CLOVIS BOSSOLAN SARAVALLE

**CORRENTES NATURAIS EM OBRAS
DE ENGENHARIA CIVIL (Barragens)**

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005608

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de Geociências
da Universidade de São Paulo.

SÃO PAULO
1973

ÍNDICE

	página
1 - Introdução	1
2 - Vazamentos no maciço	3
2.1 - Vazamentos no corpo da barragem	3
2.1 - Vazamentos através da Fundação das barragens	5
3 - Vazamentos no substrato	6
4 - O método do Potencial Espontâneo	15
4.1 - Histórico	15
4.2 - Condições básicas	16
4.3 - Equipamento e procedimento de campo	18
4.4 - Interpretação dos resultados	20
5 - Desenvolvimento do método em laboratório	21
5.1 Bases teóricas	21
5.2 Ensaios em laboratório	25
6 - Aplicação do método no campo	33
6.1. Trabalhos Anteriores	33
6.1.1 Barragem de Saracuruna	33
6.1.2 Barragem do Rio Juqueri	37
6.2 Trabalhos de Campo Realizados	38
6.2.1 Barragem de Saracuruna	38
6.2.2 Barragem do Rio Juqueri	51
7 - Conclusões	53
8 - Resumo	54
9 - Agradecimentos	55
10 - Bibliografia	55

1 - Introdução

O presente trabalho teve a finalidade de estudar os métodos para a localização de vazamentos de água em barragens, principalmente os vazamentos no substrato, aplicando-se o método geofísico, elétrico, chamado Potencial Espontâneo. São apresentados também na parte inicial deste estudo as diferentes possibilidades de vazamentos, que são no substrato, maciço e/ou nos limites entre maciço e substrato.

Chugaev (1971) considera que: "Há dois tipos de percolação: as permissíveis que não são perigosas se são tomadas certas medidas de precaução, e as impermissíveis que sempre são perigosas para a estabilidade do maciço de terra ou concreto.

A percolação impermissível ocorre em barragens de terra e fundações não rochosas de barragens de concreto, que são frequentemente destruídas, devido aos caminhos de percolação no solo serem concentrados casualmente em alguns pontos. Estes caminhos podem ocorrer quando o método admitido de assentamento do solo não é seguido, tanto que a extensão da percolação torna-se pequena comparada com a altura do topo da estrutura. Podem também ser devidos à falhas na construção".

A percolação d'água em barragens e reservatórios obedece a Lei de Darcy, de acordo com Pichler (1956): "O bom conhecimento da Lei de Darcy se aplica a todos os casos de percolação lenta de água pelos interstícios do solo ou formação geológica. Afirma esta lei que a razão do fluxo é diretamente proporcional à permeabilidade do material pelo qual a água escôa, a área da secção transversal pela qual este escoamento se processa e o gradiente hidráulico. Se este fluxo subterrâneo passa por cavernas ou fendas lar-

gas, a lei do fluxo mais se aproxima à das correntes da superfície."

A percolação sendo função da permeabilidade, dependerá evidentemente da porosidade da rocha em questão. Segundo Pichler (1956): "pode a percolação resultar de porosidade geral ou de porosidade localizada. A porosidade geral é encontrada em pedregulhos, areias, siltes, algumas argilas, arenitos, certos tipos de rochas vulcânicas, granitos e gnaisses - profundamente alterados. A porosidade localizada ocorre em juntas e fissuras em folhelhos, ardósias e rochas cristalinas".

A percolação d'água através de barragens, na sua fundação e no substrato, quando consideradas como percolação normal (ou permissível) obedecem às leis de percolação normal nos solos, que controlam essa percolação.

Quando a percolação normal é excedida, torna-se do tipo impermissível, ocasionando os vazamentos.

Vazamentos de água consideráveis em reservatórios tornam difícil atingir a capacidade de armazenamento planejada. Em alguns casos os vazamentos provocam inundações catastróficas. Estas catástrofes se devem à erosão originada pelos vazamentos, erosão esta que pode causar subsidência, e portanto colapso da barragem, quando a concentração de fluxos d'água em terrenos inconsolidados naturais e artificiais atingem valores críticos. A maior razão das catástrofes são as áreas de vazamentos concentradas não descobertas no devido tempo.

O método do Potencial Espontâneo permite localizar estas áreas críticas tendo sido teoricamente estudado em laboratório com modelos redu

zidos e experimentado no campo, nas barragens de Saracuruna (RJ) e Juqueri, esta última, do Sistema Cantareira (COMASP), em Mairiporã, Estado de São Paulo, pela primeira vez no Brasil, fornecendo resultados previstos conforme as deduções teóricas.

2 - Vazamentos no maciço

Os vazamentos no maciço podem ocorrer através do corpo da barragem e através de sua fundação.

a - Vazamentos no corpo da barragem

Os vazamentos no corpo da barragem podem ocorrer através das seguintes estruturas, conforme bibliografia especializada e exemplos de barragens descritos neste trabalho: drenos, tubos, tubos de drenagem, cortina de montante, maciço de terra insuficientemente compactada, maciço de material homogêneo arenoso, maciço rico em argila, diafragma e juntas de dilatação.

Milton Vargas e outros (1955) relata as diferentes partes no corpo da barragem por onde pode haver percolação, indicando as estruturas possíveis de caminhamento d'água:

"Considerações sobre as condições de percolação através da barragem: a - influência do dreno de jusante; b - influência dos tubos de drenagem; c - influência da cortina de montante; d - influência da compactação das camadas".

"A Compactação insuficiente que se constatou no material do corpo da barragem contribui para um aumento da permeabilidade da mesma, e consequentemente, um aumento da velocidade de infiltração, fazendo crescer a

probabilidade de ocorrência dos fenômenos de vazamentos e ruptura.

Como o material é mais facilmente erodível quando a compactação é menos intensa, conclui-se que um defeito de compactação tem dobrada importância na diminuição do coeficiente de segurança da barragem contra a infiltração exagerada e a erosão subterrânea de tipo de "entubamento". No caso da Pampulha os ensaios demonstram que havia deficiência de compactação no corpo da barragem".

Estas considerações acima referem-se à Ruptura da Barragem de Pampulha que ocorreu em 19 de maio de 1954, em Belo Horizonte, M.G.

J.A. Martins (1961) considera em relação ao maciço: "Do material a ser aplicado, da proporção entre a base e a altura, dependerá a infiltração através do maciço da barragem e esta determinará a possibilidade ou não da construção.

A percolação nos maciços das barragens de terra pode ocorrer quando o material homogêneo do maciço é arenoso e então a permeabilidade é excessiva, ou quando é rico em argila com o perigo de fendilamentos devido as alternâncias de umidade e secura.

No tipo de barragem de terra Chamado "americano", o núcleo central é substituído por diafragma, geralmente de concreto armado, para se rebaixar a linha de saturação. A percolação pode ocorrer neste tipo de barragem através do diafragma devido ao fato de este acompanhar o processo, geralmente longo, de acomodações da terra, vindo a sofrer lesões posteriores".

(Fig. 1)

E. Fortes de Oliveira e outros (1966), no trabalho

Fig. 1 . (seg. J.A. Martins, 1961)

"Estudo de Percolação em Fundações de Barragens por meio de percolação isótopos radioativos", constataram de água através das juntas de dilatação e através dos drenos da Barragem de Barra Bonita. Isto nos leva à conclusão de que se há caminhamentos preferenciais da água pelas juntas e drenos, o vazamento poderá ocorrer também através dessas estruturas no maciço da barragem.

b - Vazamentos através da Fundação das Barragens

Em terrenos permeáveis onde se pretende construir barragens, o material da fundação deverá ser o mais impermeável possível para se evitar fugas perigosas.

J.A. Martins (1961) apresentando soluções como diâfragmas, lençol impermeável e drenos para vazamentos em fundações de barragens, considera - que: "Se a barragem tiver que ser erguida em terreno não impermeável, deve -

rá ser devidamente considerada a infiltração sob a fundação, infiltração essa acentuadamente aumentada, considerada a carga razoável que se virá obter por efeito da acumulação. Tal infiltração sendo excessiva virá provocar o aparecimento de empuxos de água a jusante, assim como o arrastamento de material da fundação".

O material para fundação das barragens deve ser escolhido em relação à sua permeabilidade conforme Riuiti Yoshida e outros (1972), que trabalhou em estudos geológicos para a implantação de Barragens no médio São Francisco. Estudando os arenitos da Formação das Vazantes, chegou à seguinte conclusão: "Os sedimentos predominantemente arenosos da Formação das Vazantes apresentam características de alta permeabilidade e espessuras da ordem de 20 metros, que poderão comprometer - los como material de fundação."

3 - Vazamentos no substrato

Os vazamentos no substrato podem ocorrer em qualquer tipo de rocha. Há autores que classificam os vazamentos no substrato baseados nos três tipos de rochas, ígneas, metamórficas e sedimentares e suas estruturas. Outros levam em consideração a configuração do Reservatório (L.C. - Glenn . 1929).

Com frequência na bibliografia especializada em barragens e vazamentos citam-se as estruturas das rochas como causa destes últimos: fraturas, diaclases, fissuras, juntas, vesículas, falhas, contatos, planos de acamamento, planos de xistosidade, dobras, camadas horizontais, camadas mergulhando para jusante, discordâncias e zonas de cisalhamento.

Além destes, outros fatores como alteração das rochas, estruturas cársticas em calcários e rochas solúveis (cavernas, dolinas, cavidades, canais de solução), cascalhos, arenitos, folhelhos e siltitos de alta permeabilidade, depósitos glaciais e aluvionais de pedregulhos, nascentes de água no Reservatório, sumidouros, brecha de falha, formações morráinicas, gargantas encobertas subjacentes ao reservatório (mesmo distantes da barragem), rochas vulcânicas porosas, solo residual, veios, diques e pegmatitos são causas de percolação excessiva, e conseqüentemente, de vazamentos no substrato.

Ernesto Pichler (1958) a respeito das rochas no substrato e na fundação de barragens conclui que: "Grosso modo, devem ser considerados três grupos de rochas - ígneas, metamórficas e sedimentares. Nas rochas - ígneas além das juntas podem existir falhas. Uma falha pode ser também decisiva para o insucesso de uma obra, desde que não seja estudada e tratada convenientemente.

Os basaltos podem aparentar na superfície qualidade excelente e passar em pequena profundidade a uma forma de alteração de reduzida resistência e alta permeabilidade."

Esse fato se deve provavelmente à existência de diversos derrames, onde haveria abaixo de uma rocha de boa qualidade, uma outra diaclasada ou vesicular, acarretando o aumento da permeabilidade.

" O máximo cuidado exige também, nessas rochas, o estudo dos contatos, ao longo dos quais a alteração da rocha básica é geralmente bastante pronunciada e elevada portanto, a capacidade de percolação de água "

(Pichler, 1958).

A respeito das rochas metamórficas Pichler (1958) cita gnais -
ses e xistos, fissuras e fraturas nos quartzitos, e calcários por onde
podem ocorrer vazamentos, mencionando principalmente os vazamentos que
ocorreram abaixo da fundação da Barragem de Hales Bar, EUA, no calcário
do substrato.

"A Barragem de Hales Bar, EUA, foi construída entre 1905 e
1914, tendo tanto o prazo quanto o custo sido quatro vezes superior ao
inicialmente estipulado. No correr dos anos seguintes houve necessidade -
de trabalhos extensos de estancamento que, entretanto, não conseguiram -
vencer as fugas cada vez maiores e que em 1939 atingiram cerca de $46 \text{ m}^3/\text{seg.}$
Novos estudos foram feitos e construiu-se uma cortina de vedação que
foi levada até a rocha sólida abaixo da rede de percolação. Tudo indica -
que esta cortina resolveu finalmente o problema "(Pichler, 1958).

Considerando as rochas sedimentares, Pichler (1958) cita exclu-
sivamente os arenitos concluindo que "o que caracteriza os arenitos de um
modo geral é a sua permeabilidade que pode variar dentro de limites bastan-
te amplos. Nessas condições o problema principal a enfrentar relaciona-se
com as fugas de água por percolação, com as pressões neutras e com a pos-
sibilidade de escorregamento ao longo do plano de estratificação. A permea-
bilidade constitui propriedade das mais importantes, particularmente no ca-
so das barragens e reservatórios".

Estudando os "Problemas Geológicos relacionados à implantação -
de Barragens no médio São Francisco", Riuiti Yoshida (1972) e outros reali-

zaram trabalhos que permitiram o conhecimento detalhado das feições de dissoluções típicas do calcário Bambuí, bem como uma avaliação das dificuldades ligadas a projetos e construção de usinas hidroelétricas em áreas cársticas, chegando às seguintes conclusões: "Em uma região calcária, a topografia dos vales, sempre cortados em gargantas profundas, é favorável à priori, a implantação de uma barragem. Por outro lado, a estanqueidade dos terrenos de fundação bem como do reservatório, pode deixar a desejar ^{devido} as fissuras de caráter cárstico, que podem provocar grandes perdas com risco de comprometer a economia do projeto".

"As rochas calcárias do Grupo Bambuí, na área estudada são intensamente carstificadas, constituindo-se em problema de grandes proporções em relação aos projetos de barragens propostas para os rios Arrojado e Correntina".

"Nas áreas de ocorrência de rochas calcárias foram observados fenômenos de dissolução (estruturas lapiasadas, cavernas, dolinas, sumidouros, rios intermitentes e drenagem subterrânea intensa) de significado regional, que se estendem a cotas inferiores às de enchimento dos reservatórios projetados. Os processos de dissolução atualmente quase que inativos têm toda uma estrutura formada que lhes permitiria sua reativação caso se elevasse novamente o nível freático. As estruturas de dissolução observadas nas áreas de calcário comprometem portanto a estanqueidade dos reservatórios propostos".

Em relação ao substrato rochoso, Pichler (1956) e Chiossi (1971) - consideram que "as rochas mais suscetíveis de permitir fugas sérias, são o calcário e outras rochas solúveis, o basalto e outras rochas vulcânicas, depósitos glaciais de pedregulhos e depósitos aluvionares", e analisam separadamente cada um dos casos, citando alguns exemplos, que se seguem:

"A presença de calcário, dolomitos e mármore inclusos, deve sempre ser encarada como fator de suspeita quando ocorre na área do reservatório projetado. A sua aparência superficial firme e sólida pode ser extremamente enganosa. Geralmente apresenta sistema de juntas, pelas quais a água da chuva escoar com facilidade. É bem sabido que esta água dissolve gradualmente e remove o calcário, chegando a produzir grandes e extensos canais subterrâneos. A

gipsita é ainda mais solúvel que os calcários e sendo de menor resistência mecânica, é sujeita a sofrer desagregação mais intensa." Ex: Reservatórios do Vale do Rio Pecos em N.M., EUA. (New México - NM).

A respeito dos basaltos, Pichler (1956) cita que "a parte central de um derrame de grande possança, pode ser bastante densa e não fraturada, mas tanto na superfície, quanto no contacto com a formação subjacente e nas zonas de contacto entre derrames sucessivos a rocha será provavelmente muito fraturada e permeável. Uma formação que consiste de numerosos derrames pequenos, será assim obviamente mais permeável que uma formação que consiste de um ou poucos derrames apenas".

Esta permeabilidade no contato entre basalto e a formação subjacente foi um dos problemas encontrados na construção da Barragem de Barra Bonita, onde havia percolação entre o basalto e o arenito subjacente.

Pichler (1956) ainda constata que as rochas vulcânicas de textura grosseira podem também permitir fugas apreciáveis.

Com relação às rochas sedimentares, "pedregulho grosso é equivalente a calcário cavernoso e basalto fraturado relativamente à sua capacidade de percolação de água. Se ocorrer na base do vale sobre o qual se pretende construir uma barragem, deve isto ser levado em consideração. Se a formação de pedregulho não for demasiadamente profunda e extensa, poderá o fluxo pela mesma ser controlado por meios artificiais. Em certos casos pode o depósito de pedregulho ter aspecto morânico, ou de leque aluvional, ou ainda, um leito abandonado de rio pode fazer parte do flanco do reservatório e nesses casos será bastante difícil as fugas de água pelos meios

artificiais . Nesses casos é que se precisa levar em consideração o perigo de fugas excessivas sob ação da carga da água represada. Dependerá esta fuga não somente da permeabilidade do pedregulho e da seção transversal pela qual esta fuga se processa, mas também do respectivo gradiente hidráulico ". (Pichler, 1956).

As fugas por nascentes de água no reservatório são também analisadas por este, com exemplos.

"Devido à presença de grandes nascentes na área do Reservatório de American Falls, em Idaho, EUA, muito trabalho cuidadoso tem sido executado a fim de traçar as curvas de nível do lençol freático na área do reservatório e áreas vizinhas. No local nº 3 do projeto de Carlsbad em New México nascentes com uma descarga de 1.000 a 1.500 litros/seg. e que seriam submersas até uma profundidade de mais de 10 metros, foram consideradas como vias possíveis de fuga, visto que a rocha local consistia essencialmente de calcário e gesso e os poços de ensaio mostraram que a pequena distância apenas das nascentes o nível do lençol de água se achava em nível muito mais baixo".

Pichler (1956) cita os vazamentos no Reservatório Mackey, no Big Lost River, a 6 km aproximadamente acima de Mackey, Idaho, EUA: "Observações feitas quando a altura da água no reservatório era de 18 m com uma perda de, aproximadamente 3.700 litros/seg., mostraram que cerca de 30% desta perda passava debaixo da cortina para reaparecer no canal do rio pouco abaixo da barragem. Aproximadamente 20% da perda passa pela formação calcária que constitui a enconsta no engastamento à direita da barragem. Esta água reaparece no canal do rio à jusante entre 0,4 a 2 km

abaixo da barragem. Cerca de 50% da perda por percolação total passa de -
baixo e em torno do engastamento esquerdo da barragem pelo delta de cas -
calho de Cedar Creek recorrendo para o rio em diversos pontos situados en -
tre 100 m, a 3 km abaixo da barragem".

Vazamentos podem ocorrer também através de diaclases em camadas
mergulhando para montante.

Exemplo dêste tipo é o que ocorre na barragem de Tel-Yeruham em
Israel.

Descrevendo o substrato rochoso sob o ponto de vista de vazamen -
tos, Chiossi (1971) apresenta os seguintes argumentos, até certo ponto pa -
recidos com os de Pichler (1956):

"Granitos e gnaisses, via de regra, apresentam fraturas, falhas
e dobras, ou seja, zonas de enfraquecimento e de percolação de água. No ca -
so de gnaisses deve-se estudar a posição da xistosidade.

O perigo em barragens construídas em áreas de basalto não se res -
tringe apenas ao local da barragem, mas principalmente no próprio reservató -
rio, uma vez que quando intensamente fraturadas, a possibilidade de fuga
d'água é bastante elevada". Exemplo de insucesso de barragem construída sô -
bre basalto: Wilson Lake, Idaho, EUA, que foi abandonada.

Citando também fugas d'água em basaltos, Ruiz (1961) comenta o
fenômeno exemplificando com o maciço altamente fraturado como o da Barragem
de Bariri, e principalmente, dando ênfase aos problemas encontrados na cons -
trução da Barragem de Barra Bonita, onde vários especialistas referem-se à
fuga d'água através do contato entre basalto e arenito, através do basalto

fissurado e através de fissuras no arenito por onde se podem estabelecer perdas importantes e, principalmente, localizadas.

Continuando sua descrição Chiossi (1971) argumenta que nos quartzitos notam-se com frequência zonas de infiltração de água. Os maiores inconvenientes dos quartzitos fraturados são o excesso de material fragmentado e a grande permeabilidade. É o que ocorre, por exemplo, no substrato da Barragem de Jaguará (Rio Grande). Os siltes, areias e principalmente calcários estão sujeitos a intensa percolação, e os folhelhos não são resistentes aos efeitos dissolventes das águas de percolação, bem como materiais inconsolidados.

Vazamentos podem ainda ocorrer através de brecha de falha ("fault breccia"), onde a rocha se apresenta fragmentada em blocos ou partículas irregulares e angulares com poros ou canais, que permitem a passagem de água; de formações morânicas (Pichler, 1956); de zonas de alteração caracterizadas por faixas de feldspatos em rochas gnáissicas; de camadas e lentes de areia e pedregulhos nos bordos das geleiras.

No estudo dos vazamentos de água em barragens e reservatórios - sempre são consideradas as estruturas, através das quais esses vazamentos podem se processar. Citamos aqui as mais importantes:

a - Contatos - Ex: percolação através do contato basalto - arenito, barragem de Barra Bonita.

Contato folhelho - arenito no Local Laurel, Rio Laurel. (EUA).
(Pichler, 1956).

b - Xistosidade: Pichler (1956) cita a possibilidade da evasão -

de uma quantidade pequena de água abaixo e em torno da barragem ao longo dos planos de xistosidade.

c - fraturas , diaclases, juntas.

Martins (1961) cita percolação através de fraturas no substrato da Barragem Três Marias, Rio São Francisco, M.G.; Ruiz (1961) e E. Fortes de Oliveira (1966) na Barragem de Barra Bonita e Pichler (1956) cita percolação através de diaclases e juntas.

d - Falhas - Ex: Barragem do Rio Ocee em Parks-Ville, Tennessee, EUA. (Pichler 1956).

e - Zonas de cisalhamento, discordâncias, dobras, cavidades, juntas argilosas, canais de solução e formações porosas e solúveis. Segundo Pichler (1956), os vazamentos podem se dar através dessas estruturas.

Deve ser ainda lembrado que os vazamentos podem ocorrer por meio de gargantas em arenitos pouco cimentados (Pichler, 1956) Ex: Gargantas: Reservatório do Jerome , Idaho, EUA.

Também onde há juntas, falhas ou fraturas é sempre possível que se venha encontrar nascentes que podem constituir sério perigo.

Pichler(1956) cita percolação através de rocha vulcânica porosa no dique seco de Pearl Harbour.

Doutro lado, rochas resistentes à ação da água, podem conter fissuras ou cavidades cheias de material solúvel ou de fácil erosão, que pode ser removido por correntes de água subterrânea, quando sob a ação da carga represada se produz um fluxo vigoroso daquelas correntes.

Finalmente, sob o ponto de vista dos vazamentos deve ser levada

em consideração, não somente o maciço e o substrato da barragem, como também a configuração do Reservatório.

A título de exemplificação citamos Pichler (1956), concluindo - que "a configuração do reservatório é doutro lado às vezes bastante complicado e pode ser que uma parte do seu bordo seja formada por um espigão ou divisor através do qual a rocha é de tal modo permeável que pode resultar - séria infiltração e mesmo uma ruptura."

4 - O método do Potencial Espontâneo

a - Histórico

Corpos de certos minerais podem, sob certas condições, comportarem-se como células galvânicas naturais e provocar o aparecimento de corrente elétrica ao seu redor. Este fenômeno é denominado Polarização Espontânea, e o método geofísico que o estuda recebe o nome de Método de Polarização Espontânea, ou método do Potencial Espontâneo (Self-potential method).

Foi o geofísico francês, C. Schlumberger quem desenvolveu este método e, após sua famosa investigação na pirita de Saint Bel, França, em 1913, numerosas áreas contendo prováveis depósitos com sulfetos foram investigadas por este método, em todo mundo.

"O método do potencial espontâneo é um método elétrico que usa um campo natural. Todos outros métodos elétricos usam campos elétricos artificiais.

A atividade elétrica de corpos de minério e os potenciais associados com concentrações de metais em jazidas, corrosão de tubulações de oleodutos, movimento de águas subterrâneas, e bases de fundação, resultam de concentrações diferentes de soluções eletrolíticas em contacto com objetos metá-

licos , de diferenças químicas de materiais em contacto com soluções, e (em casos excepcionais) da eletrofiltração ". (Heiland, 1940).

O potencial espontâneo sendo uma corrente elétrica que circula no solo, cuja origem independe da ação humana, está ligado a fenômenos como oxidação, eletrólise, filtração, etc. No caso da filtração, uma solução percolando um material permeável provoca o aparecimento de uma diferença de potencial, dado pela fórmula de Helmholtz, $V = \frac{\rho E \Delta P}{4 \pi N}$, onde
V = potencial de fluxo

ρ = resistividade do líquido

E = constante dielétrica do líquido

ΔP = Pressão

N = Viscosidade do líquido

b - Condições básicas

A pirita mostra a mais forte Polarização Espontânea, mas a mesma atividade foi observada na pirrotita, magnetita, minérios de cobalto, grafita e antracita. A atividade elétrica desses minerais provém das diferenças de concentração de soluções eletrolíticas que circundam o corpo de minério (ou camada). A diferença na composição das soluções ao redor do corpo de minério é causada por oxidação diferencial do minério. Muitas vezes as formações inconsolidadas perto da superfície acima do nível hidrostático estão saturadas de ar. Um corpo de minério vertical, de pirita por exemplo, penetrando a Zona arejada, será oxidada no seu topo, por intermédio de águas superficiais ricas em O_2 . A oxidação da pirita produz H_2SO_4 , que é neutralizada por carbonatos existentes ao redor do corpo de minério. A solução de sais assim

obtida ao redor da porção oxidada do corpo de minério difere, pois, da composição da solução em contacto com a parte não oxidada, resultando numa diferença de potencial entre a parte superior e a parte inferior do corpo de minério. Esta diferença de potencial causa uma corrente que flui para baixo, dentro do corpo de minério e, então, para fora e para cima, através das rochas encaixantes. Na superfície, a corrente se dirige para um ponto, normalmente acima do minério, chamado centro negativo. (fig.2)

A figura 2 mostra ao alto, a medida do potencial segundo uma linha reta 00_1 , mostrando o diagrama que, no ponto correspondente ao polo negativo, o potencial é o mínimo. O ponto correspondente na superfície ao polo negativo é o ponto C, que é o centro negativo.

Portanto, para a ocorrência de polarização espontânea em corpos de minério, devem ser preenchidas as seguintes condições básicas:

- O corpo de minério deve constituir-se, ou pelo menos conter apreciável quantidade, de minerais dos tipos acima mencionados, sendo condutor.

- O mineral deve ser susceptível de oxidar-se.

- O eletrólito ao redor do corpo de minério deve ter composição diferente na parte superior e na parte inferior do depósito. Esta condição geralmente existe quando o corpo mineral penetra na zona arejada acima do nível da água subterrânea. Deve-se levar em conta ainda, que as variações do nível freático podem influenciar o fenômeno da polarização espontânea de modo considerável.

c - Equipamento e procedimento de campo.

c - 1. Equipamento

Para a medida do Potencial Espontânea empregam-se: eletrodos para o contacto com o solo, instrumento de medida e cabos isolados, para ligação dos eletrodos com o medidor.

Os eletrodos devem ser do tipo não polarizável, os instrumentos de medidas podem ser galvanômetros, potenciômetros ou voltímetros eletrônicos, e os cabos são de cobre, finos, leves, torcidos e bem isolados.

c - 2. Procedimento de campo

O objetivo do levantamento da polarização espontânea é localizar o centro negativo. Isto pode ser feito de duas maneiras:

- levantamento de linhas equipotenciais

- levantamento de perfis de potencial

c.2-1 . Levantamento de linhas equipotenciais

Este procedimento consiste em se determinar os pontos que estão

situados numa mesma linha equipotencial, locando-se os pontos que apresentem a mesma anomalia por meio de um galvanômetro, dos eletrodos e dos cabos. Este procedimento continua até que a linha mais interna seja traçada, o que permite localizar o centro negativo.

c.2-2. Levantamento de perfis de potencial

Este procedimento consiste em se traçar linhas de pontos espaçados, podendo formar uma malha ou não, e medir a diferença de potencial entre os pontos observados, por meio de um potenciômetro ou um voltímetro eletrônico de corrente contínua.

Figura 3

de 8/1

O procedimento por nós utilizado no campo foi o do levantamento de perfis de potencial e, que será portanto descrito mais adiante com maiores detalhes para o caso especial de Correntes Naturais em Obras de Engenharia Civil, especificamente barragens.

Há ainda a considerar as fontes de erro que aparecem em trabalhos desta natureza, que são correntes estranhas causadas por linhas de transmissão em áreas popladas, indústrias, mineração, estradas de ferro, correntes da ionosfera, indução na Terra, e flutuações do campo magnético da Terra (correntes telúricas).

Estas correntes criam campos que podem ser consideráveis em comparação com aqueles que se quer medir, que é o Campo causado pela Polarização Espontânea.

A polarização espontânea é constatada não somente em corpos de minérios, como também pode ocorrer por meio de fenômenos hidrológicos, seja por "eletro-filtração", seja por "fricção", em montanhas devido o fluxo das águas superficiais pelas encostas, em áreas desérticas e semi-desérticas e, finalmente, entre solo natural e solo arado.

d - Interpretação dos resultados

A partir dos dados (diferença de potencial) obtidos por qualquer dos dois procedimentos citados constroem-se mapas com curvas de isoanomalias. No caso de levantamento de perfis de equipotencial pode-se fazer um perfil - para cada linha de observação, colocando-se em abcissas as distâncias horizontais e em ordenadas os valores relativos do potencial medido em cada ponto dessas linhas. Este gráfico recebe o nome de perfil de potencial.

A interpretação é usualmente qualitativa. A partir dos mapas de linhas equipotenciais (ou linhas de isoanomalia) e/ou dos perfis de equipotencial, pode-se determinar a locação e a extensão lateral aproximada dos corpos de minério, sendo em geral difícil determinar a natureza do corpo de minério.

Na prática, anomalias menores que 50 mV não são levadas em consideração na interpretação, porque podem ser facilmente causadas por outras correntes, que não o Potencial Espontâneo que se quer medir.

Métodos de avaliação quantitativa de anomalias de Potencial Espontâneo podem ser aplicados em casos favoráveis. Tais métodos têm sido desenvolvidos por Heiland, Lasfargues, Meiser e outros.

5 - Desenvolvimento do método em laboratório

5.1 - Bases teóricas

Para a execução dos nossos trabalhos de laboratório baseamo-nos nos estudos de C.Schlumberger sobre o método do Potencial Espontâneo, descrito atrás, nos trabalhos de Ogilvy, (1969,1970), sobre o estudo do método em laboratório e sua aplicação em barragens, e na Lei de Darcy.

Este método tem sido largamente empregado na prospecção mineira, porém raramente em obras de Engenharia Civil.

Até o presente, pelo que nos consta, somente Ogilvy, Ayed e Bogoslovsky, estudaram e desenvolveram o método em laboratório e o aplicaram em barragens.

Conforme Ogilvy (1969), "experiências de laboratório são executadas em vista de que os vazamentos de reservatórios são caracterizados por anomalias de correntes naturais. Quanto maior a descarga de filtração, tanto

mais altas estas anomalias são. Como resultado, a relação que governa a diferença de potencial e a composição granulométrica da areia, concentrações eletrolíticas e outros fatores foram revelados.

As primeiras experiências para detectar locais de vazamentos em barragens, usando fenômenos de potenciais de fluxo deram bons resultados. Elas mostraram que, usando-se anomalias naturais de potenciais de fluxo - é possível mapear exatamente locais de vazamentos através do fundo, tão bem quanto através dos aterros das barragens.

Para estabelecer as bases teóricas para o método mencionado, investigações de laboratório e projetos de trabalho foram desenvolvidos".

Êstes autores realizaram trabalhos de campo em reservatórios do Trans-Cáucaso e da Ásia Central, obtendo dados que confirmaram suas experiências de laboratório.

"A possibilidade de usar correntes naturais para estudar vazamentos de água em reservatórios é baseada no fenômeno do campo elétrico formado pelo fluxo d'água através de um meio poroso. Êsse fenômeno foi - investigado por muitos geofísicos e eletroquímicos. Entretanto muitos factores que influenciam a origem desses potenciais permanecem não esclarecidos "(Ogilvy 1969).

Tendo isso em mente, êstes autores desenvolveram investigações de laboratório, tendo em mira o estudo da dependência do potencial de fluxo com a porosidade e permeabilidade de areias quartzosas, tão bem quanto à composição iônica e à concentração eletrolítica.

"Sabe-se que no limite das fases sólida e líquida, e, em par-

ticular entre partículas minerais com poros umidecidos, uma camada dupla é formada. O conceito mais recente é que essa dupla camada tem um caráter difuso, e parte dela, na fase líquida, pode se mover sobre a parte sólida. Dessa maneira, uma diferença de potencial é criada.

Na natureza prevalecem soluções de água e sais mono e bivalentes. A parte imóvel das camadas dupla afiliada com a parte sólida, usualmente tem uma carga negativa, enquanto a parte móvel tem uma carga positiva - (Fig.4).

Figura 4

As bases teóricas para o potencial de fluxo foram formuladas pela primeira vez por Helmholtz. Ele considerou o fluxo através de um tubo capilar e derivou a seguinte equação $V = \frac{\rho E \Delta P \sigma}{4 \pi N}$ onde

V = potencial de fluxo

E = constante dielétrica do líquido

σ = potencial eletro - cinético

ρ = resistividade do líquido

ΔP = diferença de altura (pressão)

N = viscosidade do líquido

Esta equação mostra que para um certo tubo capilar e para uma certa solução $V/\Delta P$ é constante, isto é, o potencial de fluxo é diretamente proporcional à diferença de altura (pressão) e independe do comprimento e da área do tubo capilar.

Em meios porosos (rochas), as relações eletrocinéticas são mais complicadas que em tubos capilares. Neste caso é essencial considerar a com posição granulométrica, a permeabilidade do meio, a forma e a tortuosidade dos poros, a área da superfície livre e espessura dos filmes de água firmes e de limites infinitos, além de outros fatores "(Ogilvy, 1969).

Ogilvy, Ayed e Bogoslovsky (1969) em seus experimentos de laboratório fizeram passar um fluxo d'água de soluções iônicas através de um tubo de vidro de cerca de 20 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro, contendo areia, variando a pressão.

Essa variação de pressão foi medida através de dois piezômetros inseridos sobre o tubo, distanciados cerca de 10 cm. No tubo, abaixo dos piezômetros foram inseridos dois eletrodos, por onde era medida a diferença de potencial, concluindo que ela varia com a pressão, porosidade, permeabilidade e a concentração da solução percolante.

A fase inicial dos nossos experimentos em laboratório foi baseada nestas experiências efetuadas pelos autores citados.

5.2 - Ensaio em laboratório

5.2.1 - Fase inicial

Nesta fase efetuamos experiências com água destilada e uma solução de NaCl em água destilada de concentração $N = 10^{-3}$, que atravessou diferentes granulações de areia, sob diferentes condições de pressão.

Para as experiências em laboratório foram usadas amostras de areia quartzosa de origem fluvial. Essas areias foram separadas por peneiramento nas seguintes frações em microns: 105 a 177, 177 a 250, 250, a 297, 297 a 420, 420 a 840, 840 a 1000, e 1000 a 2000.

Todas as medidas de potencial de corrente foram efetuadas num tubo de fluxo de material plástico com 2,5 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento. Inicialmente foram confeccionados um tubo e piezômetros de vidro, mas devido à fragilidade da montagem, optamos por tubo e piezômetros de plástico.

O tubo foi obturado por duas rolhas de borracha furadas, passando-se nos furos duas mangueiras para entrada e saída da solução. Dois tubos piezométricos de plástico separados de 10 cm foram ligados ao tubo de fluxo para verificar a diferença de pressão. Esta era conseguida por uma pinça de Hoffman colocada na mangueira por onde circula a solução que vai entrar no tubo.

Exatamente abaixo destes tubos piezométricos foram inseridos dois eletrodos de platina. Para se medir o potencial de corrente adotamos o se-

guinte procedimento : colocar a areia no tubo, compactá-la, colocar as rolhas perfuradas nas extremidades, ligar o fluxo da solução para eliminar o ar contido nos poros, deixar equilibrar o sistema durante pelo menos uma hora e finalmente ligar os eletrodos e ler o potencial de corrente com um microvoltímetro e a altura da coluna atingida nos dois piezômetros.

Surgiram porém certas dificuldades para a realização da experi-ência. A primeira, já citada, foi a construção de um tubo de fluxo de plás-tico, bem como piezômetros de plástico, devido à fragilidade do material de vidro. A segunda foi o carreamento dos grãos de areia pela mangueira de saí-da e pelos piezômetros. Êste problema foi resolvido colocando pequenas telas de nylon no contacto com o tubo dos piezômetros e das mangueiras de en-trada e saída. Outra dificuldade foi o vazamento através dos orifícios dos eletrodos e através das rolhas, que foi solucionada colando-se as rolhas, os piezômetros e os eletrodos com araldite.

Quanto à indução, ligamos um dos eletrodos ao terra do laboratório. A leitura da coluna d'água nos piezômetros foi feita por meio de fitas métri-cas colocadas ao longo dêles. Porém, a dificuldade mais grave era a de se man-ter constante a pressão da água uma vez que no início foi usada a rêde de água do laboratório, de pressão não constante. O problema foi solucinado colocando-se um reservatório a uma altura de 43 cm acima do tubo e o ligando a êste controle da pressão foi conseguido graças ao uso da pinça de Hoffman . No reservatório foi inicialmente colocada água destilada que era recuperada-na saída do sistema.

Com o sistema funcionando normalmente, para cada granulação de

areia abria-se toda a pinça dando a maior vazão e conseqüentemente a maior pressão nos piezômetros; deixava-se equilibrar o sistema e lia-se o potencial de corrente. As alturas da coluna d'água nos piezômetros também eram medidas, de onde tirava-se a variação de pressão ΔP . Para cada ΔP corresponde uma diferença de potencial ΔV . Depois a pressão era diminuída com um pequeno fechamento da pinça, o sistema entrava novamente em equilíbrio e tínhamos novos ΔP e ΔV . O procedimento foi repetido várias vezes para todas as granulações de areia citadas.

Resultados obtidos

Observou-se que à medida que aumenta a pressão, há um aumento de potencial elétrico criado pela corrente natural, que tem origem na percolação de uma solução por um material poroso.

Posteriormente fez-se os mesmos estudos para uma solução percolante iônica de NaCl em água destilada de concentração $N = 10^{-3}$, obtendo os mesmos resultados teóricos, porém, como é óbvio, com resultados numéricos diferentes.

As tabelas 1 e 2 fornecem as medidas de ΔP e ΔV obtidas, cujos valores estão lançados nos gráficos das figuras 6 e 7, respectivamente.

A figura 5 mostra a montagem utilizada para o estudo do potencial espontâneo no laboratório. Nela aparecem o reservatório, o microvoltímetro com seus cabos ligados aos eletrodos do tubo de fluxo, o tubo de fluxo com seus piezômetros e suas mangueiras de entrada e saída.

Figura - 5

Para a tabela 1, notamos o emprego da granulação 420 a 840 microns. Nas experiências constatou-se que essa fração se comporta como a fração 297 a 420 microns, assim não aparecendo na tabela 2 e no gráfico da figura 7.

As investigações levadas a efeito forneceram dados concretos e mostraram que o método de correntes naturais é efetivo na determinação de perda d'água em barragens.

5.2.2 - Fase final

Os ensaios em laboratório continuaram a ser desenvolvidos, construindo-se parte do equipamento a ser utilizado no campo.

Foram construídos os eletrodos não polarizáveis, constando de um recipiente de porcelana porosa com cobertura em plástico, com rosca na

DESENVOLVIMENTO DE CORRENTE NATURAL EM AREIAS
PELA PASSAGEM DE UM FLUXO D'ÁGUA

Tabelas para o gráfico: potencial espontâneo (ΔV) X pressão (ΔP)

a
fração 105-177 micra

ΔP	ΔV
6,00	1,30X0,03
15,00	4,5 X0,03
18,50	5,60X0,03
28,00	6,80X0,03
10,00	4,00X0,03
8,50	2,00X0,03
29,50	7,00X0,03

b
fração 177-250 micra

ΔP	ΔV
16,00	9,60X0,03
15,00	9,40X0,03
14,00	9,00X0,03
13,00	7,50X0,03
11,00	7,20X0,03
10,00	6,20X0,03
5,00	5,00X0,03

c
fração 250-297 micra

ΔP	ΔV
24,00	2,90X0,03
23,50	2,30X0,03
12,00	1,40X0,03
9,50	1,00X0,03
13,70	1,25X0,03
14,70	1,30X0,03
8,50	0,70X0,03
8,00	0,50X0,03

d
fração 297-420 micra

ΔP	ΔV
16,00	7,20X0,03
13,60	6,20X0,03
11,80	4,90X0,03
9,50	3,00X0,03

e
fração 420-840 micra

ΔP	ΔV
19,30	8,30X0,03
15,50	6,90X0,03
12,40	5,60X0,03
10,30	4,60X0,03
10,00	4,50X0,03

f
fração 840-1000 micra

ΔP	ΔV
16,50	3,70X0,03
8,40	1,90X0,03
11,00	2,80X0,03
3,00	0,60X0,03
2,50	0,50X0,03

g
fração 1000-2000 micra

ΔP	ΔV
5,00	2,90X0,03
6,40	3,70X0,03
8,70	5,00X0,03

ΔV é dado em milivolts

ΔP é dado em centímetros

DESENVOLVIMENTO DE CORRENTE NATURAL EM AREIAS
PELA PASSAGEM DE UM FLUXO DE SOLUÇÃO DE NaCl
EM ÁGUA DESTILADA DE CONCENTRAÇÃO $10^{-3}N$

TABELAS PARA O GRÁFICO $\Delta V = \Delta P$

reta a		reta b	
fração 250 a 297 microns		fração 297 a 420 microns	
<u>ΔP</u>	<u>ΔV</u>	<u>ΔP</u>	<u>ΔV</u>
6,70	3,30	8,60	3,50
9,65	4,40	11,70	4,90
13,40	6,30	15,20	6,30
16,30	7,50	18,40	7,70
reta c		reta d	
fração 177 a 250 microns		fração 105 a 177 microns	
<u>ΔP</u>	<u>ΔV</u>	<u>ΔP</u>	<u>ΔV</u>
7,50	2,40	18,20	1,90
9,50	3,00	13,50	1,60
13,30	4,40	11,40	1,10
17,00	5,40	7,50	0,80
20,50	6,70		
reta e		reta f	
fração 840 a 1000 microns		fração 1000 a 2000 microns	
<u>ΔP</u>	<u>ΔV</u>	<u>ΔP</u>	<u>ΔV</u>
8,50	1,70	6,70	0,30
12,00	2,30	9,80	0,65
16,60	3,30	14,50	0,80
18,00	3,50	18,50	1,10

ΔV é dado em milivolts

ΔP é dado em centímetros

Gráfico potencial espontâneo x pressão

FIGURA 6

GRAFICO 1

Clovis Bossolan Saravalle

FIGURA 7

Clovis Bossolan Saravalle

na parede superior; preparadas bobinas com contato deslizante e soluções de sulfeto de cobre . Foi feita a moagem do sal para enchimento das porcelanas porosas e, finalmente, foram preparadas as trenas de nylon com de marcação de 10 em 10 metros para serem utilizadas nas áreas inundadas.

A preparação deste equipamento e a construção de parte dele foram possíveis graças aos estudos de dimensionamento dos eletrodos e de adaptação do equipamento visando facilidade de transporte e impermeabilização.

6 . Aplicação do método no campo

O método do Potencial Espontâneo que usa correntes naturais foi aplicado no campo, na Barragem de Saracuruna, Estado do Rio de Janeiro, e na Barragem do Rio Juqueri, Sistema Cantareira, da COMASP, Estado de São Paulo, barragens estas que sofrem vazamentos.

6.1. Trabalhos Anteriores

6.1.1 Barragem de Saracuruna

A Barragem de Saracuruna está situada no curso alto do Rio Saracuruna, logo após a junção dos Rios Mantiqueira e da Pedra Branca, na Serra da Estrela, destinada ao abastecimento d'água da Refinaria Duque de Caxias, da Petrobrás, no Estado do Rio de Janeiro.

Esta Barragem foi construída entre 1960 e 1962, apresentando desde o seu enchimento, vazamentos no fundo e na ombreira direita.

Após a conclusão da barragem, com o nível da água na cota 65 m surgiram vazamentos nas duas ombreiras. Os da ombreira esquerda desapareceram em seguida, mesmo com a elevação contínua do nível do reservatório até a cota - 75 m.

A barragem de Saracuruna é do tipo barragem de terra, tendo sido apontados vários defeitos de construção pelos técnicos do Instituto de Pesquisa Tecnológicas, na Revista O Dirigente Construtor (1972): dreno vertical a partir da berma 61 m da barragem em direção ao interior da ombreira direita; êste dreno apresentava o inconveniente de diminuir o caminho de percolação da água, acentuando assim o gradiente e a própria percolação; má qualidade dos tubos coletores na obra, originando uma caverna de 2,9 m de profundidade dentro do aterro; dispositivos de impermeabilização e drenagem, bastante alterados durante quase um decênio de obras de recuperação; abandono de muitos desses dispositivos e a construção de novos deles; discordância topográfica de várias plantas; o não funcionamento de muitos piezômetros instalados; a cortina drenante executada na ombreira direita não era eficiente, apesar do grande volume de água coletado; e a presença de camadas compactas alternadas e lentes mal compactadas, descontínuas no aterro da barragem.

Os estudos geológicos regionais e locais efetuados na região - (Revista O Dirigente Construtor, julho, 1972) objetivaram determinar o tipo de infiltração de água que se processa: se por zonas localizadas, ao longo de falhas ou zonas fraturadas transversais ao eixo da barragem, se de modo generalizado pelas ombreiras. Tais estudos revelaram a ausência de falhas ou fraturas diretamente responsáveis pelas infiltrações.

Geologia local

Já em 1960, Freitas descreveu a geologia do local da Barragem de Saracuruna, antes da sua construção:

" O ante-projeto de construção seleccionou dois eixos. O sítio 2 fica cêrca de 220 m à juzante do sítio nº 1 .

Existem três tipos de rochas aflorando no terreno: tálus, colúvio e migmatitos.

No sítio nº 1 os depósitos de tálus ocupam a margem esquerda - do Rio Saracuruna. Na margem direita, observa-se o contacto entre o tálus e o regolito da rocha local (manto od migmatito). Capeando irregularmente o manto de intemperismo do migmatito ocorrem depósitos coluviais pouco espêssos, na margem direita. O migmatito, via de regra, aparece fresco ou ligeiramente alterado, no talvegue do rio.

No sítio nº 2 da barragem o talvegue do rio exhibe depósitos ru dáceos misturados com arenosos, cujos tamanhos variam de calháus à areia grossa, tendo restos de talus salientes na forma de matacões sub-angulares. O "bed-rock" compõe-se de um migmatito idêntico ao encontrado no eixo nº 1, sendo ótimo o estado de conservação da rocha. A rocha, também, é pouco suscetível ao diaclasamento. São observados depósitos de colúvio a esmo duas mar gens. Restos de depósitos de tálus são encontrados na margem direita. Na mar gem esquerda o exame geológico superficial não revelou a presença de tálus".

Além da geologia local, Freitas (1960) fornece a topografia, lito-logia, intemperismo, fisiografia, estrutura geológica e gemorfologia da região. São indicados também subsídios para a Engenharia sob o título "Geolo - gia Aplicada".

A revista "O Dirigente Construtor" (julho, 1972) apresenta também alguns aspectos da geologia local da própria barragem: "Além dos afloramentos dos pontos rochosos, a ombreira direita possui na superfície camadas de solo

coluvial, argiloso, de consistência média e cor vermelha. Este solo engloba matacões rochosos de vários tamanhos e graus de alteração. Em certas áreas onde houve remoção, aflora o solo de alteração de rocha, constituído por areias médias a grossas, siltosas, de compactidade média a compacta, de cores amarela e cinza. Em muitos locais da ombreira direita o solo coluvial apresenta-se repleto de orifícios tubulares vazios, que mergulham a pequenos ângulos, em qualquer direção.

Em vários pontos da ombreira direita constatou-se a presença de saueiros ativos, com 'olheiros' de seções similares às dos orifícios tubulares. A partir daí concluiu-se que a camada de solo coluvial da ombreira direita já foi o habitat de numerosos saueiros, atualmente abandonados na maioria.

Eles podem anular o efeito de impermeabilização natural, característico desses tipos de solos argilosos superficiais".

Foram realizados também, estudos dos vazamentos na Barragem de Saracuruna, empregando-se isótopo radioativo de bromo ^{82}Br , pelo Departamento de Aplicação de Radioisótopos nas indústrias, do I.E.A. de São Paulo tendo-se chegado à seguinte conclusão: as infiltrações de água nas duas ombreiras ocorrem generalizadamente, não se processando ao longo de caminhos preferenciais, tais como falhas ou fraturas; as infiltrações de água a montante da barragem não se restringem às proximidades, estendendo-se muitos metros a montante, ultrapassando os limites da tomada d'água; a permeabilidade da ombreira direita é alta, sendo sete vezes maior que a da esquerda.

6.1.2. Barragem do Rio Juqueri

A barragem do Rio Juqueri está localizada no rio do mesmo nome, na Serra da Cantareira, município de Mairiporã, Estado de São Paulo, sendo uma das obras do Sistema Cantareira, da COMASP, para o fornecimento de água potável à região da Grande São Paulo.

A barragem do Rio Juqueri foi concluída em 1970, sendo do tipo barragem de terra, com maciço de 22 metros de altura, crista de 195 metros de comprimento, cuja cota atinge 750 metros. É constituída de descarrega - dor principal, de fundo e de cheias, todos em concreto. O volume de terra do maciço é de 200.000 metros cúbicos . A área inundada é de 5.600.000 mé - tros quadrados, armazenando um volume de água de 36.000.000 de metros cúbi - cos.

Geologia local

No local da barragem do Rio Juqueri encontramos xistos e filitos e granitos intrusivos do Pré Cambriano Superior. No vale do rio, cobrindo es - tas rochas, existem aluviões recentes de granulação variada, que compreende partículas desde a fração argilosa, passando por siltes, areias, até seixos .

No eixo do rio, a montante, muito próximo à barragem foi consta - tada uma falha, cujo plano é quase perpendicular ao eixo da barragem.

Na margem direita do reservatório aparecem granitos, que aflo - ram junto ao engastamento da barragem, sendo recobertos mais à montante por espesso manto de regolito.

Na margem esquerda aparecem xistos bastante alterados. A falha - no talvegue do rio pode ser a estrutura de contato granito-xisto.

A respeito da Geologia da região, Ellert (1964), descreve estas rochas com maiores detalhes: "Na área predominam rochas metassedimentares, os xistos e os filitos, com intrusões graníticas, que formam três corpos distintos. Estes são designados granito Cantareira, Mairiporã e granito gnaisses".

O granito que aflora à direita do reservatório, junto à barragem, o Granito Mairiporã, é descrito pormenorizadamente por Ellert.

Em relação aos vazamentos, estes foram anteriormente constatados no corpo da barragem e através do substrato.

6.2. Trabalhos de Campo Realizados

6.2.1 Barragem de Saracuruna

a - Equipamento

O Equipamento utilizado no estudo do vazamento de água na Barragem de Saracuruna por meio do método do Potencial Espontâneo, foi o seguinte: microvoltímetro Keithley alimentado a pilha de mercúrio com sensibilidade de até 0,1 mV, eletrodos não polarizáveis, bobinas com contatos deslizantes, trenas de nylon de comprimento superior a 200 m, demarcadas de 10 em 10 m.

Para a exata locação dos pontos de medida foram utilizados dois teodolitos.

b - Procedimento de campo

O levantamento consistiu de perfis de medida espaçadas de 10 a 15 metros, com pontos de medida espaçadas de 10 metros.

A posição dos pontos de medida era dada pela trena de nylon, pre-

sa em ambas as margens da zona inundada.

Um eletrodo era mantido fixo na margem da repêsa, numa zona bem úmida, e o outro era movido por meio de uma pequena embarcação com um operador e um auxiliar, que se deslocavam ao longo da trena, a partir de uma das margens, estacionando de 10 em 10 metros, onde o operador lançava o eletrodo no fundo da repêsa.

Quando o eletrodo atingia o fundo d'água, eram então efetuadas as medidas de diferença de potencial.

Uma vez atingida a margem oposta, a trena era deslocada à montante, de aproximadamente 10 a 15 metros, e a operação era repetida. O aparelho de medida permanecia estacionado na terra junto ao eletrodo fixo.

A presença de vento causava frequentemente desvios nos pontos de medida. Para a sua exata locação foram utilizados dois teodolitos, que por meio de triangulação locavam exatamente o ponto de medida. Os teodolitos eram estacionados em pontos perfeitamente demarcados no terreno e identificados na planta.

Os valores da diferença de potencial medidos eram anotados, bem como as posições dos pontos, definidas pelos teodolitos.

Devido aos desvios nos pontos de medida, causados pelo vento, os perfis descritos não eram linhas retas, mas, arcos.

Outra dificuldade era a presença de correntes telúricas, que quando não impediam, dificultavam sobremaneira as medidas. Quando a intensidade das correntes era elevada, principalmente devido a proximidade de tempestades e descargas elétricas, os trabalhos de campo eram interrompi-

dos e reiniciados no dia seguinte, refazendo-se parte do perfil medido no dia anterior, de modo a se controlar as medidas agora obtidas.

c - Dados obtidos

Como um dos eletrodos permanecia fixo em condições de terreno - que não mudam no decorrer do levantamento de um perfil, o potencial deste ponto era tomado como potencial de referência.

Em qualquer local que se efetue uma medida por meio de dois eletrodos, aparecerá sempre uma diferença de potencial que podemos chamar de "queda de potencial ohmica", originada naturalmente pelas condições de plha geológica ou correntes telúricas, ou artificialmente por linhas de alta tensão.

Em medidas de campo o parâmetro de interesse é portanto não êsse valor absoluto da diferença de potencial, mas sim as diferenças de potencial entre pontos consecutivos. É assim, em linhas gerais, a variação da diferença de potencial entre pontos consecutivos situados ao longo de um perfil ou uma área e um ponto qualquer fixo, tomado como ponto de referên - cia.

Uma vez determinada a diferença da queda de potencial entre duas medidas consecutivas ao longo de uma mesma linha, eram as mesmas lançados em mapa no ponto situado entre as duas estações. Além de ser considerado o valor da diferença de potencial, o seu sinal é de suma importância na delimitação de áreas que estão sofrendo infiltração. O sinal é sempre negativo na parte por onde penetra a solução e positivo na parte onde a solução filtrante deixa o meio poroso.

FIGURA 8

FIGURA 9

FIGURA 10

FIGURA 11

FIGURA 12

FIGURA 13

FIGURA 14

FIGURA 15

FIGURA 16

Os pontos investigados foram lançados em mapa de isoanomalias .
Este mapa foi construído utilizando-se as medidas obtidas pelos dois teodolitos que permitiam a exata locação do ponto medido e os valores da diferença de potencial com seu respectivo sinal, marcados entre os pontos localizados no mapa. Foram traçadas as curvas de isoanomalia, unindo-se os pontos de mesmo potencial.

As medidas foram executadas somente nas partes cobertas por água, não sendo realizadas em áreas emersas numa tentativa de se determinar o sentido e posição do fluxo d'água infiltrada .

Foram levantados nove perfis com comprimento variando de 140 a 240 metros (figuras 8, 9 , 10, 11, 12, 13, 14, 15,16).

O mapa de isoanomalia (Fig. 17) foi comparado com o mapa obtido pelo Instituto de Energia Atômica da USP, no estudo do fluxo de material radioativo , onde se verificou uma boa correlação entre as anomalias obtidas.

Uma simples observação denota a presença de anomalias alongadas, concentradas principalmente ao longo da margem e ombreira direita, locais estes conhecidos como sendo os mais permeáveis.

Nos perfis das figuras 8 a 16, aparecem em abcissas os pontos medidos, com suas distâncias a partir da margem na escala 1:1.000, e em ordenadas os potenciais que podem variar de - 100 a + 100 mV.

6.2.2. Barragem do Rio Juqueri

a - Equipamento

Foi o mesmo usado na Barragem de Saracuruna.

b - Procedimento de campo

Na Barragem do Rio Juqueri foi utilizado o mesmo procedimento de campo adotado para a Barragem de Saracuruna, sendo levantados 24 per fis.

De modo a estudar o maciço de terra que constitui o corpo da - barragem, foi também executado um caminhamento, mantendo-se um eletrodo fixo à jusante da barragem e outro eletrodo móvel, que era deslocado na face montante da barragem, sempre no fundo d'água. As leituras obtidas mos tram alguns resultados interessantes quanto à possíveis localizações de vazamentos.

Como em Saracuruna, surgiram na Barragem do Rio Juqueri as se guintes dificuldades a serem levadas em consideração:

- Vento, que causava desvios nos pontos de medida.
- presença de correntes telúricas que dificultavam as medidas.
- instabilidades climáticas que dificultaram o trabalho.
- na face montante do maciço de terra, as medidas foram um pouco dificultadas pelo enrocamento aí existente.

c - Dados obtidos

Tal como em Saracuruna, os pontos investigados eram simultânea mente com a medida do potencial elétrico, levantados topograficamente por meio de ois teodolitos estacionados em pontos identificados na planta to pográfica.

Os valores, tanto topográficos, como elétricos, foram anotados - em caderneta de campo e lançados em mapa localizando os pontos de medida

e os seus respectivos potenciais.

Com os pontos locados e seus respectivos valores assinalados ,
construiu-se o mapa de isoanomalia que foi comparado ao mapa geológico da
região, podendo-se obter dessa maneira as seguintes conclusões:

- as curvas de iso-anomalia concordam com o contato xisto-grani
to, ao longo do qual se impôs o Rio Juqueri. Este contato situa-se na par
te central da barragem.

- as curvas de iso-anomalia concordam com a xistosidade das ro-
chas da margem esquerda, onde também se encontram veios de quartzo e fa-
lhas.

- as fugas d'água parecem ser mais importantes pelo fundo da
reprêsa e ombreira esquerda da barragem, sendo pouco acentuadas pelo ma-
ciço de terra.

A figura 18 mostra o mapa de isoanomalia obtido a partir das
medidas efetuadas ao longo dos perfis mencionados.

7 - Conclusões

O método do Potencial Espontâneo tem sido largamente utilizado
em prospecção mineira, porém, mostrou agora ser bastante eficiente na de-
terminação de fugas d'água em barragens, tendo em vista os resultados ob-
tidos não só nestas duas barragens estudadas.

Os resultados obtidos por esta metodologia mostram-se bastante
concordantes com aqueles obtidos por levantamentos mais refinados, como o
do estudo do fluxo de material radioativo injetado em furos de sondagem -
rotativa.

Outra vantagem, além da sua grande eficiência, é que o método é barato e rápido, requerendo uma equipe de aproximadamente 5 homens: dois para topografia, dois para o barco e um operador para as medidas.

Torna-se assim uma metodologia que justifica maiores aplicações em nosso país, onde ora se constrói grande número de barragens, quer para o fornecimento de água potável, quer para a produção de energia elétrica.

8 - Resumo

No presente trabalho são apresentados os resultados da Aplicação do Método do Potencial Espontâneo, no estudo do vazamento de água em barragens.

Os vazamentos de água em barragens podem ocorrer através do maciço e através do substrato. São aqui descritas as diversas partes do maciço e as estruturas do substrato por onde ocorrem esses vazamentos, sendo também fornecidas as litologias dos substratos, salientando-se aquelas que podem originar maior permeabilidade.

Alguns exemplos típicos de vazamentos, tanto através do maciço, como através do substrato, são fornecidos para casos brasileiros, tão bem como para alguns estrangeiros.

O método do Potencial Espontâneo, só recentemente começou a ter aplicações em obras de Engenharia Civil. Suas primeiras aplicações em barragens começaram com Ogilvy e outros (1969) que desenvolveram estudos de laboratório, e de campo em reservatórios do Trans-Cáucaso e da Ásia Central.

Antes disso, o método já era largamente utilizado em prospecção mineira, tendo-se desenvolvido por C. Schlumberger, quando estudava a

pirita de Saint Bell, na França, em 1913.

Para a execução dos trabalhos em laboratório, baseamo-nos na Lei de Darcy, nos estudos de C.Schlumberger sobre o método do Potencial Espontâneo, e nos trabalhos de Ogilvy e outros (1969, 70, 72,).

Segundo Ogilvy e outros (1969), "experiências de laboratório - são executadas em vista de que os vazamentos de reservatórios são caracterizados por anomalias de correntes naturais . Quanto maior é a descarga de filtração, tanto mais alta são as anomalias . Como resultado, a relação que governa a diferença de potencial e a composição granulométrica da areia, concentrações eletrolíticas e outros fatores foram revelados".

São apresentados gráficos e tabelas como conclusões dos trabalhos de laboratório.

O método do Potencial Espontâneo foi empregado no estudo dos vazamentos de água da Barragem de Saracuruna (R.J.) e da Barragem do Rio Juqueri, Sistema Cantareira, da COMASP (S.P.)

São apresentados trabalhos anteriores sobre a localização, tipo de barragem, locais de vazamento, defeitos de construção, geologia local e características geométricas das barragens mencionadas, bem como são feitas comparações com outras metodologias empregadas no estudo dos mesmos vazamentos, chegando-se a uma boa correlação , entre este método e aqueles .

Como conclusões dos trabalhos de campo realizados são fornecidos os nove perfis levantados na Barragem de Saracuruna e os mapas de isoanomalias das duas barragens, onde aparecem as zonas de maior permeabilidade.

9 - Agradecimentos

Queremos inicialmente expressar os mais profundos agradecimentos ao nosso Orientador, Prof. Dr. Nelson Ellert, que com sua objetividade característica e apoio integral, nos assistiu inteiramente durante a realização do trabalho todo.

Agradecemos também às seguintes entidades e pessoas :

FAPESP, cujo auxílio financeiro nos possibilitou a realização - deste trabalho; COMASP pela autorização para realizar nossos estudos na Barragem do Juqueri; Aparecida Nunes Comi, pelos exímios trabalhos datilográficos; Itacy Kroehne, pelos aprimorados trabalhos de desenho; Maria Bosolan Saravalle, pelo estímulo prestado durante todo o trabalho, e a todos que de uma maneira ou outra se interessaram por este trabalho e sempre nos incentivaram para a sua conclusão.

10 - Bibliografia

- Ahmad, M.U. 1964 - Laboratory study of streaming potencial. Geophys. Prospect . 12 (1): 49-64
- Bogoslovsky ,V.A. & Ogilvy, A.A. 1972 - The study of streaming potencial on fissured media models . Geophys.Prospect , 20 (1): 109-117
- Camargo ,F.P. de . 1970 - Geologia aplicada à barragem de Ilha Solteira - Sistema Urubupungá. IPT. Publ. 900. São Paulo.
- Chiossi, J.N. 1971 - Geologia aplicada à engenharia. D.L.P. Grêmio Politécnico.USP. São Paulo.
- Chugaev, R.R. 1971 - Seepage through dams. Advances in Hydrosience, 7 : 283-325 . New York.
- COMASP. Relatório anual . 1970.
- COMASP. Relatório anual. 1971

- Diafragma plástico detém infiltração de água. 1972, Rev. O Dirigente Construtor, 8 (9): 12-19
- Ellert, R. 1964 - Geologia da região de Mairiporã, S.P. Tese de Livre-Docência .USP. São Paulo.
- Freitas, R.O. de. 1960. - Geologia aplicada a barragem do rio Saracuruna , no município de Duque de Caxias, R.J. Bol. - Paul. de Geogr., 35 : 3-31.
- Gignoux, M.& Barbier, R. 1955 - Geologia des barrages et des aménagements - hydrauliques. Paris, Masson.
- Heiland, C.A. 1940. - Geophysical exploration. Prentice Hall ,Inc. New York.
- Laboratório de Hidráulica EPUSP-DAEE. 1969. Estudo em modelo reduzido da barragem do Juqueri. São Paulo.
- Martins, J.A. 1961 - Barragens. EPUSP (apostila). São Paulo
- Motta, J.P. 1964 - Prospecção geofísica: Métodos elétricos. In Manual do Engenheiro Globo. Editôra Globo (1964) V. 5 , t.2 , cap. 4, IB, 5, pág. 320-323. Rio de Janeiro.
- Ogilvy , A.A. , Ayed, M.A. & Bogoslovsky, V.A. 1969 - Geophysical studies - of water leakages from reservoirs. Geophys. - Prospect, 17 (1): 36-62.
- Ogilvy, A.A. & Bogoslovsky, V.A. 1970 - Natural potencial anomalies as a - quantitative index of the rate of seepage from water reservoirs. Geophys. Prospect. 18 (2): 261-268.
- Oliveira, A.M.S., Guidicini, G. & Nieble ,C.A. 1971 . Quadro roteiro de trabalhos em geologia aplicada a barragens. IPT.Public. 903 . São Paulo
- Oliveira, E.F. de, Silva, C.M. & Lima, F.W. 1966 - Estudo de percolação em fundações de barragens por meio de isótopos radioativos. Laboratório de Hidráulica EPUSP-DAEE.Inst. En.Atom. São Paulo.

- Pichler, E. 1954 . - Diretrizes para o estudo geológico de barragens .IPT.
Publ . 507 . São Paulo.
- Pichler, E. trad. 1956 . - Geologia e engenharia de barragens. Comissão -
Interestadual da Bacia Paraná. - Uruguai. IPT .
São Paulo.
- Pichler, E. 1958 - Geologia de barragens. IPT. Publ. 575 . São Paulo.
- Ponçano, W.L. Rodrigues, A.R. & Yoshida, R. 1972 - Problemas relacionados
à implantação de barragens no médio São Francis-
co. IPT. Publ. 928. São Paulo.
- Ruiz, M.D. 1961 - Problemas relacionados com a geologia de Barra Bonita -
(Rio Tietê). S.P. CESP. IPT. Publ. 866 . São
Paulo.
- Vargas, M. et al. 1955 - A ruptura da barragem da Pampulha. IPT. Publ.529.
São Paulo.
- Vaz, L.F. 1969 - Estudo geológico de barragens. Anais da Primeira Semana -
Paulista de Geologia Aplicada, 3 .São Paulo.
- Zangar, C.N. 1953 - Theory and problems of water percolation. Bureau of Re-
clamation. Engineering monographs, 8.

CLOVIS BOSSOLAN SARAVALLE