

LÓGICA: ASPECTOS DA SUA APLICAÇÃO EM QUESTÕES GEOTÉCNICAS*

Logics: using its principles in geotechnical problems

por

MANOEL HENRIQUE ALBA SORIA**

JOSÉ FOLQUE***

ARAKEN SILVEIRA**

RESUMO — Apresenta-se argumentação em favor de um maior emprego da Lógica como ferramenta para o desenvolvimento da Engenharia e em particular da Geotecnia. Foca-se a estrutura lógica de determinados campos da Geotecnia como a classificação de solos e os Códigos de Fundações.

SYNOPSIS — It is claimed that a more intense use of Logics principles in Engineering studies can be largely rewarding. A discussion concerning the logical structure of very important fields of Geotechnique (Soils Classifications, Codes of Practice) is presented.

1 — INTRODUÇÃO

O objectivo final da Geotecnia é a explicação e previsão do comportamento de massas de rochas ou solos e das obras que delas se utilizam. Para isso utiliza-se o conhecimento pessoal de cada técnico somado ao conhecimento contido nas obras escritas e similares. Essa parte do conhecimento é formulada em declarações ou asserções expressas em uma linguagem que contém palavras, números, símbolos e fórmulas matemáticas. Pode-se chamar teoria a cada conjunto coerente de asserções que permitem descrever ou prever.

Essas teorias foram desenvolvidas com dois ingredientes essenciais: a experiência e o raciocínio. A experiência, seja ela observação, medida ou ensaio, traz a informação do mundo concreto para o campo intelectual. O tipo fundamental de afirmação derivada de experimentos é um simples enunciado de resultado de ensaios como:

— a actividade (IP/teor de argila) da argila de Grangemouth ensaiado por Skempton (1953) é igual a 0,74.

É evidente que tais afirmações só são úteis se forem verdadeiras, isto é, se corresponderem a factos, e se existir um arcabouço teórico onde elas possam ser inseridas. São entretanto imprescindíveis para a elaboração de teorias.

Já para que possam ser formuladas as asserções de maior alcance, que permitem prever e explicar factos, é necessário um nível de raciocínio mais especializado que o usado para relatar ou descrever. Enquanto que para enunciar um resultado não há necessidade de argumentação, para formular uma teoria exigem-se argumentos elaborados a partir de asserções derivadas de experiências e isso exige processos de raciocinar. É necessário um código de procedimento que

*A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

**Professor e pesquisador, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

***Investigador-coordenador, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

permita criar teorias cuja aplicação conduza a resultados que se aproximem convenientemente dos factos. Isso significa que toda afirmação com "status" de teoria traz como pressuposto a existência de um método de raciocinar.

Duas ferramentas são básicas para raciocinar, na elaboração e análise crítica de teorias: a lógica, que estabelece os processos válidos de tirar conclusões, e a epistemologia que estuda o conhecimento e o modo como ele se desenvolve.

Uma afirmação como:

"Para determinado "estrato" natural de argila, a razão entre o índice de plasticidade e o teor de argila é aproximadamente constante." (Skempton, 1953),

obtida com base na observação de um grande número de amostras, indica que o autor aceitou a indução como processo de inferência. Ao se fazer uso da afirmação citada, deve-se ter em conta esse facto.

Outra afirmação contida no mesmo artigo,

"Informações acerca de 27 argilas são dadas na Tabela 2, de onde pode-se deduzir que há um certo grau de correlação entre a actividade e a mineralogia e a história geológica da argila." (Skempton, 1953),

mostra que o autor atribuiu o carácter de dedução a um argumento que formalmente é uma indução.

Enquanto a dedução é um processo de raciocínio cujas regras são claramente estabelecidas pela lógica formal, a validade da indução como método de se obter teorias ainda não pôde ser estabelecida. Embora existam alternativas para resolver o problema da indução, o que mais importa é que se tenha uma postura clara, definida e declarada frente a teorias.

Ainda no argumento em análise, o autor admite a simetria entre propriedades, caracterizada pela palavra "correlação", afirmando que tanto a mineralogia e história geológica da argila pode ser prevista pela actividade como também que a actividade pode ser prevista a partir da mineralogia e história.

Vê-se, com esses exemplos simples, que os clássicos preceitos da lógica formal e as recentes conquistas da epistemologia são instrumentos importantes para a formulação e análise crítica de teorias.

2 — APLICAÇÃO: UMA ABORDAGEM LÓGICA DA CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

A partir da ideia básica de uma revisão crítica, com o auxílio da lógica para a análise de inferências e adoptando a posição de Popper (1972) frente aos problemas e teorias, iniciou-se na Escola de Engenharia de São Carlos um primeiro estudo sobre a lógica da classificação de solos (Sória, 1985). Algumas das ideias surgidas durante o desenvolvimento do trabalho, e as suas consequências, são apresentadas a seguir.

O primeiro problema que se trata é:

Por que classificar?

A resposta, amplamente amparada na análise da história e na teoria das classificações é que uma classificação ou sistema de classificação visa a inferência de propriedades, a partir da classe em que o solo se enquadra. Se a classificação não permite inferir propriedades ela é tautológica, ou seja, classifica por classificar e portanto não tem qualquer utilidade. O exame das classificações de solos para a engenharia civil mostra que, para classificar, medem-se determinadas propriedades-índices, atribui-se uma classe ao solo e, a partir da classe, inferem-se outras das suas propriedades.

É curioso notar que as primeiras versões das classificações traziam tabelas que davam as propriedades em função da classe e que actualmente as classificações mais consagradas como a USCS (ASTM 1983a) e HRB-AASHTO (ASTM 1983b) não mais apresentam tabelas similares. Nesse caso a inferência das propriedades fica a cargo do usuário da classificação. Também é digno de nota que na primeira versão da classificação HRB não se dizia que era uma classificação de solos mas sim de subleitos. Estavam portanto embutidas na nomenclatura e na descrição dos subleitos as inferências feitas com base nas propriedades dos solos.

Decorrências da estrutura das classificações

Uma classificação deve ter duas propriedades fundamentais: a abrangência e a excludência, ou seja, ela deve abranger todos os elementos do conjunto a que se refere e um elemento não pode pertencer simultaneamente a mais de uma classe. Por serem as classificações criadas pelo intelecto humano é lícito e possível estabelecer essas regras.

Note-se que o princípio da excludência não proíbe que objectos de propriedades diferentes possam estar numa mesma classe. Isso é bastante surpreendente do ponto de vista prático, mas trivial no aspecto lógico. Por exemplo, se dois solos bastante diferentes caírem numa mesma classe, isso não contraria os princípios gerais das classificações; para contrariar o princípio da excludência seria necessário que um mesmo solo ou dois solos iguais caíssem em duas ou mais classes diferentes.

Tal facto indica a necessidade de uma outra propriedade das classificações, esta não mais ligada à lógica da estrutura de concepção mas ao conteúdo de verdade ou seja, à sua capacidade de correspondência aos factos e de servir como modelo adequado à realidade:

Uma boa classificação não deve colocar na mesma classe objectos diferentes.

Esse requisito mostra a dificuldade de adequar-se uma classificação, artificial, ao mundo, real. A necessidade de abrangência obriga as classificações a serem imperfeitas pois têm que classificar todo o conjunto. Ora, sempre haverá na natureza uma parte desconhecida, e portanto sempre existe a possibilidade de colocar na mesma classe objectos diferentes, cuja diferença não pode ser identificada pela medida ou propriedade que permite classificar.

Em resumo, a classificação detecta algumas propriedades, digamos, P1 e a partir delas permite classificar com o objectivo de inferir outras propriedades, P2. Mas de acordo com a estrutura lógica da classificação não é necessário que P2 implique em P1. Ou seja, a estrutura permite que dois objectos, um deles com propriedades P2 e outro com P3, sendo P2 diferente de P3, tenham propriedades P1 idênticas e portanto estejam na mesma classe. Um exemplo é o caso dos solos lateríticos e não-lateríticos que segundo as classificações tradicionais estão na mesma classe porque têm propriedades P1 iguais, e que no entanto podem ter (e geralmente têm) propriedades P2 e P3 diferentes.

A aparente e desejada correspondência biunívoca entre propriedades-índices (que possibilitam classificar) e as propriedades inferidas não existe. Isso pode ser fonte de enganos, principalmente provocados pelo facto de se ignorar ou esquecer que uma classificação — tal como as demais teorias — é uma criação artificial do intelecto humano para desvendar o mundo natural. Da classificação, como teoria, não se pode admitir falha lógica; da sua aplicação para descrição do mundo, como conhecimento, é desejável a veracidade.

Além disso a estrutura das classificações torna válidas determinadas inferências que sem essa estrutura, ou seja, estritamente pela lógica formal, não seriam válidas. Explica-se recorrendo a um exemplo: seja o esquema geral de correspondência entre propriedades-índices I, classes C e propriedades inferidas P:

$$\begin{array}{l} I_1 \rightarrow C_1 \rightarrow P_a \\ I_2 \rightarrow C_2 \rightarrow P_b \\ I_3 \rightarrow C_3 \rightarrow P_b \\ I_4 \rightarrow C_4 \rightarrow P_a \\ I_5 \rightarrow C_5 \rightarrow P_a \end{array}$$

Os processos de inferência amparados pela lógica formal são dos tipos:

a) *modus ponens*

$$\begin{array}{ll} I_2 \rightarrow P_b & \text{ou seja,} \\ I_2 & \text{se um solo tem índice } I_2 \text{ então terá propriedade } P_b. \text{ Este solo tem} \\ \dots\dots\dots & \text{índice } I_2. \text{ Portanto este solo tem propriedade } P_b. \\ P_b & \end{array}$$

b) *modus tollens*

$$\begin{array}{ll} I_2 \rightarrow P_b & \text{ou seja,} \\ P_b & \text{se um solo tem índice } I_2 \text{ então terá propriedade } P_b. \text{ Este solo não} \\ \dots\dots\dots & \text{tem propriedade } P_b. \text{ Portanto este solo não tem índice } I_2. \\ \tilde{I}_2 & \end{array}$$

Um argumento que não é formalmente válido é o chamado

c) *falácia da afirmação do consequente*

$$\begin{array}{ll} I_2 \rightarrow P_b & \text{ou seja,} \\ P_b & \text{se um solo tem índice } I_2 \text{ então terá propriedade } P_b. \text{ Este solo tem} \\ \dots\dots\dots & \text{propriedade } P_b. \text{ Portanto este solo tem índice } I_2. \\ I_2 & \end{array}$$

Entretanto, se forem impostas a abrangência e a excludência para o elenco de propriedades, serão válidas inferências como:

$$\begin{array}{ll} d) \quad I_2 \rightarrow P_b & e) \quad I_1 \rightarrow P_a \\ & \text{ou ainda} \\ P_b & P_a \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ I_2 \text{ ou } I_3 & I_1 \end{array}$$

Essas inferências têm estruturas de falácia da afirmação do consequente e sozinhas seriam não-válidas; o que as torna válidas é a estrutura das classificações, mais exactamente os postulados de abrangência e excludência. (Pode-se levantar a suspeita de o facto de inferências como essas (d, e) serem válidas, ter induzido à crença injustificada em raciocínios que são falácias da afirmação do consequente.)

Diante desse quadro pergunta-se agora: é lícito contar com a abrangência e excludência no conjunto P das propriedades inferidas? Responde-se que não: enquanto os elencos de índices I e classes C são criações ou teorias do intelecto humano, o elenco de propriedades P está sujeito aos desígnios da natureza. No exemplo acima podem existir indivíduos com propriedades P_b , digamos, que tenham índice I_5 . Pode haver também indivíduos com propriedades P_b , não enumeradas no conjunto P original. Em casos como esses é necessário retocar ou reformular a teoria que dá a correspondência entre índices e propriedades.

O conhecimento da estrutura das classificações — e classificar é uma actividade fundamental — mostra que é infundada a tendência que temos frequentemente de não aceitar determinados factos naturais porque eles não se enquadram bem na estrutura da nossa classificação.

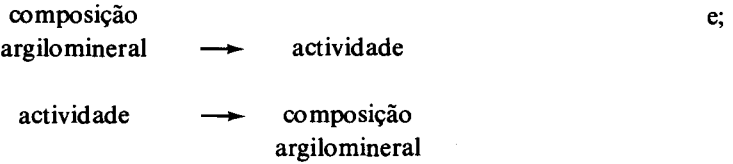
Assim, uma maneira mais racional de ver as classificações é encará-las como teorias que serão modificadas à medida que o nosso conhecimento evoluir. As dificuldades em classificar, os casos em que a classificação falha, os casos habitualmente ditos "peculiares", servirão para construir novas e melhores classificações.

Como exemplo, talvez o mais marcante até hoje, cita-se o caso dos solos lateríticos, que cobrem extensas áreas de regiões tropicais. As classificações tradicionais com USCS e HRB-AASHTO colocam esses materiais junto com outros de propriedades muito piores. Como esses solos lateríticos têm, via de regra, óptimo comportamento (quando comparado com os de mesma classe não-lateríticos) tanto nos aterros, cortes, mas principalmente no pavimento, costuma-se dizer que são peculiares. Mas o correcto é dizer que as classificações citadas são falhas e fracas como teorias para classificar um universo de solos onde existem solos lateríticos. Sente-se aqui o poder do conhecimento acerca da estrutura das teorias; pode-se orientar e decidir uma questão da tecnologia, com o uso de ferramentas de grau mais básico: a lógica e a epistemologia.

Há um outro problema que parece estar ligado ao da estrutura das classificações: é o da correlação entre propriedades. Quando se estudam, por exemplo, os índices de Atterberg e a composição argilomineral dos solos é comum serem encontrados argumentos como:

— admitindo-se que em função do argilomineral (ou elenco deles) o solo tem um determinado valor para a relação IP/teor de argila ou actividade, através da medida da actividade pode-se inferir a composição argilomineral.

Esse argumento não é válido segundo a lógica formal. Formalmente é uma falácia da afirmação do consequente. Entretanto essa ideia vem orientando, desde que foi enunciada pela primeira vez, diversos trabalhos. Veja-se Skempton (1953), Seed *et alii* (1964a, 1946b) e Vargas (1982). É possível que a crença em sua validade tenha componentes associados à validade da simetria afirmada por Skempton na asserção já citada:



3 — APLICAÇÃO: DAS HIPÓTESES "A PRIORI" DOS EXPERIMENTOS

Todas as classificações (ou pelo menos as usadas em tecnologia) são baseadas em propriedades-índices, geralmente detectadas ou medidas através de ensaios e têm a sua estrutura montada a partir de comparações de resultados. Um exame dos tipos de comparação de resultados de ensaios publicados na literatura e uma reflexão sobre as condições "a priori" dessas comparações mostra que existem três níveis de comparações de resultados de ensaios. Essa identificação foi proposta por Sória (1985).

Do "primeiro nível" são as comparações entre resultados que são iguais "a priori". As diferenças entre resultados são atribuídas aos erros de ensaios. É o caso, por exemplo, quando se ensaiam dois ou mais corpos de provas obtidos por quarteamento do mesmo solo e submetidos a tratamento idêntico. Com esses resultados geralmente são feitas estatísticas como média, desvio padrão etc.

As comparações do "segundo nível" são aquelas em que os materiais são "a priori" da mesma natureza mas não idênticos. Procura-se uma asserção em forma de lei que relacione entre si duas ou mais propriedades, que será válida para materiais dessa natureza. O significado da palavra natureza, aqui, é amplo e depende dos tipos de hipóteses e teorias procuradas.

Um exemplo é o que ocorre quando se estuda um depósito natural de material onde, apesar de serem da mesma natureza, as amostras terão variações não desprezáveis de granulometria, limites de Atterberg, etc. As asserções derivadas desses estudos serão válidas para os materiais desse depósito em particular. A diferença entre resultados de ensaios é composta de duas parcelas: uma é o erro de ensaio, o mesmo do primeiro nível; a outra é devida às diferenças entre duas amostras da mesma natureza. Essa diferença é provocada pela variação de outras propriedades, resguardada a mesma natureza.

Já as comparações do "terceiro nível" não admitem qualquer posição "a priori" sobre as amostras e os resultados de ensaios. Não se sabe se os materiais são idênticos ou da mesma natureza. Como exemplo mais genérico pode-se pensar no seguinte experimento: toma-se o mapa-mundi e obtém-se por sorteio um número N de locais onde há solos e colhe-se uma amostra de cada local. A comparação entre os resultados desses ensaios é do "terceiro nível".

A identificação desses três níveis de comparações, experimentos e das asserções que deles derivam, é de capital importância. Frequentemente teorias obtidas a partir de experimentos de segundo nível são usadas inadvertidamente para condições em que elas não são válidas. É também comum encontrarem-se, na literatura, casos em que uma tabela ou conjunto de dados traz, misturados, resultados de experimentos de segundo e terceiro níveis, o que compromete a validade das conclusões tiradas.

Ressalte-se que os três níveis podem ser usados para delimitar validade geográfica de uma teoria, de uma classificação de solos ou de recomendações contidas em um Código de Fundações como apontado por Folque (1985).

Curiosamente a preocupação do homem na busca da unidade e diversidade na natureza aparece em vários locais, épocas e contextos, como nas palavras de Pico della Mirandola (1463-1494):

"Primeiramente, há a unidade nas coisas, pela qual cada coisa está de acordo consigo mesma, consiste dela mesma e é coerente consigo mesma. Em segundo lugar há a unidade, pela qual uma criatura está unida às outras, e todas as partes do mundo constituem um só mundo."

4 — A LÓGICA FORMAL E OS CÓDIGOS DE FUNDAÇÕES

A reformulação dos Regulamentos de Fundações é tarefa que actualmente se afigura de primordial importância. Na Europa encontra-se em pleno desenvolvimento com a elaboração dos Eurocodes. Estes, como é sabido, contêm uma matriz de preceitos comuns que deverão ser respeitados pelos países da CEE e neles encastarão os preceitos regulamentares atinentes a cada país, obviamente de cariz regional.

É interessante observar como os preceitos da lógica moderna (empirismo lógico — Escola de Viena) estiveram implícitos na elaboração dos Códigos de Fundações existentes e como, tudo leva a crê-lo, teriam beneficiado esses Códigos se os ditos preceitos (obviamente a partir da data em que ficaram disponíveis — década de 30) tivessem sido *explicitamente* usados na sua elaboração.

Considere-se um código primitivo, seja por exemplo o Código da cidade de New York de 1905. A cada classe de terreno fez-se corresponder uma capacidade de carga — grandeza complexa que inclui tensão de ruptura e tensão limite de assentamento admissível. É evidente que este acoplamento foi obtido por tentativas com êxitos e insucessos para diversos locais ensaiados. O acoplamento "classe de terreno-capacidade de carga" é obviamente uma comparação do 2.º nível. Com efeito a indicação era dada para terrenos geologicamente similares e a indicação era restrita a uma formação geológica pouco extensa e de espessura reduzida. É de crer que teria havido benefício no processo se os princípios da lógica formal tivessem sido levados em conta, pois a consciência das limitações teria sido mais clara, sobretudo tornando evidente que o Código só tinha validade local.

Entre o início do século XX e a década de 40 verificaram-se grandes progressos na Mecânica dos Solos. Desenvolveram-se e esclareceu-se a interpretação dos ensaios de carga; aperfeiçoaram-se e ganhou-se consciência acerca de ensaios de laboratório. Isso permitiu que as indicações de capacidade de cargas atribuídas a cada terreno transcendessem o âmbito local, pois as características mecânicas de certos solos (argilas terciárias de Boston, de Londres, de Lisboa) mostraram que elas podiam ser assimiladas. Elaborou-se assim um Código em que os acoplamentos constituíam comparações de 3.º nível — o Código de Boston de 1944, talvez o primeiro dessa categoria. A classificação é obviamente de 3.º nível pois que nenhuma suposição apriorística foi feita acerca dos classificandos.

É de se notar que para se elaborar melhores códigos teve-se de recorrer aos aperfeiçoamentos experimentais e interpretativos contidos nos ensaios laboratoriais edométricos, de corte, triaxiais, etc., e às informações fornecidas pelos ensaios SPT, CPT, "vane-test", pressiométrico, etc. Todos eles requereram esforços intensos levados a cabo a partir da década de 40.

Para o caso destes Códigos mais recentes torna-se aparente que poderia ter havido vantagem na utilização dos preceitos do empirismo lógico, embora nenhum Autor revele que a ele recorreu.

Como se deduz do que nas generalidades ficou exposto, uma das mais perigosas e frequentes infracções que nas disciplinas técnicas se pratica em relação às regras da lógica é a falácia de afirmação do consequente. Como é fácil de constatar em nenhum Código de Fundações, nem nos de 2.º nível, nem nos de 3.º nível, se cai nesse erro. Não por se ter tido consciência da falácia, mas como consequência da aplicação do simples bom senso. Com efeito, a ninguém lembraria tomando, por exemplo, a carga admissível numa formação, daí pretender concluir sobre sua classificação geológica (e nem mesmo geotécnica).

Mas já no que se refere às propriedades de abrangência e excludência tem de ser meditada a forma como podem elas ser respeitadas nos Códigos de Fundações. A este respeito é de

recordar o que já atrás se disse. Ficou dito "o princípio da excludência não proíbe que objectos de propriedades diferentes possam estar na mesma classe". É o que acontece, por exemplo com "argilas brandas" e "areias soltas" que se situam na mesma classe numa classificação por "capacidades de carga". Seria inadmissível, mas de facto isso não acontece que, por exemplo, as "argilas brandas" fossem classificadas em duas diferentes classes de "capacidade de carga". Para a propriedade de excludência ser respeitada é necessário que a um dado solo só possa ser atribuída uma dada capacidade de carga. Examinando, por exemplo, o Code of Practice n.º 4 (1954) "Foundations" da Institution of Civil Engineers constata-se que para "hard clay with shaly structure" se admite uma capacidade de carga que vai até 6 kg/cm²; mas aos "clay shales" é atribuída uma capacidade de carga de 10 kg/cm². Se se atentar a que a diferença entre esses dois tipos de solo é tão diminuta que a maior parte dos geotécnicos os levará a tomar como sendo o mesmo solo, vê-se que é possível que se tenha cometido aqui uma infracção, embora não grave, ao princípio de excludência.

Em resumo, embora não se possa afirmar que os Códigos de Fundações tenham sido prejudicados por não terem sido elaborados com apoio em estudo específico da sua estrutura lógica, é provável que algo beneficiassem se fossem revistos à luz da Lógica e dos princípios que regem as classificações.

5 — CONCLUSÃO

A conclusão básica pretendida por este artigo é mostrar como a Lógica e conceitos da Epistemologia, aparentemente tão distantes do campo técnico, podem ser usados com grande proveito na análise de problemas ligados à Engenharia e em particular à Geotecnia. As aplicações aqui indicadas são as mais imediatas e mais simples e devem ser encaradas apenas como primeiros exemplos de uma análise mais ampla e como primeira visualização de um caminho mais longo a ser explorado, é de admitir, com grande proveito para o desenvolvimento tecnológico.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM (1983a) — *Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes*. ASTM D 2487-69 (reapproved 1975).
- ASTM (1983b) — *Standard Recommended Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. ASTM D 3282-73 (reapproved 1978).
- FOLQUE, J. (1985) — *Códigos de Fundações*. 1.º Encontro Nacional de Geotecnia (Geotecnia em obras nas áreas urbanas), Vol. 1, pp IV-1 a IV-7, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa.
- POPPER, K. R. (1972) — *Conhecimento Objectivo*. Ed. da Universidade de São Paulo, Ed. Itatiaia Ltda. 394 pp. São Paulo.
- SKEMPTON, A. W. (1953) — *The Colloidal "Activity" of Clays*, Proceedings 3rd Internatl. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg., pp. 57-61, Zurich.
- SORIA, M. H. A. (1985) — *Reflexões Lógicas sobre Classificações de Solos*, tese de doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 209 pp. São Carlos.