

Importância Prática do Coeficiente de Permeabilidade, seu Papel em Geral Particularmente na Hidrogeologia e sua Determinação pelo Método de Campo Thiem - Wenzel

PROF. JOSÉ DE CARVALHO LOPES

Eng. Civil e de Minas.

(M.G.).

RESUMO

Apresentação

A monografia que ora apresentamos deveria ser publicada como "anexo" ao relatório da "Comissão Investigadora das causas da ruptura da Barra da Pampulha", Belo Horizonte,⁽¹⁾ nomeada por decreto municipal pelo saudoso Prefeito Américo Giannetti, por ocasião do lamentável acidente que privou a jovem e linda Capital Mineira de um de seus mais belos ornamentos. O relatório em causa figura como separata da Publicação n.º 529, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. A não inclusão do citado "anexo" se deveu ao fato do conseqüente coeficiente de permeabilidade ser considerado excessivamente elevado pelos especialistas em "Mecânica dos Solos", que integravam a Comissão. A contestação só poderia basear-se na apreensão de amostras indeformadas de diâmetro conveniente para determinações, no laboratório, do coeficiente de permeabilidade. Tal apreensão se mostrou impraticável, o que até certo ponto confirma a elevada permeabilidade do material atravessado. Diante disto, o autor do projeto da nova estrutura resolveu proceder a experiências, mais grosseiras e expeditas, verificando pelo menos a ordem de grandeza do coeficiente. Foi adotado o método de campo, pelo potencial, isto é, praticado um poço, bombeia-se ou se introduz água, anotando o tempo do restabelecimento do nível primitivo. A fórmula a empregar é, o que será fácil deduzir-se:

$$K = 1,8r_0 \frac{\log \frac{h_1}{h_2}}{t_2 - t_1}$$

r_0 sendo o raio interno do tubo de revestimento, h os desníveis e t os tempos respectivos.

Este método "expedito" figura no excelente e conhecidíssimo "Manual Davis" (segunda edição — Mac Graw — pág. 191 — "Field Permeability Tests") o curioso sendo que não indica o mesmo as unidades, sem importância para os h , cuja relação é evidentemente adimensional mas necessárias para K e t . Não nos resta dúvida que r representa pés e t exprime segundos.

Os resultados, segundo comunicação verbal do Eng.º Mário Brand, se mostraram ligeiramente inferiores aos obtidos pelo método de Thiem.

(1) Desta comissão fizeram parte: prof. Milton Vargas (Presidente), prof. A. J. da Costa Nunes, prof. Lincoln Continentino, eng. Dante Federico e o autor do presente trabalho.

Uma última e definitiva confirmação foi verificada na operação de rebaixamento do freático, para fins operacionais, trabalho executado pela Estacas Franki Ltda. e supervisionado pela Sondotécnica Ltda.

Ficam assim comprovados mais de uma vez os excelentes resultados da aplicação do método de Thiem, pela primeira vez executado na América Latina. Lamentamos, tão somente, que a excelente oportunidade se nos tenha oferecido em consequência dum lamentável acidente, que, como acima explicamos, privou o belo-horizontino do seu mais importante centro de atração, hoje, felizmente restabelecido.

A importância do elemento hidrológico em pauta é sintetizada numa ousada epigrafe de tese recente para concurso de catedrático:

"O complexo Argila-Areia se nos afigura "mágica esponja" cuja função reguladora possibilita a vida na crosta da terra".

E o que regula estas complicadas e por vèzes indecifráveis funções senão o nosso K e seus conexos, coeficientes de "retenção" e "cessão" específicas?

Procurando esclarecer mais, nosso trabalho vai encimado por um quadro que submetemos à análise, críticas e modificações dos especialistas.

QUADRO SINTÉTICO DAS APLICAÇÕES

DO

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

| | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---|-----------------|----------|---|-----------------------------------------|
| K para Aplicações do Coeficiente Permeabilidade | 1) — Abastecimento por água subterrânea: arma fundamental. | | | | | | | | |
| | 2) — Sancamento de regiões, dessecamento de todos os tipos. | | | | | | | | |
| | 3) — Drenagem de tôdas as classes, espaçamentos e dimensões de drenos, determinação das vazões. | | | | | | | | |
| | 4) — Irrigação | { | das bacias imbríferas: fundamento dos controles hídricos dos aquíferos subterrâneos nos corpos de barragens de terra do subsolo de barragens em geral, fundamento geotécnico | | | | | | |
| | 5) — Grandes barragens | { | No contrôle das infiltrações e assoreamento das bacias. No contrôle dos corpos das estruturas, porejamento de materiais vários. Na mecânica dos solos — fundações, etc. | | | | | | |
| | 6) — Geologia-Hidrogeologia Circulação Subterrânea | { | águas: mineral e potável petróleo e associados Outras substâncias | | | | | | |
| | 7) — Indústria | { | Produtos gerais, cerâmicas, materiais etc. Produtos sanitários — filtros, tubos, etc. Controles gerais de estanqueidade Esgotamento das minas Sub-bases ferro e litoviárias | | | | | | |
| | 8) — Técnica da filtração. Base para a classificação dos filtros | { | <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="vertical-align: top;">Artificiais</td> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td style="vertical-align: top;">Lento Rápido</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;">Naturais</td> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td style="vertical-align: top;">Cascalho natural Cascalho artificial</td> </tr> </table> | Artificiais | { | Lento Rápido | Naturais | { | Cascalho natural Cascalho artificial |
| | Artificiais | { | Lento Rápido | | | | | | |
| | Naturais | { | Cascalho natural Cascalho artificial | | | | | | |
| 9) — Silvicultura — relação água — floresta | | | | | | | | | |
| 10) — Verificação dos métodos de Laboratório | | | | | | | | | |

O método foi estabelecido por A. Thiem, notável hidrogeólogo alemão. Em 1906, seu filho George Thiem aperfeiçoou o, aplicando-o no abastecimento d'água

de Praga, como técnica básica para o racional aproveitamento das reservas hídricas daquela capital. Muito mais tarde, o hidrogeólogo norte-americano Leland K. Wenzel, inspirando-se na famosa obra, resultado das observações de Thiem em 10 grupos de poços em Praga e subúrbios (Hydrologische Methoden, George Thiem, Leipzig — 1906), submenteu o método a rigorosa verificação, em local adequado,, perto de Grand Island, Nebraska, em 1931. Havia, na região, grande número de poços para irrigação, de modo que se tornaram seguras as observações. Surgiu a excelente monografia, do Departamento do Interior dos Estados Unidos (Water Supply Paper 679-A: The Thiem Method for Determining Permeability of Water-Bearing Materials and its Application to the Determination of Specific Yield). Foi, pois, como dissemos, o método posto à prova em dois testes executados em Grand Island, Nebraska, mediante colaboração entre técnicos do U.S. Geological Survey, professores e assistentes da Universidade de Nebraska, tendo sido em número de 81 os poços de observação (observation wells). Havia o temor de que, sendo muito variáveis as características de permeabilidade dos terrenos naturais (e isto ocorre no subsolo da Pampulha), discutíveis seriam os resultados obtidos. Tal, porém, não se dá uma vez aplicado o método racionalmente, com prudência e bem determinadas as camadas estratigráficas em estudo, agindo-se com bom senso e as preocupações que a delicadeza de tais estudos exige. Transcrevemos da citada obra alguns trechos esclarecedores: "A study of the data obtained from these tests indicates that the Thiem method is applicable to the condition that are found in nature". Mais adiante, no capítulo "Confirmation of Thiem's formula from other Work done in the United States", Wenzel enumera uma série de trabalhos em que a aplicação do método deu bons resultados. Outro não é nosso intuito, com tais citações, senão procurar provar que o método proposto não constitui teórica divagação, como poderia a muitos parecer, mas apresenta resultados práticos dignos de monta. Os métodos de laboratório se bem que indispensáveis e valiosos, não são exclusivos, e devem, tanto quanto possível, ser confrontados com os de campo. Da citada obra ainda transcrevemos: "The laboratory methods are open to the criticism that the coefficients of permeability of the samples tested may differ widely from the average coefficient of the materials as found in nature. The material that is tested in laboratory must necessarily be removed from the ground, and as a result, especially with the more in consolidated material, the soil particles do not remain in their original arrangement, etc."

Não devemos avivar a velha querela entre laboratório e campo. Ambos são indispensáveis e se completam. Nos Estados Unidos os laboratory-men e os "field-men" terminaram dando-se os braços, numa proveitosa colaboração.

Apenas diremos que no caso presente o Laboratório e o Campo se verificaram mutuamente, pois as determinações do Coeficiente de Cessão Específica (Specific Yield), para cuja solução o método se presta, resultaram no que segue:

"Samples of the material were analysed in Laboratory for Specific Yield, and the results obtained compared favorably with those determined by the pumping Method" (Wenzel, opus citatus). Voltaremos mais tarde a este assunto.

Consiste o método de Thiem em efetuar o bombeamento de um poço central e observar a queda do lençol em dois poços secundários (chamados de observação). O coeficiente de permeabilidade será dado pela fórmula:

$$K = \frac{527,7 \cdot q \cdot \log \frac{r_1}{r}}{m (s - s_1)} \quad (1)$$

que é a fórmula original então empregada por Wenzel, na qual:

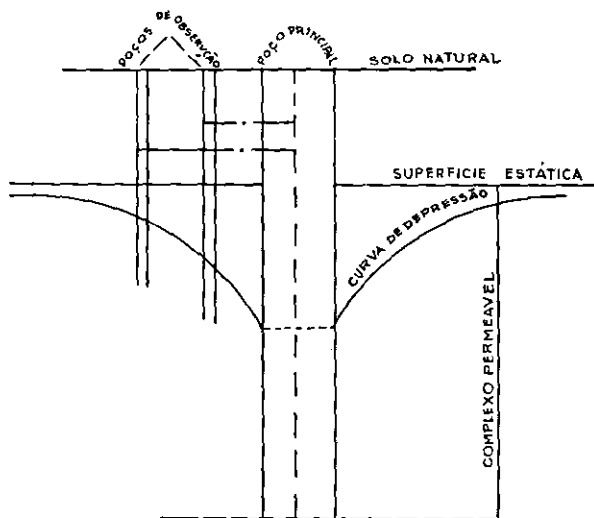
q = vazão em galões por minuto

r e r₁ as distâncias horinzatais dos poços de observação ao central, em pés.

s e s₁ as respectivas quedas dinâmicas (de bombeamento) nos poços de observação, em pés.

m a espessura média do meio filtrante entre r e r₁

P será expresso em galões americanos por dia, através de um pé quadrado de secção sob o gradiente 100% e 60° Fahrenheit.



PREPARO DA FÓRMULA A SER EMPREGADA

Ao invés de aplicarmos diretamente a fórmula de Thiem, adaptada por Wenzel (fórmula 1) preferiremos, no caso presente, seguir Creager-Justin (Engineering For Dams — 1945), autores familiarizados com o tipo de barragem em vista, (Vol. III — pág. 652) que apresentam a fórmula:

$$K = \frac{q \cdot \log \frac{r_1}{r}}{20,4m (s - s_1)} \quad (2)$$

as unidades dos dados sendo as mesmas da fórmula (1), apenas K expresso agora em pés por minuto. Como se sabe, K, é definido sob dois aspectos: duma vazão por determinada área e duma velocidade, que é a sua dimensão. Nos dois casos teremos, respectivamente:

1) Vazão em pés cúbicos por minuto através de um pé quadrado sob a declividade 100% e 54° F (fórmula 2).

2) Velocidade em pés por minuto, sob declividade — 100% e 54° F.

Exprimindo a fórmula em unidades métricas, após as transformações necessárias, obtivemos a cômoda expressão de K em centímetros por segundo:

$$K = 36,6 \cdot q \cdot \frac{\log \frac{r_1}{r}}{m (s - s_1)} \cdot 10^{-2} \frac{\text{centímetro}}{\text{segundo}}$$

em que:

q = litros por segundo

m e s em metros

obtendo-se K em centímetros por segundo, de acôrdo com as unidades usuais em Geotécnica, o que facilitará a consulta a tabelas como a de Greager (opus citatus, vol. III, pág. 649), que relaciona permeabilidade com granulometria.

Feitos os poços centrais e dispondo em várias orientações os secundários (p da fig. 2) ter-se-á idéia da distribuição dos coeficientes, seja da permeabilidade no bloco, hidrosubterrâneo (complexo argila-areia), indiretamente, uma noção granulométrica, uma vez comparados os valores obtidos no campo e numa tabela correlacionando êsses elementos com a escala granulométrica adotada, como a supra-citada de Creager.

Foi encarregado dos trabalhos de campo o engenheiro de Minas e Civil Haroldo Zeferino Silva, então Diretor da Secção de Águas Subterrâneas da Prefeitura da Capital. Foi trabalho árduo e metucioso, executado pela vez primeira, ao que se nos afigura, em nosso país e provavelmente na América do Sul, constituindo processo caro e moroso, que os técnicos indígenas têm pouca oportunidade de executar. Sòmente um caso grave como o da Pampulha, nos brindou com tão útil instrumento. Foi impregada uma das quatro perfuratrizes Star-71, da Prefeitura. Os poços auxiliares foram executados pela turma de Mecânica dos Solos (DER), com a supervisão do colega Dante Federico.

Os geotécnicos da Comissão ficaram "chocados" (que se me perdoe a expressão) com os resultados obtidos, da ordem de

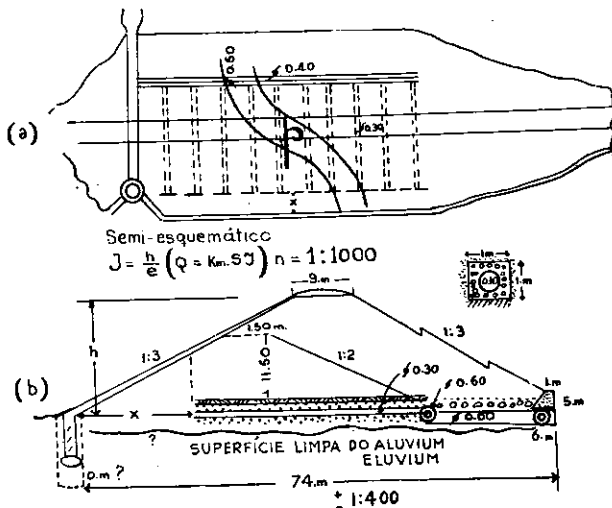
$$K = 4.10^{-4} \text{ centímetros por segundo, seja}$$

$$K = 4.10^{-3} \text{ milímetros por segundo}$$

correspondendo a arcia fina ou silt muito grosso.

Se, na realidade, o número obtido é elevado, temos a considerar que o ponto de vista firmado é o da Mecânica dos Solos, quando as operações realizadas dizem mais respeito à hidrogeologia, tendo em vista o aproveitamento dos lençóis subterrâneos. Isto equivale, em verdade, como disseram os geotécnicos, a considerar o material analisado como areia para filtro. Efetivamente, o coeficiente médio calculado se aproxima do referente a "filtro lento", como tal se comportando geralmente os escoamentos hidrosubterrâneos do tipo freático.

O método de Thiem só tem sentido interpretável quando associado à coluna estratigráfica. Citamos um exemplo concreto. Admitamos um subsolo de zero (solo natural) a — 20 m de argila de elevada impermeabilidade, praticamente impermeável. De — 20 a — 40 m de areia grossa e cascalho formando um conjunto altamente permeável, ambas as camadas saturadas, o filtro sendo completo. Torna-se claro que o coeficiente calculado se refere quase 100% à camada inferior, sendo desprezível a influência da superior, que agiria como infinitamente pequeno de ordem superior. Ora, a coluna estratigráfica de nossos subsolos cristalinos associados aos gnais compreende como vimos no texto (2), superiormente, o que chamamos "lage argilosa natural", geralmente regular suporte de estruturas maciças de terra ou outro material detritico. Em geral alguns metros de espécie de taba-



ting (argila caolínica), também excelente sêlo do lençol freático, constituindo garantia de potabilidade da água freática, se bem estabelecido o filtro subterrâneo. Considerando o talvegue, o gráfico de penetração do furo n. 9 (fig. 3) é a nosso ver, bastante expressivo.

Mostra êle que a camada impermeável em vista é muito fraca no subsolo da barragem da Pampulha, de poucos metros, no caso 4 a 5. Tão fraca foi que os drenos críticos, já em seu seio, promoveram ruptura em alguns pontos fracos, provocando a já descrita comunicação das exageradas infiltrações do maciço, com o freático subjacente. No F 9 (v. gráfico n. 3), os índices de penetração crescem súbitamente na citada zona (achuras verticais, formando um trapézio), em 4m, em seguida caindo violentamente (achuras inclinadas) no complexo areia-argila, em cerca de 5m a 6m, subindo em seguida num bloco de mais ou menos 2m, fazendo um "dente" no intervalo bloco-arcia grossa, readquirindo o valor maior e o conservando uniformemente até o "bed-rock", que sômente aparece lá pelos quarenta e poucos metros, até onde mantém uniformemente o índice 10 (zona não achurada). Conclui-se que a zona coberta pelo método de Thiem é de —20 para baixo (cota do perfil, a partir do piso da crista da barragem). Acontece, todavia, e o fato é de máxima importância, que os dois furos centrais praticados no atual solo do corredor de rutura não encontram praticamente a camada argilosa superior, como o mostram as colunas estratigráficas do relatório Haroldo Zeferino. Apesar disto não se perfurou o tubo-filtro acima de —10m.

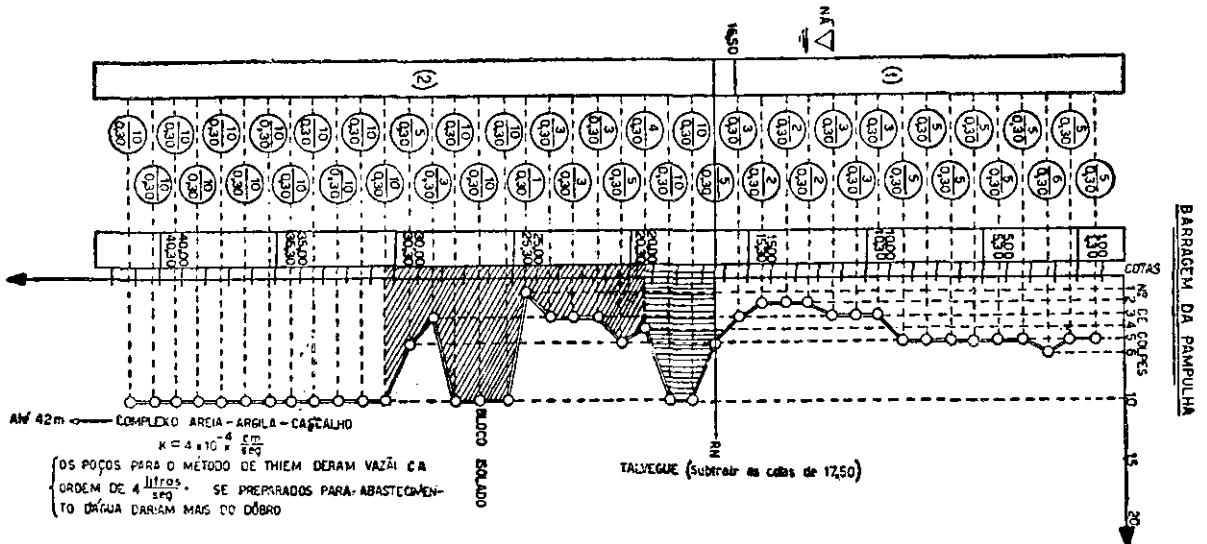


Fig. 3

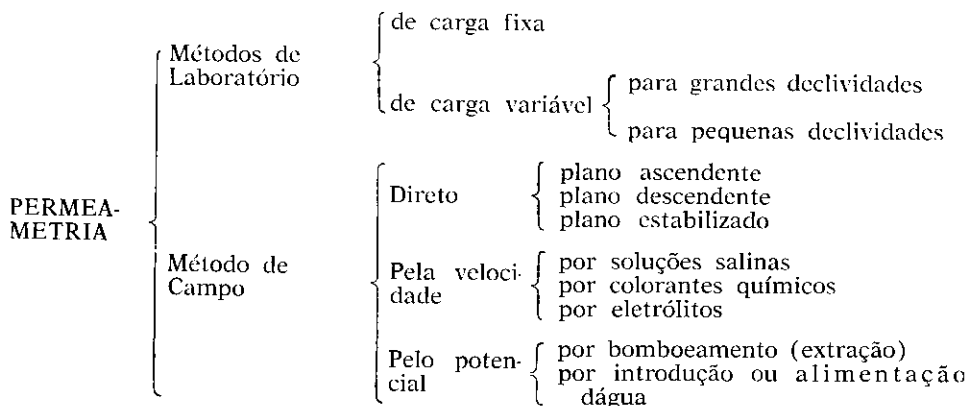
Em resumo, o coeficiente de permeabilidade calculado se refere a um "complexo médio argila-areia-cascalho" realmente de elevada permeabilidade, nada havendo, a nosso ver, salvo melhor juízo, de estranhável.

Para reforçar o argumento supra registremos que as vazões dos poços centrais são apreciáveis, elevadas mesmo, se considerarmos a finalidade dos poços. Nos dois locais, convenientemente preparados os poços com o objetivo do aproveitamento dos lençóis subterrâneos, freático e cativo, teríamos produção da ordem de um milhão de litros em 24 horas, segundo o que nossa experiência no assunto deduz de subsolos semelhantes.

Outro forte argumento em prol da elevada permeabilidade conseqüente dos cálculos vem a ser a impossibilidade da turma geotécnica apreender amostras nas zonas em vista. Segundo informou-nos o eng.º Dante Federico, não se conseguiu uma só amostra, por mais esforços que se empregassem. Desapareceu, pois, o

meio direto de contróle dos resultados obtidos, com a comparação entre o Laboratório e o Campo. O melhor processo que conhecemos para apreensão de testemunhos de areia grossa ou mesmo fina saturada, consiste em provocar o congelamento da base do barrilete, por meio de instalação frigorífica especial (vimos isto descrito em um número de Engineering News Record).

Finalmente procuremos enquadrar o Método de Thiem-Wenzel num esquema que associe, classificando, os vários métodos de determinação do coeficiente de permeabilidade.



Não caberia, nos estreitos limites do presente trabalho, particularizar todos os métodos supra. Temos usado todos, com especialidade os de carga variável, com cujo aparelho, de nossa própria construção, já obtivemos centenas de valores. Algumas vezes empregamos o da velocidade pela solução salina de NaCl, para contróle do método.

Dentre os métodos diretos, usados por sua simplicidade, em operações comuns de sondagem, o do plano ascendente é o mais utilizado e nele o bombeamento é operado pela própria bomba de limpeza da perfuratriz ("dart-sand pump" ou "vacuum sand pump") nos canteiros de perfuração de poços.

O de "plano descendente", no qual se provoca a elevação no nível d'água dentro do poço acima do nível estático, por bombeamento, observando-se a descensão, é o preferível quando há possibilidade de entupimento pelo material sólido do aquífero (areias, argilas, cascalhos). Evita-se, assim, ou diminui-se de muito, a intrusão do material sólido pelo fundo do revestimento. O mecanismo da causa é fácil de compreender-se. A fórmula a empregar-se, para a determinação de K, é a mesma indicada no começo deste trabalho.

O método direto do "plano estabilizado" consiste no manter "um nível estacionário", mais elevado que o estático (por introdução d'água dentro do poço) ou mais baixo que o mesmo (por bombeamento), resultando duas sub-variantes: a do "plano estacionário positivo" e a do "plano estacionário negativo". Sendo q a vazão de "equilíbrio" (de alimentação no primeiro caso e de extração no segundo) e r o raio interno do tubo de revestimento do poço, teremos:

$$K = (0,25 \rightarrow 0,50) \frac{q}{r \cdot h}$$

h sendo a "altura de equilíbrio" obtida, em relação ao nível estático. Ainda aqui Davis (opus citatus) silencia no tocante às unidades dos elementos da fórmula. Não temos, porém, dúvida de que a mesma deriva-se da expressão de Darcy aplicada no caso:

$$(1) \quad K S J = K \cdot 2\pi r_0 \cdot h = q$$

donde

$$(2) \quad K = \frac{1}{2\pi} \times \frac{q}{r_0 \cdot xh} = 0,16 \frac{q}{r_0 h}$$

Como K é de dimensão LT^{-1} , p.^a passar de m p.^a pé teremos

$$K = \frac{3,28}{2\pi} \times \frac{q}{r_0 h} = 0,52 \frac{q}{r_0 h}$$

e recairíamos no limite superior da fórmula já vista:

$$K = (0,25 \rightarrow 0,50) \frac{q}{r_0 h}$$

mas os elementos ainda continuam métricos. Na realidade, o coeficiente 0,16, que acarretará um K fraco (inf. ao mín. 0,25), deriva de termos suposto $J = 1$, digamos 100%, o que nem sempre se verificaria na prática, donde a correção empírica de DAVIS, derivada certamente de dados práticos ou de laboratório experimental, porém sob o pecado em que Davis comumente incorre em seu extraordinário Manual, da abstração das unidades. Haveria, numa página qualquer, particularmente no início do volume, alguma convenção sobre unidades? — Não o encontramos; mas o volume é muito grande...

Finalmente, o último termo de nosso quadro-classificação, referente aos métodos de Campo pelo Potencial, é o mais preciso e conveniente, sendo o adotado no presente trabalho.

BIBLIOGRAFIA :

- 1 — Creager (W), Justin (J) e Hinds (J) — Engineering For Dams — J. Wiley — 945. III v.
- 2 — Lopes (J. Carvalho) — Hidrogeologia e Aspectos Brasileiros da sua Aplicação — Optimus Studius. F. Calvo — Belo Horizonte — 1957.
- 3 — Davis (C.V.) — Handbook of Applied Hydraulics — 2.º ed. — Mc Graw 1952.
- 4) — Tolman (C.F.) — Ground Water — Mc Graw — 1957.
- 5 — Taveira (A.S.) — Permeabilidade dos Materiais Aquíferos e sua Determinação — Tese de Doutorado — 1949. Universidade do Porto.