

# DESAFIOS ATUAIS DO GEÓLOGO DE ENGENHARIA NO BRASIL

CURRENT CHALLENGES OF ENGINEERING GEOLOGIST IN BRAZIL

SÉRGIO NERTAN ALVES DE BRITO  
*Geólogo, Consultor.*

## 1 INTRODUÇÃO

Para discutir quais são os desafios que hoje enfrenta o Geólogo de Engenharia no Brasil é bom relembrar as suas funções fundamentais:

- prever de que maneira o comportamento natural de um maciço pode influenciar uma obra de engenharia;
- prever o comportamento do maciço natural diante das modificações impostas por uma obra de engenharia.

No primeiro caso, ele enfrenta o seu desafio profissional por excelência, como um homem das geociências e, portanto, habituado à análise dos fenômenos naturais. Como preocupação básica, ele centra suas considerações no entendimento da dinâmica dos maciços naturais, considerada simplificada como a maneira como eles alteram sua forma e/ou sua composição ao longo do tempo. Nesta tarefa, ele assume o papel do profissional responsável, mesmo que para exercê-la precise contar com a colaboração dos outros profissionais das geociências, cujo trabalho, entretanto, cabe a ele coordenar. Faz-se necessário apenas algumas adaptações nos seus métodos de estudo de modo a levar em conta a escala temporal bem mais diminuída que corresponde à vida de nossos projetos e um conhecimento de quais sejam as influências realmente pertinentes.

Existe um período de treinamento intenso no qual o geólogo tem contato com os projetos de en-

genharia de modo a visualizar a dependência que eles têm da natureza e de que maneira interagem com o meio natural, o que traz à tona o segundo campo de suas preocupações. Neste campo, ele tem contato com o engenheiro civil geotécnico, que, ao longo dos anos, vem desenvolvendo metodologias de análise do comportamento dos maciços naturais quando submetidos aos esforços impostos pelas obras de engenharia. Aqui, a responsabilidade profissional é por excelência do engenheiro civil, sendo o geólogo de engenharia um dos seus colaboradores imprescindíveis.

Ao participar ativamente da elaboração dos modelos representativos do maciço natural, o geólogo de engenharia tem contato com as técnicas de análise desenvolvidas pelos mecânicos dos solos e das rochas e descobre a grande ajuda que podem prestar no entendimento do comportamento dos maciços naturais. E o círculo se fecha.

A atividade profissional do geólogo de engenharia gora, portanto, em torno dessas três funções: trazer à engenharia o conhecimento da dinâmica dos maciços naturais, ajudar o engenheiro na modelagem desses maciços de maneira a poderem ser analisados pelas técnicas desenvolvidas pela engenharia e, finalmente, aplicar essas técnicas no conhecimento do comportamento dos maciços naturais.

Quando o Brasil iniciou sua fase de construção de grandes projetos nos anos 1960, o papel da geologia de engenharia já era reconhecido graças

ao trabalho pioneiro que havia sido desenvolvido individualmente por geólogos de várias partes do Brasil. Aquela época coincidiu também com o início da formação de geólogos brasileiros, e a engenharia teve que buscar seus primeiros colaboradores recém saídos da fornada das escolas de geologia brasileiras. Todos nós que iniciamos na Geologia de Engenharia nos primeiros anos da década de 1960, o fizemos como recém formados, e já começamos envolvidos diretamente com a responsabilidade dos grandes projetos. Muitos tiveram a chance de cursos de pós-graduação posteriormente, mas, naquele momento, só tínhamos a formação básica que nos deram nos bancos de escola. Fomos formados em Geologia de Engenharia pelo contato diário com a engenharia e seus problemas. Foi aí que deixamos a Fase Amadorística da GE<sup>1</sup> e iniciamos a Fase Profissional, quando as empresas de engenharia começaram a contratar geólogos para seus quadros. A formação do geólogo de engenharia foi feita principalmente pelo engenheiro e não por geólogos de engenharia mais experientes. Tivemos a sorte de já contar neste momento com uma instituição de pesquisas à frente de nossos conhecimentos, já preparada para desenvolver tecnologias e formar pessoal, e que foi o nosso primeiro suporte tecnológico. Rendo neste momento uma justa homenagem ao IPT de São Paulo, que forjou naquela época o mais brilhante grupo de geólogos de engenharia que nossa geração teve, hoje trabalhando nas mais diversas frentes.

Os recursos teóricos de que dispõe o geólogo de engenharia advém, portanto, de duas fontes principais: as geociências e a engenharia. Os primeiros compõem a sua formação básica, própria de qualquer geólogo, com o enfoque principal de que cabe neste caso principalmente definir a “fenomenologia natural”, o que abordaremos no capítulo 2. Muito do que se consegue hoje interpretar do comportamento dos materiais naturais foi possível graças a teorias desenvolvidas dentro da engenharia, basicamente sintetizadas na Mecânica dos Solos e das Rochas ou a Geomecânica, o que também estará visível no capítulo 2. Aqui se pode resumir o primeiro grande desafio com que se depara atualmente o geólogo de engenharia:

usar cada vez mais os recursos da Geomecânica no entendimento dos fenômenos naturais, aliados a seu conhecimento das geociências.

Desde o começo da geologia de engenharia, um conceito fundamental consistia em definir as feições geológicas importantes que deveriam ser investigadas nos estudos de engenharia. É uma constatação quase decepcionante quando lemos trabalhos que compõem o famoso Berkey Volume, *Application of Geology to Engineering Practice* (Paige, 1950), da Geological Society of America, que as principais feições geológicas importantes às obras de engenharia já eram conhecidas naquela época. Algumas feições novas foram determinadas após aquele período e algumas novas surpresas nos esperam no futuro, mas não é aí que se situa o nosso maior desafio.

Onde aconteceu a grande evolução da geologia de engenharia nas três décadas? Nieto (1977) mostra dois pontos fundamentais que gostaríamos de reforçar:

- O extraordinário desenvolvimento dos métodos de investigação. Este é um desafio permanente pois anda de braços dados com o próprio desenvolvimento tecnológico. Vamos abordar este ponto apenas superficialmente no capítulo 4. Cabe ainda comentar, entretanto com decepção, a fragilidade do sistema de pesquisas no Brasil que não tem permitido um desenvolvimento mais dinâmico de nossas técnicas de investigação ou sua distribuição no mercado. Constata-se a grande preocupação por parte de indivíduos, empresas privadas e mesmo institutos de pesquisas oficiais em reter para uso próprio, com únicos interesses comerciais, metodologias recentemente desenvolvidas e de grande interesse para a comunidade.
- O segundo ponto é a grande influência exercida pela Mecânica dos Solos e Mecânica das Rochas na geologia de engenharia. O grande avanço observado na caracterização dos maciços rochosos observado nos últimos anos se deu ao melhor conhecimento que hoje se tem das características geológicas que influenciam as propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço. Este ponto abordaremos em maior detalhe no item 3.

1 Geologia de Engenharia

Mesmo já conhecendo as principais feições geológicas que são importantes na engenharia, o geólogo de engenharia não pode esquecer que estamos diante de um universo que em geral apresenta uma grande probabilidade de surpresas e imprevistos. Nenhum exemplo é mais elucidativo do que o dos basaltos, a rocha sobre a qual se construiu a maior experiência em projetos de barragem no Brasil. Mesmo assim, a cada ano, somos surpreendidos por feições novas, algumas delas apresentadas neste congresso.

Stapledon (1976), ao analisar vários casos históricos de barragens onde ocorreram acidentes devido a causas geológicas (levantamento até 1965) mostrou que mais da metade das rupturas puderam de certa forma ser relacionadas a essas causas. A análise de dez casos mais conhecidos levou-o a concluir que os fatores tecnológicos que contribuíram para tais rupturas foram (apenas aqueles que interessam ao geólogo de engenharia):

- 1º) atingiu-se o limite do estado da arte  
.....6 casos;
- 2º) falta de conhecimento de engenharia por parte do geólogo  
.....4 casos;
- 3º) a informação geológica foi incorreta ou insuficiente  
.....3 casos;
- 4º) investigação inadequada de subsuperfície  
.....2 casos;
- 5º) linguagem geológica não entendida pelos engenheiros  
.....1 caso.

Este levantamento, se bem que um tanto defasado no tempo, é ainda muito válido e realça várias questões que procuraremos abordar neste trabalho.

## 2 O CONHECIMENTO DA FENOMENOLOGIA NATURAL

Entender de que maneira se processam os fenômenos naturais é a chave para equacionar e

seu inter-relacionamento com as obras de engenharia. O que caracteriza este entendimento é a participação de um grande número de profissionais cujos conhecimentos se somam para a tarefa comum. É uma atividade essencialmente multidisciplinar. Dela têm participado os próprios engenheiros geotécnicos, que forneceram as bases teóricas pelas quais os processos de erosão e de ruptura pudessem ser entendidos, mesmo que ainda parcialmente.

Várias áreas de interesse para a geologia de engenharia ainda exigem grande quantidade de pesquisa e formam um grande elenco de desafios para o geólogo de engenharia. Vamos comentar algumas delas.

### 2.1 Origem e Evolução dos Solos

A origem dos solos pelo enfoque puramente geológico levou-nos a esbarrar em problemas inexplicáveis e quase insolúveis pelos processos físicos e químicos. Estes perdem inteiramente a importância diante da imensurável atividade processada pelos seres vivos, principalmente os animais, o que só veio adquirir importância adequada quando do surgimento dos famosos canais da barragem de Tucuruí.

Em 1972, o geólogo americano Vernin Hurst, da Universidade de Georgia, que dava um curso de mapeamento os saprólitos para a CPRM em Belo Horizonte, visitou as obras da barragem de São Simão, a convite da CEMIG. Examinou os solos coluvionares de espessura de 3 a 5 m que cobriam espessos depósitos de cascalho também coluvionares. O aspecto grumoso do solo, em que partículas silto-argilosas formavam aglomerados de tamanho de areia, dava ao solo uma baixa densidade in situ, que localmente atingia valores de  $\gamma_s = 1 \text{ g/cm}^3$ . Não tínhamos na ocasião uma explicação aceitável para a origem do solo. Hurst foi enfático e categórico: a estrutura de solo coluvionar era devida ao intenso trabalhamento do mesmo pelos animais que o habitam. Como exemplo, citou dados da Geórgia: 20 toneladas de solo por acre/ano passam através do trato digestivo dos vermes; para uma camada de 3 m, em 800 anos, todo o solo seria digerido pelo vermes. Foi a pri-

meira vez que tive contato com este efeito na escala gigantesca dos nossos solos.

Entretanto, somente em 1984, voltei a ter contato pessoal com a intensa ação animal em nossos solos ao examinar os canalículos e cavidades encontradas nas fundações dos diques da barragem de Samuel, em Rondônia, em construção pela Eletronorte. A ocorrência mais generalizada de canalículos em Samuel se deve aos Minhocoçus. Esta minhoca de grande porte (atinge 40 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro) deixou evidências de sua atividade em todos os solos de Samuel, em vários estágios de preservação. Assim é que canalículos atuais, com o animal em pela atividade, são encontrados lado a lado com canalículos inteiramente preenchidos por solo ainda fofo e outros preenchidos por material endurecido por hidróxido de ferro. É de se esperar que a atividade dos minhocoçus venha ocorrendo há longo tempo em Samuel

Chama a atenção a grande dimensão dos cones de material fecal observados sobre os canalículos à superfície, que chegam a atingir 5 cm de base por outros de altura, o que evidencia a grande quantidade de solo que este animal pode trazer de profundidade à superfície do terreno. Observações feitas durante a pesquisa mostraram que o número de bolos fecais formados por mês em 10 quadrados de 3 x 3 m variam durante o ano de 3 a 40, num total médio de cerca de 26 por área de 9 m<sup>2</sup>. Se admitirmos o volume de cada bolo de 30 cm<sup>3</sup>, o que é comum, é fácil calcular que o volume de solo trazido só por este animal à superfície é de 1 cm por século.

De Heinzelin (1955, citado por Tricart e Cailleux, 1965) avaliou que o volume de terra revolvido pelos cupins pode atingir cerca de 1 m por 1.000 anos. Os canalículos de minhocoçus são facilmente identificados por serem muito uniformes, com diâmetro regular, subverticais, sempre tubulares, e apresentam frequência de ocorrência de várias dezenas por metro quadrado. Entretanto, uma grande variedade de outros canalículos e cavidades, de dimensões das mais variadas, é observada em Samuel. A mais espetacular e impressionante observação desses canalículos pôde ser feita durante o bombeamento das trincheiras de investigação feitas na fundação do dique na margem direita, sob o lençol freático. O afluxo de

água pelas paredes, incluindo jorros equivalentes a tubulações de 2" a 4" realçou o porte, a continuidade e a importância das cavidades no horizonte de solo aluvionar abaixo do chamado coluvião. A porosidade desse horizonte é absurda. Existem canalículos de pequenas dimensões, só observados com o uso de lupas de 10 a 20 vezes de aumento, e que praticamente ocorrem em todo o solo, com origem animal clara. Canalículos regulares de minhocoçu, subverticais, são vistos em todos os locais das trincheiras. Canalículos e cavidades de forma variável, numa distribuição espacial irregular, intercomunicantes e com continuidade lateral enorme, demonstrada pelo fluxo de água, forma a feição mais impressionante do solo.

A origem animal de alguns canalículos de Samuel já foi realçada por Machado (1983) e Buck (1984), respectivamente, responsabilizando as térmitas e os minhocoçus. Formigas são, entretanto, os insetos atualmente mais comuns nos solos de Samuel, e são vistos em todos os tipos de solo e em todos os locais, e negar-lhes a importância que têm na atividade de transformação recente, e mesmo passada, do horizonte superficial do solo é um tanto injusto.

Estruturas semelhantes a estas, em forma e dimensões, já foram observadas pelo autor em solos recentes, mesmo fora da Amazônia. Sua origem animal é reconhecida e facilmente observada. Cupins, formigas e minhocas, e um número ainda maior de pequenos animais, compõem uma fauna que povoa a camada superficial do solo, em qualquer região do Brasil, e são os maiores responsáveis pela sua total desagregação, uniformização de textura e grande parte da sua alteração química. A intensidade deste processo na Amazônia, debaixo de proteção da floresta, é muito maior. É reconhecido o papel vital que tais animais têm na reincorporação ao solo dos elementos nutrientes que se encontram nos vegetais mortos que se acumulam sob a mata. Em solos tão pobres como os amazônicos, estes processos têm que suprir, com sua intensidade, as deficiências próprias de um solo basicamente estéril.

Mesmo ocorrendo em qualquer tipo de solo e região, a ação animal deixa marcas mais permanentes nos solos da Amazônia em virtude dos processos de ferruginização por que passam os solos desta região. Os solos observados nas trin-



cheiras possuíam em “esqueleto” endurecido nas suas fases de ressecamento que permitia a “estabilização” das cavidades, mesmo de grandes dimensões. Este é o fator que não é observado nos solos das regiões sul e sudeste, onde se construiu a nossa maior experiência barrageira. Mas a atividade animal nestes solos também existe e vem sendo cada vez mais notada, após a experiência das obras na Amazônia.

A hipótese que formulamos para explicar a origem do horizonte superficial extremamente poroso, mesmo em superfícies muito horizontais, como um aluvião, é uma intensa ação animal capaz de abrir canalículos e cavidades, revolver o solo e mesmo carregá-lo até a superfície, deixando no lugar um solo de elevadíssima porosidade. A desagregação superficial do solo e a disposição de grande quantidade de solo trazida de profundidades maiores pelos animais, misturada à matéria orgânica disponível, dá origem à camada superficial de solo orgânico.

## 2.2 Mecanismos de Movimentação de Encostas

A cada período chuvoso, a sociedade se choca com os inúmeros escorregamentos ocorridos nas nossas cidades e estradas, alguns de registros trágicos, com perdas de dezenas de vidas. Este permanece como um dos grandes desafios ao geólogo de engenharia: a previsão do comportamento das encostas naturais e aquelas ocupadas pelo homem.

O enfoque central do estudo tem que considerar que este é um processo natural de desenvolvimento das paisagens e é desta forma que tem que ser entendido: as rochas desagregadas física e/ou quimicamente nos pontos altos da topografia são trazidas para os pontos baixos por ação primeiro da gravidade obviamente, mas com uma ajuda quase inseparável da água. Seja em partículas individuais, seja em grandes massas de consistência variável de sólido a quase líquido, os solos e rochas têm uma tendência incontrolável a descer as encostas em velocidades das mais variáveis.

No período chuvoso de janeiro de 1979, uma série de deslizamentos em encostas e aterros ocorreu na BR-262, no trecho Belo Horizonte-Monlevade, e foram objeto de estudos para projetos de

recuperação. Uma questão intrigante, que durante os estudos chamou a atenção, foi a capacidade que se teria de previsão de acidentes como aqueles.

Dentre os oito casos analisados, quatro chamaram a atenção por se tratarem de aterros (apenas um corte) de pequena altura (de 5 a 10 m), em encostas muito suaves e com grande extensão da área danificada.

Nos três casos em aterro, houve total ruptura do pavimento, com a formação de uma série de degraus mantendo-se as superfícies dos mesmos ligeiramente horizontais, não tendo havido rotação perceptível dos blocos rompidos. Os deslocamentos verticais entre degraus contíguos eram de cerca de 1 m e no total de 3 a 4 m. O deslocamento horizontal era mais acentuado, tendo atingido 10 m.

Durante a inspeção de campo, um ponto ficou realçado de imediato. Não se observava nenhum abaulamento do pé do aterro, isto é, o volume deslocado no escorregamento não foi “expulso” junto ao pé. Não se tratava, portanto, de escorregamentos rotacionais comuns. A impressão que se tinha é que havia ocorrido um “espalhamento” do aterro. A inspeção da encosta natural abaixo dos aterros mostrou uma série de rachaduras que evidenciaram sua movimentação em áreas que atingiram de 60 a 200 m, a partir da saia do aterro.

No km 82, o corte original tinha no máximo 10 m de altura, tendo sofrido deslizamentos generalizados com grande surgência de água e estufamento do pavimento da estrada por levantamento generalizado de cerca de 0,50 a 1,0 m, numa extensão de 100 m. Rachaduras recentes foram observadas a 180 m do corte, encosta acima.

Em todos os casos, as encostas são bastante suaves (5° a 15°). Não havia dúvida de que toda a encosta estava envolvida no escorregamento e deu exame cuidadoso mostrou degraus que levavam a suspeitar da ocorrência de escorregamentos antigos. Tudo indicava que as encostas haviam se movimentado, levando consigo os aterros, e não o contrário.

Todos os locais se situam em região de gnaisses mas não há rocha envolvida nos fenômenos (apenas blocos), ocorrendo em todos os casos um coluvião argiloso vermelho (com ou sem blocos) de espessura variável, mas em média de 5 a 10 m, sobre o solo residual de gnaisses. Os escorre-

gamentos ocorriam sistematicamente no contato entre os dois solos, ou dentro do coluvião.

Em todos os locais, o coluvião era formado em bacias convexas, portanto, coletoras de água tanto superficial como subterrânea, e tinha grande extensão. Inúmeras minas de água surgiam no material escorregado, e em alguns ocorria argila orgânica associada ao coluvião e que também condicionava o escorregamento.

Os solos porosos coluvionares são particularmente sensíveis ao efeito da saturação na diminuição de sua resistência e a submersão é bastante comum devido à ascensão do NA no terreno. É fácil observar que o NA tende a subir de maneira mais crítica na parte inferior de inclinação suave, que na parte superior côncava de forte declividade.

As linhas de percolação também se estabelecem de maneira mais desfavorável na zona inferior, paralelamente à superfície, dando origem a forças de percolação na direção mais crítica. Essas forças de percolação afetam bastante o fator de segurança destes taludes, apesar da sua pequena inclinação.

O que é importante observar é que a velocidade de rastejo do solo, influenciada pela inclinação da encosta e pela incidência da água, varia bastante ao longo de uma mesma encosta, em função da ascensão do NA, da direção do fluxo subterrâneo e do tipo de solo predominante. É de se esperar, portanto, “descontinuidades” no movimento ao longo da encosta, e grandes variações durante a história geológica de encostas, levando a rupturas locais.

Guidicini e Iwasa (1976) procuraram correlacionar escorregamentos e pluviosidade em nove áreas brasileiras, todas caracterizadas como de clima tropical úmido, mas com pluviosidades médias anuais diferentes.

A pluviosidade média anual da área da BR-262 em questão é 1.366 mm, comparável àquela da Serra das Araras e do Sul de Minas, estudadas por Guidicini e Iwasa.

A influência das chuvas foi analisada pelos autores citados com base na chuva que ocasionou o escorregamento e na quantidade de chuva acumulada no ciclo anual até o dia do acidente

$C_c$  (coeficiente de ciclo) = precipitação até o acidente / média anual

Se plotarmos a curva de  $C_c$  acumulado para a área de BR-262, no gráfico dos autores, notamos claramente que de janeiro em diante ela já atinge a zona de 100% de correspondência de chuva com escorregamento, mas o coeficiente do ciclo até dezembro é inteiramente normal, o que impede o uso do gráfico na previsão dos eventos.

A análise da precipitação do episódio de chuva correspondente ao escorregamento não pôde ser feita neste caso por ser impossível datar os acidentes, como também por terem quase todos ocorridos gradativamente ao longo de vários dias. Consideramos por este motivo que os acidentes ocorreram próximo ao final do mês de janeiro de 1979, quando a estrada foi interrompida.

Só para efeito comparativo, entretanto, é bom frisar que Guidicini e Iwasa descobriram que sempre que ocorrem chuvas de intensidade de 12% a 18% de média anual, inevitavelmente ocorrem escorregamentos. Não foram analisados os pluviogramas da área da BR-262, mas no período de chuva analisado, em média pode-se considerar que a precipitação diária máxima de novembro a março foi de 70 mm, variando de 18 a 250 mm. Assim, episódios isolados podem ter ocorrido na área e que por si só podem ter desencadeado escorregamentos.

Verifica-se no gráfico de pluviosidade acumulada para o período 1978 - 1979 que o período de chuva era absolutamente normal até fins de dezembro, sendo que em janeiro e fevereiro é que o gradiente de chuva aumentou de maneira anormal. Detalhando essa parte do ciclo com os registros diários, nota-se que, de 18 de janeiro a 10 de fevereiro, choveu ininterruptamente a um ritmo médio de 55 mm por dia, período esse que coincide inteiramente com o período crítico dos deslizamentos. Guidicini e Iwasa (op.cit.) já haviam chamado atenção para esse aumento do gradiente de pluviosidade nos dias anteriores aos escorregamentos e já reconheceram na ocasião o pequeno significado do fato na previsão desses acontecimentos.

No caso da BR-262, trecho BH-Monlevade, tudo indica que os deslizamentos estão relacionados ao elevado gradiente de pluviosidade no período de 18 de janeiro a 10 de fevereiro, o que torna impossível concluir pela sua previsibilidade. Conclui-se que acidentes desse tipo ocorrem

devido a condições morfológicas de terreno já conhecidas ou analisáveis, com os recursos que se dispõem em geologia de engenharia e geotecnia.

Parece ser possível correlacionar com boa precisão os episódios de chuvas com os escorregamentos, mas previsões desses escorregamentos com antecedência suficiente parecem impossíveis em casos semelhantes ao descrito neste trabalho. Novas tentativas de correlação entre chuvas e escorregamentos foram feitas posteriormente e uma delas é a publicada nos anais deste Congresso (Tatizana e outros, 1987).

Os autores concluíram que a acumulada de 4 dias de chuva anterior ao escorregamento foi considerada como efetiva no processo de escorregamento, sendo responsável pela preparação do terreno para fenômenos de instabilização, ao passo que as precipitações de curta duração (horárias) podem estar associadas a fenômenos de desenvolvimento instantâneo que podem funcionar como detonantes do processo de escorregamento. Não estamos convencidos de que a “acumulada de 4 dias”, segundo os dados dos autores, apresente qualquer indício de correlação com os acidentes melhor do que a de 2, 3 e 8 dias. Aliás, a dispersão observada é absurda em qualquer dos gráficos.

Entretanto, o que vale a pena insistir, o que é reconhecido pelos autores, é que os estudos têm validade para uma dada conformação geomorfológica, o que não foi considerado. O segundo ponto, referente à previsibilidade, é tratado pelos autores como base no CPC (Coeficiente de Precipitação Crítica), que depende da intensidade horária da chuva do episódio e da acumulada de 4 dias, o que, de novo, tem pouco valor na previsão do fenômeno.

O estudo das correlações de chuvas com escorregamentos têm grande valor no entendimento da fenomenologia, mas só pode ser usado em avaliação de predisposição regional, se associados ao conhecimento da evolução morfológica da área.

Várias outras questões associadas ao comportamento das encostas precisam ser melhor abordadas, sendo que uma delas também foi tratada neste Congresso por Carvalho e Wolle (1987) sobre o fluxo d'água em solos insaturados.

Outro ponto que não pode ser menosprezado se refere ao efeito das vibrações causadas pelas trovoadas, já várias vezes mencionado, mas que

têm sido consideradas com certo desprezo. Na região de Salto Grande - MG, vários moradores insistiram que “terremotos” foram sentidos simultaneamente com grandes escorregamentos, não se conhecendo qualquer registro dos mesmos. Lopes (1987), em trabalho apresentado a este Congresso, volta a mencionar a questão relacionada ao abatimento das fundações em Terra Roxa, no Paraná.

O fato é que solos de estruturas muito instáveis, como alguns dos nossos coluviões, quando saturados, podem sofrer um processo de liquefação, que é como se assemelham vários dos escorregamentos de encostas no Brasil.

Há pouco tempo, participamos do estudo da ruptura de uma barragem de rejeitos cujo mecanismo de desencadeamento da liquefação foi quase certamente a vibração causada por 3 caminhões estacionados simultaneamente em sua crista.

Acredito que a geomorfologia pode dar uma grande ajuda aos geólogos de engenharia no entendimento dos fenômenos de estabilidade de encostas, sendo mesmo o grande caminho a ser seguido nesta fase.

### 2.3 Deformações de Paredes e Fundos de Vales

A presença de algumas juntas horizontais abaixo do leito do rio na barragem de Foz do Areia foi mencionada por Marques Filho e outros (1978), mas uma tentativa para sua explicação só foi apresentada posteriormente (Marques Filho e outros, 1981).

Citam os autores a existência no leito do rio, constituído de basalto denso, de “uma série de zonas fraturadas e alteradas mergulhando suavemente no sentido das duas margens (20° a 25°, em ambos os sentidos) e reduzindo-se a uma única zona subhorizontal em direção à ombreira esquerda. Na terceira dimensão, estas zonas mostram um pequeno mergulho para jusante, com os horizontes mais superficiais aflorando na área do plinto e aprofundando-se no sentido do fluxo do rio”. Ao explicar o fenômeno, os autores consideram a existência de tensões horizontais, porém apenas atuando como tensões principais maiores após a remoção ou diminuição das cargas verticais pela erosão.

As feições de Itaipu foram detalhadamente descritas por Paes de Barros e Guidicini (1981), com comparações com as descobertas de Foz do Areia. Os autores realçam a presença, no interior de quase todos os derrames, de descontinuidades de amplo desenvolvimento lateral. Trata-se de feições subhorizontais, de andamento subparalelo ao topo e base dos derrames, que podem variar, em aspecto, desde a simples junta com abertura milimétrica e faces constituídas por rocha sã, ou pacotes de rocha fortemente fraturada e alterada, com espessura da ordem de um a dois metros, até caixas de material argiloso com algumas dezenas de centímetros de espessura". "Fato importante é a verificação que tais descontinuidades apresentam com frequência sinais de movimentação relativa das faces, isto é, observa-se que, ao longo de algumas dessas feições, a porção do maciço a elas sobrepostas se deslocou em relação à porção sotoposta. Tanto a quantidade do deslocamento como seu rumo são variáveis, dependendo da descontinuidade que estiver sendo enfocada e da ombreira em questão. Vale, entretanto, a norma de que os movimentos das porções sobrepostas às descontinuidades convergem para o centro do vale... tendo sido observados movimentos de 37 cm".

Os autores explicam tais casos como devidos aos deslocamentos de fundos de vale causados pelo alívio das tensões durante a erosão, usando o modelo exposto por Patton e Hendron (1974) que se aplicava entretanto apenas a rochas sedimentares. Admitem a pré-existência de juntas subhorizontais na rocha que foram deslocadas pelo processo de abertura do vale.

Um caso interessante foi observado pelo autor em 1986 durante a construção da barragem do rio Mando, a 40 km de Belo Horizonte, para abastecimento de água da capital mineira.

A geologia local é constituída de xistos do Grupo Nova Lima, com xistosidade vertical e paralela ao eixo da barragem, estrutura esta considerada obviamente muito favorável. Durante as investigações, o único problema descoberto foram as perdas d'água elevadas no contato do horizonte intemperizado com a rocha sã, que praticamente coincidia com o nível do rio, devido ao espesso pacote intemperizado. Este ponto também constitui uma anomalia de monta.

Uma grande cavidade, com dimensão maior da ordem de 5 m, foi descoberta durante o início da escavação em rocha para o canal de desvio. Não foi possível observá-la integralmente pois a mesma já havia desabado e sido parcialmente escavada quando da nossa inspeção. A parte remanescente da cavidade forneceu-nos entretanto uma observação adequada da ocorrência dando bons indícios de sua origem.

A cavidade foi descoberta no promontório de rocha que representa o ponto mais alto da rocha na escavação, ocorrendo pouco abaixo do contato solo-rocha. O xisto apresenta-se com sua xistosidade muito desenvolvida, subvertical, sendo o fraturamento, na zona da cavidade, muito intenso (F3 a F4) e a decomposição variável, predominando a rocha pouco decomposta (D2) mas com inúmeras zonas muito decompostas (D3 e D4). As feições geológicas que mais chamam a atenção são as fraturas subhorizontais de grande extensão e muito abertas. Ocorre uma laje de rocha relativamente maciça e sã, com 1 a 2 m de espessura, no topo do promontório, praticamente isolada da rocha. O exame cuidadoso das fraturas horizontais mostra que houve acentuado deslocamento em direção ao rio e lateralmente, denunciado pela grande quantidade de superfícies estriadas e espelhadas, e pelo tombamento de blocos de xisto que são encontrados com a xistosidade horizontal, entre a laje superior e a rocha inferior, ambos com a xistosidade vertical. Acredita-se que o movimento horizontal foi de, no mínimo, 0,5 m, podendo mesmo ter ultrapassado 1 m. Tais deslocamentos criaram uma grande quantidade de vazios na rocha que foram localmente alargados pela remoção do material fragmentado e intemperizado. Parece-me ser esta a origem mais plausível para as cavidades observadas, não havendo nenhuma evidência de dissolução nas paredes remanescentes.

Esta origem para as cavidades fica reforçada quando se observa a existência de inúmeras outras zonas fraturadas da rocha, em tudo semelhante à principal, mas em menores dimensões. No pé do talude do corte em solo, uma destas zonas foi parcialmente limpa e mostrou as fraturas horizontais abertas até 5 cm, e aparentemente com grande extensão para dentro da ombreira.



A relação das cavidades com a abertura das juntas subhorizontais do topo da rocha, criando zonas fragmentadas, intemperizadas e posteriormente erodidas pela água de percolação parece clara.

Deslocamentos em direção ao rio das paredes de seus vales, em rochas sedimentares horizontais, têm sido observados frequentemente e são relacionados ao alívio das tensões horizontais produzido pelo desconfinamento lateral durante o entalhe do vale pela erosão.

Os movimentos de encosta que ocorreram na região da Barragem de Manso em tempo geológico recente se deram ao longo de planos de fraturas tectônicas pré-existentes, caracterizando-se pela movimentação do maciço saprolítico sobre a rocha sã.

O alívio de tensões decorrentes da rápida escavação do vale pelo rio Manso alcançou as condições de equilíbrio no maciço, provocando movimentações ao longo das descontinuidades geológicas preservadas no saprolito e na rocha alterada. Abaixo do topo da rocha sã, pouco fraturada, não se constataram mais indícios de movimento.

Do mapeamento das paredes de escavação do canal de desvio e da galeria, concluiu-se que os movimentos tinham direção preferencial NNW-SSE, normal ao leito do rio e no sentido do talvegue. Nestes casos, os movimentos se davam principalmente segundo planos subhorizontais (conjunto J-2), e secundariamente segundo planos subverticais (conjuntos J-1 e J-3).

No caso das escavações do vertedouro, o mapeamento também foi conclusivo quanto à direção preferencial dos movimentos (aproximadamente E-W) ser normal à direção do leito do rio. Neste caso, o movimento se dava principalmente segundo planos com ângulos intermediários e no sentido do talvegue.

Na região Amazônica, onde várias obras estão sendo construídas em rochas sedimentares, o mesmo tipo de fenômeno vem sendo observado. Em Cachoeira Porteira, uma trincheira feita na ombreira direita revelou feições interessantes, já suspeitadas na escavação de poços manuais.

O solo superficial é um coluvião vermelho, argilo-siltoso poroso, com grande quantidade de concreções duras de limonita. Abaixo, segue uma

sequência de camadas correspondendo a solos residuais de argilito, siltito e arenito, este ocorrendo mais no fundo da trincheira. Originalmente, as cores são claras mas o solo encontra-se hoje inteiramente mosqueado pela precipitação de hidróxido de ferro, dando origem à plintita típica.

Algumas superfícies subhorizontais espelhadas e estriadas são observadas com continuidade da ordem de metros à dezena de metros, porém interrompidas localmente por zonas do solo mais intensamente ferruginizadas.

Um dos planos observados ocorre no contato entre o siltito e o arenito, junto à base superior da trincheira (encosta acima) e outro ocorre dentro de uma fina camada (5 cm) de argilito dentro do arenito. Ambos sofrem interrupção por zonas ferruginizadas.

Junto ao fundo da trincheira ocorrem horizontes de espessuras centimétricas de limonita, com grande extensão horizontal, atravessando toda a trincheira. Alguns "pilares" ferruginizados de 10 a 20 cm de largura se formam para cima e para baixo desses horizontes. São bem duros na parte central, tornando-se mais friáveis nas bordas. O aspecto de pilar se deve à intersecção com a parede, mas não há dúvidas de que se trata de feições planares verticais perpendiculares ao eixo da barragem. Entre as zonas ferruginizadas ocorrem grandes bolsões métricos de argilito que sofrem relaxação intensa quando da escavação, com desmoronamentos sucessivos, talvez por alívio de tensões ou por variação de umidade.

Os horizontes ferruginizados associados aos "pilares" parecem ser feições devidas aos deslocamentos sofridos pelas ombreiras quando do alívio de tensões causado pela erosão do vale. Formam-se superfícies horizontais de deslizamento e verticais de tração, ambas apresentando boas condições para precipitação de hidróxido de ferro cuja mobilização ocorre simultaneamente. Inverte-se pois o resultado do fenômeno, havendo o endurecimento dos planos fracos.

Como o processo é contínuo e plenamente ativo ainda nos dias atuais, encontramos superfícies em várias fases, algumas ainda bem preservadas, outras parcialmente ferruginizadas e outras inteiramente endurecidas pelo hidróxido de ferro.

Poços feitos abaixo e acima da trincheira confirmam a extensão lateral do fenômeno.

Parece que os processos de cimentação com limonita diminuam bastante a importância das feições quanto à resistência. Permeabilidade mais altas podem ainda estar associadas a elas.

Uma questão que pode estar intimamente relacionada à “neotectônica de fundo de vale” é a sismicidade induzida por reservatórios. É muito mais fácil admitir a interferência do enchimento de reservatórios e o equilíbrio existente no fundo dos vales do que procurar explicação na tectônica regional.

Este ponto já foi aventado um tanto indiretamente por Ferguson (1974, p 19) que afirma: “When high water conditions occurred in the área such as those occurring during the time of glacial meltwater runoff, or other extreme flooding conditions, additional uplift forces could further reduce the effective strength of valley bottom rocks. Under these conditions shear failures in the form of thrust faulting and tensile failures could occur in the weaker rocks or springing or dowing in the stronger rocks”.

Nichols e Avel (1975) foram mais diretamente à questão quando afirmam que: “the mere removal of geologic restraints by erosional processes may be sufficient to mobilize and reconcentrate strain energy sufficient to cause rock failure or an earthquake”.

Ferguson (1967) já havia alertado que o alívio de tensões observado no fundo dos vales poderia atingir profundidades de vários milhares de pés ou pelo menos várias vezes a altura e a largura do vale.

Infanti (1986) faz uma ligação entre erosão dos vales e o alívio de tensões no fundo dos mesmos: “while the river carves the valley the consequent stress relief provokes fracturas in the rock mass”, clara referência à possibilidade de geração de sismos, que ele menciona mais adiante com relação a Kariba: “The seismic induced activity that followed reservoir impounding clearly demonstrates that there was stress concentration beneath the valley”.

As evidências hoje justificam que uma grande atenção seja dada à possibilidade de associação entre as deformações em fundo de vale e a sismicidade induzida.

## 2.4 O Estudo do Estado de Tensão dos Maciços Rochosos

Na maior parte dos casos onde foi feita a determinação do estado de tensões naturais em maciços rochosos no Brasil, pouca ou nenhuma atenção foi dada aos “registros geológicos”, sejam eles de ordem estrutural ou petrográfica.

Uma exceção é a análise feita por Serra Júnior e outros (1986) sobre o maciço basáltico da UHE Taquaruçu. Os autores usaram o procedimento desenvolvido por Arthaud (1969). Mesmo considerando que sejam ainda discutíveis as hipóteses sobre a origem das descontinuidades “primárias” e “secundárias” no basalto, análises como estas devem ser incentivadas ao máximo e vêm sendo empregadas rotineiramente em várias partes do mundo (Herget, 1967).

Ainda sem aplicação no Brasil, mas de uso extenso no mundo, é a análise da relação entre esforços e deformação nas rochas, com base no estudo dos registros que permaneceram na estrutura cristalina da rocha.

## 2.5- A Colmatação de Filtros

Vários estudos têm sido apresentados sobre a questão da colmatação de filtros por hidróxido de ferro, mas com um enfoque quase que eminentemente físico-químico, deixando de lado um dos fatores mais relevantes que é a participação biológica. Bactérias que reduzem o óxido de ferro e depositam o produto em suas colônias são universalmente conhecidas (Ghiorse, 198; Jones, 1983; Jones e outros, 1983) e devem merecer consideração em nossos futuros estudos.

## 2.6 Desagregação das Rochas

Recentemente, além dos problemas clássicos de desagregação nos basaltos, casos surgiram com rochas sedimentares, principalmente na Amazônia, alguns mencionados neste Congresso. Um caso interessante vem sendo observado na barragem de Três Marias, da CEMIG, com sedimentos já ligeiramente metamorfizados, muito resistentes.

O fenômeno de desagregação observado no enrocamento abrange siltitos, arenitos e ritmitos. Pode ser caracterizado apenas como “rachaduras” e “lasqueamentos”, com um pouco de “fragmentação”, mas nunca “desintegração” (termo conforme nomenclatura da MRL-01 – Ensaio de Meteorização de Rochas da CESP).

O fenômeno parece estar ligado a uma fissuração da rocha que prossegue para a formação de rachaduras e liberação de lascas e fragmentos. Dois fenômenos parecem estar em jogo:

- A fissuração pode ser original da rocha, como os planos de acamamento, ou criada pela detonação, mas ambas de origem anterior ao lançamento. Pode ter tido origem durante o lançamento, pela passagem do equipamento e choques na queda e no contato com outros blocos. Finalmente, a fissuração pode ser criada ou acentuada pelas variações térmicas e de umidade durante o aquecimento pelo sol e do esfriamento pela chuva ou ondas do reservatório. A rocha usada na construção dos aterros da Barragem de Três Marias são rochas sedimentares de baixo grau metamórfico, do Supergrupo Bambuí. Tem elevada resistência, mas mesmo assim, após cerca de 20 anos de operação, começou a apresentar sinais de deteriorização.
- No desenvolvimento das fissuras e liberação dos fragmentos, podem ter importância a dissolução do cimento pela água e a liberação das tensões internas da rocha. No primeiro caso, o baixo grau metamórfico poderia justificar o cimento mais fraco, facilmente solúvel no nosso clima. Este fenômeno também explicaria o intenso desgaste sofrido pelas arestas do arenito quando em abrasão, mesmo sendo uma rocha de alta resistência. Entretanto, acho que para os siltitos, sedimentos finos e de matriz argilosa, o segundo fenômeno é mais importante. Sabe-se hoje que a “energia de deformação” (strain energy) absorvida pelos materiais terrosos durante uma consolidação de longa duração, como nas bacias sedimentares, não é imediatamente liberada quando da remição da carga (erosão e/ou escavação) porque as ligações diagenéticas, desenvolvidas durante o longo período de aplicação de carga, impedem a liberação imediata. Assim,

a deformação de sedimentos fortemente pré-adensados, quando do descarregamento, é por si só dependente do tempo, mas pode evidentemente ser acelerada por enfraquecimento das ligações cristalinas, seja por fissuramento, seja por dissolução.

Assim, o fenômeno observado parece ser originado na energia de deformação armazenada nos sedimentos finos e liberada, seja naturalmente, em função do tempo de exposição, seja acelerada por ciclagem térmica e de umidade. As rochas ligeiramente intemperizadas ou com fissuras já oxidadas são as que desagregam mais intensamente, porém, têm pouca importância devido ao seu uso quase desprezível no enrocamento.

Os aspectos das rochas que têm sofrido desagregação têm se ampliado nos últimos tempos graças ao maior tempo de observação das obras concluídas.

### 3 A CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSO

#### 3.1 Geral

Pode parecer um tanto surpreendente, mas um dos grandes desafios que se apresenta para o geólogo de engenharia está na parte mais fundamental e básica de qualquer atividade técnico-científica, que é o aprimoramento da sua linguagem técnica, isto é, no desenvolvimento de metodologias de caracterização e de classificação de maciços rochosos.

Dentro desse desafio, a parte mais importante corresponde à exploração até os limites do possível do que se pode fazer uma descrição visual-táctil, usando apenas as simples ferramentas de trabalho de um geólogo: m martelo, um canivete, uma lupa, uma bússola e uma trena.

Por caracterização entendemos o levantamento de todos os parâmetros geológicos que tenham interesse aos estudos geotécnicos, descritos de uma maneira padronizada, entendível por geólogos e por engenheiros, e que possa ser usado para, de certa forma, avaliar as propriedades geomecânicas do maciço.

Em primeiro lugar, a seleção das características geológicas que devem ser descritas e como

descrevê-las está razoavelmente bem definida. Aqui, o avanço que observamos nos últimos anos foi notável, graças principalmente ao trabalho liderado pela própria ISRM.

Na caracterização de um maciço, a linguagem usada e a maneira de descrever deve ser a mais universal possível, de modo a facilitar a comunicação entre técnicos de diferentes locais. Os procedimentos devem tanto quanto possível se aplicar a testemunhos de sondagem e a afloramentos, de modo a evitar distorções entre dados obtidos em várias fases dos estudos. Como exemplo, vale a pena citar o caso do RQD.

O RQD é uma medida modificada da recuperação de testemunho numa sondagem. Como enxergá-lo num afloramento? Ninguém consegue “ver” o RQD numa parede escavada, pois ele não tem expressão física.

Usam-se artifícios, como estender uma trena, correlacionar com o grau de fraturamento, correlacionar com o tamanho do bloco unitário, etc. ora, se é preciso obter estes dados para avaliar o RQD, por que não eliminá-lo e usar diretamente os índices observáveis?

### 3.2 A Revisão dos Procedimentos de Caracterização em Uso no Brasil

O primeiro passo no Brasil para uma padronização da caracterização dos maciços rochosos foi dado pelo IPT e apresentado na 2ª Semana da APGA, e posteriormente complementado e oficialmente apresentado por Guidicini e outros (1972a) na 4ª Semana da APGA. Foi chamado de “Método de Classificação”, mas sem dúvida se restringe a um método de caracterização geotécnica de meios rochosos.

Sugere um procedimento para descrição do grau de alteração, do grau de fraturamento, do grau de coerência e do grau de resistência, que vem sendo seguido até hoje. Necessita de revisões, no que pese o grande papel que desempenhou em nosso meio técnico.

#### 3.2.1 Grau de Decomposição / Grau de Consistência

Continua sendo a mais difícil característica das rochas a ter sua descrição padronizada, e temos que admitir que inevitavelmente terá sempre uma grande dose de subjetividade. Porém cabe perguntar: onde reside o verdadeiro interesse em caracterizar o estado de decomposição da rocha? É claro que está na avaliação da sua perda de resistência. A decomposição é uma caracterização da rocha intacta e não do maciço. Não deve, como em muitos casos se procura fazer, amarrar o grau de decomposição ao estado de intemperismo ao longo de descontinuidades, estas devem ser caracterizadas em separado. Assim sendo, caracterizar o grau de decomposição de uma rocha é de certa forma, definir sua resistência relativa no que então ocorre uma superposição com o grau de consistência. É claro que este tem um caráter absoluto enquanto o outro é relativo. Graus de decomposição são estados sucessivos de enfraquecimento da rocha a partir de seu estado original, enquanto que graus de consistência compõem uma escala para medir indiretamente a resistência da rocha, independente do seu estado de decomposição.

Deste modo, nada melhor para substituir o grau de consistência que uma verdadeira escala de resistência medida por um procedimento expedito, como o ensaio de compressão puntiforme. Em cada local, uma série de ensaios puntiformes permitirão estabelecer procedimentos de inspeção visual-táctil que forneçam a resistência dos vários materiais, de modo que aqueles ensaios sejam usados apenas para verificações esporádicas.

Se se tem a caracterização da resistência da rocha, o grau de decomposição deve ser apenas uma complementação da descrição geológica, de maneira mais padronizada possível, mas sem a necessidade da precisão que se exige dos parâmetros de uma caracterização geomecânica.

Na descrição do grau de decomposição de uma rocha, é importante definir o conceito de “mineral(ais) chave(s)” que governam a resistência da rocha. O grau de decomposição deve ser definido como um percentual de minerais-chaves que se encontram intemperizados. Por exemplo: 25%, 50%, 75%, 100%. Esta descrição deve ser completada pela caracterização do produto de intem-



perismo, que tendendo para um solo, deve usar a terminologia adequada para solos em geotecnia.

### 3.2.2 Grau de Fraturamento

Melhor seria ser chamado de grau de descontinuidade da rocha. Para definir descontinuidade, existem dois conceitos imprescindíveis à sua caracterização: sua baixa resistência em comparação com a da rocha intacta e sua persistência diante das dimensões da obra. Só são descontinuidades aquelas que atendam a estes dois pré-requisitos. Aqui vale a pena diferenciar dois comportamentos distintos dos maciços comandados pelo fraturamento e que dependem de estar o maciço em compressão ou em relaxação.

Em primeiro lugar, cabe reconhecer que as descontinuidades só comandam a resistência do maciço quando a rocha intacta tem resistência diante do estado de tensão a que esteja submetida.

Quando sob compressão, só interessa considerar as descontinuidades que condicionem a resistência ao cisalhamento do maciço e a sua deformabilidade. Sob estes esforços, só são descontinuidades as feições planares que tenham paredes planas e muito lisas, ou paredes intemperizadas ou ainda com preenchimentos fracos.

Para o caso de uma rocha submetida à relaxação, qualquer superfície que tenha baixa resistência à tração é importante, pois influi na definição do bloco unitário que pode se soltar.

Um exemplo bem conhecido de todos nós é o comportamento do basalto denso intensamente fissurado devido às juntas de contração. Este grau de fissuração não condiciona a resistência ao cisalhamento nem a deformabilidade do maciço diante das tensões de compressão normalmente aplicadas por nossas estruturas. Porém, quando submetidas à relaxação, todas estas juntas trabalham como descontinuidades e facilitam enormemente o desmonte. É importante que se passe a distinguir dois índices que meçam a frequência de descontinuidade que tenham resistência e persistência que comprometem a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade do maciço e que seria o “grau de fraturamento” como o conhecemos. O outro incluiria todas as feições que pudessem interferir nas relaxação do maciço e que levaria em

conta portanto todas as feições de baixa resistência à tração e viria a ser o “grau de fissuração” do maciço.

A escala proposta inicialmente pela ABGE para medir o grau de fraturamento da rocha precisa ser revista. Primeiro, ela não diferencia qualquer classe acima de um espaçamento de 1 m, o que é injusto. Cabe sem dúvida distinguir os maciços que tenham descontinuidades com espaçamento de 1 m daquelas com 3 m e daqueles com 10 m, cujo comportamento geomecânico será inteiramente diverso. Por outro lado, não acredito que seja necessário distinguir entre espaçamento como F3 e F4. Diante das obras de engenharia, estes maciços têm comportamento inteiramente similar.

A escala de grau de fraturamento de forma proposta pela ISRM (Brown, 1981) é a seguinte:

F-1	=	e	>	6	m
F-2	=	e	de	6	m a 2 m
F-3	=	e	de	2	m a 6 m
F-4	=	e	de	6	m a 2 m
F-5	=	e	de	2	m a 06 m
F-6	=	e	de	06	a 002 m
F-7	=	e	<	0,002	m (2 cm)

O termo FO poderia ser reservado para descrições locais onde valesse a pena distinguir ainda espaçamentos mais abertos que 6 m.

Uma simplificação da escala foi apresentada pela própria ISRM (1981) unificando alguns índices:

- F1 > 200 cm
- 60 cm < F2 < 200 cm
- 20 cm < F3 < 60 cm
- 6 cm < F4 < 20 cm
- F5 < 6 cm

Minha sugestão é usar a seguinte terminologia:

F1 > 200 cm (F1A > 600 cm e 200 cm < F1B < 600 cm)  
 60 cm < F2 < 200 cm  
 20 cm < F3 < 60 cm  
 6 cm < F4 < 20 cm  
 F5 < 6 cm (2 cm < F6A < 6 cm e F6B < 2cm)

### 3.3 Caracterização das Descontinuidades

Este é o ponto que mais avançou nos últimos tempos, estando bem descrito pela ISRM (Brown, 1981), traduzido pela ABGE. Pouco teríamos a acrescentar.

## 4 ENSAIOS ÍNDICES

São ensaios que não medem diretamente as propriedades do maciço rochoso mas permitem sua avaliação. São em geral ensaios expeditos, de fácil realização, usando amostras de pequenas dimensões ou executados nos furos de sondagens.

### 4.1 Ensaios Expeditos

Entre eles realça-se o ensaio de compressão puntiforme já em uso há bastante tempo no Brasil, desde o trabalho de Guidicini e outro (1972b). Posteriormente o ensaio foi padronizado pela ISRM (Brown, 1981).

Conforme já definido no item anterior, este ensaio deve ter uso rotineiro em nossas obras devido à facilidade de sua execução e a grande simplicidade do equipamento, que pode ser construído hoje sem dificuldades, usando macacos hidráulicos de pequena capacidade (10 a 15 t). As pontas de compressão podem ser feitas com esferas de aço de rolamento o que é mais simples que a sua preparação no torno.

Materiais muito brandos (com menos de 50 kgf/m<sup>2</sup>) não são facilmente ensaiados com a compressão puntiforme, devendo-se executar o ensaio de compressão simples, os quais também são usados em pequena quantidade para aferição dos ensaios de compressão puntiforme.

O próprio ensaio de compressão triaxial em amostras de rocha intacta é apenas um índice a ser usado na avaliação da qualidade do maciço, que apenas em condições muito especiais pode ter sua resistência representada por este ensaio.

Um ensaio índice já introduzido no Brasil (Dobereiner, 1987) e que pode vir a ser mais divulgado é o de cisalhamento direto em amostras pequenas, obtidas de testemunhos de sondagem, não se perdendo de vista entretanto que ele não passa de um índice e não representa a resistência

do maciço, nem mesmo das suas descontinuidades. O efeito de escala não pode ser menosprezado.

### 4.2 Ensaios em Furos de Sondagem

A utilização dos furos de sondagem para ensaios *in situ* ficou estacionada no tempo com apenas a execução do convencional ensaio de perda d'água. Somente nos últimos anos tem-se assistido a uma certa evolução nos ensaios realizados em furos de sondagem.

Na década de 1970, o dilatômetro (Rocha, 1970) foi usado em vários de nossos projetos, por exemplo UHE São Simão (Rocha, 1975), e usado como um índice para classificação de maciços (Franciss, 1974). Entretanto seu custo elevado e a falta de alternativas nacionais impediu sua maior divulgação no país.

O ensaio de perda d'água (EPA) vem sendo aprimorado intensamente nos últimos anos, cabendo realçar os trabalhos de Corrêa e Freitas.

Este mesmo Congresso foi palco de discussões em torno de vários métodos recentemente introduzidos na engenharia de investigações de maciços, tanto para observação da parede de furos de sondagem como para caracterização das suas propriedades hidráulicas.

No primeiro grupo incluem-se o obturador de impressão, o TRH e o SRH. Com o obturador de impressão consegue-se uma "impressão" de todas as irregularidades da parede, o que exige uma boa dose de interpretação, na eliminação daqueles puramente mecânicos. Ainda possui grandes deficiências, principalmente devido às deformações da borracha, produzindo um exagero nas dimensões das feições, as quais também se encontram mascaradas pelo desgaste durante a sondagem, e ainda em virtude da dificuldade de diferenciar as características do material de preenchimento das feições de maior porte, sendo quase impossível distinguir rocha fraturada de material intemperizado. O desenvolvimento de borrachas com vários níveis de rigidez pode levar a um aprimoramento do ensaio. Seu uso é bem promissor e no projeto do Complexo da Altamira já permitiu esclarecer várias dúvidas quanto à existência de zonas intemperizadas na fundação rochosa, com perda de testemunho (Correa e Quadros, 1987).

O teste de registro hidráulico ou TRH é um engenhoso processo de identificação de feições permeáveis. Não possui precisão na definição da dimensão pequena, milimétrica e submilimétrica, nem nas zonas de grande espessura, onde as feições que absorvem estão associadas confusamente. Seu uso em vários projetos (Andrade, 1987) tem permitido seu aprimoramento.

A definição das descontinuidades abertas que absorvem água num ensaio tem importância fundamental na geotecnia.

Inicialmente o interesse geomecânico é óbvio, pela importância que tem o conhecimento da abertura de uma feição, mesmo que em termos de grandeza. Esta é uma das questões mais difíceis de avaliar na caracterização dos maciços. Em segundo lugar, na montagem do modelo hidrogeológico, o conhecimento das feições que controlam o fluxo da água é imprescindível. Não se pode entretanto perder de vista a necessidade de um número de ensaios estatisticamente significativo pois as informações são muito pontuais e condições de absorção locais podem não definir as prioridades do maciço. Além disso, é de se ter em conta a enorme dependência do fluxo em relação ao estado de tensão da rocha (abrindo e fechando as descontinuidades) e que será muito alterado após a construção e operação da barragem.

No segundo grupo estão a Sonda Hidráulica Multiteste, o Ensaio de Injeção d'Água sob Pressão Decrescente e a Diagrafia.

A Sonda Hidráulica Multiteste - SHM é sem dúvida um grande avanço na nossa capacidade de estudo das condições hidrogeotécnicas dos maciços rochosos fraturados.

O seu funcionamento como um piezômetro triplo móvel já é em si um dispositivo poderoso na avaliação das direções de fluxo e interdependência entre sistemas de juntas. Para tanto é importante que as medidas dos transdutores sejam absolutas e não apenas por diferença, e que um tempo adequado de estabilização das leituras seja adotado. A possibilidade de ensaio tanto por injeção como por bombeamento (evidentemente abaixo do NA) tem permitido ensaios mais precisos e dando valores de vazão surpreendentemente altos (silva, 1987). Este último permite também o estudo da influência do bombeamento em furos vizinhos, desde que para permeabilidade baixas,

compatíveis com a capacidade de bombeamento da sonda.

A medida da temperatura e de resistividade da água fornece informações ricas sobre sua origem, tempo de permanência no maciço, comunicação subterrânea e comparação entre vários aquíferos. Neste caso, a sonda é uma das primeiras tentativas brasileiras de emprego da Diagrafia.

O Ensaio de Injeção d'Água sob Pressões Decrescentes - EIPD (Andrade, 1987) é um ensaio de injeção sendo que um determinado volume de água de um êmbolo pressurizado juntamente com o maciço é deixado fluir para a descontinuidade sob pressão decrescente, quando é interrompida a comunicação com a pressão aplicada inicialmente. É possível definir o regime laminar para o fluxo, o que torna a análise mais confiável e permite a avaliação da espessura teórica da descontinuidade. Este ensaio ainda se encontra em fase de experimentação.

Diagrafia é um dos mais promissores processos de otimização de sondagens em pesquisa geotécnica, já em uso difundido no exterior, principalmente na Europa.

Cabe distinguir as Diagrafias Instantâneas, que são os registros contínuos e imediatos dos parâmetros da perfuração em função da sondagem. Normalmente são medidos pressão de perfuração, velocidade de rotação, torque, velocidade de avanço, pressão e vazão do fluido de circulação, em sondagens totó-percussivas, sempre com identificação dos detritos de furação.

A correlação destes parâmetros com as propriedades geotécnicas ou sua variação com a profundidade permite a otimização do programa de sondagens pelo uso maior de sondagens destrutivas.

As diagrafias diferidas são métodos de leitura ou medição de propriedades físicas no interior do furo, nas paredes ou na água do maciço. São feitas, portanto, após a execução dos furos (diferidos). Entre elas realça-se: potencial espontâneo, gama natural, caliper, resistividade e velocidade sônica.

Uma das grandes vantagens da diagrafia é permitir a medida de determinada propriedade in situ, por exemplo a velocidade sônica, e reproduzi-la em laboratório sob condições controladas. A porosidade da fissuração de uma rocha amos-

trada de profundidade é um sinal de relaxação de suas tensões. No entanto, não poderemos nunca avaliar a intensidade desta relaxação se não conhecermos as suas reais condições *in situ*.

O desenvolvimento e implantação da Dia-grafia no Brasil só se fará se houver um grande envolvimento por parte das empresas executoras de sondagens.

### 4.3 O Papel das Empresas de Sondagens

Temos assistido nos últimos 20 anos uma gradativa alienação das empresas executoras de sondagem da participação em qualquer responsabilidade do projeto, limitando-se a simples executoras de sondagens, cumprindo especificações, programas e quantitativos que não ajudaram a definir. E ainda mais, sem participar em nada da interpretação dos dados obtidos. Na minha opinião, o desenvolvimento dos métodos de investigação passa inescapavelmente pela maior participação das empresas de sondagens no Projeto.

É inadmissível que uma empresa técnica possa executar um bom trabalho se não tem acesso aos seus objetivos mais íntimos, quando não pode sugerir métodos alternativos de estudos.

A minha proposta é que as concorrências para investigação sejam cada vez mais concorrências técnicas e menos de custo. À empresa sondadora deve-se formular a questão que se deseja estudar e apresentar a concepção do projeto. É claro que existe fase inicial de qualquer projeto em que não se tem informações suficientes para tanto. As primeiras sondagens praticamente começam a desbravar o maciço e revelar suas características principais. Mas acho que sempre que possível, a questão a ser investigada deve ser colocada de maneira objetiva, permitindo à empreiteira o uso da sua criatividade. Por exemplo, poderia fazer parte de uma concorrência o seguinte:

- a. definir, quantificar e fornecer a metodologia de interpretação para o método que sugere para a investigação das características hidrológicas do maciço;
- b. que métodos possuem para o estudo e caracterização geomecânica de juntas decompostas e/ou com preenchimento no maciço;

- c. especificar o método que usará para a orientação dos testemunhos, levantamento e descrição das descontinuidades e sua análise estatística.

As empreiteiras devem por outro lado se preparar para poder propor técnicas alternativas de investigação e aprimoramento na sua interpretação. E só há uma alternativa para tal: envolver nosso centro de pesquisas, institutos e universidades, em programas objetivos de desenvolvimento ou adaptação de tecnologias que já vinham sendo usadas com sucesso em outras partes do mundo. Aliás, estas instituições também poderiam tomar a iniciativa de desenvolver tais tecnologias, comercializando-as posteriormente com as empresas interessadas.

O desenvolvimento dos métodos de investigações por sondagem, que ainda é o método mais importante em uso, depende intrinsecamente dos seguintes fatores:

- existência constante, por parte das proprietárias, de métodos que visem uma otimização da investigação através de uma minimização de custos globais e aprimoramento dos resultados;
- definição por parte das proprietárias dos objetivos, cada vez mais concretos, do programa de investigação
- participação efetiva da empreiteira na responsabilidade de definição dos métodos a empregar e na qualidade dos seus resultados
- desenvolvimento tecnológicos fornecidos por parte de nossas instituições de pesquisa no desenvolvimento de novas técnicas de investigação.

## 5 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Nieble e Francis (1976) distinguiram duas categorias de sistemas classificatórios:

- critérios de classificação que interessam apenas às propriedades intrínsecas do meio rochoso;
- critérios de classificação que interessam não apenas às propriedades físicas do meio rochoso, como também ao seu comportamento



em presença de determinados tipos de solicitações e reações.

É claro que os primeiros permitem zonestar os maciços, estabelecer uma linguagem com significado local preciso e universal compreensível, e mais importante, permitem estimar, com alguma segurança, determinadas propriedades físicas em função de classificações relativamente simples conforme realizado pelo autor e Francis em São Simão, em 1972.

Entretanto devo confessar que a previsão não foi feita no ato da descrição do maciço, mas sim no escritório por meio de correlações puramente matemáticas. Não existiu o exercício mental, mais que isto, fundamental, de prever-se o comportamento do maciço no ato da sua descrição.

Os segundos já trazem em si embutidos o conceito do “comportamento”, sendo mais elaborados e complexos. Hoje, tais sistemas tendem a ser entretanto herméticos e inquestionáveis quanto após uma sistemática de avaliação quase automática de índices, chega-se a números mágicos que permitem prever comportamentos das várias classes de maciços com base em correlações estatísticas um tanto universais. Também aqui não é realizado o exercício de previsão que é o passo decisivo capaz de distinguir o sucesso do trabalho em geologia de engenharia.

## 5.1 Sistemas Universais

Dentre estes últimos, destacam-se dois sistemas de classificação empregados em cavidades subterrâneas, referidos em trabalhos apresentados neste Congresso e que são os sistemas de Barton e de Bieniawski.

Estes sistemas têm o mérito de ter selecionado parâmetros classificatórios importantes e terem aperfeiçoado a sua descrição sistematicamente. Com base em estudos de casos históricos, correlacionam os índices obtidos com o comportamento de obras subterrâneas.

São de fácil utilização e têm hoje uso generalizado. Porém, seu emprego tem as seguintes desvantagens:

- automatiza a interpretação e análise do dado geológico;

- elimina a “previsão do comportamento” a ser feita pelo próprio geólogo de engenharia;
- legitima procedimentos e métodos muitas vezes inadequados e ultrapassados;
- usa um sistema de ponderação cuja base não pode ser manipulada e torna arbitrário e de difícil entendimento o resultado final;
- usa o RQD, juntamente com outros parâmetros a ele relacionados, como frequência de fraturamento.

A minha proposta em consonância com o que foi dito por Nieble e Francis (1976) é desenvolver metodologias as mais padronizadas possíveis de caracterização das feições geológicas, mas com ênfase nos comportamentos locais.

## 5.2 Classificações Locais

Por classificação local entendo o trabalho do geólogo de engenharia de, em cada local, separar o maciço rochoso em várias classes que tenham comportamento diferente. Para isto tem-se que ter em mente dois pontos fundamentais: 1) a finalidade da classificação, isto é, o comportamento que deve ser previsto e 2) o conhecimento das características do maciço rochoso local.

O procedimento envolve, portanto, 3 etapas:

- uma ampla caracterização do maciço rochoso, a mais universal possível, usando os procedimentos discutidos no item 4, tanto quanto possível com base apenas na inspeção visual e em ensaios índice;
- a definição dos vários comportamentos a serem previstos, e que podem ser em grande número dependendo da complexidade do projeto. Por exemplo, podemos citar:
  - » estabilidade de taludes e de fundação;
  - » deformabilidade;
  - » escavabilidade;
  - » durabilidade;
  - » permeabilidade / condutividade;
  - » erodibilidade;
  - » injetabilidade / drenabilidade.
  - » seleção das características do maciço a serem usadas.

Cada comportamento acima mencionado é condicionado por um número limitado de parâ-

metros. A sua seleção pelo geólogo de engenharia exige um conhecimento profundo do fenômeno envolvido para o que ele deve contar com a colaboração estreita do engenheiro geotécnico.

Esta é sem dúvida a atividade profissional mais importante do geólogo de engenharia e deve representar a síntese consciente de todo seu trabalho. Para executá-la é absolutamente necessário que ele tenha:

- um amplo conhecimento do maciço através de uma boa caracterização geomecânica;
- um perfeito conhecimento do condicionamento que cada feição geológica possa ter no fenômeno a ser previsto;
- uma certa criatividade em agrupar as características geomecânicas importantes de modo a definir cada classe de maciço para cada aplicação.

O produto final deste trabalho é a compartimentação geomecânica do maciço que significa seu zoneamento onde se mostra a distribuição das várias classes de maciço e o que necessariamente será feito para cada comportamento a ser previsto. Assim a compartimentação do maciço quanto à escavabilidade não é necessariamente a mesma que para a injetabilidade ou durabilidade, etc.

É no exercício da tarefa de prever o comportamento dos maciços rochosos que se pode medir o sucesso do trabalho do geólogo de engenharia.

Uma questão que gostaria de comentar é quanto à pressão que é feita sobre o geólogo de engenharia no sentido de obter resultados numéricos, isto é, quantitativos. Este ponto não é absolutamente imprescindível. Classificar não é obter números, é prever comportamento. Aliás, o fato de que as classificações mais usadas hoje levam à obtenção de classes de maciço definidos por valores numéricos, alguns excessivamente detalhados (3 casas decimais) podem dar uma conotação de precisão que nenhum dos métodos realmente tem. Não se pode “operar” matematicamente com tais valores livremente, nem existe entre classes diferentes as mesmas relações que existem entre seus números representativos. Sempre que possível, as características de um maciço devem ser definidas por valores numéricos, mas a classificação não necessariamente.

### 5.3 Obtenção Empírica de Parâmetros Geomecânicos

Parâmetros geomecânicos dos maciços rochosos podem ser obtidos com aceitável precisão, pelo menos para as fases iniciais dos estudos (viabilidade e projeto básico), a partir de uma boa caracterização, ensaios índices e classificação dos maciços. Este é um dos campos que mais tem experimentado avanços nos últimos tempos, sendo, entretanto, ainda limitada a contribuição nacional. Um grande esforço deve ser dedicado a estudos que possam validar ou reformular a experiência estrangeira, e mesmo contribuir para novos procedimentos.

Dobereiner e outros (1987) apresentam uma boa síntese dos métodos mais em uso hoje em dia e como foram aplicados nos estudos da Cachoeira da Porteira.

Resistência ao cisalhamento das descontinuidades, resistência ao cisalhamento do maciço rochoso, resistência à compressão simples do maciço, deformabilidade do maciço, abertura de juntas podem ser avaliadas com base apenas na caracterização do maciço e em ensaios índice.

### 5.4 A Importância da Observação do Protótipo

A base da sistematização do uso das “classificações locais” é a análise do comportamento do protótipo. Cada classificação feita é uma previsão que tem que ser verificada diante do comportamento do protótipo. Mesmo no caso de projetos já em operação, o uso dos sistemas de classificação locais permite analisar o comportamento que vem apresentando ao longo do tempo e ainda estabelecer procedimentos que poderão ser extrapolados para outros projetos.

Uma das questões mais importantes, e que é paradoxalmente uma das mais negligenciadas da geologia de engenharia, está na previsão do comportamento dos maciços rochosos nas áreas de dissipação de energia a jusante dos vertedouros de nossas barragens. Criou-se aí uma cerimoniosa área de não comprometimento em que os hidráulicos confiam na previsão com base em considerações teóricas e em modelos reduzidos, e em ambos o maciço rochoso se encontra normal-

mente mal definido. Os geólogos de engenharia e os engenheiros geotécnicos têm se mantido afastados desta área, o que precisa ser urgentemente corrigido.

Imediatamente nos deparamos com a propalada dificuldade de modelar tanto em modelos físicos como matemáticos os pormenores geológicos que têm importância no comportamento da rocha.

A observação de vertedouros em operação deve trazer uma grande ajuda ao equacionamento do problema, desde que suportado por uma boa caracterização do maciço. Este é um trabalho que terá que ser desenvolvido em conjunto, pelos geotécnicos e engenheiros hidráulicos. É no conhecimento dos esforços atuantes, como pulsação intensa das pressões, o impacto do jato, as vibrações, a velocidade da água, etc., que se poderá selecionar os parâmetros geomecânicos condicionantes. A resistência à compressão simples controla evidentemente a resistência ao impacto, e a ação da velocidade sobre os materiais mais fracos é o elemento dominante. Nas rochas mais resistentes, o fraturamento passa a definir o comportamento, pois o mecanismo de erosão passa a ser o de remoção de blocos. Assim, é importante a definição do tamanho, peso, orientação em relação à superfície, imbricamento dos blocos, abertura das juntas.

A experiência tem mostrado que a heterogeneidade da rocha e sua anisotropia são fatores dominantes no comportamento do maciço quando erodido e não podem ser esquecidas.

O trabalho de Infanti (1986) mostra a única sugestão feita no Brasil para a classificação de maciços quanto à erodibilidade a jusante de vertedouros. O sistema de classificação geomecânica proposto por Klaus John é adaptado, introduzindo-se ainda importantes modificações quanto à forma da partícula.

O assunto merece, entretanto, que se dê a ele a importância que lhe cabe num país onde se constroem os maiores vertedouros do mundo.

## 5 CONCLUSÃO

A apresentação de algumas questões que ainda desafiam a geologia de engenharia no Brasil

teve o objetivo de mostrar ao profissional da área, principalmente os mais novos, o enorme campo científico e técnico que se abre à sua ação. Muito longe de mim qualquer intenção de abranger toda a área de atuação da geologia de engenharia. Com apenas alguns poucos casos comentados, esperamos ter incentivado os colegas a se aprofundarem cada vez mais nos fundamentos e nas aplicações do campo técnico-científico que compõem a Geologia de Engenharia.

## REFERÊNCIAS

- PAIGE, S. (1950). Application of Geology to Engineering Practice Berkeley Volume. GSA-
- NIETO, ALBERTO S. (1977). Significant Engineering – Geology Features at Damsites in Flat-Lying Sedimentary Rocks. Ohio River Valley Soils Seminar.
- STÄPLEDON, D. H. (1976). Geological Hazards and Water Storage, Boletim nº 14 da IAEG.
- MACHADO, A. (1983). Inspeção dos Canalículos dos Solos Residuais das Áreas das Usinas Hidrelétricas de Tucuruí, Balbina e Samuel. Relatório Interno da Eletronorte.
- BUCK, N. (1984) Vários Relatórios Internos da Eletronorte.
- TRICART, J. e CAILLEUX, A. (1965). *Traité de Géomorphologie*. Volume 5.
- GUIDICINI, G., IWASA, O. Y. (1976). Ensaio de Correlação entre Pluviosidade e Escorregamento em Meio Tropical Úmido. Publicação 1080 – IPT-SP.
- TATIZANA, C e outros (1987). Análise de Correlação entre Chuvas e Escorregamentos. Serra do Mar no Município de Cubatão. 5º CBGE.
- CARVALHO, C. S. e WOLLE C. M. (1987). Considerações sobre o Fluxo de Água em Taludes de Solos Insaturados. 5º CBGE.
- MARQUES FILHO, P.L.; LEVIS, P. (1978). Aspectos Geológicos de Barragens de Enrocamento com

Face de Concreto. A Experiência de Foz do Areia. 2° CBGE.

MARQUES FILHO, P. L.; LEVIS, P. (1981) . A Influência do Manto de Alteração na Barragem de Foz do Areia. 3° CBGE.

PAES DE BARROS, F.; GUIDICINI, G. (1981) . Um Processo Natural de Alívio de Tensões e o Projeto de Drenagem da Fundação da Barragem de Itaipu. 14° Congresso do CBGB.

PATTON, F. D., HENDRON, A. J. (1974) . General-Report on Mass Movements. 2° Congresso Internacional da IAEG.

FERGUSON, H. F. (1974) . Geologic Observations and Geotechnical Effects of Valley Stress Relief in the Allegheny Plateaus. ASCE National Meeting on Water Resources Engineering.

NICHOLS, T. C .; ABEL, J . F. (1975) . Mobilized Residual Energy. A Factor in Rock Deformation. Bulletin of the AEG.

FERGUSON, H. F. (1967) . Valley Stress Release in the Allegheny Plateau. Bulletin of the AEG.

SOBRINHO, J. A.; INFANTI JR., N. (1986) Erosion of Rocks Masses Subject do Flow Action. Some Geomechanical and Hydraulic Aspects. 5° Congresso da IAEG. Buenos Aires.

SERRA JÚNIOR, E. e outros (1986) . Análise das Feições Estruturais para Estudo do Estado de Tensões Naturais no Maciço Basáltico da UHE Taquaruçu. 2° Simpósio Sulamericano de Mecânica das Rochas. Porto Alegre.

ARTHAUD, F. (1969) . Método de Determinação Gráfica das Direções dos Eixos de Deformação de uma População de Falhas. Bulletin. Soc. France (7) . XI. Tradução do IPT.

HERCET, G. (1976) . The Stress Field in the Urquhart Shales at Mount Isa (Queensland, Australia) , Based on Structural Investigations . Felsmechanik u. Ingenieurgeol (1968) .

GHTORSE, W.C. (1984) . Biology of Iron and Manganese Depositing Bacteria. Ann. Rev. Microbiol. 1984.

JONES, J. G. (1983) . A note on the Isolation and Enumeration of Bacteria which Deposit and Reduce Ferric Iron . Journal Applied Bacteriology .

JONES, J. C. e outros (1984) . Reduction of Ferric Iron by Heterothrophic Bacteria in Lake Sediments. Journal of General Microbiology. Great Britain.

GUIDICINI, G. e outros (1972a) . Um Método de Classificação Geotécnica Preliminar de Meios Rochosos. Anais da 4 a Semana da APGA.

BROWN, E. T. (1981) . Rock Characterization Testing and Monitoring ISRM Suggested Methods. Pergamon Press.

GUIDICINI, G. e outros (1972b) . Análise do Método de Compressão Puntiforme em Fragmentos Irregulares na Caracterização Geotécnica Preliminar de Rochas. 4a Semana da APGA.

ROCHA, M. e outros (1970) . Characterization of the Deformability of Rocks Masses by Dilatometer Tests, Memória 360 do LNEC.

ROCHA, M - e outros ( 1975) . Application of Advanced Techniques to the Study of the Foundation of São Simão Dam. Memória 458, LNEC.

LOPES, J. A. U. (1987) Terra Roxa-PR: Um Caso Notável de Problemas em Fundações Rasas Provocados por Fenômenos Associados a Colapso dos Solos.

CORRÊA FILHO, D. e QUADROS, E. F. (1987) . Instrumento Auxiliar de Interpretação do Comportamento Hidrogeotécnico de Maciços Rochosos - Obturador de Impressão. 5° CBGE.

CORRÊA FILHO, D. e QUADROS, E. F. (1986) . Metodologia para Determinação do Comportamento Hidrogeotécnico dos Maciços Rochosos. Anais do 2° Simpósio Sulamericano de Mecânica das Rochas. Porto Alegre .



ANDRADE , R. M. de (1987) . A Compressão do Escoamento em Maciços Fraturados Através de Novos Testes Realizados no Campo. 5º CBGE .

SILVA, R. F. (1987) Ensaio com a Sonda Hidráulica Multiteste na Barragem Juruá da Usina Hidrelétrica de Kararaô. 5º CBGE.

DOBEREINER, L. CAMARGO, F. JÁCOMO, A.A.C. (1987) . Caracterização Geomecânica do Maciço Rochoso de Fundação da UHE Cachoeira Porteira. 5º CBGE.