas



Figura 19: trechos rompidos já recuperados



Figura 20: corte das juntas de compressão

Inicialmente foi removido o concreto de todo o trecho rompido até o local onde se encontrava o concreto em bom estado, após a remoção executava-se a limpeza da região, retirando os entulhos gerados e a poeira presente na superfície. O passo seguinte era a remoção da armadura danificada e recomposição de uma nova, respeitando a dimensão de traspasse especificado em projeto. Após a análise e conferência da execução das etapas mencionadas anteriormente, foram concretados os trechos rompidos da laje, finalizada a cura procedeu-se o corte das juntas responsáveis pela absorção das deformações de compressão da laje de concreto.

## 6.4.2 UHE Porto Primavera

A usina hidrelétrica Porto Primavera está localizada no rio Paraná, 130 km a jusante de Presidente Epitácio/SP. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à CESP. A construção deste empreendimento, com 1.854 MW de potência instalada, foi executada pela construtora Camargo Corrêa, a partir de projeto da Themag (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982).

Com o fechamento das comportas para o enchimento do reservatório foram constatadas infiltrações de água em alguns locais da casa de força. Esta é uma situação que causa desconforto, pois implica na presença de umidade, água empoçada e incômodo estético, nas galerias e escadas de serviço, poços de inspeção, entre outros. Nesses locais com infiltração de água foi injetado poliuretano hidroativado, que em contato com a água reage e expande, bloqueando a passagem. Esses serviços de injeção foram executados pelo LCEC com relativo sucesso, atendendo ao seguinte procedimento (SALLES, 2001):

- a) furação de forma a atravessar o plano de infiltração;
- b) lavagem do furo e disposição dos bicos de injeção;
- c) injeção de poliuretano hidroativado;
- d) remoção dos bicos de injeção;
- e) acabamento superficial.

As inspeções feitas nas estruturas injetadas comprovaram a eficiência dos serviços realizados. Verificações periódicas indicaram a durabilidade da aplicação e o desempenho do produto injetado.

Os testes e aplicações experimentais dos produtos: poliuretano hidroativado (semirígido) e resina de poliuretano (flexível), respectivamente espuma e gel, têm apresentado bons resultados.

O sistema e tecnologia dessas injeções se mostram adequados para estancar infiltrações de água e vedar fissuras e trincas no concreto, de acordo com Salles (2001).

### 6.4.3 UHE Itaipu

A usina hidrelétrica Itaipu está localizada no rio Paraná, próximo à cidade de Foz do Iguaçu/PR. A concessão de operação e venda da energia gerada por esta usina pertence à Itaipu Binacional. A construção deste empreendimento, com 12.600 MW de potência instalada, foi executada pela construtora Unicom, a partir de projeto da Themag-Ieco/ELC (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982).

O vertedouro de Itaipu é controlado por 14 comportas de segmento, com 20 m de vão e 21,34m de altura, as quais transferem o empuxo da água para os pilares do vertedouro por meio de braços inclinados em relação ao pilar. As cargas hidrostáticas e o peso da comporta são transmitidos ao interior dos pilares através das vigas munhão, por meio de ancoragens protendidas. A ancoragem protendida é constituída por um conjunto de 22 cabos de aço trançados (cordoalhas), que fixam a viga munhão à face posterior dos pilares. Estas cordoalhas atravessam longitudinalmente os pilares, na direção montante-jusante, e estão assentadas internamente em bainhas que as isolam do concreto do pilar. Para isto, os cabos são introduzidos na bainha após a construção dos pilares (FABRO, 1997).

Segundo o autor, antes da concretagem do entorno das bainhas, foi feito um teste de pressurização para verificar a eventual perfuração das mesmas. O procedimento de execução previa que não deveria entrar água nas mesmas, principalmente após o enchimento com calda. Com a ocorrência, nos Estados Unidos, de fenômenos de falhas nas ancoragens de vigas munhão de duas barragens na Califórnia, com 18 a 20 anos de operação, devido à oxidação de tirantes, foi recomendado por consultores internacionais reforçar a atenção nas inspeções realizadas, periodicamente, sobre as vigas munhão e suas ancoragens. Ficou estabelecido que os sinais que indicariam o desenvolvimento de fenômenos de diminuição da resistência dos tirantes (ou perda de protensão), seriam manifestações de fissuras no concreto ou abertura de juntas, que indicariam relaxação das ancoragens. As fissuras de interesse seriam aquelas que apresentassem abertura  $\geq 0,5$  mm, comprimento  $\geq 30$  cm e profundidade  $\geq 5$  cm. Outros fenômenos que poderiam ocorrer seriam: a oxidação das cabeças de ancoragem, cujo sintoma externo seria a ocorrência de fissuras no concreto da superfície, com ou sem manchas de óxido de ferro, devido à expansão das cabeças de ancoragem, e a progressiva deterioração da cordoalha devido à percolação de água para junto da mesma, e que teria como aparência a presença de umidade na superfície do concreto.

Fabro (1997) cita que, em uma das inspeções periódicas, realizada em julho/1995, foi detectada a presença de umidade junto à cabeça de jusante de uma das vigas munhão, no pilar nº 5, próximo ao local das ancoragens longitudinais C20' e C21'. A umidade, com seus agentes oxidantes poderia deteriorar uma cordoalha a ponto de perder-se a tensão de ancoragem ali implantada. Estudos e pesquisas da equipe de Itaipu orientaram as buscas no sentido de observar quais os fenômenos que justificariam esta sintomatologia:

- a) oxidação das cordoalhas devido à percolação de água infiltrada na bainha;
- b) perda de resistência da cordoalha por problemas associados de stress-corrosion;
- c) perda de tensão na ancoragem de montante da cordoalha;
- d) eventuais falhas no processo construtivo.

Aprofundando as pesquisas e inspeções, para uma melhor análise do problema e imediato tratamento dessas infiltrações, conforme orientado pelos consultores, foi removido todo o concreto da superfície sobre os cabeçotes de ancoragem dos cabos C6', C20' e C21', bem como foi feita uma limpeza geral das partes metálicas dessas ancoragens. Constatou-se que apenas o cabeçote do cabo C21' apresentava sinais de umidade (FABRO, 1997).

Foram elaborados cálculos estruturais que indicaram que deveria ter ocorrido a perda de uma cordoalha na posição que apresentava surgência d'água. Os cálculos confirmaram que a excentricidade dos esforços resistentes (pela perda de uma ancoragem) geraram momentos fletores, redundando em tensões localizadas de tração que, apesar de causarem apenas uma diminuição no fator de segurança, geraram fissuras, consideradas indesejáveis nesta região, face aos agentes agressivos e níveis de solicitação extremados.

Após as inspeções técnicas "in loco" dos consultores Luércio Scandiuzzi e Manfred Theodor Schmidt, foram analisados os relatórios de acompanhamento de protensão e os relatórios de acompanhamento de frente de concretagem dos blocos. Os relatórios de acompanhamento de protensão não apresentavam nenhuma anomalia que pudesse auxiliar no esclarecimento das causas das infiltrações. Porém, os relatórios de acompanhamento das frentes de concretagem, mostram que o fiscal do turno diurno do dia 13/08/79 registrou, próximo ao local onde mais tarde ocorreram os problemas com as cordoalhas, que "a partir das 16:30 h, o concreto apresentou "slump" um pouco abaixo, dificultando a vibração entre bainhas" (FABRO, 1997).

Com base em uma série de ensaios com injeção de ar, e posteriormente com injeção de água com corante sob pressão, constatou-se a existência de um concreto com maior porosidade no local onde o fiscal havia registrado uma mudança nas propriedades do concreto. Posteriormente verificou-se ainda, a existência da comunicabilidade entre a região de “concreto poroso” e a ancoragem que estava apresentando problemas. Segundo Fabro (1997), comprovada a comunicabilidade entre cabeçote de ancoragem do cabo C21’ e a região do “concreto poroso”, decidiu-se injetar resina epoxídica fluída, tanto no cabo quanto na região do “concreto poroso”, com as seguintes características:

- a) tipo de resina: epoxídica, da Ciba Geigy, nome comercial Strutral Adesivo 202, com viscosidade de 224 Cps;
- b) pressão de injeção: 0,7 MPa;
- c) tempo de injeção: 2 horas;
- d) volume real injetado: 9,0 litros.

Na injeção do “concreto poroso” foram consumidos 8 litros de resina, sendo que 7 litros foram absorvidos em um pequeno espaço de tempo, levando a conclusão de que realmente havia uma deficiência de concretagem no local previsto com base no registro de acompanhamento de concretagem.

Conforme exposto anteriormente, devido à existência de registros durante a etapa de construção da usina, foi possível a realização de um diagnóstico preciso e tratamento eficaz de um problema diretamente associado ao aspecto de segurança da estrutura.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização deste trabalho, cuja finalidade precípua era coletar e analisar dados de problemas reais em obras de barragens, buscando contribuir para o entendimento e a recuperação relativos à ocorrência de manifestações patológicas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas, pode-se constatar a importância de diversos aspectos que englobam a execução de empreendimentos hidrelétricos, tais como:

- a) é fundamental adotar um sistema de monitoramento, que englobe a execução de inspeções visuais em todas as estruturas civis, após a construção e ao longo da vida útil da estrutura;
- b) é importante manter de forma organizada, os registros de ocorrências durante a construção, bem como documentos do projeto;
- c) é fundamental propiciar a troca de informações entre os técnicos responsáveis pelo acompanhamento do desempenho das estruturas com o meio técnico nacional e internacional, visando a transferência de conhecimentos e experiências.

Os empreendimentos hidrelétricos no Brasil funcionam de acordo com a lei de concessão, onde o governo concede às empresas o direito de construir e operar estes empreendimentos durante alguns anos, e ao final deste período a usina passa ser propriedade do governo federal.

A questão é que o governo está cada vez preocupado em assegurar que estes importantes elementos da infra-estrutura energética brasileira se mantenham em boas condições. Se a construção, operação e manutenção das usinas não forem executadas de maneira correta, a sociedade paga a conta, pois se compromete a geração de energia. Mesmo que os danos não provoquem imediatamente a suspensão do fornecimento, sob o ponto de vista do patrimônio público o encurtamento da vida útil destas estruturas é nefasto, pois o governo e a sociedade vão ter que em algum momento assumir a responsabilidade de substituir usinas completamente deterioradas e sem condições de utilização ou, pelo menos, investir recursos importantes em operações de recuperação e reparo que podem ser muito onerosas. Se estes problemas se acumularem, a própria integridade do sistema de fornecimento de energia brasileiro pode ser colocada em risco, como todas as implicações decorrentes.

Devido a este cenário, está cada vez maior a cobrança, por parte dos órgãos públicos, sobre as empresas que ganharam a concessão para construção e operação destes empreendimentos, no sentido de que haja uma forte preocupação com a manutenção de obras e com a prevenção e recuperação de manifestações patológicas que possam se manifestar nas diversas estruturas que compõem uma usina hidrelétrica.

Neste sentido, é fundamental olhar para trás, para a experiência acumulada, e entender quais são os problemas mais frequentes e importantes. Este trabalho se encaixa nesta necessidade. A partir da análise dos casos patológicos e da revisão das estratégias de reparo adotadas pelos responsáveis, o trabalho busca indicar quais os cuidados mais importantes.

O estudo de casos efetuado confirma a eficácia dos programas de inspeções periódicas das barragens, que permitem acompanhar o desempenho e o comportamento das estruturas e dos equipamentos, possibilitando identificar as necessidades de manutenção corretiva e intervir na ocasião oportuna.

A análise das operações de intervenção em várias unidades que apresentam problemas evidencia que já se dispõe de uma diversidade de materiais e produtos adequados para a recuperação de danos causados pela abrasão ou tratamento de fissuras. Por outro lado, os tratamentos de problemas de cavitação e reação álcali-agregado demandam mais estudos, pois as técnicas atuais somente abrandam seus efeitos.

No caso de materiais de reparo, verifica-se que nos casos mais antigos se tendia a utilizar as argamassas epoxídicas, por causa da alta resistência mecânica e química da matriz e da rapidez de cura. Hoje em dia, com o desenvolvimento de argamassas de cimento com alto desempenho, através dos usos de sílica ativa e superplastificantes, as mesmas começam a ser utilizadas em maior escala, pois associam grande desempenho mecânico, compatibilidade de deformações com o substrato e baixo custo. A tendência atual parece ser utilizar argamassas de cimento lançadas a mão em pequenos reparos, ou projetadas, com fibras de aço ou polipropileno, em áreas maiores. Em zonas submersas ainda se usam as argamassas poliméricas, mas seu custo e o reduzido tempo de aplicação tendem a limitar seu uso. Em alguns casos se está preferindo usar concretos especialmente formulados para uso submerso.

No caso das injeções, a solução com poliuretano é muito eficaz e se mostra como técnica predominante. Em alguns casos, onde não há acesso à fissura, se faz a colmatação com material granular, com bons resultados.

No caso da reação álcali-agregado, ainda estão sendo estudadas estratégias para limitar quimicamente a formação do gel expansivo, sendo a aplicação de sais de lítio uma das alternativas mais promissoras. Como medidas paliativas se buscam criar juntas de expansão, corrigir seções ou evitar o acesso da umidade, alternativa difícil em obras hidráulicas.

Por fim, em relação à cavitação, os únicos tratamentos eficientes parecem ser aqueles que modificam a velocidade do fluxo, impedindo as condições para a formação de bolhas de vácuo. Os tratamentos superficiais, por mais resistentes que sejam os materiais empregados, não parecem apresentar durabilidade adequada devido ao alto valor das forças pontuais envolvidas.

Em qualquer caso, as experiências coletadas indicam que se deve avaliar adequadamente a situação específica e a condição de trabalho da estrutura onde as manifestações patológicas se manifestaram para definir qual a melhor estratégia de intervenção.

Acompanhar os avanços da tecnologia dos materiais e dos processos de aplicação resultará no emprego de tratamentos modernos e eficientes, com os produtos apropriados. A retaguarda oferecida por laboratório de testes é bastante importante porque estuda as propriedades e as possíveis variações das misturas, permitindo avaliar os custos e os resultados das aplicações.

## REFERÊNCIAS

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Amazônica**. 1994. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional – BEN**. Brasília: MME, 2003.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. 2ed. – Brasília: ANEEL, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em 04 abr. 2008.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Barragens no Brasil**. 1982.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Panorama brasileiro e relato técnico do simpósio. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALIAGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Relatório final**. Rio de Janeiro: CBDB, 1999. 135 p.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Concrete Face Rockfill Dams. **Anais do 3ª Simpósio de Barragens de Enrocamento com Face de Concreto**. Florianópolis: CBDB, 2007.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto**. 1989. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOULART NETO, A. A.; GONÇALVES, J. P.; NASCIMENTO, J. F. F. do; TRABOULSI, M. A.; GÓZ, R. S. Reparos com argamassa de cimento e microsilica. In: Reunião Anual do IBRACON, 37ª, 1995, Goiânia. **Anais da 37ª REIBRAC - IBRACON**. Goiânia: IBRACON, 1995. v. II, p. 585-600.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LATORRE, P. E. V. **Estudo de argamassas para reparo de estruturas de concreto sujeitas à abrasão, em locais com umidade elevada.** 2002. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LEITE, P. A. R. C. A.; OLIVEIRA, P. J. R.; ALMEIDA JÚNIOR, W. Erosões causadas por cavitação na região dos dentes dissipadores de energia no vertedouro de superfície da UHE Ilha Solteira. **Anais da 32ª REIBRAC - IBRACON.** Fortaleza: IBRACON, 1990.

LEITE, A. R. C. A. de P.; ABBUD A. R. Considerações sobre o método construtivo e a durabilidade da estrutura em concreto do vertedor da UHE Capivara, da CESP. In: Reunião Anual do IBRACON, 38ª, 1996, Ribeirão Preto. **Anais da 38ª REIBRAC - IBRACON.** Ribeirão Preto: IBRACON, 1996. v. II, p. 507-514.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MESQUITA FILHO, J. **Ensaio para a determinação da potencialidade de ocorrência de reação álcali-agregado, proposições para a conservação de estruturas afetadas, ocorrência em barragens de concreto.** 2000. 63 f. Trabalho de diplomação – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução de Salvador Giamusso. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

OPERADOR NACIONAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS. **Mapas do Sistema Interligado Nacional.** Rio de Janeiro, 2003. 1 CD-ROM.

PINFARI, J. C.; CARNEIRO, E. F.; CESTARI JÚNIOR, E. Reparos no concreto e construção do dispositivo anti-vórtice no vertedouro da UHE Ilha Solteira. **Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON.** Vitória: IBRACON, 2003.

SABBAG, A. F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas.** 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SALLES, F. M. **Algumas considerações sobre a erosão por cavitação no concreto de estruturas sujeitas a ação d'água em alta velocidade.** In.: XIII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1980. Rio de Janeiro.

SALLES, F. M.; ALMEIDA JUNIOR, W. Recuperação do concreto do rápido do vertedouro da Usina Hidrelétrica Escola de Engenharia Mackenzie (UHE Capivara). In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42º, 2000, Fortaleza. **Anais em CD-ROM do 42º IBRACON.** Fortaleza: IBRACON, III-E-006.

SALLES, F. M. **Algumas ocorrências de patologias em estruturas de concreto das barragens e os tratamentos adotados pela CESP.** In.: XXIV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2001. Fortaleza.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. São Paulo: Pini, 1986.

SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Edgar Blücher; Rio de Janeiro: ENGEVIX, 1978.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. 1994. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso / CHESF: influência da reação nas propriedades do concreto**. 2007. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVEIRA, J. F. A. **A deterioração de barragens e usinas hidrelétricas provocadas pela reatividade álcali-agregado**. Revista do Comitê Brasileiro de Barragens; publicação 01/96 – 1996, Rio de Janeiro.

SOUZA, Z. **Centrais Hidrelétricas/Dimensionamento de Componentes**. São Paulo: Edgar Blücher, 1992.