

II SIMPÓSIO SUL AMERICANO DE  
MECÂNICA DE ROCHAS

TEMA MR-2

Aplicações de Mecânica de Rochas à Engenharia Civil

RELATO GERAL  
APLICAÇÕES DA MECÂNICA DE ROCHAS À ENGENHARIA CIVIL

Milton Vargas

THEMAG LTDA, São Paulo

RESUMO

É feito um relato do estado dos conhecimentos das aplicações da Mecânica das Rochas à Engenharia Civil, nos campos da Fundação de Estruturas, Escavações Subterrâneas e Estabilidade de Taludes, em maciços rochosos, obtidos em obras e pesquisas realizadas na América Latina e relatados em trabalhos apresentados em congressos e simpósios de Mecânica das Rochas e Geologia de Engenharia, a partir do "Simpósio de Mecânica das Rochas em Relação a Fundação de Barragem", realizado no Rio de Janeiro, em 1978, e do "I Congresso Sul-Americano de Mecânica das Rochas", realizado em Bogotá, em 1982.

INTRODUÇÃO

É para mim uma honra esta oportunidade que me foi dada de tentar relatar a este Simpósio, o estado dos conhecimentos atuais sobre as aplicações da Mecânica das Rochas à Engenharia Civil. Como se trata de um simpósio sulamericano, restringirei o meu relato aos aspectos do assunto que mais interessam à engenharia civil da América do Sul. Além disso restringirei esta minha tentativa aos conhecimentos publicados e desenvolvidos depois do I Congresso Sul-Americano de Mecânica das Rochas, realizado em Bogotá, em 1982; só me referindo a publicados antes dessa data se for absolutamente necessário — como é o caso dos trabalhos apresentados ao Simpósio de Mecânica das Rochas em Relação a Fundações de Barragens, realizado no Rio de Janeiro, em 1978. Em segundo lugar, sem deixar de lado totalmente os aspectos teóricos desse conhecimento, procurarei ater-me a exemplos de obras realizadas entre nós; tentando ressaltar os avanços dos conhecimentos de Mecânica das Rochas nelas aplicados. Entretanto, como a minha atividade de engenheiro é no Brasil, serei obrigado a ater-me mais a obras brasileiras, correndo o risco de omitir, por ignorância, importantes obras realizadas no restante do nosso Continente.

A Mecânica das Rochas é uma ciência aplicada, isto é: no sentido amplo da palavra, uma tecnologia pois sistematiza as aplicações dos métodos e teorias da Mecânica à problemas técnicos relacionados com rochas e maciços rochosos. Entre esses problemas há aqueles que são do es-

côpo da Engenharia Civil; como: o projeto e construção de fundações de estruturas sobre maciços rochosos; de túneis e galerias através desses maciços; e de obras de contenção de encostas rochosas ou simples análise de sua estabilidade. Naturalmente haverá muitas outras aplicações importantes da Mecânica das Rochas à Engenharia Civil, que como complementares às acima especificadas que como conjugação das mesmas. Entretanto, por questão de brevidade e simplicidade restringir-me-ei aos aspectos simples desses três campos de aplicação. Assim deixarei de lado três gêneros de importantes aplicações da Mecânica das Rochas que são: os das escavações e desmontes de maciços rochosos; o dos métodos de consolidação e melhoramento das propriedades desses maciços; e o do projeto e construção de enrocamentos. Essas regiões do conhecimento geomecânico só serão abordadas neste relatório, quando associadas aos três itens principais acima mencionados.

#### FUNDAÇÕES DE ESTRUTURAS

No seu relatório do estado dos conhecimentos sobre fundações em rocha, apresentado ao I Congresso Sulamericano de Mecânica das Rochas, realizado em Bogotá, em novembro de 1982, o Eng. Orestes Moretto (1) muito bem sumarizou os requisitos necessários para o bom desempenho de uma fundação sobre rocha, como sendo de resistência, deformações e os dos efeitos de percolação d'água.

Para tanto, disse o Eng. Moretto, será necessário primeiramente: "um conhecimento prévio do mecanismo segundo o qual se desenvolve o fenômeno que se analise, afim de elaborar um modelo geomecânico que o interprete"; e, em segundo lugar: "uma definição e valorização dos parâmetros que intervêm para quantificar o fenômeno"

No Brasil a experiência que se adquiriu sobre as aplicações da Mecânica das Rochas ao problema técnico das fundações de estruturas, refere-se principalmente as fundações de grandes barragens e vertedouros de concreto. Creio que a primeira divulgação sistemática das questões relacionadas com tais obras foi feita pelo Eng. Murillo Dondici Ruiz (2), então chefe da Seção de Geologia APLICADA do I.P.T. de São Paulo, em 1965, numa palestra proferida no Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas. Ali ele relatou os princípios de Mecânica das Rochas, adotados por ele e por seu predecessor o Eng. Ernesto Pichler, no I.P.T. nas investigações de Mecânica das Rochas, relacionadas com obras hidroelétricas brasileiras, desde as Usinas Subterrâneas de Paulo Afonso, em 1951, Cubatão, em 1952, Graminha, em 1960, até os problemas de fundação da Barragem, Vertedouro e Casa de Força de Jupiá, em 1963. No momento de sua palestra ainda o Eng. Ruiz, desenvolvia ensaios de Mecânica das Rochas na Barragem do Jaquiri, no Estado de São Paulo, e do Estreito, no Rio Grande do Sul. Pode-se confirmar que essas foram as obras pioneiras da aplicação da Mecânica das Rochas à fundação de Barragens no Brasil. Mas, o progresso brasileiro na questão foi tal, em virtude de um ciclo de construção de barragens, acontecido na época no Brasil, que já em 1973, o Comitê Brasi-

(1) O. Moretto - "Fundaciones en Roca - Síntesis Escogida del Estado del Conocimiento" - Anais I Congresso Suramericano de Mecanica de Rocas. Tomo I - Bogotá, 1982.

(2) M.D. Ruiz - "O papel da Mecânica das Rochas no Estudo de Fundações de Grandes Barragens" - Águas e Energia Elétrica - Nº 1 - Vol. 2 - 1966

sileiro de Mecânica das Rochas pode organizar um Simpósio Internacional de Mecânica das Rochas relacionado com Fundações de Barragens, no Rio de Janeiro, em cujos anais está testemunhada a experiência adquirida pela engenharia civil brasileira, neste campo.

No Simpósio em questão foi apresentado um trabalho que reune a experiência brasileira na concepção de modelos geomecânicos obtida no projeto de três grandes barragens nacionais: a de Itaipú, sobre o Rio Pará; a de Tucuruí, no Tocantins; e a de Salto da Divisa, no Rio Jequitinhonha (3). Este trabalho foi amplamente discutido e complementarizado, num "panel" do mesmo Congresso por Murillo Dondici Ruiz (4), estendendo suas considerações para o caso dos ensaios de campo e a análise de seus resultados.

Esses modelos conceituais são desenhados à partir de resultados de sondagens, mas eles requerem a imaginação criativa do geólogo ou engenheiro especialista em Mecânica das Rochas. Note-se que, quando me refiro a "imaginação criativa" não me refiro a nenhuma arbitrariedade nem fantasia mas, a capacidade, estribada em conhecimentos científicos e tecnológicos, de interpretar corretamente os dados observacionais e de interpolar, entre as indicações obtidas, detalhes que não foram ou não podem ser observados. Disso resulta que eles devem mostrar um caráter dinâmico. Isto é, eles devem partir de uma conjectura inicial — feita a partir dos primeiros dados — que servirá de base para a programação e organização de novas observações, com as quais a conjectura inicial é melhorada ou mesmo reformulada à medida que novas informações são obtidas, inclusive ao correr dos estágios da própria construção.

Os autores do trabalho em questão exemplificam — com os casos de Itaipú, Tucuruí e Salto da Divisa — como os modelos geomecânicos conceituais, sobre os quais os cálculos do projeto são baseados, evoluem, através de sucessivas interações da investigação geológica preliminar, das sondagens e perfis geológicos, dos diagramas de blocos e das investigações geotécnicas sobre os valores dos parâmetros tradicionalmente usados nas análises de resistência e compressibilidade.

Note-se que um modelo conceitual geomecânico inclui, por um lado, as unidades geomecânicas correspondentes às diversas camadas em que é dividido o maciço rochoso, individualizado pela natureza da rocha, pela frequência e distribuição de suas descontinuidades e pelo grau de decomposição. Isto é feito por observação de campo do maciço rochoso e pela interpretação de perfis de sondagens, em face a uma classificação prévia dos estados da rocha, preparada especificamente para o local. A padronização dessas observações foi elaborada por uma comissão especial da I.S.R.M. designada em 1967, cujos trabalhos foram resumidos em tra-

(3) F.P. Camargo, C.A.G. Leite, S. Bertin Neto, F. Maldonado e P.T. Cruz - "Development of Conceptual Geomechanical Models for Foundation of Concrete Dam - Approach Applied to Three Projects" - Proc. Int. Symp. on Rock Mech. Related to Dam Foundations - Rio de Janeiro, 1978.

(4) Murillo D. Ruiz - "Shear Strength Characteristics of Discontinuities" Panel Report Int. Symp. on Rock Mech. Related Dam Foundations - Rio de Janeiro, 1978.

lhos publicados em 1978 (5) o qual foi traduzido para o português e está sendo adotado pelos especialistas brasileiros. Em segundo lugar tal modelo deve indicar os principais parâmetros geotécnicos das diversas camadas. Tais parâmetros seriam obtidos a partir dos ensaios correntes de Mecânica das Rochas ou por experiência própria. Alguns métodos para esses ensaios já foram elaborados pela mesma Comissão de Padronização da I.S.R.M. (6); mas, não existe ainda uma padronização para esses ensaios adotada pelo conjunto de especialistas latinoamericano; embora participem de sua elaboração.

Permitam-se tomar como exemplo, o caso particular de Tucuruí que é o que conheço melhor. Nesse caso o estudo das condições geomecânicas do maciço rochoso da fundação da Tomada D'Água foi feito na seguinte sequência: a) descrição dos tipos de descontinuidades que ocorrem no maciço rochoso; b) estudo do ângulo de atrito médio necessário em planos sub-horizontais ao longo de prováveis descontinuidades; c) estimativa do ângulo de atrito da descontinuidade baseado em bibliografia; d) considerações sobre o comportamento do maciço e previsão de necessidade de ensaios mecânicos.

As descontinuidades principais do maciço eram: a) descontinuidades de baixo mergulho, provavelmente associadas a uma falha de empurrão existente no local, com preenchimento argiloso e baixa área de contato rocha x rocha. Pode-se afirmar, em base das sondagens, 5 cm de intervalo médio entre essas descontinuidade e mergulhos de 10 a 30° NE; b) falhas sub-verticais, com presença de brechas constituidas por fragmentos e matriz argilosa de espessura de 1 a 2 m, dispostos transversalmente ao eixo da barragem; c) sistema de juntas sub-verticais normais ao eixo da barragem, associada às descontinuidades de baixo mergulho.

A estimativa do ângulo de atrito foi feita, pelo método de Barton mas, como foi dito anteriormente, esse método ainda não é de aceitação padronizada pelos especialistas, embora publicado pela I.S.R.M. (6). Não se leva em conta, nessa estimativa, a presença do preenchimento das descontinuidades. Por isso, no caso da Tomada D'Água de Tucuruí, admitiu-se que o ângulo de atrito real se aproximaria do valor mínimo da fórmula (7).

(5) I.S.R.M. - "Suggested Methods for the Quantitative Descriptions of Rock Masses" - Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts - Vol. 15, nº 6, 1978 Tradução Brasileira - "Métodos para descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos" - Tradução nº 12 - ABGE - Comitê Brasileiro Mecânica das Rochas - São Paulo, 1981.

(6) I.S.R.M. - Comm. on Testg methods - "Rock Characterization Testing and Monitoring" - Pergamon Press, 1981.

(7) Consórcio ENGEVIX/THEMAG - "Análise Preliminar do Maciço Rochoso de Fundação da Tomada D'Água - TUC-10-4090-RE - Não Publicado.

No caso das fundações do Vertedouro de Tucuruí, devido a maior complexidade do maciço rochoso, com sistemas de juntas formando cunhas, foi adotada uma metodologia diferente; descrita por Bertin Neto, Bastos e Basso, em trabalho apresentado ao 3º Congresso Brasileiro de Geologia da Engenharia, realizado em 1981 (8). O problema nesse caso é tridimensional e, para reduzi-lo a plano adotou-se o método de Kovari e Fritz que permite determinar os parâmetros de resistência a cisalhamento, considerando um efeito de cunha. O plano dito "equivalente" contém a ares-ta da cunha.

Pois bem, uma vez concebido o modelo geomecânico de um maciço rochoso e fixados seus parâmetros de resistência e compressibilidade, vem a fase da análise da estabilidade da fundação sobre o mesmo: a capacida-de de suportar cargas verticais de um maciço rochoso não apresenta, em geral, problema. Entretanto, a de suportar cargas horizontais é, sem-pre problemática (1). A análise, pelo método clássico, da segurança ao escorregamento ao longo de uma superfície que, tanto pode ser a superfície de contato fundação x maciço, como ao longo de uma descontinuidade julgada crítica, é feita comparando-se as forças atuantes, descontadas as sub-pressões, sobre a superfície de deslizamento, com as forças re-sistentes, ao longo da mesma, calculadas por meio de parâmetros obtidos em ensaios de ruptura, ou estimados em base a experiência anterior, não importando as deformações necessárias para as obter.

Evidentemente, o bom sucesso desses cálculos não está só no cálculo mas, também, no preparo das fundações para que o maciço rochoso ve-nha a comportar-se o mais possível de acordo com o que se imaginou du-rante o projeto. Como esse preparo deva ser realizado no caso das fundações sobre rocha, focalizando em especial as estruturas da Usina de Tu-curuí, foi relatado ao 4º Congresso Brasileiro de Geologia da Enge-haria, realizado em Belo Horizonte em 1984, em dois trabalhos dos Geólo-gos Matos, Sathler, Bull e Mesquita (10).

Mais tarde, em trabalho apresentado por Nieble e Bertin Neto, ao Congresso de Melbourne, 1983 (9), os casos de Itaipú e Tucuruí foram re-tomados já agora relatando a evolução, durante o projeto e a constru-ção, dos respectivos modelos geomecânicos.

Por outro lado, a aplicação do método dos elementos finitos, no cálculo de tensões e deformações do contínuo formado pela estrutura mais o maciço rochoso, permite levar em conta qualquer geometria da se-ção transversal em estudo, a rigidez entre a estrutura e sua fundação, a heterogeneidade e anisotropia do maciço e a presença de descontinui-dades, quais que sejam elas e suas posições. Por esse método podem-se calcular as tensões e deformações em qualquer ponto do conjunto barra-gem-maciço sob qualquer que for o carregamento.

(8) S. Bertin Neto; A. C. Bastos e I. J. Basso - "Modelos Geomecânicos das Fundações do Vertedouro da UHE Tucuruí" - Anais 3º Congresso Brasileiro Geologia da Engenharia - Itapema, SC - 1981.

(9) C. M. Nieble e S. Bertin Neto - "Conceptual Geomechanical Models: Their Evolution During the Design and Construction of Dams" - Proc. Int. Cong. Rock Mechanics - Mel-bourne, 1983.

(10) Mattos, G.; Sathler, G.; Bull, J. F. e Mesquita, J. B. - "Influênci-a do Zoneamento nos Critérios Executivos de Prepa-ro de Fundação".

Entretanto, só em alguns casos particulares é possível restringir-se os cálculos a uma análise considerando somente materiais elásticos lineares, definidos pelos módulos de elasticidade normal e transversal e coeficiente de Poisson de cada uma das camadas. Na maioria dos casos os maciços são cortados por descontinuidades e, então, é necessário considerar um comportamento elasto-plástico do maciço, pois aparecem grandes deformações e pequena resistência ao longo dessas descontinuidades. Então aparecem parâmetros de resistência e compressibilidade peculiares a essas descontinuidades. Além do atrito e coesão ao longo das mesmas, já mencionadas, será necessário considerar a rigidez normal e a de cisalhamento ao longo dessas superfícies, como funções da pressão normal  $\sigma$ . Ruiz, Ré, Celestino e Buosi, fizeram um excelente estudo dos valores desses coeficientes para o caso dos basaltos correspondentes de barragens brasileiras (11), em trabalho ao 1º Congresso Brasileiro de Geologia da Engenharia, em 1976.

Um bom exemplo de aplicação desses tópicos de Mecânica das Rochas ao cálculo de estabilidade de barragens foi relatado no "Simpósio Inter-nacional de Mecânica das Rochas em Relação às Fundações de Barragens", pelos Engs. Infantti, Kanji, Kneese, Ré e Tagliatella, a respeito da fundação, sobre maciço basáltico de formação complexa, da Tomada D'Água da Usina Hidrelétrica de Água Vermelha, no Brasil (12).

No modelo geomecânico adotado para o cálculo há duas juntas que representam as descontinuidades mais importantes da fundação. Elas limitam um basalto denso superior e inferior de uma camada horizontal de lava conglomerática e basalto visicular. A primeira junta é sub-horizontal continua com infiltrações de argila siltosa ou areia siltosa, lisa, com pequenas irregularidades e ondulações com uma abertura média de 2 cm, altamente permeável. A segunda é sub-horizontal, na transição entre o basalto visicular e o basalto denso inferior, com preenchimento argiloso descontínuo, espessura de 2,5 cm, sob uma certa região da Tomada D'Água e, sem preenchimento e fechado no restante.

Para a determinação da resistência à cisalhamento e módulos de rigidez das juntas foram feitos ensaios de laboratório sobre umas testemunhas de 20 cm de diâmetro, obtidas por sondagens rotativas, e ensaios de cisalhamento direto feitos numa galeria de inspeção escavada sob o local da estrutura. O ângulo de atrito da junta 1 levando em conta a contribuição das ondulações foi fixado em 20 a 25°. Mas, um cálculo clássico de estabilidade ao deslizamento ao longo dessa junta mostrou ser necessário um ângulo de atrito de 35° para segurança com fator 1,5. O ângulo de atrito da junta 2 foi estimado entre 35 e 45° por inspeção direta durante a escavação para fundação da estrutura. Isto seria suficiente para a estabilidade, numa análise clássica.

- 
- (10) Idem - "Critérios de Preparo de Fundação em Rocha Aplicados na Usina Hidrelétrica de Tucuruí". Anais 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia - Belo Horizonte, M.G. - 1984.
- (11) M.D. Ruiz, G. Ré, T.B. Celestino e M.A. Buosi - "Síntese das Características Geomecânicas de Maciços Basálticos como Fundação de Barragens" - Anais do 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia - Rio de Janeiro - 1976.
- (12) N. Infante, M.A. Kanji, F. Kneese, G. Ré e E. Tagliatella - "Slidings Stability Analysis of Água Vermelha Intake-Powerhouse Structure" - Proc. Int. Symp. Rock Mech. Related to Dam Foundation - Rio de Janeiro - 1978.

Com esses dados, foi elaborada uma análise da estabilidade por elementos finitos, considerando várias hipóteses de melhoria do atrito da junta 1, por injeções ou remoção parcial dessa e escavação de galerias de drenagem para redução da sub-pressão. Por essa análise chegou-se ao dimensionamento final onde os ângulos de atrito mobilizados ao longo das duas juntas eram compatíveis com os valores limites estimados.

Ponto muito importante da análise da estabilidade é o da determinação das sub-pressões hidráulicas na base da fundação. É clássico considerar-se, nessa determinação, o diagrama proposto pelo U.S. Bureau of Reclamation pelo qual se admite que uma cortina de drenagem à montante reduzirá a sub-pressão, controlada pelo nível d'água de montante. Será reduzida de 2/3 da diferença dos níveis e crescerá linearmente até o nível d'água à jusante da estrutura.

No Congresso de Mecânica das Rochas Relacionada com Fundações de Barragens (Rio de Janeiro, 1978) Paulo Cruz e Ricardo da Silva (13) relataram a experiência brasileira, obtida na observação de 16 estruturas de concreto em sete barragens, em operação desde três até quinze anos, sobre maciços basálticos com descontinuidades sub-horizontais, associadas a fendas verticais. A conclusão é que o efeito da cortina de injeção à montante foi um pouco maior que o indicado pelo U.S.B.R., isto é: redução de 4/5 em vez de 2/3 da diferença de nível d'água entre montante e jusante. Em planos sub-horizontais de descontinuidades, no caso em que haja drenos que a interceptam, a porcentagem de sub-pressão varia com a profundidade da descontinuidade considerada e com a relação entre o comprimento da estrutura e a altura d'água à montante. Nos casos estudados por Paulo Cruz e Ricardo da Silva, onde a descontinuidade horizontal estava a uma profundidade entre 30 e 40% de altura d'água à montante, observou-se uma sub-pressão na vertical do dreno de cerca de 60% da altura d'água mais profundidade da descontinuidade.

O cálculo para previsão da ordem de grandeza dessas sub-pressões foi feito, no passado, por meio de método da "Rede de Fluxo", de Casagrande. Era uma aproximação grosseira pois se imaginava que a percolação da água através dos sistemas de fraturas, juntas e diaclases, pudesse ser assimilado a uma percolação homogênea, através de poros uniformemente distribuídos no maciço. Este método foi aplicado com relativo sucesso para estimativa das sub-pressões e vazão de percolação sob as fundações das estruturas dos vertedouros das Usinas de Jupiá e Ilha Solteira, no Rio Paraná (14). Esses casos estão incluídos no estudo anterior de Paulo Cruz e Ricardo da Silva; mas, a análise a que me refiro, aparentemente, não foi do conhecimento daqueles autores. Trata-se de maciços basálticos com descontinuidades horizontais e juntas verticais o que conferia ao maciço um comportamento anisotrópico em relação à percolação. Admitiu-se que a relação dos coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical era a mesma que a dos números de fendas horizontais e verticais, por metro linear. Uma comparação dos resultados desses cálculos com os dados observados, mostrou boa concordância entre as vazões previstas e as reais.

Atualmente tal cálculo de percolação é feito pelo método dos elementos finitos; como por exemplo, foi feito no caso da Barragem de Águas

(13) P.T. Cruz e R.F. da Silva - "Uplift Pressures at the Base and in the Rock Basaltic Foundations of Gravity Concrete Dams"- Int. Symp. on Rock Mech. Related to Dam Foundations - Rio - 1978.

(14) M. Vargas - "Escoamento d'Água em Meios Porosos Fissurados - Aspectos Geotécnicos do Problema" - V Encontro Escoamento em

Vermelha, acima citado. Abriu-se ainda, mais recentemente, com trabalho do Eng. F.Q.S. Kneese, a possibilidade de estudo conjunto, pelo método dos elementos finitos, da estabilidade e da percolação d'água nos problemas de fundação de estruturas hidráulicas sobre maciços rochosos (15).

Como já foi mencionado, essa experiência brasileira refere a maciços de rochas ígneas ou metamórficas fraturadas porém densas. Só muito recentemente vem aparecendo referências a casos de fundação de estruturas pesadas sobre rochas brandas na América do Sul, embora a ocorrência de tais maciços seja frequente entre nós.

Evidentemente, o que se põe, como problema inicial, é a do estabelecimento de modelos geomecânicos para tais maciços, geralmente de rochas sedimentares, desde as mais duras até as muito fracamente cimentadas. Uma contribuição de valor inestimável para a solução desse problema fomos dado no Congresso de Bogotá, pelo Eng. Alberto S. Nieto, quando esse apresentou seu excelente relatório do estado dos conhecimentos sobre a caracterização geotécnica dos maciços de rocha branda (16), o qual é uma notável e original contribuição ao assunto. Suas conclusões podem e devem servir de base a qualquer eventual aplicação às obras de engenharia civil fundadas sobre maciços de rocha branda.

A experiência brasileira de fundações sobre maciços de rocha branda é ainda, muito restrita. O primeiro estudo que tenho notícia está sendo feito pela equipe do Eng. Mutillo D. Ruiz, da THEMAG Engenharia, para as fundações da Barragem de Carolina, sobre o Rio Tocantins (17). Trata-se de um maciço rochoso pertencente à formação Pedra do Fogo, de idade permeana, constituída por camadas maciças de siltitos, argilitos intercalados por arenitos.

A questão dos modelos geomecânicos de maciços de rocha decomposta (note-se que estou me referindo a rochas decompostas e não a solos de alteração de rocha) é ainda menos solucionada. Entretanto, no I Congresso Sulamericano de Mecânica das Rochas, o nosso colega Sadowski apresentou um trabalho, sobre o qual poderão ser baseados os futuros modelos geomecânicos de tal material (18). É o caso que, em outra ocasião, propus chamar de uniformemente desuniforme. Isto se dá quando as médias das

---

#### Meios Porosos - Rio, 1977.

- (15) Kneese, F.Q.S. - "Aplicações do Método dos Elementos Finitos a Estudos conjuntos de Percolação e Estabilidade" - 1º Simpósio sobre Sistemas Computacionais para Engenharia Civil - COPPE, Rio, 1977.
- (16) A.S. Nieto - "Caracterización Geotecnica de Maciços de Roca Blanda" - Estado del conocimiento. Anais I Congresso Suramericano de Mecanica de Rocas - Bogotá, 1982.
- (17) THEMAG Engenharia - "Estudo de Inventário do Médio Tocantins. Sítio Carolina. Eixo Carolina. Características Geomecânicas do Maciço Rochoso" - 1985 - Não publicado.
- (18) G.R. Sadowski - "Algunas consideraciones sobre la cartografía geológica de rocas fracturadas meteorizadas" - Anais I Congresso Suramericano Mecanica das Rocas - Bogota, 1982.

propriedades mecânicas e as orientações predominantes das decontinuidades, são as mesmas em várias regiões do maciço, escolhidas ao acaso. Há, portanto, nesse caso a intervenção de análises estatísticas, como muito bem ressaltou Sadowski em seu trabalho.

Dentre os outros três trabalhos apresentados a 1<sup>a</sup> Sessão de Congresso de Bogotá e dois outros apresentados a 2<sup>a</sup> Sessão: "Fundações em Rocha", quero chamar a atenção dos interessados sobre dois deles, pois que constituem contribuição valiosíssima ao problema da concepção de modelos geomecânicos; que consideramos questão básica na solução de problemas de engenharia civil aplicada às fundações de estruturas, sobre maciços rochosos. Refiro-me aos trabalhos do Prof. Costa Nunes (19) e R. Sancio (20) apresentados àquele Congresso como constituindo contribuição valiosa à Engenharia Civil de fundações sobre rocha. O primeiro trata dos processos de melhoramentos das propriedades dos terrenos de fundação (inclusive maciços rochosos) por meio de armação ou protenção mediante vários tipos de ancoragem. A experiência obtida pela equipe do Prof. Costa Nunes nesse tipo de melhoramento da resistência dos maciços rochosos merece toda nossa atenção. O trabalho do Eng. Sancio é especificamente sobre aplicação da Mecânica das Rochas ao problema de Engenharia Civil de projeto e construção de fundação de estruturas que fazem parte de um complexo hidroelétrico reversível, sobre o Rio Grande próximo de Córdoba, Argentina, a cerca de 700 km a noroeste de Buenos Aires. O modelo geomecânico original foi concebido em base a observação durante escavações subterrâneas que serão mencionadas em capítulo posterior deste Relatório. Para as fundações superficiais, aqui mencionadas, o modelo original foi adaptado às condições encontradas nas diversas estruturas. Trata-se da fundação da estrutura de concreto da Tomada D'Água principal e de duas barragens principais de material solto, denominados respectivamente "Presa Lateral de Margem Derecha" e "Presa Principal Cerro Pelado".

A estrutura de concreto da Tomada D'Água foi fundada sobre um maciço cujo modelo geomecânico era semelhante ao original, concebido através das escavações subterrâneas. É um maciço denso com diaclases verticais e sub-verticais fechadas, com uma fratura ondulada paralela à superfície com espessura de alguns centímetros. Afora pequenos problemas relacionados com essa fratura e com a abertura de diaclases sub-verticais na parte superior do maciço, nada de extraordinário aconteceu em relação a essa obra.

Deixo de comentar a parte referente às fundações das duas barragens de material solto, mencionadas no trabalho do Eng. Sancio — assim como não comentei casos de fundações de barragens de terra e encoramento, que aparecem nos anais dos diversos congressos acima referidos — porque essas constituem problemas mais atinentes à Geologia da Engenharia que à Mecânica das Rochas.

Finalmente, gostaria de terminar este capítulo referindo-me a comparação entre recalques e deslocamentos horizontais observados, em função

(19) A.J. da Costa Nunes - "Mejoramiento y esfuerzo de roca" - Anais I Congresso Suramericano Mecanica das Rocas - Tomo II - Bogotá, 1982.

(20) R.J. Sancio - "Características geotécnicas de las fundaciones del complejo hidroeléctrico Rio Grande nº 1" - Córdoba, Argentina - I Congresso Suramericano Mecanica das Rocas - Tomo II - Bogotá, 1982.

dações de barragens sulamericanas, com os calculados — a partir de modelos geomecânicos e parâmetros obtidos pelos processos acima mencionados — pelo método dos elementos finitos. Infelizmente nos anais de congressos à minha disposição só encontrei um caso. O da Barragem de Itaipu, relatado por Abrahão, Silveira e Paes de Barros, no congresso internacional de Melbourne (21). O trabalho relata as observações feitas durante um enchimento preliminar do reservatório, quanto as vazões de drenagem e os recalques das estruturas. As vazões de drenagem observadas depois do enchimento eram muito menores que as calculadas; mas os recalques reais aproximaram-se aos valores mínimos calculados. O trabalho mostra ainda as curvas tensão x deformação obtidas nos extensômetros, para as três camadas principais que formam a fundação. Por essas observações pode-se concluir que enquanto o módulo de elasticidade admitido para a camada de basalto denso era de 20 GPa, o observado foi de 5,5 GPa; para o basalto vesicular e a brecha o admitido foi de 10 GPa e o observado 7 GPa. É possível que a diferença encontrada para o basalto denso seja devido ao fato dessa camada ser superficial e, portanto, sujeita a perturbações de construção. Os pêndulos invertidos instalados nas fundações dos blocos mais altos da barragem não indicaram nenhum deslocamento horizontal. Finalmente, os cálculos indicavam tensões de tração no maciço rochoso a montante da fundação de até 2 MPa; a serem induzidas pelo enchimento preliminar; porém, não se observou nenhuma evidência de fendas por tração que correspondesse a tal pressão.

#### ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Também neste capítulo das aplicações da Mecânica das Rochas à engenharia civil de escavações subterrâneas em rocha, nos restringiremos a relatar trabalhos, artigos e comunicações sobre obras desse tipo publicados, na América do Sul, durante ou após o "1º Congresso Suramericano de Mecânica de Rocas". Somente em caso de absoluta necessidade nós referimos a publicações anteriores.

Contudo creio que não é possível apresentar-se um relatório sobre o estado dos conhecimentos dessa tecnologia sem primeiro, comentar a situação do que se sabe sobre a classificação dos maciços rochosos, tendo em vista a previsão de sua capacidade de auto-suporte, ou as pressões que exerceriam sobre os suportes provisórios ou permanentes dos túneis. Essa foi uma das questões com as quais tiveram início os estudos da Mecânica das Rochas, quando em 1946, apareceu o célebre manual dos "Liner Plates", como suportes de túneis, em cujo capítulo inicial Terzaghi apresentou sua classificação dos maciços rochosos, em relação aos suportes de túneis.

A classificação dos maciços rochosos para a engenharia, projeto e construção de túneis, porém, só veio a se estabelecer definitivamente no trabalho de Barton, Lien e Lunde, publicado na "Rock Mechanics" de dezembro de 1974, quase trinta anos depois de Terzaghi, e um ano após a publicação da célebre classificação dos maciços rochosos fraturados de Bieniawski. Essa classificação parte do índice RQD (rock quality designation) proposto por Don Deere em 1963 e agrupa a esse mais cinco índices, correspondentes ao número de juntas, asperezza das juntas e, grau de alteração do material de enchimento das juntas mais fracas, em conjunto

(21) R. Abrahão; J.F.A. Silveira e F. Paes de Barros - "Itaipu Main Dam Foundations: Design and Performance During Construction and Preliminary Filling of the Reservoir" - Proc. 5th Int. Cong. Rock Mech., Melbourne, 1983.

com parâmetros correspondentes aos pesos de rochas e percolação d'água.

Entretanto a classificação de Barton, Lien e Lunde, apesar de muito detalhada, ou talvez justamente por isso, não encontrou muita aceitação entre os nossos geotecnologistas, os quais mostram uma preferência nítida sobre a menos complexa, elaborada por Bieniawski, para o CSIR - Consil for Scientific and Industrial Research - da África do Sul.

A aplicação das classificações geotécnicas dos maciços rochosos aplicados ao projeto e construção de obras lineares, tais como os túneis, é até hoje muito discutida. Veja-se, por exemplo a discussão desse problema feita, por Mello Mendes, da Universidade Técnica de Lisboa em colaboração com o Geólogo Ojima, do I.P.T. de São Paulo, no 4º Congresso da Associação Internacional de Geologia de Engenharia, realizado em New Delhi, em 1982 (22).

Aliás as classificações geotécnicas baseadas em parâmetros e propriedades mecânicas das rochas não são as preferidas por grande número de Geólogos. Esses preferem as classificações dos maciços rochosos de acordo com sua gênese, isto é: sua litogia e estrutura e com sua história, isto é: suas descontinuidades de origem tectônica ou meteológica. Um exemplo de tais classificações é, por exemplo o apresentado pelos geólogos soviéticos, ao Congresso de New Delhi (23).

No seu relatório do estado do conhecimento, sobre "Escavações Sub-superficiais en Roca Blanda", apresentado ao 1º Congresso Suramericano de Mecânica de Rocas, o Eng. A. Marulanda (24) deu mais ênfase aos aspectos consultivos da questão, embora especialmente "não aos últimos programas de computador ou análises numéricas"; mas sim, aos critérios que se devem enfocar nos processos do projeto", referindo-se especialmente aos túneis em rocha branda. Sua aproximação ao problema é, portanto, a de um projetista; isto é: interessa-se pelo cálculo, pelas especificações e informações que dêm ao construtor elementos suficientes para bem realizar a obra. So aborda itens construtivos quando esses são diretamente ligados ao projeto, sem entrar em detalhes de execução. Não creio, que da data desse relatório até hoje, tenha havido maiores desenvolvimentos nos métodos clássicos de projeto de túneis em rochas brandas.

Entretanto o outro aspecto, de projeto de túneis, não mencionado no relatório em questão, é o emprego da simulação por elementos finitos. Essa questão foi muito bem definida por Kochen, Negro, Heinz Jr. e Rottman (25), em trabalho apresentado ao 2º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, realizado em Rio de Janeiro, em 1985. O método permite uma extensão ao comportamento não linear de escavações, considerando plastificação do maciço.

---

(22)Melo Mendes; F. e Ojima; L.M. - "Geologic Rock Mass Classification Applicable to Tunnel Design and Construction" - Proc. IV C.I.A. Eng. Geol., New Delhi, 1982.

(23)Golodovskaya G.A.; Matuba, M.; Shaumjan, L.V. - "Engineering-Geological Classification of Rock Mass" - Proc. IV C.I.A. Eng. Geol., New Delhi, 1982.

(24)A. Marulanda - "Excavaciones Sub-superficiales en Roca Blanda" - I Congresso Suramericano de Mecanica das Rocas - Tomo I - Bogotá, 1982.

(25)R. Kochen; A. Negro Jr.; H. Keinz Jr. e E. Rottman - "Simulação de Escavações Subterrâneas por Elementos Finitos" - Anais 2º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas - Vol.I - Rio Janeiro, 1985.

Excelentes contribuições ao cálculo analítico dos problemas de Mecânica das Rochas, inclusive no caso de túneis, acham-se nos trabalhos apresentados ao item 2: "Numerical modelling of Rock Behaviour" do Tema E - "Special Topics in Rock Mechanics", do 5º Congresso International da I.S.R.M., realizado em Melbourne, em 1983.

Dentre esses os mais interessantes são os de Cunha (26) que mostra por elementos finitos como, no avanço dos túneis se distribuem as deformações radiais, ao se atingir o contato entre duas formações geológicas ou no cruzamento de uma falha. Isto é feito para mostrar como o maciço rochoso não dá nenhum aviso de uma eventual próxima deteriorização de suas características. O segundo é de Souza (27) sobre o cálculo tridimensional de grandes casas-de-força subterrâneas, incluindo comparações dos resultados de cálculo de uma caverna com modelos experimentais tridimensional e com observações no protótipo. O resultado dessa comparação é julgado razoável pelo autor; porém, as figuras e gráficos apresentados estão em escala muito pequena para ser julgado pelo leitor. Numa seção, o cálculo 3-D previa 3,6 cm de deslocamento e o observado foi de apenas 1,4 cm. Finalmente é de se mencionar o trabalho, apresentado aquele Congresso por Desai, Eitani e Haycocks (28) sobre a aplicação de elementos finitos às estruturas subterrâneas em maciços rochos com compressibilidade dos blocos e deformações das juntas não lineares. O que é importante nesse trabalho é que há o julgamento da comparação dos resultados calculados com os observados; por tal comparação observa-se que os deslocamentos calculados são da ordem de 25% dos observados, em dois extensômetros instalados na escavação de um túnel do "subway" de Atlanta. É interessante ainda mencionar que, nesse trabalho, é mencionada uma outra análise para a mesma obra, feita por Azzons, Schwartz e Einstein, em modelos 3-D e 2-D considerando maciço de material homogêno, cujos resultados são mais próximos dos observados.

O moderno método chinês do "bloco crítico" (29) foi exposto já no nosso 1º Congresso de Bogotá, pelo Geol. Salcedo (30) para avaliar a estabilidade de um túnel viário. Esse método tem a vantagem de mostrar que é possível estabilizar-se todo o maciço simplesmente pela fixação do bloco crítico. Entretanto, ele não se adapta no cálculo automático por com

(26) A.P. Cunha - "Analysis of Advancing Tunnels in Rock" - Proc. 5º Int. Cong. I.S.R.M. - Melbourne, 1983.

(27) L.R. Souza - "Three Dimensional Analysis of Large Underground Power Stations" - Proc. 5º Int. Cong. I.S.R.M. - Melbourne, 1983.

(28) C.S. Desai; I.M. Eitani e C. Haycocks - "An Application of Finite Element Procedure for Underground Structures with non-linear Materials and Joints" - Proc. 5º Int. Cong. I.S.R.M. - Melbourne, 1983.

(29) Shih Ken-Lua - "A Geometric Method of Stability Analysis of Rock Masses" - Academia Sinica - P.R.C. - Peking, 1978.

(30) D.A. Salcedo - "Evolution de la Estabilidad de Túneles en Macizos Rocosos mediante el método del Bloque Crítico" - Anais I Congresso Suramericano de Mecânica das Rocas - Tomo II - Bogotá, 1982.

putadores. No Congresso da I.S.R.M. realizado em Melbourne em 1983, Warburton (31) apresentou um trabalho introduzindo um método computacional para maciços rochosos em blocos e, com isso, chegou a um programa para o respectivo cálculo por computadores.

No I Congresso Suramericano de Bogotá foram apresentados trabalhos descrevendo a experiência adquirida na aplicação de Mecânica das Rochas ao projeto e construção de quatro obras importantes de escavações em rocha, realizados na América do Sul. Dois deles são no Brasil e referem-se aos túneis ferroviários de 50 km da Ferrovia do Aço e aos túneis e cavernas para armazenamento de água do Sistema Cantareira em São Paulo. Um refere-se às escavações da caverna para a central elétrica de São Carlos, na Colômbia, e o último a da central do Rio Grande, na Argentina.

No trabalho sobre os túneis da Ferrovia do Aço, no Brasil, Nieble (32) relata a elaboração da classificação geomecânica. Foram definidos 4 tipos de maciços rochosos sãos porém fraturados (quando a relação entre a resistência e a compressão simples e a tensão de compressão máxima  $\sigma_c/\sigma_{max} > 1$ ) designados como classes I, II, III (maciços sãos pouco fraturados) e classe IV (maciços sãos muito fraturados). O caso de maciços plastificáveis ( $\sigma_c/\sigma_{max} < 1$ ) é o das classes V, VI (saprolitos) e VII (solos residuais). A classificação é elaborada na etapa preliminar e revisada durante a execução da obra. Durante essa etapa foi correlacionada com o método executivo (NATM) por meio de instrumentação. Tratam-se de 70 túneis pouco profundo em rocha metamórfica, material de transição e solo residual, portanto, a importância da classificação para definição dos métodos de cálculo e de construção é primordial. Somente posteriormente é que foram elaborados cálculos por elementos finitos, admitindo faixas de variação dos parâmetros, para verificação do dimensionamento e programação de construção à partir da classificação dos maciços. A classificação preliminar dos maciços consiste na adaptação de uma classificação geral — provavelmente a de Bieniawski — às condições locais, por meio de sondagens e investigações geológicas, levando em conta a grandeza das solicitações provenientes da escavação. A revisão dessa classificação durante a fase executiva é feita em base a observação sistemática das escavações e do comportamento do maciço, apoiadas em instrumentação para esse fim instalada. Essas observações permitirão não só confirmar um comportamento normal esperado como, também, detetar situações anômalas a serem corrigidas pela adoção de novas medidas de estabilização. Finalmente, o trabalho descreve os resultados das observações feitas durante a escavação no sentido de revisar dinamicamente o projeto. Verificou-se a variação do comportamento (deslocamento pela passagem da frente de escavação) das diferentes classes de maciços em relação à litologia, especialmente a grande variabilidade dos deslocamentos observados nos filitos das classes mais brandas.

---

(31) P.M. Warburton - "Application of a New Computer Model for Reconstructing Blocky Rock Geometry Analysis Single Block Stability and Identifying Keystones" - Proc. 59 Cong. I.S.R.M. - Melbourne, 1983.

(32) C.M. Nieble - "Proyecto e Ejecución de Túneles Poco Profundos en Sueños, Materiales de Transición y Roca" - Anais I Congresso Suramericano de Mecânica das Rochas - Tomo II - Bogotá, 1982.

As informações acima foram complementadas por dois trabalhos apresentados ao 1º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas realizado no Rio de Janeiro, dez dias antes do Congresso de Bogotá. O primeiro deles é de Nieble e Serman e versa sobre observação, instrumentação e interpretação daquela obra (33) e o segundo é de Davidovitsch, Amaral, Serman e Garcia e versa sobre a caracterização geomecânica dos maciços atravessados pelos túneis da Rodovia do Aço (34).

Furro

A segunda obra brasileira, envolvendo escavações subterrâneas, relatada ao I Congresso de Bogotá é a de um reservatório subterrâneo para 400.000 m<sup>3</sup> de água tratada, para o abastecimento de São Paulo (35). Essa obra pertence ao Sistema de Abastecimento d'Água Cantareira, constituído por seis barragens, cinco reservatórios, sete túneis de adução, três canais de ligação, uma estação elevatória e uma estação de tratamento, para aduzir mais 33 m<sup>3</sup>/sg de água tratada ao abastecimento de São Paulo. Aliás essa comunicação prende-se a dois outros trabalhos apresentados ao 3º Congresso Brasileiro de Geologia da Engenharia. O primeiro é próprio Fujimura (36) e relata a experiência adquirida no acompanhamento técnico da escavação do Túnel nº 7 do mesmo sistema. O segundo é de Mello Filho, Vaz, Vêncio e Marino (37) refere-se ao mesmo Túnel nº 7. Por esses trabalhos fica-se sabendo que inicialmente foi feita uma classificação preliminar dos maciços rochosos, envolvidos pela obra, adaptando-se a classificação de Bieniawski à situação local, tendo em vista: investigações geológicas de superfície, mapeamentos regionais, pequena quantidade de sondagens rotativas, análises petrográficas e ensaios sísmicos. Depois de escavadas várias seções do túnel foi feita uma revisão dessa classificação inicial. Baseando-se nessa última é que era fixada a proteção a ser utilizada, seja por atirantamento, concreto projetado, cambotas ou concreto moldado, conforme a classe do maciço. E de se notar que observaram-se imprecisões e necessidade de julgamento subjetivo na classificação de material intermediário, particularmente nos materiais de transição.

Uma outra obra brasileira que julgo necessário mencionar neste Relatório é a das Cavernas Subterrâneas da Usina Hidroelétrica de Paulo Afonso, sobre o Rio São Francisco no limite entre os estados da Bahia e Alagoas. No 1º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, realizado no Rio

- (33) Nieble, C.M. e Serman, C. - "Observação, Instrumentação e Interpretação da Obra" - 1º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, Vol. 1 - Rio de Janeiro, 1982.
- (34) Davidovitsch, A.D.; Pinheiro Amaral, L.A.; Serman, C. e Garcia, R.P. - "Classificação e Caracterização Geomecânica de Maciços Aplicada aos Túneis da Ligação Ferroviária B. Horizonte - São Paulo (Ferrovia do Aço)" - 1º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas. Vol. 1 - Rio de Janeiro, 1982.
- (35) F. Fujimura - "Reservatório Subterrâneo de Água Tratada: uma Solução Econômica e Viável para Abastecimento de Grandes Centros Urbanos" - Anais do I Congresso Suramericano Mecanicas das Rocas - Bogotá, 1982.
- (36) F. Fujimura - "A Importância do Acompanhamento Técnico em Escavações Subterrâneas" - Anais 3º Congresso Brasileiro Geologia da Engenharia - Itapema, SC, 1981.
- (37) P. Silva Mello Fº, L.F. Vaz; F.N.C. Vêncio e O. Marino - "Estudo Comparativo entre as Fases do Projeto Interligação Jaguari-Cachoeira" - Anais do 3º Congresso Brasileiro Geologia da Engenharia - Itapema, SC, 1981.

de Janeiro, em 1982, Giacomo Ré, Slongo e Taniguchi (38) apresentaram um trabalho onde relatavam os "critérios gerais que nortearam o desenvolvimento do projeto das escavações subterrâneas da Usina de Paulo Afonso IV, bem como acompanhamento da construção, principalmente, no que concerne à observação do comportamento do maciço rochoso através de instrumentação". Esse trabalho é complementado por um outro a ser apresentado num próximo simpósio em Helsinki (39).

O aproveitamento hidroelétrico de Paulo Afonso é constituído por quatro cavernas de forças, escavadas em rochas metamórficas com intrusão de um granito, cortadas por várias descontinuidades — que podem ser agrupadas em descontinuidades de contato e descontinuidades estruturais. Aliás, diga-se de passagem que, durante a escavação da Caverna de Paulo Afonso I, é que se inaugurou no Brasil a aplicação da Mecânica dos Solos aos problemas de Engenharia Civil com dois ensaios de pressão d'água, em câmara escavada para esse fim e vários ensaios de alívio de pressões, feitos pelo I.P.T. de São Paulo, sob a orientação de Ernesto Pichler (40). Esta foi a primeira grande obra hidroelétrica, inteiramente projetada e construída por engenheiros brasileiros, de 1949 a 1955.

Um trabalho sintetizando os procedimentos técnicos e as soluções adotadas nas quatro cavernas das Usinas de Paulo Afonso foi comunicado por Limeira (41) ao 2º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, realizado no Rio de Janeiro em 1985. Por esses trabalho fica-se sabendo que as cavernas de Paulo Afonso foram escavadas em maciço rochoso de biotita-xistos, anfítolitos e granito, altamente metamorfizados, de idade pré-colombiana. As descontinuidades do maciço são, no local da caverna de Paulo Afonso IV, consubstanciadas em quatro famílias de falhas e quatro, de fraturas e diaclases.

Primeiramente foi concebido, em face dos conhecimentos que se tinha do maciço, um sistema de suporte e revestimento constituído por ti-rantes injetados, simples chumbadores e concreto projetado. Esse esquema e os estudos geomecânicos forneceram os parâmetros para a elaboração de um modelo matemático o qual foi processado pelo método dos elementos finitos, sob a simulação das diversas situações de carregamento. Ao mesmo tempo foi feita a observação do comportamento do maciço em escavação por meio de instrumentos de medidas, possibilitando-se assim a

- 
- (38) Ré, G.; Slongo T.T. e Taniguchi, L. - "Usina Paulo Afonso IV. Critérios de Projeto e Comportamento do Maciço Rochoso durante a Construção" - Anais 1º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas - Vol. 1, Rio de Janeiro, 1982.
- (39) Ré, G. e Zondine, E. - "Paulo Afonso IV Cavern Support System and Construction Monitoring" - a ser apresentado ao Congresso "Large Rock Cavern" a ser realizado em agosto de 1986 em Helsinki.
- (40) Pichler, E. e de Campos, F.B. - "Rock Characteristics at the Paulo Afonso Plant" - Journ. Soil Mech. Div. Proc. ASCE - Vol. 85 SM-4, Aug. 1959.
- (41) Limeira, F. - "Técnicas e Soluções construtivas utilizadas nas Escavações Subterrâneas das Usinas da CHESF em Paulo Afonso" - Anais 2º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas - Rio de Janeiro, 1985.

revisão do modelo de cálculo. O resultado dos cálculos das deformações das paredes da caverna, em comparação com os observados por meio de extensômetros múltiplos de haste ali instalados, mostram concordância muito adequada.

Os outros dois trabalhos sobre obras de escavação em rocha, apresentados ao Congresso de Bogotá foram, também, sobre cavernas de centrais elétricas. O primeiro é de Mejia, Lopes e Castañeda, sobre a caverna da Central de San Carlos, na Colômbia (42), o segundo é de Moreto, sobre a caverna da central do Rio Grande, na Argentina (43).

As escavações das cavernas da Casa-de-Força da Usina Hidroelétrica de São Carlos, na Colômbia — em maciço de rochas metamórficas paleozóicas e sedimentares cretaceas, com intrusões igneas — descritas por Mejia, Lopes e Casteñeda, foram projetadas em base a investigações geológicas e geotécnicas, consistindo de mapeamento, sondagens e galerias exploratórias — as quais permitiram a classificação do maciço rochoso pelo sistema de Barton, Lien e Lunde anteriormente citado. Tal classificação foi sendo revista e melhorada a medida que progrediam as escavações, aplicando-se análises estatísticas da orientação de fraturamento — do que resultou a identificação de um novo sistema de juntas, não identificado anteriormente. Analisaram-se as condições de estabilidade das cunhas de rocha conformadas pelo sistemas de falhas e diaclases e instalaram-se tirantes e chumbadores para garantir a estabilidade de várias delas, inclusive deixou-se de escavar um bloco de rocha para servir de apoio a outro.

Para controlar essas análises instalaram-se extensômetros que mediam os movimentos diferenciais dos blocos — os quais mostraram a necessidade de instalação, localizada em zonas críticas, de mais tirantes. Além disso, quando se iniciava a escavação da caverna executaram-se ensaios de carga sobre placas, com a finalidade de determinar os módulos de deformabilidade do maciço rochoso; ensaio de compressão simples sobre corpos-de-prova de rocha intacta, para determinação dos módulos de elasticidade; e ensaios de "sobreperfuração" e "doorstopper" para determinar as tensões residuais do maciço.

Em base a todos esses estudos foi projetado o sistema de suporte das escavações como consistindo de uma rede de tirantes espaçados de 1,5 m entre si, nas duas direções e instalados cerca de 10 horas após cada explosão. Esses tirantes agem conjuntamente com um tratamento de concreto projetado sobre uma malha de arame ligada às pontas dos tirantes. Entre as paredes da caverna principal e a dos transformadores foram instalados atrantamentos de 60 t para assegurar a estabilidade de ambas paredes.

O último trabalho a que me referirei neste capítulo é o de Moreto, sobre as aplicações da Mecânica das Rochas no projeto e construção do complexo hidroelétrico do Rio Grande, na Argentina. Trata-se da esca-

(42) Mejia, O.; Lopez, J.H. e Castañeda, R. - "Excavacion de cavernas para la central de San Carlos, Antioquia, Colombia" - 1º Congresso Suramericano de Mecánica de Rocas - Bogotá, 1982.

(43) Moreto, O. - "La Mecánica de Rocas para la central en caverna del Rio Grande" - 1º Congresso Suramericano de Mecánica de Rocas - Bogotá, 1982.

vação de caverna para casa-de-força em maciço de gneiss com diaclases subverticais fechadas e secas. Para determinar o estado de tensões residuais neste maciço foi utilizada a técnica de "sobreperfuração" (over-coring) — que consiste em executar uma perfuração de 1,5" e medir as deformações, do furo, provenientes do estado de tensões do maciço. Depois disso faz-se uma sobreperfuração concentrada com a anterioe, medindo-se as deformações a cada 1/2" de avanço. Repete-se depois o ciclo anterior avançando-se em profundidade com ambas perfurações. Finalmente faz-se ensaio bi-axial dos corpos-de-prova extraídos para determinar o módulo de deformabilidade da rocha. Com esses dados é possível calcular as tensões residuais. Os resultados obtidos foram, ainda, confirmados com o aparelho português-australiano do "cilindro sensível". Os valores das tensões principais iniciais, no maciço da caverna em questão, eram de -115 kg/cm<sup>2</sup> para a maior e -17 kg/cm<sup>2</sup> para a menor.

A determinação do módulo de deformabilidade do maciço foram feitos ensaios de carga direta em galeria, com placas suficientemente grandes para envolver o maior volume possível de maciço, controlando-se o fraturamento da rocha na escavação dessas galerias. Os módulos de deformabilidade tangentes obtidos em vários ciclos de carga, sob diferentes pressões, variavam de um mínimo de 300.000 kg/cm<sup>2</sup> a um máximo de ..... 750.000 kg/cm<sup>2</sup> no primeiro ciclo de carga e aumentavam ligeiramente nos ciclos subsequentes.

Com esses dados foram calculadas as deformações, provocados por cada uma das etapas de escavação, nas paredes e topo da caverna. Extensômetros ali instalados mediram esses movimentos e confirmaram as previsões, dentro de limites razoáveis.

No Congresso de Geologia da Engenharia, realizado em New Delhi, em 1982, Sarra Pistone e Del Rio (44), apresentaram uma comunicação sobre o tratamento das falhas principais encontradas no Túnel de Fuga desta mesma Central Elétrica do Rio Grande. O túnel atravessa duas formações: uma de gneiss denso; porém, o último km está situado num gneiss foleado. Ali, o túnel atravessa uma zona de falhas, associadas a uma intrusão no gneiss foleado, que necessitaram tratamento por injeções de cimento, gunitagem logo após o desmonte e ancoragens. Assim, embora a estabilidade do túnel tenha sido assegurada pelos resultados de análise por elementos finitos, apareceram alguns problemas, localizados em zonas de anomalias que necessitaram de tratamento especial.

#### ESTABILIDADE DE TALUDES

No 19 Congresso Suramericano de Mecânica de Rocas tive o prazer e a honra de apresentar o respectivo relatório de estado dos conhecimentos sobre estabilidade de taludes em rocha. Naquela ocasião procurei resumir os pontos principais do que tinha sido comunicado, sobre o assunto, em trabalhos apresentados em Congressos e Simpósios de Mecânica das Rochas e de Geologia da Engenharia, a partir de 1966. Dessa revisão tentei retirar dados para uma tentativa de classificação dos escorregamentos de rocha. Depois procurei sintetizar os métodos de cálculo de esta-

(44) Sarra Pistone, R.E.; Del Rio, J.C. - "Excavation and Treatment of the Principal Faults in the Tailrace Tunnel of Rio Grande I Hydroelectric Complex, Argentina" - Proc. IV C.I.A. Eng. Geol., New Delhi, 1982.

bilidade de taludes, até então conhecidos e, finalmente, procurei sintetizar os respectivos processos de estabilização.

Não creio que tivesse havido muito progresso na concepção clássica da estabilidade de taludes; porém, progresso houve nos métodos de cálculo automático. Por isso passo a relatar casos em que a Engenharia Civil sulamericana veio a aplicar princípios de Mecânica das Rochas, quando encarregada de resolver problemas relacionados com taludes em rocha, naturais ou artificiais. Restringir-me-ei aos casos mais notórios ocorridos na América do Sul, a partir dos relatados no Congresso de Bogotá, em 1982. Depois tentarei relatar os progressos alcançados entre nós nos conhecimentos dos métodos computacionais de projetos de taludes.

Antes de mais nada desejo chamar a atenção sobre a contribuição do Eng. Carrillo Gil (45) sobre os aludes e grandes deslizamentos que ocorrem no Peru e que lá se chama de "huaycos". São fluxos rápidos de enormes massas de milhares de m<sup>3</sup> de água, blocos de rocha, lava, neve e vegetação que se desprendem dos picos dos Andes e correm pelas quebradas das montanhas como efeito de chuvas violentas ou terremotos. São, assim, o tipo das avalanches. Sua grande velocidade de escorregamento e o longo e sinuoso caminho percorrido só pode ser explicado se considerarmos toda a massa deslizante liquefeita. Isto é todo o material deslizante, inclusive os grandes blocos, terem perdido virtualmente a resistência de atrito interno e coesão, por efeito de aparecimento repentino de pressões neutras na massa. Está provado que tal fenômeno pode-se dar não só em argilas e areias mas, também, em pedregulhos ou blocos de rocha envolvidos por solo fino ou neve, como resultado de movimentos violentos simultâneos com super-saturação da massa. O que exatamente acontece é o efeito de chuvas violentas sobre taludes íngremes ou terremotos.

É de se notar que, "mutatis mutandis", esse fenômeno é semelhante — a menos da escala de grandeza — aos grandes escorregamentos de terra que se registraram na Serra do Mar, após chuvas violentíssimas, em 1967 em Caraguatatuba, SP, e na Serra das Araras, RJ. Também aí o material deslizado estava de tal forma liquefeito que, no segundo local, pode penetrar numa casa-de-força subterrânea existente na base da serra, de introduzir-se entre as bobinas dos geradores. Uma investigação feita no primeiro local, mostrou que nos sedimentos costeiros, depositados recentemente até cerca de 20 km do pé da serra, encontrou-se a evidência de ciclos de sedimentação fluvial intercalados com material de escorregamentos periódicos em ciclos de cerca de mil anos (46).

Outra contribuição interessante ao Congresso de Bogotá é de autoria de Vardé e contém a descrição, a análise e as previsões para projeto de estabilização de encostas nas margens da barragem de Alicura, na Argentina. Um modelo geomecânico, elaborado em base a investigações geotécnicas, foi utilizado para o projeto de um sistema de drenagem associado a ancoragens e proteção da superfície do talude (47).

(45) Carrillo Gil, A. - "Analisis de Aludes y Grandes Deslizamientos en los Andes Peruanos" - Anais I Congresso Suramericano de Mecânica de Rocas - Bogotá, 1982.

(46) Fulnaro, V.J.; Poncano, W.L.; Bistriddi, C.A.; Stein, D.P. - "Escorregamentos de Caraguatatuba: Expressão Atual e Registro na Coluna Sedimentar da Planície Costeira Adjacente" - Anais 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, 1976.

(47) Vardé, O. - "Estabilidad de la margen izquierda de la presa Alicura" - 1º Cong. Suram. Mecânica de Rocas - Bogotá, 1982.

Ainda ao mesmo Congresso Diniz da Gama (48) apresentou um trabalho referente à metodologia a ser adotada nos cálculos de taludes, na fase de estudos de viabilidade econômica das minas escavadas a céu aberto. Finalmente, ao mesmo Congresso foram apresentadas duas interessantíssimas contribuições teóricas sobre estabilidade de taludes: a primeira de Gonzales (49), sobre modalidades de ruptura em taludes cinematicamente estáveis, e a segunda de Tinoco (50) sobre a teoria da resistência ao deslocamento e a estabilidade de taludes. São todas elas contribuições sulamericanas ao cálculo teórico de estabilidade de taludes em rocha que já estão sendo incorporadas ao nosso conhecimento coletivo sobre o assunto.

Permitam-me referir-me a uma minha própria contribuição ao Congresso de Bogotá, quando tentei sumarizar uma tentativa de classificação e mecanismos dos escorregamentos de terra e rocha em zonas tropicais, que venho a muitos anos tentando aperfeiçoar, a partir da experiência brasileira adquirida, desde 1928, com os escorregamentos da Serra do Mar (51). Aliás essa experiência brasileira já mereceu atenção internacional, com o capítulo "Landslides in Brazil", redigido por Costa Nunes, Couto-e-Fonseca e Hunt, para a obra "Rockslides and Avalanches" editada por Barry Voight, publicada na célebre série "Developments in Engineering", pela Elsevier.

Uma contribuição importantíssima sobre o comportamento de taludes artificiais escavados em rocha, foi apresentada por Adilson Luis Barbi ao 3º Congresso Brasileiro de Geologia da Engenharia, realizado em Itapema, SC, em 1981 (52). Trata-se da escavação feita em maciço de basalto fraturado para abertura do canal de desvio do Rio Paraná, para a construção da Usina de Itaipú. São taludes artificiais com inclinação 1:4 e bancadas (no trecho da estrutura de desvio a inclinação é de 1:20), com 80 m de altura média, numa extensão de 2 km. Foram instalados instrumentos para observação do comportamento desses taludes e do maciço adjacente, em virtude das dúvidas surgidas sobre seu comportamento sob o efeito das explosões intermitentes. Apesar de grandes dificuldades das observações, foi possível chegar à conclusão que "os movimentos do maciço rochoso se restringiram apenas aos provocados pelas vibrações devidas aos fogos e pelo reajuste das pressões hidrostáticas". Os deslocamentos

- (48) Diniz da Gama, C. - "Estabilidad de taludes rocosos en minas a cielo abierto" - 1º Congresso Suramericano Mecanica das Rocas - Bogotá, 1982.
- (49) Gonzalez, A. - "Modos de falha de taludes cinematicamente estables" - 1º Congresso Suramericano Mecanica das Rocas - Bogotá, 1982.
- (50) Tinoco, F. - "La teoria de resistencia y estabilidad de taludes" - 1º Congresso Suramericano Mecanica das Rocas - Bogotá, 1982.
- (51) Vargas, M. - "Clasificación y Mecanismos de Deslizamientos de Tierra y Roca en Zonas Tropicales" - 1º Congresso Suramericano Mecanica das Rocas - Bogotá, 1982.
- (52) Barbi, A.L. - "Comportamento do Maciço Rochoso em Função da Escavação do Canal de Desvio do Rio Paraná - Usina Itaipú" - Anais 3º Congresso de Geologia de Engenharia, Itapema, SC, 1981.

entre as âncoras dos tirantes e as suas cabeças, na superfície do talude, foram de apenas de 1 a 5 mm na entrada do canal; no trecho correspondente às estruturas de desvio, onde a inclinação era de 1:20, observaram-se deslocamentos maiores, de 25 a 12 mm. Na zona de jusante observaram-se deslocamentos grandes; inclusive num certo trecho, onde eles atingiram de 25 a 40 mm. Nesse trecho julgou-se necessário um tratamento de estabilização com tirantes curtos.

Nos anais do 4º Congresso Internacional de Geologia de Engenharia, realizado em New Delhi, em 1982, nada há sobre as aplicações de Mecânica dos Solos à engenharia de taludes em rocha, comunicado por engenheiros sulamericanos. Os trabalhos sobre escorregamentos de terra lá relatados não dizem respeito à engenharia da América do Sul e nem apresentam aspectos que, julgo eu, tenham contribuído para a melhoria do nosso estado de conhecimentos sobre a questão.

Pelo contrário, ao 5º Congresso Internacional de Mecânica das Rochas, realizado em Malbourne, em 1983, várias contribuições latino-americana sobre estabilidade de taludes foram apresentadas. Dentre elas destaco quatro que me parecem mais interessantes. A primeira é de Diniz da Gama (53), onde ele apresenta um método de análise retroativa de escorregamento de taludes, a partir de "gráficos computacionais interativos". É um processo capaz de incorporar geometrias complexas nos modelos geomecânicos, permitindo o traçado apurado de malhas de elementos finitos, em duas ou três dimensões, a partir de gráficos computadorizados que podem ser modificados interativamente ao correr da análise. Como exemplo do método de Diniz da Gama descreve duas retro-análises de taludes levadas a efeito na mina de urânio de Cercado, em Minas Gerais, e numa mina de manganês, no Território do Amapá, ambas no Brasil, onde ele aplicou o método com a finalidade de determinar os parâmetros de resistência a cisalhamento dos maciços em questão. Aliás Diniz da Gama relata sua experiência em computação eletrônica da estabilidade de taludes em sua tese de livre docência "Métodos Computacionais de Projetos de Taludes em Mineração", apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, em 1984.

O segundo trabalho a ser mencionado é o de Costa Nunes, Sandroni e Souza Ramos (54) onde os autores descrevem um ensaio, em vários estágios de cisalhamento direto "in-situ", utilizado no cálculo da estabilidade dos taludes de uma mina de ferro a céu aberto, do Caué, em Itabira, MG. São ensaios cujos estágios são interrompidos pouco antes da ruptura. A experiência de 13 anos de estudos e observações, nessa mina, mostra que tal tipo de ensaio pode ser utilizado com sucesso nos cálculos da estabilidade de seus taludes.

Os dois outros trabalhos, dos quatro acima mencionados, versam sobre a estabilidade de taludes em xistos decompostos da área urbana de Caracas. O primeiro de Gianfranco Perri (55) e refere-se a um método grá

(53) Diniz da Gama, C. - "Interative Graphics in the Back-Analysis of Slope Failures" - Proc. 5th I.C. Rock Mec. - Melbourne, 1983.

(54) Costa Nunes, A.J.; Sandroni, S.S. e Souza Ramos, I.M. - "Multi-stage Direct Tests in-situ on Schist for Slope Stability (Carré Mine, Itabira, Brazil)" - Proc. 5th I.C. Rock Mec. - Melbourne, 1983.

(55) Gianfranco Perri, A. - "Graphical Method for the Analysis of Rock Slopes in Urban Areas" - 5th I.C. Rock Mec. - Melbourne, 1983.

fico para a análise de estabilidade de tais materiais. O segundo é um caso histórico de escorregamento de rocha, na área urbana em questão, descrito por Salcedo e Tinoco (56). O método de cálculo utilizado nesse caso foi o descrito por Tinoco no Congresso de Bogotá (50). O conjunto desses três trabalhos é de grande valor como contribuição ao nosso conhecimento da estabilidade de taludes de rochas xistosas, de uma forma geral, e, também, na circunstância especial de taludes em zonas urbanas.

Em dezembro de 1981, intensa chuva de mais de 100 mm/dia, com período de recorrência de 900 anos, caiu sobre o município de Petrópolis, RJ, atingindo os trechos da Serra dos Órgãos das estradas de rodagem Rio-Petrópolis e Rio-Terezópolis, provocando catastróficos escorregamentos simultâneos de solos residuais e blocos de rocha, do tipo de avalanches, ou de maciços de rocha intensamente fraturados ou, ainda, pelo menos, um caso de deslizamento planar de rocha sã, diaclasada. Tais ocorrências foram relatadas pelo Prof. Costa Nunes, num simpósio sobre estabilidade de taludes, realizado na PUC do Rio de Janeiro em 1982. O mesmo professor e seus colaboradores mencionaram as mesmas ocorrências, em trabalho apresentado ao 7º Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos, realizado em Vancouver, em 1983 (57).

No 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, realizado em Belo Horizonte, em 1984, La Torre e Alves Barroso (58) apresentaram um outro trabalho sobre as condicionantes geológicas-estruturais da estabilidade de taludes no trecho da rodovia acima mencionada no seu prolongamento, além de Petrópolis. Esses condicionamentos provavelmente são os mesmos que os do trecho atingido pelas intensas chuvas de dezembro de 1981. Porém, neste trabalho, a ênfase é dada ao grão de alteração, diaclasamento, mergulhos, xistosidade e esfoliação dos maciços rochosos, como causas dos deslizamentos, e não a chuvas intensas. Provavelmente, como se tratava de cortes rodoviários havia aqui a própria operação de escavação como elemento instabilizador. Entretanto, nesse trecho, não ocorreram deslizamentos em rocha sã, ou mesmo pouco alterada, como aconteceu no trecho da Serra dos Órgãos; contudo observaram-se tombamentos de fatias de rocha alterada e quedas ou deslizamentos de blocos, em maciços rochosos alterados.

O quarto volume dos Anais do 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, realizado em Belo Horizonte, em 1984, reúne as contribuições ao Tema III daquele Congresso: "Tratamento e Reforço de Maciços Terrosos e Rochosos", no qual foram observadas questões e casos históricos de tratamento de maciços rochosos; tanto por meio de drenagem ou injecções de cimento como por ancoragens. É abordada, também nessa seção, a questão importantíssima da proteção dos taludes contra erosão. Finalmente, sob o título "Temas Diversos" foram apresentados ao Congresso três trabalhos de Ladeira e Minette (59) sobre a questão da alterabilidade

- (56) Salcedo, D.A. e Tinoco, F.H. - "A Rock Slide in Urban Area: a Case History" - 5th I.C. Rock Mec., - Melbourne, 1983.
- (57) Costa Nunes, A.J.; Brandão, C.A.; Dias, P.H.V. e Fernandes, C.E. de M. - "Landslides Due to Intense Tropical Rainfall in Brazil" - Proc. 7th Pam. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. - Vancouver, 1983.
- (58) La Torre, C. e Alves Cardoso, J. - "Condicionantes Geológicos-Estruturais na Estabilidade de Taludes de Cortes da BR-040, Município de Petrópolis, RJ" - Anais do 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia - Belo Horizonte, MG, 1984

das rochas e um trabalho de Ladeira (60) sobre o ensaio Windsor para julgamento da qualidade das rochas. Por último, aplicando os princípios, relatados nos trabalhos anteriores, ao problema da estabilização dos taludes rochosos devida a intemperismo rápido, Ladeira (61) apresenta um interessantíssimo trabalho. Destaco aqui esses trabalhos porque creio que nenhum conhecimento da engenharia de taludes em zonas tropicais, pode ser considerado completo se não considerar atentamente o fenômeno de intemperismo rápido peculiar a essas zonas.

#### CONCLUSÃO

Será difícil chegar a uma conclusão geral num tema tão amplo como o deste relato tão parcial, sobre o estado dos conhecimentos das aplicações da Mecânica das Rochas ao projeto e construção de obras de Engenharia Civil. Entretanto, permitam-me concluir sumariamente que, pela quantidade e qualidade de contribuições apresentadas a congressos, seminários ou reuniões várias que ocorreram, nesses últimos dez anos, na América do Sul, tornou-se evidente, entre nós, ser impossível projetar ou construir com sucesso e honestidade profissional, fundações de estruturas, principalmente as hidráulicas, sobre maciços rochosos, sem profundos conhecimentos geomecânicos. O mesmo se dá tanto para as escavações subterrâneas como para os taludes em rocha. Por outro lado, a possibilidade de levar a efeito, com exatidão e segurança, cálculos numéricos — com a finalidade precípua de guiar o bom julgamento sobre tais problemas — já está completamente assegurada pelo sucesso da aplicação dos métodos computacionais dos maciços rochosos.

- 
- (59) Ladeira F. e Minette, E. - "A quantificação da alteração e alterabilidade de rochas".  
- "Índices físicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas".  
- "Índices geomecânicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas".  
Anais 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia - Belo Horizonte, MG, 1984.
- (60) Ladeira, F. - "Índice de qualidade pelo ensaio Windsor. Nota prévia" - Anais do 4º Cong. Bras. de Geol. Eng. - Belo Horizonte, MG, 1984.
- (61) Ladeira, F. - "Instabilidade de taludes rochosos provocada por rápido intemperismo" - Anais 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 1984.