

# UM ESBOÇO DA HISTÓRIA DA MECÂNICA DOS SOLOS (V)

## An outline of the History of Soil Mechanics (V)

JOSÉ FOLQUE\*

### 4.3 — O Congresso de Montréal (1965)

O Congresso de Montréal teve o mesmo tipo de organização do Congresso de Paris, as mesmas modalidades de funcionamento das Sessões de Discussão, e até o mesmo *tonus* geral das comunicações e intervenções.

Na repartição das matérias introduziram-se porém algumas alterações. Foram consideradas as seguintes DIVISÕES:

- DIVISÃO 1 — Propriedades dos solos – Generalidades
- DIVISÃO 2 — Propriedades dos solos – Resistência ao corte e consolidação
- DIVISÃO 3 — Fundações superficiais e pavimentos
- DIVISÃO 4 — Fundações profundas
- DIVISÃO 5 — Impulsos de terras e de rochas
- DIVISÃO 6 — Barragens de terra e de enrocamento; taludes de escavação

### DIVISÃO 1 — PROPRIEDADES DOS SOLOS – GENERALIDADES

Há que constatar, logo de início, que não se mostrou acertada a decisão de agrupar *Generalidades* sobre “Propriedades de Solos” numa só Divisão. Resultou um confuso amálgama de comunicações que tratam desde “amostragem” até “ensaios in situ”, passando por “subsidiências”, “matéria orgânica”, “expansibilidade”, etc. Não é por isso possível efectuar uma *recensão ordenada* das principais comunicações apresentadas. Elas vão, por isso, ser citadas por ordem de aparecimento nos “Proceedings”. De resto há a notar que as comunicações que permanecem hoje com algum interesse não são numerosas.

BEGEMANN apresentou uma comunicação de interesse fundamental; trata-se da constatação, hoje definitivamente consagrada, de que, em ensaios CPT a relação entre *resistência de ponta* e *resistência lateral local* (determinada com penetrómetros dotados de “manga”) permite a IDENTIFICAÇÃO dos solos.

CRAWFORD et al. apresentam um estudo relativo às argilas de Leda. Os resultados são ilustrativos de certos comportamentos menos evidentes e por isso às vezes postos em dúvida em relação às argilas comuns. As argilas de Leda, extremamente SENSÍVEIS dada a sua

---

\* Investigador do LNEC

estrutura peculiar (consequência do seu elevado teor em montmorilonite) exibem resistência à compressão simples e tensões de pré-consolidação crescentes com a profundidade e PROPORCIONAIS ao *overburden*. Em locais em que substanciais erosões levaram à redução de *overburden* as características mecânicas devidas à pré-consolidação são *conservadas*.

JARAY apresenta uma comunicação em que mostra ser a grandeza da expansão devida a congelamento uma função da composição química e da granulometria. É assim possível deduzir valores daquela grandeza dos valores do limite de liquidez.

MEIGH et al. mostram que ensaios de placa e ensaios pressiométricos, efectuados sobre rochas *brandas* (margas, arenitos, argilitos), conduzem a resultados que são confirmados por ensaios de laboratório de amostras indeformadas.

A comunicação de RESENDIZ sobre *interacção sólido-líquido nos solos argilosos* não contém matérias que mantenham completo interesse quanto ao que hoje se sabe sobre inter-relações ao nível dos contactos água-partícula. Só merece ser mencionada pelo seu carácter pioneiro.

ROHNISCH et al. mostram o interesse do método da “analogia eléctrica” para estudar fenómenos de percolação em solos *anisótipos (ortotrópicos)*.

ZLATARER apresenta um importante trabalho, importante sobretudo por antecipar muito do que depois se faria no domínio de estudos probabilísticos de solos. Este trabalho tem por objectivo a determinação do número MÍNIMO de amostras que é necessário ensaiar para avaliar uma dada propriedade com um certo intervalo de confiança.

ZOLKOV et al. comunicam resultados de grande importância por mostrarem que há “envelhecimento” das características mecânicas de aterros constituídos por areias de duna.

O Relator-Geral, JENNINGS, se bem que reconhecendo o grande interesse de algumas das comunicações, manifestou o seu desapontamento por não encontrar trabalhos que cubram com generalidade a *vastidão* de tópicos que na Divisão se podem incluir.

Como questões para discussão recomendou:

- comportamento físico-químico do complexo água-argila
- problemática de solos parcialmente saturados
- interpretação estatística de resultados.

O Painel de Discussão era composto por ROSENQVIST (Noruega), PACHECO SILVA (Brasil), SKEMPTON (Grã-Bretanha) e ZEITLEN (Israel).

As participações começaram com uma intervenção de SKEMPTON que focou a seguinte questão: é frequentemente afirmado que os estudos baseados em ensaios de laboratório têm pouco valor, ou são mesmo irrelevantes, para a *previsão* de comportamentos *in situ*, de maciços naturais. Contudo, centenas, milhares de ensaios de laboratório são efectuados todos os anos, certamente porque alguma utilidade neles se encontra. Será bom procurar esclarecer esta questão.

Antes de tudo o mais há que reconhecer que ensaios de laboratório realizados sobre amostras *indeformadas* conduzem, *em certos casos*, a resultados indiscutivelmente válidos. Que casos são estes? Os que têm que ver com comportamentos de argilas homogéneas, saturadas e não-fissuradas. Mas os solos que não satisfaçam a estas condições só poderão ser estudados em laboratório para obter grosseiras ordens de grandeza dos parâmetros intervenientes nos processos a estudar. Mesmo em relação a solos cujo estudo em laboratório pode conduzir a resultados válidos, por vezes acontece que eles são IRRELEVANTES. Isto porque se cometem erros, muitas vezes *erros sistemáticos* e que por isso são passíveis de classificação.

Classe 1 – Ensaios bem realizados mas que não se aplicam ao processo que na natureza se pretende estudar. É o caso, por exemplo, de usar resultados de ensaios de compressão simples para estudar fenómenos de resistência a longo prazo.

Classe 2 – Ensaios que, em princípio, são adequados mas que falham na realização em pormenor. Por exemplo, ensaios de corte rápido realizados para estudar um escorregamento que se processa com lentidão.

Classe 3 – Ensaios que em princípio são adequados mas que são conduzidos sobre amostras não representativas por serem *pequenas* em comparação com o *volume elementar* do maciço a estudar.

A intervenção de ROSENQVIST focou, com base em Comunicações apresentadas ao Congresso, a importância de fenómenos de física dos solos, ao nível da *partícula*, no condicionamento do comportamento mecânico das argilas.

PACHECO SILVA apresentou dados sobre solos residuais do Brasil, em particular sobre as célebres "argilas porosas" de S. Paulo. Trata-se de informações de interesse predominantemente local, que é importantíssimo conhecer quando houver que estudar um caso de espécie.

ZEITLEN disserta longamente sobre fenómenos de retracção e expansão de argilas. Insiste em que há diferenças marcadas entre estas características para solos "virgens" e solos "remexidos"; a permeabilidade também é grandemente afectada pelo "remeximento".

## DIVISÃO 2 — PROPRIEDADES DOS SOLOS – RESISTÊNCIA AO CORTE E CONSOLIDAÇÃO

Foi uma Divisão "recordista" no que respeita ao número de comunicações apresentadas, mais de 60. Muitas delas não resistiram à passagem do tempo (o consabido "caixote de lixo da história")

AAS apresenta uma comunicação merecedora de menção por propor uma engenhosa aplicação dos ensaios de corte rotativo: utilizando aparelhos com diversas relações entre o comprimento e a largura das *palhetas* (altura e diâmetro do "bloco" cortado do maciço) obtêm-se resultados que permitirão julgar a *anisotropia* da formação em estudo.

BAMERT et al. comunicam resultados de ensaios realizados com aparelhos triaxiais acoplados a células piezo-eléctricas, ensaios cujas finalidades eram medir características elásticas de solos arenosos sob solicitações pulsadas (imitando solicitações sísmicas). Interessa aqui citar o trabalho unicamente pelo seu carácter pioneiro.

Uma comunicação de DE BEER contém um estudo sobre a influência da tensão principal intermédia nas características de corte. A curva intrínseca, nestas condições, ainda mais se afasta da linearidade, o que leva, se se quiser lidar com uma grandeza do tipo "ângulo de atrito", a tomar, por exemplo, o *ângulo de atrito tangente*  $\phi$ . Mostraram os estudos realizados que  $\phi$  sobe quando  $\sigma_2$  se aproxima de  $\sigma_1$ ; desce no caso inverso.

BISHOP et al. apresentaram resultados de ensaios triaxiais realizados com pressões de confinamento muito elevadas, atingindo 70 kgf/cm<sup>2</sup>. As curvas intrínsecas mostram curvatura muito acentuada, como seria de esperar. O trabalho tem carácter exploratório, ainda em princípio de desenvolvimento.

BROMS et al. apresentam resultados de comparação entre ensaios triaxiais conduzidos em amostras cilíndricas e em amostras "ocas" (camada cilíndrica). Como é sabido, aplicando

pressões no interior da camada cilíndrica diferente da aplicada no exterior, é possível realizar ensaios triaxiais “verdadeiros”. A comparação permite concluir que os ensaios convencionais levam a resultados *elevados* (contra a segurança).

CHAPLIN relata ensaios de corte conduzidos a *volume constante*. A curva tensões-deformações é inicialmente côncava (as tensões crescem mais depressa do que as deformações) por razões óbvias de supressão da dilatância. O mesmo comportamento é observado em ensaios de compressão simples de argilas duras e margas; tal facto é de atribuir à existência de microfissuras que *fecham* conforme a deformação cresce dando assim maior rigidez ao material.

DENISOV apresenta um trabalho sobre argilas não-consolidadas defendendo que elas podem suportar tensões apreciáveis sem sofrer consolidação, isto devido à formação de ligações físico-químicas entre partículas. Mas uma qualquer perturbação que *remolde* as ditas argilas, destruindo as mencionadas ligações, fará com que elas sofram consolidação completa para a mesma tensão que até aí tinham suportado sem consolidação.

BRINCH HANSEN disserta sobre matéria que está na linha daquilo que foi o cerne de toda a sua obra; e assim, adoptando certas hipóteses sobre a distribuição de estados de tensão nos contactos entre partículas deduz relações tensões-deformações para processos de corte. É de interesse recordar a mais simples das expressões que propôs:

$$\gamma/tf = (\partial/\partial f) [2 - (\partial/\partial f)]$$

JANBU et al. mostram que a relação de tensões principais efectivas,  $K'$ , condiciona a compressibilidade dos solos. Mas só para valores de  $K'$  abaixo de 0,5 é que o comportamento difere substancialmente daquele que exibem os corpos elásticos.

JOSSELIN DE JONG et al. apresentam um trabalho de interesse teórico pelas condições “puras” em que foi conduzido. Utilizando uma montagem muito engenhosa procedeu-se à consolidação *isotrópica* de uma amostra esférica. Efectuou-se portanto um ensaio de consolidação em que a amostra *não sofreu distorções*. Os resultados mostraram que o modelo de Terzaghi constitui uma boa primeira aproximação para o fenómeno em estudo.

KENNEY et al. descrevem um interessante equipamento: um aparelho de corte rotativo que opera no interior de uma câmara triaxial. Pode parecer surpreendente que este aparelho não tenha tido subsequentes aplicações em laboratório.

KIRKPATRICK apresenta um estudo sobre “*efeitos das dimensões das partículas e distribuição granulométrica no comportamento ao corte de materiais granulares*”. É um importante repositório de dados que não traz informações teóricas mas contém importantes informações factuais.

LADD estuda o corte não-drenado de argilas consolidadas anisotropicamente. A primeira e importante conclusão consiste em que os parâmetros de corte de argilas nestas condições *não podem* ser deduzidos de ensaios realizados em amostras com consolidação isotrópica. A resistência *não-drenada* DEPENDE da trajectória de tensões. Note-se que esta foi a primeira contribuição para o importante problema das trajectórias de tensão.

MARSAL apresentou um trabalho que merece menção pelo seu interesse *teórico*. Trata-se da aplicação de processos estatísticos ao estudo de deformações de meios granulares: o movimento das partículas é considerado como a consequência de impulsos, com distribuição *errática*, transmitidos pelas partículas vizinhas. O processo de deformação é assim governado por leis probabilísticas, o que, tanto quanto de momento se descortina, não tem consequências práticas.

ROWE estuda a consolidação de argilas estratificadas, com permeabilidade horizontal muito alta. Chega a conclusões interessantes na prática e que implicam, caso por caso, a realização de ensaios edométricos em amostras que reproduzam com fidelidade a *anisotropia* de permeabilidade.

SCHMID propôs o conceito de “tensão intrínseca” para designar um certo estado notável de uma dada argila; bem vistas as coisas “tensão intrínseca” não é mais do que a consabida “tensão de pré-consolidação”. Schmid mudou simplesmente o “nome aos bois”.

SCHULTZE et al. propuseram a determinação das características de corte de argilas com base em ensaio triaxial usando uma só amostra. O método é baseado no traçado de sucessivos círculos de Mohr (em tensões efectivas), o que é possível efectuar medindo, durante o decorrer do ensaio, a evolução de tensões de poros em correlação com as tensões totais aplicadas. É óbvio, e esta é grande limitação do método, que ele só é aplicável a argilas *saturadas normalmente consolidadas*.

SHIBATA et al. estudaram a influência da variação da tensão principal intermédia no comportamento de argilas normalmente consolidadas. A principal conclusão tirada é que a deformabilidade diminui quando a tensão  $\sigma_2$  se aproxima de  $\sigma_1$ .

VYALOV apresenta uma contribuição de importância fundamental. Estabeleceu uma expressão geral que relaciona tensões e extensões para uma dada *tensão média*. Associando-a com uma equação de fluência chega à *equação reológica de estado*. É uma proposta interessante por ser inteiramente construída por via analítica.

O Relato Geral foi elaborado por MORETTO que analisou a matéria subdividindo-a em dois aspectos:

- 1 – Resistência ao corte para solicitação estática
- 2 – Deformabilidade para solicitação estática e comportamento geral para solicitação dinâmica.

Em relação a ambos os aspectos, após passar em revista as Comunicações, apresentou um bem elaborado comentário relativo a “*progressos desde o Congresso antecedente*”.

No que se refere ao aspecto 1, faz notar que a Mecânica dos Solos, em muitos domínios, já chegou à *maturidade* e por isso já não é de esperar que, com frequência, apareçam contribuições portadoras de espectaculares avanços. Os conhecimentos fundamentais estão bem implantados e os progressos que nesta fase se conseguem consistem em firmes, mas pequenas, contribuições conducentes ao aprofundamento das teorias e ao aperfeiçoamento dos métodos de ensaio, aperfeiçoamentos compatíveis e articulados com os aprofundamentos teóricos.

Tendo em mente o que fica dito há a assinalar, como principais progressos desde o anterior Congresso, os seguintes:

- melhorias nas condições de ensaio, quer no que respeita ao “corte directo” quer no que concerne o “triaxial”, consistindo em muito melhor domínio dos efeitos e da não-uniformidade da distribuição de tensões nas amostras (isto tanto no que respeita a tensões efectivas com as pressões intersticiais)
- adopção de equipamentos que permitem efectuar ensaios para tensões muito elevadas e usando amostras de grandes dimensões;
- aprofundamento das teorias que explicam o comportamento de solos argilosos para solicitações distorcionais;

- estudo da REPRESENTATIVIDADE das amostras, no que respeita ao seu grau de não-remeximento e às suas dimensões;
- estudo da influência de variações nas “trajectórias de tensão”;
- estudos de resistência a longo prazo de argilas sobreconsolidadas fissuradas.

No que concerne ao aspecto 1, o Relator-Geral propôs como temas de discussão:

- resistência ao corte para estados de tensão anisotrópicos e em especial para estados de deformação plana ( $\epsilon_1 > \epsilon_2 = \epsilon_3$ );
- resistência ao corte para altas tensões de confinamento;
- efeitos de “dimensão” das amostras;
- resistência ao corte de solos não-saturados.

Os progressos verificados desde o anterior Congresso no que respeita ao aspecto 2 foram pequenos no domínio das solicitações estáticas; em contrapartida realizaram-se assinaláveis avanços no estudo do comportamento de solos sujeitos a cargas dinâmicas. Como temas para discussão o Relator propôs:

- novas tendências e futuros desenvolvimentos de métodos de laboratório para obter os parâmetros de deformabilidade, de solos saturados e não-saturados;
- idem no que respeita a ensaios de carga.

O Painele de Discussão era composto por: AITCHISON (Austrália), BISHOP (Grã-Bretanha), LEUSSINK (Alemanha), MARSAL (México).

Depois de alocações do Presidente da Sessão e do Relator-Geral a primeira comunicação veio de LEUSSINK que dissertou sobre *areias naturais*. Começou por focar aspectos relacionados com a anisotropia do estado de tensão. Opinou que o ângulo de atrito interno determinado em aparelho triaxial é cerca de 10% inferior ao valor determinado em estado de deformação plana.

BISHOP pronunciou-se sobre a questão da resistência ao corte sob a acção de muito altas tensões de confinamento. Começou por recordar que a consideração de uma tensão de confinamento como “alta” tinha, neste Congresso, o significado de se referir a ensaios triaxiais realizados com tensões laterais entre 7 e 70 kg/cm<sup>2</sup>. Este limite superior excede largamente a tensão principal mínima que é de esperar que se instale na base de uma barragem de terra com a máxima altura até então construída. Contudo, para estudar questões relacionadas com fundações profundas, já tinham então sido efectuados ensaios com tensões laterais de 700 kg/cm<sup>2</sup>.

Apurando as conclusões a que se pode chegar para estes ensaios com altas tensões vem que:

- para areias e cascalhos as envolventes terão curvatura modesta se no início do ensaio as amostras forem *densas*;
- a curvatura será ligeira se o estado inicial das amostras for solto;
- para areias o ângulo de atrito inicial nunca desce abaixo de 30°;
- a fragmentação de partículas e consequentes repercussões começam a dar-se, para certos materiais (cascalhos, pedras de enrocamento) para tensões relativamente baixas,

à volta de 3 kg/cm<sup>2</sup>; mas só para tensões bem mais altas é que as fracturações se tornam importantes, podendo mesmo dar lugar a *perigosas* situações de corte *não-drenado*.

- para solos argilosos as envolventes apresentam acentuadas curvaturas, associadas a re-orientações das partículas quando as tensões são elevadas.

MARSAL preencheu a sua comunicação ao painel sobretudo com a descrição e comentários relativos aos equipamentos desenvolvidos na Universidade do México e na *Comisión de Electricidad* próprios para ensaiar amostras de grandes dimensões de materiais granulares grossos. Os resultados preliminares a que então já se chegara mostravam a grande variabilidade de comportamentos ligada à distribuição granulométrica, dimensão média e composição mineralógica dos materiais ensaiados. Mas, para já, parecia poder afirmar-se que o ângulo de atrito interno diminui sensivelmente quando aumenta a dimensão média das partículas.

Leussink levantou reparos a esta questão por manifesto mal-entendido que merece ser citado para esclarecer bem o problema: não é a dimensão da *amostra* que está em causa mas sim as dimensões das *partículas* que constituem a amostra.

AITCHISON pronunciou-se sobre o comportamento de solos não-saturados. Resumindo as suas considerações poderá apontar-se:

- é fundamental medir a pressão intersticial para compreender o comportamento dos solos não saturados; esta pressão, nos solos em causa, é “negativa”, isto é, inferior à pressão atmosférica (mas em geral é mesmo inferior a zero);
- os processos de medir as aludidas pressões intersticiais necessitam de ser melhorados, melhorias difíceis de alcançar nos solos argilosos dada a sua baixa permeabilidade.

A importância e extensão da Divisão 2 levou os organizadores do Congresso a programar uma segunda sessão de Discussão em Painel. Foram membros deste Painel: LAMBE (EUA), RICHART (EUA), SCHULTZE (Alemanha) e SHANNON (EUA).

A contribuição de Lambe incidiu sobre matéria fundamental: como melhorar os métodos de previsão de deformações de solos, nomeadamente de assentamentos?

Sabe-se que os parâmetros de deformabilidade são determinados a partir de ensaios edométricos ou de ensaios de compressão triaxial. Lambe analisa as “*trajectórias de tensões*” nas rotinas usuais de condução destes ensaios e mostra como as ditas “*trajectórias*” afectam fortemente os parâmetros de deformabilidade medidos. Conclui Lambe, e esta conclusão ficou incorporada no “saber” relativo a esta questão, que a conveniente averiguação das propriedades que governam as deformações deve ser efectuada procurando *imitar em laboratório as trajectórias de tensão* que vão instalar-se no fenómeno que no “natural” se pretende estudar.

SCHULTZE dissertou sobre métodos de campo para determinar parâmetros de deformabilidade. Apontou, em relação aos clássicos ensaios de placa, que as principais causas de erro residem em:

- grande influência da camada remexida em contacto imediato com a placa
- baixo estado de tensão confinante na zona de solo ensaiada
- pequeno tempo de actuação das cargas, no caso de solos argilosos.

Justifica-se por isso que se procure estabelecer correlações da deformabilidade com os resultados de ensaios penetrométricos, dos quais o cone-penetrómetro parece o mais prometededor.

Também se afigura de explorar as potencialidades de ensaios de carga usando placas de pequenas dimensões, ensaios realizados no fundo de sondagens; é óbvio que a placa deve ser instalada abaixo do solo alterado ocorrente no fundo dos furos.

SHANNON contribuiu com comentários sobre o comportamento de solos para solicitações vibratórias. Descreveu ensaios efectuados com uma carga de aplicação muito rápida (choque) e ensaios de solicitação cíclica realizados em triaxiais e em caixas de corte. As considerações apresentadas actualmente já não mantêm interesse.

Grande interesse didáctico, pelo arrumo e *fixação* de conceitos, apresenta uma comunicação de BARKAN enviada ao Congresso por escrito. Nela se tratam, com sistemática, os seguintes aspectos:

- características reológicas que governam o comportamento dinâmico dos solos
- influência das vibrações de fundações de máquinas nas características elásticas dos solos
- determinação das características elásticas dos solos subjacentes a fundações de máquina
- determinação das propriedades dissipativas dos solos.

### DIVISÃO 3 — FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS E PAVIMENTOS

Foram numerosas as Comunicações apresentadas a esta Divisão. Mas é sintomático do estado da questão que, vistas à distância de alguns anos, a maiorias delas trate de assuntos que actualmente são “pacíficos”.

BACHELIER et al. contribuem com uma proposta para correlacionar a resistência de ponta dos CPT com a compressibilidade. Sugerem a relação

$$E = 2,3 (R_p/\alpha)$$

$E$  — módulo edométrico

$R_p$  — resistência de ponta

$\alpha$  — coeficiente com valores de:

0,9 a 1,0 — areias

0,33 — argilas magras

0,5 a 0,7 — argilas plásticas

É de notar que as argilas citadas pertencem a formações terciárias, apresentando portanto acentuados efeitos diagenéticos.

DE BEER apresenta estudos sobre efeitos de escala na capacidade de carga de solos coerentes compactos. Os efeitos de escala reflectem-se, por exemplo, em que os assentamentos relativos  $\partial/b$  ( $b$  — dimensão transversal da sapata) aumentam 20% quando  $b$  aumenta na proporção de 1 para 3.

EGOROV trata na sua comunicação do cálculo dos assentamentos e da redistribuição de tensões de contacto de uma sapata em coroa circular (sapata em anel).

FEDA et al. mostram que a capacidade de carga de solos arenosos varia com a compacidade por efeito da dilatância; a dilatância positiva aumenta a capacidade de carga e a negativa fá-la diminuir.

BENT HANSEN propõe um método aproximado para determinar “*figuras de ruptura*” em processos plásticos nos solos argilosos. É uma comunicação que, além do mais, apresenta o interesse de propor procedimentos de fácil aplicação.

JANBU propõe uma teoria de consolidação que importa assinalar: trata-se de uma teoria de consolidação em que se considera a relação tensão-extensão como não-linear.

KNIGHT disserta sobre os aspectos devidos à diminuição de tensões nos solos (curva de descarga). É de assinalar o trabalho porque o tema não se encontra frequentemente tratado.

Uma comunicação de MANDEL apresenta resultados relativos à interferência de processos plásticos no solo de fundação de sapatas relativamente próximas.

VESIC et al. apresentam resultados de estudos experimentais sobre a capacidade de carga de solos arenosos solicitados por carga dinâmica (carga variável no tempo). Ensaíram velocidades de carga desde  $10^{-5}$  pol/s até 10 pol/s. Conclui-se dos resultados que em areias não-saturadas as “respostas” pouco variam. Já em areias saturadas, devido ao desenvolvimento de pressões nos poros, as “respostas” em termos de tensões reactivas crescem substancialmente quando cresce a velocidade de aplicação das cargas.

O Relator-Geral, DE BEER, reparte as suas considerações por aspectos distintos da temática — “fundações superficiais”.

Inicia o Relato pelo exame da *capacidade de carga*. Considera que até ao Congresso em curso, e incluindo-o, pode-se dar como apurado que são grandes os ensinamentos colhidos na matéria; em particular sabe-se contar com os efeitos de:

- interação de sapatas vizinhas
- fenómenos de ruptura progressiva
- dilatação
- espessura da camada portante
- velocidade de carga.

No que se refere à *previsão de assentamentos* pode-se considerar a situação nos seguintes termos:

- no caso de fundações sobre argilas normalmente consolidadas, em camada espessa, uma previsão de boa precisão exige que se adopte uma formulação de consolidação tridimensional
- para argilas sobreconsolidadas só existem soluções aproximadas
- para fundações em areias a melhor previsão parece que será a que se apoie em resultados de ensaios de placa.

Como temas para discussão De Beer propôs os seguintes:

- Comparação entre si de todos os métodos teóricos de determinação da capacidade de carga de fundações directas em solos granulares
- Comparação dos resultados dos métodos teóricos com resultados experimentais
- Discussão dos métodos disponíveis para determinar parâmetros de deformabilidade de solos granulares e de argilas sobreconsolidadas.

Um 1.º Painel de Discussão, tendo por objecto questões de “capacidade de carga” era composto por: BOROWICKA (Áustria), KOIZUMI (Japão), L’HERMINIER (França) e JIMENEZ SALAS (Espanha).

A contribuição de BOROWICKA foi dedicada à capacidade de carga de sapatas. Lembrou Borowicka que os erros nas determinações podem derivar de duas origens, por vezes indestrinçáveis: os métodos e os parâmetros de cálculo. Seria aconselhável procurar, para diversas categorias de solos, métodos em que os condicionamentos de ambos os aspectos se encontrem acoplados, isto é, simultaneamente possam ser atendidos.

L’HERMINIER chamou na sua comunicação a atenção para as grandes dispersões dos factores  $N_{\gamma}$  que, para o mesmo  $\phi$ , se encontram em diversos métodos para o estado de ruptura sob a fundação. Os resultados de estudos conduzidos no laboratório de l’Institut Technique du Bâtiment mostram claramente que os estados a considerar devem ser determinados a partir do *método das características* (este método, para um equilíbrio tipo “sapata-fundação”, foi concretizado por LUNDGREN-MORTENSEN).

KOIZUMI dedicou a sua intervenção aos fenómenos de ruptura progressiva. Afirmou que, para casos reais de solos estratificados em que as superfícies de ruptura interessem mais do que um estrato, qualquer estudo teórico é impensável. Se não se quiser ficar com soluções aproximadas muito grosseiras a única solução disponível parece que será o estudo em modelo (o ensaio de carga em escala natural, evidentemente).

JIMENAZ SALAS apresentou a descrição de uma determinação de capacidade de carga em solo estratificado em que foi possível fazer uma análise teórica do problema. Isto foi possível porque a estratificação do solo era razoavelmente regular; alternavam-se camadas do solo A, praticamente com as mesmas características e espessura, com camadas de solo B nas mesmas condições. Foi assim possível idealizar um solo *ficício* equivalente em propriedades ao solo real.

Tal como fora previsto realizou-se 2.ª sessão de discussão em Painel, este dedicado a questões de assentamentos. O Painel foi constituído por KANTEY (África do Sul), MITCHELL (Rodésia) e TURNBULL (EUA).

KANTEY apresentou uma discussão relativa à previsão de assentamentos de fundações em aluviões recentes, especialmente estuarinas. No que respeita a solos moles (lodos) é Kantey da opinião de que os usuais métodos teóricos de previsão são adequados, contando que se disponha de amostras representativas para ensaio de laboratório. Especial cuidado tem que ser posto em dois aspectos: não remeximento das amostras e representatividade de um complexo que muitas vezes tem características com variações erráticas muito acentuadas.

No que concerne as formações arenosas, as correlações da compressibilidade com os resultados de ensaios penetrométricos, designadamente CPT, oferecem boas expectativas.

MITCHELL dissertou sobre dimensionamento de pavimentos oferecendo a opinião que se estava já em situação de substituir os clássicos métodos empíricos por métodos elásticos.

TURNBULL, pronunciando-se sobre o dimensionamento de pavimentos flexíveis, opinou que os métodos teóricos ainda não oferecem suficiente confiança para que se possa adoptá-los em substituição dos métodos semiempíricos.

Nas discussões em que intervieram elementos não pertencentes ao Painel há a destacar uma contribuição de MIKASA que se refere a uma teoria de consolidação em que as relações entre as grandezas que controlam o processo são não-lineares.

## DIVISÃO 4 — FUNDAÇÕES PROFUNDAS

As comunicações apresentadas a esta Divisão não foram muito numerosas mas tinham conteúdo substancial.

BEGEMANN comunicou um resultado de importância fundamental: a determinação da resistência ao *arrancamento* de uma estaca a partir da aderência lateral medida com penetrómetro dotado de *manga lateral*.

A contribuição de BEREZANTZEV é uma das três ou quatro propostas fundamentais relativas a *figuras de ruptura* na zona plastificada junto à ponteira de uma fundação profunda.

DAVISSON et al. apresentaram uma interessante proposta para estudar a encurvadura de estacas parcialmente encastradas. Demonstram que, em 1.<sup>a</sup> aproximação, uma estaca embebida num solo com módulo de reacção constante  $k$ , ou função da profundidade,  $n(h)$ , pode ser tomada como se fosse uma estaca livre encastrada na ponta e tendo o comprimento  $1,4 R$  ou  $1,8 T$  sendo  $R = 4 \sqrt{EI/K}$  e  $T = 5 \sqrt{EI/n(h)}$ .

HEIMAN relatou um “caso de obra” relativo a uma circunstância que hoje em geral não é esquecida: trata-se dos importantes impulsos laterais induzidos nas vizinhanças de aterros, impulsos que por vezes danificam estacas de fundação de estruturas adjacentes.

KERISEL et al. apresentaram resultados experimentais de muita importância para esclarecimento da problemática da aderência lateral *versus* compacidade, em terrenos arenosos. Assim, usando um penetrómetro de  $\phi = 226$  mm, constataram que a aderência sobe de  $0,5 \text{ tf/m}^2$  (numa areia com densidade seca de  $1,58$ ) para  $2 \text{ tf/m}^2$  (densidade seca de  $1,68$ ) e sobe ainda para mais de  $8 \text{ tf/m}^2$  (densidade seca de  $1,75$ ).

Resultados de ensaios relatados por KUBO mostram que uma estaca, embebida num solo com módulo de reacção  $K$  e actuada por força horizontal, tem deslocamentos laterais que se relacionam com a reacção lateral por unidade de largura  $p$ , por intermédio de

$$p = K x y^{0,5}$$

em que  $x$  é a profundidade contada a partir da superfície do terreno e  $y$  é o deslocamento lateral à profundidade  $x$ .

MENARD apresentou uma comunicação dando regras de cálculo de capacidades de carga e de assentamentos de estacas, regras baseada em resultados de ensaios efectuados com *pressiómetro*, aparelho que Ménard fizera reviver, sobre o qual largamente teorizara e cuja utilização procurava esforçadamente propagandar.

WILLIAMS et al. publicaram um trabalho de muito interesse para o estudo do comportamento de estacas em argilas rijas fissuradas, concretamente, nas argilas de Londres. O que sobretudo interessa sublinhar é a conclusão de que o problema é “*casuístico*”: para um dado local têm de ser estabelecidas expressões empíricas que relacionem a capacidade de carga e os assentamentos com as características LOCAIS da argila em questão.

O Relator-Geral, KEZDI, subdividiu o relato em vários tópicos:

- Comportamento de estaca isolada — começa-se a abandonar os métodos puramente empíricos ou semiempíricos que até há pouco eram prevalecentes. Surgem teorizações que permitem ter esperanças na viabilidade de efectuar cálculos *teóricos* de capacidades de carga.

- Investigações teóricas e experimentais sobre o comportamento de fundações em estacaria — desenvolvem-se estudos, cada vez mais fiáveis, relativos ao comportamento de grupos de estacas.
- Questões relacionadas com cargas não-verticais — são de assinalar os progressos realizados no domínio das solicitações horizontais. As abordagens teóricas já disponíveis são complementadas com ensaios em modelo e observações de obra.
- Problemas de construção — há especialmente que realçar os progressos que se têm verificado usando *vibradores* para efectuar a cravação de estacas.

Kezdi propôs para discussão os seguintes temas:

- Tensões e deformações nas estacas e no solo circundante
- Interação entre estacas do mesmo grupo
- Revisão e crítica da utilização do *módulo de reacção* no estudo de estacas sujeitas a solicitações horizontais.

O Painel de Discussão era composto por MEYERHOF (Canadá), PAREZ (França), VAN DER VEEN (Holanda) e ZEEVAERT (México).

A primeira intervenção foi de VAN DER VEEN. Tratou de problemas das tensões e deformações ocorrentes em torno e na ponta de estacas sujeitas a cargas verticais. Tendo em atenção a complexidade da questão conclui que, na época, o problema não tinha ainda solução satisfatória.

ZEEVAERT falou da interacção de estacas em grupo. Na realidade “desviou” a sua exposição para o problema dos assentamentos de grupos de estacas. Para estacas trabalhando de ponta no bed-rock o assentamento do grupo é dominado pelo encurtamento *elástico* de cada estaca.

No caso de grupos de estacas flutuantes é de considerar que, numa espessura  $z$  contada para cima a partir da ponta, são mobilizadas tensões tangenciais; sendo  $H$  o comprimento da estaca no troço  $H-z$  a aderência lateral é nula. O assentamento do grupo será dado pela consolidação da camada de espessura  $z$ , camada que ao fim e ao cabo suportará a totalidade das cargas transmitidas ao grupo.

Na sua intervenção MEYERHOF pronunciou-se sobre a capacidade de carga dos grupos de estacas. Se os espaçamentos entre estacas andarem, como é usual, por 2,5 a 3,5 diâmetros, a capacidade de carga do grupo poderá tomar-se como a de um PEGÃO com área igual à envolvente do grupo.

PAREZ pronunciou-se sobre as regras de “*boa interpretação*” dos ensaios de carga de estacas. É matéria que ainda hoje merece ser considerada. A proposta de Parez consta fundamentalmente do seguinte: em geral a curva cargas-assentamentos não indica com clareza um *ponto limite de ruptura*; Parez propõe que se trace a curva  $\alpha$ -assentamentos em que  $\alpha$  é a inclinação da curva assentamentos-tempo para cada escalão de carga; essa curva exhibe um “ponto singular” (*ponto anguloso*) que será tomado como correspondendo à carga de ruptura.

## DIVISÃO 5 — IMPULSOS DE TERRAS E DE ROCHAS

As comunicações apresentadas foram pouco numerosas. Consequentemente são poucas as que se justifica que aqui sejam recordadas.

BIAREZ et al. relataram estudos experimentais efectuados em cortinas verticais (simulação de estacas-pranchas) para determinação das grandezas e distribuição das tensões induzidas. Apresentam fórmulas empíricas baseadas nos resultados dos mencionados estudos.

Estudaram movimentos de translação e de rotação. As fórmulas apresentadas são abrangidas por fórmulas mais recentes que as contemplam como casos particulares; só têm por isso interesse histórico.

ISHIHARA relata experiências, efectuadas com equipamento vibratório, para medir impulsos de terras em regime dinâmico. As experiências foram efectuadas numa mesa vibratória em que se montou uma coluna vertical suportando um maciço terroso. As principais conclusões tiradas foram:

- o ângulo de atrito terras-muro diminui sensivelmente em regime dinâmico; a diminuição pode atingir 25% dos valores instalados em regime estático;
- o ponto de aplicação do impulso resultante desce substancialmente.

VERDEYEN' et al. apresentam resultados de experiências efectuadas com modelos de roletes metálicos. As experiências tinham como finalidade estudar *cortinas ancoradas*. Dado o carácter de grosseira aproximação que têm os modelos de roletes os resultados só têm interesse qualitativo. Nesta conformidade comparam-se as figuras de ruptura correspondentes ao arranque de placas de ancoragem, umas amarrando tirantes curtos e outras rematando tirantes longos. No primeiro caso constata-se que ocorrem plastificações de todo o solo entre a placa, a cortina e a superfície do terreno. Já no segundo a zona plastificada parte da ancoragem em direcção à superfície do terreno mas não chega a atingir a cortina.

VESIC apresenta um estudo em que trata da formação de *crateras* por meio de explosivos. As relações entre as cargas de explosivos e as dimensões da cratera formada são estudadas em termos de impulsos de terras. Não é trabalho que se possa resumir em poucas linhas, interessando aqui dar curta notícia da sua existência sobretudo porque é assunto que só raramente se encontra tratado.

O Relator-Geral, MENCL, começou por salientar, e lamentar, o pequeno número de comunicações apresentadas e, sobretudo, a gama estreita de questões tratadas. Tendo isso em atenção propôs-se, ele próprio, fazer um curto *estado-da-questão* que, ao mesmo tempo, serviria para justificar as questões propostas para discussão.

Começou por analisar o problema fundamental dos *impulsos sobre muros de suporte* e da aplicabilidade, ao seu estudo, da Teoria da Plasticidade. E, nessa conexão, analisou os estados de "equilíbrio limite". Mencl realçou que seria de adoptar, de acordo com as concepções adoptadas na URSS, três *estados limites*: um *equilíbrio limite de deformações*, no qual a obra deixa de estar em condições de permanecer em serviço, um *estado limite de fissuração* que antecede o *estado limite de ruptura*.

Com base ainda na análise de certos casos especiais, em particular relativos a equilíbrios de *maciços rochosos*, formula por fim as sugestões para discussão:

- Qual é a diferença fundamental do comportamento em ruptura por corte dos solos e das rochas? Como o tomar em consideração na Teoria de Plasticidade?
- Consideração dos diferentes "estados limites".

O Painel de Discussão era composto por BRINCH HANSEN (Dinamarca), STEFANOFF (Bulgária), VERDEYEN (Bélgica), WARD (Grã-Bretanha).

STEFANOFF iniciou as discussões com uma comunicação que mais se poderá considerar um “lamento”: sabe-se razoavelmente calcular os valores relativos a impulsos activos e passivos em situação *limite*, mas não se sabe relacionar as deformações dos suportes com as fracções de impulso mobilizadas.

BRINCH HANSEN dissertou sobre a questão dos *coeficientes de segurança* nos cálculos de impulsos activos e passivos. Resumindo as suas considerações vem que ele preconiza, em ambos os casos, a adopção de coeficientes de segurança *parciais*. Nomeadamente são de aplicar coeficientes de segurança às cargas acidentais e aos parâmetros de corte; não é necessário aplicar coeficientes de segurança aos pesos próprios e cargas hidrostáticas.

VERDEYEN tratou do problema do cálculo de cortinas flexíveis mas só se pronunciou sobre generalidades. Em especial insistiu em que o cálculo de uma cortina de estacas-pranchas deve ser feito tendo em conta as suas deformações (limitadas ou não por “ligações exteriores”), a sua rigidez própria e as características do solo.

WARD falou de ensaios em modelo. Considerou-os particularmente úteis para elucidar aspectos básicos dos “mecanismos” envolvidos, quer em equilíbrios activos quer em equilíbrios passivos.

## DIVISÃO 6 — BARRAGENS DE TERRA E DE ENROCAMENTO; TALUDES DE ESCAVAÇÃO

Ao contrário do que aconteceu nalguns outros domínios o campo de conhecimentos coberto por esta Divisão suscitou numerosas e importantes Comunicações. Há comunicações MILIARES sobretudo no que respeita a *filtros, argilas dispersíveis e reologia aplicada ao estudo de taludes*.

AITCHISON et al. referem-se, pela primeira vez com este realce e neste campo de aplicação, a argilas que, depois de compactadas, sofrem *deflocação (dispersão)* possibilitando assim, sobretudo em pequenas barragens, a ocorrência de “pipings”. Trata-se das argilas que depois viriam a ser designadas por “dispersíveis”. Aitchison chamou a atenção para o elevado número de “pipings” que destruíram pequenas barragens da Austrália, antes de se ter começado a adoptar adequadas precauções. Apontou que a composição química dessas argilas levava a que o índice de absorção de sódio fosse superior a 5. A este propósito recorde-se que o “índice de absorção de sódio” é definido por

$$\text{I.A.S.} = [\text{Na}] \sqrt{0,5} [\text{Ca} + \text{Mg}]$$

em que [Na] e [Ca + Mg] exprimem a concentração em iões solúveis (miliequivalentes por litro) na água intersticial do solo em causa.

No caso de uma argila apresentar este “índice de absorção de sódio”, dado que é de esperar que ela seja “dispersível”, pode-se contrariar essa característica por adequada correcção química ou efectuando a compactação no lado húmido e com energia que leve a um coeficiente de permeabilidade de  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  cm/s.

GOLDSTEIN et al. relatam investigações reológicas relacionadas com a estabilidade de taludes em solos argilosos. Fundamentalmente pesquisaram-se relações baseadas na teoria da

*hereditariedade*. Encurtando a exposição vem que a velocidade de deformação viscosa é dada por

$$d/dt (\epsilon_x) = (\sigma_x - \sigma_o) / 2\eta$$

em que

- $\sigma_o$  — componente hidrostática de tensão
- $\eta$  — coeficiente de viscosidade

KASSIF et al. apresentaram uma comunicação que é hoje um "clássico" da literatura sobre filtros para solos argilosos. Fundamentalmente a comunicação mostra o papel desempenhado pela *coesão*; ela leva a que a erosão não destaque partículas individuais do solo mas sim AGREGADOS. Encarando a questão com outro enfoque: sobre cada PORO do material de filtro forma-se uma *cúpula* hemiesférica, isto é, com diâmetro igual à dimensão do poro; cada cúpula resulta da expulsão de um elemento do mencionado agregado e o diâmetro da maior cúpula que uma dada argila consente é função da sua *coesão*.

ARAKEN DA SILVEIRA apresentou uma comunicação que é também um marco histórico na problemática de filtros. Analisou a questão probabilisticamente comparando a distribuição *granulométrica* do material a proteger com a distribuição *porométrica* do filtro.

MENCL et al. discutem três *questões* relativas a estabilidade de taludes. A primeira diz respeito ao papel desempenhado pelas tensões residuais na estabilidade de taludes de *escavação*. A segunda refere-se à estabilidade da estreita camada de solos superficiais que repousam sobre taludes, relativamente ásperos, de formações resistentes. Por fim a terceira diz respeito à determinação de parâmetros de corte de argilas fissuradas, em especial as que apresentam abundantes fissuras com desenvolvimento sub-horizontal.

NASH et al. retomam estudos apresentados anteriormente por ROCHA et al. sobre o uso de solo-cimento na construção de barragens. Foi mais um passo dado num caminho que, muito mais tarde, nos anos 80, viria desembocar no RCC.

PIASKOWSKI et al. apresentam uma comunicação referindo a utilização de *argilas tixotrópicas* para substituir o escoroamento de trincheiras profundas. Foi claramente uma contribuição para aquilo que viria a ser a *parede moldada*, já anunciada por VEDER no Congresso de Zurich (1953).

SAITO estuda o problema da previsão da data de ocorrência de um dado escorregamento. Afirma que a velocidade de deformação que leva à ruptura e que se determina em laboratório pode ser extrapolada para os processos da Natureza. Esta comunicação merece realce porque, *posteriormente*, Saito efectuou previsões da ocorrência de deslizamentos com notável precisão. Concretamente, numa encosta cujo escorregamento se considerou pouco económico evitar, Saito previu o DIA em que o escorregamento se daria com uma antecedência de 3 meses.

SOWERS et al. apresentam resultados de determinações de compressibilidade de agregados rochosos e seu relacionamento com assentamentos de aterros de enrocamento. É, neste domínio, um estudo pioneiro.

TER-STEPANIAN relata resultados de observações feitas com tubos telescópicos inseridos em encostas exibindo processo de escorregamento lento (fluência). Os ditos resultados permitiram medir características reológicas dos solos da encosta.

A comunicação de WOLSKI sobre erosão interna de núcleos argilosos de barragens também pertence aos “clássicos” da literatura sobre filtros. Wolski mostrou que o fenómeno de erosão interna de argilas era assimilável a uma extrusão por orifício — o poro do filtro adjacente ao núcleo. A extrusão é comandada pelo gradiente hidráulico (força de percolação) e pela *coesão* da argila do núcleo.

O Relator-Geral desta Divisão foi MOHAN. Depois de apresentar, sem grandes comentários, resumos das comunicações apresentadas, Mohan passou de imediato à apresentação de propostas para discussão:

- Consideração da visco-elasticidade, visco-plasticidade e elasto-plasticidade nos métodos de dimensionamento de aterros
- Mecanismo do desenvolvimento dos escorregamentos. Começam no coroamento ou no pé do talude?
- Variações de tensões com o tempo e distribuição ao longo de uma superfície de escorregamento
- Fluência de solos e sua repercussão na estabilidade a longo prazo
- Efeitos de acções sísmicas e suas considerações nos cálculos de dimensionamento
- “Envelhecimento” no que respeita a características de resistência e de compressibilidade
- Novos conceitos no projecto de filtros
- Importância das poro-pressões negativas na estabilidade de taludes.

A matéria coberta pela Divisão 6 teve duas sessões de Discussão em Painel. O 1.º Painel era composto por FOLQUE (Portugal), GOLDER (Canadá), NONVEILLER (Jugoslávia) e ARAÚJO QUEIROZ (Brasil).

A primeira intervenção foi de A. QUEIROZ que se pronunciou sobre os mecanismos de desenvolvimento de escorregamentos.

Descreveu um “caso de obra” relativo a um escorregamento de um talude de escavação: o escorregamento foi planar, praticamente simultâneo do bordo superior ao inferior e deu-se ao longo de um conjunto de diaclases que definiam praticamente um plano inclinado.

Seguiu-se uma animada discussão em que intervieram Nonveiller, Golder, Folque e Queiroz. Se para alguma coisa tal discussão serviu foi para mostrar como o conceito de resistência ao corte se encontrava então ainda mal-esclarecido. Por exemplo, poucos aceitavam então que a “cadeia estrutural” dos solos argilosos contivesse elementos viscosos e plásticos.

Foi sobre a matéria acima mencionada que incidiu a intervenção de FOLQUE. Comentou aspectos reológicos dos solos argilosos e chamou a atenção para a complexidade das equações reológicas de estado, cujo tratamento ainda mais se complica dado elas serem não-lineares. Por isso evocou o interesse de efectuar estudos em modelo reduzido; dada a complexidade da reologia dos materiais deve-se usar no modelo o próprio material do protótipo. Como isso leva a que sejam muito baixas as forças mássicas será necessário usar aparelhos extremamente sensíveis para detectar as pequeníssimas tensões e extensões instaladas no modelo.

NONVEILLER interveio no sentido de sublinhar o interesse de detectar e medir as acentuadas deformações plásticas que antecedem o escorregamento propriamente dito.

GOLDER discutiu aspectos relacionados com a resistência a longo prazo e com a diminuição do ângulo de atrito interno quando cresce a tensão média.

Discussões fora do Painel, nomeadamente de BJERRUM e JANBU, focaram questões relacionadas com escorregamentos de *argilas sensíveis*. Chamaram a atenção, sobretudo, para

o facto de esses escorregamentos poderem ocorrer com certa brusquidão e sem aviso prévio escorvados por uma pequena “perturbação” (microsismo, abertura de uma pequena vala no pé do talude).

COSTA NUNES apresentou uma importante comunicação sobre estabilização de encostas. Discutiu medidas tais como: redução da inclinação do talude, drenagens, reforço de certas zonas do maciço, ancoragens, revestimento dos taludes (vegetal ou com calda de cimento).

Dentro da mesma Divisão houve 2.º Painel. Nele participaram KJAERNSLI (Noruega), LOFQUIST (Suécia), SCHAERER (Suíça) e WALKER (EUA).

A contribuição de LOFQUIST relacionou-se com os filtros de protecção dos núcleos de barragens. Chamou em especial a atenção para a necessidade de dispor de materiais que possam eventualmente colmatar fendas que se abram no núcleo.

KJAERNSLI focou a questão da compactação do lado húmido e do lado seco. Mostrou como ambas tinham as suas circunstâncias de preferência dependentes do clima e do tipo do material.

SCHAERER apontou algumas questões relacionadas com a complexidade do estado de tensão-extensão nos corpos das barragens.

WALKER pronunciou-se sobre aspectos sísmicos. Sublinhou o facto de barragens construídas tendo em atenção as disposições dos Regulamentos Anti-sísmicos terem exibido bom comportamento mesmo para sismos severos.