

UM ESBOÇO DA HISTÓRIA DA MECÂNICA DOS SOLOS

An Outline of the History of Soil Mechanics

por
JOSÉ FOLQUE*

RESUMO — Considera-se a história da Mecânica dos Solos dividida em quatro períodos: pré-histórico, clássico, moderno e actual. Em relação aos três primeiros resumem-se os principais desenvolvimentos ocorridos e que, de cada um, são característicos.

SYNOPSIS — In the history of Soil Mechanics four epoches are considered: pre-historic, classical, modern and contemporary. Concerning the former three epoches comments are presented related with the main specific aspects.

1 — EXPLICAÇÃO PRÉVIA

1.1 — Afigura-se que será possível distinguir na história da Mecânica dos Solos, depois de um período pré-histórico, mais três períodos. Tem cabimento designá-los, por semelhança com a História geral, por clássico, moderno e actual.

1.2 — Na pré-história da Mecânica dos Solos não serão de incluir, ao contrário do que à primeira vista poderia apeter, as actividades que, desde tempos imemoriais, os homens desenvolveram e em que tiveram que resolver problemas de engenharia de solos. De início, na resolução desses problemas recorria-se somente a procedimentos empíricos, por vezes mesmo de um grosseiro empirismo. Parece pois que dever-se-á considerar o início da pré-história na fase em que os conhecimentos, embora parcelares e rudimentares, já contêm em germe os princípios fundamentais da Mecânica dos Solos. É nitidamente o caso dos trabalhos de Coulomb e Rankine sobre impulsos de terras, os primeiros estudos quantitativos sobre areias, com relevo para os estudos de Darcy relativos à permeabilidade, e ainda trabalhos pioneiros, como os de Fellenius, sobre o comportamento de solos argilosos.

1.3 — O período clássico parece apropriado que se comece a contar a partir da publicação dos trabalhos de Terzaghi; não só a sua fundamental obra (em colaboração com Frolich), relativa à consolidação de argilas, mas também os trabalhos de juventude, publicados quando trabalhava em Istambul, e em que descreve minuciosos estudos, teóricos e experimentais, sobre resistência ao corte de areias e de argilas.

*Investigador LNEC.

O período clássico cobre o desenvolvimento e a consagração da Mecânica dos Solos como disciplina científica com todo o *esqueleto*, toda a conformação que hoje a caracteriza.

Encontram-se testemunhos importantes do período clássico nos Relatórios dos I, II e III Congressos Internacionais que se realizaram em Cambridge-Mass (1936), Roterdão (1948) e Zurique (1953).

1.4 — De passagem é importante comentar aquilo que os Relatórios dos Congressos Internacionais podem representar em relação aos *estados-da-questão* da época em que foram realizados.

E assim é de salientar que os primeiros Congressos contêm o magno registo e são o veículo fundamental de discussões entre os investigadores da jovem ciência.

Depois os Congressos Internacionais perdem importância relativa, pois a proliferação de Seminários, Simpósios, Encontros, Jornadas, *Workshops* e bem assim o aparecimento de numerosas revistas da especialidade multiplicam extraordinariamente os meios de difusão e discussão. Ver-se-á na continuação que até ao VII Congresso (México — 1969) os Relatórios dos Congressos veicularam informações fundamentais. Nos Relatórios dos Congressos posteriores começam a rarear comunicações que assim se possam considerar. Eles vão-se transformando em conjuntos de comunicações que, em geral, não tratam de questões em primeira mão, São repositórios de congeminções que em muitos outros locais se podem encontrar.

1.5 — Poderá designar-se como período moderno da Mecânica dos Solos aquele que se inicia posteriormente ao Congresso de Zurique (1953). O primeiro Congresso do período moderno será assim o de Londres (1957).

O que caracteriza fundamentalmente o período moderno é a intensa procura de teorizações que, com base nos princípios fundamentais — os da teoria da consolidação com o seu fecundíssimo conceito da tensão efectiva —, se adequem ao estudo dos mais variados equilíbrios de maciços terrosos: constituindo encostas rematadas em talude áspero, sob uma fundação, pressionando um suporte, constringendo uma cavidade em expansão, solicitando um revestimento de túnel.

E ainda no período moderno fazem-se incursões, também fortemente marcadas por ambições teorizantes, noutras domínios: por exemplo, o estudo do equilíbrio de um meio granular actuado por forças internas de percolação, problema que comporta dois aspectos: o equilíbrio global (como no esvaziamento brusco de uma barragem) e o equilíbrio em relação ao *arranjo estrutural* (equilíbrio que, uma vez rompido, conduz à erosão interna, ao *piping*).

Outros aspectos típicos do período moderno são os que se referem ao aprofundamento do estudo de comportamentos de solos recorrendo à reologia, sobretudo usando reologia analógica, isto é, reologia em que se utilizam modelos com correspondência entre cada elemento do modelo e um homólogo elemento da estrutura do solo.

São abundantes as comunicações relativas a problemas referidos como sendo típicos do período moderno e que se encontram contidas nos Relatórios dos Congressos de Londres (1957), Paris (1961), Montréal (1965) e México (1969).

1.6 — O período actual, em que a literatura é muitíssimo abundante e largamente extravasa os Relatórios dos Congressos da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos, é caracterizado por dois aspectos com algo de antagónico. Por um lado, traduzindo um certo desencanto em relação à abundante teorização existente (de muito reduzido êxito na prática), assiste-se a um pujante retorno ao empirismo; procuram-se regras de decisão que se fundamentem em comportamentos observados, sem cuidar muito de aspectos teóricos; e isto implica uma grande valorização da observação das obras. Por outro lado, promovem-se esforços com *aparência* de teorização mas que na realidade têm essência empírica: trata-se da árdua procura de *modelos*, mas agora de modelos matemáticos que sirvam para basear cálculos em computador.

Nos referidos modelos pode-se até descurar a estrita correspondência com a física dos fenómenos; o escopo, na esteira do positivismo lógico, é encontrar representações que correspondam à experiência. Representações que, numa palavra, sirvam para reproduzir o “suposto” real em termos de haver ajuste com o observado. Tudo isto porque a poderosa ferramenta que o desenvolvimento do cálculo computacional pôs ao serviço do engenheiro leva-o, na actualidade, à necessidade de arranjar modelos matemáticos que lhe sirvam como modelos de cálculo. Nesses cálculos baseiam-se previsões de comportamento e a validade de toda a matematização efectuada afere-se pelo grau de ajustamento entre essas previsões e o comportamento efectivamente observado na obra. A física dos fenómenos é suposto que subjaz, aceita-se (sem de resto dar ao caso grande atenção) que está envolvida no processo pois só assim se pode compreender que a previsão calculada possa coincidir com o comportamento observado.

1.7 — No presente trabalho omitir-se-ão referências ao período actual porque nele estamos a viver, não tendo essas referências cabimento num trabalho que se pretende de cariz histórico.

Num primeiro artigo tratar-se-á do período *pré-histórico* com as alíneas: De Coulomb a Rankine; Estudos de areias; Estudos de solos argilosos.

Em artigos subsequentes tratar-se-ão os períodos *clássico e moderno*. Em relação com o período clássico focar-se-ão as alíneas: Os trabalhos de Terzaghi; O princípio da tensão efectiva; Consolidação e resistência de solos. No artigo dedicado ao período moderno comentar-se-ão os Congressos Internacionais: Londres (1957); Paris (1961); Montréal (1965); México (1969).

2 — O PERÍODO PRÉ-HISTÓRICO

2.1 — De Coulomb a Rankine

Há sempre muito de arbitrário em marcar datas de nascimento às épocas históricas. Mas é sedutor e nem sempre se resiste à tentação. Nesta conformidade vai-se datar o nascimento da Mecânica dos Solos de 1766, ano em que Coulomb apresentou à Academia Francesa o seu célebre *Éssai sur une application des règles de “Maximis et Minimis” à quelques problèmes de statique*.

O conteúdo fundamental desse Ensaio era constituído por um conjunto de regras para cálculo dos impulsos de terras sobre muros de suporte. Coulomb pôs a questão em termos que prenunciam o fundamental da Mecânica dos Solos como disciplina científica. De facto, atente-se às hipóteses básicas apresentadas:

a) — A resistência ao corte, τ , numa faceta de solo em que a tensão normal é σ é dada por

$$\tau = c + \sigma \cdot v$$

em que c é a coesão e v é o coeficiente de atrito interno. Esta *descrição* da resistência ao corte tem resistido à prova dos tempos. Embora em formulações modernas requintadas se tenha recorrido a outras formulações, a tensão de resistência ao corte de acordo com a teorização de Coulomb continua a ser aquela que domina a prática corrente.

b) — A ruptura do maciço suportado, para evitar a qual o muro de suporte tem de absorver um dado impulso, dá-se ao longo de uma superfície plana com uma localização tal que conduz ao *máximo* impulso.

É uma formulação que também se mantém parcialmente moderna. Conserva actualidade sobretudo por ter implícita uma condição de *máximo*, o que corresponde a uma condição de *mínima* resistência na superfície de deslizamento, teorização de acordo com os modernos conceitos da Teoria da Plasticidade (teorema do *limite inferior*).

c) — O impulso é calculado admitindo que o maciço suportado esté na *iminência* de deslizar. Isto implica que a reacção mobilizada ao longo do plano de deslizamento se disponha fazendo o ângulo de atrito interno com a normal ao plano — e isto fixa a direcção da reacção; e que assuma o valor $\sigma \cdot v$ — e isto fixa a sua grandeza.

Esta é, ainda hoje, a formulação básica de qualquer método de *equilíbrio-limite*.

E, como se vê, não falta fundamento à decisão de considerar o Ensaio de Coulomb como o *atestado de nascimento* da Mecânica dos Solos.

Neste mesmo domínio de avaliação de impulsos de terras merece menção o trabalho de Poncelet *Mémoires sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations* (1840). Com base na teorização de Coulomb são estudados os casos de impulsos, activos e passivos, de muros de suporte inclinados. Poncelet resolve também, obviamente em “equilíbrio-limite”, o problema da capacidade de carga de uma sapata.

Todos os seus estudos foram feitos para solos incoerentes. Como curiosidade é de apontar que foi Poncelet que introduziu o símbolo ϕ para designar o *ângulo de atrito interno*, símbolo que recebeu consagração.

Em 1845 Hope realizou, numa interessantíssima montagem, a medição das componentes, horizontal e vertical, do impulso sobre um muro de suporte, Determinou-se assim, pela primeira vez, um valor do ângulo de atrito terras-muro. Estas experiências estão descritas na

publicação *Experiments carried out at Chatham on the pressure of earth against revetments* (Londres, 1845).

Foi Collin quem em primeiro lugar procurou teorizar a questão de escorregamentos de encostas de solos argilosos ao longo de superfícies cilíndricas. Considerou como determinante do escorregamento a circunstância de ser excedida, ao longo de uma determinada superfície, aquilo que designou por “coesão”. Em terminologia moderna esse termo equivale a “resistência não-drenada para tensão normal nula” (coincide com a grandeza que hoje se designa por *coesão* quando o solo tiver pressão intersticial nula, e portanto tensão normal total igual à tensão efectiva).

É também de assinalar, nas actividades de Collin, a realização de ensaios usando uma caixa de corte rudimentar. Foi essa montagem que lhe permitiu medir as “coesões” com que analisou escorregamentos ocorridos e de cuja superfície de escorregamento fez o levantamento (constatou então que elas poderiam ser bem aproximadas por ciclóides). Os trabalhos de Collin estão descritos no livro *Recherches experimentales sur les glissements spontanés des terrains argilleux* (Paris, 1846).

É notável a contribuição de Rankine para o estudo do equilíbrio dos maciços terrosos. As suas ideias, contidas em diversas Memórias, estão compiladas no célebre *A Manual of Civil Engineering* (Londres, 1862).

A visão de Rankine é mais geral do que a de Coulomb pois que encara a ruptura *global*, a ruptura simultânea de toda a massa do maciço. Mas na prática, no cálculo de muros de suporte, acaba por ser menos rigorosa por não levar em consideração o atrito terras-muro.

Considera Rankine que um determinado maciço entra em ruptura quando o estado de tensão é tal que os círculos de Mohr têm como envolvente uma recta que faz o ângulo ϕ com o eixo das abcissas. Uma simples análise trigonométrica desta circunstância leva aos coeficientes de impulso activo, K_a , e passivo, K_p , dados por

$$K_a = \operatorname{tg}^2 (45 - \phi/2)$$
$$K_p = \operatorname{tg}^2 (45 + \phi/2)$$

É, obviamente, uma solução mais globalizante do que qualquer das anteriormente propostas. Ganha esse estatuto com o sacrifício, o que de certo modo é inevitável, de algumas precisões práticas, como é a aludida não consideração do atrito terras-muro: uma teorização muito geral perde em precisão aquilo que ganha em abrangência.

Há interesse em recordar alguns pontos de vista práticos que Rankine enunciou. Referem-se nomeadamente à *coesão*. Era opinião de Rankine que, para quaisquer tipos de solos, a coesão devia ser desprezada em estudos de equilíbrios a longo prazo, pois que, mesmo nas argilas duras, a coesão tende a anular-se com o tempo. Nesses solos a coesão só podia portanto ser tomada em consideração em estudos de equilíbrios temporários.

Nas rochas *sãs* a coesão pode ser evidentemente levada em conta, mas não se deve contar com qualquer atrito interno. Nos xistos argilosos a coesão tem de ser encarada com muita precaução pois que, tal como nos solos, pode tender a evanescer.

2.2 — Estudos de areias

É fora de dúvida que o mais importante trabalho, deste período e referente a este tema, foi o estudo de Darcy sobre *permeabilidade de areias*. O referido estudo foi largamente difundido pela obra clássica *Les fontaines publiques de la ville de Dijon* (1856).

Darcy estabeleceu a lei que é universalmente designada pelo seu nome e que exprime o seguinte: numa areia percorrida por um fluxo de líquido, a velocidade do fluxo é proporcional ao gradiente de pressões; o coeficiente de proporcionalidade é o coeficiente de permeabilidade do meio para o líquido em questão. Depende obviamente da viscosidade do líquido mas é habitual, por ser esse o líquido com que mais se lida em engenharia, referi-lo à *água*.

Não está muito difundido o conhecimento do trabalho de Reynolds *Experiments showing dilatancy, a property of granular material* (Proc. Royal Inst., 1897). Como o título do trabalho indica, Reynolds estudou a *dilatância* das areias, fenómeno que, como se vê, há muito é conhecido, mas o qual apesar disso não é muito familiar a um grande número de engenheiros.

É interessante descrever sucintamente uma experiência de Reynolds: encheu com areia muito compacta e saturada um saco de borracha; ligou o saco a um tubo vertical de vidro contendo água e torceu o saco. Constatou que a água descia no tubo: a areia absorvia água, o que significava que o seu volume de poros aumentava.

Clibborn, no trabalho *Experiments on the passage of water through the sand of the Chenabi River from de Kharbi weir site* (1902), deu conta de fenómenos de erosão interna (“*pip-ing*”) e da necessidade de obrigar a que o “caminho de percolação” sob a fundação de açudes fosse suficientemente longo: reduzia-se assim o gradiente e consequentemente a velocidade de fluxo (e portanto o poder erosivo). Este foi o primeiro de uma série de trabalhos experimentais que fundamentaram as conhecidas regras empíricas de fixação dos “caminhos de percolação” em função da carga hidráulica e da granulometria da areia onde a percolação se processa.

Foi ainda em consequência da exploração dos trabalhos que no parágrafo anterior se mencionaram que, pela primeira vez, se propôs o uso de *filtros*. Deve-se isso a Beresford (*Notes on technical works*, Govt. of India, 1902), que mostrou, em experiências feitas usando um recipiente contendo areia e sede de um fluxo ascendente de água, que dispendo uma camada de gravilha na superfície superior (superfície de saída) o “*pip-ing*” não ocorria. Logo em 1905 Buckley aplicou filtros na prática, com inteiro êxito, na fundação de um açude no rio Jalem (Índia).

2.3 — Estudos de solos argilosos

Em 1908 Atterberg propôs uma classificação de solos finos com base na granulometria para cuja fundamentação definiu “argila” (dimensão) como a fracção dos solos com dimensão inferior a 2μ .

Pouco tempo depois Atterberg, constatando que a granulometria, por si só, era insuficiente para descrever as propriedades dos solos argilosos, propôs uma classificação complementar baseada no comportamento “plástico”: definiu o *limite plástico superior* como o teor em água

acima do qual uma “pasta” de solo tem comportamento líquido; e o *limite plástico inferior*, como o teor em água abaixo do qual uma pasta de solo não pode ser moldada sem gretar. Definiu *índice de plasticidade* como a diferença entre os *limites* e estabeleceu a seguinte classificação:

- Índice de plasticidade entre 0 e 1solo não plástico
- Idem 1 e 7 solo de baixa plasticidade
- Idem 7 e 15solo de média plasticidade
- Idem acima de 15 solo de alta plasticidade

Estas propostas foram sintetizadas em artigo aparecido, em 1910, na revista alemã *Chemischer Zeitung*, n.º 34.

Posteriormente Atterberg continuou com pesquisas no mesmo campo e concluiu pela constatação de que a composição mineralógica era o principal determinante dos comportamentos observados.

Em conformidade com o que atrás ficou dito verificou Atterberg que solos finos, compostos por biotite, clorite ou caulinite, tenham plasticidade média a alta; pós finos obtidos por moedura de limonite tenham pequena plasticidade; e o quartzo, mesmo com moedura muito fina, apresentava-se como não-plástico.

Nos anos imediatos à sua publicação os trabalhos de Atterberg praticamente não tiveram repercussão. Deve-se a Terzaghi o reconhecimento do seu interesse. Inclusive, aponta-se como pormenor curioso, foi Terzaghi que propôs as designações de *limite de liquidez* e *limite de plasticidade* para os “limites plásticos” que tinham sido definidos por Atterberg. As propostas de Atterberg mantêm, como é sabido, completa actualidade.

Em Outubro de 1907 a barragem de Charmes, no canal Marne-Soam, sofreu um escorregamento do maciço de montante após um esvaziamento que, nalguns meses, fez baixar a cota da água armazenada de cerca de 9m. O talude de montante era bastante inclinado (2,5/1) e o corpo da barragem era constituído por terras argilosas. Mesmo assim o facto causou bastante surpresa porque a barragem tinha sido excepcionalmente bem compactada, em camadas de 15 cm de espessura, atingindo-se compactação a que correspondiam pesos volúmicos aparentes de 20 KN/m³.

A reparação da barragem consistiu em remover todas as terras acima da superfície de escorregamento e fazer a sua substituição por solos adicionados de 20% de cascalho fino.

O engenheiro que dirigiu os trabalhos de reconstrução, Frontard, conduziu simultaneamente aprofundados estudos visando esclarecer a influência da granulometria dos solos no seu comportamento após compactação.

Começou Frontard por estudar a granulometria de 15 barragens, todas elas com taludes tão ásperos como a de Charmes (1,5/1 como ficou dito). Constatou que, em geral, o teor em elementos grosseiros era muito elevado; em média a percentagem de cascalho+areia grossa andava por 25%. Só em três barragens, uma delas sendo a de Charmes, o teor em “grosseiros” descia para valores de 10 a 12%; e em todas elas tinha havido escorregamentos do talude de montante, embora só na de Charmes o escorregamento tivesse interessado um volume apreciável. Este facto indicava que a elevada percentagem de material fino (55% de argila+silte) seria a causa dos escorregamentos.

Foi ainda constatado que o fenómeno não estava conotado, como se poderia julgar em primeira impressão, com *amolecimento por encharcamento* do solo; acima e abaixo da superfície de escorregamento este mostrava-se nas mesmas condições em que tinha sido deixado na construção. Só em estreitas camadas adjacentes à superfície de escorregamento o solo estava com teor em água sensivelmente superior ao de colocação.

Por sugestão de Résal efectuaram-se, em blocos talhados no próprio corpo da barragem, ensaios de corte. Usaram-se macacos para aplicar forças na vertical e na horizontal. Os resultados ajustaram-se bem ao andamento rectilíneo da lei de Coulomb mas conduziram a um ângulo de atrito muito baixo, 8 a 10° (com “coesão” de 20KPa).

Em fase posterior dos estudos efectuaram-se ensaios, em caixas de corte, sobre amostras remexidas de solo da barragem adicionado de percentagens crescentes de elementos grossos. Constatou-se que o ângulo de atrito exhibia acréscimos substanciais. Estes ensaios foram fundamentais na decisão de reparar a barragem com solos adicionados de cascalho.

Em relação aos ensaios que atrás foram mencionados Frontard intuiu que os comportamentos observados estariam relacionados não tanto com a granulometria “per se” mas mais com o facto de os solos grosseiros permitirem drenagem fácil da água intersticial. Esta, por sofrer drenagem, perderia a pressão que anteriormente lhe tinha sido transmitida pela água armazenada na albufera. Frontard não conseguiu porém (apesar de o ter tentado) ler essa pressão enquanto decorriam os ensaios de corte. Mas constatou, o que confirmava a sua ideia, que quanto mais lentamente se aplicavam as forças de corte, maiores eram os ângulos de atrito obtidos. Como se vê estava *compreendido*, embora insuficientemente quantificado, o mecanismo das rupturas dos maciços de montante em consequência de *esvaziamentos bruscos*.

Os ensaios de corte em blocos e a discussão dos seus resultados constam do célebre tratado de Résal *Poussée des terres; théorie des terres cohérentes*, Paris 1910. Os ensaios conduzidos por Frontard e a sua discussão constam de *Notice sur l'accident de la digue de Charmes, Ann. Ponts et Chauss. IX série*, 1914.

Em 1916, no porto de Gotemburgo, um muro-cais fundado em argila sofreu um espectacular acidente: um escorregamento, por rotação do solo de fundação, logo a seguir ao seu acabamento. Petterson, o engenheiro que tinha a seu cargo as obras do porto, com base em medidas precisas dos deslocamentos do muro e do terraplano por ele suportado, concluiu que o muro sofrera um escorregamento rotacional ao longo de superfície cilíndrica cuja directriz podia ser tomada como circular.

Dividindo em fatias a massa que sofreu escorregamento e considerando em equilíbrio-limite cada uma das fatias, traça-se o polígono das forças actuantes o que permite determinar a força reactiva em cada fatia. A inclinação de cada força com a normal à faceta em que incide dá um valor do ângulo de atrito, valor diferente para cada faceta, em princípio. Mas a dispersão dos valores é pequena e tem por isso sentido tomar o seu valor médio como ângulo de atrito interno do material. Foi assim que nasceu o método de cálculo da estabilidade em relação ao deslizamento, conhecido por *método das fatias* ou *método sueco*.

Mais tarde Fellenius, cujo nome é habitual associar também a este método, preconizou que para argilas o dito método fosse aplicado considerando o solo como puramente coesivo: aparecem assim os primeiros cálculos efectuados na condição designada hoje como “ $\varphi=0$ ”. E mais tarde,

também por sugestão de Fellenius, foi generalizado o método para se levar em conta as duas componentes da resistência dos solos: a friccional e a coesiva.

Foi ainda Fellenius quem, usando a metodologia citada, deduziu o chamado *número de estabilidade*, $c/\gamma h$, que permite calcular a altura que pode suportar um maciço puramente coesivo quando desmontado em corte na vertical.

Os artigos originais de Petterson e Fellenius só em 1927 foram traduzidos para alemão e tiveram difusão internacional.

Da Suécia, nestes primeiros tempos de experimentação sistemática do comportamento de solos finos (época que vai de 1914 a 1925), vieram outras contribuições notáveis, sobretudo originadas em estudos promovidos pela Companhia Nacional de Caminhos de Ferro.

Nomeadamente são de citar ensaios de *indentação com cone*, efectuados em laboratório e particularmente úteis para caracterização de solos finos. Usava-se um cone com 60° de abertura no vértice e pesando 60 g. Era habitual correlacionar a profundidade de indentação deste cone numa amostra indeformada com a sua resistência ao corte. Usando amostras remexidas, com diferentes teores em água, determinavam-se também o limite de liquidez e o limite de plasticidade; são métodos com menos erros “pessoais” do que os métodos normalizados entre nós e por isso são eles recomendados em muitos países, sobretudo da Europa de Leste.

O principal artífice dos trabalhos promovidos pelos Caminhos de Ferro suecos foi Olsson, considerado como o primeiro engenheiro que trabalhou em “full-time” no domínio da Mecânica dos Solos. A Olsson devem-se também os primeiros estudos sobre *sensibilidade* (realizados com o cone de ensaio que foi mencionado) e ainda o que foi talvez o primeiro amostrador de amostras razoavelmente *indeformadas* colhidas em furos de sonda: um amostrador de paredes finas com válvula de retenção.