

116.1

1905/83

XV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS

RIO DE JANEIRO

NOVEMBRO 1983

Volume II, pp.220-240.

CONSIDERAÇÕES SOBRE RETIFICAÇÕES NOS MÉTODOS DE JULGAMENTO DA ESTABILIDADE DE
TALUDES DE BARRAGENS.

TEMA IV

Prof. Dr. Victor F.B. de Mello

1. INTRODUÇÃO

Há já algum tempo tenho tentado enfatizar que a engenharia precisa avaliar cuidadosamente que tipos de ruptura se deve considerar fisicamente associáveis com taludes de barragem e, a partir daí, distinguir dentre as filosofias de projeto adequadas para os diferentes casos.

É compreensível que os engenheiros se concentraram inicialmente no estudo das rupturas. A capacidade humana de compreensão do contínuo vem da percepção de quando este deixa de existir, o reconhecimento do descontínuo.

Taludes rompem, alguns deles inexoravelmente, em sua vida em escala geológica do tempo. Mas como poderíamos distinguir entre movimentos vagarosos de instabilidade que somente causam fissuramentos e danos aceitáveis e movimentos súbitos que ameaçam vidas e propriedades?

É compreensível que a análise da estabilidade de Taludes, de grandes volumes e de movimentação rápida, e a quantificação de fatores de segurança FS contra tais instabilidades tenha absorvido grande esforço dos engenheiros geotécnicos de barragens.

Consideremos que os métodos analíticos de equilíbrio limite, e suas correspondentes quantificações, estão razoavelmente estabelecidos como ferramentas de trabalho. Mesmo que pretendêssemos descartar tais hipóteses de trabalho e recorrer a métodos mais modernos com análises da distribuição de tensões e deformações, vamos admitir que também estes poderiam ser estabelecidos como ferramentas rotineiras de trabalho.

Pretendemos enfatizar que independentemente dos nossos métodos de investigação-ensaios-computação, todos nossos FS são nominais e a problemática da decisão continua a ser uma descontinuidade arbitrária dentro do contínuo da realidade. Em algum ponto do histograma de porcentagem de probabilidade de ruptura (PP %), ou melhor, de Índices de Satisfação (SI) (3) vs. valores nominais de FS', um projetista precisa acionar a guilhotina da decisão SIM-NÃO.

O problema se transformaria em discutir valores aceitáveis de FS. O comportamento de uma massa instável deveria ser condicionado pela estatística de médias dentro dos grandes volumes e superfícies em jogo. Por que seria então que não se dispõe de nenhum histograma de índices de comportamento de movimentos em taludes versus FS nominais? A culpa decididamente não é da Natureza, mas de nossos modelos mentais de equilíbrio limite rígido-plástico, que transformam o problema na mera ajustagem das análises de superfícies rompidas (retro-análises) na hipotética condição de $FS \leq 1.00$, tendo sempre pressuposto estar trabalhando com fatores de segurança reais, e que engenharia é ciência e ambas determinísticas. Além disto rupturas sempre foram analisadas a posteriori, sob todas condições técnicas e psicoló-

gicas que se manifestam nestes momentos.

Neste artigo, pretendo discutir a natureza de Fatores de Segurança FS vs. Fatores de Garantia FG e as análises convencionais de estabilidade em Mecânica dos Solos aplicadas a taludes de barragens de terra e de terra-enrocamento com a necessidade de ajustá-las à realidade de maneira a acumular experiência observacional nos desejados histogramas de SI vs. FS ou FG; a necessidade de ajustar resultados de ensaios e de análises.

É correta a postura dos engenheiros de barragem ao afirmar aos teóricos (acadêmicos) que "uma barragem não pode romper". Definitivamente o talude de jusante de uma barragem nunca deve romper rapidamente. Cálculos probabilísticos são ilusórios. Devemos almejar e conseguir uma mudança de universo estatístico, para que a probabilidade da ocorrência do evento seja garantidamente, deterministicamente, nula.

2. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO PROJETO DE TALUDES DE BARRAGENS E DA DEFINIÇÃO ESTATÍSTICA DE ÍNDICES DE ACEITABILIDADE DE SEU COMPORTAMENTO

2.1 Em inúmeras oportunidades discuti o que considero os mais fundamentais princípios de um bom e teorizável projeto de barramento (3).

a) O princípio do pré-teste, a partir do qual se assegura que as condições em período construtivo sejam mais críticas do que as de período operacional, permitindo portanto raciocinarmos em termos de fatores de garantia FG e não de fatores de segurança FS;

b) o princípio da humildade em mudanças de condições, aonde se impede mudanças rápidas e desproporcionais em relação à experiência disponível e ao status quo;

c) o princípio de que se deve almejar que todas, mesmo que mínimas, variações previstas com o tempo sejam direcionadas de maneira favorável.

A principal consequência é que em um projeto concebido adequadamente segundo tais princípios, quantificações da estabilidade da obra sob condições críticas de operação deverão se demonstrar desnecessárias: é nesta hora em que sabedoria sobrepassa o conhecimento.

Entretanto devemos reconhecer que ainda nos falta conhecimento da distribuição estatística de índices de comportamento de taludes de barragens e de sua aceitabilidade.

2.2 Fator de Segurança é convencionalmente definido como:

$$\frac{\text{Resistências disponíveis } R (\pm er)}{\text{Tensões solicitantes } S (\pm es)}$$

Se durante construção da obra estabelecermos comportamento satisfatório e estável (elástico?) até determinado nível de tensões S_c (c = constru

ção), sabemos deterministicamente que $R \geq FS (R_c)$. Se por decisão e critério de projeto garantirmos que $Sc \geq So$ ($o =$ operacional) e anteciparmos que $Ro \geq Rc$, parece claro que não poderemos mais associar o valor de Ro ($\pm er$) como fator de segurança FS da obra.

So ($\pm es$)

Propuz em outras oportunidades (5) (6) que se denominasse fator de garantia FG tal quociente. Obviamente poderemos aceitar $FG \ll FS$ sem qualquer risco: por exemplo $FG = 1.1$ poderá muito bem se demonstrar satisfatório em determinado material e condições que requereriam $FS = 1.5$.

Estudos especializados de estatística para tais histogramas truncados já estão em andamento para desenvolver relações entre FG e FS.

2.3 Na figura 1 tento demonstrar que enquanto a Mecânica dos Solos tem se restringido até o momento a utilizar uma única definição de Fator de Segurança FS pode vir a ser importante reconhecer a existência de três Fatores (considerando somente a diferenciação das dispersões estatísticas das Resistências, R, sem adentrar em considerações quanto aos histogramas das Tensões S).

A definição de Fator de Segurança FS é rotineira.

Escolhi definir como Fator de Garantia FG a situação em que devido a existência de um critério de rejeição nós garantimos que o histograma de resistências será sempre superior a determinado valor pré-testado. Obviamente um valor de $FG = 1,5$ se constitui numa garantia de sucesso muito maior do que $FS = 1,5$. Visando classificar o conceito exposto usarei da discussão de estacas, aonde temos maior familiaridade, e de túneis em solo, nos quais os efeitos de execução são de grande relevância.

Uma estaca cravada estaticamente (estaca MEGA) sob 60 toneladas até recusa de penetração terá $FG = 2,0$ caso tenha carga de trabalho de 30t, sendo tal valor difícil de ser associado a um FS. Em contraposição uma estaca escavada sofreria de duas desvantagens em seu comportamento carga-recalque. Em primeiro lugar ela nunca teria sido pré-testada e portanto poder-se-ia concluir que ela estaria associável a conceito de FS (pior do que FG). Em segundo lugar, numa análise mais detalhada, poderíamos pensar que a situação é até pior. Todo o esforço da Mecânica dos Solos é de minimizar perturbações de amostragem e de ensaio e obter parâmetros representativos do solo, em sua forma intacta. Na realidade a obtenção de parâmetros da condição intacta de um solo estabeleceria um critério de rejeição superior, uma vez que o solo afetando o comportamento de uma estaca escavada representa um histograma sempre inferior, em vários níveis, truncado no valor superior. É uma situação diametralmente oposta aquela do FG, com critério de rejeição inferior. Poderíamos denominar a esta nova razão médias de

Resistências e de Tensões de Fator de "Seguro" FI: "seguro" é contra algo essencialmente inevitável, que deveria ser minimizado.

O fato básico é que $FI < FS < FG$ e que dependendo dos histogramas em questão tais diferenças podem ser apreciáveis.

Se os projetos de obras continuarem a almejar FS nominais de 1,5 sem reconhecimento destas diferenças significativas, todas estruturas nas quais os projetos se deveriam posicionar em termos de FG estarão incorporando graus de segurança desnecessariamente altos.

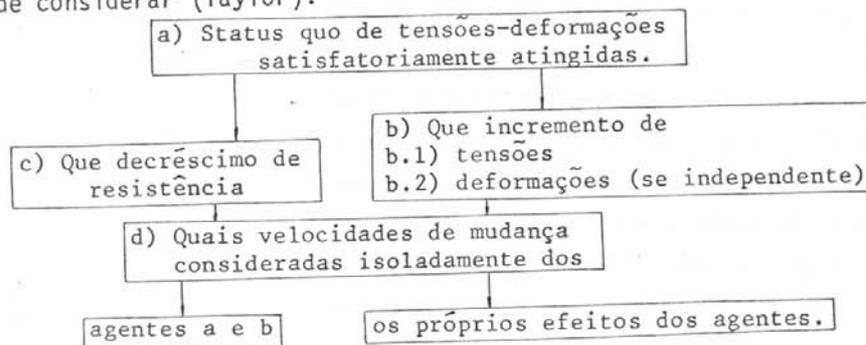
Túneis e estacas escavadas envolvem efeitos de execução que sempre deterioram os parâmetros in situ (de resistência, de deformabilidade), e por tanto envolvem condições de FI.

No caso de barragens, se permitirmos que as redes de percolação devidas ao primeiro enchimento do reservatório alterem as condições de estabilidade do talude de jusante, estaremos convidando condições tipo FS ao invés das desejadas condições pré-testadas de FG.

Um outro importante ponto a enfatizar é a distinção entre condições que permitem aplicação de universos de médias (como as acima) e aquelas que envolvem situações localizadas correspondendo aos extremos dos histogramas. Neste caso, os limites de confiança e fatores de segurança podem ser relacionados com eventos individuais no histograma e não com sua média. Tal é, por exemplo, o caso de instabilidade em bolsões localizados em um fuste de estaca sob lama bentonítica antes de sua concretagem: depois desta concretagem a rigidez do concreto garante a aplicabilidade das médias no perfil todo.

Na fase aberta de um túnel, durante sua escavação, instabilidades localizadas podem estar ocorrendo, e correspondendo a condições muito mais desfavoráveis: comportamento atrás da face de um shield de face fechada ou de um revestimento pode ser aceito como de médias, o que implica em condições mais garantidas.

2.4 Em uma conceituação e ensaios considerados razoavelmente "completos" em sua trajetória de tensões-deformações-tempo, não poderíamos deixar de considerar (Taylor):



Cabe notar que tensões internas (item a) são frequentemente diferentes das hipóteses geostáticas rotineiramente adotadas nos primórdios da Mecânica dos Solos ainda hoje corrente embora convencional. Além disto, incrementos de deformações (item b.2) pode ser dissociado de acréscimos de tensões (colapso de estrutura, por exemplo). Finalmente é importante frisar que importam as velocidades de variação das causas e as dos efeitos, as quais, face às reologias mais complexas, podem não ser similares.

Reconhecendo tais fatos estaremos somente enfatizando nosso reconhecimento de que os procedimentos de amostragem - ensaios - cálculos de estabilidade de taludes, e que sempre continuarão a ser.

2.5 É por isso que propuz que devemos estabelecer aceitáveis Índices de Satisfação operacionais para avaliar o comportamento de taludes de barragens, associando-os com seus FS (e/ou seus FG).

É importante utilizar no mesmo universo estatístico (mesma barragem) inúmeros distintos taludes para acumular dados de observação teorizáveis (por exemplo de incremento de movimentos plásticos comparados com valores de referência pseudo-elásticos estáveis). Para estabelecer os histogramas necessários precisaremos de centenas de pares de valores SI vs. FG.

Somente a partir deste momento poderemos aplicar nossa decisão de aceitabilidade, racional e economicamente.

3. ESTABILIDADE DE TALUDES DE ENROCAMENTO SOLTO E COMPACTADO

Na minha Rankine Lecture o assunto foi abordado para enfatizar que:

- a) análises de estabilidade de talude infinito são um extremo inferior conservador e poderiam aceitar $FG = 1,00^+$
- b) estabilidade é auto-testada durante a elevação da barragem com seu talude de inclinação constante; estamos portanto com FG e não FS.
- c) contamos com a vantagem determinística de $u = 0$ para permitir valores de FG baixos;
- d) devemos ter vantagens de tensões embutidas nos esmagamentos dos contatos entre "partículas" a partir das quais permitiríamos contar com maior estabilidade do que a convencionalmente computada.

Visando aprofundar o assunto os fatos a seguir são ressaltados, sintetizando a observação de um grande número de stock-piles de enrocamento e de agregados, com alturas entre 30 e 45 metros.

1) Os taludes estáveis (ângulo de repouso) foram levantados topograficamente em detalhe em lances mínimos que envolvessem mais do que 15 grandes blocos de enrocamento. O histograma para o enrocamento empurrado por lâmina de trator pode ser considerado como condicionado pela superfície na qual a pedra mais instável se firmou a partir de uma condição de movimento

(Fig. 3).

2) Em comparação, os taludes de escavação mostram duas tendências distintas: um trecho íngreme (até parcialmente subvertical), dominado pelas pedras mais estáveis tendo que se mover de seu repouso imbricado (atrito dinâmico vs. estático?) e o trecho inferior englobando taludes de escavação e de material rolado, em talus.

3) Comparando-se com material granular mais fino, estamos lidando com histogramas que não são tão apertados quanto os obtidos para areias uniformes testadas em laboratório.

4) Entretanto, mesmo em estoques de rocha angular lançada e em aterro de ponta existe um ganho de resistência devido a um estado de pré-tensão.

5) A questão retórica passa a ser: que ϕ' médio deve prevalecer nas análises nominais de estabilidade? O obtido em taludes de aterro (lançamento) ou aqueles dos taludes de escavações a partir da base, depois do benefício do pré-tensionamento?

6) Considerando a contribuição deveras significativa do pré-tensionamento obtido pela compactação do enrocamento em camadas, quanto mais íngreme poderemos ir sem risco de comportamento não satisfatório?

7) Em sintonia com a sugestão apresentada na Rankine Lecture, os movimentos horizontais e verticais de pontos na face do talude de jusante de um talude foram cuidadosamente levantados durante a subida do enrocamento por camadas compactadas (Fig. 4). Podemos pensar que as tendências de movimentos são tais que caso prosseguissem estaríamos modelando uma rutura de talude?

8) Note-se que este enrocamento era relativamente uniforme e compressível, não sugestivo de um imbricamento dos mais estáveis.

4. ESTABILIDADE DE PERÍODO CONSTRUTIVO EM MATERIAIS ARGILOSOS

Em outros artigos enfatizei que com os pesados equipamentos de terraplenagem, o fator condicionante é a traficabilidade, e que em uma barragem bem projetada com filtro septo (conforme Rankine Lecture) deveria ser difícil conceber condições de compactação levando a instabilidades de período construtivo.

Inexoravelmente teremos uma coesão de pré-adensamento em tensões efetivas (mesmo que só temporariamente) para as condições consideradas. Teremos também pressões neutras inicialmente negativas e não os assumidos diagramas de u_c vs. γ_z (c = construção) insinuados pelos ensaios de laboratório e observações de campo (principalmente do USBR). Finalmente o coeficiente de pressões neutras (\bar{B}) assumido constante para simplificar os cálculos parece desnecessário, gerando maior instabilidade em círculos rasos, os quais na realidade são beneficiados pela coesão e pela sucção (Fig. 5).

Na zona a jusante do filtro septo, afetando a fundamental estabilidade do talude de jusante, deveríamos preferir gerar pressões neutras de período construtivo a fim de assegurar o princípio de pré-teste e um FG satisfatório, com sua inexorável melhoria com a dissipação de u_c com o tempo.

No caso de se desenvolver u_c maiores do que os desejados, poderemos utilizar de camadas de compactação algo mais secas como ajustadores de u_c intermitentes, funcionando como mataborrões (filtros não comunicantes com drenagens livres). Poderíamos utilizar com vantagens o mesmo artifício na zona de montante de uma barragem desde que se respeite a área de núcleo: nesta zona de núcleo é necessário impedir os efeitos desfavoráveis de $k_h \gg k_v$ nas redes de percolação sendo desejável obter um alto u_c , preferivelmente próximo ao u_o (o = operacional) visando minimizar as mudanças de condição no núcleo no primeiro enchimento da barragem.

É bem conhecido e facilmente demonstrável que um núcleo de barragem pode ter altas pressões neutras de período construtivo sem gerar instabilidades do talude de montante, desde que conte com um espaldar robusto.

Caso necessário análises de estabilidade poderiam ser realizadas utilizando estimativas de tensões internas, coesão, pressões neutras negativas e positivas e envoltórias de resistência em tensões efetivas: mas o FS aceitável, e mesmo almejavável em projeto, deveria ser próximo a 1.0 para uma obra ser adequadamente pré-testada. As análises meramente facilitarão a introdução Bayesiana de sucessíveis valores de u_c vindos do campo para continuamente aprimorar a avaliação de FS, enquanto que observações de deslocamentos fornecem indicações do SI.

5. ESTABILIDADE DO TALUDE DE JUSANTE SOB RESERVATÓRIO CHEIO

5.1 Primeiro Enchimento

Toda a interessante problemática de comparação entre um primeiro enchimento de um reservatório rápido vs. lento não será discutida no presente. Assumiremos a tradicionalmente crítica rede de percolação de período operacional já estabelecida.

Pareceria que até que enfim estaríamos perante o todo importante caso no qual as estabilidades convencionais seriam indispensáveis. Na realidade, seria o oposto. A eventual hipótese de tal ruptura é tão inimaginável que só se poderia aceitar a sabedoria embutida em um projeto no qual o estabelecimento das condições críticas para reservatório cheio não causariam u_o maiores do que os u_c já satisfatoriamente vividos pela construção da obra. Me parece fundamental tal conceito. E com uma otimização da locação do filtro-septo, controlando u_o , e controle adequado dos critérios de compactação, controlando u_c , não seria difícil conseguir tal conceito de projeto

que dispensaria as análises de estabilidade.

Com $\Delta u = u_0 - u_c$ modestamente negativo a variação de estabilidade do período construtivo para o primeiro enchimento só poderia ser positiva, ΔFG positivo.

Muitas barragens tiveram comportamento satisfatório sem atender a tal princípio de projeto. Considero entretanto que tal fato não prova sua improcedência. A única maneira de garantir probabilidade nula de rutura do talude de jusante de uma barragem é haver pré-testado seu talude com $FG > 1^{++}$ e ter ΔFG positivo. Inúmeras seções e condições (critérios) de projeto podem ser esquematizadas mostrando como comparar u_c vs. máximo u_0 : é um exercício muito simples.

Qual é a pior (mais desfavorável) condição de u_0 possível? A hipótese de rede de percolação u_{rp} ? Sob quais hipóteses (cf. Rankine Lecture) uma vez que todas são fortemente medianificadas e altamente dependentes por sua vez de outras hipóteses? Seria correto então considerar que o máximo maximorum obtível seria a condição hidrostática u_{hid} ? Muitos especialistas afirmam que sim.

Eu me arrisco em posicionar que mesmo tal hipótese, em princípio, é errada pois não incorpora a influência da velocidade de mudança de condições, de possíveis consequências reológicas de tais mudanças e das velocidades de tais consequências. Exemplificando, em um enchimento rápido de reservatório com hipótese desfavorável de $\Delta u = u_0 - u_c$ positivo provoca-se uma súbita queda de estabilidade, podendo gerar rápidas deformações e consequentemente variações volumétricas devidas ao cisalhamento na superfície de rutura. Se garantirmos um comportamento dilatante estaríamos seguros, mas no caso de haver tendências a compressões estaríamos gerando aumentos Δu de maneira que o u real em jogo fosse $u = u_0 + \Delta u$.

É fundamental buscar o universo estatístico geomecânico e reológico correto que dispense a necessidade de quantificações da estabilidade de taludes de jusante de barragem, através de estudos de mudanças de condições e seus histogramas de análise truncados.

5.2. Estabilidade de Longo Prazo

Para a análise da estabilidade a longo prazo do talude de jusante de uma barragem novamente a única análise apropriada é a avaliação mental de que mudanças de carregamentos e resistências tendem a ocorrer e afetar os FG já estabelecidos para o primeiro enchimento.

Realmente é absurdo pensar em uma análise de estabilidade do Talude desvinculando-a de todo o raciocínio exposto visto que sua imprecisão probabilística é imensamente superior à obtida pela análise Bayesiana de probabilidades a posteriori sobrepostas no universo a priori já conhecido (ver

Rankine Lecture). Conceitualmente não há diferença em utilizar a variação de probabilidade da ocorrência de u da condição $u_{0.p.e}$ (p.e. = primeiro en^{chimento}) para $u_{0.l.p}$ (l.p. = longo prazo), de uma maneira similar à preliminarmente sugerida como de ajustes progressivos de u_c como uma quantificação no Método Observacional.

Cabe-nos questionar se u_0 tenderia a aumentar com o tempo? Depende de como a consolidação, compressões secundárias, fissuramentos por tração,... etc. viriam a mudar as permeabilidades relativas do maciço. Como são poucos nossos conhecimentos para quantificar os efeitos do tempo! Não nos faltam porém condições de antever as tendências de variações, se favoráveis ou desfavoráveis: só podemos almejar as primeiras.

Precisamos almejar e projetar de maneira que a resistência dos materiais aumente com o tempo e que u decresça com o tempo: ambas tendências estão associadas a compressões, desejavelmente pequenas. Resistência poderá inclusive se beneficiar de efeitos de cimentação e tixotrópicos.

Não parece ser muito difícil projetar uma barragem de maneira a garantir a ocorrência de tais pequenas compressões, de maneira que após $FG_{0.p.e} > 1^{++}$ garantimos ΔFG positivo.

Parece que o medo de instabilidades a longo prazo em taludes naturais tiveram influência não justificável no projeto de barragens: enquanto que instabilidades a longo prazo são inexoravelmente um problema em taludes naturais com $FS = 1.00$, em um bom projeto de barragem com $FG > 1.00^{++}$ e $\Delta FG > 0$, a probabilidade da existência de problemas é remota. Cabe ressaltar que muito depende das deformações de cisalhamento, sua velocidade e o comportamento tensão-deformação ser ou não friável: não é válido se contentar com a utilização da envoltória de resistência em tensões efetivas e somente u_0 quando pode haver uma parcela adicional Δu devida às deformações cisalhantes existentes.

Uma condição de carregamento que parece curto-circuitar o raciocínio simples postulado seria o sísmico. Não pretendo discutir este caso adicional, sendo suficiente enfatizar que até o caso de probabilidades da ocorrência de um sismo catastrófico não deveriam ser consideradas independentemente da probabilidade de ocorrência de sismos de menor intensidade. Exceto no caso extremo de ocorrência de um sismo de intensidade máxima-maximum no primeiro evento, a ocorrência de eventos de intensidade menor poderiam e deveriam ser consideradas no que diz respeito ao efeito benéfico cumulativo de sucessivas compressões cíclicas. Seria ideal conseguir obter materiais com comportamento levemente dilatante para intensidades maiores do que algum valor de tempo de recorrência moderadamente raro.

6. TALUDE DE MONTANTE - REBAIXAMENTO INSTANTÂNEO

Este é um tópico no qual as práticas correntes e as teorizações disponíveis estão erradas. Como resultado parece que os taludes de montante das barragens estão sistematicamente super dimensionados. A bibliografia mostra casos como o do esvaziamento do reservatório de Tarbela (≈ 4 metros por dia) e o rebaixamento em 10 horas do reservatório de Euclides da Cunha com 58 metros de profundidade após rutura da barragem por galgamento, nos quais nada ocorreu no que diz respeito ao talude de montante.

Não é somente o caso de permitir a utilização de baixos FS como 1.10 (como hoje comumente utilizado) assim como a justificativa não se baseia no fato de que rebaixamentos não são tão instantâneos e que algum abaixamento da freática fonte deveria ser incluído. Me parece ser um caso no qual o modelo mental de análise apresenta inconsistências desde o início (ver Rankine Lecture): o fato de acertadamente abaixarmos o FS em um modelo mental errôneo não nos impede de enfrentar algumas desagradáveis e inesperadas surpresas (tais como teria sido o caso recente da barragem San Luiz, California, USBR?).

Visando analisar as hipóteses críticas limites do modelo mental utilizado, me restringirei a considerar um maciço hipoteticamente absolutamente saturado. Todos sabemos como são altas as contra-pressões necessárias para saturar corpos de prova em células triaxiais (6 a 12 kg/cm^2) especialmente se o solo é consolidado pela tensão de confinamento, reduzindo assim o diâmetro dos microporos de ar. Assim parece óbvio que em barragens de altura módica e/ou para círculos rasos de rutura o solo compactado não estará saturado.

Os conceitos abaixo sintetizados restringem-se a considerações de tendências de variação de σ (assumindo o solo saturado e o fluido intersticial incompressível): em uma análise mais generalizável deveremos considerar tendências de variação de σ' e de u (além de sofisticações de segunda ordem como rotação das tensões principais, etc.).

Os principais erros de conceito embutidos nos processos de análise disponíveis podem ser sintetizados como:

a) não deveria existir a dicotomia entre:

a.1) aterros francamente drenantes: Terzaghi-Peck, 1948, aceitando redes de percolação, rebaixamento instantâneo;

a.2) aterros compressíveis: pressões neutras geradas por $\Delta\sigma_t$ no talude da barragem e conceito de r_u ($r_u \approx 1.0$), vide Bishop, 1952 etc.

Obviamente drenantes vs. não drenantes não tem vinculação com hipótese de compressibilidades. Da mesma forma o conceito de incompressibilidade vs. compressibilidade não tem obrigatoriedade de associação direta determinística com drenabilidade ou velocidade de drenagem.

b) Segundo: Excetuando-se materiais extremamente diferenciados não

existe distinção radical das qualidades intrínsecas de drenagem vs. impermeabilidade e de compressibilidade vs. incompressibilidade, no que diz respeito a materiais e suas condições de utilização. As línguas espanhola e portuguesa (capaz outras?) têm uma distinção conceitual importante em seus verbos estar e ser.

Em primeiro lugar nenhum material possui uma tendência contínua (de comprimir, de drenar, etc.) em todo talude de montante de uma barragem.

Além disso compressibilidade, etc. são um problema de comportamento temporário (estar): um material não se comportará como compressível (mesmo se geralmente ou frequentemente o é) caso submetido a um alívio de tensões.

Um elemento de solo em determinado local de um círculo crítico pode estar submetido a um alívio de tensões e querer se dilatar, enquanto outro elemento de solo em outro local do mesmo círculo crítico pode estar submetido a um incremento de tensões e querer comprimir.

Como um curioso exemplo extremo utilizado para enfatizar o conceito em questão, poderíamos dizer que em um material que é homogêneo e permeável, em regime de percolação estabilizado, cada linha de percolação se comporta como (está) impermeável, uma vez que nenhuma gota de água a atravessa (não importa que não há interesse nessa gota em atravessar a linha de percolação). Todos materiais são compressíveis, permeáveis, etc...: é questão de algebra (tendência de dilatar vs. tendência de comprimir) e de grau (compressões maiores ou menores) que determinarão seu comportamento.

c) Terceiro: existem simplificações exageradas nos processos vinculados a σ_t e r_u (ou \bar{B}) que não permitem a incorporação das vantagens (ou desvantagens) da mais poderosa ferramenta de projeto em uma barragem: o posicionamento do filtro-septo vertical e os detalhes de drenagem (para controlar u , como por exemplo drenos sem comunicação, cf. Rankine Lecture).

O grau de importância de tais condicionantes varia consideravelmente em distintas seções-tipo.

O princípio de projeto proposto é simples e consistente com a hipótese de aterro saturado com fluido incompressível. A tendência de mudança da rede de percolação entre condição de longo prazo e de rebaixamento é instantânea, e o que importa são as variações instantâneas de pressões neutras (compare com o modelo reológico da teoria do adensamento proposto por Terzaghi).

Assim podemos partir de duas redes de percolação: a de longo prazo e a de rebaixamento rápido; a locação dos detalhes de drenagem já devidamente incorporada. Uma vez que os valores de pressões neutras nas duas condições estão estabelecidos, baseadas na rápida mudança das condições de contorno, é simples verificar quais serão as tendências de mudança dos $\Delta\sigma'v$

que determinarão se os elementos de solo tenderão a se comprimir. Caso exista a tendência a compressões deverá haver um aumento correspondente de pressões neutras transientes (devido ao ΔV). As análises de estabilidade deverão se basear na rede de percolação de rebaixamento rápido (válida para poros incompressíveis) complementada (no caso extremo) pelos Δu devidos ao efeito da compressão gerada por $\Delta \sigma'$ (e eventuais consequências do cisalhamento gerado por ΔV).

Em outras palavras, o princípio é que redes de percolação rotineiras presumem poros e fluido incompressível: portanto se deve primeiramente verificar qual será a tendência, a dilatar ou a comprimir. Assim se deve superpor na rede de rebaixamento rápido tal comportamento de dilatação ou de compressibilidade.

Mais uma vez, condições de instabilidade são melhor analisadas como mudanças de condições, superpostas em um talude previamente demonstrado satisfatório sob hipótese de nível d'água máximo. Além disso, a ocorrência de frequentes rebaixamentos parciais pode ser introduzida de maneira a verificar se a tendência é de pequenas compressões e conseqüentemente aumento de resistência.

Uma seção de barragem otimizada em seu projeto buscaria pequenas compressões para os frequentes rebaixamentos parciais e uma tendência à dilatação sob o rebaixamento rápido crítico.

Entretanto se as pressões neutras de período construtivo u_c foram satisfatoriamente altas em comparação com as u_{rr} (rebaixamento rápido) + Δu , e o talude de montante tiver sido demonstrado estável em período construtivo suficientemente desfavorável, estaremos em condição pré-testada com $FG = 1^+$.

Existe considerável evidência, direta e indireta, que os taludes de montante das obras estão superdimensionados para atender à condição de rebaixamento rápido.

7. CONCLUSÕES

De uma maneira análoga à evolução do projeto de fundações que evoluiu da discussão da capacidade de carga para o mais frutífero enfoque da limitação das deformações para evitar danos, o campo da otimização dos taludes de barragens deve se mover significativamente nesta direção, quando se coletarem dados estatísticos correlacionando FS ou FG e Índices de Satisfação SI.

Apresento algumas recomendações de focar análises de estabilidade para fornecer fatores de segurança FS nominais, ou preferivelmente FG, e os níveis de aceitabilidade de tais índices em relação a inúmeras situa-

ções de estabilidade (não rutura).

Nas condições mais críticas o único enfoque satisfatório para se garantir o projeto de uma barragem é considerar as mudanças de condições antevistas, iniciando por pré-testar a estrutura em situações mais críticas do que as operacionais futuras.

8. REFERÊNCIAS CONSULTADAS

- (1) - Bishop, A.W. & Bjerrum, L. (1960), "The Relevance of the Triaxial Test to the Solution of Stability Problems", Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, pp. 437-501.
- (2) - da Cruz, P.T. & Massad, F. (1966), "O Parametro B em Solos Compactados", Anais do III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Belo Horizonte, vol. I, pp. 11-124.
- (3) - de Mello, V.F.B. (1977), 17th Rankine Lecture: "Reflections on Design Decisions of Practical Significance to Embankment Dams" Geotechnique, 27(3), Sep. 1977, pp. 281-355.
- (4) - de Mello, V.F.B. (1979), "Soil Classification and Site Investigation", 3rd International Conference 'Applications of Statistics & Probability in Soil & Structural Engineering', Sydney, Australia, vol. III, pp. 123-144.
- (5) - de Mello, V.F.B. (1981), "Proposed Bases for Collating Experiences for Urban Tunnelling Design", Symposium on Tunnelling and Deep Excavations in Soils, São Paulo, pp. 197-235.
- (6) - de Mello, V.F.B. (1982) "Desafios no Desenvolvimento de uma Engenharia de Solos Autoctone Firmemente Enquadrada em Princípios Universais", Conferência de Abertura, VII COBRAMSEF, Olinda/Recife.
- (7) - Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1974), "Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics", New York, John Wiley & Sons, 1974.
- (8) - Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice", New York, John Wiley & Sons, 1948.

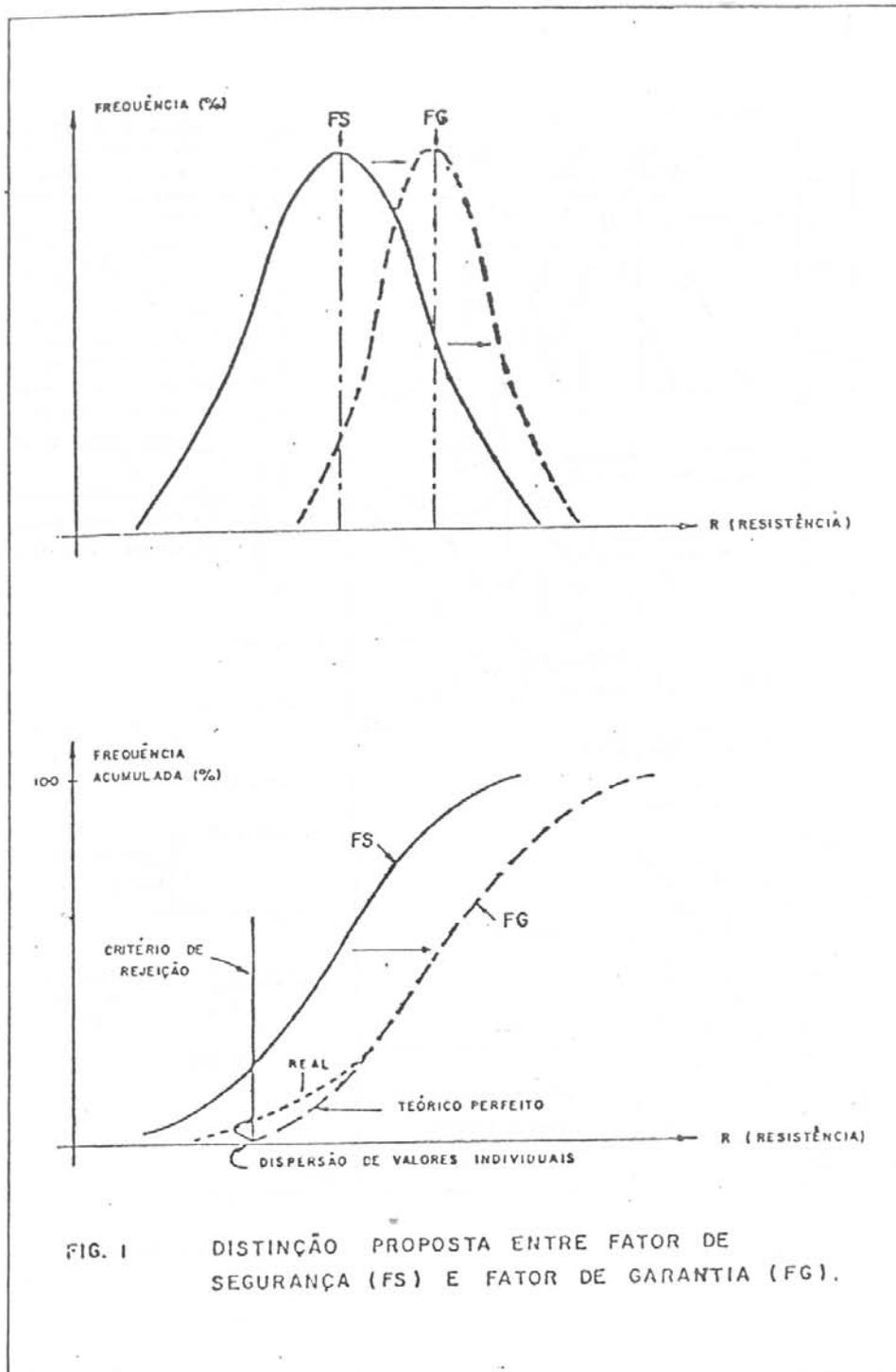


FIG. 1 DISTINÇÃO PROPOSTA ENTRE FATOR DE SEGURANÇA (FS) E FATOR DE GARANTIA (FG).

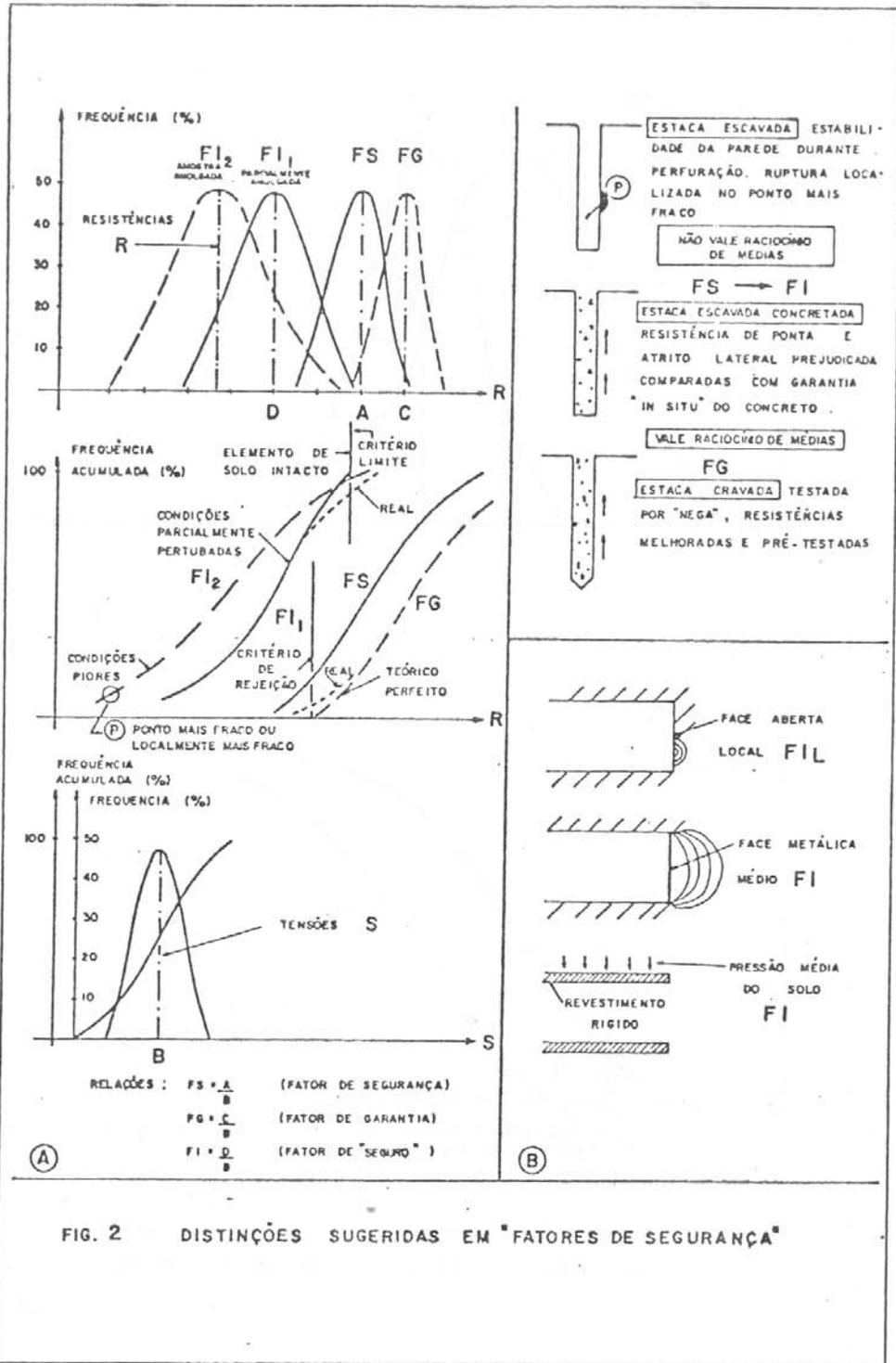


FIG. 2 DISTINÇÕES SUGERIDAS EM "FATORES DE SEGURANÇA"

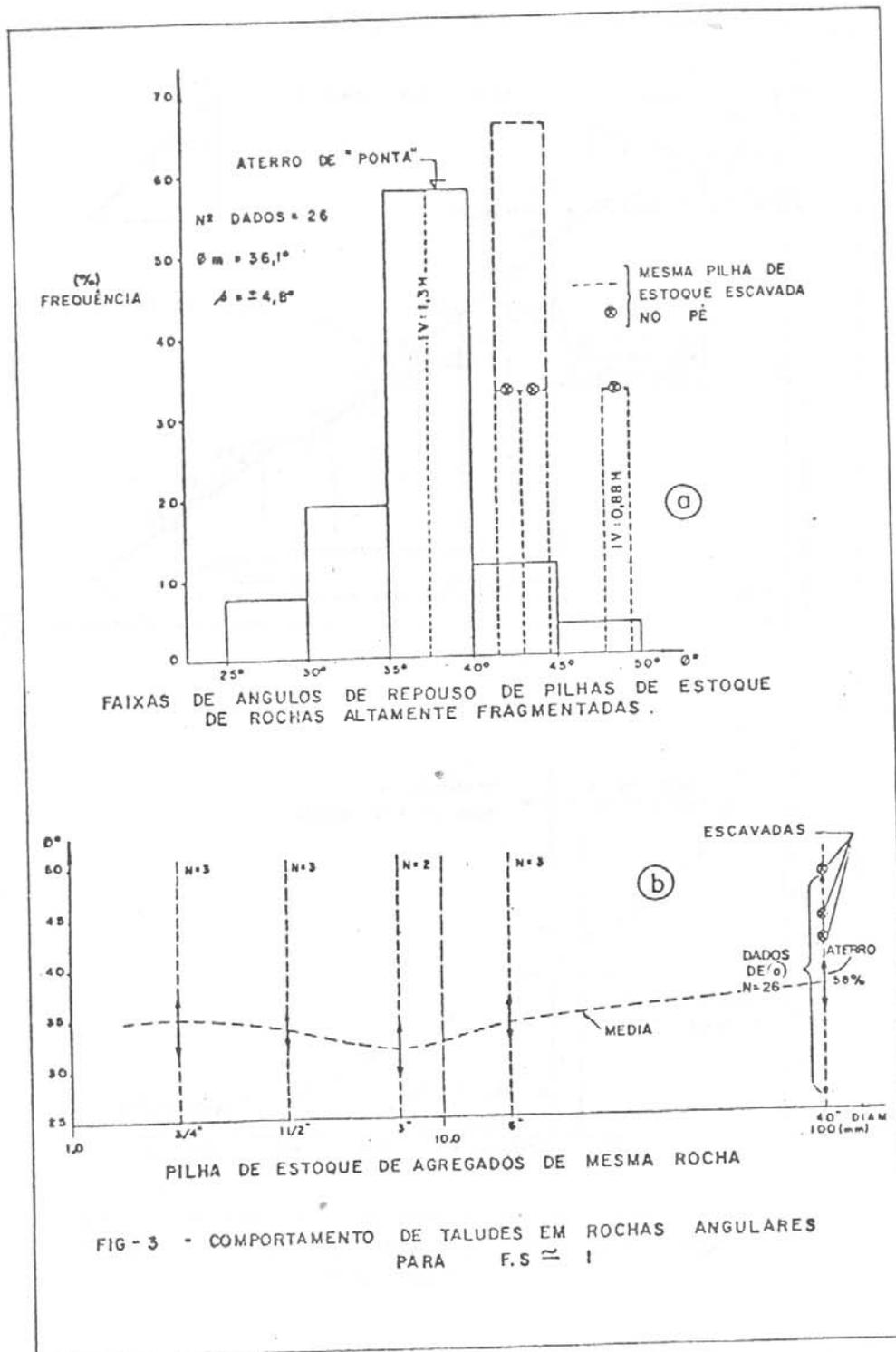
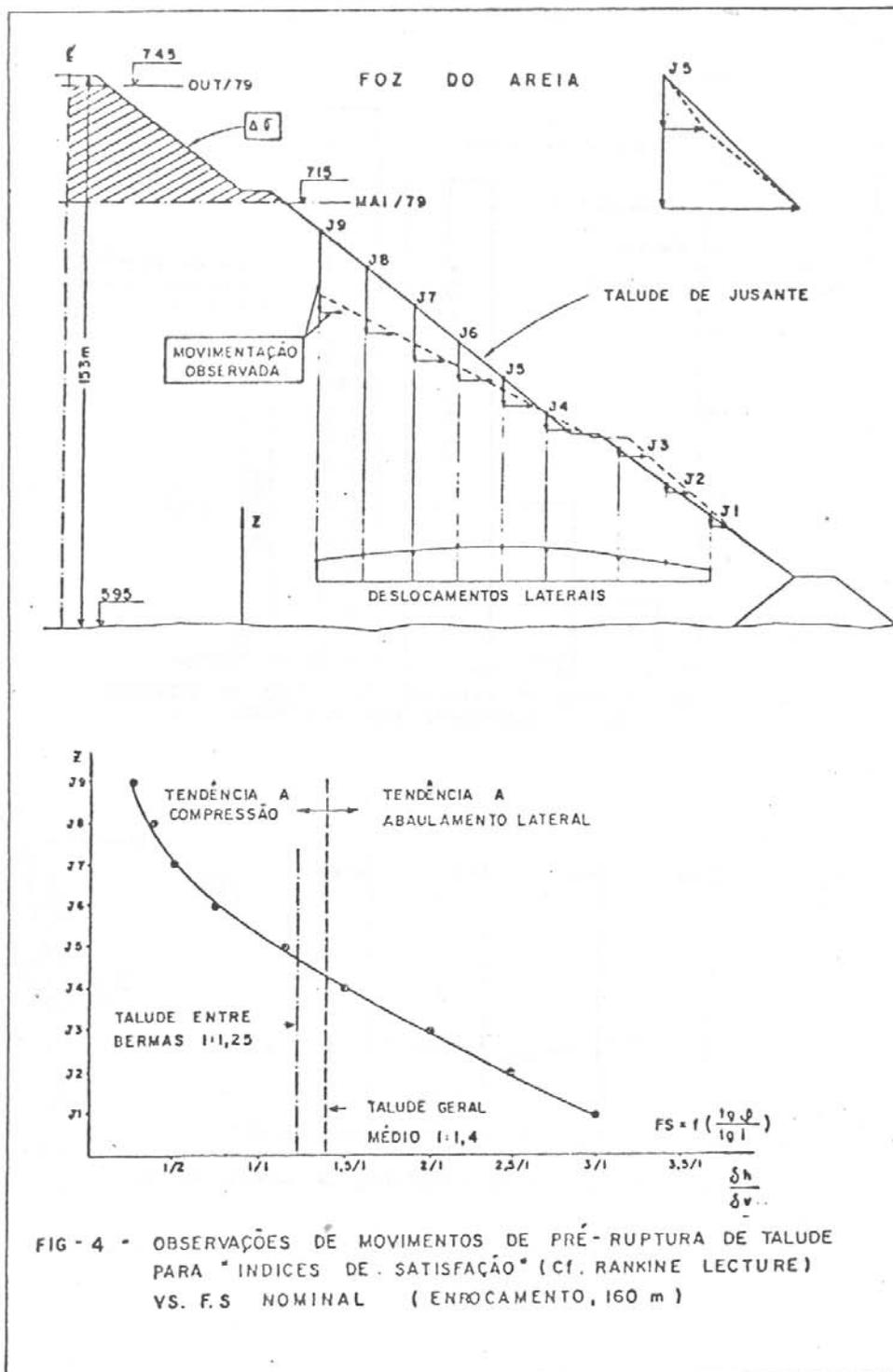
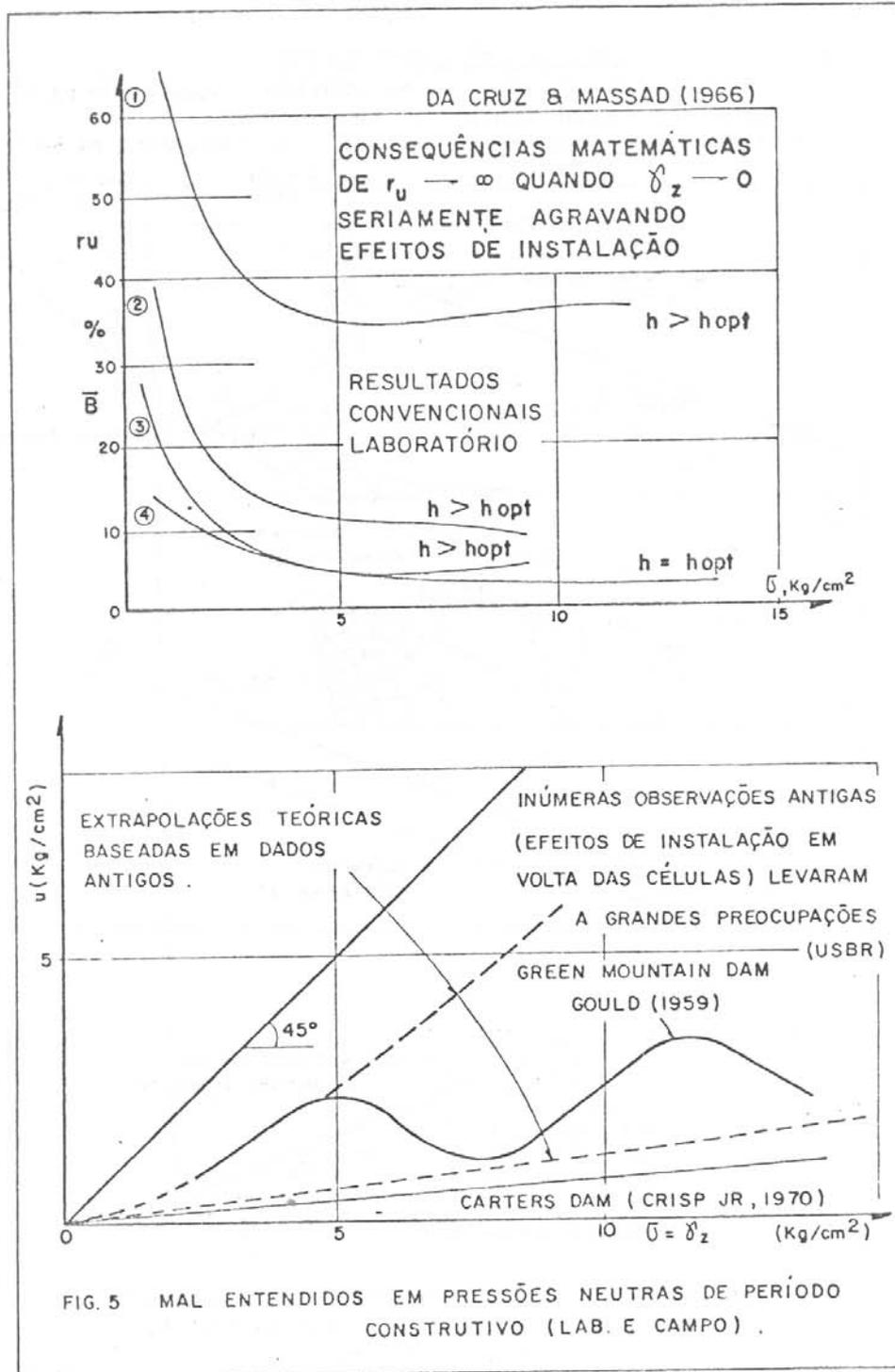
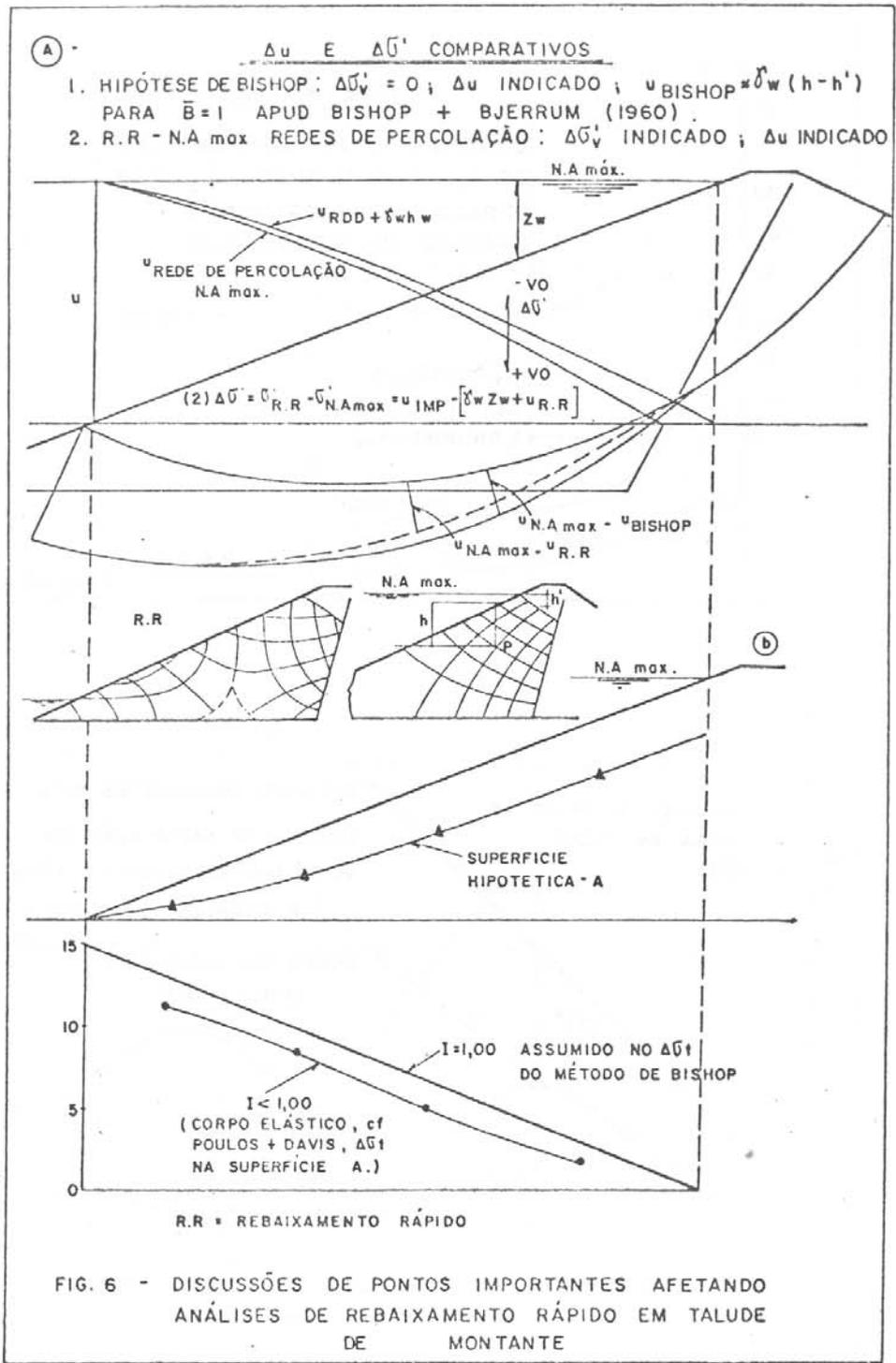


FIG-3 - COMPORTAMENTO DE TALUDES EM ROCHAS ANGULARES PARA $F.S \approx 1$







XV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS

RIO DE JANEIRO, NOV. 1983
Anais Volume III

SESSÃO SOLENE DE ABERTURA

COMPOSIÇÃO DA MESA DIRETORA

CARLOS ALBERTO PADUA AMARANTE

Presidente do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens

JOSÉ COSTA CAVALCANTI

Presidente da ELETROBRÁS e Diretor Geral da Itaipu Binacional

TERRY MCINTIRE

Representante do Consul dos Estados Unidos da América no Rio de Janeiro

ROY WASHINGTON CARLSON

Homenageado

ANTONIO CARLOS T. HOLTZ

Diretor de Planejamento e Engenharia da ELETROBRÁS

VICTOR F.B. DE MELLO

Presidente da Associação Internacional de Mecânica dos Solos

SIMÃO PRISZKULNIK

Presidente do Instituto Brasileiro de Concreto

DELPHIM MAZON FERNANDES

Vice-Presidente da Comissão Internacional de Grandes Barragens

RUI TAIJI MORI

Representante do Presidente da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos