



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH - 28  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO I  
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO - GGH**

**OS DESAFIOS DE ENGENHARIA APLICÁVEIS À CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS EM ÁREAS DE  
ROCHAS COM PRESENÇA DE SULFETOS - A EXPERIÊNCIA DA CEMIG NA IMPLANTAÇÃO DA USINA  
PRESIDENTE JK, IRAPÉ, VALE DO JEQUITINHONHA, MINAS GERAIS**

**Romildo D. Moreira Filho \* Tibiriçá Gomes Mendonça Sérgio L.C.Fernandes Monica N. Cordeiro**

**CEMIG**

**CEMIG**

**CEMIG**

**CEMIG**

**RESUMO**

A Usina Hidrelétrica de Irapé está em fase final de construção, no trecho médio do rio Jequitinhonha, na região nordeste do estado de Minas Gerais, nos municípios de Berilo (margem direita) e Grão Mogol (margem esquerda). A usina, de 360 MW de potência instalada, aproveita um desnível de 185,00 m em um local de relevo bastante acidentado, do tipo *canyon*, em terreno geológico adverso geoquimicamente devido aos altos teores de minerais sulfetados presentes no quartzo-mica xisto grafitoso de fundação.

Foram necessárias soluções inovadoras de engenharia para se conviver com as questões da drenagem ácida, resultante da oxidação dos minerais sulfetados, além das dificuldades construtivas por se tratar de um vale muito encaixado.

Optou-se por impermeabilizar todos os contatos concreto-rocha, zoneamento apropriado da barragem e utilização de agregados isentos de sulfetos. Em função do relevo acidentado utilizou-se alternativas de acessos em túneis e estruturas subterrâneas para os condutos forçados e calha dos vertedouros.

**PALAVRAS-CHAVE**

Engenharia de Barragens, Usina Hidrelétrica, Geração, Rochas com Sulfetos, Geotecnia, Concreto, Barragens.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os primeiros estudos da bacia do rio Jequitinhonha foram realizados entre 1963 e 1965 pela empresa de consultoria canadense - *CANAMBRA Engineering Consultante Limited*, tendo a Cemig iniciado seus estudos de inventário em 1984 através da empresa Enerconsult Engenharia Ltda. O projeto de viabilidade foi concluído em 1993 e os estudos de projeto básico foram desenvolvidos entre 1998 e 1999, já em parceria com o Consórcio Construtor de Irapé e sua engenharia de projetos composta pelas empresas Leme Engenharia e Intertechne. A concessão para construção e exploração do Aproveitamento Hidrelétrico de Irapé foi concedida a Cemig, pela Aneel, em 28 de fevereiro de 2.000. As obras iniciaram em fevereiro de 2002 e têm previsão de início de geração comercial da primeira unidade geradora em agosto/2005.

Várias otimizações foram implementadas na fase final de projeto básico e início do projeto executivo, para o cumprimento do cronograma de 40 meses objetivando o início de geração da primeira máquina. As principais foram a implantação de um vertedouro extravasor em cota inferior à dos demais vertedouros, viabilizando o início de enchimento do reservatório anteriormente à conclusão do coroamento da barragem e como proteção da mesma e adotando-se alternativas de acesso subterrâneo em janelas construtivas para agilização da escavação dos dois túneis de desvio, condutos forçados subterrâneos e calhas dos vertedouros, também subterrâneas.

Devido à presença de minerais de sulfeto na matriz rochosa do sítio das obras, as águas percolantes do maciço rochoso poderão conter ácido sulfúrico resultante da oxidação destes minerais sendo, portanto agressivas ao

\*Avenida Barbacena, 1200 / 9º A2, B. Sto. Agostinho, Belo Horizonte, Minas Gerais - BRASIL  
Tel.: (031) 3299-4930 - Fax: (031) 3299-2530 - e-mail: moreira@cemig.com.br

concreto. Cuidados e tratamentos específicos das superfícies rochosas, contra as quais foram concretadas as diversas estruturas, foram objeto de vários estudos e pesquisas durante as fases de projeto básico e executivo. Neste artigo serão descritas as principais alternativas adotadas para a impermeabilização do contato concreto-rocha das estruturas de concreto de Irapé.

Foi necessário também que o projeto da barragem fosse concebido dentro da realidade das condições geológico-geoquímicas do sítio de Irapé. O zoneamento interno do maciço de terra-enrocamento da barragem levou em conta a possibilidade de formação de efluentes ácidos não só no reservatório, como também nas águas percolantes pelo maciço da barragem e maciço de fundação. Como grande parte dos blocos rochosos do enrocamento foram provenientes das escavações obrigatórias, compostos conseqüentemente de rocha sulfetada, o projeto previu um zoneamento específico para conviver com esta situação, minimizando assim o risco de degradação dos blocos de enrocamento e de geração de drenagem ácida, como também instrumentação específica para monitoramento dessas percolações. Vale ressaltar que a barragem de Irapé será a barragem mais alta do Brasil com seus 208,00 m de altura (ver Figuras 1 e 2).

A seguir serão descritas as características principais do empreendimento, como também as novidades do projeto civil que foi concebido para um empreendimento desta magnitude em terreno geológico com as particularidades da UHE de Irapé.

## 2.0 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA UHE DE IRAPÉ

O Aproveitamento Hidrelétrico de Irapé explora uma queda líquida de 158,50 m e uma vazão aproximada de 250,50 m<sup>3</sup>/s para gerar com uma potência nominal nos bornes dos geradores de 361,95 MW. A energia assegurada (ao nível de garantia do sistema interligado) do Aproveitamento Hidrelétrico de Irapé é de 1.807.188 MWh/ano.

Para isto está sendo construída uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso, com altura máxima de 208,0 m que possibilitará a formação de um reservatório de regularização com 137 km<sup>2</sup> de área inundada para o N.A. máximo normal na El. 510,00 m. Ver Arranjo Geral da Obra na Figura 5 deste Informe Técnico.

O desvio do rio Jequitinhonha está sendo operado por dois túneis localizados na margem direita, com comprimento para os túneis superior e inferior de, respectivamente, 1.067 m e 1.227 m, e seção tipo “cogumelo” com alturas de 12,70 (túnel inferior) e 14,00 (túnel superior), para as seções transversais.

O Vertedouro está situado na ombreira esquerda sendo constituídas das seguintes estruturas que têm vazão efluente de projeto de 5.940 m<sup>3</sup>/s:

- uma estrutura de controle do tipo perfil Creager na EL 491,00, composta de dois vertedouros. Cada um com uma comporta tipo segmento nas dimensões de 11,0 m x 20,0 m e uma calha sendo inserida em dois túneis individuais com comprimento médio de 626 m e seção inicial de 11,0 m x 15,0 m transicionando para uma seção de 10,0 m x 11,40 m, o trecho final correspondente ao salto de esqui disposto na EL. 404,00 m;
- Um descarregador de fundo que tem estrutura em torre, posicionada entre o vertedouro de superfície e a tomada d'água, alinhada com o vertedouro para permitir a utilização de um único pórtico. A estrutura de controle propriamente dita é composta por duas aberturas com seção de 7,00 x 9,40 m (l x h) cada uma, soleira na El. 450,00, e controladas por comportas tipo segmento, guarnecidas por um conjunto de *stoplogs*. Cabe ressaltar que a seção de escoamento foi definida para garantir as condições operacionais como extravasor intermediário durante a construção da barragem, excedendo as necessidades de descarga como vertedouro nas condições normais de operação do reservatório, aumentando portanto a segurança quanto a capacidade de extravasão do reservatório.

A tomada d'água, posicionada na ombreira esquerda, à direita da estrutura do vertedouro, é formada por três unidades independentes, do tipo torre, com base na El. 455,00 m e topo na El. 514,00 m, com uma altura total de 59,0 m. Estão previstas grades e ranhuras para uma comporta ensecadeira e três comportas, tipo vagão, hidráulicamente operadas. Para o acionamento das grades da comporta ensecadeira e manutenção das comportas tipo vagão existe um pórtico rolante na plataforma superior da tomada d'água, na El. 514,00 m, com capacidade de 150 kN.

Os três condutos forçados são subterrâneos, tendo um primeiro trecho, com cerca de 404,0 m e com diâmetro interno de 4,6 m, revestido com concreto, e um segundo trecho de aproximadamente 110,0 m e diâmetro interno de 3,8 m, blindado em aço. O desemboque dos túneis está a 8,50 m a montante da linha de centro das unidades.

A casa de força está localizada a jusante da barragem, na margem esquerda do rio, imediatamente a montante do desemboque dos túneis de desvio. Possui três unidades geradoras com capacidade nominal de 120 MW (nos bornes do gerador) e capacidade total nominal instalada de 360 MW. Trata-se de uma estrutura do tipo abrigada,

encaixada em uma escavação na rocha. O acesso e o pátio de manobras da casa de força estão situados na El. 342,00 m.

### 3.0 – GEOLOGIA DO LOCAL DO EMPREENDIMENTO

O maciço rochoso local é constituído predominantemente por um pacote de quartzo-mica-xisto grafitoso, homogêneo, de coloração cinza escura, com granulação que varia de fina (predominante) a grosseira e portador de sulfetos (principalmente pirrotitas) disseminados na matriz rochosa.

A característica singular do maciço, e que norteou os conceitos de projeto, é a presença disseminada de sulfetos em praticamente todo sítio da obra. Estes minerais ocorrem principalmente na forma de delgados níveis (quase sempre lâminas) orientados segundo a foliação da rocha, exibindo granulação preferencialmente fina. Os sulfetos podem ocorrer em grãos grosseiros apenas quando associada a veios de quartzo predominantemente concordantes. Os sulfetos possuem teores médios da ordem de 6% em volume na rocha (cerca de 10% em peso). Veios de quartzo, com espessura variando de centímetros a metro são comuns na seqüência, estando normalmente paralelos aos planos de xistosidade e muitas vezes enriquecidos em sulfetos.

O mapeamento geológico-estrutural executado no local, durante as escavações para implantação das estruturas, revelou a presença de uma descontinuidade principal representada pela foliação do quartzo-mica xisto (atitude com máximo em NS/10°E) e um sistema de fraturas conjugadas, com máximos em N13°W/85°NE e N30°W/84°SE. Dentro das escavações subterrâneas (calhas dos vertedouros por exemplo) constata-se que as descontinuidades apresentam-se abertas abertas somente nas bordas do maciço rochoso (próximo aos emboques), com indícios de circulação temporária de água, e fechadas quando se avança para o interior do corpo rochoso, sendo que em geral, as descontinuidades abertas não ultrapassam a profundidade média de 40,00 m.

Na região da casa de força e nos septos entre os vertedouros observa-se que o sistema de fraturamento forma um par conjugado, localmente ortogonal entre si e com afastamento médio para uma mesma família da ordem de dois metros, que ocasionou instabilidades combatidas através de tratamento por tirantes e concreto projetado. Descontinuidades isoladas, como as encontradas na região dos defletores, na saída dos túneis calha, representam zonas de falhas, com preenchimento de material decomposto laterizado, com até 0,5 metro. Estes locais receberam tratamento específico através de uma densa malha de tirantes e concreto projetado com tela metálica.

No geral pode-se afirmar que o maciço rochoso do local das obras de Irapé apresenta um bom comportamento geomecânico, principalmente na porção interior das escavações subterrâneas e nos trechos mais profundos do vale, pois o quartzo-mica xisto apresenta-se são, muito consistente e pouco fraturado. As questões relacionadas a geração ácida a partir dos minerais sulfetados serão tratadas a seguir.

### 4.0 – ASPECTOS RELACIONADOS À PRESENÇA DE SULFETOS NA ROCHA DE IRAPÉ

A CEMIG e as empresas constituintes do Consórcio Construtor de Irapé\* (CCI) fizeram uma extensa pesquisa a respeito do tema – presença de sulfetos disseminados na rocha que serviu de fonte de enrocamento, fundações, taludes e túneis das obras civis da Usina de Irapé, objetivando equalizar o conhecimento sobre o problema e encontrar suas possíveis soluções.

Os minerais de sulfeto de ferro se alteram quimicamente quando expostos a um ambiente oxidante e úmido (água + oxigênio) e se transformam em novos compostos químicos (sais de sulfato, hidróxidos e ácido sulfúrico). Os produtos resultantes desta reação química dependem fundamentalmente da quantidade de água presente, pois esses sais resultantes precipitam-se em ambiente de grande concentração de soluto (pouca água) e são dissolvidos em ambiente de grande concentração de solvente (água). A reação química mais comum da alteração dos sulfetos de ferro (pirrotita e pirita),  $FeS_2$ , em presença de pouca água e oxigênio é a formação de sulfato de ferro (melanterita e rozenita no caso de Irapé) e de ácido sulfúrico.

Nos maciços rochosos, o processo de alteração está normalmente limitado à zona de variação do nível de água do terreno, nas fissuras, poros e fraturas da rocha. Nas porções mais externas e aliviadas do maciço rochoso, as altas permeabilidades ao ar e às soluções facilitam o acesso do oxigênio, resultando em zonas com lixiviação intensa. Já em porções interiores, onde a percolação de água oxigenada é mais difícil, com o fraturamento fechado e porosidade reduzida, os sulfetos encontram-se quase sempre inalterados. A oxidação rápida dos sulfetos pode ocorrer em porções expostas pelas escavações, principalmente aquelas de granulometria mais fina e conseqüente maior superfície específica.

\* O CCI é constituído por: Construtora Andrade Gutierrez S.A., Construtora Norberto Odebrecht S.A., Hochtief International do Brasil, Ivaí – Engenharia de Obras S.A. e Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda.

Os sais formados devido a alteração dos sulfetos para sulfatos, apresentam durante sua precipitação e cristalização uma variação volumétrica com o desenvolvimento de pressões de expansão. No caso de Irapé, onde a rocha local se caracteriza como de alta resistência, a pressão de expansão provocada pela transformação dos sulfetos em sulfatos não é suficiente para vencer a resistência à tração da matriz rochosa. O fornecimento do ânion sulfato para as águas levam a uma diminuição do pH tornando as soluções mais ácidas em função de sua diluição. No caso do reservatório de Irapé devido a constante renovação das águas este fenômeno de acidificação não ocorrerá. No caso das águas percolantes pelo maciço rochoso (das fundações, taludes e túneis) e da barragem que tiverem valores de pH baixo, os critérios adotados pelo projeto levaram em consideração a aplicação de tratamentos específicos, que serão descritos no próximo item, de forma a proteger as estruturas de concreto e a estrutura do barramento quanto a estabilidade.

A influência dos produtos de alteração de sulfetos (sais de sulfato, hidróxidos e ácido sulfúrico) nos concretos fabricados com cimento Portland comum pode ser resumida em dois tipos de reações – internas e externas.

As reações internas ocorrem quando se utiliza britas ou agregados de rochas contendo sulfetos. A oxidação dos sulfetos existentes nos agregados, com a geração de sulfatos, quando em contato com a água de amassamento do concreto leva a uma baixa no valor de pH da solução devido a formação do ácido sulfúrico. Este ácido, não neutralizado pela cal livre, poderá atacar os produtos secundários da hidratação do cimento e levar a uma degradação progressiva do concreto. Pode ocorrer também reação com os produtos de hidratação do cimento, com o desenvolvimento de pressões de expansão em fissuras do agregado ou na sua superfície. Isto levará a uma desintegração física do concreto, com pouco ou nenhum ataque químico à pasta do cimento. Finalmente, os sulfatos resultantes da oxidação dos sulfetos podem desencadear também novas reações com a calcita, proveniente da carbonatação da portlandita,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e formar gesso (gipsita), que deveria ser totalmente consumida no processo de hidratação do cimento. O problema é que a hidratação da gipsita é expansiva e pode levar ao fissuramento da matriz cimentante.

As reações externas podem ocorrer como conseqüência da imersão de concretos em soluções de baixo pH e sulfatadas, provenientes da solubilização dos produtos de alteração dos sulfetos, podendo ser consideradas como um fenômeno de superfície. A penetração destas soluções no concreto depende, fundamentalmente, da permeabilidade deste, do gradiente de pressão de percolação e da espessura da peça de concreto. As reações de superfície são as mesmas que acontecem nas reações internas.

No maciço da barragem, o contato da água aerada do reservatório com os blocos e finos do enrocamento poderá levar a formação de soluções de baixo pH (ácidas) devido a oxidação dos minerais sulfetados presentes nos xistos utilizados na construção do aterro. Este fenômeno poderá ocorrer na faixa de depleção (entre os níveis mínimo – El. 470,00 m e máximo – El. 510,00 m do reservatório) e com menor possibilidade de ocorrência quando da circulação de água do reservatório devido a inversão térmica. Na porção jusante do maciço de enrocamento da barragem a infiltração das águas de chuva poderia desencadear o processo de formação de soluções ácidas devido ao contato principalmente com o material fino do enrocamento. Foram tomadas algumas iniciativas de projeto, que serão descritas a seguir, para minimizar os efeitos das reações na integridade dos blocos de enrocamento e assim garantir a estabilidade da barragem.

## 5.0 – SOLUÇÕES DE PROJETO ADOTADAS

Os conceitos de projeto que serão apresentados neste item resultam de uma grande e extensa pesquisa e evoluíram nas diversas etapas de estudos de Irapé, desde os primeiros relatos e registros sobre os sulfetos feitos nos relatórios de inventário e viabilidade, até os relatórios técnicos do projeto executivo, além das observações e testes de campo que foram possíveis durante o andamento das obras. Vale registrar que os dados colhidos dos testes com lisímetros dos materiais fornecidos pelas escavações e das várias campanhas de ensaios geoquímicos foram desenvolvidos em parceria com os laboratórios de Furnas e da UFMG. Também foram utilizados dados de observação das pilhas geradas pela escavação de uma galeria de pesquisa feita pela Cemig em 1997, com acompanhamento até a atualidade.

### 5.1 – Concretos Convencionais e Projetados

Em todos os concretos está sendo utilizado cimento resistente a sulfatos (RS) e agregados de materiais rochosos com ausência ou contendo teores mínimos de sulfetos, provenientes de pedreira de metadiamicito (quartzo-xisto compacto) localizada a 3,5 Km a jusante do barramento.

O cimento RS apresenta baixo teor de  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico), de 0,78%, e adicionalmente pouca cal livre (CaO) e todo o aluminato é consumido durante a hidratação, impedindo a formação de etringita secundária pela inexistência do componente principal para a reação ocorrer. Quanto ao óxido de cálcio livre, como o cimento RS possui teores marginais, a introdução de pozolana consome o pouco de CaO porventura existente, impedindo assim a carbonatação do cimento e a conseqüente formação de gipsita secundária que poderia levar a fissuração

do concreto devido a expansão volumétrica. Adotou-se como limite os teores de C3A de 3,5% em peso de cimento e cal livre (CaO) no intervalo LSF (*lime saturation factor*) entre 1,08 e 0,66. A adição de microsilica e pozolanas ao cimento de Irapé propiciaram o consumo do pouco de  $\text{Ca(OH)}_2$  que poderia sobrar da reação de hidratação do concreto.

A baixa permeabilidade do concreto de Irapé foi resultado de um bom adensamento da matriz cimentante através de dosagens mais elevadas de cimento, tipicamente superiores a  $300 \text{ Kg/m}^3$ , além de adição de microsilica com dosagens típicas entre 5% e 10% do peso de cimento e baixos fatores água/cimento, entre 0,45 e 0,50. Foi utilizado também o produto metacaolim em substituição a microsilica, também com bons resultados.

## 5.2 – Proteção dos Contatos Concreto-Rocha

Devido a presença de minerais de sulfetos na matriz rochosa das fundações, as águas percolantes através do maciço rochoso poderão conter ácido sulfúrico resultante da reação por oxidação sendo, portanto agressivas ao concreto. Os tratamentos das superfícies rochosas, contra as quais estão sendo concretadas as diversas estruturas, foram objeto de estudos e pesquisas para a definição dos produtos de impermeabilização e sua melhor forma de aplicação em função das características peculiares de cada estrutura.

O conceito utilizado para este sistema de proteção consistiu em isolar o concreto do contato direto com os agentes agressivos, procurando evitar a criação de vazios que prejudicassem a estanqueidade do contrato concreto-rocha ao fluxo de água do reservatório, além de evitar a transmissão de esforços da estrutura para o maciço rochoso. O material de proteção deve funcionar como uma barreira impermeável entre a superfície da rocha e o concreto e possuir resistência comprovada aos ataques químicos a que estarão sujeitas durante a operação da usina.

Foram identificadas no mercado películas de proteção aplicadas por aspersão mediante o uso de pistola *airless*, sendo utilizadas na obra basicamente dois tipos de produtos:

- Tintas epóxi sem solvente – Fospox SF P 235 da Fosroc;
- Revestimentos elastoméricos a base de poliuretano – Nitoproof 250 da Fosroc.

Estes produtos foram submetidos a ensaios de laboratório no IPT para certificação de sua resistência ao ataque de agentes químicos (soluções ácidas). Também fez parte do processo de qualificação a realização de testes de aplicação de campo para verificação da adequação dos produtos às condições reais das estruturas.

As amostras ensaiadas em laboratório foram avaliadas quanto a variação de massa, alteração visual e variação de resistência a tração direta após ciclos de 7 dias em temperatura ambiente para concentrações de ácido sulfúrico de 10%, 20% e 40%. A concentração máxima esperada para Irapé é em torno de 0,02% para pH de 2,5. Foi realizado também um conjunto de ensaios em corpos de prova moldados com juntas de construção para avaliar e quantificar os valores de resistência à tração correspondente a aderência entre as películas e o concreto. Os ensaios foram realizados variando-se o intervalo de tempo entre a concretagem e a última demão das películas.

Nos testes de campo procurou-se avaliar o comportamento dos produtos às condições dos substratos de aplicação – superfícies porosas e irregulares, eventualmente úmidas ou molhadas, assim como as condições operacionais – adequação dos equipamentos ao ambiente de aplicação, produção e tempo de cura. Foram testadas condições de aplicação em fundações horizontais e inclinadas, além de paredes e abobadas de túneis.

As estruturas do arranjo da UHE Irapé que estão sendo protegidas no perímetro do contato concreto-rocha são as seguintes – vertedouro e extravasor, túneis calha, túneis forçados, concreto de enchimento do fundo do canal do rio (CCR) na fundação da barragem, tampões dos túneis de desvio, casa de força e tomada d'água.

No vertedouro o tratamento foi a aplicação em duas etapas do produto Fospox SF P 235, com espessura nominal de 0,4 mm, de maneira a formar uma película contínua utilizando-se, inclusive, uma argamassa especial resistente a sulfatos para regularização prévia daquelas superfícies irregulares onde a rocha apresentava mais fraturada e com cavidades. Na região da viga munhão, para garantir melhor integridade do concreto e rigidez no contato, o produto Fospox foi aplicado com espessura nominal de 0,6 mm (correspondente à aplicação em três etapas).

Nos túneis calha a maior parte do revestimento em concreto dos muros laterais e laje de fundo possui contato direto com rocha sã que não deverá gerar efluente ácido, salvo zonas localizadas com maior fraturamento e preenchimento de material decomposto localizadas próximo aos emboques dos túneis. Nestes trechos aplica-se o produto Fospox SF P 235, em duas etapas com espessura total de 0,4 mm.

Durante a operação dos 3 túneis forçados ocorrerão pressões internas da ordem de até 2,3 MPa, sendo que a ação destas pressões deformará e fissurará o revestimento de concreto. Diante disto optou-se pela aplicação da película protetora Nitoproof 250 em 2 demãos, de modo a formar uma membrana contínua com espessura mínima de 1,2 mm. Este produto possui elasticidade necessária para acompanhar as deformações do revestimento de concreto sem se romper.

Para a estrutura da casa de força foi previsto a aplicação dos seguintes tratamentos:

- Nas áreas de engaste da estrutura na rocha (fundação e paredes abaixo da El. 319,70 m) e nas superfícies horizontais previu-se a aplicação de tinta epóxi sem solvente (Fospox);
- Nas demais superfícies previu-se a aplicação de revestimento elastomérico (ver Figura 4) à base de poliuretano (Nitoproof 250);
- Adotou-se a aplicação sistemática, a toda a superfície limpa da rocha, de uma camada de argamassa resistente a sulfatos sendo as películas impermeabilizantes aplicadas sobre a argamassa. O uso da argamassa foi para garantir a suavização do substrato rochoso, garantindo a formação de uma película contínua e sem falhas de aplicação.

Na tomada d'água as paredes e fundações receberam uma pintura de epóxi (Fospox SF P 235) com espessura nominal de 0,4 mm. Dentro de um prazo mínimo de 12 horas e máximo de 6 dias foi borrifado o mesmo produto e, imediatamente após, foi aplicado uma leve camada de areia pulverizada mecanicamente sobre o produto fresco. Este procedimento foi adotado para garantir uma melhor aderência entre o concreto das paredes e a película epoxídica, suficiente para impedir o aparecimento de vazios entre estes materiais em função da retração do concreto ou da pressão hidrostática decorrente da diferença de níveis d'água interno e externo, quando do rebaixamento do NA do reservatório, e também incrementar a transmissão de esforços entre a estrutura e o maciço rochoso.

O concreto de enchimento do fundo do canal do rio na barragem recebeu em toda a superfície de contato com a rocha de fundação uma película de interface a base de epóxi (Fospox SF P 235), com espessura nominal de 0,6 mm resultante do total de três etapas.

### 5.3 – Zoneamento do Maciço da Barragem

A barragem de Irapé é do tipo enrocamento com núcleo central delgado em material argiloso, com os taludes de montante e de jusante com inclinação média de 1,0V: 1,5H e um volume total de aterro de aproximadamente 10 milhões de metros cúbicos. A crista com largura de 13,00 m possui extensão total de 550,00 m e a cota de coroamento é na elevação 514,50 m, o que confere a esta barragem uma altura recorde no Brasil de 208,00 m.

Grande parte do material utilizado no enrocamento foi proveniente da escavação do canal de aproximação e adução do vertedouro e da tomada d'água, do tipo quartzo-mica xisto sulfetado. Os maciços rochosos classificados nos mapeamentos geológicos como de Classe II (Maciço Bom) e de Classe I (Maciço Muito Bom) forneceram blocos para o enrocamento designados no zoneamento da barragem como enrocamento E5 e E6. Estes materiais provenientes das zonas mais interiores do maciço rochoso possuem sulfetos são e praticamente sem lixiviação pois a rocha apresenta-se sã (E6) a pouco decomposta (E5). Já os maciços classificados como de Classe III (Maciço Regular) forneceram material para o enrocamento designado na barragem como enrocamento E5A. Por possuírem mais juntas abertas e permeabilidade mais alta que os maciços II e I, a rocha apresenta-se medianamente a muito decomposta e durante o processo de escavação a fogo das bancadas gerou maior quantidade de finos. Finalmente os maciços rochosos classificados como de Classe IV e de Classe V forneceram rocha extremamente decomposta a saprolito para a barragem, sendo denominadas no zoneamento como material 5L, ou material lixiviado (teoricamente com teor de sulfetos muito baixo). Além dos materiais provenientes das escavações obrigatórias, utilizou-se também blocos de enrocamento provenientes da pedreira de metadiamiccito (praticamente sem sulfetos).

Com base nas observações feitas nas pilhas de rocha escavada na galeria de investigação de 1997 e nos lisímetros com rochas das escavações, procurou-se adotar como critério de projeto da barragem a disposição dos diversos horizontes de enrocamento de maneira a preservá-los quanto a desintegração por ataque ácido, como também a própria geração de efluentes ácidos no maciço da barragem. A montante do núcleo impermeável, e de montante para jusante, foram posicionados os enrocamentos E6, E5 e 5L. Desta maneira os enrocamentos com menor quantidade de finos e maior sanidade dos blocos ficaram posicionados mais próximo ao reservatório. O material lixiviado – 5L (com a totalidade dos sulfetos praticamente já lixiviados) ficou posicionado junto ao núcleo impermeável. Para o material mais grosseiro (E6) em contato com o lago, é de se esperar a formação de películas de óxido de ferro nas faces dos blocos, o que os protegerá da oxidação dos sulfetos.

Os filtros e transições são constituídos por areias naturais e materiais processados oriundos da pedreira de metadiamiccito e conseqüentemente não terão problema quanto a geração de ácido. Da mesma forma, tanto a

montante (ao longo da faixa de oscilação e depleção do reservatório), quanto a jusante, foi prevista uma camada de enrocamento de revestimento (designado E7), o qual também é oriundo da pedra de metadiamicito, cuja rocha apresenta-se praticamente isenta de sulfetos garantirá a não geração ácida. Esta mesma rocha foi empregada no enrocamento da barragem, a jusante do núcleo, no preenchimento do canal profundo do rio e numa faixa junto aos paredões do *canyon* na plataforma de ligação da barragem com o pátio da casa de força.

Devido às condições geométricas do canal mais profundo e estreito do rio Jequitinhonha (ver Figuras 1 e 2), francamente desfavorável à distribuição de tensões no núcleo da barragem, e também pouco favorável quanto aos aspectos de tratamentos para o assentamento do núcleo, foi executado o preenchimento com concreto compactado a rolo (CCR) devidamente encapsulado pela película de material epóxi (Fospox SF P 235) com 0,6 mm em 3 etapas de aplicação. Nesta região da fundação da barragem foi instalado também um medidor de pH para acompanhamento da acidez da água de percolação na barragem, proveniente do reservatório, durante a operação da usina.

No paramento de jusante da barragem a proteção adotada para minimizar a infiltração das águas de chuva, que poderão levar a geração ácida quando em contato com os finos do enrocamento de rocha sulfetada, é constituída de barreiras impermeáveis sucessivas formadas por mantas de PEAD (ver Figura 3), dispostas em intervalos regulares a cada 3 camadas de enrocamento e com direcionamento de fluxo para jusante aduzindo a drenagem através do enrocamento constituído por blocos de metadiamicito.

#### 5.4 – Sistemas de Suporte do Maciço Rochoso e Tratamentos Profundos

Após a classificação geomecânica do maciço rochoso, que variou de Classe V (Maciço Muito Pobre) a Classe I (Maciço Muito Bom) foram definidos os tratamentos específicos com o emprego de concreto projetado padrão (CPP), concreto projetado reforçado com fibras (CPRF), ancoragem ativa e ancoragem passiva.

Todas as barras de ancoragem receberam um tratamento anticorrosivo para resistirem ao ataque ácido e os concretos projetados foram fabricados com o uso de cimento resistente a sulfatos. No preenchimento dos furos que receberam as ancoragens procurou-se dar preferência a utilização de resinas e argamassas com cimento resistente a sulfatos.

As caldas de cimento empregadas nos tratamentos profundos das fundações das estruturas de Irapé, principalmente da barragem, foram confeccionadas com cimento resistente a sulfatos, com vários testes de adição de superplastificante, sílica ativa, escória, como também metacaolim. Utilizou-se também de calda de microcimento. Todos os testes realizados foram para se obter um produto que atingisse as maiores profundidades das juntas e vazios da fundação e que sejam mais resistentes ao ataque ácido.

#### 6.0 – CONCLUSÃO

A Usina de Irapé devido as suas particularidades de relevo acidentado e geologia do sítio em rochas ricas em sulfetos, sabidamente com geração de efluentes ácidos, mereceu por parte da CEMIG e das empresas que compõem o Consórcio Construtor de Irapé (CCI) um grande ineditismo das soluções adotadas pelo projeto. Isto tem sido resultado de intensas pesquisas e observações, com a participação inclusive de consultores internacionais que já vivenciaram situações semelhantes, principalmente em Minerações com geração de drenagem ácida. O empreendimento de Irapé foi aparelhado de diversos instrumentos que permitirão o monitoramento constante de suas estruturas, de maneira a avaliar as soluções adotadas de projeto durante a operação da usina.

Coube também ao Consórcio Construtor de Irapé, através de sua engenharia de planejamento, a escolha acertada de uma logística bastante complexa de acessos, muitos deles subterrâneos para atender ao prazo de geração de 40 meses para a primeira unidade geradora. A sua engenharia de projetos optou também acertadamente para a adoção de calha subterrânea para os vertedouros, aproveitando-se das condições topográficas e geológicas favoráveis para este tipo de estrutura.

#### 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Cia Energética de Minas Gerais - Usina Hidrelétrica de Irapé – Projeto Básico Consolidado – Volume 1 – Texto – 11.171 RE-G00-004.
- (2) Cia Energética de Minas Gerais - Usina Hidrelétrica de Irapé – Projeto Básico Consolidado – Anexo II – Aspectos Relacionados à Presença de Sulfetos na Rocha – Estudos e Investigações – RT-210-12-002.
- (3) Cia Energética de Minas Gerais - Usina Hidrelétrica de Irapé – Projeto Executivo – Tratamento dos Contatos Concreto-Rocha – Medidas e Produtos para a Proteção dos Contatos – 11.171-RT-G10-005 a.
- (4) Cia Energética de Minas Gerais - Pesquisa e Estudos da Qualidade da Água da UHE Irapé – Relatório Final de Atividades – ST-690-S-RE-G00-003.



- (5) Cia Energética de Minas Gerais - Usina Hidrelétrica de Irapé – Projeto Executivo – Instruções para Tratamento do Contato Concreto-Rocha nas Estruturas da Tomada D’água, Vertedouro, Casa de Força, Barragem, Túneis de Desvio e Conduitos Forçados – 11.171-IN-G10-01/02/03/04/06/09.

## 8.0 – ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fundação do núcleo impermeável da barragem de Irapé abaixo da elevação 390,00 m.

Figura 2 – Vista aérea da construção da Usina de Irapé, com destaque para o maciço da barragem.

Figura 3 – Instalação da Manta de PEAD no paramento de jusante da barragem para proteção contra infiltração das águas de chuva, também chamado de “guarda-chuva da barragem”.

Figura 4 – Aplicação por aspensão da película impermeabilizante Nitoproof.

Figura 5 – Arranjo Geral do Empreendimento de Irapé.



FIGURA 1



FIGURA 2



FIGURA 3



FIGURA 4

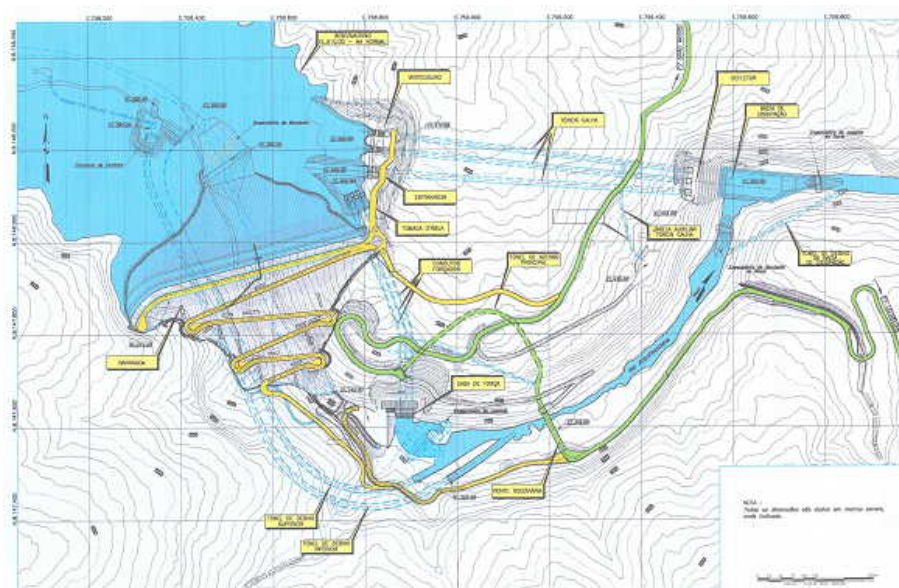


FIGURA 5