



Modelagem geométrica de maciços rochosos no Rio de Janeiro: caso estudado da bacia do rio dos Macacos

C. Amaral^{1,2} & G. Nogueira¹

1 PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225 – 3º andar, 22453-900, Gávea, Rio de Janeiro, RJ.

2 UERJ, Rua São Francisco Xavier, 524 sala 2019 F, 20521-200 Maracanã, Rio de Janeiro, RJ.

Abstract The first step in every study set down to really understanding the hydrogeological behavior of a drainage basin is the geometrical modeling of the area. This modeling should be as realistic as possible, indicating all features that characterize the rock masses. This paper presents the methodology and the results of its application in one watershed near the Botanic Garden of Rio de Janeiro. Based on large-scale structural mapping and mapping of joint properties, a model is created with CorelDraw.

Palavras-chave: Modelagem geométrica; maciços rochosos; mecânica das rochas.

INTRODUÇÃO Na geologia, tradicionalmente, a modelagem geométrica bidimensional, por meio de mapas geológico-estruturais, sempre foi uma ferramenta de apresentação dos dados interpretados do meio físico. Nos últimos anos, contudo, as técnicas de modelagem geométrica de dados geológicos em 3D, por meio da utilização de *softwares* específicos, abriu grandes perspectivas para a representação e apresentação de dados geofísicos, de reservatórios de petróleo etc.

A modelagem geométrica tridimensional de ambientes geológicos continua, entretanto, a ser um grande desafio para os projetos geotécnicos que envolvem escala de detalhe, devido, primeiro, à dificuldade em representar o meio físico com precisão, e em segundo lugar, porque persiste a dificuldade em gerar produtos de fácil compreensão e rápido aproveitamento em programas de análise de comportamento mecânico e fluxo de água.

Durante as pesquisas em modelagem geométrica 3D desenvolvidas na PUC-Rio, ao lado dos vários ensaios feitos com as ferramentas computacionais existentes para auxiliar a análise e a interpretação de meios físicos distintos, foi dada ênfase também a etapa da modelagem geométrica normalmente relegada a segundo plano, que é o levantamento de dados de campo, particularmente daqueles relacionados aos maciços rochosos (Nascimento 1999).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia (e a sua aplicação a um caso estudado) adotada para suportar os projetos de modelagem geométrica dos maciços rochosos do Rio de Janeiro, com dados de entrada confiáveis, sem a utilização de sondagens do subsolo, em geral caras.

O caso estudado foi desenvolvido na bacia do rio dos Macacos, na vertente sul da Serra da Carioca. O objetivo da pesquisa é contribuir para a discussão

sobre o papel das fraturas na recarga do nível de água na área do Jardim Botânico, e sobre os riscos associados à rápida elevação do nível do lençol freático local em períodos de chuvas mais intensas.

CONHECIMENTO DO PROBLEMA Um sistema de modelagem, tridimensional, do comportamento mecânico e do fluxo e transporte, em meios porosos e fraturados, pressupõem o somatório de cinco etapas metodológicas: a geração de superfícies geológicas; a geração de sistemas de fraturas; a representação geométrica do meio físico propriamente dita; a análise numérica; e, finalmente, a visualização dos resultados.

Reconhecidamente, nos últimos anos, o desenvolvimento e a superposição de programas computacionais, têm sido espetaculares, garantindo a modelagem de meios porosos, meios fraturados, e de meios porosos e fraturados (inclusive interpostos).

De uma maneira geral, contudo, ao lado do reconhecimento do progresso da Computação Gráfica, há também uma grande crítica quanto à confiabilidade dos modelos criados, principalmente no que diz respeito à representação geométrica de meios físicos complexos. Em mais de uma oportunidade, ao serem apresentados aos resultados finais em maciços rochosos fraturados, os pesquisadores afirmaram: “o modelo é bastante moderno, mas infelizmente ainda não corresponde ao que observamos no campo”.

E por que isto aconteceu? Por que o levantamento de dados sobre a distribuição e as propriedades das fraturas em uma área reduzida exige muito tempo? Por que ele exige muito cuidado? Por que ele exige um conhecimento geológico específico, pouco afeito aos engenheiros geotécnicos? Por que os métodos determinísticos ou estatísticos são mais convidativos para gerar as discontinuidades estruturais do que os trabalhos de campo?

As respostas são sim. Na realidade, não há solução para o problema de efetiva representação das características geométricas de um meio físico complexo como os maciços rochosos fraturados, que não a intensificação do trabalho de geologia estrutural de detalhe, no qual não apenas se mapeiam as atitudes das estruturas geológicas, como também se medem, pacientemente, as propriedades geométricas das fraturas, tais como o espaçamento, a abertura, a persistência, a rugosidade e o material de preenchimento.

Desde 1999 tem-se procurado atender a essa lacuna de dados por meio de capacitação simples dos recursos humanos. Geólogos graduandos na disciplina de Mecânica das Rochas, são treinados para o mapeamento geológico-estrutural de detalhe, na escala 1:2000, de maciços rochosos localizados junto ao seu endereço residencial ou próximo ao seu local de trabalho. Ao final do curso, os interessados em especializar-se na área de Geologia de Engenharia têm então a oportunidade de desenvolver com mais vagar o trabalho, normalmente mapeando uma área maior, e apresentando um modelo geométrico via programas simples de representação geométrica como o CorelDraw.

ÁREA DE ESTUDO A bacia de drenagem do rio dos Macacos, que nasce na Serra da Carioca e desemboca na Lagoa Rodrigo de Freitas, é composta por cinco rios: dos Macacos, Pai Ricardo, Capenga, Cabeça e Algodão. A área de 9,46km² está contida em duas bases cartográficas, na escala 1:10000. O acesso à área é feito pela rua Pacheco Leão, ao lado do Jardim Botânico (Fig. 1).

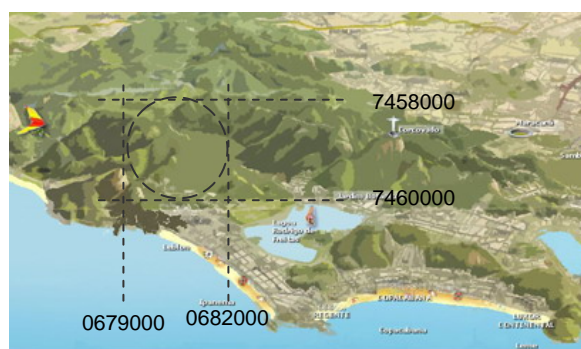


Figura 1. Localização da área estudada

A precipitação pluviométrica anual na área é de aproximadamente 1582mm, concentrada entre novembro e março. A vegetação nativa, apesar do desmatamento crescente, ainda é exuberante, integrando a Floresta da Tijuca. A planície de inundação natural é intensamente ocupada por imóveis residenciais e favelas.

O padrão de drenagem é caracterizado como de Treliça de Junta, com drenagens curtas e retilíneas, com alto grau de continuidade e com sinuosidade retilínea, relacionado às zonas de fraturas ou falhas. A topografia é acidentada; as encostas laterais, de forma côncava, junto à cabeceira, atingem a altitude de 768m, formando picos. As cheias são constantes durante os períodos chuvosos.

Geologia local O embasamento cristalino da área é composto por orto e paragneisses [gnaisse facoidal, kinzigito (biotita gnaisse) e leptinito], intercalados por granitos aplíticos, pegmatitos e diques de composição básica e ácida.

O maciço rochoso apresenta dobras e zonas de cisalhamento, decorrentes de fases de deformação distintas (Dn: geração da foliação principal; Dn + 1: geração de dobras fechadas; Dn + 2: geração de dobras suaves e zonas de cisalhamento dúctil, com zonas milonitizadas e retrometamorfisadas), e falhas normais com direção N65°W e fraturas conspícuas e frequentes de direção NNE e SSW, que representam a deformação rúptil (Silva & Silva, 1987). Algumas fraturas são preenchidas por diques de diabásio. Além disto, ainda ocorrem falhas com atitudes 060°, 240°, 350°, com mergulho sub-vertical para SSE ou NNW (Heilbron *et al.* 1993).

O perfil de intemperismo típico é composto por um solo coluvionar amarelo, com espessura média de 2m, sobrejacente a um colúvio vermelho com espessura variável, podendo chegar até 15m, que se assenta sobre o residual de cor vermelha que, por sua vez, entra em contato com o residual típico. O colúvio amarelo apresenta uma estrutura uniforme, aspecto homogêneo e raros blocos de quartzo. O colúvio vermelho tem a presença marcante de blocos e matacões de biotita-gnaisse e quartzito (Rocha 1992).

RESULTADOS Pré-campo Uma idéia preliminar sobre a compartimentação do maciço rochoso foi formulada no trabalho de Logrones (1999), na qual a autora discute as causas do escorregamento ocorrido na Vista Chinesa, junto à cabeceira de drenagem do rio dos Macacos, em 1988. No trabalho, a superfície de contato solo-rocha é tida como uma superfície impermeável.

Essa hipótese, contudo, contrasta com os resultados de ensaios de permeabilidade *in situ*, constantes do trabalho de Lacerda & Lopes (1992), realizados em local próximo à área de estudo. Segundo os autores, o horizonte de rocha alterada, com alto grau de fraturamento (>20 fraturas/m), entre 15m e 20m, é de fato menos permeável que o solo residual, mas mostra valores significativos de condutividade hidráulica, da ordem de $k=8 \times 10^{-5}$ cm/s,

e de perda de água, da ordem de 10 L/min/m a 30 L/min/m (a 2,4 kgf/cm² de pressão). Na verdade, somente ao se iniciar o horizonte de rocha sã, com baixo grau de fraturamento ($6 < x < 10$ fraturas/m), a superfície é teoricamente impermeável.

Essa contradição levou à revisão dos dados dos furos de sondagens descritos por Logrones (1999). De fato, além da elevada perda de água nos furos, observou-se ausência de registro de poro-pressões positivas nos piezômetros de máxima instalados na média/alta encosta, após um período de um ano, e o seu registro apenas nos piezômetros instalados nas regiões de baixa encosta. Isto mostra que a água da chuva se infiltra no maciço por intermédio das fraturas, mas só provoca o aumento da poro-pressão nos sopés dos taludes, justamente porque a densidade elevada de fraturas permite a drenagem do horizonte de rocha alterada.

Essa linha de raciocínio foi confirmada quando se procedeu à nova interpretação dos boletins de sondagens rotativas. Em um dos perfis apresentados, por exemplo, o valor de RQD é extremamente baixo, da ordem de 63%, contrastando intensamente, com o valor no horizonte de rocha sã, que é de 100%. Esse dado comprova a existência de um intenso grau de fraturamento no maciço rochoso, e indica uma interconexão significativa das fraturas em profundidade.

Mapeamento de campo O mapeamento litológico ratificou a presença de três litotipos: o cordierita-granada-biotita-gnaiss (kinzigito), associado aos veios de quartzito; o leptinito (apesar de gnáissico, com aspecto semelhante a um granito); o gnaiss facoidal, nos pontos inferiores e elevados da área. Um dique de rocha alcalina, com 1,5m de largura, ocorre localmente.

O mapeamento estrutural reconheceu as três fases de deformação dúctil, mas deu ênfase às descontinuidades que efetivamente compartimentam o maciço rochoso, as fraturas, já que durante o mapeamento não se observaram grandes falhas. Além da atitude das fraturas, mapearam-se, com apoio da trena, as propriedades espaçamento, abertura, persistência e preenchimento.

O diagrama de Roseta, com os dados das atitudes das fraturas, é mostrado na Fig. 2, enquanto as propriedades dos *sets* principais de fraturas são mostradas na Tabela 1.

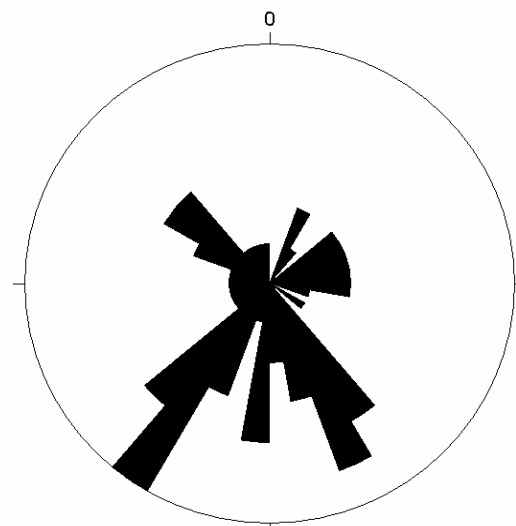


Figura 2. Diagrama de Roseta

Dois *sets* (famílias) principais de fraturas tectônicas destacam-se nitidamente na figura, com direções perpendiculares, NW-SE e NE-SW, e mergulho sub-vertical. Um outro sistema de fraturas, de alívio, com direção NW-SE e baixo ângulo de mergulho para SW, também é bastante conspícuo.

| Set | Set 1 | Set 2 | Alívio |
|----------|------------------------|------------------------|----------------|
| atitude | NW/SE - 80° | NE/SW - 80° | Sub-horizontal |
| abertura | 1-10 cm | 0,2-5 cm | 0,3 - 8 cm |
| Espaçam. | 0,3-1,6 m | 0,3-3m | 0,2 -1,5m |
| Persist. | 0,01->1m | 0,2->1 m | 0,1->1m |
| Preench. | Areno-argiloso Ausente | Areno-argiloso Ausente | Solo residual |

Tabela 1. Sets de fraturas I, II e de alívio e suas respectivas propriedades físicas (dados medidos em afloramentos).

Além de confirmar que as fraturas tectônicas controlam as direções do rio dos Macacos (NW-SE) e do riacho do Pai Ricardo (NE-SW), observou-se em escala de afloramento que as fraturas se cruzam indistintamente, garantindo, portanto, interconexão e caminhos preferenciais de fluxo de água, em especial quando diferentes fraturas tectônicas são ligadas pelas juntas de alívio.

Dentre as propriedades das fraturas, a mais difícil de determinar no campo é a persistência, tanto em profundidade como lateralmente. Para diminuir a incerteza seria necessário executar sondagens rotativas inclinadas. Em geral observa-se, contudo, que as fraturas tectônicas são persistentes em profundidade, e que as fraturas de alívio se preservam no solo residual.

Embora a Tabela 1 mostre que o espaçamento das fraturas varia pouco, por ser construída com dados de afloramentos, observa-se nas fotos aéreas oblíquas que as propriedades de abertura e espaçamento são de fato bem maiores. Por esse motivo, e diante da importância da dimensão das fraturas para a construção do modelo geométrico, os três sets principais de fraturas foram subdivididos em função da abertura e do seu espaçamento, em mega, macro e micro fraturas (Tabela 2).

Elaboração do modelo geométrico Com base na análise do diagrama de rosetas e das tabelas com as propriedades das fraturas, construiu-se um modelo

geométrico da bacia de drenagem do rio dos Macacos (Fig. 3), em Coreldraw.

| | Mega Fraturas | Macro Fraturas | Micro Fraturas |
|---------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Abertura | 70–100cm | 3–10cm | 0,2–1,8cm |
| Espaçam. | 15–60m | 1– 3m | 10–70 cm |
| Persistência | >1,0 m | 0,1–1m | 0,01–0,3m |
| Atitude | 1 / 2 | 1/2/alívio | 1/2/Alívio |
| Preenchimento | Ausente / material arenoso | Ausente / mat. areno-argiloso | Ausente/mat. areno-argiloso |

Tabela 2. Compartimentação Geométrica dos Sets de fraturas em função de suas respectivas propriedades físicas

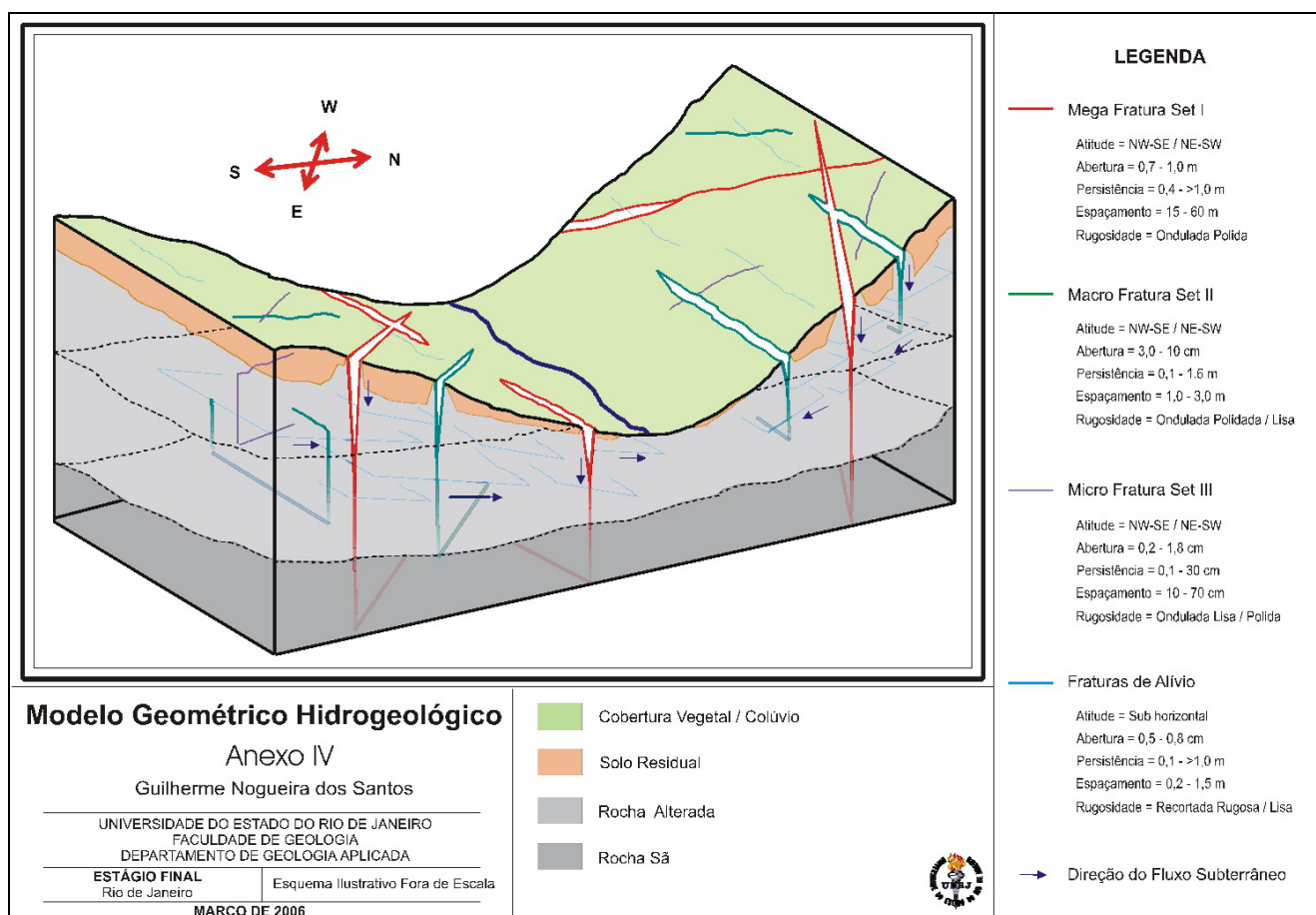


Figura 3. Modelo geométrico da bacia do rio dos Macacos

DISCUSSÃO Embora possa ser detalhado por meio da utilização de outros métodos de investigação, e apesar da subjetividade no lançamento dos dados, o modelo geométrico criado no Coreldraw é satisfatório para uma discussão preliminar sobre o fluxo subterrâneo na área de estudo, principalmente devido às vantagens da simplicidade e do baixo custo.

Ele explica, por exemplo, a ausência de nível de água superficial nas encostas após um período de

chuvas prolongadas e fracas. Com a conexão, a interseção e o cruzamento das fraturas, toda a água que infiltra no maciço rochoso é drenada diretamente para o vale do rio dos Macacos, encaixado e controlado pelo sistema de fraturas NE-SW.

Esse fluxo contínuo é devido principalmente às mega fraturas de direção NW-SE e NE-SW, que são as principais linhas de fluxo de água, mas se processa também por meio das fraturas macro e micro verticais



de menor persistência e das juntas de alívio de maior persistência. Com isto, a rede de drenos naturais do maciço rochoso abastece permanentemente o rio principal.

Outra vantagem do modelo criado é o seu fácil aproveitamento na geração da representação geométrica em programas mais avançados. Nesse caso, a existência de uma concepção preliminar confiável poupa tempo para a escolha de programas de análise numérica e implementação de exemplos verdadeiros.

CONCLUSÃO O modelo geométrico do maciço rochoso que embasa a bacia do rio dos Macacos, criado no Coreldraw, é satisfatório para a discussão preliminar sobre o fluxo subterrâneo e sobre o deslocamento de blocos rochosos dos taludes naturais e escavados na área de estudo, devido às vantagens da simplicidade, baixo custo e rapidez.

O “Modelo Geométrico da Bacia de Drenagem do Rio dos Macacos” representa de forma simplificada e com fácil visualização o meio físico da área. O fluxo hidrogeológico processa-se ao longo das fraturas interconectadas e recarrega o nível de água na bacia de drenagem do rio dos Macacos.

Referências

- HEILBRON M., ALMEIDA J.C.H., BROWN M., VALERIANO C., TUPINAMBÁ M. 2000. Comprehensive Tectonic Model for the Neoproterozoic Ribeira Orogenic belt. In: 31 International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro. *Abstracts of the 31 International Geological Congress*. Rio de Janeiro : SBG,
- HEILBRON M., PIRES F.R.M., VALERIANO C., BESSA M.P. 1993. Litoestratigrafia, Evolução Tectono-Metamórfica e Magmatismo no Pré-cambriano do Setor Sudeste do Município do Rio de Janeiro. 3 Simpósio de Geologia do Sudeste, SBG-Rio, *Anais*, UERJ, p. 174-179.
- LACERDA W.A. & LOPES F.R. 1992. Características Geotécnicas de Um Perfil de Alteração na Crista de Uma Encosta Gnáissica do Maciço do Corcovado, Rio de Janeiro, RJ. - 1 COBRAE, *Anais*, págs. 433-443.
- LOGRONES A.P.A. 1999. *Avaliação do Mecanismo de Ruptura da Encosta em Solo não Saturado na Vista Chinesa*. Tese de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 123p.
- NASCIMENTO A.C. 1999. *Modelagem Geométrica no Maciço do Morro Dois Irmãos com base na Geologia Estrutural de Detalhe*. Tese de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 123p.
- ROCHA J.C. 1992. Caracterização Geológica-Geotécnica dos Materiais Envolvidos nos Movimentos de Massa Ocorridos em Fevereiro de 1988 na Vista Chinesa. 1ª COBRAE, Rio de Janeiro, ABGE/ABMS, *Anais*, v.1.
- SILVA P.C.F. & SILVA R.R. 1987. Mapeamento geológico-estrutural da Serra da Carioca e adjacências, município do Rio de Janeiro. In: I Simpósio de Geologia Regional RJ-ES. Rio de Janeiro. *Anais*, p. 198-209.