

UM ESBOÇO DA HISTÓRIA DA MECÂNICA DOS SOLOS (VI)

An Outline of the History of Soil Mechanics (VI)

JOSÉ FOLQUE*

4.4 – O Congresso do México (1969)

Organização

Este Congresso inaugurou um novo tipo de organização. Renunciando a, em sessões plenárias, cobrir todo o vasto domínio da Mecânica dos Solos, optou-se por serem discutidos, em sessões desse tipo, só alguns *temas fundamentais*. Cada um desses temas foi objecto de uma conferência “estado-da-questão” a cargo de reputado especialista; em relação a cada um desses temas foram apresentadas Comunicações; e só estes temas tiveram Discussão em Painel.

Para cobrir os temas sobranes realizaram-se Sessões Especiais, cada uma das quais com organização a cargo de um reputado especialista na matéria.

No decurso do Congresso deixaram-se intervalos entre as Sessões Plenárias para realizar, em grupos de 3 ou 4, as Sessões Especiais. Daqui decorreu que cada congressista só teve possibilidade de participar num número muito limitado de Sessões Especiais; o que se justifica à luz do pressuposto, de facto razoável, que os assuntos tratados nessas Sessões não eram de interesse geral.

Foram escolhidos como temas gerais:

- G1 – Tensões-deformações e resistência dos solos
- G2 – Fundações de edifícios em solos argilosos
- G3 – Barragens de terra e de enrocamento
- G4 – Escavações profundas e túneis em solos brandos
- G5 – Estabilidade de taludes de aterros e de encostas naturais.

Realizaram-se as Sessões Especiais que a seguir se mencionam:

- E1 – Amostragem
- E2 – Dinâmica dos solos
- E3 – Solos expansivos
- E4 – Medição de pressões nos poros
- E5 – Propriedades do loess e outros solos colapsíveis
- E6 – Propriedades dos solos lateríticos
- E7 – Influência no comportamento das argilas da estrutura e da constituição físico-química

* Investigador LNEC.

- E8 – Atrito negativo e assentamentos de fundações em estacas
- E9 – Coeficientes de segurança em Mecânica dos Solos
- E10 – Propriedades das argilas duras, fissuradas
- E11 – Terminologia e definições
- E12 – Recentes progressos nas teorias de consolidação
- E13 – Propriedades de materiais para enrocamentos
- E15 – Paredes moldadas
- E16 – Ancoragens
- E17 – Novos métodos de ensaio em laboratório
- E18 – Medições “in situ”
- E19 – Estradas e Aeródromos

4.4.1 – Temas Gerais

G1 – Tensões-deformações e resistência de solos

G1.1 – Estado-da-questão – *SCOTT e HON-YIM KO*

Os autores começam por fazer notar que apresentarão o estudo em três níveis: *a)* pesquisa de questões relacionadas com a físico-química e com a microscopia; *b)* investigação matemática contemplando meios contínuos; *c)* comportamentos macroscópicos.

a) Estudos físico-químicos e microscópicos

Os estudos microscópicos, utilizando microscopia electrónica, têm sido numerosos. São de realçar os que têm permitido definir “*estruturas*” de argilas e as alterações estruturais (sobretudo *rotações* de partículas) que ocorrem nas zonas de corte.

Estudos de aprofundamento das características físico-químicas dos solos têm sido conduzidos com particular êxito aplicando, sobretudo, as teorias de “rate-process”. Encontram-se estabelecidas, dentro deste enfoque, as equações que regem os processos de fluência e as que dão as “*energias de activação*” (barreiras de energia).

b) Mecânica do contínuo e métodos matemáticos

Dando resultados úteis, como “primeira aproximação” e pelo conteúdo qualitativo, têm sido desenvolvidos numerosos estudos postulando para os solos propriedades de “*contínuo elástico*”.

Para estudar problemas de fluência e de relaxação têm-se conduzido com êxito trabalhos em que se admite para os solos características visco-elásticas.

No que respeita a teorias de consolidação os autores recordam que elas fundamentalmente têm de postular comportamentos para duas fases: o conjunto de partículas sólidas e o fluido de preenchimento dos poros. Ora a qualquer uma destas fases poder-se-á atribuir comportamento elástico (linear ou não-linear), elasto-plástico, visco-plástico, viscoso e, com outro enfoque, as fases podem ser consideradas compressíveis ou incompressíveis.

É óbvio que são muito numerosas as *combinações* que estas diversas hipóteses permitem. Por enquanto só poucas estão exploradas. Mas pode-se prever que algumas outras ainda o venham a ser para conseguir melhor ajuste das teorias ao que é observado no “real”.

c) Comportamentos macroscópicos

Grandes progressos têm-se conseguido nos equipamentos e procedimentos de laboratório, e por isso muito se tem melhorado a observação dos comportamentos macroscópicos. Foi assim possível progredir sensivelmente no que concerne ao conhecimento da deformabilidade e resistência à ruptura.

No que respeita a areias pode-se dar como assente que, para baixas tensões, a *curva intrínseca* é linear; para altas tensões ela começa a encurvar, o que se deve, sobretudo, ao esmagamento de grãos.

Ainda para as areias há a assinalar os importantes esclarecimentos que se têm obtido no que respeita ao comportamento sob cargas cíclicas (liquefação).

Para os solos argilosos os progressos têm sido notáveis nos conhecimentos sobre andamento de curvas intrínsecas e resistência em termos de tensões efectivas.

G1.2 – Comunicações

As comunicações apresentadas são numerosas e fazem uma boa cobertura do tema.

SHIBATA et al. apresentam um trabalho sobre a evolução no tempo das deformações de solos argilosos sob tensão constante. É analisada a influência da relação “tensão tangencial/tensão normal” no processo de fluência. Particular atenção é dada a efeitos de tempo na resistência final.

SINGH et al. continuam estudos prévios em que foi proposta uma relação generalizada tensão-extensão-tempo. Mostram que há três categorias de solos: aqueles cuja resistência cresce com o tempo, os que, pelo contrário, têm resistência que diminui com o tempo e ainda os que têm resistência praticamente independente do tempo.

MURAYAMA também continua estudos anteriormente iniciados procurando agora relações tensões-extensões-tempo e critérios de ruptura que possam ser generalizados abrangendo areias e argilas. É de particular interesse um novo conceito de ruptura apresentado pelo autor: considera ele que um solo está em ruptura quando mais de 50% das suas partículas sofrem deslocamento incessante. Por outras palavras: quando da aplicação de uma solitação resulta que só uma pequena percentagem de partículas entra em movimento, o solo não está em ruptura. A ruptura dá-se para uma proporção grande de partículas postas em movimento.

DUNCAN et al. estudaram por elementos finitos a distribuição de tensões numa amostra ensaiada em corte simples; a tensão medida no plano horizontal não é a máxima. A comunicação apresenta um método para a calcular.

PERLOFF et al. também aplicaram elementos finitos para estudar a distribuição de tensões num provete sujeito a ensaio triaxial. A mais importante conclusão que se tira refere-se aos constrangimentos introduzidos pelas placas de topo e base.

RECORDON et al. apresentam resultados de medições do grau de compactação por meio de ensaios de carga em placa.

LOMITZE et al. relatam extensos e importantes estudos efectuados com um aparelho triaxial “verdadeiro” usando amostras cúbicas. Os resultados apresentados são tratados em termos de averiguação das características reológicas com base, sobretudo, na teoria que a escola soviética designa por “teoria da hereditariedade”.

Um outro estudo relacionado com a ruptura de argila é apresentado por JUAREZ-BADILLO. Propõe este autor que se considerem as argilas como meios “puramente friccionais”. Introduce o conceito de *tensão fundamental*, composta por duas parcelas: a tensão efectiva e a tensão *armazenada*. Nestes termos a diferença entre a resistência “pico” e a resistência residual mede a tensão “armazenada”.

Um trabalho de BEREZANTZEV et al. trata sobretudo da não-linearidade da envoltória de Mohr.

MOGAMI apresenta correlações referentes à sua própria Mecânica dos Solos granulares. Segundo o autor, o comportamento de um solo é determinado, não só pelo índice de vazios médio, mas também pela *distribuição* dos índices de vazios no solo.

HABLY e ROSCOE apresentam um aparelho, que designam por biaxial, em que ensaiam amostras prismáticas de secção rectangular. A grande vantagem reivindicada para este equipamento é a uniformidade de tensões-deformações conseguida quando se procede ao corte por compressão aplicada no lado maior da secção. Os resultados obtidos mostram boa concordância com o critério de ruptura de Mohr. É de notar que estes resultados diferem dos obtidos em ensaios com aparelhos triaxiais “verdadeiros”, como os de Lomitze que atrás se citaram.

GIBBS et al. discutem as técnicas usadas no Bureau of Reclamation para medir poro-pressões, insistindo nas mais desenvolvidas, destinadas a medir pressões neutras negativas.

De acordo com LADAY et al., o ensaio de penetração é um dos melhores métodos para medir resistências não-drenadas de argilas, pois a “perturbação” causada pelo ensaio nos estratos da argila é muito reduzida.

FOLQUE et al. apresentam um método para realizar ensaios triaxiais usando um só provete. O ensaio é realizado em termos de tensões efectivas, por escalões, sendo fundamental no método (ao contrário de outros anteriormente propostos) que as tensões sejam sempre *crescentes, de escalão para escalão*.

Merece menção um estudo apresentado pelo U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS comparando resultados de ensaios de classificação, realizados com os mesmos solos, por *nove* diferentes laboratórios. As diferenças entre resultados em certos casos são apreciáveis, o que não pode deixar de causar certa perplexidade.

ROWE continua os seus estudos sistemáticos sobre resistências passivas em muros de suporte. Chama a atenção para o facto de que o impulso passivo não é determinado pela resistência “pico” mas sim pela “residual”.

GLYNN et al. propõem uma relação tensão-extensão para argilas sujeitas a cargas repetidas. A relação é linear no início do processo e encurva quando cresce o número de ciclos.

BURLAND estuda a resposta de argilas, em aparelho triaxial, quando solicitadas *subitamente* por uma carga vertical elevada (simulação do “choque” no estudo de pavimentos).

SUTHERLAND et al. descrevem um aparelho triaxial “verdadeiro” que aplica cargas do seguinte modo: a carga vertical é aplicada por uma placa rígida; uma das tensões horizontais é aplicada pela pressão do líquido que preenche a câmara de ensaio; a outra tensão horizontal é aplicada por uma almofada preenchida com líquido.

LEE et al. salientam estudos em que efectuaram ensaios com muito diferentes velocidades de crescimento de carga; estas iam desde 0,02 a 15000%/min. O aumento de velocidade induz um muito apreciável aumento de resistência.

LOWE et al. apresentam extensos estudos de comportamento de argilas glaciares, muito rijas e fissuradas. É aqui muito importante a *dimensão* da amostra: a resistência de amostras ou blocos de grandes dimensões chega a cair para 1/3 da que é exibida por amostras de 2 polegadas.

Apresenta particular interesse o trabalho de TOWNSEND et al. conduzido sobre argilas consolidadas. A curva tensões-deformações exhibe andamento rectilíneo até que é ultrapassada a tensão de *colapso* das ligações estruturais.

WEBB apresenta estudos relativos à determinação de resistências residuais em ensaio triaxial; essas resistências coincidem com as que se determinam em ensaios de corte com múltiplas reversões da meia-caixa móvel.

Um estudo de BALLY trata das características tensões-deformações de solos não-saturados, características determinadas por meio de ensaios "in situ" dada a dificuldade de obter amostras representativas destes solos.

HANRAHAN et al. afirmam que, durante a consolidação, a deformação volumétrica e a deformação distorcional têm leis de variação no tempo independentes; devem portanto ser avaliadas em separado.

G1.3 – Discussões

O Painel de Discussão era constituído por BIAREZ (França), GIBSON (Grã-Bretanha), KENNEY (Canadá), MITCHELL (EUA) e MOGAMI (Japão).

A primeira intervenção foi de MITCHELL que dissertou sobre:

- a) Aplicação das teorias de "rate-processes". Relações fenomenológicas entre tensões-extensões-tempo e "tempo para a ruptura" para cargas mantidas
- b) Exemplos de aplicação de relações constitutivas na previsão de comportamentos tensão-deformação. São tratados os casos de assentamentos de sapatas e de deslocamentos lentos de taludes de escavação instáveis;
- c) Validade da lei de Darcy nas argilas saturadas. Resultados de estudos recentes confirmam a validade, mas nalguns casos começam a aparecer evidências de não-proporcionalidade entre o caudal e o gradiente hidráulico. Também começam a aparecer resultados que mostram, em relação com os fenómenos de consolidação e expansão, que gradientes "químicos" somam-se aos gradientes hidráulicos.

MOGAMI na sua discussão debruçou-se sobre "modelos matemáticos". Sublinhou em especial que, ao propor um novo modelo, deve-se ter como objectivo:

- 1 – esclarecer o comportamento do material substituindo-o por um modelo analiticamente tratável
- 2 – procurar fundamentar uma nova teoria
- 3 – estabelecer uma lei, útil na aplicação, que esteja de acordo com quantidades medidas em observações de obras.

Desenvolveu depois considerações sobre um modelo por si proposto e que consta já da literatura da especialidade.

Seguiu-se a intervenção de BIAREZ, muito esotérica, em que o autor comenta as leis de Reologia e os seus limites.

Na intervenção de GIBSON foram focadas, em especial, as vantagens e inconvenientes de usar métodos numéricos ou analíticos quando ambas as opções são possíveis. Sobretudo faz-se questão de sublinhar que a aplicação de métodos muito refinados de projecto pode ser não-apropriada por uma ou mais das seguintes razões:

- as conclusões tiradas serem completamente erróneas, por os factores físicos relevantes não terem sido considerados, nem sequer identificados
- o seu uso ser desnecessário por haver métodos mais simples *com a aproximação suficiente*
- a aplicabilidade das conclusões ser ilusória por falta de precisão nos parâmetros de cálculo.

A última intervenção do Painel foi de KENNEY que se limitou a considerações de grande generalidade. Apelou sobretudo para os meios universitários no sentido de as pesquisas fundamentais serem ainda mais desenvolvidas. Isto porque, embora na prática se disponha de razoáveis métodos para estudo em primeira aproximação da maior parte das questões, sente-se a falta de uma melhor compreensão dos fenómenos fundamentais.

Em discussões fora do Painel, algumas merecem citação:

BISHOP comentou as dificuldades de correlacionar o ϕ (aparente) com o verdadeiro ϕ entre partículas de solos grosseiros;

ROSCOE exprimiu as suas apreensões (que os tempos posteriores viriam confirmar) relativas à “falsa” capacidade de acção que os computadores poderiam vir a trazer. Quantos “peritos teóricos”, comentou, não virão a inventar “parâmetros ilusórios” para descrever comportamentos, parâmetros cujo significado físico é pura ilusão;

BURLAND alertou para a importância de adquirir adequada compreensão dos fenómenos físicos envolvidos antes de tentar atacar um problema usando um método requintado, muitas vezes de grande complexidade. Os poderosos meios de cálculo existentes devem aplicar-se na investigação de comportamentos básicos (pesquisa fundamental), de preferência à resolução de problemas correntes.

G2 – Fundações de edifícios em argilas

G2.1 – Estado-da-questão – VICTOR DE MELLO

Introdução

O Autor sublinha que cada problema específico comporta um número muito elevado de elementos circunstanciais; as importâncias relativas desses aspectos variam muito acentuadamente. Torna-se assim necessário efectuar uma escolha criteriosa dos aspectos dominantes e, sobretudo, não deixar que a questão seja turvada pelos aspectos secundários. A análise estatística de dados é um precioso auxiliar nessa análise.

Capacidade de carga

Há uma moderna tendência para efectuar estudos de comportamento, por exemplo, de sapatas, analisando o seu comportamento *global*. Parece contudo mais recomendável seguir a prática clássica de estudar em separado a *capacidade de carga* e os *assentamentos*. A capacidade de carga de sapatas, embora muitas variantes se tenham apresentado, é na maior parte dos casos estudada seguindo o método clássico que foi vulgarizado por Terzaghi no seu tratado clássico. Se alguma novidade merece menção é a constatação feita por VESIC de que os “coeficientes de capacidade de carga dependem da compressibilidade”.

Quanto à capacidade de carga de estacas flutuantes acentua-se a consagrada formulação que consiste em calcular, em separado, a resistência de ponta e a resistência por aderência local. É de sublinhar que, neste domínio, o nível de confiança nas soluções é relativamente baixo.

Os ensaios pressiométricos têm-se revelado de grande utilidade. Já em relação aos ensaios SPT algumas reservas têm de ser postas.

Assentamentos de fundações superficiais

O método de cálculo de previsões proposto por SKEMPTON e BJERRUM parece muito promissor, embora se levantem dificuldades na determinação dos coeficientes A e B.

Os cálculos baseados em teorias de consolidação deparam com a dificuldade de determinação da tensão de consolidação. Existem técnicas requintadas para determinações em laboratório mas, como é óbvio, todas elas requerem amostras de muito boa qualidade. Outro aspecto a ter em atenção é que a verdadeira “tensão de consolidação” não depende só da máxima tensão que já solicitou o solo mas também de fenómenos de *envelhecimento*, *diagénese* e eventual *secagem*.

Nota-se a necessidade de desenvolver métodos que permitam determinar a tensão de consolidação por meio de ensaios “in situ”.

Fundações de estacas

Ensaio em modelo têm contribuído fortemente para elucidar o comportamento de grupos de estacas. Por isso são já bem conhecidos os *factores de influência* em função do *espaçamento*, *diâmetro* das estacas e *número* de fiadas.

Assentamentos diferenciais admissíveis

Os estudos relacionados com as distorções admissíveis em diversos tipos de estruturas e o já abundante acúmulo de dados experimentais, permitem já hoje ter ideia dos assentamentos admissíveis para as estruturas correntes.

G2.2 – Comunicações

BENT HANSEN apresenta uma solução, no âmbito da teoria da plasticidade com material rígido-plástico, para calcular rupturas não-drenadas sob sapatas corridas.

BROWN e MEYERHOF propõem soluções para a capacidade de carga de sapatas circulares e retangulares em dois casos especiais, ambos para bi-camadas: argila rija sobre argila mole; argila mole sobre argila rija.

MANDEL e SALENÇON elaboraram um trabalho de grande interesse prático. Trata-se de calcular o *acréscimo* da capacidade de carga quando *diminui* a espessura da camada suporte da fundação, camada que repousa sobre um "bed-rock" rígido.

REESE et al. estudaram o comportamento de uma estaca de grande diâmetro (75 cm) com comprimento de 9 m. Efectuaram observações de tensões em diversas cotas do fuste. Dos resultados deduzem fórmulas que dão as deformações necessárias para mobilizar a aderência lateral (deformações obviamente funções do diâmetro).

KERISEL et al. apresentam valiosa informação colhida em ensaios de carga de estacas. A principal conclusão apurada é que o "factor de resistência de ponta" decresce consideravelmente quando aumenta o diâmetro.

HOEG et al. estudam os assentamentos imediatos de uma sapata de ensaio repousando sobre argila com ligeira pré-consolidação. Os assentamentos, para cargas relativamente pequenas, têm andamento linear e confirmam os valores que se podem deduzir de ensaios "vane".

TSYTOVICH et al. propõem um método generalizado para calcular os assentamentos de forma a incluir os assentamentos imediatos e os devidos a consolidação. É fundamental no método postular uma "*camada equivalente*", camada com uma espessura tal que, calculando a sua deformação uni-dimensional, tem-se o deslocamento da sapata, consequência de um processo tri-dimensional.

DAVIS et al. apresentam soluções formais para o cálculo da consolidação de solos estratificados (estudo efectuado por análise numérica).

ZARETSKY et al. contribuem com ideias relacionadas com teorias de consolidação não-lineares e propõem investigações relacionadas com um "coeficiente inicial de poro-pressão" (equivalente aos coeficientes A e B de Skempton).

KOMORNIK e ZEITLEN descrevem as danificações ocorridas em edifícios de quatro pisos que sofreram assentamentos *súbitos* devidos a molhagem (fortes chuvadas). Analisam também casos de assentamentos cíclicos (estações seca e húmida) e de assentamentos que se processaram em meses (ou poucos anos). Fornecem informações sobre a *rigidez* das estruturas.

G2.3 – Discussões

As discussões estiveram a cargo de um Painel composto por GOLDER (Canadá), KEZDI (Hungria), MOHAN (Índia), PEREZ GUERRA (Venezuela) e ROSENBLUETH (México).

A primeira intervenção foi de KEZDI que chamou a atenção para a necessidade de calcular capacidades de carga considerando superfícies de escorregamento que NÃO apresentam desenvolvimento completo.

Seguiu-se PEREZ GUERRA que se referiu a questões relacionadas com *prospecção, amostragem e ensaios "in situ"* ("vane" e diversos penetrometros). Deu conta da situação no seu país, situação que de resto estava de acordo com a prática adoptada nos países desenvolvidos.

MOHAN discutiu a questão do dimensionamento de estacas analisando os aspectos:

- Métodos analíticos; por enquanto não dispensam a confirmação por meio de ensaios de carga

- Equações de ondas; a sua aplicação ao dimensionamento divisa-se como muito prometedora
- Ensaio de carga; é necessário, e imperioso, proceder à sua normalização.

GOLDER teve uma “animada e anárquica” (!) intervenção em que se referiu a diversas questões práticas. Começou por afirmar que nas fundações em argilas o problema dominante prendia-se com os assentamentos; mas QUANTO se pode aceitar de assentamento e com que velocidade de processamento? Neste domínio são estas as linhas mestras das investigações que mais urge desenvolver.

Por fim ROSENBLUETH teve uma intervenção que constituiu uma lição *magistral*. Os tópicos que abordou foram os seguintes:

- As DECISÕES em engenharia
- O caso particular da engenharia de fundações
- Um enfoque racional da questão dos assentamentos
- Alternativas de projecto
- Análise probabilística da distribuição de assentamentos
- O problema da minimização dos custos.

G3 – Barragens de terra e de enrocamento

G3.1 – Estado-da-questão – S. WILSON e R. SQUIER

Introdução

A evolução das barragens de aterro tem sido no sentido de, a pouco e pouco, serem abandonados os perfis homogéneos. Actualmente são muito mais frequentes os perfis zonados e até com uma certa complexidade no zonamento.

Também praticamente já não se constroem barragens de enrocamentos VAZADOS, constituídos só por pedras de média e grande dimensão. Os enrocamentos são, actualmente, de granulometria muito extensa. E, tal como as barragens de terra, sofrem enérgica compactação.

Prospecção do local

Tem-se alargado consideravelmente o âmbito da prospecção. Isto não só de um ponto de vista qualitativo mas também quantitativo.

A prospecção geofísica praticamente é sempre usada nos estudos prévios.

As operações de prospecção estendem-se actualmente bastante para montante e jusante do local de implantação da barragem.

Para além das clássicas sondagens e dos ensaios de injeção de água, efectuam-se também numerosos ensaios “in situ”: ensaios de corte, ensaios de placa, penetrómetros, pressiómetros.

Também não se dispensa uma cuidada prospecção dos locais de empréstimo.

Podem-se também considerar incluídas no capítulo da prospecção a prática, cada vez mais difundida, de construir aterros experimentais. Visa-se colher esclarecimentos sobre os melhores procedimentos para a exploração dos empréstimos e a trabalhabilidade dos materiais. Os aterros experimentais constituem, por outro lado, uma óptima “amostra” para determinar propriedades dos solos nas condições de “colocação em obra”.

Ensaio de laboratório

Têm-se requintado e aperfeiçoado os métodos de ensaios já consagrados: edómetros e triaxiais.

No que respeita aos materiais granulares dá-se particular atenção ao seu comportamento para grandes tensões de confinamento; isto não só se refere a características de corte mas também às correlatas variações de volume.

Projecto do aterro

Uma das principais inovações introduzidas na concepção dos perfis de barragens de terra é a incorporação de filtros interiores (os chamados *filtros chaminé*).

Também a largura e a localização dos núcleos impermeáveis têm sido sujeitas a certas revisões. Entre as soluções clássicas de “núcleo vertical” e “núcleo inclinado” tende-se a adoptar, por interpolação, núcleos de “inclinação moderada”.

Assinaláveis melhorias têm-se registado no que respeita aos cálculos para solicitações sísmicas.

Controlo de percolação

Procura-se hoje dominar, com assinalável êxito, as condições de percolação no corpo das barragens e nas fundações. O controlo é assegurado pela conveniente *conjugação* entre elementos de impermeabilização (cortinas) e elementos drenantes (filtros, drenos, poços de alívio).

Construção

Há em primeiro lugar a assinalar que se abandonou a construção por aterro hidráulico.

Os aterros são compactados com energias de compactação muito mais elevadas do que anteriormente. Estas grandes energias encontram-se associadas ao uso, cada vez mais geral, de cilindros vibradores. E, como consequência, podem-se colocar em obra camadas cada vez mais espessas.

Quer a construção do “lado seco” quer a do “lado húmido” adoptam-se de acordo com as especificidades de cada caso. Contudo, o Bureau of Reclamation privilegia a construção do “lado seco” (com as necessárias excepções, como é óbvio).

Como já ficou apontado a construção de enrocamentos faz-se por camadas COMPACTADAS. As energias de compactação são evidentemente mais elevadas do que as adoptadas nas barragens de terra. A lavagem (*sluice*) dos enrocamentos por jacto de água continua a praticar-se em certos casos, mas em regra foi abandonada.

Instrumentação

Considera-se indispensável instalar, em certos pontos do aterro, instrumentos para medir deslocamentos verticais e horizontais, tensões totais e pressões nos poros.

Problemas de projecto e construção

Os problemas que actualmente se consideram de esclarecimento prioritário são os seguintes:

- Propriedades de resistência e de deformabilidade dos materiais de aterro quando sujeitos a altas tensões de confinamento

- Fendilhação dos aterros
- Métodos de compactação dos enrocamentos.

Têm também grande importância, embora se sinta menos pressões no seu estudo, as seguintes questões:

- Atrito dos aterros rochosos nas superfícies de contacto das obras acessórias e dos aterros argilosos
- Previsão de pressões intersticiais nos aterros argilosos
- Comportamento dos aterros em regiões sísmicas
- Métodos de medições de tensões nos aterros.

G3.2 – Comunicações

ANAGNOSTI apresenta um método de cálculo tridimensional de estabilidade de taludes. O maciço é considerado dividido em fatias verticais em cujas faces actuam forças de grandeza incógnitas e pontos de aplicação também incógnitos. A resolução do sistema de equações a que se chega torna-se possível fazendo hipóteses adicionais relativas à *distribuição* das forças internas.

NITCHIPOROVITCH et al. descrevem trabalhos teóricos e experimentais relativos à estabilidade e às deformações de barragens de enrocamento. Estudaram amostras para tensões tão altas como 60 kgf/cm².

POOROOSHAB et al. estudam a drenagem e dissipação das poro-pressões no maciço de montante de uma barragem com núcleo impermeável central.

BEGEMANN relata um caso-de-obra relacionado com uma barragem construída para armazenamento de fuel-óleo, ao ar livre. A impermeabilização do fundo é assegurada por um “forro” de argila plástica saturada. A granulometria da argila (e portanto a sua “sucção”) foi escolhida tendo em atenção a máxima altura de fuel no reservatório.

Uma comunicação de PELLIS refere-se ao uso de uma malha metálica para proteger temporariamente um enrocamento contra o galgamento, na fase de construção.

TAYLOR passa em revista o comportamento da barragem Terzaghi (primitivamente barragem Mission), sendo de notar que esta barragem é fundada sobre uma camada de argila aluvionar, muito deformável, com espessura da ordem de 15 m. Previa-se por isso que sofresse, a longo prazo, assentamentos que ultrapassariam os 3 m. Esta circunstância levou a que se tomassem precauções especiais para garantir a integridade da obra, nomeadamente: uma cortina de injeções de fiadas; no topo da cortina instalou-se uma segunda cortina, esta de estacas-pranchas; este conjunto foi sobrepujado por um maciço de argila bentonítica, muito deformável. O comportamento da obra, entre 1960 e 1969, período coberto pelo relato, tem sido plenamente satisfatório.

Um relatório de MARGARSON et al. descreve a construção de três aterros experimentais para estudar, em diversas condições, a indução e dissipação de poros-pressões na argila de fundação de uma barragem em projecto.

Uma comunicação de MIKASA et al. descreve uma grande centrífuga destinada a estudar modelos de barragens de enrocamento. A caixa da centrífuga tem 50 × 30 × 10 cm e ela pode aplicar acelerações até 200 g.

O Painel de Discussão foi composto por CASAGRANDE (EUA), MARSAL (México), NITCHIPOROVITCH (URSS), PINKERTON (Austrália) e SEMBENELLI (Itália).

A primeira intervenção foi de CASAGRANDE. Foi dedicada à discussão do tema “Controlo de percolação”, de certo modo *acrescentando-se* ao estado-da-questão apresentado. Foram cobertos os tópicos que a seguir se resumem.

- Cortinas de betão construídas na década de 30. Fez-se a apresentação de resumos descritivos das mais importantes *cortinas* construídas na época mencionada. As de maior vulto terão sido as das duas barragens que constituíram o reservatório Quabbin (abastecimento de água a Boston). A “cortina” foi concretizada à custa de “caixões pneumáticos”. Os intervalos entre caixões foram posteriormente escavados e preenchidos com betão. Cada caixão tinha 15 m de profundidade e 3 m de lado.
- Estudo de projecto para cortinas muito profundas. É assinalada em particular a barragem Manicouagan 3 em que existe um vale entulhado, com 120 m de profundidade máxima, que se tornava necessário impermeabilizar. Estavam na época em curso diversos ensaios de campo, pondo à prova diversas soluções *alternativas*, nomeadamente uma que consistia em duas fiadas de estacas “secantes”. Para evitar o “punçoamento” prevê-se instalar, superiormente à cortina, um maciço de argila compactado com humidade próxima do LP.
- Escavações profundas para alojar elementos de impermeabilização. É citado um caso notável de uma escavação a céu aberto com 70 m de profundidade. Efectuou-se rebaiamento por escalões múltiplos de bombagem. A escavação, aberta na fundação da barragem Lowen Notch (Canadá), destina-se a alojar uma cortina de impermeabilização.
- Tratamento de fundações em que se consente percolação. É o caso da barragem Fort Peck em que se instalou uma cortina de estacas-pranchas para “cortar” a percolação sob a fundação. Constatou-se posteriormente que ela consentia fortes passagens. Resolveu-se o problema instalando no pé de jusante uma fiada de poços de alívio.

Seguiu-se a intervenção de MARSAL que fundamentalmente tratou das propriedades de argilitos (shales) fissurados. A estrutura dos mencionados argilitos conduziu a que as suas propriedades tivessem de ser averiguadas a partir de amostras de grandes dimensões. O relato de Marsal consiste sobretudo na descrição de aparelhos que expressamente foram construídos para realizar estes ensaios. Dá-se realce a um aparelho de corte por torção que ensaia cilindros ocios sendo a secção sujeita a corte de 0,5 m². Um macaco vertical pode aplicar cargas de compressão até 200 toneladas. Ensaios efectuados com este aparelho mostram que a resistência ao corte dos argilitos anda por volta de 1,0 kg/cm² (tensão pico aproximadamente igual à tensão residual).

PINKERTON apresentou um relato referente a enrocamentos compactados com cilindro vibrador liso actuando sobre camadas de espessura relativamente pequena; numa palavra, utilizou-se a mesma técnica que é classicamente usada nas barragens de terra. Merece realce o facto de se ter conseguido aterros de muito boa qualidade, permitindo a utilização de rochas alteradas que *não* poderiam ser usadas nos enrocamentos clássicos. Efectuaram-se diversos estudos de laboratório e de campo relacionados com: fracturação dos elementos durante as

diversas operações (escavação, transporte, compactação), resistência ao corte do material compactado, deformabilidade, esmagamento dos elementos depois da construção (envelhecimento) e controlo de qualidade durante a construção.

Seguiu-se a intervenção de NITCHIPOROVITCH que se referiu a problemas relacionados com medições de deslocamentos e deformações (externas e internas) dos maciços, deslocamentos verticais e horizontais normais transversais longitudinais. Deu indicações gerais do tratamento analítico que na URSS se efectua para interpretar as indicações dos aparelhos de forma a determinar as deformações *espaciais* das barragens.

SEMBENELLI apresentou uma comunicação de um certo “revivalismo” e, por isso mesmo, cheia de interesse: mostrou que, em certas circunstâncias, continua a ser uma solução fortemente recomendável o uso de cortinas METÁLICAS como revestimento impermeável a jusante.

Deu exemplos de utilizações recentes em obras com alturas da ordem dos 100 m. Referiu-se a obras que já estavam então em serviço havia mais de 60 anos e cujas cortinas tinham tido comportamento muito bom, com despesas de conservação e manutenção bastante moderadas.

Como nota final é de sublinhar que as discussões em Painel não assumiram propriamente o carácter de discussões, mas antes o de LIÇÕES. Já nas sessões anteriores tal tinha sucedido e mais se acentuou nas posteriores.

G4 – Escavações profundas e túneis

G4.1 – Estado-da-questão – RALPH PECK

Trata-se de um documento notável e que mantém quase completa actualidade. Para os estudiosos das matérias pode-se considerar este “Estado-da-questão” como de leitura obrigatória.

Um documento de mais de 60 páginas não pode, é óbvio, ser resumido na maneira que é própria da resenha histórica que se está efectuando. Dar-se-á portanto somente indicação dos *tópicos* tratados com curtas indicações do seu conteúdo.

a) Introdução

Chama-se a atenção para o crescente número de túneis em terrenos não-rochosos que estão em construção ou em fase de projecto. É este um domínio em que o *projecto* e a *construção* estão inextricavelmente ligados: há forte inter-acção entre o *suporte* e a *acção*.

b) Requisitos do projecto e construção de túneis

b.1) Viabilidade

Obviamente governada a construção por circunstâncias económicas, entre elas sobressaem o custo da escavação e as repercussões em edificações à superfície.

Em relação aos custos de escavação são de ter em atenção os progressos recentes verificados nas “máquinas escavadoras de túneis” — “*tuneladoras*”. Indicações muito úteis, e até decisivas, têm sido ultimamente colhidas àcerca da utilização de “*tuneladoras*” em diferentes tipos de terrenos.

As repercussões à superfície, como seria de esperar, dependem fundamentalmente da profundidade do túnel e das características do terreno envolvente.

Em solos incoerentes põem-se os mais graves problemas: os assentamentos à superfície são em regra muito altos e difíceis de prever; se os processos ligados à presença de água não forem dominados podem dar-se percolações que acarretam “piping” incontrolável com invasão da obra já construída. As operações e dispositivos de drenagem e rebaixamento são por isso decisivos nas obras em solos incoerentes.

Nas argilas rijas e pouco fissuradas a abertura de túneis é em geral relativamente fácil, embora seja de contar com pressões muito altas nos revestimentos definitivos.

Nas argilas brandas as operações de escavação são mais difíceis, mas não será de contar com pressões muito altas.

b.2) Projecto dos revestimentos

É neste capítulo essencial ter presente a interacção entre *deformabilidade* do revestimento e *grandeza das pressões* actuantes. O documento apresenta informações sobre como lidar com esta intrincada questão. E dá informações *quantitativas* para cálculo dos revestimentos: pressões e momentos flectores.

c) Escavações profundas

c1) Deslocamento das cortinas e assentamento dos terrenos adjacentes

A questão é claramente exposta e são dadas explicações sobre a forma de lidar com os problemas conexos. Obviamente a questão reveste aspectos diferentes em solos coerentes e em solos incoerentes. Também são diferentes os problemas que se relacionam com cortinas livres, ancoradas ou escoradas.

c2) Ruptura do fundo de uma escavação

É outro importante aspecto da questão que o documento trata.

G4.2 – Comunicações

VINEL et al. apresentam um desenvolvido relato sobre um troço de túnel, aberto com “escudo” em terreno incoerente, para o Metropolitano de Bruxelas. Os assentamentos à superfície foram diminutos, excepto num local em que houve “fluxão” apreciável de areia para o interior do túnel.

SMOLTCZYK relata um estudo num troço experimental de túnel aberto para colher elementos de projecto a aplicar no túnel de Varsóvia. O solo era constituído por argilas plásticas com teor em água um pouco abaixo do LP.

ROSSMAN et al. dão informações sobre a construção de um túnel, em Hamburgo, em que se usou uma “tuneladora” trabalhando no interior de um “escudo”. Os solos envolventes eram areias de compacidade média.

NORBERT et al. descrevem operações de avanço de um túnel através de dolomites fracturadas. Em dada altura a frente do túnel foi derrubada por uma ressurgência (pressão de 1 kgf/cm²) que inundou o túnel com um caudal de 1 m³/s. O troço já aberto sofreu colapso. No retomar dos trabalhos tentou-se dominar a ressurgência à custa de injeções de cimento, mas não se teve êxito. Foi-se forçado a mudar o traçado do túnel.

Um trabalho de RODRIGUEZ et al. dá importantes informações sobre valas suportadas por cortinas. Esclarecimentos significativos são dados relativamente aos impulsos nas escoras.

A comunicação de BOUTSMA et al. contém elementos de interesse em relação aos deslocamentos de solos nas vizinhanças de escavações.

HUPER descreve a construção de *paredes moldadas* destinadas a suportar “frentes” verticais numa escavação com 17 m de profundidade.

RAILLY et al. relatam as observações de obra colhidas num “gabion” celular com 25 m de profundidade e 19 m de lado. O “gabion” foi preenchido com areia e suportava a acção da água, no exterior, nos 10 m superiores. É muito complexa a distribuição de tensões que foi observada nas estacas-pranchas que constituem o “gabion”.

G4.3 – Discussões

O Painel de Discussão era integrado por ALBERRO (México), ENDO (Japão), JENNINGS (África do Sul), KUESEL (EUA) e WARD (Grã-Bretanha).

A primeira intervenção foi de KUESEL. Referiu-se à experiência colhida nas estações e túneis do *S. Francisco Bay Area Rapid Transit*. É uma colectânea de “casos-de-obra” muito difíceis de resumir; por isso dar-se-á só notícia dos diversos aspectos tratados:

- informações sobre os solos atravessados
- uso de “tuneladoras”
- uso de ar comprimido
- assentamentos à superfície
- repercussões em edificações existentes
- projecto dos revestimentos dos túneis
- distorção dos revestimentos
- escavações a céu aberto; escoramentos, observação das forças absorvidas pelas escoras
- sobrecargas nos pavimentos das ruas e repercussão nos impulsos de terras.

Seguiu-se a contribuição de WARD que incidiu sobre o comportamento observado nas obras do Metropolitano de Londres. Os solos interessados são argilas rijas e, por vezes, siltes moles e areias; o nível freático, nas areias, ocorre próximo da superfície. Importa sublinhar as diferenças observadas entre os revestimentos de ferro fundido e os de aço; a maior flexibilidade deste últimos acarreta, como é óbvio, maiores deslocamentos com o conseqüente *alívio* de pressões.

JENNINGS apresentou uma comunicação relativa a escavações profundas em área urbana (Joanesburgo). Os casos relatados contemplam suportes laterais constituídos por “estacas secantes”, suportes por vezes escorados, por vezes ancorados com “cabos”. Trata-se de técnica hoje ultrapassada, substituída por paredes moldadas e ancoragens injectadas.

A comunicação de ENDO refere-se também a escavações profundas e seus suportes. Dá informações relativas a forças observadas em escoras (distribuição dos impulsos activos nas “frentes” suportadas) e subidas do fundo das escavações.

ALBERRO apresenta uma comunicação fornecendo elementos sobre observações de campo efectuadas durante a construção do Metropolitano da Cidade do México. Dá informações — correlacionadas com os tipos de terreno — relativas a deslocamentos dos terrenos adjacentes às escavações e a impulsos laterais em suportes.

G5 – Estabilidade de taludes naturais e fundações de aterros

G5.1 – Estado-da-questão – *SKEMPTON e HUTCHISON*

Tal como acontece com o estado-da-questão de G4 — Túneis e escavações, esta comunicação de SKEMPTON e HUTCHISON é uma notável contribuição, uma revisão sistemática e muito bem documentada, cuja leitura é ainda indispensável no estudo da matéria. Apontar-se-ão, muito resumidamente, os tópicos tratados.

Introdução — Os Autores apresentam quatro grupos de questões que fortemente se entrelaçam no domínio em estudo:

- (i) classificação dos vários tipos de escorregamentos
- (ii) classificação dos materiais envolvidos nos escorregamentos e determinação das suas propriedades mecânicas
- (iii) métodos de cálculo de estabilidade
- (iv) correlação entre resultados de observação de campos e estudos de estabilidade

Em seguida passam em revista este “entrecruzar” de circunstâncias no que se refere aos escorregamentos de ARGILAS.

- (1) – Classificação dos escorregamentos
 - Desmoronamentos
 - Escorregamentos rotacionais
 - Escorregamentos planares e compósitos
 - Solifluxões (terras, lodos, detritos)
 - Escorregamentos múltiplos sucessivos
 - Escorregamentos múltiplos retrogressivos
- (2) – Velocidade dos escorregamentos
 - Fluência de encostas
 - Movimentos lentos que antecedem um escorregamento rápido
 - Escorregamento rápidos
 - Movimentos muito rápidos (solifluxões)
- (3) – Tipos de argilas
 - Argilas residuais
 - Argilas sedimentares
 - Argilas glaciares

Em relação à *consistência* pode-se distinguir

- Argilas moles
- Argilas rijas maciças
- Argilas rijas fissuradas

Em relação à *resistência ao corte* há a distinguir

- Resistências de pico e residual
- Ruptura frágil

Em relação às *discrepâncias* entre determinações *in situ* e em laboratório há a atender

- O problema da amostragem
- A velocidade de corte

(4) – Análise de estabilidade

- Estudos em equilíbrio-limite
- Análise em tensões totais e em tensões efectivas
- Superfícies de escorregamento circulares
- Superfícies de escorregamento não-circulares

G5.2 – Comunicações

Uma comunicação de BJERRUM et al. trata de forma extensiva do problema das “quick-clays” da Escandinávia e dos grandes escorregamentos de encosta — escorregamentos rápidos — que elas originam.

Artigos de BARATA e de COSTA NUNES focam os grandes escorregamentos de encosta, em especial de materiais já anteriormente “escorregados”, que são causados pelas curtas mas muito intensas chuvadas que fustigam a região montanhosa a sul do Rio de Janeiro.

DE BEER comunica interessantes informações sobre escorregamentos profundos em taludes acabados de escavar em argilas rijas fissuradas. Os escorregamentos começaram pelo pé do talude e progrediram ascensionalmente.

SAITO apresenta resultados complementares da metodologia por si proposta para prever o “instante” de ocorrência de um escorregamento. É notável a precisão conseguida na previsão de um caso concreto de escorregamento, previsão baseada na medida dos deslocamentos ocorridos nas duas semanas anteriores ao evento.

TER-STEPANIAN propôs que se efectuasse registo das velocidades de deslocamento dos “vectores-movimento” da massa da encosta. Os resultados fornecem valiosa contribuição para o “diagnóstico” do tipo de escorregamento.

ESU et al. descrevem um *escorregamento rápido*, ocorrido próximo de Florença, de uma argila rija fissurada. O escorregamento foi *planar* e desenvolveu-se ao longo de descontinuidades (diaclasses) da massa argilosa.

A comunicação de HAMON et al. descreve questões relacionadas com as fundações da barragem de Djatilibur, em Java. O terreno de fundação era uma argila média à qual, em fase de projecto, se atribuiu $c' = 0$ e $\phi' = 25$. As escavações para o corta-águas não vieram confirmar estas hipóteses, pois foram postas a descoberto estreitas faixas de argilas “tectonizadas” cujas características de corte foram medidas e apresentaram valores de $c' = 0$ e $\phi' = 14$.

JUSTO descreve um estudo da fundação de um aterro experimental, trabalho realizado nas cercanias de Valência. A principal conclusão tirada refere-se ao facto de a permeabilidade do terreno “*in situ*” ser muito maior do que a prevista; por isso os assentamentos da fundação processaram-se, praticamente na totalidade, na fase de construção.

CHRISTIAN et al. apresentam um modelo matemático que permite investigar o mecanismo de *início* da ruptura de um talude. Este modelo ajusta-se bem à explicação da ruptura progressiva de acordo com a proposta de Bjerrum.

RANGANATHAN et al. dão resultados relativos à influência da anisotropia na resistência de uma argila “black cotton” com $LL = 224\%$ e $LP = 70\%$.

AVEGHERINOS e SCHOFIELD descrevem ensaios em centrifugadoras para estudo da estabilidade de taludes. Usaram para o modelo uma argila caulínica cuja consolidação, a partir de uma pasta, foi efectuada na centrifugadora. Aplicaram depois solicitações que reproduziam um *esvaziamento rápido*. Mediram deformações superficiais e extensões internas bem como poro-pressões nalguns pontos da massa. Os ensaios mostraram-se promissores.

G5.3 – Discussões

As discussões estiveram a cargo de um Painel constituído por BJERRUM (Noruega), BOROWICKA (Áustria), BROMS (Suécia), HIRSCHFIELD (EUA) e KENNEY (Canadá).

A primeira intervenção coube a HIRSCHFIELD que comentou o estado-da-questão apresentado por Skempton e Hutchison. Embora manifestando plena concordância com os pontos de vista expostos, chamou a atenção para certos aspectos de pormenor em que uma *realidade muito complexa* não se deixa dominar por análises puramente lógicas mas que não abarcam todos os factores em jogo.

Seguiu-se BJERRUM que apresentou as considerações que a seguir se resumem.

Em princípio há três aspectos que importa ter em conta na resistência ao corte de solos: a resistência não-drenada (que se pode determinar, por exemplo, por ensaios “vane” ou por compressão simples), a resistência em termos de tensões efectivas, c' e ϕ' (determinável por ensaios triaxiais) e a resistência residual (que se determina, por exemplo, por ensaios de corte com reversões). O problema que se põe é julgar qual destas grandezas (ou conjunto de grandezas) é adequado usar para o estudo de uma dada questão. E é essa a principal e mais difícil tarefa que, no domínio da estabilidade de taludes, cabe a um engenheiro geotécnico.

KENNEY apresenta também comentários ao estado-da-questão de Skempton e Hutchison. O principal conteúdo do seu comentário foi adicionar: (i) – alguns casos-de-obra diferentes dos apresentados no estado-da-questão; (ii) – discutir em que condições se deve usar a resistência residual ou a resistência de pico. Os casos-de-obra relatados dão suporte à ideia de que será adequado conduzir os cálculos de estabilidade para parâmetros em termos de tensões efectivas. No que se refere à consideração da resistência residual nos cálculos de estabilidade parece que tal não se justifica para argilas com pequenos índices de plasticidade, isto é, com teores em água muito altos.

BROMS apresentou uma discussão centrada na questão dos espectaculares escorregamentos que ocorreram no vale do rio Grotta. É uma colectânea de casos-de-obra com interesse, em especial, no que se refere a argilas sensíveis.

A discussão de BOROWICKA incidiu numa sistematização relativa às três situações que estão na origem dos escorregamentos:

- aumento das forças exteriores
- diminuição da resistência do terreno
- conjugação de ambos os factores.