

A RELAÇÃO BENEFÍCIO-CUSTO COMO CRITÉRIO DE PROJECTO EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Benefit-cost ratio as a design tool in Geotechnical Engineering

por

C. DINIS DA GAMA*

RESUMO — O cálculo de factores de segurança e de probabilidades de rotura são métodos usados para avaliação da estabilidade de estruturas geotécnicas, que geralmente não conduzem à determinação de soluções óptimas para os problemas em análise.

Com efeito, o processo de tomada de decisões requer, para além dos aspectos de segurança, a consideração dos constrangimentos económicos envolvidos nos projectos, permitindo a aplicação de métodos convenientes, em que a quantificação do risco e os custos esperados da rotura das estruturas sejam devidamente incorporados.

A Relação Benefício-Custo, bastante utilizada em estudos económicos, parece ser uma excelente ferramenta para a Engenharia Geotécnica, não apenas como critério de projecto para serem alcançadas soluções optimizantes, mas também como estratégia para tomada de decisões.

Exemplos de aplicação desta técnica a problemas de Mecânica dos Solos e das Rochas são apresentados para ilustração da validade do método.

SYNOPSIS — Safety factors and probabilities of failure are ways of evaluating the stability of geotechnical, although not leading to optimum solutions for the problems under analysis.

In fact, the decision making process requires the consideration of both safety and economy aspects of each problem or situation, in order to develop reliable design methods, where features like the quantification of risk and the expected costs of failure are duly taken into account.

Benefit-cost ratio, a well-known technique of Economic Analysis, seems to be an excellent tool for Geotechnical Engineering, not only as a design criterion in terms of reaching optimum solutions, but also as a convenient decision making strategy.

Examples of application of this technique to soil and rock mechanics problems are presented and help to support its validity.

1 — INTRODUÇÃO

A diferença fundamental entre Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica reside na inclusão de conceitos económicos na segunda, com o objectivo de prover o equilíbrio indispensável com os aspectos de segurança das estruturas, de tal modo que sejam alcançáveis decisões inteligentes para a solução dos problemas do sector.

* Doutor Engenheiro, Professor do Instituto Superior Técnico.

A abordagem tradicional desses problemas envolve uma sequência de etapas que normalmente inclui:

- Definição do problema
- Colecta de informações
- Estudos laboratoriais e de campo (investigação e instrumentação)
- Determinação das propriedades mecânicas dos terrenos
- Análises de estabilidade
- Projecto
- Construção
- Acompanhamento em serviço (monitoração).

Entre quaisquer duas destas etapas devem ser tomadas decisões estratégicas, utilizando o melhor conhecimento disponível sobre os assuntos e as situações reais, o qual envolve um grande conjunto de variáveis técnicas e económicas que devem ser apropriadamente avaliadas e submetidas à apreciação por meio de critérios de Engenharia. Em muitas circunstâncias práticas, os aspectos económicos dos problemas são apenas ligeiramente equacionados (por vezes só intuitivamente) embora os projectos requeiram uma quantificação adequada de todas as suas implicações em termos de custos, especialmente quando houver que optar entre diversas alternativas. Cada solução proposta deve ser convenientemente estudada do ponto de vista mecânico, geralmente com o apoio de modelos matemáticos apropriados, mas a sua implementação prática só é correcta desde que exista alguma avaliação positiva da sua viabilidade económica.

Com a recente proliferação de computadores e o advento dos métodos probabilísticos de análise de estabilidade e de projecto, foram desenvolvidas novas formas de avaliação das consequências económicas de cada uma das soluções propostas e com aplicação directa a situações reais, fornecendo dessa maneira os fundamentos essenciais desta metodologia.

Por outro lado, os métodos determinísticos não podem levar aos mesmos tipos de conclusões, porque lhes falta a possibilidade de avaliar os riscos (e suas probabilidades de ocorrência), embora possam fornecer indicações úteis para a explicação dos problemas, orientando a respectiva resolução.

Uma das ferramentas mais promissoras em termos de implementação de critérios de engenharia, baseados na plena consideração das sujeições económicas e de segurança que são associáveis aos projectos, é a conhecida técnica de cálculo da Relação Benefício-Custo (RBC) que possui grande aplicação na Análise Económica, estendendo-se a muitas áreas do conhecimento. E pergunta-se: por que não em Engenharia Geotécnica?

2 — METODOLOGIA DA RELAÇÃO BENEFÍCIO-CUSTO

Em 22 de Junho de 1936, o Regulamento de Controle de Enchentes nos E. U. A. (U. S. Flood Control Act) indicava que "... se os benefícios, para quem quer que seja, foram maiores que os custos estimados", era perfeitamente justificável despendar fundos públicos para cons-

truir barragens e outras obras de engenharia, com o objectivo de reduzir os danos causados pelos desastres naturais.

Esta filosofia passou a ser adoptada na avaliação de muitos projectos em vários domínios, como a construção de canais, diques, estradas, pontes, etc., e as agências governamentais responsáveis pelo planeamento e fiscalização de obras de obras públicas em muitos países começaram a utilizar também essa metodologia, incorporando por vezes conceitos socioeconómicos e custos ambientais naquelas análises.

No sector privado, a determinação das RBC's constitui um índice bastante usado para fundamentar decisões normais, as quais podem variar desde simples estimativas determinísticas até estudos probabilísticos sofisticados, em que os efeitos a longo prazo são considerados em detalhe. Por exemplo, para o estudo de viabilidade de uma nova barragem destinada ao controle de enchentes e à irrigação, poderá ser necessário avaliar quantitativamente os seguintes aspectos:

- a) Benefícios: aumento da produtividade agrícola + eliminação dos danos provocados pelas enchentes.
- b) Custos: projecto e construção + manutenção da barragem e do reservatório + reinstalação das áreas agrícolas e outras infra-estruturas + indemnizações sobre terrenos submersos.

Os cálculos envolvidos nestas avaliações são extensivos a toda a vida útil da barragem e os valores monetários correspondentes aos benefícios e aos custos devem ser actualizados, para determinação dos seus valores presentes, usando-se uma taxa de juro adequada. No caso de diferentes alternativas serem apresentadas para a mesma obra, é obvio que deverá ser estabelecida a RBC de cada uma delas, de modo a proceder-se à selecção da melhor opção, geralmente aquela com maior RBC, desde que superior à unidade.

Deve ser realçado que diversas variáveis incluídas, seja nos benefícios, seja nos custos, são essencialmente probabilísticas. No exemplo acima referido, a eliminação dos danos causados por enchentes futuras é função da frequência esperada desses eventos, com os seus correspondentes volumes de água, informação essa que pode ser deduzida a partir dos registos históricos que existirem sobre a região em estudo. Multiplicando tais frequências pelas correspondentes consequências económicas previsíveis, obtêm-se os valores esperados que poderão ser adicionadas aos benefícios estimados a partir do aumento da produção agrícola, fornecendo assim os benefícios totais que caracterizam este tipo de problema.

Por vezes o método é aplicado de maneira distinta: uma vez de se calcularem os quocientes entre benefícios e custos totais de cada alternativa, determina-se a RBC comparativa, a partir dos benefícios e dos custos relativos (ou diferenciais) entre cada par de alternativas, de modo a indicar assim a melhor opção entre todas elas.

Muitos outros exemplos desta metodologia podem ser encontrados na bibliografia geral (como por exemplo em Grant & Ireson, 1970; Gentry & O'Neil, 1984), porém não são do conhecimento do autor quaisquer aplicações à Engenharia Geotécnica.

3 — USO DA RBC EM GEOTECNIA

De modo a ilustrar a aplicabilidade do método RBC em projectos geotécnicos, são seguidamente discutidos três casos simples, cobrindo áreas importantes do sector: taludes, túneis e fundações.

3.1 — Estabilidade de taludes

Embora o empirismo ainda prevaleça, especialmente no projecto e na execução de obras de baixo custo, as técnicas actualmente disponíveis para a análise da estabilidade de taludes abrem a possibilidade de se atingirem equilíbrios harmónicos entre a segurança e a economia.

Seja pela aplicação de métodos de equilíbrio limite, seja com recurso ao método dos elementos finitos, a estabilidade dos taludes é geralmente quantificada por meio da determinação de um factor de segurança, mas certas perguntas podem ser levantadas:

- Por que usar um dado factor de segurança?
- Quais são as consequências económicas dessa decisão?
- Existirá outra alternativa de projecto que forneça mais vantagens?
- A decisão será orientada para alcançar benefícios imediatos, desprezando a possibilidade de o talude escorregar, com os correspondentes custos de reconstrução, assim como o pagamento dos eventuais danos daí resultantes?

Muitas outras perguntas poderão ser formuladas ao responsável pela decisão que escolhe um certo factor de segurança e a geometria do talude a ele associada. As respostas podem variar desde “conforme a minha experiência anterior”, ou “devido às circunstâncias específicas do problema”, ou ainda “aplicando critérios de engenharia”, de modo a justificar-se determinado curso dos eventos.

Por vezes nem se indaga a possibilidade de otimizar a solução do problema, nem mesmo se suspeita que a abordagem da decisão possa ser baseada em outros critérios. E se eventualmente o talude deslizar, apresentam-se explicações variadas, do tipo “comportamento imprevisível do solo”, ou a “ocorrência de cargas ou de chuvas anormalmente altas”, ou até um “Act-of-Good”... para justificar o colapso.

Conforme se pode observar, tais deficiências são oriundas do emprego de métodos determinísticos em Geotecnia quando é sabido que presentemente dispõe-se de abordagens mais realistas dos fenómenos, a partir do conhecimento da sua natureza aleatória. As vantagens que tais abordagens proporcionam são, de acordo com Gama, 1987:

- a) Quantificação da incerteza e da variabilidade das grandezas físicas que intervêm na estabilidade dos taludes, e tratando-as com métodos apropriados (como o de Monte Carlo, por exemplo) visando a determinação de probabilidades de rotura dos taludes, em vez de factores de segurança.

- b) Possibilidade de integrar variáveis económicas em conjunto com parâmetros geotécnicos, de modo a estabelecer um determinado nível de risco a incorporar nos projectos, estabelecido em conformidade com o tipo de problema em estudo.
- c) Definição do ângulo de inclinação óptima do talude a partir da minimização do respectivo *custo generalizado*, o qual pode ser definido por:

$$C_g = C_c + P_f (C_d + C_r)$$

onde C_c representa o custo de construção do talude (incluindo a sua escavação), P_f a probabilidade de rotura desse talude, C_d o custo dos danos provocados pelo seu escorregamento e C_r os correspondentes custos de reconstrução, na hipótese de o mesmo deslizar.

O andamento típico das curvas de variação de C_g (custo generalizado) com o ângulo de talude é em forma de “U”, apresentando geralmente um valor mínimo que é o indicativo do ângulo óptimo do talude, e admitindo-se que os benefícios não variam com esse ângulo.

Entretanto, para uma análise mais completa deste conceito, torna-se conveniente desenvolver uma avaliação dos benefícios e custos totais envolvidos ao longo de toda a vida útil da obra, o qual não é mais que o fluxo de capitais (“cash flow”) correspondente. A representação típica desta variação é esquematizada na Fig. 1.

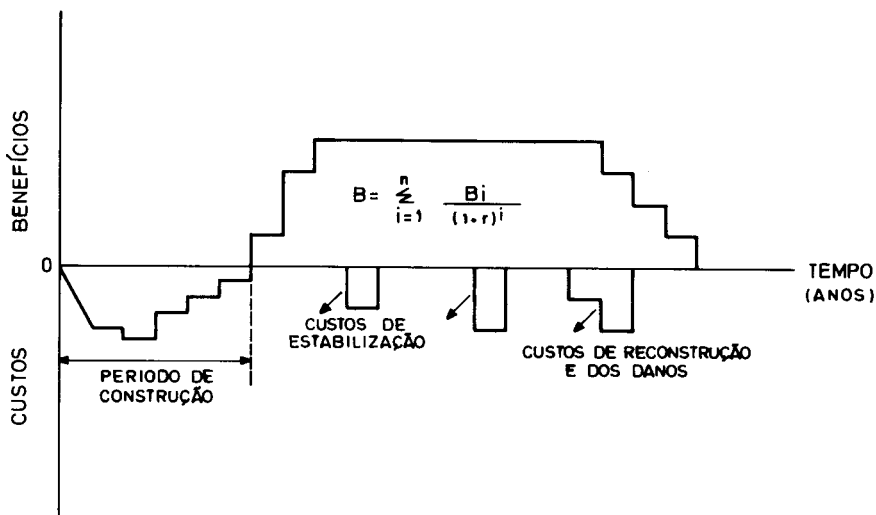


Fig. 1 — Perfil do fluxo de capitais correspondente à construção e utilização de um talude

Para fins de projecto torna-se necessário obter um perfil de fluxo de capitais para cada alternativa proposta, o que implica a realização de um volume considerável de cálculos, pelo que os computadores são normalmente utilizados para auxiliar esta metodologia.

No sentido de ilustrar este aspecto, considere-se o exemplo simplificado seguinte: determinado talude situado em zona urbana precisa ser escavado para dar lugar à construção de um edifício. Partindo de uma certa geometria inicial (ver Fig. 2) verifica-se que à medida que o ângulo de talude aumenta maiores serão os benefícios com a área disponível para a obra, mas em contrapartida mais elevados são os custos de escavação, assim como os custos esperados de estabilização e dos danos que uma eventual rotura poderia ocasionar. A variação típica dessas grandezas está representada na Fig. 2, revelando como se pode estabelecer o ângulo óptimo do talude, de acordo com esta metodologia.

Pela observação da Fig. 2, pode-se obter um julgamento adequado da viabilidade do projecto (conforme a RBC for, ou não, maior que um) incluindo a sua sensibilidade às variações de certos factores importantes (geotécnicos ou económicos), de tal modo que se pode constituir um bom critério para a tomada de decisões apropriadas.

3.2 — Abertura de túneis

As obras subterrâneas são habitualmente empreendimentos arriscados, face ao grande número de variáveis que influenciam os seus resultados. A escavação de túneis, quer em solo, quer em rocha, deve ser sempre conduzida com os devidos cuidados, na organização dos trabalhos de avanço, de modo a que se alcancem boas eficiências e baixos custos.

Como é habitual, após a operação de escavação segue-se a instalação dos sistemas de suporte e uma sequência de trabalhos relacionados com o serviço que o tunel irá proporcionar.

É óbvio que existe uma correlação íntima entre as variáveis geotécnicas e económicas que incidem no projecto, tendo uma consequência vital para o sucesso do projecto.

É neste contexto que o método da RBC pode ser de extrema utilidade para as tarefas de optimização ligadas ao projecto, conforme pode ser observado na Fig. 3.

Assim, para a determinação racional das dimensões da secção do túnel (e, em particular, da sua largura) torna-se conveniente estimar os custos de escavação, com as correspondentes incidências da instalação dos suportes e, ainda, dos custos esperados com o colapso do túnel (calculáveis através do produto da respectiva probabilidade de rotura pelo valor dos prejuízos resultantes).

Por outro lado, os benefícios provenientes da construção do túnel deverão ser quantificados, de tal forma que é possível calcular as RBC características de cada largura do túnel, sugerindo assim a dimensão optima procurada.

Podem ser equacionados sistemas alternativos de suporte do túnel, seja do ponto de vista de segurança seja de custos, de modo que as combinações mais vantajosas sejam sugeridas após a aplicação da metodologia de benefício-custo.

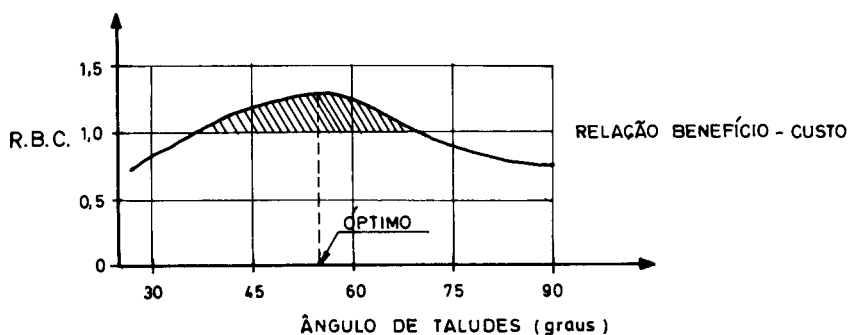
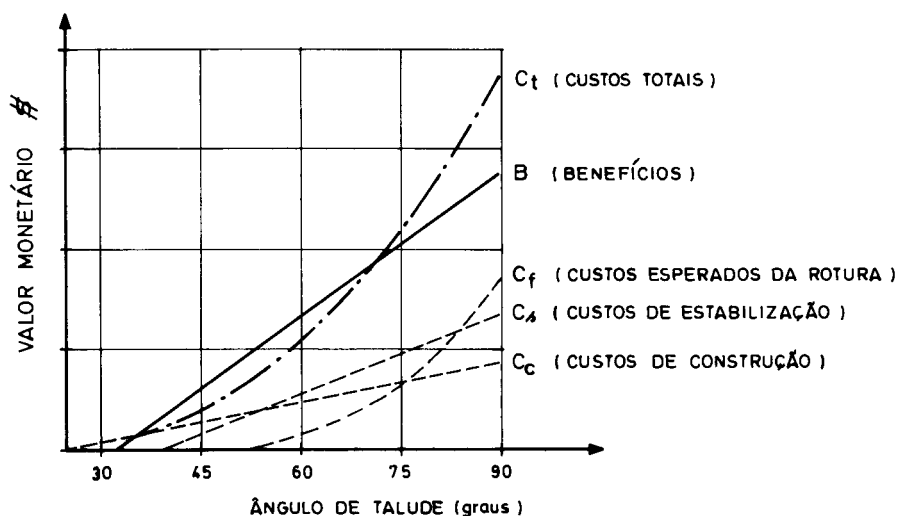
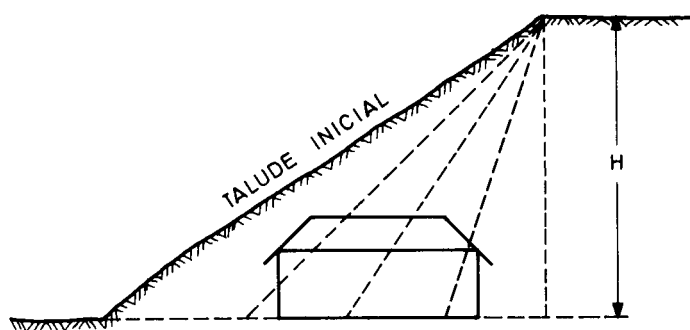


Fig. 2 — Determinação do ângulo óptimo de um talude, de acordo com o método da RBC

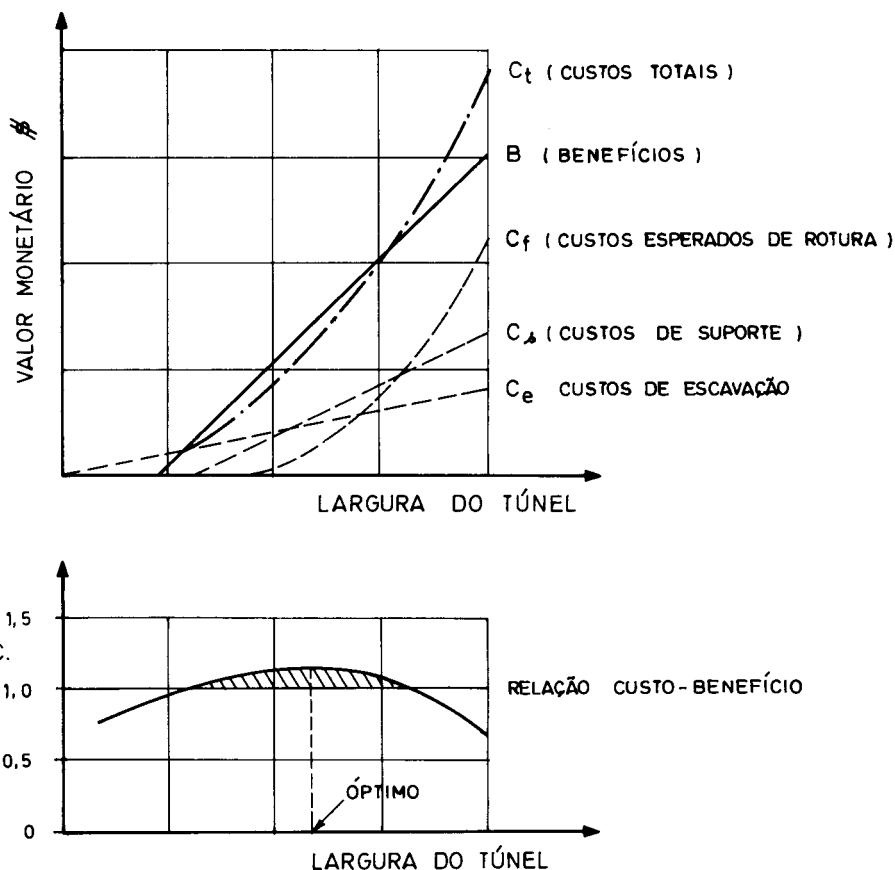


Fig. 3 — Aplicação do método RBC ao projecto de túneis

3.3 — Fundações

Talvez mais do que na engenharia de taludes ou de túneis, o tipo de decisões sobre a fundação de estruturas é baseado na economia construtiva, dentro da qual intervêm aspectos de campo, tais como os tipos de terreno, a profundidade das camadas resistentes, a presença da água, os efeitos da corrosão, etc., que combinados com as características de carga transmitidas pela estrutura acabam por ditar o projecto final.

Os custos totais de fundação podem assim ser divididos em duas partes, uma correspondente ao custo directo (ou o contratado com o empreiteiro) e outra pelos custos esperados de instabilidade ou assentamento excessivo, os quais podem ser estimados pela compensação monetária e pela reconstrução subsequentes.

Em termos práticos é previsto que a largura da fundação pode ser estabelecida com vantagem através da RBC, conforme sugere a Fig. 4.

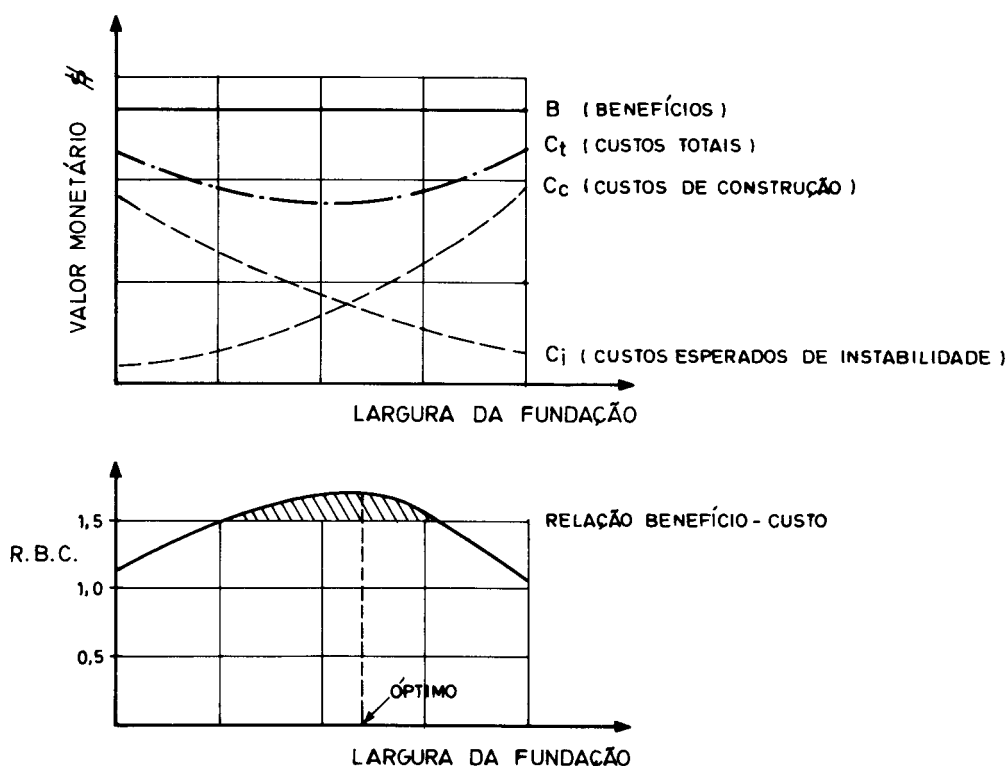


Fig. 4 — Determinação da largura óptima de uma fundação sugerida pelo método da RBC

4 — CONCLUSÕES

A Engenharia Geotécnica necessita de ferramentas poderosas para fins de projecto, de modo a suportar os processos complexos de tomada de decisões, quase sempre em condições de incerteza e de risco, e onde geralmente economia é sacrificada em favor da segurança.

Muitas dificuldades existem ainda para se implementarem as novas metodologias que se baseiam nas abordagens probabilísticas, por razões que vão desde o total descrédito sobre elas, até às simples incompreensões a respeito do carácter aleatório das propriedades mecânicas dos solos e das rochas. Porém, a criatividade e as experiências positivas serão os veículos que ajudarão a consolidar o emprego dos métodos probabilísticos para solução efectiva dos problemas geotécnicos, à semelhança do que já ocorre em outros campos de conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASH, J. L., and RUSSEL, B. E. (1974) — *Improved subsurface investigations for highway tunnel design and construction*. Fed. Hwy. Admin. Office of Research Washington, D. C.
- GAMA, C. D. (1987) — *Sensitivity analysis for failure probability of slopes*. "Proc. VIII Panamerican Conf. Soil Mech. Found. Eng.", vol. 3, pp. 441-451. SCG, Cartagena, Colombia.
- GENTRY, D. W., and O'NEIL, T. J. (1984) — *Mine investment analysis*. Society of Mining Engineers of AIME. New York.
- GRANT, E. L., and IRESON, W. G. (1970) — *Principles of Engineering Economy* (5th ed.). Ronald Press. New York.
- PRENTZ, D. L. (1987) — Report on Session VII — Risk Evaluation in Geotechnics. "Proc. VIII Panamerican Conf. Soil Mech. Found. Eng." vol. 1, pp. 431-452 SCG, Cartagena, Colombia.