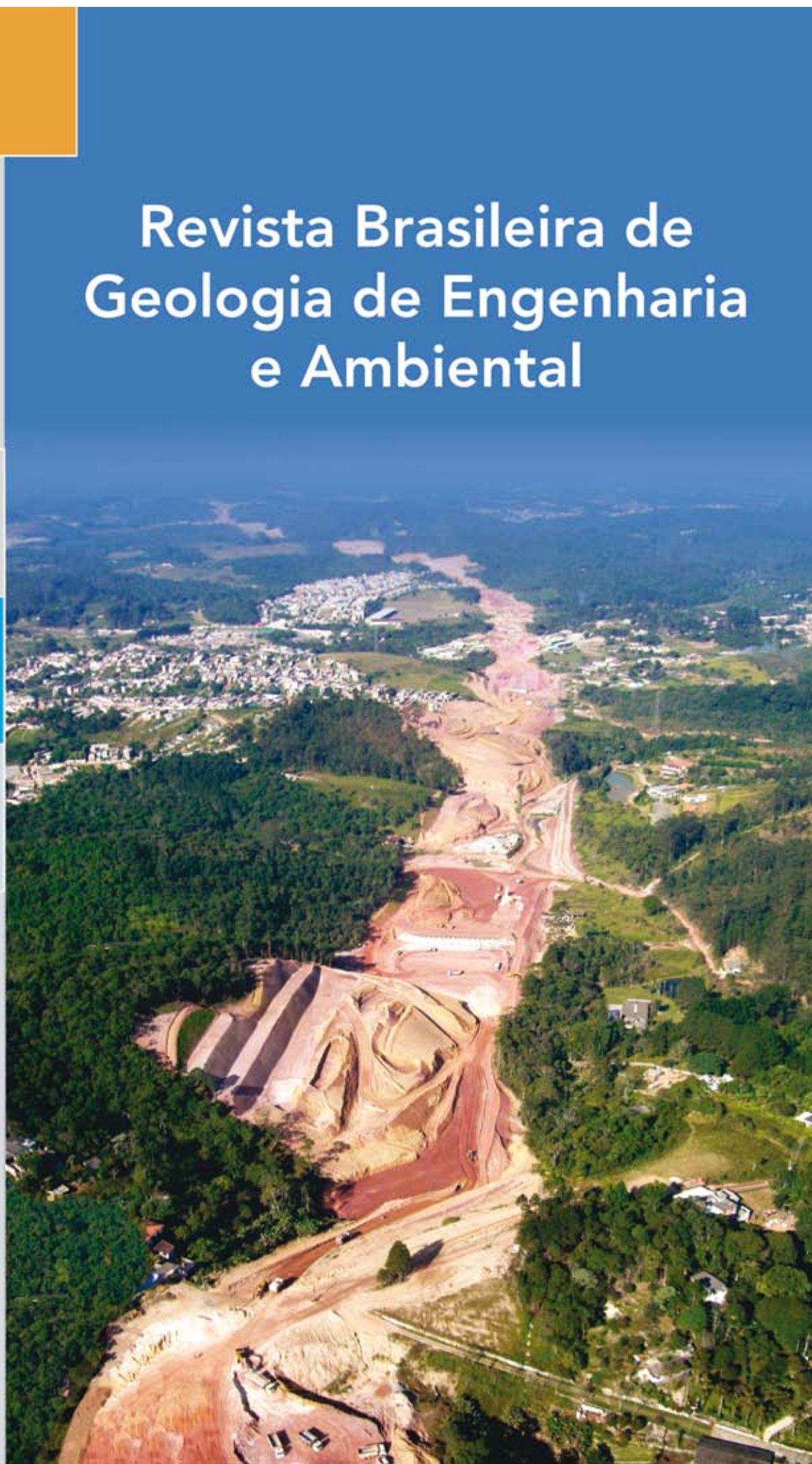




ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental



ISSN 2237-4590

Volume 1
Número 1
Novembro 2011

Edição Especial



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

RBGEA

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

EDITOR

Lázaro Valentim Zuquette - USP

CO EDITOR

Fernando F. Kertzman - GEOTEC

REVISORES

Antonio Cendrero - Univ. da Cantabria (Espanha)

Alberto Pio Fiori - UFPR

Candido Bordeaux Rego Neto - IPUF

Clovis Gonzatti - CIENTEC

Eduardo Goulart Collares - UEMG

Emilio Velloso Barroso - UFRJ

Fabio Soares Magalhães - BVP

Fabio Taioli - USP

Frederico Garcia Sobreira - UFOP

Guido Guidicini - Geoenergia

Helena Polivanov - UFRJ

Jose Alcino Rodrigues de Carvalho - Univ. Nova de Lisboa (Portugal)

José Augusto de Lollo - UNESP

Luis de Almeida Prado Bacellar - UFOP

Luiz Nishiyama - UFU

Marcilene Dantas Ferreira - UFSCar

Marta Luzia de Souza - UEM

Newton Moreira de Souza - UnB

Oswaldo Augusto Filho - USP

Reinaldo Lorandi - UFSCar

Ricardo Vedovello - IG/SMA

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Rita Motta - Editora Tribo da Ilha

FOTO DA CAPA

Obras do Rodoanel trecho sul, nas proximidades da represa Billings.,
tirada em 08 de julho de 2008 . Fabrício Araujo Mirandola - IPT

Edição Especial

Circulação: Novembro de 2011

Tiragem: 2.500

ISSN 2237-4590

São Paulo/SP

Novembro/2011



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - IPT (Prédio 11) 05508-901 - São Paulo - SP
Tel.: (11) 3767-4361 - Telefax: (11) 3719-0661 - E-mail: abge@ipt.br - Home Page: <http://www.abge.com.br>

DIRETORIA - GESTÃO 2009/2011

Presidente: Fernando Facciolla Kertzman
Vice-Presidente: Gerson Salviano de Almeida Filho
Diretora Secretária: Kátia Canil
Diretor Financeiro: Luiz Fernando D'Agostino
Diretor de Eventos: Elisabete Nascimento Rocha
Diretor de Comunicação: Marcelo Fischer Gramani

CONSELHO DELIBERATIVO

Elaine Cristina de Castro, Elisabete Nascimento Rocha, Fabio Canzian da Silva, Fabrício Araújo Mirandola, Fernando Facciolla Kertzman, Fernando Ximenes T. Salomão, Gerson Almeida Salviano Filho, Ivan José Delatim, Kátia Canil, Leonardo Andrade de Souza, Luiz Antonio P. de Souza, Luiz Fernando D'Agostino, Marcelo Fischer Gramani, Newton Moreira de Souza, Selma Simões de Castro.

NÚCLEO RIO DE JANEIRO

Presidente: Nelson Meirim Coutinho - **Vice-Presidente:** Antonio Queiroz
Diretor Secretário: Eusébio José Gil - **Diretor Financeiro:** Cláudio P. Amaral
End.: Av. Rio Branco, 124 / 16º andar - Centro - 20040-916 - Rio de Janeiro - RJ
Tel : (21) 3878-7878 **Presidente - Tel.:** (21) 2587-7598 **Diretor Financeiro**

NÚCLEO MINAS GERAIS

Presidente: Maria Giovana Parizzi - **Secretário:** Frederico Garcia Sobreira
Tesoureiro: Luís de Almeida P. Bacellar - **Diretor de Eventos:** Leonardo A. Souza
End.: Univ. Fed. de Ouro Preto - Depto. Geologia - 35400-000 - Ouro Preto/MG
Fone: (31) 3559.1600 r 237 **Fax:** (31) 3559.1606 -

REPRESENTANTES REGIONAIS	UF
ROBERTO FERES	AC
HELIENE FERREIRA DA SILVA	AL
JOSÉ DUARTE ALECRIM	AM
CARLOS HENRIQUE DE A.C. MEDEIROS	BA
FRANCISCO SAID GONÇALVES	CE
NORIS COSTA DINIZ	DF
JOÃO LUIZ ARMELIN	GO
MOACYR ADRIANO AUGUSTO JUNIOR	MA
ARNALDO YOSO SAKAMOTO	MS
KURT JOÃO ALBRECHT	MT
CLAUDIO FABIAN SZLAFSZTEIN	PA
MARTA LUZIA DE SOUZA	PR
LUIZ GILBERTO DALL'IGNA	RO
CEZAR AUGUSTO BURKERT BASTOS	RS
CANDIDO BORDEAUX REGO NETO	SC
JOCÉLIO CABRAL MENDONÇA	TO



A Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) é uma proposta da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE) no sentido de suprir uma lacuna nacional para publicação de trabalhos científicos técnicos e de exemplos de aplicação da Geologia de Engenharia e Ambiental, que venham agregar conhecimentos aos profissionais, pesquisadores e comunidade em geral, tanto em nível nacional como internacional.

A frequência será de três números regulares por ano, e números especiais, no caso de seleção de trabalhos relacionados a um tema específico.

A RBGEA terá o primeiro número na forma impressa, e, logo que tiver uma sequência definida, será uma publicação eletrônica, impressa anualmente. Com este periódico espera-se que haja um avanço nas relações entre os profissionais que atuam na formação e pesquisa e aqueles que atuam nas outras esferas da profissão. Assim, será reforçada a relação que tornou a atividade de Geólogo de Engenharia e Ambiental relevante em diversos países, fazendo com que a profissão ocupe uma posição de destaque na sociedade, com questões relevantes relacionadas ao Planejamento Urbano e as Obras de Infraestrutura e tantos outros.

Espera-se que esta publicação atinja seus objetivos e venha subsidiar estudantes e profissionais da Geologia de Engenharia nas suas atividades, seja nas universidades, nos institutos, nas empresas de economia mista, públicas ou privadas.

A Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) destina-se à divulgação

de investigações, estudos e soluções de problemas de engenharia e ambientais decorrentes da interação entre a Geologia e as atividades humanas - (incluindo aspectos relevantes da Geologia relacionados à Engenharia Civil, Mineração e Recursos Hídricos, assim como relacionados à previsão de eventos perigosos, às áreas contaminadas, aos processos geológicos, à prevenção e remediação de áreas degradadas) -, Planejamento Territorial e Ambiental, Banco de Dados e Casos Históricos; além destes estudos serão também contemplados os processos modernos, as novas técnicas de campo e laboratório e temas científicos de interesse amplo e caráter original, sempre relacionados com a Geologia de Engenharia e Ambiental e com as ciências da terra de uma forma geral, seja do Brasil seja de outros países, publicados na língua portuguesa e espanhola.

O primeiro número apresenta artigos históricos de três profissionais que dão nome aos Prêmios da ABGE para os destaques de nossa categoria: Ernesto Pichler, Lorenz Dobereiner e Fernando Luiz Prandini, bem como uma série inicial de artigos encomendados pelos Editores. A segunda edição continuará com autores convidados pelos Editores; e a terceira edição será um dos melhores trabalhos escolhidos no 13º CBGE. Na sequência, haverá publicações digitais reunindo os artigos submetidos por diversos autores.

Boa leitura à todos.

**Lazaro V. Zuquette e
Fernando F. Kertzman**



- 9** BOÇOROCAS
Ernesto Pichler (In memorian)
- 17** CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO DE FUNDAÇÃO DA UHE CACHOEIRA PORTEIRA
Lorenz Dobereiner (In memorian)
Fernando Pires de Camargo
Alarico A. C. Jácomo
- 29** O BRASIL E A GEOLOGIA NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL E URBANO
Fernando Luiz Prandini (In memorian)
- 41** UM BREVE RELATO SOBRE A GEOLOGIA DE ENGENHARIA
Lazaro Valentin Zuquette
- 57** INTEGRAÇÃO DE ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS APLICADOS A PROJETOS DE ENGENHARIA E À AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS: ESTAMOS AVANÇANDO?
Omar Yazbek Bitar
Amarilis Lucia Casteli Figueiredo Gallardo
Sofia Julia Alves Macedo Campos
Tânia de Oliveira Braga
Caio Pompeu Cavalhieri
- 73** GEOLOGIA APLICADA A BARRAGENS: UMA REVISÃO DE PROCEDIMENTOS
Luiz Ferreira Vaz
Magali Dubas Gurgueira
Talita de Oliveira Muzzi
- 93** CONTRIBUIÇÃO PARA A GEOLOGIA DE ENGENHARIA APLICADA ÀS CIDADES. EXPERIÊNCIA DE LONGA DURAÇÃO EM BELO HORIZONTE – MG
Edézio Teixeira de Carvalho - GEOLURB
- 109** GESTÃO DE RISCOS GEOLÓGICOS NO BRASIL
Margareth Mascarenhas Alheiros
- 123** IMPORTÂNCIA DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA E GEOMECÂNICA NA MINERAÇÃO
Sérgio N. A. de Brito
Paulo R. C. Cella
Rodrigo P. Figueiredo

GEOLOGIA APLICADA A BARRAGENS: UMA REVISÃO DE PROCEDIMENTOS

LUIZ FERREIRA VAZ

THEMAG Engenharia – São Paulo/SP - Brasil
Professor visitante – IG/UNICAMP – Campinas/SP - Brasil
vaz@themag.com.br

MAGALI DUBAS GURGUEIRA

THEMAG Engenharia – São Paulo/SP - Brasil
magali@themag.com.br

TALITA DE OLIVEIRA MUZZI

THEMAG Engenharia – São Paulo/SP - Brasil
talita@themag.com.br

RESUMO ABSTRACT

A alteração do marco regulatório das concessões para aproveitamentos hidroelétricos, depois de 1995, levou ao encurtamento dos prazos para o projeto e a construção de barragens para usinas hidroelétricas, afetando a aplicação da Geologia nesses empreendimentos. Simultaneamente, a maior parte da exploração do potencial hidroelétrico deslocou-se para a região amazônica, enfrentando condições geológicas inéditas ou pouco conhecidas. Por outro lado, novos métodos de investigação e a evolução dos existentes, forneceram ferramentas atualizadas para o estudo e avaliação das condições geológicas. Este artigo oferece uma revisão de procedimentos da Geologia de Engenharia utilizados nos estudos de aproveitamentos hidroelétricos face aos novos paradigmas. São comentadas as implicações do modelo atual de concessão nos trabalhos de investigação geológico-geotécnica e a utilização de novos métodos de prospecção, como a perfuração ótica, incluindo critérios para a interpretação dos resultados. A seleção de eixos de barramento nos estudos de inventário e outros é discutida, enfatizando a interação entre as condições geológicas e o arranjo geral da obra na escolha do sítio. É também discutida a elaboração de planos de investigação para o estudo de aproveitamentos hidroelétricos, fornecendo critérios para a quantificação de sondagens. São ainda comentadas, para o entendimento dos riscos geológicos, a incerteza e os imprevistos. Um exemplo de avaliação de riscos geológicos é apresentado, discutindo-se os principais condicionantes e os critérios básicos para a elaboração da avaliação.

Palavras-chave: Barragem, investigação e risco geológico

GEOLOGY APPLIED TO DAMS: A REVIEW OF PROCEDURES

The change in the regulatory framework of concessions for hydroelectric developments in Brazil, after 1995, led to the shortening of deadlines for the design and construction of dams for hydroelectric plants, affecting the application of geology in these projects. Simultaneously, most of the exploitation of hydropower potential has shifted to the Amazon region, facing unpublished or little known geological conditions. On the other hand, new investigation methods and further development of the existing ones, provide updated tools for the study and evaluation of geological conditions. This paper offers a review of procedures used in engineering geology studies of hydroelectric developments in relation to new paradigms. The implications of the current model of concessions on geological and geotechnical investigations and the use of new exploration methods such as optical profiling, including criteria for the interpretation of results are discussed. The selection of dam axis at inventory stage and other studies is discussed, highlighting the interaction between geological conditions and the layout on the selection of the dam axis. The development of investigation plans for the study of hydroelectric developments is also discussed, providing criteria for quantifying the drilling. The understanding of geological risks, uncertainty and the unpredicted features are also commented. An example of geological risk assessment is presented, discussing the main constraints and the basic criteria for the preparation of the assessment.

Keywords: Dam, investigation and geological risk

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os conhecimentos geológicos passaram a ser aplicados à construção de barragens em princípios da década de 50 do século passado. Entretanto, sua utilização sistemática nos projetos de barragens somente veio a se tornar corriqueira depois de meados da década de 60, com os trabalhos do Comitê de Estudos Energéticos da Região Centro Sul - CORESP. L

O Comitê, como ficou conhecido, foi a contrapartida brasileira a um financiamento da ONU para o levantamento do potencial hidroelétrico da região centro-sul. Para orientar e conduzir o estudo foi contratado um consórcio de empresas americanas e canadenses, denominado CANAMBRA. Este consórcio contava com a participação das principais empresas daqueles países no projeto de usinas hidroelétricas e, portanto, introduziu a tecnologia de ponta então disponível, não só em geologia, mas também em hidrologia e hidráulica, cartografia, estudos energéticos e outras áreas (Vaz, 1998).

No tocante aos estudos geológicos para os estudos de viabilidade, além do mapeamento geológico detalhado, eram feitas sondagens ao longo do eixo, não somente a percussão e rotativas, mas

também sondagens sísmicas de refração, além de estudos sobre a disponibilidade de materiais naturais de construção. Mais importante do que isso, os eixos dos aproveitamentos eram escolhidos a partir de suas características geológicas e topográficas, tendo em vista o atendimento do arranjo das obras. Pela primeira vez, os conhecimentos geológicos foram utilizados na escolha dos eixos, até então feita somente com base nos dados topográficos.

O Comitê, por sua vez, contava com técnicos cedidos pelas empresas estatais de energia elétricas então existentes. No Estado de São Paulo essas estatais dividiam os rios principais, a CHERP (rios Pardo e Tietê), a CELUSA (rio Paraná) e a USELPA (rio Paranapanema). Essa participação dos técnicos das estatais propiciou a rápida absorção da tecnologia de projeto de usinas hidroelétricas, levando à contratação de geólogos por todas elas. Em 1967, as empresas de cada bacia hidrográfica foram unificadas na Companhia Energética do Estado de São Paulo - CESP, a qual contratou o Instituto de Pesquisa Tecnológicas - IPT para conduzir os estudos geológicos de suas barragens (Figura 1). Processo semelhante ocorreu em Minas Gerais, porém, centralizado nas Centrais Elétricas de Minas Gerais - CEMIG.



Figura 1 – Barragem de Ilha Solteira, concluída pela CESP em 1978. Fonte: Exame.com (2011).

Em 1968, o IPT estava presente, com equipes de campo, em todas as barragens da CESP em construção (Ilha Solteira, Promissão e Capivara) além de prestar assistência a outras barragens em fase final de construção (Paraitinga, Jupia e outras). Essas equipes necessitavam de critérios para seus trabalhos tendo em vista homogeneizar suas atividades, já que trabalhavam para o mesmo cliente. Foram então elaboradas, numa reunião em meados de 1968, na Usina de Promissão, com a participação dos geólogos Fernando Pires de Camargo, Luiz Ferreira Vaz e João Alberto Nery de Oliveira, as especificações técnicas para a execução de sondagens e os procedimentos para a classificação de sondagens, definindo-se os graus de alteração e de fraturamento dos testemunhos de sondagem. Esses procedimentos vinham sendo utilizados pelo IPT nos estudos para a Barragem de Ponte Nova, desde 1966, porém foram unificados e aprovados para uso geral pelo IPT na reunião de Promissão.

Dessa forma, ao final da década de 60, uma tecnologia de investigação geológica, adaptada às condições brasileiras, estava ficando disponível. Daí para frente, diversos outros métodos e procedimentos, tanto de campo como de laboratório foram desenvolvidos, principalmente pelo IPT e aplicados ao projeto e construção de barragens, criando uma tecnologia brasileira de grandes barragens em regiões tropicais.

Dentre esses diversos passos alguns foram particularmente importantes. O primeiro foi o desenvolvimento, pelo IPT, da tecnologia pioneira de estudos de alterabilidade de basaltos, depois estendida para outras rochas, incluindo os estudos sobre a reação álcali-agregado, com a proposição de métodos de análise e parâmetros de utilização (Ruiz, 1963). O segundo foi a introdução, pelo consultor Klaus John, do sistema de classificação de maciços rochosos para aplicação na liberação e tratamento de fundações da UHE Ilha Solteira. Até então, esses serviços baseavam-se na experiência dos profissionais envolvidos, porém, passaram a ser definidos em função da classificação geológica do maciço de fundação. Este passo foi de fundamental importância, pois, até então, a geologia era entendida como necessária apenas durante a fase de projeto participando apenas eventualmente da construção (Vaz, 1998).

Toda esta tecnologia estava disponível para aplicação nas grandes hidroelétricas na década de 70 (Itaipu, Tucuruí e Paulo Afonso IV), nas quais foi aperfeiçoada e testada com sucesso. Porém, nas décadas de 80 e 90 e nos primeiros anos deste século, um período de 20 a 25 anos, houve violenta redução nos investimentos em projeto e construção de usinas hidroelétricas, com a desagregação das equipes, das empresas do setor e dos centros de pesquisa.

Nos últimos dez anos o mercado de projeto e construção de usinas hidroelétricas voltou a ficar aquecido, porém, com usinas de médio porte e só recentemente, com as usinas do rio Madeira voltaram as grandes barragens. Essa retomada acompanhou as modificações no sistema de concessão estabelecidas pela Lei 8987 de 1995. O novo modelo permitiu a entrada de empreendedores privados, isoladamente ou associados com empresas estatais e introduziu modificações nas fases de projetos básico e executivo.

A principal alteração ocorreu com a duração dos serviços de projeto e construção. Esses prazos foram consideravelmente reduzidos, de tal sorte que empreendimentos similares, erigidos na década de 70, ocupavam mais de duas vezes o prazo dos empreendimentos atuais. Em consequência, muitos estudos têm sido postergados para a fase de projeto executivo, o que incrementa os riscos geológicos e pode conduzir a acidentes, além de elevar o custo de construção. Aparentemente, esses custos não superam os resultados da geração antecipada dentro da engenharia financeira do empreendimento, o que pode tornar os prazos insuficientes para a adequada investigação geológica.

Em segundo lugar, as condições geológicas dos locais de implantação das novas hidroelétricas tornaram-se muito mais desfavoráveis do que aquelas investigadas na década de 70. Atualmente, os empreendimentos concentram-se na região centro-norte, a maioria na Amazônia. Nessas regiões predominam os maciços pré-cambrianos, com extrema variação nas condições litológicas, de resistência, de alteração e estruturais. Maciços de comportamento geomecânico desconhecido (Figura 2), constituídos por rochas ígneas, sedimentares, metassedimentares, entre outros, têm que ser enfrentados.

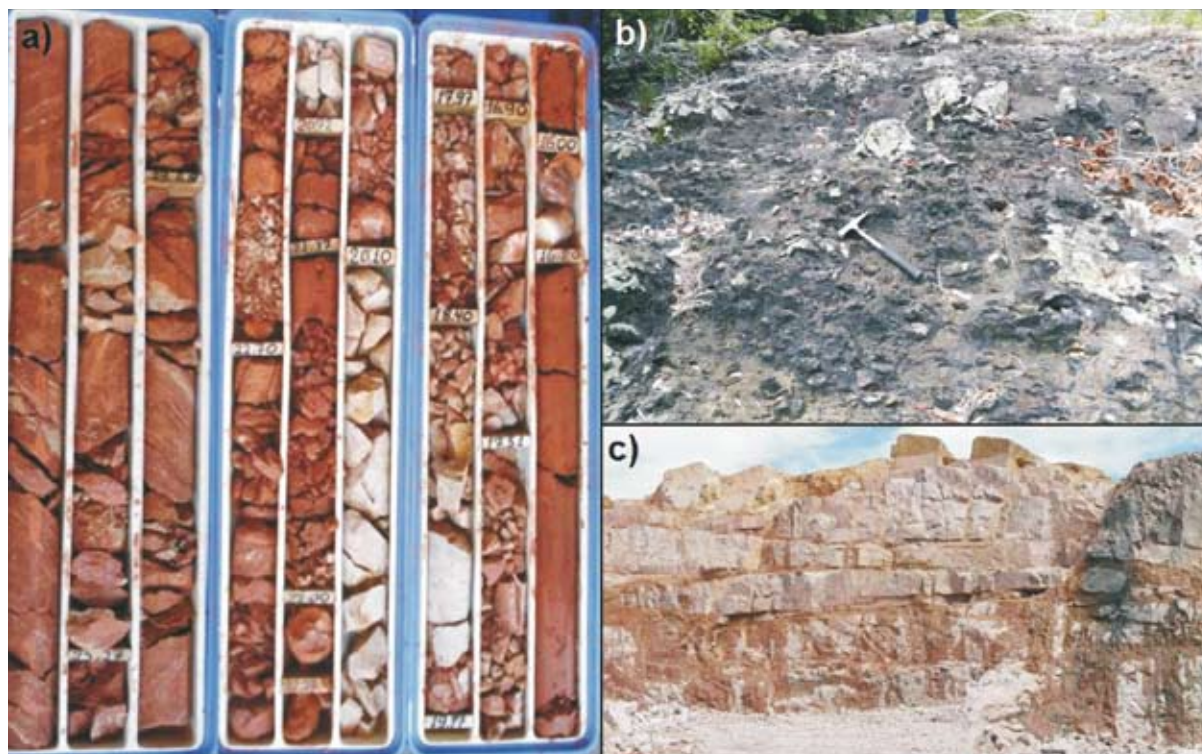


Figura 2 – Exemplos da complexidade geológica a) metassedimentos com intercalações de solo e rocha; b) brecha vulcânica e c) extensas discontinuidades sub-horizontais alteradas até solo de ocorrência aleatória.

Além disso, ocorrem espessas e extensas coberturas recentes, mascarando as condições de sub-superfície e exigindo novos critérios de classificação, seja para fundações ou para materiais de empréstimo. Essas coberturas são de tal monta

que podem preencher canais profundos, como mostrado na Figura 3. A mudança nas condições geológicas faz com que a tecnologia desenvolvida para o estudo das barragens sobre basalto, por exemplo, somente seja parcialmente utilizada.

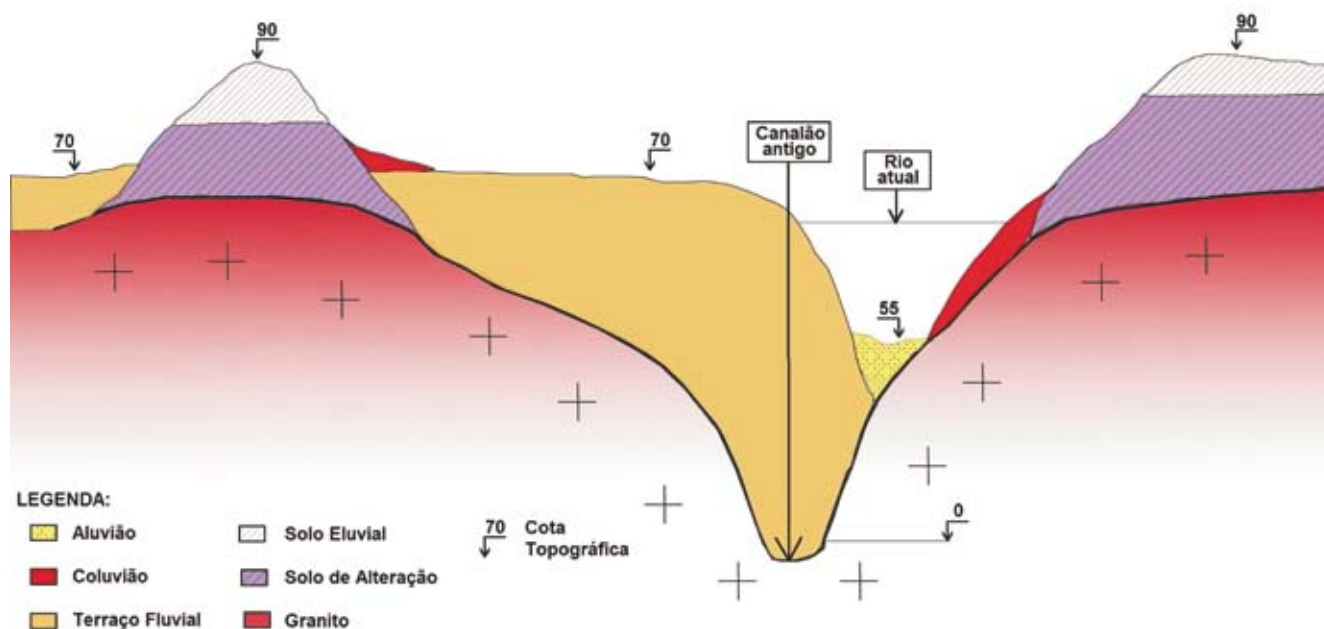


Figura 3 – Modelo esquemático com canais antigos preenchidos por materiais de cobertura.

2 MODELO DE CONCESSÃO E PRAZOS

As etapas de projeto e construção de aproveitamentos hidroelétricos continuam sendo a fase de inventário, a viabilidade dos aproveitamentos mais atrativos e as fases de projeto básico e projeto executivo. Essas fases e os respectivos estudos são definidos no *Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas* (Eletrobras, 2007) conforme mostrado na Figura 4.

As concessões para estudos de inventário são outorgadas pela Agência Nacional de Ener-

gia Elétrica - ANEEL para empresas privadas e estatais, inclusive para a Empresa de Planejamento Energético - EPE, empresa estatal encarregada de estudos e do planejamento energético. É possível que, para uma dada bacia hidrográfica, duas ou mais concessões sejam concedidas. Essas concessões são válidas apenas para os estudos de inventários e seus resultados são encaminhados à ANEEL, tornando-se públicos. Os prazos disponíveis para estes estudos não sofreram muita alteração.



Figura 4 - Etapas de implantação de aproveitamentos hidroelétricos. Fonte: Modificado de Eletrobras (2007).

Porém, para passar à fase seguinte, haverá uma licitação conduzida pela ANEEL. Essa licitação é feita com base no preço ofertado pelo empreendedor para a venda da energia a ser produzida pelo aproveitamento, vencendo aquele que ofertar o menor preço. Para essa oferta o empreendedor precisa do planejamento financeiro de toda a operação, desde o projeto básico até o final da concessão. Obviamente, a redução no prazo entre a licitação e o início da geração de energia é fator determinante do custo da energia produzida. Dessa forma, prazos de 3 a 4 anos entre o início da construção e da geração tornaram-se regra geral.

Para participar dessa licitação, cada uma das empresas interessadas desenvolve suas próprias avaliações elaborando estudos de viabilidade avançados ou projetos básicos simplificados. Esses trabalhos podem ou não dispor de prazo satisfatório já que a data de licitação depende do planejamento da ANEEL para atendimento da demanda de energia elétrica.

Entretanto, depois de definido o vencedor da licitação, começa uma corrida contra o relógio, o que engloba o prazo para o projeto básico consolidado, para o projeto executivo e para a construção. Dessa forma, os prazos têm sido progressivamente reduzidos, em alguns casos chegando à metade daqueles que vinham sendo utilizados. Em consequência dessa redução, várias modificações foram necessárias, começando pela ampliação das equipes envolvidas no projeto.

Além de implicar maiores esforços de coordenação, a redução dos prazos acarretou mudanças na concepção e no desenvolvimento das investigações geológicas. Assim, anteriormente, na fase de projeto básico, métodos como os geofísicos eram usualmente aplicados depois de algum conhecimento do sítio por meio de sondagens diretas. Atualmente, já devem ser aplicados de início, concomitantemente com as sondagens diretas, pois, geralmente, não haverá tempo de executá-los mais tarde.

Em outras palavras, todas as necessidades de investigação devem ser antecipadas uma vez que as informações geológicas para ajustes no arranjo geral das obras e o adequado conhecimento do risco geológico devem estar disponíveis antes da licitação pela ANEEL. Por outro lado não há como exagerar no volume de investigações uma vez que os custos da investigação devem ser mantidos dentro de limites aceitáveis e da disponibilidade de prazo.

Informações sobre o tipo e as quantidades de investigações e estudos geológicos são encontradas no *Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas* (Eletrobras, 2007), nas *Instruções para estudos de viabilidade* (Eletrobras/DNAEE, 1997) e nas *Diretrizes para o projeto básico de usinas hidroelétricas* (Eletrobras/Aneel, 1999).

Cabe registrar que há empreendedores conscientes da importância das investigações geológicas e outros que relutam em alocar recursos para esses trabalhos. Em geral, os primeiros já tiveram alguma experiência desagradável com as condições geológicas e com o impacto financeiro da remediação. Os que não se importam desconhecem os riscos associados às condições geológicas, ou seja, não sabem que não sabem.

3 SELEÇÃO DE EIXOS DE BARRAGENS

A seleção de eixos de barragens para aproveitamentos hidroelétricos é geralmente feita na fase de inventário. A ELETROBRAS editou um manual, conhecido como Manual de Inventário, com os procedimentos para esta fase dos estudos (Eletrobras, 2007). A escolha dos sítios é feita, primeiramente, pelos estudos hidráulicos de divisão de queda, os quais procuram determinar a melhor posição dos possíveis eixos de barragem de forma a aproveitar toda ou a maior parte do desnível do rio. Como existe a possibilidade de variar a altura do barramento, dentro de certos limites, é possível reduzir a extensão do reservatório ou aproveitar uma queda natural (corredeiras ou cachoeiras) para a locação dos eixos. Assim, a locação final do eixo pode ser feita em um determinado trecho do rio em função das condições locais o que, usualmente, é tarefa dos estudos geológicos.

É preciso lembrar que, atualmente, a grande maioria dos estudos de inventário é realizada na

Amazônia, cujas limitações de dados cartográficos é bem conhecida, sendo raros os trechos com mapas topográficos de escala 1:100.000. Além disso, a densa floresta tropical, que domina na região, dificulta a interpretação de fotografias aéreas. Em fases mais avançadas dos estudos de inventário ficam disponíveis levantamentos cartográficos de escala 1: 10.000, em geral utilizando laser. Esses levantamentos aerotransportados são feitos com a emissão de um feixe de raios laser, considerando que a maior parte deles serão refletidos pela copa das árvores, mas, outra parte alcança a superfície do terreno, sendo utilizados. Esses levantamentos, apesar de apresentarem suas restrições, permitem desconsiderar a cobertura da floresta, a qual contribuiu para insucessos em barragens na Amazônia, como ocorreu com a UHE Balbina (Wittman & Bonilla, 2009).

A exatidão dos dados cartográficos deve ser verificada no início dos trabalhos efetuando-se trabalhos de validação dos dados incluindo levantamentos de campo e, principalmente, a verificação dos marcos de referência a serem utilizados. A experiência de estudos anteriores mostra que são frequentes as divergências entre esses marcos na região amazônica.

São muitas as condições que controlam a locação de um eixo de barragem, porém, a mais importante é a existência de ombreiras favoráveis, isso é, que permitam acomodar a altura prevista para a barragem. Ombreiras desfavoráveis são aquelas que apresentam fugas no reservatório, exigindo a construção de diques. Maciços rochosos com vazios e feições que permitam elevada percolação de água devem ser evitados por comprometerem a estanqueidade do eixo.

Em segundo lugar, estão as condições geológicas e geomecânicas do maciço rochoso. As barragens sempre necessitam de rochas duras para as fundações das estruturas de concreto, nomeadamente a casa de força e o vertedouro, além de, em alguns casos, da eclusa e outras obras. Assim, o eixo deve, se possível, apresentar rochas duras, usualmente reconhecidas por provocarem corredeiras e cachoeiras, numa extensão apropriada para as estruturas de concreto previstas. Obviamente, existem barragens com estruturas de concreto acomodadas sobre rochas brandas, sendo a mais conhecida delas a UHE

Curuá-Una, no Estado do Pará. Porém, o custo de construção é mais elevado e pode inviabilizar o aproveitamento.

Em seguida, aparecem outros fatores que afetam o custo das obras, tais como a extensão do eixo. Quanto mais curto, desde que seja possível acomodar as estruturas de concreto, mais interessante é o local. É também necessário que a região do eixo disponha de volumes adequados de materiais naturais de construção (solo, areia/cascalho e rocha) aproveitáveis. É possível britar a rocha para obter areia artificial, porém, além do custo mais elevado, podem ocorrer dificuldades com a trabalhabilidade do concreto, resultando em prazos mais longos. Já a disponibilidade de solo ou rocha, a distâncias superiores a 10 km do eixo, pode inviabilizar um aproveitamento, dependendo dos volumes requeridos.

O local deve ainda permitir acomodar o arranjo geral das obras, ou seja, a disposição das estruturas de concreto e demais obras da barragem. Atualmente, prefere-se que as estruturas de concreto fiquem dispostas na mesma margem, de forma a evitar a instalação de dois canteiros de

obras. Também pode ser mais conveniente, dependendo do comportamento do topo de rocha, substituir parte da barragem de terra por barragem de concreto compactado a rolo (CCR). Note-se que o CCR é mais caro do que a barragem de terra e exige fundação em rocha, porém, é mais rápido para ser construído e depende menos das condições climáticas.

Atualmente estão sendo utilizadas barragens de enrocamento com núcleo asfáltico, principalmente devido ao custo inferior. Da mesma forma que os plintos de concreto, é necessário fundação em rocha para o núcleo asfáltico,

De forma geral, devem ser preferidos os eixos com baixa cobertura de solo, ou seja, com topo de rocha dura na superfície ou próximo (Figura 5). Essa característica vai exigir maior escavação em rocha na casa de força, porém o material será utilizado como brita ou enrocamento, restringindo a abertura de pedreiras. Em contrapartida, o vertedouro e a área de montagem, que usualmente têm fundações rasas, não vão requerer concreto de enchimento e a barragem de terra pode ser substituída por CCR.



Figura 5 – Usina Hidrelétrica de Furnas com rocha aflorante, localizada no rio Grande, Minas Gerais.

Em rios com meandros encaixados, em formato de ferradura, como é comum no Sul, as estruturas da barragem podem ser construídas separadamente. Assim, a barragem é construída na perna montante da ferradura e a casa de força é

construída na perna jusante da ferradura (Figura 6). Além de facilitar a construção, pela separação das obras, há um ganho de desnível entre a barragem e a descarga da casa de força, em função do percurso do rio.



Figura 6 – Usina Hidrelétrica de Itá, localizada na divisa dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina aproveitando meandro em forma de ferradura. Fonte: Site da Secretaria de Turismo do Rio Grande do Sul - Setur (2011).

Nem todos esses fatores podem ser devidamente considerados, por ausência de informações, nas fases de inventário e viabilidade. Entretanto, cabe à Geologia de Engenharia participar ativamente da análise dos dados e propor os ajustes no arranjo geral das obras e na locação dos eixos.

Um programa de seleção de eixos para estudos de inventário inicia-se com a avaliação detalhada dos aspectos fisiográficos e geológicos, utilizando imagens (principalmente do Google Earth), mapas, fotografias aéreas e dados bibliográficos. Essas informações devem ser exaustivamente analisadas, elaborando-se, para cada local, uma ficha e croquis com todas as informações.

A seguir deve ser efetuado um reconhecimento por via aérea, utilizando avião leve de asa alta ou helicóptero, este com a desvantagem do abastecimento mais frequente. Em geral, nesse reconhecimento, além do geólogo, deve ir um engenheiro especializado em arranjo, geralmente em duplas, para permitir que um observe e o outro registre. A principal função do sobrevôo é identificar os trechos do rio mais favoráveis para a implantação dos aproveitamentos. Além disso, o reconhecimento aéreo é fundamental para a escolha de eixos, principalmente na região amazônica, sendo tarefa de rotina nos estudos de inventário. Neste sobrevôo são identificadas as feições topográficas e geológicas regionais e, se possível, definidos os eixos.

O planejamento do sobrevôo é fundamental para seu sucesso. Além de ajustar a rota e altitude a ser mantida, em conjunto com o piloto no início do sobrevôo, é necessário orientar o voo. Um dos geólogos, mais familiarizados com navegação, deve orientar o posicionamento da aeronave. Para o bom andamento dos trabalhos a equipe deve contar com equipamentos (câmera fotográfica, gravadores e GPS's) em duplicata.

Como resultado desse trabalho é indicado um local preliminar para o desenvolvimento dos estudos de campo. Para esses estudos é necessário um planejamento detalhado, cuja complexidade depende, principalmente, de aspectos logísticos. Assim, na Amazônia as condições de acesso, comunicação e alojamento são determinantes da velocidade dos trabalhos. Em outras regiões, com acesso mais fácil, o planejamento é menos complexo, já que alojamento, alimentação e meios de transporte estão disponíveis.

Os trabalhos de campo destinam-se a ajustar o posicionamento do eixo às condições locais efetivamente encontradas e a definir a disponibilidade de materiais naturais de construção. Para isso, um mapeamento geológico detalhado, apoiado por sondagens a trado, poços de inspeção e sondagens sísmicas de refração fornece os elementos preliminares sobre a posição do topo de rocha e do nível d'água, a distribuição das unidades e feições geológicas, tanto em superfície como em

subsuperfície e a disponibilidade de materiais naturais de construção.

Não raramente, um eixo com condições mais favoráveis pode ser encontrado com os trabalhos de campo dada à maior aderência à realidade fisográfica e geológica obtida com esses trabalhos. Essas adaptações ou alterações fazem parte do processo de seleção do eixo, sempre em busca da solução mais favorável.

O eixo do inventário pode ou não permanecer nas fases seguintes de estudos. Em geral, na fase pré-licitação, o empreendedor faz uma revisão da posição do eixo, considerando os mesmos fatores elencados e utilizando os mesmos procedimentos, isto é, sobrevôo e estudos de campo, porém contando com mais recursos de investigação e ensaios de campo, além de levantamentos topográficos e batimétricos.

Em síntese, o processo de estabelecimento de um eixo de barragem e seu respectivo arranjo é um processo de aproximações sucessivas, interativo e multidisciplinar no qual a Geologia de Engenharia tem papel fundamental.

4 INVESTIGAÇÕES

A redução do prazo para as investigações geológicas tornou ainda mais importante o mapeamento geológico-estrutural de detalhe da área do empreendimento. O mapeamento deve ser conduzido após um reconhecimento feito por um geólogo experiente e a elaboração de um manual de mapeamento contendo os critérios e a definição das unidades geológicas. O mapa geológico deve ser progressivamente atualizado à medida que novas informações fiquem disponíveis.

De forma geral, os métodos de investigação pouco evoluíram nessas últimas décadas. Alguns métodos, como os geofísicos (Souza, 2006) foram bastante aperfeiçoados pela utilização de instrumentos digitais, o que, por sua vez, permitiu melhorar o processamento dos dados e a interpretação de sondagens sísmicas em terra e subaquáticas, elétricas e outras. Alguns métodos de ensaio de campo, como o cone de penetração contínua (*deep sounding*) e o ensaio de cisalhamento *in situ* (*vane test*) também foram automatizados, facilitando a interpretação. As informações hidrogeológicas para maciços fissurados foram aperfeiçoadas com

os ensaios 3D que permitem avaliar a continuidade e intercomunicação das estruturas, o tensor de permeabilidade e a anisotropia da percolação (Tressoldi, 1991).

Nas sondagens diretas foi introduzida a perfuração mecanizada nas sondagens a percussão, com o emprego de trado oco (*hollow stem auger*) montado sobre caminhão (Figura 7). O sistema inclui um martelo com queda automática para a realização do ensaio SPT, reduzindo sensivelmente o tempo de execução da sondagem e do ensaio. Equipamentos de sondagens rotativas de alta produtividade, montados sobre esteiras também já existem. Esses equipamentos montados sobre plataformas móveis (caminhões, carretas de esteiras, etc) têm aplicação limitada à disponibilidade de acessos nem sempre podem ser utilizados nas fases iniciais dos estudos de barragens quando, em geral, os caminhos limitam-se às picadas estreitas.



Figura 7 - Equipamento de trado oco com martelo automático para ensaio SPT.

Mais recentemente tornaram-se disponíveis equipamentos digitais de televisamento de furos de sondagens em rocha, conhecidos como perfuração ótica (Figura 8). Esses equipamentos trabalham em furos abertos por sondagens rotativas ou por rotoperfuração, com perfuração pneumática. A perfuração com sondagens rotativas destina-se, principalmente, à aferição das imagens por comparação com os testemunhos (Figura 9). Para o televisamento, o furo deve ser previamente lavado para a limpeza das paredes.

As imagens são digitalizadas o que permite sua exibição em computador, apresentando um testemunho virtual ou desdobrado numa vista de

360° (Figura 10). Como são imagens digitais, as descontinuidades e outras feições podem ser identificadas e obtido o estereograma das diversas famílias de fraturas. A perfuração com rotoperfuração é muito rápida e o televisamento também, de forma

que, não havendo restrições, a operação completa de um furo de 30 a 50m (perfuração, lavagem e televisamento) pode ser concluída em dois dias, permitindo sua aplicação em investigações para a liberação de fundação na fase construtiva.



Figura 8 - Câmera para perfilagem ótica.
Fonte: Fundsolo - Mesa Redonda ABGE/ABMS (2011).



Figura 9 - Comparação entre testemunho virtual (a); imagem das paredes desdobrada em 360° (b) e testemunho convencional (c)
Fonte: Fundsolo - Mesa Redonda ABGE/ABMS (2011).

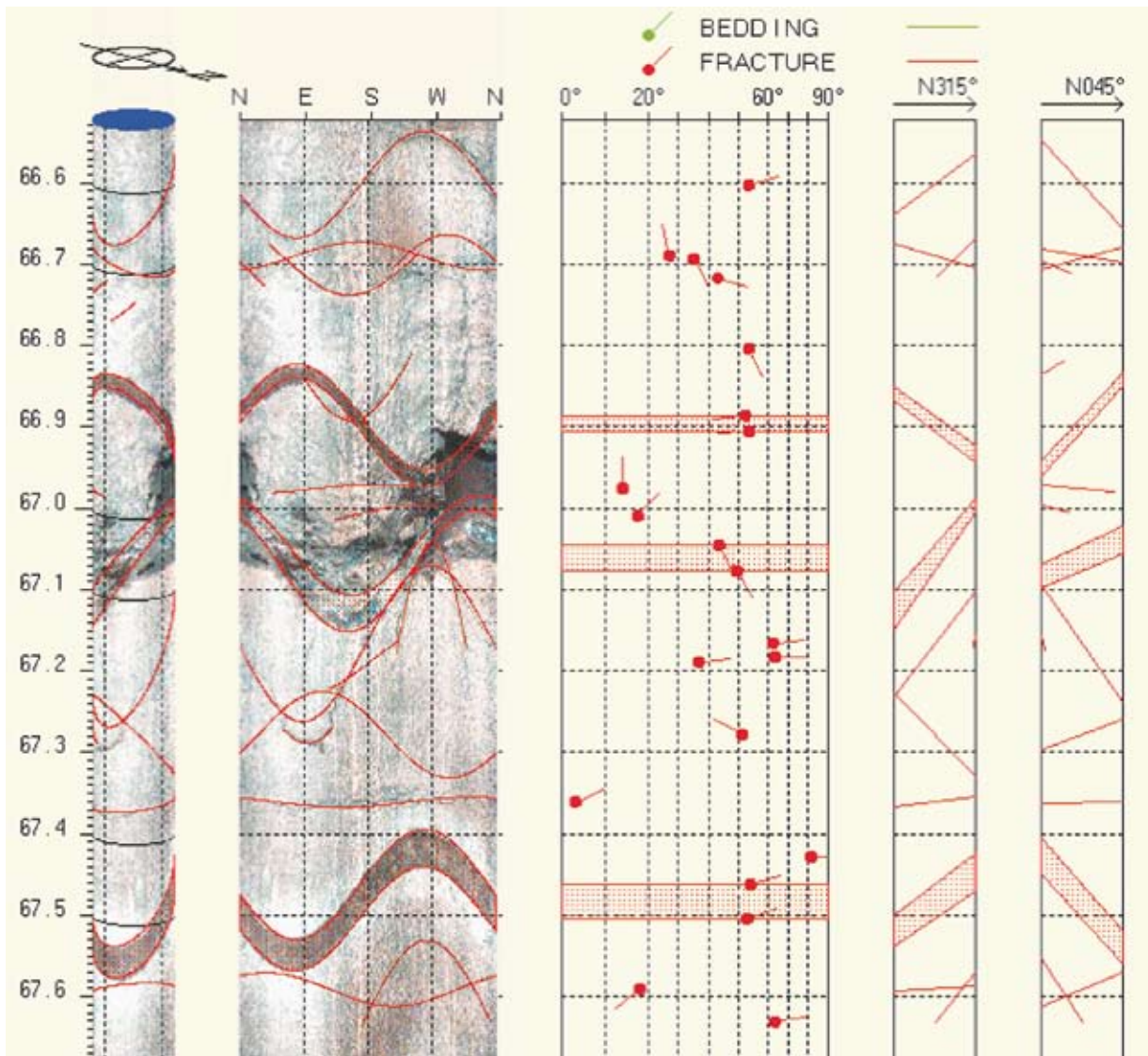


Figura 10 – Interpretação estrutural com o uso de softwares.
 Fonte: Fundsolo – Mesa Redonda ABGE/ABMS (2011).

Para a interpretação dos resultados devem ser definidos critérios específicos para a identificação das feições de interesse. As fraturas, falhas e contatos são claramente visíveis nas imagens e não apresentam dificuldades para a identificação, bastando sua atribuição a um dos sistemas ou famílias previamente identificados. Feições como vazios ao longo das fraturas podem ser atribuídas a preenchimentos de solo ou de rocha muito fragmentada, ambos capazes de ser removidos pela lavagem do furo com jato d' água sob pressão. Com o recurso de aproximação da imagem (*zoom*) é possível visualizar a textura da rocha e, em alguns casos, atribuir graus de alteração em função do descolorimento dos minerais.

A interpretação bem sucedida de imagens de televisamento digital requer a prévia identificação das feições usuais no maciço rochoso com auxílio de testemunhos obtidos em sondagens rotativas e dados dos mapeamentos da fundação. Para cada feição deverá ser definida uma sigla ou número para facilitar a identificação. Posteriormente, no escritório, a interpretação pode ser revista e preparado um relatório individual de sondagem. Segundo Baillot *et al.* (2004), as imagens podem ser utilizadas para a classificação do maciço rochoso.

Uma das principais limitações do televisamento digital é a limpeza do furo já que a água não pode estar afetada por turbidez. Caso as paredes do furo não sejam estáveis, o risco de prender

a câmera pode impedir a execução dos serviços de televisamento. O método também não se aplica a furos inclinados.

A grande vantagem do televisamento é a rapidez na obtenção das informações. Sua utilização no detalhamento de informações obtidas com sondagens rotativas convencionais torna-se muito útil, principalmente na fase de construção. Assim, por exemplo, se estiver previsto no plano de sondagens de uma casa de força, com 500m de extensão total, uma sondagem a cada 50m, as rotativas podem ser feitas a cada 100m e as rotoperfurações, com televisamento, nos intervalos. Trabalhando com três equipamentos de sondagens rotativas e considerando 40m de profundidade em cada sondagem, teríamos 440m o que demandaria cerca de 50 dias para conclusão dos trabalhos utilizando apenas sondagens rotativas. Com cinco sondagens, a rotoperfuração com televisamento, restariam apenas 240m de sondagens rotativas, o que seria feito em cerca de 30 dias. De forma geral, até 30% da metragem total de sondagens tem sido executada com rotoperfuração e televisamento, concentradas nas estruturas de concreto emersas.

O IPT dispõe de equipamento de perfilagem acústica que produz imagens digitais da parede do furo utilizando pulsos sônicos (Birelli *et al.*, 2004). O instrumento exige a presença de fluido na perfuração, que pode ser água turva ou lama bentonítica, porém a resolução é menor do que a da perfilagem ótica. Perfilagens com cáliber e raios gama podem ser conduzidas simultaneamente com a perfilagem acústica. Instrumentos similares estão sendo importados por outras empresas.

Porém, apesar dos avanços nos métodos de investigação, continua sendo necessário apresentar os dados obtidos de forma acessível para engenheiros e outros profissionais. Shaffner (2011) aponta, em seminário sobre o Projeto de Barragens para o Século 21, a necessidade de um conjunto de relatórios e desenhos, combinando dados geológicos e geotécnicos para a avaliação da segurança de barragens, apresentando vários exemplos de mapas e seções geológicas.

5 PLANOS DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA

A metragem de investigações por sondagens (a percussão e rotativas) aumentou consideravelmente nas últimas décadas. Contribuíram para isso, a maior conscientização dos empreendedores sobre os benefícios da investigação geológica (principalmente na redução do risco geológico), a maior abrangência dos planos de sondagem em função dos prazos mais reduzidos e a maior complexidade geológica dos sítios dos empreendimentos.

Para a elaboração de um plano de investigações, também conhecido como plano de sondagem, para uma usina hidroelétrica diversos fatores são considerados, dos quais o mais importante é a complexidade geológica da fundação. Um maciço de rocha dura, cristalina, constituído por um gnaisse com foliação incipiente, pode ser investigado com uma metragem menor de sondagens do que um maciço de metassedimentos, com foliação desenvolvida e várias famílias de fraturas. Se introduzirmos contatos e falhas, mais sondagens serão necessárias, principalmente se os afloramentos forem escassos.

Em segundo lugar, o plano de sondagens depende do arranjo do aproveitamento. As estruturas de concreto, mesmo de baixa altura, requerem sondagens mistas ou rotativas para sua adequada investigação. As barragens de terra e de enrocamento com núcleo argiloso, por sua vez, são usualmente investigadas com sondagens a percussão e algumas sondagens mistas. Barragens de enrocamento com face de concreto ou núcleo asfáltico necessitam de sondagens rotativas e mistas. Para a investigação de um eixo de barramento, essas sondagens devem ser distribuídas ao longo do eixo e em seções transversais de forma a abranger todas as estruturas do aproveitamento.

A metragem de sondagens para a investigação de uma barragem para geração de energia elétrica depende de vários fatores. Admitindo-se um aproveitamento com estruturas de concreto e barragens de terra em região de baixa complexidade geológica e na fase de estudo de viabilidade avançada ou projeto básico simplificado, a metragem de sondagens está indicada na Tabela 1.

Tabela 1 – Metragem de sondagens para estudos de viabilidade avançada.

VARIÁVEL	ESTRUTURAS DE CONCRETO (sondagens rotativas)	BARRAGENS DE TERRA (sondagens a percussão)
comprimento (m)	400	800
altura máxima (m)	50	55
espaçamento sondagens (m)	100	100
número de sondagens (un)	5	9
profundidade de sondagens (m) *1	40	30
metragem parcial	200	270
Acréscimos:		
seções transversais (m) *2	240	240
sondagens rotativas barragem de terra (m) *3	80	-
sondagens de reserva - 2 furos (m)	80	60
sondagem estratigráfica (m) *4	80	
metragem total	680	570
Notas:		
*1 – As sondagens devem penetrar no mínimo 10m abaixo da cota de fundação, se não existirem feições subhorizontais		
*2 – Três seções transversais nas estruturas de concreto e quatro nas barragens de terra, cada uma com duas sondagens		
*3 – Duas sondagens com 40m cada		
*4 – Uma sondagem com o dobro da profundidade das demais		

Além do tipo e características da barragem, diversos outros fatores devem ser considerados na formulação de um plano de investigações, entre os quais os maciços de fundação, o comportamento do topo de rocha, as condições hidrogeológicas e outras específicas do sítio e do arranjo geral.

Para uma região com alta complexidade geológica, a metragem de sondagens poderá ser acrescida de 50 a 70%. Nas *Instruções para estudos de viabilidade* (Eletrobras/DNAEE, 1997), recomenda-se um espaçamento entre sondagens de 50 a 100m ao longo do eixo. Essa variação contempla a complexidade geológica e os requisitos dos arranjos, sendo compatível com os dados da Tabela 1, baseada em eixos investigados.

Para a fase de projeto básico consolidado será necessário, aproximadamente, a mesma metragem utilizada na fase de viabilidade avançada, desde que o eixo permaneça no mesmo local.

Sendo a metragem de sondagens adequada nas fases anteriores, durante o projeto executivo

são necessárias apenas sondagens para detalhamento de feições localizadas, para a investigação de condições geológicas anteriormente não detectadas e para a liberação de fundações. Neste caso deve-se admitir uma metragem de 20% do total despendido nas fases anteriores de projeto.

Atualmente, com o desenvolvimento de desenhos de projetos com recursos tridimensionais (3D), um mapa com curvas de contorno do topo de rocha é essencial para a elaboração desses desenhos, o que pode exigir sondagens fora da área da barragem.

Para a elaboração desse mapa é necessário definir o topo de rocha dura (Figura 11), escavável somente com explosivo e, eventualmente, dependendo das características do maciço, o topo de rocha de escavação comum, sem uso de explosivos (equivalente à base do solo), resultando em dois mapas de contorno. Outros mapas de contorno podem ser necessários, por exemplo, para mostrar as condições geológicas na cota de fundação das estruturas de concreto.

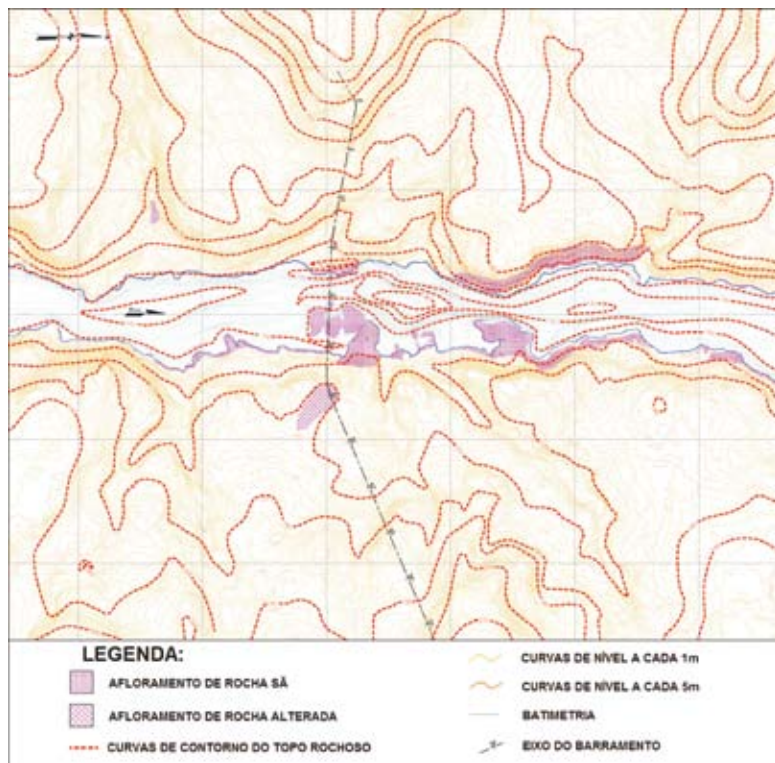


Figura 11 – Mapa de contorno do topo rochoso.

As condições de alteração e fraturamento usuais nos maciços rochosos, bem como os materiais de cobertura (solos residuais, aluviões, terraços e coluviões), obrigam à definição de tipos de materiais, usualmente conhecidas como unidades geológicas. Essas unidades resultam, no caso de

solos residuais e da rocha subjacente, da associação entre o tipo do material e seu respectivo horizonte de alteração. Para isso é necessário utilizar um perfil de intemperismo associado aos processos de escavação, conforme aquele indicado na Figura 12.

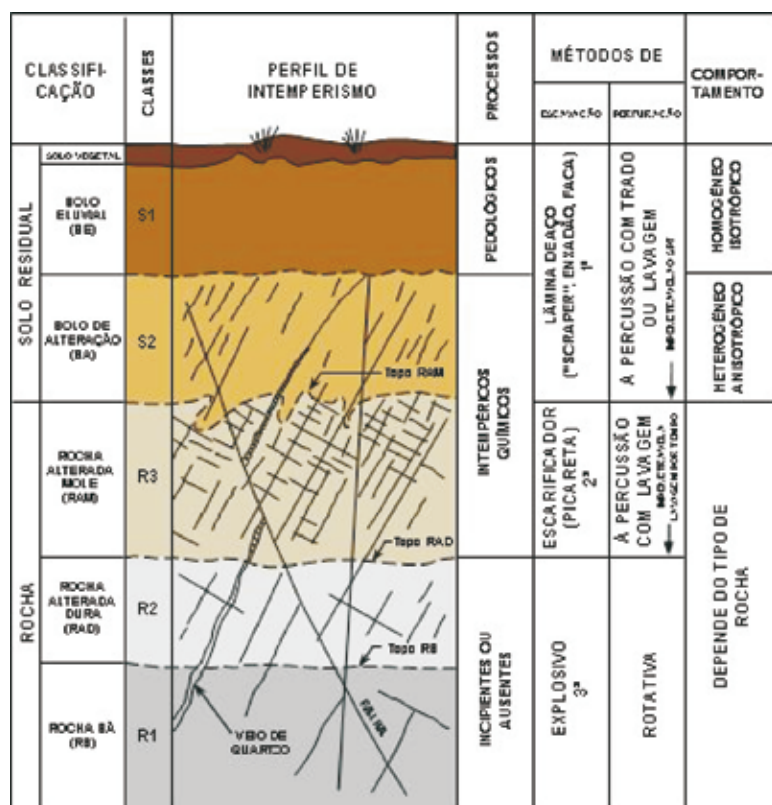


Figura 12 – Perfil de intemperismo para regiões tropicais. Fonte: Vaz (1996).

Tratando-se de um maciço granítico, por exemplo, as unidades geológicas seriam:

- S1Gr - solo eluvial de granito;
- S2Gr - solo de alteração de granito;
- R3Gr - granito alterado mole;
- R2Gr - granito alterado dura e
- R1Gr - granito são.

Os solos transportados são definidos por siglas, como nos exemplos abaixo:

- ALar - aluvião arenoso;
- ALag - aluvião argiloso;
- COag - coluvião argiloso.

Maiores informações sobre a definição de unidades geológicas podem ser encontradas no artigo *Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais* (Vaz, 1996).

Os critérios de classificação de sondagens devem ser definidos e registrados em relatório específico no início dos serviços. Se necessário, um treinamento em classificação deve ser oferecido aos geólogos responsáveis. Norbury (2010) discute detalhadamente a descrição de exposições e amostras de solo e rocha para fins de Geologia de Engenharia. Apesar de utilizar normas britânicas e européias, são apresentados procedimentos para a sistematização e codificação das descrições de materiais, alteração, descontinuidades e vários outros parâmetros geológico-geotécnicos.

De forma geral, o plano de investigações deve responder ou fornecer dados para as seguintes questões:

- i) posição do topo de rocha na área das estruturas de concreto considerando o topo de rocha dura (escavável a fogo) e o topo de rocha adequado para fundação;
- ii) distribuição em superfície das unidades e feições geológicas;
- iii) distribuição em subsuperfície das unidades geológicas, com suas espessuras definidas;
- iv) caracterização das estruturas com a identificação das famílias de fraturas e macro-estruturas;
- v) caracterização hidrogeológica das unidades e estruturas condicionantes da percolação;
- vi) caracterização geomecânica das unidades geológicas e estruturas que condicionam a esta-

bilidade das estruturas da barragem e a deformabilidade da fundação;

- vii) estudos e projetos de tratamentos de fundação das estruturas da barragem e instrumentação; e
- viii) disponibilidade e características dos materiais naturais de construção.

Essas informações devem atender não somente às necessidades do projeto das estruturas da barragem, mas também da determinação de volumes e quantitativos de serviços de construção.

Finalmente, a apresentação dos dados decorrentes dos estudos geológicos deve considerar sua utilização por diversos outros profissionais, os quais podem ou não estar familiarizados com os conhecimentos geológicos.

6 RISCO GEOLÓGICO

Antes de discutir os riscos geológicos é conveniente esclarecer a distinção entre imprevisto geológico e imprevisível. Diz-se como imprevisto uma feição conhecida, por exemplo, uma falha de empurrão, não detectada por deficiência da investigação ou da interpretação dos dados ou qualquer outra limitação. Imprevisível aplica-se a feições desconhecidas do meio técnico, situadas além do estado da arte. São situações muito mais raras, que podem ser exemplificadas pelo basalto de baixa densidade (“basalto leve”) encontrado, pela primeira vez, na casa de força da UHE Porto Primavera (Tressoldi *et al.*, 1986). Os imprevistos, entretanto, são muito mais comuns, em geral decorrentes de investigação insuficiente.

É também conveniente esclarecer a distinção entre incerteza geológica e risco geológico. A incerteza geológica é a parcela das condições geológicas que pode ficar oculta, mesmo após a aplicação de todos os recursos de investigação. Exemplificando, uma falha no maciço rochoso, coberta por coluviões, poderá não ser detectada, pois, caso a falha seja vertical, dificilmente será atravessada pelas sondagens, em geral também verticais. Neste caso, a falha somente será revelada quando a cobertura for removida, podendo ou não vir a se constituir em risco geológico.

O risco geológico está associado a condições geológicas conhecidas que podem afetar o sucesso (custo, prazo e segurança) da obra. Abrange, também, condições geológicas suspeitas ou não completamente avaliadas por insuficiência de dados. Exemplificando, um sistema de fraturas transversais ao rio, desde que paralelo às paredes de escavação da casa de força, dependendo do mergulho, pode afetar a estabilidade das paredes, requerendo tratamentos adicionais. Um exemplo de feição suspeita é a possibilidade de ocorrer uma camada de areia e blocos de rocha no fundo de “canalões”, dificultando a vedação de enseadeiras. Dificilmente a camada será detectada com sondagens devido às dificuldades de execução, mas há uma elevada probabilidade de sua ocorrência por tratar-se de rocha dura e existirem blocos de rocha na superfície.

No modelo anterior de construção de aproveitamentos hidroelétricos os eventos então conhecidos como *surpresas geológicas* eram suportados pelo proprietário da obra, o qual arcava com os custos decorrentes. Na época, as obras eram remuneradas por preços unitários aplicados às quantidades medidas, o que facilitava os ajustes de custos.

Com a mudança do setor elétrico e a necessidade de conhecer antecipadamente o custo da obra, os contratos com as empreiteiras passaram a ser por preço global, sendo as parcelas pagas por evento, conforme definido no cronograma de construção ou por medição, porém, respeitando o custo global ofertado. Essa mudança acarretou a entrada de novo *personagem* na construção dos aproveitamentos hidroelétricos, o risco geológico, ou mais especificamente, quem responde pelo custo de serem encontradas condições geológicas desfavoráveis não reveladas no projeto básico utilizado pelo empreiteiro para a composição de seu preço.

Em geral as construtoras são obrigadas, por dispositivo contratual, a contratar apólices de seguro para cobrir diversos riscos, entre os quais os chamados *riscos de engenharia*, nos quais se incluem os riscos geológicos. Entretanto, quanto

maiores ou mais indefinidos forem esses riscos, mais cara será a apólice.

As construtoras, por sua vez, majoram seus serviços e custos por fatores de contingência toda vez que uma determinada atividade não possa ser adequadamente prevista, seja em termos de quantidades ou de dificuldade de execução. Exemplificando, um desmonte subaquático pode ser convenientemente previsto e seu custo é conhecido, porém, a dificuldade para remover o material desmontado, em um “canalão” profundo, constitui-se em um risco geológico, pois dificilmente pode ser calculada. Dessa forma, é aplicado um acréscimo no preço de desmonte subaquático toda vez que estiver envolvida a escavação de um “canalão”.

As condições geológicas que mais frequentemente constituem riscos geológicos são:

- variação na posição do topo de rocha dura, alterando os volumes de escavação, principalmente aqueles que requerem explosivos;
- sistemas de fraturas capazes de afetar a estabilidade das paredes de escavação, requerendo tratamentos adicionais;
- fraturas abertas requerendo esforço adicional de tratamento com injeções;
- canalões e paleocanais preenchidos total ou parcialmente;
- feições geológicas capazes de afetar a estabilidade das estruturas e a deformabilidade da fundação;
- feições geológicas favoráveis ao desenvolvimento de processos de *piping* e
- insuficiência da investigação geológica.

A avaliação do risco geológico pode ser feita com distintos graus de detalhamento. O exemplo apresentado na Tabela 2 constitui um procedimento qualitativo baseado no conhecimento das condições geológicas e na experiência anterior. Contém, entretanto, todos os elementos necessários para aferir o risco geológico e adotar as medidas de contingência apropriadas.

Tabela 2 – Tabela simplificada de riscos geológico-geotécnicos.

REFE-RÊNCIA	DESCRIÇÃO DO CONDI-CIONANTE	PROCESSOS E EFEITOS ES-PERADOS	ESTRUTURAS DA BARRAGEM POSSIVELMEN-TE AFETADAS	RISCO QUALITA-TIVO	INTERVENÇÕES NECESSÁRIAS	MITIGAÇÃO
G1	Profundidade dos canais	Profundidade maior do que a prevista	Barragem de CCR	Alto	Aumento do volume de concreto utilizado na barragem e prazos	Aumento nos volumes de concreto na área dos canais e acréscimo do prazo de construção
G2	Camadas de areia com blocos de rocha e elevada condutividade hidráulica em canais	Erosão interna (<i>piping</i>)	Ensecadeiras	Médio	Aumento do volume de material utilizado na ensecadeira	Aumento nos volumes das ensecadeiras
G3	Jazidas de areia	Não encontradas	Concreto e filtros	Médio	Substituição por areia artificial.	Considerar uso de areia artificial.
G4	Suficiência das investigações	Adequada para estudos de viabilidade	Estruturas do arranjo	Baixo	Execução de investigações adicionais nas próximas fases	Programas de investigações
G5	Sobreescavação em rocha	Rocha muito fraturada	Taludes provisórios e finais	Baixo	Plano de fogo ajustado e fogo cuidadoso	Acréscimo do volume de concreto
G6	Reatividade do granito	Reação álcali-agregado	Estruturas de concreto	Baixo	Estudos de dosagem do concreto	Uso de cimento pozolânico com custo de transporte mais alto.
G7	Fraturas de alívio subhorizontais	Subpressões, recalques e instabilidade das estruturas	Barragem de CCR, vertedouro, muros e outras estruturas com fundações rasas	Baixo	Tratamento das fraturas com injeções e drenagem; sobreescavação ou chaveteamento da fundação	Aumento no volume de concreto de enchimento
G8	Áreas de empréstimo de solo	Ensaio insuficientes	Barragens e ensecadeiras construídas com solo	Baixo	Execução de investigações, estudos e ensaios	Ensaio e sondagens conforme programa de investigação
G9	Sismicidade	Aceleração horizontal elevada	Ensecadeiras, barragem, taludes de escavação	Baixo	Definição do coeficiente de aceleração sísmica	Dimensionamento das estruturas

Conforme exemplificado pela Tabela 2, a avaliação do risco geológico compreende as seguintes etapas, indicadas pelas diversas colunas da tabela:

- sigla de referência do risco;
- descrição do condicionante geológico responsável pelo risco;
- processos associados e efeitos esperados decorrentes do risco;
- estrutura da obra afetada pelo risco;
- avaliação qualitativa do risco (baixo, médio e alto);
- intervenções necessárias; e
- medidas mitigadoras dos efeitos do risco.

Dos itens acima requerem comentários específicos a avaliação do risco e a recomendação de medidas mitigadoras. Os demais itens são auto-explicativos pela leitura da Tabela 2.

A qualificação do risco depende da probabilidade de sua ocorrência e dos seus efeitos, ou seja,

do impacto no prazo, custo e segurança da obra. Essa avaliação é qualitativa atribuindo-se à qualificação de riscos baixo, médio ou alto. Devem ser ainda consideradas as características específicas da obra e das medidas mitigadoras, sendo mandatário o impacto na obra.

Assim, uma feição frequente, porém de baixo impacto, por exemplo, um sistema de fraturas com atitude desfavorável para a estabilidade das paredes de escavação pode ser considerado de baixo risco se o talude for de baixa altura. Esse mesmo sistema, num talude elevado, pode tornar-se de risco médio, caso a dificuldade com os trabalhos de contenção possa afetar o prazo previsto para tais serviços. Finalmente, se a condição da obra permitir que o sistema possa afetar a estabilidade de uma estrutura de concreto, o risco pode tornar-se alto.

Para a qualificação do risco e a recomendação de medidas mitigadoras, destinadas a reduzir ou

eliminar os efeitos das feições geológicas desfavoráveis, é necessária uma abordagem multidisciplinar com a participação de especialistas. Em outros casos, as medidas mitigadoras podem exigir consultas a empresas especializadas em métodos de tratamento.

7 CONCLUSÕES

A Geologia de Engenharia (GE) é uma atividade consolidada no estudo e construção de barragens. Contribuíram para essa consolidação os trabalhos de liberação de fundações, de seleção de eixos e da avaliação do risco geológico.

A evolução dessas áreas é distinta. A liberação de fundações é tarefa exclusiva da GE e sua evolução depende essencialmente da própria GE. A seleção de eixos depende da habilidade da GE em identificar a aderência dos arranjos às condições locais. Finalmente, a avaliação do risco geológico ainda tem muito a evoluir, não só na identificação dos riscos, mas também na busca de métodos de quantificação.

Agradecimentos

Agradecemos à geóloga, Dra. Marilda Tressoldi, pela revisão e comentários; e aos colegas, que forneceram dados sobre os equipamentos.

BIBLIOGRAFIA

- Baillet, R., Barton, N., Abrahão, R., Ribeiro Jr., A. 2004. Comparing 360° televising of drill holes walls with core logging. *In: Intern. Site Characterization Conf. ISC-2, ISSMGE, Porto, Portugal.*
- Birelli, C.A., Ferrari, M.A.D., Ciantelli Jr, C.A., Motta, C.E. 2004. Integração de perfilagens ótica, acústica e elétrica para fins de avaliação ambiental de aquíferos. *In: 1º Simp. Reg. Soc. Bras. Geof. SBGf. São Paulo.*
- Eletrobras/DNAEE 1997. Instruções para estudos de viabilidade. Eletrobras/Dnaee, Brasília.
- Eletrobras/Aneel 1999. Diretrizes para a elaboração de projetos básico de usina hidroelétrica. Eletrobras/Aneel, Brasília.
- Eletrobras 2007. Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas. Eletrobras, Brasília.
- Fundsolo 2011. Perfilagem ótica. *In: Mesa Redonda: Sondagens – Método, Procedimentos e Qualidade – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE) e Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). São Paulo, março 2011. Caderno, p.7.*
- Lei Nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/blei19958987.pdf>. Acessado em 24 jun 2011.
- Norbury, D. 2010. Soil and Rock Description in Engineering Practice. Whittles Publishing. Scotland, UK. 288pp.
- Revista Exame 2011. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/negocios/empresas/noticias>. Acessado em 17 jun 2011.
- Ruiz, M.D. 1963. Mecanismo de desagregação de rochas basálticas semi alteradas. *In: II Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Anais. vol 1, p.533-541.*
- SETUR - Secretaria de Turismo do Rio Grande do Sul 2011. Disponível em: <http://www.turismo.rs.gov.br/portal>. Acessado em 13 jun 2011.
- Shaffner, P.T. 2011. Geologic data and risk assessment; improving geologic thinking and products. 31st Annual USSD Conference - 21st Century Dam Design – Advances and adaptations. US Society on Dams. Disponível em: <http://ussdams.com/proceedings/2011Proc/545-570.pdf>. Acessado em 27 jun 2011.
- Souza, L.A.P. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 311p.
- Tressoldi, M., Guedes, M.G., Vaz, L.F. 1986. Ocorrências de basalto de baixa densidade na Usina de Porto Primavera e aspectos de interesse ao projeto. *In: II Simpósio Sul Americano de Mecânica de Rochas, Porto Alegre. Anais. Vol. II, p.238-251.*

Tressoldi, M. 1991. Uma contribuição à caracterização de maciços rochosos fraturados visando a proposição de modelos para fins hidrogeológicos e hidrogeotécnicos. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 291p.

Vaz, L.F. 1996. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais. *Solos e Rochas*, ABMS-ABGE, **19**:117-136.

Vaz, L.F. 1998. Os geólogos e a geologia de Engenharia na década de 60. *In: ABGE 30 anos*. ABGE, p.: 20-85.

Wittmann, D.; Bonilla, S.H. 2009. Determination of relevant environmental impacts and benefits caused by Balbina Hydropower at Amazon. *In: 2nd International Workshop in Advances in Cleaner Production*, São Paulo.

