

ELIENI GUIMARÃES BARBOSA STRUFALDI

**RETROANÁLISE PROBABILISTA: APLICAÇÃO PRÁTICA DE ANÁLISE
DE PERCOLAÇÃO EM UMA BARRAGEM DE TERRA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia.

São Paulo

2004

"Se o Senhor não edificar a casa, em vão trabalham os que a edificam. Se o Senhor não guardar a cidade, em vão vigia a sentinela."

(Salmos, 127:1)

A Luis Claudio, meu esposo querido, por não me deixar esmorecer... Por seu amor e paciência, eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em sua infinita sabedoria, por me guiar no caminho do conhecimento;

Aos meus pais, Eliél e Nina Rosa, pelo constante incentivo, amor e dedicação;

Ao Prof. Dr. Waldemar Coelho Hachich, orientador deste trabalho, pelo seu modo dedicado e paciente de ensinar;

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, na pessoa do engenheiro Ronaldo Rocha, o qual guiou os meus primeiros passos no campo da engenharia de barragens;

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo por permitir que os dados da instrumentação da Barragem do Jaguari fossem utilizados para o desenvolvimento deste trabalho;

À amiga, engenheira mestre Sofia Julia Alves Macedo Campos, companheira de aventuras desde os tempos de faculdade, pelas sugestões, revisão do texto e estímulo constante;

Ao amigo, tecnólogo mestre Cláudio Luiz Ridente Gomes, pelas sugestões, revisão do texto e palavras de apoio;

Ao amigo, engenheiro Geraldo Figueiredo de Carvalho Gama Júnior pelas sugestões e constante incentivo;

Aos colegas Ozéias Rodrigues, Antonio Carlos Rodrigues, Flavio Jorge Ventura e Thomaz Massadi Teixeira Kawache pela solicitude e auxílio em todos os momentos; e

Aos demais professores, amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, expresso os meus mais profundos agradecimentos.

RESUMO

O projeto de engenharia é desenvolvido baseado em um modelo de comportamento da estrutura a ser construída. Por sua vez, este modelo incorpora uma série de hipóteses de trabalho que, durante a fase de construção ou de utilização da obra, podem não ser observadas na sua totalidade. Dentro deste cenário, a retroanálise probabilista mostra-se uma ferramenta poderosa para avaliação contínua das hipóteses de trabalho durante a construção e toda a vida útil da estrutura, uma vez que permite incorporar novas informações ao modelo inicial através de métodos formalizados.

Este trabalho apresenta uma revisão da retroanálise probabilista e sua aplicação prática na atualização do campo de permeabilidades de uma barragem de terra existente, com base em leituras piezométricas. Os resultados do estudo permitiram rever os valores dos **parâmetros** do modelo adotado, isto é, as permeabilidades dos diversos materiais, sugerindo ao mesmo tempo a aceitação do próprio **modelo**. Um estudo paramétrico destaca a importância relativa, para a retroanálise probabilista, das diversas variáveis envolvidas, indicando assim áreas em que a investigação complementar é mais necessária.

ABSTRACT

The engineering project is based upon a model that can predict the behavior of the facility to be constructed. Such model incorporates a series of working hypotheses which may or may not be fully realized during construction or operation. Under such circumstances, probabilistic back-analysis is a powerful tool for continuous evaluation of the working hypotheses, during construction and throughout the lifespan of the structure, given that it provides for the formal updating of the initial model and its parameters on the basis of incoming information.

This study presents a review of probabilistic back-analysis and a practical application to the updating of the permeability field of an earth embankment, on the basis of piezometer readings. Results of the study led to updating of the **parameters** of the adopted model, that is, permeabilities of the several materials, while suggesting acceptance of the **model** itself. A parametric study reveals the relative importance of the several variables involved in the probabilistic back-analysis, thus indicating areas in which complementary research is mostly needed.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Modelos e incertezas	4
1.2	Observações e retroanálise.....	7
2	ESTABELECIMENTO DE MODELOS.....	12
2.1	Modelos de fluxo d'água em meios porosos	12
2.2	Método dos Elementos Finitos (MEF).....	15
2.3	Incertezas do modelo e incertezas dos parâmetros.....	21
3	RETROANÁLISE PROBABILISTA	26
3.1	Modelo linear de observação	27
3.2	Atualização <i>bayesiana</i>	30
3.3	Determinação da matriz de covariâncias	32
3.4	Determinação da escala de flutuação de medições geotécnicas irregularmente espaçadas	37

4	APLICAÇÃO A UM CASO REAL	42
4.1	Apresentação do objeto de estudo.....	42
4.2	Análise das hipóteses de trabalho (projeto) pelo MEF	43
4.2.1	Estimativa de permeabilidade	45
4.2.2	Retroanálise com base na piezometria	50
4.3	Estudo paramétrico.....	57
5	CONCLUSÕES	71
6	LISTA DE REFERÊNCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Modelagem estocástica da variabilidade do solo pelo comportamento da média e variação aleatória (BAECHER; INGRA, 1985)	3
Fig. 2.1 - Fluxo não confinado através de uma barragem de terra (GIODA; DESIDERI, 1988).....	17
Fig. 2.2 - Curva idealizada de relação entre a permeabilidade e a pressão neutra (GIODA; DESIDERI, 1988).....	20
Fig. 3.1 - Divisão da malha de elementos finitos em regiões e aproximação para utilização do Método de Vanmarcke (1979)	34
Fig. 3.2 - Análise das covariâncias entre dois elementos B e C (HACHICH, 1981)	35
Fig. 3.3 - Função de decaimento da correlação (HACHICH, 1981)	36
Fig. 3.4 - Influência do coeficiente de correlação entre duas variáveis aleatórias Y_1 e Y_2 de um processo aleatório Y (GIMENES, 1988).....	39
Fig. 3.5 - Critérios de interpolação para pontos irregularmente espaçados (GIMENES, 1988).....	41
Fig. 4.1 - Seção transversal da Barragem do Jaguari na altura da estaca 25+00.....	43
Fig. 4.2 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo do aterro compactado	47
Fig. 4.3 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo do filtro horizontal	48
Fig. 4.4 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo de reaterro	48

Fig. 4.5 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo de alteração de rocha.....	49
Fig. 4.6 - Malha de elementos finitos traçada para a seção transversal da Barragem do Jaguari na altura da estaca 25+00.....	51
Fig. 4.7 - Rede de fluxo baseada nas hipóteses de projeto.	52
Fig. 4.8 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=0,5$ m e $\sigma_v^2=0,25$ m.	55
Fig. 4.9 - Rede de fluxo obtida a partir do novo campo de permeabilidades para a situação $d_1=10$ m, $d_3=0,5$ m e $\sigma_v^2=0,25m^2$	56
Fig. 4.10 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=0,5$ m e $\sigma_v^2=0,50$ m.	59
Fig. 4.11 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=0,5$ m e $\sigma_v^2=1,00$ m.	60
Fig. 4.12 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=1,0$ m e $\sigma_v^2=0,25$ m.	61
Fig. 4.13 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=1,0$ m e $\sigma_v^2=0,50$ m.	62
Fig. 4.14 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=1,0$ m e $\sigma_v^2=1,00$ m.	63

Fig. 4.15 - Variação do EQM em função da imprecisão do instrumento e da escala de flutuação.....	65
Fig. 4.16 - Variação do EQM em função da escala de flutuação horizontal.	68
Fig. 4.17 - Variação do EQM em função da escala de flutuação vertical.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Permeabilidades típicas de variados materiais (DA CRUZ, 1996)	13
Tabela 4.1 - Coeficientes de permeabilidade verticais saturados	50
Tabela 4.2 - Diferenças entre as cotas piezométricas observadas e previstas dos piezômetros pneumáticos da seção 25+00 da Barragem do Jaguari	50
Tabela 4.3 - Permeabilidades atualizadas após aplicação da metodologia proposta	54
Tabela 4.4 - Diferenças entre valores observados e previstos para cada caso analisado e erro quadrático médio (EQM).....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Vazão
k	Coeficiente de permeabilidade
i	Gradiente hidráulico
A	Área da seção transversal
k_{x1}	Coeficiente de permeabilidade principal maior
k_{x2}	Coeficiente de permeabilidade principal intermediário
k_{x3}	Coeficiente de permeabilidade principal menor
h	Carga hidráulica
u	Pressão neutra
T	Matriz de transmissibilidade
Δh	Variação de carga hidráulica
q_i	Fluxo modal no nó i
E	Operador expectância
Var	Operador variância
Cov	Operador Covariância
ρ	Coeficiente de correlação linear
m_k	Momento de primeira ordem
\underline{m}'_k	Momento de primeira ordem anterior
\underline{m}''_k	Momento de primeira ordem posterior

C_k	Momento de segunda ordem
\underline{C}'_k	Momento de segunda ordem anterior
\underline{C}''_k	Momento de segunda ordem posterior
K	$\log k$
σ_k^2	Variância do logaritmo da permeabilidade
σ_k	Desvio padrão pontual do logaritmo da permeabilidade
Γ_k^2	Fator de redução da variância
U_i	Distância horizontal
V_i	Distância vertical
t_1	Projeção da distância horizontal entre dois pontos genéricos dentro do elemento finito
t_3	Projeção da distância vertical entre dois pontos genéricos dentro do elemento finito
d_1	Escala de flutuação horizontal
d_3	Escala de flutuação vertical
$F_{\underline{Y}}(y)$	Função densidade de probabilidade conjunta
Y	Variável aleatória
X	Variável aleatória
r	Distância entre duas variáveis aleatórias
\bar{Y}_{P_i}	Média ponderada
n	Número de pontos amostrados

P_i	Peso de ponderação
\underline{Z}	Grandeza medida
\underline{a}	Vetor de coeficientes
\underline{b}	Matriz de coeficientes de observações
\underline{v}	Vetor de erros de observações
\underline{S}	Matriz de sensibilidade
$\rho(k)$	Função densidade de probabilidade de k
\underline{V}	Matriz de covariâncias dos erros de observação
σ_v	Desvio padrão dos erros de observação
$f(\underline{Z} \underline{K})$	Distribuição condicional de \underline{Z} dado \underline{K}
d	Escalar independente
EQM	Erro quadrático médio

1 INTRODUÇÃO

A segurança de uma barragem depende de vários fatores que, muitas vezes, se influenciam mutuamente, potencializando ou diminuindo o risco de uma ruptura. O seu projeto, os materiais e as técnicas utilizadas para a sua construção e, ainda, as condições às quais a obra é submetida durante a fase de operação são exemplos destes fatores. Não é possível acreditar que todas as premissas feitas durante a fase de projeto e construção sejam totalmente atendidas, uma vez que as mesmas foram baseadas em previsões de comportamento que podem não se confirmar durante a utilização da obra.

Terzaghi (1929) apud Peck (1969) propôs uma hipótese para explicar comportamentos que não são passíveis de previsão durante as fases de projeto e execução. Segundo o autor, pequenos detalhes geológicos podem ser muito interferentes no comportamento e na segurança de uma barragem. Estes aspectos não podem ser previstos nem pelos resultados de cuidadosas investigações do local de implantação nem pelas médias de uma quantidade razoável de ensaios. Exemplos são a posição exata e a variação da espessura de fissuras da rocha de fundação, a variação de permeabilidade em pequenas camadas de areia grossa e seixos existentes em depósitos aluvionares e outros aspectos similares que, em geral, são de importância geológica secundária.

Uma outra forma de entender a ocorrência desses comportamentos é ponderar que, em obras de engenharia, são utilizados modelos que procuram representar, com a máxima fidelidade possível, o desempenho das estruturas do mundo real. Entretanto, tais modelos são limitados e desta forma, imprecisos. Os parâmetros do modelo precisam ser estimados e, no caso de aterros de barragens, tais estimativas significam prever quais as propriedades finais do solo depois de seu lançamento e compactação (CORNELL, 1971).

Além disso, durante o processo executivo, são introduzidas, involuntariamente, variações espaciais aleatórias de grandezas tais como permeabilidade, resistência, deformabilidade, etc. Estas variações são inerentes ao processo executivo e não é possível eliminá-las completamente. As propriedades dos materiais construtivos, desta forma, só podem ser conhecidas em alguns pontos, onde são realizados ensaios *in situ* ou retiradas amostras para a realização de ensaios de laboratório.

A análise estatística foi então introduzida na Engenharia Geotécnica como uma ferramenta para racionalizar a heterogeneidade observada dos depósitos de solo, a dispersão nos ensaios de campo e de laboratório e a propagação destas incertezas para parâmetros relevantes do projeto (CASTILLO; ALONSO, 1985). Laplace afirmava no prefácio de seu livro "Theorie Analytique des Probabilités" ¹ que uma grande inteligência que conhecesse todas as circunstâncias determinantes de um certo fenômeno poderia não apenas conhecer todo o passado como predizer o futuro. No entanto, Laplace não considerava as probabilidades como uma forma de encarar o acaso e sim, que seria necessário calculá-las simplesmente porque não havia qualquer inteligência excepcional, conhecedora de todas as circunstâncias. O cálculo de probabilidades, então, não teria como finalidade controlar fatos ocasionais, mas somente suprir a falta de informação (VARGAS, 1996).

Um dos interesses primários na introdução desta ferramenta era descrever as propriedades do solo por meio de médias de variáveis aleatórias. O coeficiente de variação era freqüentemente utilizado para descrever a dispersão observada das propriedades do solo. Esta descrição também servia para estabelecer correlações entre diferentes parâmetros, para facilitar a aplicação da Análise de Decisão e, finalmente e mais importante, para oferecer definições alternativas e estimativas de segurança.

¹ LAPLACE, P.S. Theorie Analytique des Probabilités (1812)

Claramente, as propriedades do solo não são aleatórias e sim, espacialmente variáveis. Como as observações somente podem ser feitas em um número finito de locais, algumas hipóteses devem ser adotadas para inferir as propriedades de interesse nos locais não observados. Seguindo a prática corrente, assume-se que as propriedades estatísticas do solo são espacialmente constantes e que uma variabilidade espacial é introduzida por flutuações aleatórias ao redor da média ou de sua tendência (Figura 1.1). Isto é puramente hipotético. A incerteza, na verdade, é dividida em dois componentes artificiais, a flutuação aleatória e o erro de estimativa. A flutuação aleatória é caracterizada por uma variância pontual e pela função de autocorrelação (BAECHER; INGRA, 1981).

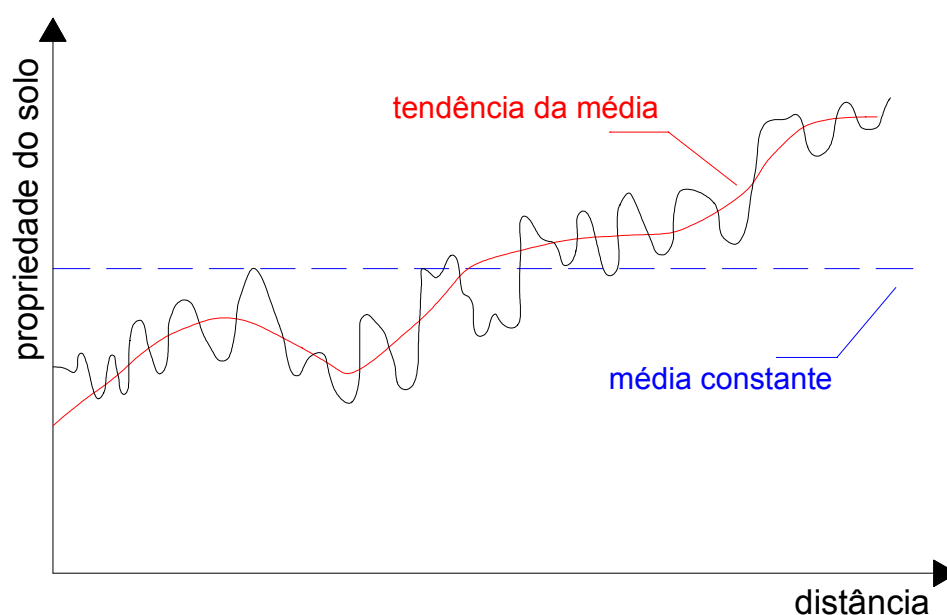


Fig. 1.1 - Modelagem estocástica² da variabilidade do solo pelo comportamento da média e variação aleatória (BAECHER; INGRA, 1985)

Hachich (1981) e Hachich; Vanmarcke (1983) apresentam uma metodologia para a realização de uma retroanálise probabilista com o

² Um modelo estocástico define o processo de interação e a sua natureza que, em princípio, determina as características do processo gerado. Um processo estocástico é um conjunto de variáveis aleatórias (WOLFF, 1988).

objetivo de atualizar os campos de pressões neutras e de permeabilidades, utilizando-se dados de instrumentação instalada em uma barragem. Baseado nos resultados e no método proposto por estes autores, esta dissertação tem como objetivo aplicar tal metodologia em um caso real. No entanto, neste trabalho serão estudados somente os aspectos relacionados à atualização do campo de permeabilidades.

1.1 Modelos e incertezas

Na engenharia moderna, o uso de modelos matemáticos tem aumentado cada vez mais. A engenharia é uma profissão que continuamente coloca os seus profissionais em uma posição de tomada de decisão. Para tomar as melhores decisões, os engenheiros devem estar atentos e ter total entendimento das alternativas de solução disponíveis.

Esta necessidade tem se tornado ainda mais importante na prática profissional, uma vez que os problemas a serem resolvidos têm-se tornado mais importantes para a sociedade e os métodos de projeto, mais complexos (AYYUB; McCUEN, 1996).

O predomínio que a computação eletrônica e a informática alcançaram, não somente na engenharia geotécnica como em todos os outros ramos da engenharia, não teria sido possível sem que, primeiramente, não se tivesse desenvolvido o processo de matematização da natureza, ou seja, as expressões matemáticas que representem os fenômenos naturais, de maneira a possibilitar o seu conhecimento, o seu controle e, obviamente, a sua solução (VARGAS, 1996).

Entretanto, independentemente do nível de sofisticação, estas expressões (modelos) são baseadas em suposições ou condições idealizadas e, por esta razão, as informações obtidas com as mesmas podem ou não refletir a realidade com precisão.

Segundo Ang; Tang (1975), no desenvolvimento de um projeto de engenharia, as decisões são freqüentemente requeridas independentemente

da qualidade ou quantidade de informação e, por isso, devem ser formuladas sob condições de incertezas, levando-se em conta que a consequência de uma decisão tomada não pode ser prevista com completa confiança. Além do fato de que a informação deve ser inferida de circunstâncias similares (ou até mesmo diferentes) ou deve ser derivada de um modelo, muitos problemas envolvem processos e fenômenos naturais que são intrinsecamente aleatórios. Os estudos de tais fenômenos são naturalmente indeterminados e, portanto, não podem ser descritos por relações causa-efeito deterministas. Por estas razões, as decisões necessárias no processo de planejamento e projeto de engenharia devem e são feitas sob condições de incerteza.

Entende-se por incertezas as variabilidades inerentes ao caráter aleatório das grandezas envolvidas, a inadequação do modelo e a insuficiência de dados para estimar os seus parâmetros (BENJAMIN; CORNELL, 1970).

A partir de sua experiência como engenheiro, Terzaghi propôs a utilização de um método que permitisse que as informações obtidas durante a construção servissem de subsídio para a alteração do projeto original conforme o seu progresso. Entretanto, o método observacional só é útil quando o projeto pode ser efetivamente modificado e se os engenheiros responsáveis pela construção traçarem um plano de ações para cada situação desfavorável que possa ser revelada pelas observações (PECK, 1969). Deste modo, o método observacional pode ser utilizado para lidar com as incertezas inerentes ao projeto.

Os efeitos das incertezas no projeto são importantes. Entretanto, a sua quantificação e a estimativa de seus efeitos no projeto, desempenho e na segurança de um sistema de engenharia devem incluir conceitos e métodos probabilistas, os quais têm um papel importante na quantificação do método observacional. Além disso, sob condições de incerteza, o projeto de engenharia envolve riscos e as decisões devem ser relacionadas com avaliações risco-benefício. Neste caso, o custo previsto para a obra passa a

ter dois componentes:

- O custo direto ou custo inicial (que pode ser considerado aproximadamente determinista) que depende apenas da escolha de uma determinada alternativa; e
- O custo indireto (probabilista), ou seja, o custo que pode ser gerado pela eventual ocorrência de uma situação indesejada multiplicado pela probabilidade de ocorrência de tal situação.

A elaboração de um projeto de engenharia e, neste caso, de uma barragem, passa por algumas etapas que podem ser agrupadas em Anteprojeto e Projeto Definitivo.

Na fase de Anteprojeto, a estrutura é concebida com base no conhecimento já adquirido, na análise das ações atuantes, na análise das características mecânicas de resistência e deformabilidade dos materiais estruturais e na sistematização e normalização dos métodos de introdução da segurança.

Assim, pode-se definir os critérios de projeto, as possíveis alternativas e os pré-dimensionamentos correspondentes. A seguir, para cada alternativa, é feita uma análise simplificada do comportamento mecânico da estrutura, a fim de verificar se os critérios de projeto estabelecidos podem ser satisfeitos e, ainda mais, a fim de otimizar as suas formas e dimensões.

Deste estudo, decorre a estrutura mais conveniente para o empreendimento, do ponto de vista de viabilidade técnico-econômica global.

Na fase do Projeto Definitivo, desenvolve-se o projeto executivo da estrutura escolhido, sofrendo, ao longo do processo, alguns ajustes de forma e dimensões, de modo a aprimorar a otimização anterior e de maneira a adaptá-la a eventuais fatos constatados ao longo da execução.

Pelo fato de quase todas as atividades de projeto serem anteriores à execução da obra, a análise do seu comportamento precisa ser feita

utilizando-se modelos (físicos ou matemáticos) concebidos através da teorização da geometria da estrutura real e das propriedades dos materiais estruturais utilizados.

Estes modelos devem ser solicitados por ações, que também são definidas por uma teorização das reais ações que deverão solicitar a obra, de tal modo que, simulando o seu comportamento mecânico, permitam ao engenheiro compreender e prever esse comportamento e, desta forma, projetar a estrutura.

Estabelecida a representação da combinação das ações cujos efeitos estruturais devam ser obtidos, e ainda, estabelecido o modelo capaz de simular convenientemente o comportamento mecânico da estrutura real, na condição de carregamento considerada, restam duas opções de análise: construir um modelo matemático da estrutura real através de métodos de análise numérica ou construir um modelo físico da estrutura real (DE ZAGOTTIS, 1976). Para o desenvolvimento deste trabalho, escolheu-se a primeira opção, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos - MEF.

Análises geotécnicas, baseadas nas propriedades do solo obtidas através de ensaios e que levam a previsões do comportamento da obra, incorporam incertezas de várias naturezas. Porém, nem todas as incertezas podem ser tratadas de maneira formal ou objetivamente. Por exemplo, as condições geológicas são obtidas intuitivamente e, desta forma, as incertezas associadas são, obrigatoriamente, subjetivas. Outros tipos de incertezas, entretanto, são obtidas de maneira dedutiva e, portanto, são passíveis de tratamento formal (BAECHER, 1983).

1.2 Observações e retroanálise

Os valores estimados para um dado parâmetro de um modelo, baseados em dados observacionais, geram erros e quanto menor a base de dados, maior será a magnitude dos erros envolvidos. De fato, em alguns casos, tais estimativas não poderiam ser muito melhores do que "palpites

direcionados", baseados grandemente na experiência do engenheiro (ANG; TANG, 1975).

As incertezas associadas aos parâmetros de projeto podem ser estimadas em termos estatísticos e a análise da sua influência no projeto de engenharia pode ser alcançada usando os conceitos e métodos da Teoria das Probabilidades.

De acordo com Hachich (1981), a análise das incertezas associadas ao modelo não pode ser feita da mesma forma que a análise das incertezas dos parâmetros. O principal motivo é a impossibilidade de isolar as incertezas do modelo do total de incertezas do problema.

Por isto, o método observacional pode ser sugerido para esta análise. Durante o período de projeto, o comportamento da obra é estimado através de vários modelos os quais representam uma série de hipóteses de trabalho. A instrumentação instalada na barragem tem como uma de suas funções procurar validar estes modelos. Entretanto, é fundamental que exista uma interpretação da resposta destes instrumentos flexível o suficiente para permitir ajustes no modelo e, se possível, permitir alarmes contra desvios das hipóteses de trabalho previamente adotadas.

A formalização probabilista do método observacional permite ao engenheiro identificar os desvios mais prováveis das hipóteses de trabalho embutidas no modelo e, conseqüentemente, examinar os dados disponíveis supondo outras hipóteses diferentes das utilizadas no projeto.

A experiência do engenheiro nunca deve ser excluída desta análise, pois o método apenas o auxilia a decidir quais são as hipóteses mais compatíveis com o estado da natureza, de acordo com os dados disponíveis (HACHICH, 1981).

No caso de obras hidráulicas, pode-se também admitir a existência de incertezas associadas às pressões neutras, uma vez que não é possível determinar os seus valores reais em locais e tempos determinados.

Comumente, o projeto de uma barragem de terra leva em conta a influência do tempo nos valores da pressão neutra através da checagem da segurança da estrutura em algumas condições críticas, consideradas como estáticas: o final de construção, percolação permanente e rebaixamento rápido do reservatório. Entretanto, nota-se que existe um grande número de rupturas ocorridas durante o primeiro enchimento do reservatório (BAECHER; PATÉ; DE NEUFVILLE, 1980), quando estão ocorrendo fenômenos transientes como a dissipação das pressões neutras (positivas ou negativas) de construção e a saturação do maciço, que tende a estabelecer uma rede de fluxo estacionária.

O estudo apresentado neste trabalho não inclui, entretanto, a variável tempo na determinação das incertezas associadas à pressão neutra. Isto porque a barragem na qual a metodologia será aplicada já está em operação há cerca de 25 anos e, portanto, pode-se considerar que já atingiu um regime permanente de percolação. Contudo, a variabilidade espacial destas pressões será tratada.

O aterro de uma barragem nunca é perfeitamente homogêneo, principalmente devido a diferenças nos processos de compactação, dos materiais de empréstimo e do seu teor de umidade, que variam de camada para camada fazendo com que a permeabilidade também varie localmente (HACHICH, 1981). Esta variabilidade da permeabilidade é a fonte das incertezas associadas à pressão neutra.

Em geral, análises de percolação são processadas durante a fase de projeto quando se quer ter uma estimativa do nível de pressões neutras a que estarão sujeitos o maciço e a fundação, ou, ainda, em situações especiais tais como rebaixamentos rápidos do reservatório ou período de chuvas excepcionais. Estas condições limites permitem aos projetistas determinarem o nível de segurança da barragem para que a tomada de decisões sobre a evacuação da população a jusante ou as manobras de comportas em situações emergenciais, por exemplo, seja feita com mais segurança.

Uma outra aplicação da análise de percolação está relacionada a retroanálises probabilistas, uma vez que a mesma permite que os campos de permeabilidades e de pressões neutras sejam atualizados com base nos resultados da instrumentação instalada.

É necessário ter em mente que são muito pequenas as chances de se ter um piezômetro instalado no local certo e a leitura ser feita no momento certo de maneira a se detectar pressões neutras elevadas a ponto de pôr em risco a estabilidade da estrutura, embora o desenvolvimento da aquisição automática de dados tenha permitido diminuir sensivelmente o intervalo entre leituras consecutivas.

Em geral, os piezômetros são instalados durante a construção do maciço e existe um tempo de resposta entre a sua instalação e as primeiras leituras, bem como cada tipo de piezômetro apresenta um tempo de resposta diferente para as variações das pressões neutras no maciço mesmo quando já se atingiu um estado de fluxo permanente.

Apesar da instrumentação não constituir a solução para todos os problemas, a sua utilidade é inegável, quando convenientemente projetada, instalada e interpretada, não apenas para a avaliação da segurança de uma estrutura, mas também para a verificação de hipóteses adotadas em projeto, com o objetivo de tornar as obras mais econômicas dentro das necessárias condições de segurança.

O valor da instrumentação não está associado somente a obras que apresentam comportamentos não previstos, indicando a necessidade de medidas reparadoras ou acerto das hipóteses de projeto, mas também à indicação da ocorrência de condições seguras mesmo em face de solicitações extremas atuantes ou da discordância das hipóteses de cálculo com a realidade (DA CRUZ, 1996).

"A instrumentação das obras têm uma importância permanente e mesmo crescente, quer para verificar as previsões dos modelos matemáticos, continuando a aumentar assim a sua concepção e a sua aplicação, quer para controlar o comportamento da obra" (DE ZAGOTTIS, 1976).

O chamado *basic time lag* (HANNA, 1985; MASSAD, 1980) é variável para cada tipo de piezômetro. Os chamados piezômetros de tubo aberto, por exemplo, o tipo Casagrande, apresentam um *time lag* maior, o que requer que a rede de fluxo já tenha se estabelecido antes de se obter uma leitura confiável. Já os piezômetros de membrana ou corda vibrante tais como os elétricos e pneumáticos reduzem a necessidade do fluxo estacionário e, quando devidamente projetados, podem ser utilizados para detectar pressões neutras negativas (DA CRUZ, 1996).

Contudo, o instrumento perfeito seria aquele que, além de instalado no local exato, fosse capaz de fornecer leituras precisas e plenamente confiáveis, ou seja, sem que houvesse incertezas associadas. Este instrumento não existe e, por isso, o que se pode fazer é utilizar os dados fornecidos pelos instrumentos disponíveis de maneira a melhorar estimativas de projeto e, dentro do possível, reduzir as incertezas associadas a grandezas como as permeabilidades dos materiais utilizados na construção de uma barragem, quer sejam da fundação ou do próprio maciço de terra.

2 ESTABELECIMENTO DE MODELOS

Um modelo pode ser encarado como uma abstração de algum problema do mundo real através da teorização e da adoção de hipóteses e simplificações que visam permitir a sua representação de maneira "tratável", mas ainda assim, sendo o mais fiel possível à realidade.

A partir deste ponto, a palavra modelo será utilizada para designar um modelo numérico, a menos que seja indicado de outra maneira. Portanto, neste trabalho, pode-se entender que o modelo será constituído por:

- Princípios básicos da conservação de energia e de massa que, combinados com a Lei de Darcy, levam à Equação de Laplace (teoria escolhida para explicar o fenômeno e as equações derivadas desta teoria);
- O Método dos Elementos Finitos (MEF) para auxiliar na resolução da própria equação de Laplace (procedimento numérico escolhido para resolver as equações envolvidas); e
- A escolha das seções transversais para análise da percolação, a definição da geometria e dos materiais envolvidos e as condições iniciais e de contorno.

2.1 Modelos de fluxo d'água em meios porosos

A permeabilidade de um meio pode ser considerada como a facilidade que ele oferece à passagem de um fluido por seus poros ou vazios. Portanto, quanto a maior a permeabilidade, maior é a facilidade de deslocamento do fluido no meio em que está contido (DA CRUZ, 1996).

Nenhuma outra propriedade de material de construção é tão variável quanto a permeabilidade. De fato, a sua variação é tal que o seu significado físico quase sempre é de difícil compreensão e as velocidades da água percolada são sujeitas a variações ainda maiores (CEDERGREN, 1967;

SMITH, 1986; MASSAD, 2003).

As propriedades hidráulicas dos solos são espacialmente variáveis e podem flutuar significativamente dentro de pequenas distâncias. Benson; Daniel (1994) apresentam o resultado de ensaios realizados por Rogowski (1990) em solos compactados que evidenciam as flutuações significativas na permeabilidade do solo ensaiado. Como resultado destas flutuações, a permeabilidade em qualquer ponto da camada compactada é sujeita à incerteza. Análises determinísticas da variabilidade espacial do solo não conseguem incorporar de maneira adequada este tipo de incerteza. No entanto, através da modelagem probabilística, é possível incorporar matematicamente tanto a variabilidade quanto a incerteza associada à permeabilidade.

Tabela 2.1 - Permeabilidades típicas de variados materiais (DA CRUZ, 1996)

Tipo de material	Permeabilidade (cm/s)
Areias finas	10^{-3}
Areias médias	10^{-2}
Areias grossas	10^{-2} a $5,0 \times 10^{-2}$
Argilas marinhas	10^{-8}
Argilas sedimentares	10^{-7} a 10^{-8}
Concreto	10^{-9}
Enrocamento sem finos	10^0
Enrocamento com finos	10^{-3}
Pedregulhos	10^{-1}
Rochas alteradas	10^{-6}
Rocha maciça com fissuras de 0,1 mm/m	4×10^{-3}
Rochas maciças	10^{-9} a 10^{-10}
Siltes	10^{-6}
Solos compactados (k_h)	10^{-4} a 10^{-6}
Solos compactados (k_v)	10^{-7}
Solos porosos	10^{-2} a 10^{-4}

Na Lei de Darcy, o coeficiente de permeabilidade k pode ser interpretado como a velocidade de escoamento por área unitária sob um gradiente hidráulico unitário.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.1)$$

Q é a vazão percolada na seção transversal de área A, normal à direção do fluxo, e sob gradiente hidráulico i. Esta lei foi originalmente concebida para fluxo unidimensional e laminar.

O fluxo d'água através do solo pode ser representado pela equação de Laplace, cujas hipóteses são:

- Conservação de energia;
- Conservação de massa;
- Solo homogêneo;
- Vazios completamente preenchidos por água;
- Não há consolidação ou expansão do solo;
- O solo e a água são incompressíveis; e
- Fluxo laminar e validade da Lei de Darcy (eq. 2.1).

Com essas hipóteses, a equação de Laplace assume a seguinte forma:

$$k_{x_1} \frac{\partial^2 h}{\partial x_1^2} + k_{x_2} \frac{\partial^2 h}{\partial x_2^2} + k_{x_3} \frac{\partial^2 h}{\partial x_3^2} = 0 \quad (2.2)$$

sendo x_1, x_2, x_3 as coordenadas de um sistema orientado segundo as direções principais de permeabilidade e h, o vetor $h(x_1, x_2, x_3)$. A solução da equação 2.2, estando os eixos coordenados orientados segundo as direções principais de permeabilidade, pode ser representada por duas famílias de curvas que se interceptam com ângulo reto, formando a chamada rede de fluxo, que é uma das formas de se apresentar a solução da equação de Laplace.

As linhas de fluxo representam os caminhos ao longo dos quais a água pode escoar através da seção transversal e as linhas equipotenciais são o lugar geométrico dos pontos de mesma quantidade de energia ou carga hidráulica.

2.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Devido às dificuldades introduzidas por sua não linearidade geométrica (eq. 2.3), os problemas de superfície livre podem ser solucionados analiticamente apenas para casos simples, muito particulares. Para que situações mais complexas possam ser analisadas, é necessário que se adote algum método numérico baseado na discretização do domínio de percolação. Entre os vários métodos disponíveis, o MEF ainda é, provavelmente, o mais utilizado.

$$\underline{T}(\underline{h}) \cdot \underline{h} = \underline{q} \quad (2.3)$$

Uma análise de percolação através do MEF é feita em três passos. O primeiro é modelar o problema. Isto envolve desenhar a malha de elementos finitos, determinar as propriedades dos materiais envolvidos e especificar as condições de contorno. O segundo passo é processar o modelo através da formulação e solução do sistema de equações de elementos finitos. O terceiro passo é a interpretação dos resultados (cargas hidráulicas, pressões neutras, gradientes e vazões).

As informações básicas necessárias para o processamento são as condições de contorno e as propriedades de permeabilidade dos materiais envolvidos (além, é claro, de informações geométricas e geotécnicas).

Uma das regras mais importantes a seguir durante a modelagem da malha é iniciá-la a partir de um modelo simples e evoluir para um modelo mais complexo. Esta seqüência facilita a detecção de pontos que possam estar causando a dificuldade de convergência do modelo. Determinar quais as causas para um resultado irreal pode ser muito difícil se todas as

complexidades do problema estão inclusas no modelo inicial. Além disso, no MEF, é importante que os resultados obtidos sejam de alguma forma coerentes com os resultados obtidos por cálculos simplistas feitos a mão (GEO-SLOPE, 2002).

Para este trabalho, escolheu-se utilizar o software SEEP/W da empresa canadense Geo-Slope International que utiliza o MEF (com geometria da malha fixa) para determinar a solução da eq. 2.2.

Dentro do MEF aplicado a problemas de percolação, existem vários processos para a resolução dos sistemas de equações diferenciais, podendo-se dividi-los em dois grupos: os de malha variável e os de malha fixa.

Nos problemas de malha variável, a geometria da malha de elementos finitos é modificada durante o processo iterativo de solução de maneira que, no final das iterações, parte do contorno da malha representa o formato "correto" da superfície livre. Em geral, esta forma de solução é muito precisa, mas apresenta algumas limitações. Em particular, problemas de estabilidade podem aparecer na presença de geometrias mais complexas (como, por exemplo, camadas com interfaces praticamente horizontais) ou quando a intersecção entre a superfície livre e um contorno permeável exposto à atmosfera (por exemplo, o talude de jusante de uma barragem) precisa ser determinada (GIODA; DESIDERI, 1988).

Uma das técnicas aplicadas a estes tipos de problema, apresentada por Taylor; Brown (1967), consiste de processos iterativos que modificam a malha a partir daqueles elementos cujas fronteiras coincidam com a superfície livre até que uma aproximação adequada do formato do domínio de fluxo seja estabelecida.

No começo de cada iteração, resolve-se uma análise confinada baseada na geometria obtida na iteração anterior na qual a superfície livre é tratada como um contorno impermeável. Se o formato desta superfície não

for o correto, os cálculos indicam cargas hidráulicas nos nós da freática diferentes da sua elevação. Portanto, os nós da superfície livre são movidos de forma que a sua elevação seja igual à carga hidráulica previamente calculada, a fim de atender à condição de que as pressões devem ser nulas na linha freática. A nova geometria obtida será utilizada na próxima iteração.

Esta solução apresenta uma ambigüidade na definição do movimento do nó localizado na intersecção entre a superfície livre e o ponto de sua saída no talude de jusante (linha 3-4 da figura 2.1). Este ponto tem, em geral, uma vazão diferente de zero, mesmo que pertença à superfície livre. Conseqüentemente, durante a análise confinada, uma condição de contorno diferente deve ser aplicada (deve-se permitir que exista vazão) e o procedimento adotado para o deslocamento dos outros pontos não pode ser aplicado. Segundo os autores, este problema pode ser minimizado reduzindo o tamanho da malha.

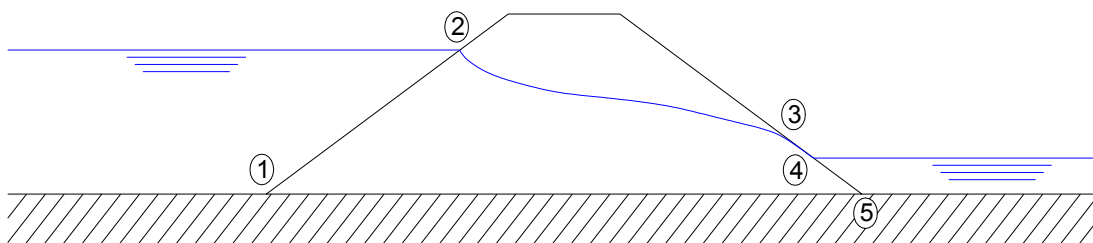


Fig. 2.1 - Fluxo não confinado através de uma barragem de terra (GIODA; DESIDERI, 1988)

Um outro método foi apresentado por Neuman; Witherspoon (1970; 1971), o qual requer duas análises confinadas para cada iteração.

Na primeira análise, a superfície livre é considerada como um contorno permeável e a carga hidráulica nos seus nós é estipulada igual à sua elevação. A partir dos resultados calculados, as vazões obtidas nos nós da superfície livre que coincidem com o talude de jusante são determinadas.

Então, uma segunda análise confinada é realizada na qual a superfície livre é impermeável e nos pontos coincidentes com o talude de jusante, são impostas as vazões previamente calculadas.

Finalmente, a malha é modificada fazendo com que a elevação dos nós da superfície livre seja igual à correspondente carga hidráulica obtida a partir da segunda análise.

Este procedimento, segundo os próprios autores, também apresenta algumas dificuldades relativas ao nó de saída da superfície livre. De fato, durante a primeira análise, o fluxo determinado para este nó corresponde à contribuição tanto da superfície livre quanto da face de percolação (linha 3-4 da figura 2.1). Na segunda análise, entretanto, apenas a parte correspondente à face de percolação deve ser aplicada ao nó de saída. Este problema pode ser eliminado utilizando-se elementos bem pequenos e impondo ao nó de saída uma vazão igual à metade da imposta ao nó adjacente.

No caso das soluções chamadas de malha fixa, a geometria da malha de elementos finitos é constante e permite que a superfície livre passe através de seus elementos por meio de procedimentos que, em muitos casos, são conceitualmente similares àqueles adotados para análises de tensões não lineares ou elasto-plásticas. Esta forma de solução leva a resultados menos precisos que o processo anterior. Por outro lado, eles exigem menos mão-de-obra de programação para sua implementação e, portanto, podem ser facilmente aplicados a problemas envolvendo meios não homogêneos ou estratificados (GIODA; DESIDERI, 1988).

Um primeiro método, proposto por Desai (1976), é o chamado de fluxo residual. Esta solução permite que a freática passe através dos elementos aplicando a alguns nós da malha um "fluxo residual" determinado de maneira que duas condições de contorno na superfície livre sejam satisfeitas simultaneamente, pelo menos na média. Este método requer que a malha contenha uma área de meio poroso maior do que aquela em que o

fluxo de percolação acontece.

No caso de problemas de fluxo permanente, o processo iterativo é iniciado realizando-se uma análise confinada na qual as condições de contorno permeável ou impermeável são aplicadas apenas ao contorno da malha e não aos seus nós internos.

As cargas hidráulicas obtidas nos nós são utilizadas para determinar quais elementos são atravessados pela linha $h=y(x)$, a qual representa uma primeira aproximação da superfície freática. Esta linha apenas satisfaz a condição de carga hidráulica igual à elevação, sendo ainda necessário respeitar a condição de velocidade normal nula. Para tanto, é necessário determinar a velocidade de fluxo v_n normal aos segmentos da superfície freática e aplicar aos seus nós um fluxo residual que produza uma vazão igual à associada à v_n , mas com sentido contrário.

Determina-se um novo vetor de cargas hidráulicas aplicando-se o referido fluxo residual. Isto levará a uma aproximação mais refinada da geometria da linha freática e a um novo vetor de fluxo residual. O processo iterativo continua até que as mudanças na geometria da superfície livre (linha freática) tornem-se desprezíveis.

Um outro método desenvolvido para a malha fixa é chamado de permeabilidade variável. Quando aplicado em condições permanentes, este procedimento troca a não linearidade geométrica intrínseca dos problemas de superfície livre por uma relação não linear entre a pressão neutra e o coeficiente de permeabilidade (BATHE; KHOSHGOFTAAR, 1979; DESAI; LI, 1983). Um pequeno valor de permeabilidade (próximo de zero) é assumido quando a pressão neutra torna-se igual ou diminui abaixo da pressão atmosférica. A geometria real da linha freática é então determinada através de um procedimento conceitualmente similar àquele utilizado para determinar a fronteira entre as zonas elástica e plástica em análises não lineares de tensões.

A figura 2.2 apresenta uma relação idealizada entre o coeficiente de permeabilidade e a pressão neutra.

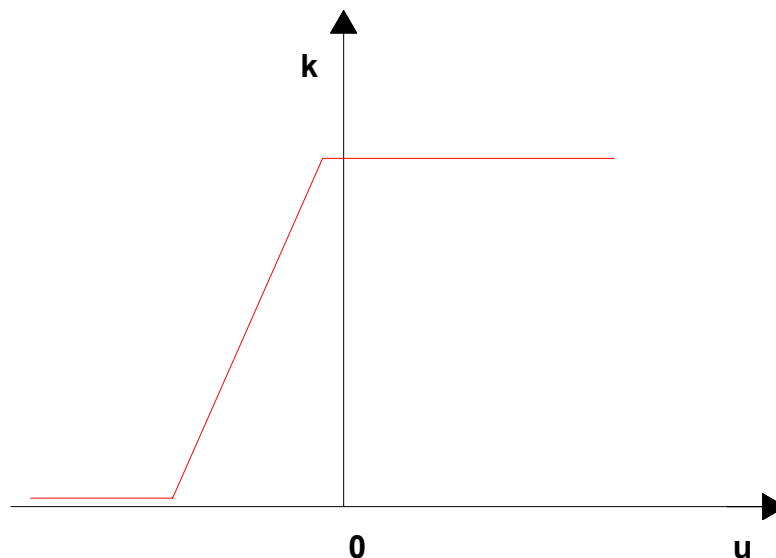


Fig. 2.2 - Curva idealizada de relação entre a permeabilidade e a pressão neutra (GIODA; DESIDERI, 1988)

A solução do problema de material não linear (a permeabilidade e a pressão neutra apresentam uma relação não linear) pode ser obtida modificando-se o chamado esquema de Newton. Este esquema leva a um processo iterativo no qual a matriz de fluxo deve ser determinada e triangularizada apenas uma vez, com a conseqüente redução do tempo de processamento.

Depois de determinar a distribuição inicial das cargas hidráulicas nos nós, através de uma análise confinada preliminar, obtém-se uma primeira aproximação da linha freática utilizando-se o mesmo procedimento descrito anteriormente. Então, a carga hidráulica é avaliada nos pontos dos elementos utilizados na integração numérica da matriz de transmissibilidade \underline{I} (apresentada com mais detalhes adiante, de acordo com a eq. 2.4).

A permeabilidade associada a cada ponto de integração é avaliada de acordo com a curva k versus u conforme a figura 2.2 e com a matriz de transmissibilidade. A variação das cargas hidráulicas nodais para a n -ésima

iteração é determinada resolvendo-se a seguinte equação:

$$\underline{T} \cdot \Delta \underline{h}_i = \underline{q} - \underline{q}_i \quad (2.4)$$

onde os fluxos nodais \underline{q}_i são avaliados com base na matriz de transmissibilidade \underline{T} e da carga hidráulica computada no final da iteração anterior. Deste modo, a nova carga hidráulica a ser utilizada na próxima iteração será:

$$\underline{h}_i = \underline{h}_{i-1} + \Delta \underline{h}_i \quad (2.5)$$

Este último procedimento descrito apresenta a desvantagem de ter a mesma ambigüidade que afeta os métodos de malha variável.

2.3 Incertezas do modelo e incertezas dos parâmetros

Uma vez que o domínio de percolação tenha sido estabelecido e discretizado em "r" elementos e "n" pontos de cargas nodais, a eq. 2.2 pode ser transformada para o seguinte sistema linear:

$$\underline{T} \cdot \underline{h} = \underline{q} \quad (2.6)$$

onde \underline{T} é a matriz de transmissibilidade, \underline{h} é o vetor de cargas nodais e \underline{q} é o vetor dos fluxos nodais impostos. Cada um dos valores de \underline{T} é uma soma de contribuições, função da permeabilidade e da geometria de cada elemento em torno do ponto nodal. Os problemas de superfície livre são, portanto, não-lineares, pois \underline{T} depende de \underline{h} , conforme mostrado pela eq. 2.3.

Deve-se reforçar a informação de que a relação entre as permeabilidades dos elementos e as cargas hidráulicas nos nós não é linear mesmo para o caso de problemas com fluxo confinado (eq. 2.6). Além disso, outro fato que deve ser destacado é que a discretização em elementos finitos traz uma mudança nos parâmetros do modelo, já que eles deixam de ser valores pontuais e passam a ser médias espaciais sobre cada um dos elementos.

Portanto, as equações do modelo escolhido envolvem parâmetros que descrevem as características inerentes da média. Substituindo-os por valores apropriados, o modelo pode ser utilizado para se obter uma resposta tal como as cargas hidráulicas (valores de saída) resultantes das cargas ou vazões impostas no contorno (valores de entrada) (HACHICH, 1981).

As incertezas associadas aos valores de saída originam-se das incertezas dos valores de entrada, dos parâmetros do modelo e do próprio modelo. Assumindo-se uma condição de regime permanente, as incertezas nos valores de entrada (por exemplo, determinados pelo nível do reservatório) são geralmente desprezíveis quando comparadas com as incertezas dos parâmetros e do modelo.

Neste trabalho, para a atualização do campo estocástico de permeabilidades, apenas as incertezas nos parâmetros serão consideradas e estes se resumem apenas às permeabilidades dos materiais envolvidos na análise.

A permeabilidade $\underline{k}(\underline{x})$ representa um tensor da permeabilidade de um determinado ponto e que, em termos das direções principais, pode ser descrito da seguinte forma:

$$\underline{k}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} k_1(\underline{x}) & 0 & 0 \\ 0 & k_2(\underline{x}) & 0 \\ 0 & 0 & k_3(\underline{x}) \end{bmatrix} \quad \text{com } k_1(\underline{x}) \geq k_2(\underline{x}) \geq k_3(\underline{x}) \quad (2.7)$$

onde $\underline{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ é o vetor de posição do ponto considerado.

Por causa da natureza das variáveis aleatórias ($k_1(\underline{x})$, $k_2(\underline{x})$ e $k_3(\underline{x})$ e suas direções), não é possível prever o exato valor que elas irão assumir em um dado local, mas a descrição completa do seu comportamento está contida em uma lei probabilista. Como essas variáveis também não são independentes entre si, seria necessário conhecer a sua distribuição conjunta. Muitas vezes, esta informação não está disponível ou não é

necessária. Descrições baseadas nos momentos de primeira e segunda ordens (médias e covariâncias), que, em geral, apresentam as informações mais relevantes sobre o processo, são mais fáceis de se obter e até mesmo de se trabalhar (BENJAMIN; CORNELL, 1970).

Devido à linearização da relação entre as permeabilidades e as cargas nodais que será feita adiante, a variável aleatória $\underline{k}(\underline{x})$ será substituída pela variável $\underline{K}(\underline{x}) = \log \underline{k}(\underline{x})$. Outras simplificações serão feitas de maneira a tornar o problema tratável. A metodologia proposta por Hachich (1981) permite que se assumam as seguintes hipóteses:

- As direções das permeabilidades principais são determinísticas;
- $E[K_1] \cong E[K_2]$;
- $\text{Var}[K_1] \cong \text{Var}[K_2]$; e
- $\rho[K_1, K_3] \cong \rho[K_2, K_3]$ e $\rho[K_1, K_2] \cong 1$.

Os operadores $E[\underline{K}]$ e $\text{Cov}[\underline{K}, \underline{K}]$ são os momentos de primeira e segunda ordens, respectivamente, da variável aleatória \underline{K} e podem ser descritos da seguinte maneira:

$$E[\underline{K}] = \begin{Bmatrix} E[K_1] \\ E[K_2] \\ E[K_3] \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\text{Cov}[\underline{K}, \underline{K}] = \begin{Bmatrix} \text{Var}[K_1] & \text{Cov}[K_1, K_2] & \text{Cov}[K_1, K_3] \\ & \text{Var}[K_2] & \text{Cov}[K_2, K_3] \\ \text{Sim.} & & \text{Var}[K_3] \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

onde $\text{Cov}[K_i, K_j] = \rho[K_i, K_j] \cdot \sqrt{\text{Var}[K_i] \cdot \text{Var}[K_j]}$ e $\rho[K_i, K_j]$ é o coeficiente de correlação linear entre as variáveis aleatórias K_i e K_j , com $i \neq j$. É importante frisar que a referência explícita ao vetor de posição \underline{x} foi removida apenas para facilidade de notação. No entanto, as variáveis que representam as

permeabilidades continuam sendo pontuais.

Portanto, partindo das hipóteses assumidas e da descrição dos momentos de primeira e segunda ordens, tem-se para o estudo em duas dimensões (seção transversal; $\underline{x} = [x_1 \quad x_3]^T$):

$$E[\underline{K}] = \begin{Bmatrix} E[K_1] \\ E[K_3] \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

$$Cov[\underline{K}, \underline{K}] = \begin{Bmatrix} Var[K_1] & Cov[K_1, K_3] \\ Sim. & Var[K_3] \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

Um certo grau de correlação entre K_1 e K_3 é esperado. Lambe e Whitman (1979) afirmam que, dependendo do processo de compactação, são usuais relações de permeabilidade K_1/K_3 que variam entre 2 e 10. Será assumido aqui que uma das duas permeabilidades é determinística, fazendo com que o tensor das permeabilidades passe a ser apenas um escalar em cada ponto do domínio de percolação. Portanto, o problema passa a ter apenas uma variável aleatória que pode ser entendida como $K_1(\underline{x})$ ou $K_3(\underline{x})$.

Deste modo, o campo estocástico das permeabilidades, em termos de momentos de primeira e segunda ordens, pode ser assim apresentados:

$$m_K(\underline{x}) = E[K(\underline{x})] \quad (2.12)$$

$$C_K(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = E\{[K(\underline{x}_i) - m_K(\underline{x}_i)][K(\underline{x}_j) - m_K(\underline{x}_j)]\} \quad (2.13)$$

Os vetores \underline{x}_i e \underline{x}_j são vetores de posição que representam dois pontos genéricos dentro do campo estocástico para os quais $C_K(\underline{x}_i, \underline{x}_i)$ e $C_K(\underline{x}_j, \underline{x}_j)$ representam as variâncias das permeabilidades nestes pontos. A covariância entre dois pontos genéricos $C_K(\underline{x}_i, \underline{x}_j)$ pode ser assim representada:

$$\rho(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = \frac{C_K(\underline{x}_i, \underline{x}_j)}{\sqrt{C_K(\underline{x}_i, \underline{x}_i) \cdot C_K(\underline{x}_j, \underline{x}_j)}} \quad (2.14)$$

que é o já apresentado coeficiente de correlação linear das permeabilidades nos pontos \underline{x}_i e \underline{x}_j .

3 RETROANÁLISE PROBABILISTA

Conforme já visto anteriormente, a permeabilidade é uma grandeza que apresenta uma variabilidade significativa, mesmo para o caso de solos compactados (como os utilizados em aterros de barragens), quando se tem a possibilidade de exercer um certo controle sobre as suas características finais, quer sejam resistência, deformabilidade, permeabilidade e outras julgadas de interesse de acordo com o uso da obra.

Durante a fase de projeto, vários ensaios são realizados com os materiais a serem utilizados na construção do maciço a fim de se determinar as características citadas acima. Os resultados então obtidos são assumidos como valores verdadeiros para fins de projeto.

Entretanto, na maioria das vezes, os valores de projeto não representam exatamente os valores reais e, desta forma, para que se garanta um controle eficiente e econômico das estruturas, é aconselhável proceder a revisão dos parâmetros de projeto.

A chamada estatística *bayesiana* utiliza todas as ferramentas da estatística clássica, porém, ela aceita que o grau de confiança que o engenheiro (ou qualquer outro profissional) possui em relação à ocorrência de um determinado evento seja utilizado como a probabilidade de ocorrência de tal evento enquanto para a estatística clássica (ou freqüentista) probabilidade é, necessariamente, definida como uma freqüência relativa.

Além disso, em termos de estimativas, a óptica *bayesiana* admite que um parâmetro é uma variável aleatória, enquanto no caso dos freqüentistas, um parâmetro é apenas uma constante desconhecida. A interpretação *bayesiana* vem ao encontro da metodologia utilizada nesta dissertação. Algumas outras vantagens de se utilizar a retroanálise *bayesiana* são:

- um modelo conceitual pode ser estabelecido de acordo com as informações de várias fontes, quer sejam através de medições diretas ou indiretas que combinadas podem fornecer uma estimativa geral do parâmetro do solo em questão;
- as informações não mensuráveis provenientes da opinião subjetiva ou experiência do engenheiro podem ser incorporadas, através de informações probabilísticas adicionais, para prever os parâmetros do solo; e
- a escolha entre ensaios de campo ou laboratório, por exemplo, pode ser baseada em relações custo-benefício e na variabilidade dos dados obtidos em cada uma das alternativas (TANG, 1971).

O modelo linear de observação apresentado por Hachich (1981), que relaciona permeabilidades e leituras de piezômetros, será o adotado nas análises a serem desenvolvidas nesta dissertação.

3.1 Modelo linear de observação

A determinação da permeabilidade é feita, em geral, através de ensaios de laboratório ou *in situ*, sendo que estes últimos apresentam resultados mais próximos dos reais. Contudo, devido ao próprio método de obtenção, tais medidas são imprecisas e podem ser melhoradas.

Os piezômetros são instrumentos que medem a pressão neutra no local onde estão instalados e, apesar de não fornecerem informações diretas sobre a permeabilidade do meio, permitem que sejam feitas algumas inferências a seu respeito. Para tanto, faz-se necessário desenvolver um modelo probabilístico que represente a relação entre estas duas grandezas, ou seja, um modelo observacional.

A formulação de análises dentro de uma visão probabilística tem vantagens significativas. Por exemplo, os erros nas observações e a

confiabilidade dos parâmetros estimados podem ser considerados de uma maneira consistente e, além disso, é possível adicionar novas informações para a estimativa dos parâmetros de uma maneira direta. O problema pode, então, ser formulado sob a óptica *bayesiana* na qual, parâmetros desconhecidos do solo, \underline{U} , são considerados como variáveis aleatórias e sua estimativa será obtida maximizando a função densidade de probabilidade de \underline{U} dada uma certa grandeza medida \underline{Z} (LEDESMA; GENS; ALONSO, 1989).

No caso dos piezômetros pneumáticos, a leitura obtida representa valores de pressões neutras. Porém, a variável que será relacionada com a permeabilidade será carga hidráulica e, portanto, é necessário fazer a seguinte transformação:

$$Z(\underline{x}_i) = a(\underline{x}_i) + b(\underline{x}_i).h(\underline{x}_i) + v(\underline{x}_i) \quad (3.1)$$

onde $Z(\underline{x}_i)$ é a grandeza medida (pressão neutra), $a(\underline{x}_i)$ é o vetor de coeficientes lineares, $b(\underline{x}_i)$ é a matriz de coeficientes angulares, $h(\underline{x}_i)$ é o vetor de cargas hidráulicas e $v(\underline{x}_i)$ é o vetor de erros de observação, com média e $\text{Cov}[H, v]$ nulas.

A eq. 3.1 representa, na verdade, uma equação de calibração do piezômetro pneumático (que pode ser utilizada para outros tipos de instrumentos que não meçam diretamente a carga piezométrica e cuja medida seja linearmente relacionada com ela) de maneira a transformar suas leituras de pressão (força dividida por área) para cargas hidráulicas (medida de comprimento).

Seja \underline{K} o vetor de n variáveis de estado e \underline{Z} o vetor de p observações em um determinado instante. Como já discutido anteriormente, um modelo linear que represente a relação entre estas duas variáveis é (ou seja, generalizando-se a eq. 3.1 para p pontos de observação):

$$\underline{Z} = \underline{a} + \underline{S.K} + \underline{v} \quad (3.2)$$

A matriz \underline{S} é a chamada matriz de sensibilidade que representa a sensibilidade da carga no nó "i" à permeabilidade do elemento "j" conforme a eq. 3.3:

$$\underline{S} = \frac{\partial h_i}{\partial(\log k_j)} \quad (3.3)$$

Para que a atualização *bayesiana* seja efetivada, algumas hipóteses adicionais devem ser adotadas:

→ \underline{K} é n - $N(\underline{m}_K'; \underline{C}_K')$, ou seja, \underline{K} segue uma distribuição normal n -dimensional com vetor média \underline{m}_K' e matriz de covariâncias \underline{C}_K' conhecidas:

$$f(\underline{K}) = \left[(2\pi)^n \cdot |\underline{C}_K'| \right]^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (\underline{K} - \underline{m}_K')^T \cdot \underline{C}_K'^{-1} \cdot (\underline{K} - \underline{m}_K') \right] \quad (3.4)$$

$|\underline{C}_K'|$ é o determinante da matriz de covariância \underline{C}_K' .

→ \underline{v} é um vetor p - $N(0; \underline{V})$, ou seja, é um vetor de média nula com uma distribuição normal p -dimensional com matriz de covariâncias conhecida \underline{V} .

→ $E[\underline{K} \cdot \underline{v}^T] = 0$, ou seja, os erros de medida não são linearmente correlacionados com as variáveis de estado.

Suponha agora que o vetor de variáveis de estado \underline{K} seja conhecido. Pela relação estabelecida na eq. 3.2, pode-se concluir que a probabilidade condicional de \underline{Z} dado \underline{K} é uma translação da distribuição de \underline{v} :

$$f(\underline{Z} | \underline{K}) = \left[(2\pi)^n \cdot |\underline{V}| \right]^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{K})^T \cdot \underline{V}^{-1} \cdot (\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{K}) \right] \quad (3.5)$$

ou seja, $\underline{Z} | \underline{K}$ é p - $N(\underline{a} + \underline{S} \cdot \underline{K}; \underline{V})$.

Neste trabalho, a eq. 3.4 será estudada como função de \underline{K} , para um dado \underline{Z} fixo, ou seja, a função probabilidade que expressa a probabilidade de

uma observação \underline{Z} derivar de diferentes valores de \underline{K} . No entanto, para outras aplicações, esta mesma equação pode ser entendida tanto como função de \underline{K} como função de \underline{Z} .

Recordando o Teorema de Bayes:

$$P[\text{estado} | \text{amostra}] = \frac{P[\text{estado}] \cdot P[\text{amostra} | \text{estado}]}{\sum_{\text{todos_estados}} (P[\text{estado}] \cdot P[\text{amostra} | \text{estado}])} \quad (3.6)$$

onde $P[\text{estado} | \text{amostra}]$ é a probabilidade atualizada (posterior), $P[\text{estado}]$ é a probabilidade anterior à nova informação e $P[\text{amostra} | \text{estado}]$ é a probabilidade daquela determinada amostra ter sido originada naquele estado em particular. O denominador representa uma constante de normalização para que a probabilidade atualizada não seja maior que 1.

Em termos de função de densidade de probabilidade, aplicada ao problema de percolação, o Teorema de Bayes assume a seguinte forma:

$$f(\underline{K} | \underline{Z}) = \frac{f(\underline{K}) \cdot f(\underline{Z} | \underline{K})}{f(\underline{Z})} \quad (3.7)$$

Portanto, como o denominador é apenas um fator de normalização, obtém-se o seguinte resultado:

$$f(\underline{K} | \underline{Z}) \propto f(\underline{K}) \cdot f(\underline{Z} | \underline{K}) \quad (3.8)$$

3.2 Atualização bayesiana

Se as eqs. 3.4 e 3.5 forem combinadas no formato da eq. 3.8, obtém-se:

$$f(\underline{K} | \underline{Z}) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[(\underline{K} - \underline{m}'_K)^T \cdot \underline{C}'_K^{-1} \cdot (\underline{K} - \underline{m}'_K) + (\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{K})^T \cdot \underline{V}^{-1} \cdot (\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{K}) \right] \right\} \quad (3.9)$$

Hachich (1981) demonstra que esta equação é equivalente a:

$$f(\underline{K} | \underline{Z}) \propto \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\underline{K} - \underline{m}_K''\right)^T \cdot \underline{C}_K''^{-1} \cdot \left(\underline{K} - \underline{m}_K''\right) + d\right]\right\} \quad (3.10)$$

onde:

$$d = \left(\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{m}_K'\right)^T \cdot \left(\underline{S} \cdot \underline{C}_K' \cdot \underline{S}^T + \underline{V}\right)^{-1} \cdot \left(\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{m}_K'\right) \quad (3.11)$$

$$\underline{m}_K'' = \underline{C}_K'' \cdot \left[\underline{C}_K'^{-1} \cdot \underline{m}_K' + \underline{S}^T \cdot \underline{V}^{-1} \cdot \left(\underline{Z} - \underline{a}\right)\right] \quad (3.12)$$

$$\underline{C}_K''^{-1} = \underline{C}_K'^{-1} + \underline{S}^T \cdot \underline{V}^{-1} \cdot \underline{S} \quad (3.13)$$

(as matrizes inversas são assumidas como existentes).

Como d é apenas um escalar independente de \underline{K} , conforme a eq. 3.11, ele pode ser incorporado à constante de normalização e, deste modo, conclui-se que $\underline{K}|\underline{Z}$ é uma distribuição n - $N(\underline{m}_K'', \underline{C}_K'')$.

A eq. 3.13 mostra que a matriz de covariâncias posterior é uma combinação linear da matriz anterior e da matriz de observação. Pode-se provar que isto significa que a incerteza nunca pode aumentar pela inclusão de informações adicionais (BRYSON; HO, 1975 apud HACHICH, 1981).

Com o intuito de facilitar a aplicação das equações aqui apresentadas, Hachich (1981) sugere a seguinte apresentação para as eqs. 3.12 e 3.13:

$$\underline{m}_K'' = \underline{m}_K' + \underline{C}_K' \cdot \underline{S}^T \cdot \left(\underline{S} \cdot \underline{C}_K' \cdot \underline{S}^T + \underline{V}\right)^{-1} \cdot \left(\underline{Z} - \underline{A} - \underline{S} \cdot \underline{m}_K'\right) \quad (3.14)$$

$$\underline{C}_K'' = \underline{C}_K' - \underline{C}_K' \cdot \underline{S}^T \cdot \left(\underline{S} \cdot \underline{C}_K' \cdot \underline{S}^T + \underline{V}\right)^{-1} \cdot \underline{S} \cdot \underline{C}_K' \quad (3.15)$$

A eq. 3.14 mostra que a média posterior é, na verdade, a soma da média anterior e mais um termo linearmente relacionado à nova informação. O termo $\left(\underline{A} - \underline{S} \cdot \underline{m}_K'\right)$ é a linearização da leitura do instrumento e

$(\underline{Z} - \underline{A} - \underline{S} \cdot \underline{m}'_k)$ representa, na verdade, a diferença entre os valores observados e os valores previstos. O fato de \underline{m}''_k ser linearmente relacionado à \underline{Z} o classifica como um estimador linear e ainda, o fato de $E[\underline{m}''_k] = \underline{m}'_k = E[\underline{K}]$ o classifica como um estimador não tendencioso.

A eq. 3.15 mostra que \underline{m}'_k é independente de \underline{Z} e, portanto, pode ser calculado antes mesmo que qualquer medida de K seja feita.

Algumas considerações interessantes a respeito das hipóteses adotadas para a retroanálise probabilista pela óptica bayesiana podem ser encontradas em Hachich (1981) e Veneziano; Faccioli (1975).

A retroanálise proposta permite encontrar o campo de permeabilidades mais compatível com as observações para uma dada hipótese de trabalho. Os seus resultados, quando adequadamente analisados, permitem ainda estabelecer se as hipóteses de trabalho adotadas são coerentes e consistentes, ou se é necessário a adoção de novas hipóteses trabalho.

3.3 Determinação da matriz de covariâncias

Os parâmetros de permeabilidade, quando se utiliza o MEF, são, na verdade, médias espaciais do campo estocástico de permeabilidades sobre cada elemento e, desta forma, para uma malha definida com "a" elementos, o vetor de permeabilidades $a \times 1 \underline{K} \sim \{\underline{m}_k; \text{Cov}[\underline{K}, \underline{K}]\}$ deve ser derivado a partir do conhecimento dos momentos do campo aleatório de permeabilidades apresentado anteriormente (HACHICH, 1981). As médias espaciais têm funções de densidade de probabilidade mais estreitas que as propriedades pontuais correspondentes. Este fato implica a redução do coeficiente de variação, a qual é aplicada multiplicando-se os valores de autocovariância pelo chamado fator de redução Γ^2 (VANMARCKE, 1977).

Em geral, pode-se assumir que a média é um valor constante e, portanto, a sua integração dentro da área do elemento não oferece maiores

dificuldades. Já no caso da covariância, a solução a ser utilizada será aquela apresentada por Vanmarcke (1979) apud Hachich (1981).

Conforme pode ser observado na figura 3.1, o método proposto por Vanmarcke (1979) apud Hachich (1981) para cálculo da matriz de covariâncias só é aplicável para elementos retangulares. Além disso, foi feita uma simplificação dividindo-se a malha de elementos finitos em regiões de iguais propriedades, conforme será detalhado mais adiante.

Os elementos "equivalentes", de formato retangular, devem manter a mesma área e as mesmas coordenadas médias, apenas para o cálculo das variâncias. Deste modo, os momentos de primeira e segunda ordens do campo de permeabilidades devem obedecer às seguintes condições:

$$m_K(\underline{x}_i) = m_K(\underline{x}_j) = m_K \quad (3.16)$$

$$C_K(\underline{x}_i, \underline{x}_j) = C_K(\underline{x}_i - \underline{x}_j) \quad (3.17)$$

(particularmente, $C_K(\underline{x}_i, \underline{x}_i) = C_K(\underline{x}_j, \underline{x}_j) = \sigma_K^2$).

As equações 3.16 e 3.17 indicam que a função média é constante, qualquer que seja a posição considerada dentro do domínio de percolação, e que a autocovariância passa a ser um valor que depende da posição relativa de dois pontos e não mais de suas posições absolutas. Apesar de parecer uma hipótese que pouco ocorre na prática, pode-se considerar que na seção transversal de uma barragem existam regiões homogêneas, não havendo praticamente nenhuma correlação entre diferentes zonas (HACHICH, 1981).

Deste modo, a solução encontrada por Vanmarcke (1979) é:

$$\text{Cov}[K_B, K_C] = \frac{\sigma_K^2}{4 \cdot A_B \cdot A_C} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (-1)^{i+j} \cdot \Gamma_K^2(U_i, V_j) \cdot U_i^2 \cdot V_j^2 \quad (3.18)$$

onde os significados de A_B , A_C , U_i e V_j estão apresentado na figura 3.2.

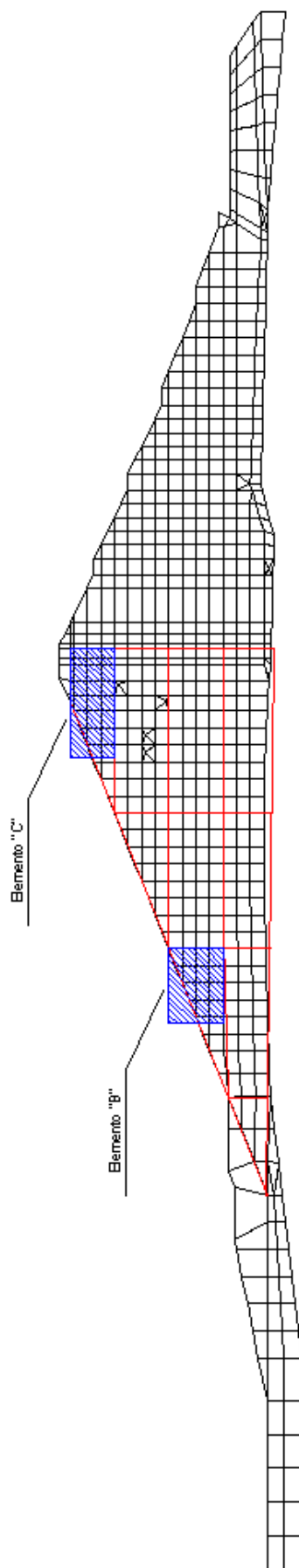


Fig. 3.1 - Divisão da malha de elementos finitos em regiões e aproximação para utilização do Método de Vanmarcke (1979).

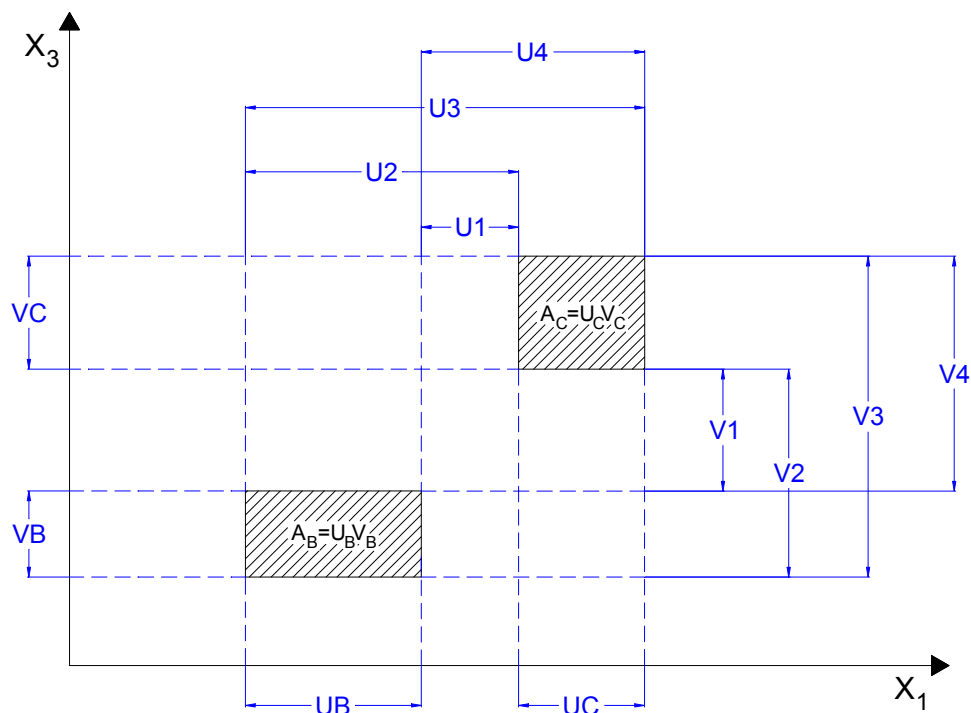


Fig. 3.2 - Análise das covariâncias entre dois elementos B e C (HACHICH, 1981)

As equações propostas por Vanmarcke utilizam, na verdade, uma média espacial da permeabilidade dentro da região delimitada pelo elemento finito. Esta média é estimada a partir de um número "n" finito de ensaios os quais carregam uma incerteza que causa o decréscimo da variância conforme o aumento de "n" (CAMBOU, 1975). Este decréscimo é o fator de redução $\Gamma_K^2(U, V)$ que deve ser aplicado à variância pontual σ_K^2 de maneira a torná-la a média espacial do campo sobre a área $U.V$.

$$\text{Var}[K_E] = \Gamma_K^2(U, V) \cdot \sigma_K^2 \quad (3.19)$$

A relação entre o coeficiente de correlação linear ρ_K e $\Gamma_K^2(U, V)$ para campos homogêneos é a seguinte (VANMARCKE, 1979 apud HACHICH, 1981):

$$\Gamma_K^2(U, V) = \frac{4}{U.V} \int_{A_E} \left(1 - \frac{t_1}{U}\right) \left(1 - \frac{t_3}{V}\right) \cdot \rho_K(t_1, t_3) dt_1 dt_3 \quad (3.20)$$

onde t_1 e t_3 são as projeções das distâncias entre dois pontos genéricos dentro do elemento "E" e $\rho_K(t_1, t_3)$ é a função de correlação linear para um campo 2-D aleatório e homogêneo.

Neste trabalho, assim como Vanmarcke (1979) e Hachich (1981) utilizaram, será adotada uma função de correlação como a apresentada na figura 3.3 e cuja expressão analítica é:

$$\rho_K(t_1, t_3) = \left(1 - \frac{|t_1|}{d_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{|t_3|}{d_3}\right) \quad (3.21)$$

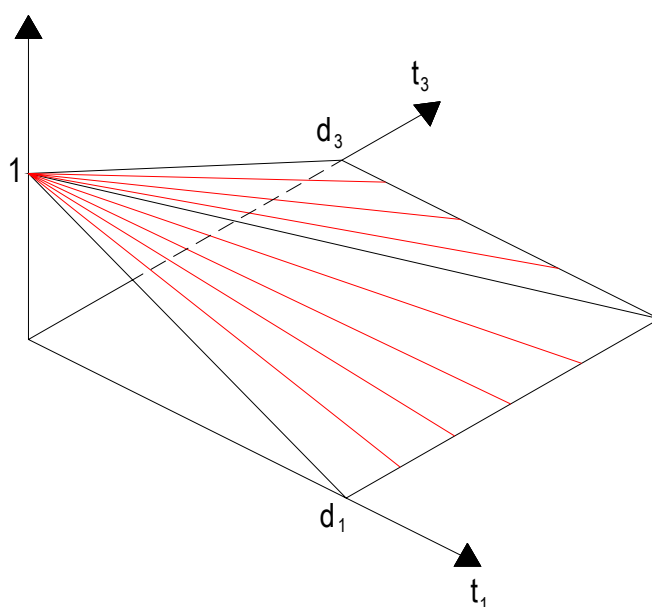


Fig. 3.3 - Função de decaimento da correlação (HACHICH, 1981)

Substituindo a eq. 3.21 na eq. 3.20 e solucionando a integral dentro da área do elemento "E" obtém-se:

$$\Gamma_K^2(U, V) = \left(1 - \frac{U}{d_3}\right) \left(1 - \frac{V}{3d_3}\right) \quad \text{para } U \leq d_1 \text{ e } V \leq d_3$$

$$\Gamma_K^2(U, V) = \frac{d_1}{U} \cdot \left(1 - \frac{d_1}{3U}\right) \left(1 - \frac{V}{3d_3}\right) \quad \text{para } U > d_1 \text{ e } V \leq d_3 \quad (3.22)$$

$$\Gamma_K^2(U, V) = \left(1 - \frac{U}{3d_1}\right) \left(1 - \frac{d_3}{3V}\right) \cdot \frac{d_3}{V} \quad \text{para } U \leq d_1 \text{ e } V > d_3$$

$$\Gamma_K^2(U, V) = \frac{d_1}{U} \cdot \left(1 - \frac{d_1}{3U}\right) \left(1 - \frac{d_3}{3V}\right) \cdot \frac{d_3}{V} \quad \text{para } U > d_1 \text{ e } V > d_3$$

Substituindo as eqs. 3.22 nas eq. 3.18 e eq. 3.19, é possível, então, derivar o vetor do momento de segunda ordem das permeabilidades dos elementos finitos (K) utilizando-se a função de correlação apresentada na eq. 3.21.

Existem outras funções de correlação entre dois elementos tais quais os apresentados nos trabalhos de Gimenes (1988), Fenton; Griffiths (1997), Fenton (1999) entre outros. De acordo com Vanmarcke (1979) apud Hachich (1981), a escolha do modelo de decaimento da correlação não interfere significativamente nos resultados obtidos. No entanto, existem funções mais realistas e complexas que podem ser utilizadas.

O item a seguir apresentará, de modo detalhado, como se obter os valores d_1 e d_3 através da metodologia proposta por Gimenes (1988).

3.4 Determinação da escala de flutuação de medições geotécnicas irregularmente espaçadas

Muitos problemas de geotecnia baseiam-se em relações funcionais que fazem a previsão do valor de uma variável dependente dado o valor de uma variável independente.

Seja, por exemplo, o caso da variável h , carga hidráulica, dependente das permeabilidades Y_i e cuja incerteza depende, desta forma, da distribuição conjunta de $F_Y(\underline{y})$. A variabilidade espacial de Y , dada pela influência da correlação espacial entre os pontos x_i onde se medem as variáveis aleatórias Y_i , afetará diretamente os momentos de h . Sejam Y_1 e Y_2 variáveis aleatórias do processo separadas por certa distância $r = |x_1 - x_2|$. Se a distância entre os pontos de observação é " a ", como mostrado na figura 2.6, então a distribuição conjunta, representada por suas curvas de isoprobabilidade, sugere baixa correlação e a variância da distribuição condicional de Y_2 dado que $Y_1 = \alpha$ é da mesma ordem da variância da distribuição marginal de Y_2 . Entretanto, se a distância entre os pontos de observação for " b " << " a ", então a distribuição conjunta revela correlação mais elevada e a variância da distribuição condicional de Y_2 dado que $Y_1 = \alpha$ é menor do que a variância marginal de Y_2 , conforme pode-se observar na figura 3.4 (GIMENES, 1988).

Uma das maneiras de descrever a correlação de um processo aleatório é através da análise de autocorrelação. Assim como existe uma correlação entre variáveis aleatórias distintas, existe uma autocorrelação entre duas medidas de uma mesma variável aleatória em pontos diferentes de espaço ou tempo. O modelo adotado por Vanmarcke (1979) apud Hachich (1981), como já descrito anteriormente, impõe que a função média deve ser constante para quaisquer pontos x_1 e x_2 e a função de autocovariância dependa apenas da posição relativa entre dois pontos considerados e não mais de suas posições absolutas. Gimenes (1988) também utilizou esta metodologia proposta por Vanmarcke (1979) para determinação de escalas de flutuação para medições não igualmente espaçadas.

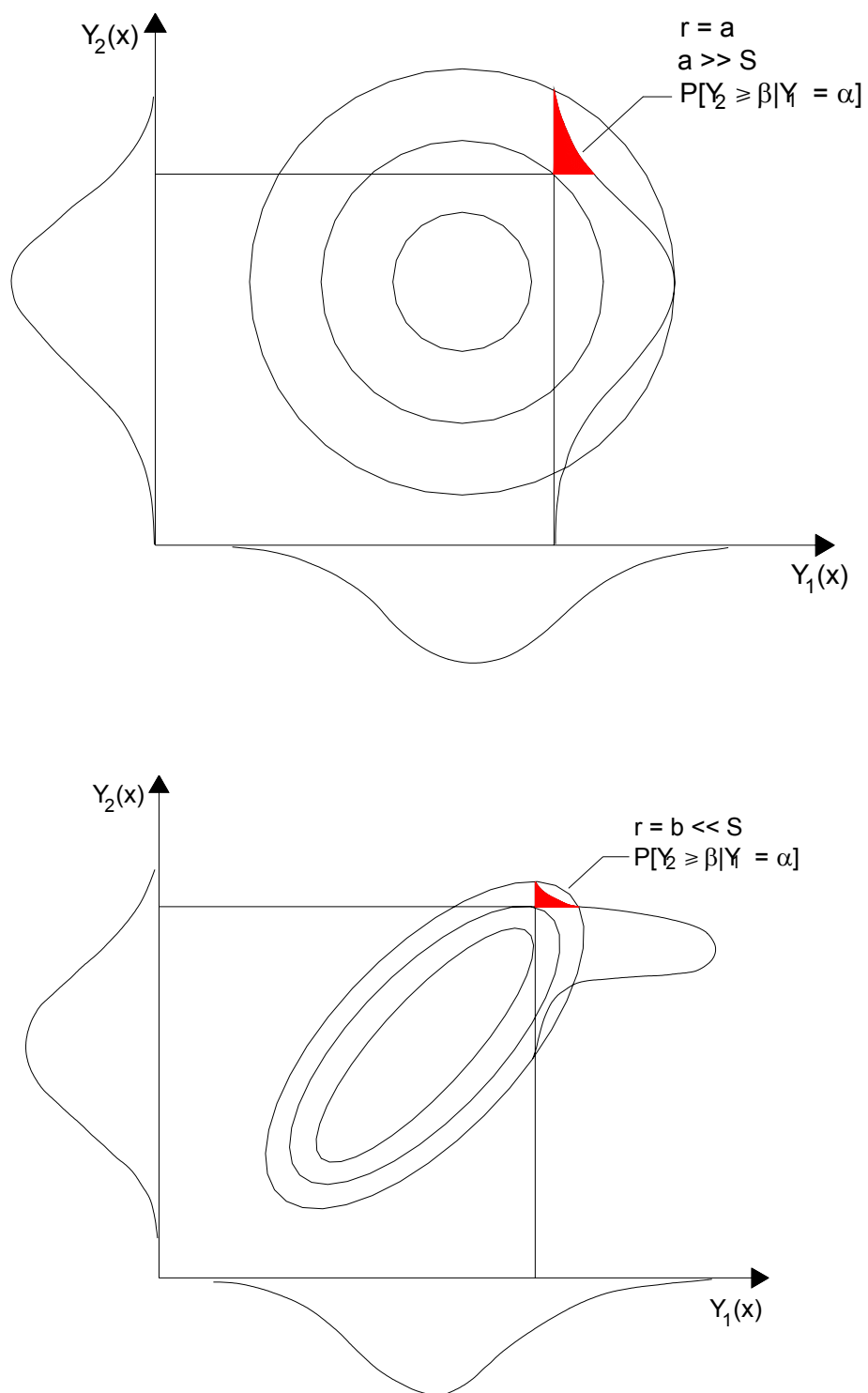


Fig. 3.4 - Influência do coeficiente de correlação entre duas variáveis aleatórias Y_1 e Y_2 de um processo aleatório Y (GIMENES, 1988).

Não é incomum que as estatísticas do campo de permeabilidades (média, variância, correlação) devam ser estimadas de uma única realização, neste caso, de uma única barragem de terra, uma vez que a natureza pode não fornecer um conjunto similar de realizações independentes provenientes da mesma função de distribuição. Se este for o caso, as hipóteses de trabalho devem ser assumidas, implicando que todos os possíveis estados do processo aleatório ocorram em uma única realização.

Este raciocínio permite determinar estimativas mais precisas das estatísticas, tomando-se uma média espacial ao invés de utilizar o conjunto de realizações. Isto implica ainda que as permeabilidades de ponto para ponto tornem-se efetivamente independentes a partir de uma determinada distância significativamente menor que o tamanho da região amostral. Esta distância é a chamada escala de flutuação (FENTON; GRIFFITHS, 1996).

Vista de modo prático, a escala de flutuação está relacionada com a distância média entre cruzamentos com a média, ou seja, quanto maior a distância média de cruzamentos com o valor médio, maior a escala de flutuação.

Gimenes (1988) apresenta duas propostas para a determinação da escala de flutuação (figura 3.5). A primeira consiste em ligar dois pontos adjacentes por uma reta, interpolando-se linearmente a partir dos valores vizinhos (figura 3.5a); e a segunda utiliza médias ponderadas, assim, os pesos atribuídos a cada medição são inversamente proporcionais às suas distâncias (figura 3.5b), conforme eq. 3.23:

$$\bar{Y}_{p_i} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.23)$$

onde n representa o número de pontos amostrados, \bar{Y}_{p_i} , a média ponderada

para $Y(x)$ em pontos equi-espçados, Y_i , os valores medidos de $Y(x)$ e P_i , o peso de ponderação para o ponto x_i . Para informações mais detalhadas a respeito da obtenção da escala de flutuação para medições em intervalos irregularmente espaçados, recomenda-se a leitura de Gimenes (1988).

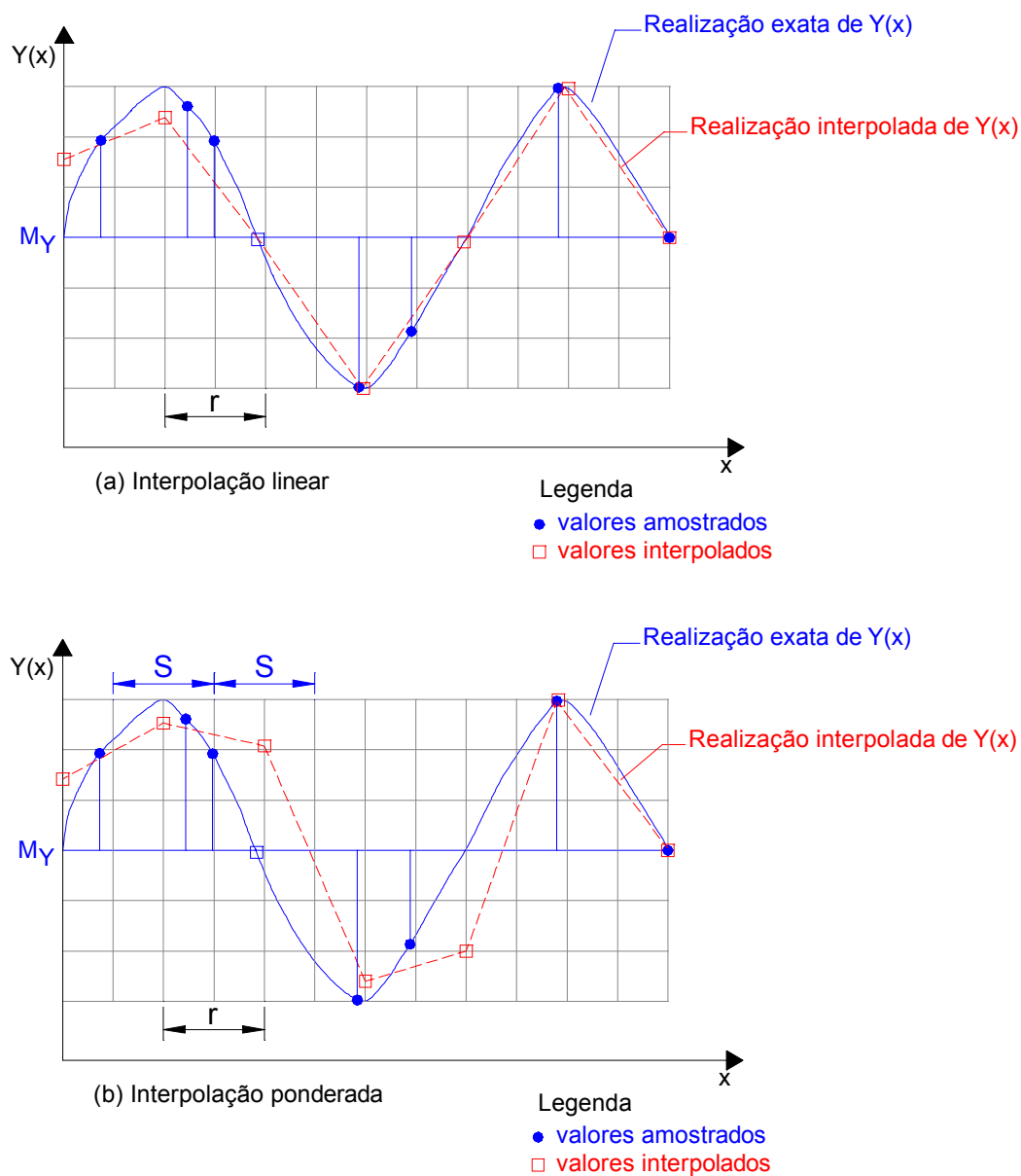


Fig. 3.5 - Critérios de interpolação para pontos irregularmente espaçados (GIMENES, 1988).

4 APLICAÇÃO A UM CASO REAL

A obra escolhida para a aplicação da metodologia apresentada neste trabalho foi a Barragem do Jaguari, pertencente ao Sistema Produtor Cantareira da Sabesp. Esta escolha está associada a alguns fatores tais como existência de instrumentos a montante do filtro com comportamento adequado e de um estudo de percolação desta barragem após o início de sua operação. Um breve histórico da Barragem do Jaguari é apresentado a seguir.

4.1 Apresentação do objeto de estudo

O Sistema Cantareira, situado a noroeste do estado, é o maior sistema produtor de água bruta para a Região Metropolitana de São Paulo e foi previsto para fornecer a vazão total de 33 m³/s, dos quais 31 m³/s são provenientes da Bacia do Rio Piracicaba e os outros 2 m³/s restantes são oriundos da própria Bacia do Alto Tietê, através do Rio Juqueri.

Este sistema é constituído por seis grandes barragens de terra: Águas Claras, Paiva Castro, Atibainha, Cachoeira, Jacareí e Jaguari, que formam quatro grandes reservatórios de regularização e um de passagem (Águas Claras); sete túneis de adução (Túneis de 1 a 7); um grande canal de adução (Juqueri-Mirim); e uma estação elevatória subterrânea (Santa Inês), além de outras estruturas ou obras secundárias.

A Barragem do Jaguari, localizada no município de Bragança Paulista, foi projetada pela PROMON Engenharia S/A e sua construção foi executada pela CETENCO Engenharia S/A. O acompanhamento e controle tecnológico da barragem, a instalação e medições dos instrumentos de auscultação, bem como os ensaios geotécnicos de laboratório estiveram sob a responsabilidade do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. As obras foram iniciadas em 1977 e encerradas em maio de 1982, sendo que o enchimento do reservatório foi iniciado em julho de 1981. Uma descrição detalhada das características dos materiais utilizados e das

técnicas construtivas pode ser obtida em IPT (1983). A barragem é constituída de um maciço homogêneo compactado de solo residual de gnaisse, de natureza siltosa (silte argilo-arenoso). A altura máxima sobre a fundação é de 62 m e o comprimento da crista é de cerca de 860 m.

O descarregador principal é composto de uma tomada d'água, três comportas radiais tipo setor, vertedouro e bacia de dissipação de energia, estando localizado na ombreira direita. Possui ainda uma galeria de descarga de fundo de 355 m de comprimento, composta de três células retangulares, uma destinada a acesso e inspeção e as outras duas equipadas com válvulas difusoras de vazão conjunta máxima de 38 m³/s.

A drenagem interna é feita por um filtro vertical homogêneo de areia e um filtro horizontal, homogêneo nas ombreiras e zoneado na região da calha do rio. O tapete horizontal termina em um dreno situado no pé do talude de jusante, sobre uma linha de poços de alívio de subpressões nas fundações.

Em relação aos aspectos geológicos, a obra está situada sobre solo residual de migmatitos nas ombreiras e rocha na região central.

Um desenho da seção transversal da barragem escolhida para esta aplicação pode ser visto na figura 4.1. Esta seção foi escolhida por ser representativa de grande parte do maciço e por ter um grande número de instrumentos de auscultação instalados.

4.2 Análise das hipóteses de trabalho (projeto) pelo MEF

O *software* SEEP/W foi utilizado para as análises de percolação. A seção transversal da estaca 25+00, apresentada na figura 4.1, foi então discretizada em 659 elementos finitos que, por sua vez, foram divididos em 14 regiões para aplicação das eq. 3.14, de acordo com a metodologia proposta.

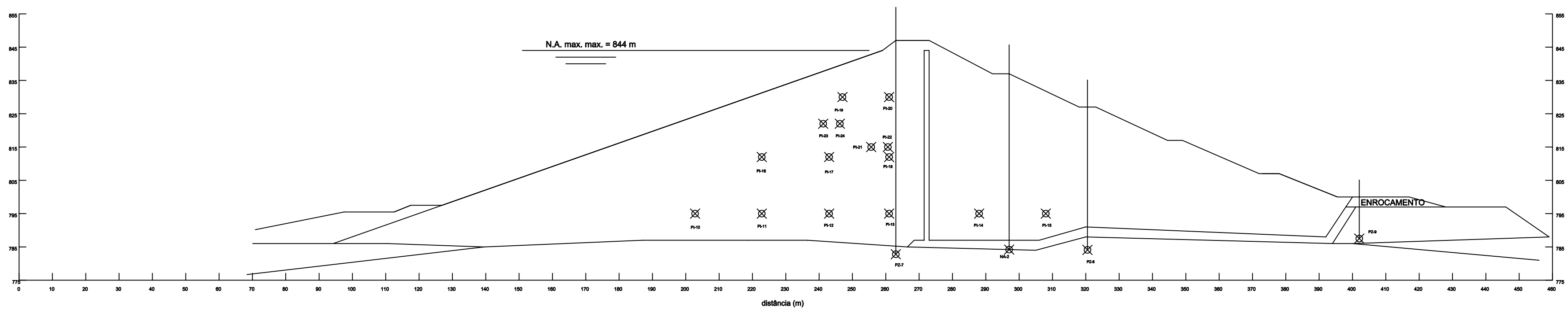


Fig. 4.1 - Seção transversal da Barragem do Jaguari na altura da estaca 25+00.

escala 1:1000

4.2.1 Estimativa de permeabilidade

Uma análise de percolação exige algumas informações iniciais que serão os dados de entrada para que seja encontrada uma solução para a equação que rege o fenômeno. Uma dessas informações é como o coeficiente de permeabilidade k se comporta conforme a variação do grau de saturação. É sabido que quanto maior a pressão de sucção, menor será o coeficiente de permeabilidade. O extremo oposto seria a chamada permeabilidade saturada, comumente utilizada e que pressupõe que todos os vazios do solo são ocupados exclusivamente por água.

Existem vários ensaios que podem ser realizados para a determinação da permeabilidade saturada, tais como o de bombeamento de água de poços ou furos de sondagem, o permeâmetro de campo ou de laboratório, medidas indiretas durante ensaios de adensamento, entre outros.

Em geral, os engenheiros dão preferência aos ensaios de campo, principalmente por causa da representatividade de seus resultados. Pelo fato de serem executados *in situ*, os resultados desses ensaios conseguem incorporar características das camadas de solo tais como a sua macroestrutura ou a existência de lentes de materiais com permeabilidades diferentes. Entretanto, a maior desvantagem dos ensaios *in situ* é a grande variabilidade dos resultados.

Por outro lado, os ensaios de laboratório são realizados em ambiente mais controlado, com corpos de prova com características geométricas similares, o que garante uma menor dispersão entre resultados. Contudo, um dos principais problemas desses ensaios é a eventual perda de representatividade, devido ao tamanho reduzido dos corpos de prova (MASSAD, 2003; SHIDHARAN, 1988).

A figura 2.2 apresenta uma função da permeabilidade *versus* a pressão de sucção. Esta função é idealizada e, em geral, não é observada na realidade. Segundo Fredlund (1994) apud Fredlund et al (1996), as funções de permeabilidade são determinadas pelo conhecimento do coeficiente de permeabilidade saturado e pela curva de retenção de água do material. É importante entender a relação entre a pressão neutra e a curva de retenção de água numa análise de percolação. O solo é feito de um conjunto de partículas sólidas e de vazios intersticiais. Os poros ou vazios podem ser preenchidos tanto por água quanto por ar, ou ainda por uma combinação de ambos. No solo saturado, todos os vazios são preenchidos por água, o volume de água no solo é igual à sua porosidade e o grau de saturação é 100%. No solo não saturado, o volume de água armazenado nos vazios pode variar, dependendo da pressão de sucção (KHRAN, 2004).

A declividade da curva de retenção de água também pode fornecer informações sobre a quantidade de água armazenada no solo sob cada estado de tensão. A função não linear do coeficiente de permeabilidade, juntamente com a função de armazenamento, fornece então a informação necessária para resolver, simultaneamente, os problemas de percolação em meios saturados e não saturados.

Entretanto, durante as análises iniciais desenvolvidas para esta dissertação, observou-se que o formato da curva da função de permeabilidade teve pouca influência nos resultados finais. Esta constatação já havia sido feita por Khran (2004), o qual concluiu que o principal efeito da alteração do formato da curva se dá na altura de capilaridade que aumenta conforme se diminui a inclinação da curva. Deste modo, adotou-se funções praticamente lineares (semelhantes à da figura 2.2) para os solos envolvidos nas análises.

Constatou-se alguma dificuldade em se encontrar curvas características de permeabilidade versus pressão neutra na bibliografia pesquisada, mas várias dessas curvas (para vários tipos de materiais) podem ser observadas em GEO-SLOPE (2002).

As funções de permeabilidade de cada material estão apresentadas nas figuras 4.2 a 4.5. Pode-se observar que, para o solo do aterro compactado, a função apresentada por Bruch (1993) apud Geo-Slope (2002) não é totalmente linear. O material do filtro horizontal da barragem foi considerado como saturado durante todo o tempo e, por isso, a sua função não apresenta valores de permeabilidades diferentes para o caso de pressões neutras negativas.

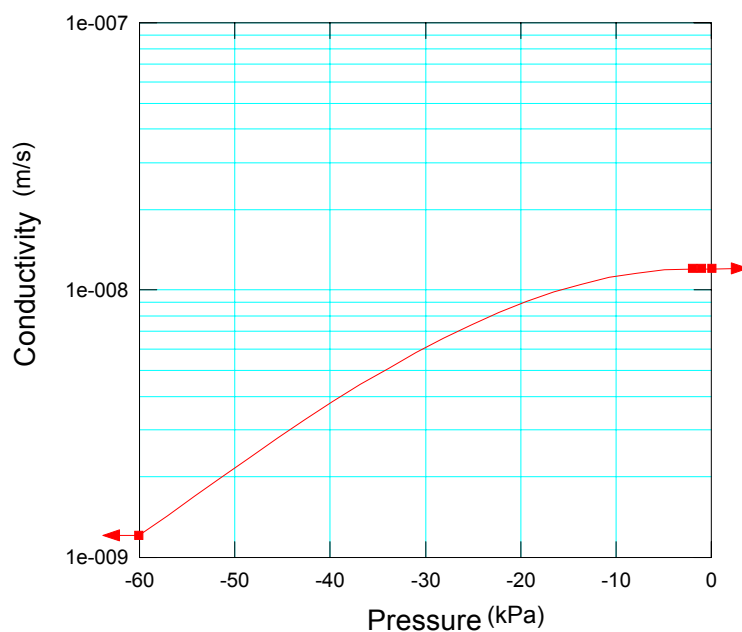


Fig. 4.2 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo do aterro compactado

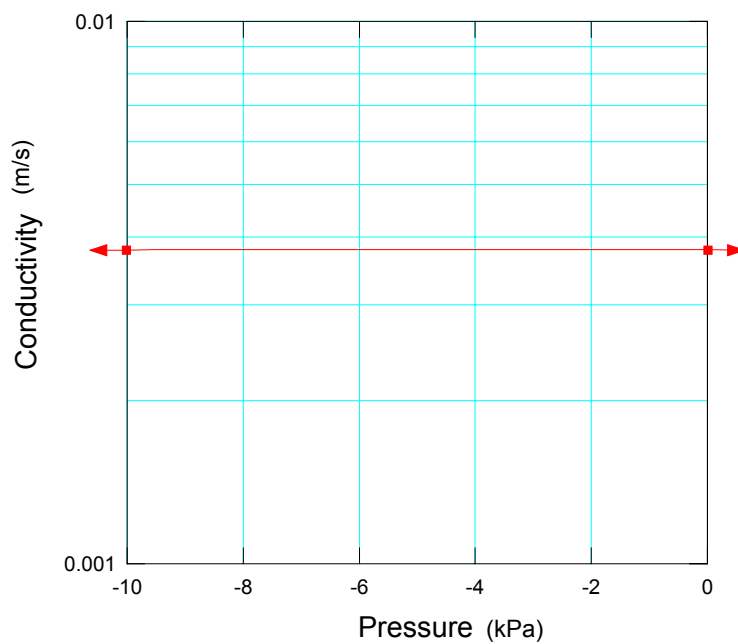


Fig. 4.3 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo do filtro horizontal

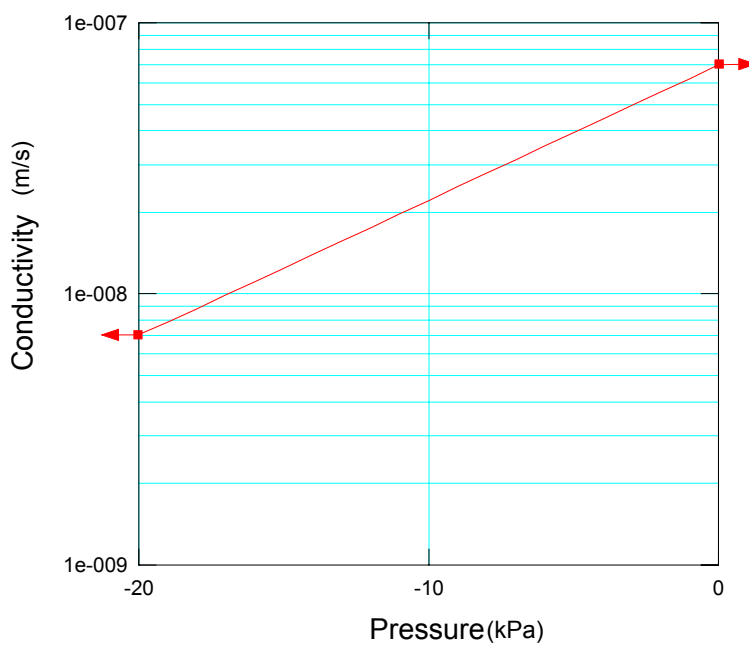


Fig. 4.4 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo de reaterro

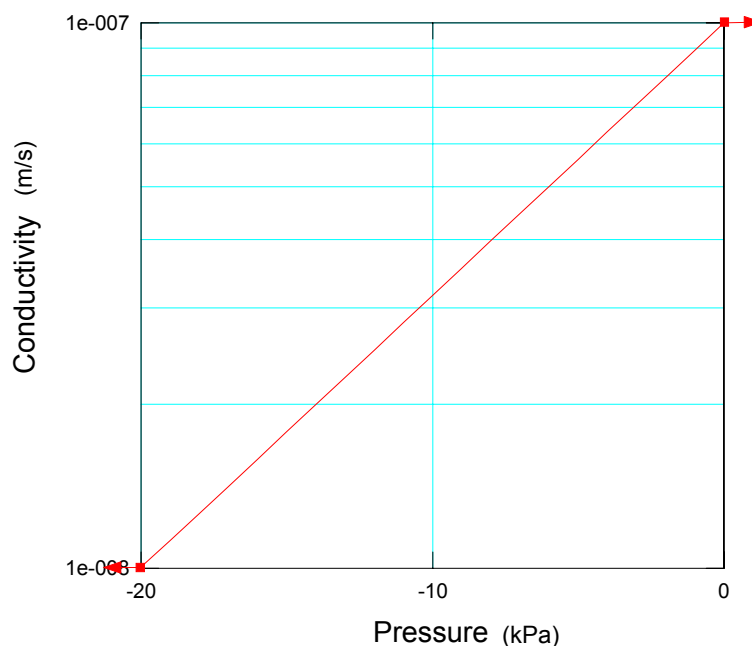


Fig. 4.5 - Função do coeficiente de permeabilidade do solo de alteração de rocha

A permeabilidade vertical saturada do maciço foi obtida indiretamente de ensaios de adensamento realizados em blocos indeformados coletados no aterro experimental da Barragem do Jacareí e adjacências, conforme apresentado por IPT (1993). No caso dos solos de fundação e filtros, obteve-se os valores do coeficiente de permeabilidade em Teixeira et al (1982). O valor utilizado nas análises representa uma média de todos os valores apresentados em IPT (1979a; 1979b; 1980; 1981). Foi utilizada uma relação k_h/k_v igual a 4 apenas para o solo do maciço compactado, conforme obtido por IPT (1993). A tabela 4.1 apresenta um resumo dos coeficientes de permeabilidade verticais saturados de todos os materiais envolvidos, considerados como valores iniciais de acordo com as hipóteses de projeto.

Tabela 4.1 - Coeficientes de permeabilidade verticais saturados

Solo	k (m/s)	log k (m/s)
Aterro compactado	1,2E-8	-7,92
Filtro horizontal	3,8E-3	-2,42
Reaterro	7,0E-8	-7,15
Solo de alteração de rocha	1,0E-7	-7,00

4.2.2 Retroanálise com base na piezometria

Após a discretização em elementos finitos e definição dos materiais e suas propriedades, foi executada uma primeira análise de percolação para que se pudesse comparar os valores previstos em projeto e os valores efetivamente observados no campo e, assim, determinar as suas diferenças, conforme apresentado na tabela 4.2. As figuras 4.6 e 4.7 apresentam, respectivamente, a malha de elementos finitos e os resultados da análise de percolação com as condições de contorno de projeto.

Tabela 4.2 - Diferenças entre as cotas piezométricas observadas e previstas dos piezômetros pneumáticos da seção 25+00 da Barragem do Jaguari

Instrumento	Cota observada	Cota prevista	Diferença
PI-10	829,57	833,06	-3,49
PI-11	828,49	826,16	2,33
PI-12	818,80	817,08	1,72
PI-13	811,80	807,84	3,96
PI-14	801,70	797,21	4,49
PI-15	799,30	797,16	2,14
PI-17	828,40	824,83	3,57
PI-18	819,50	816,99	2,51
PI-19	836,60	837,31	-0,71
PI-20	836,80	832,39	4,41
PI-21	823,04	822,10	0,94
PI-22	822,44	820,04	2,40
PI-23	835,30	832,03	3,27
PI-24	832,40	830,52	1,88

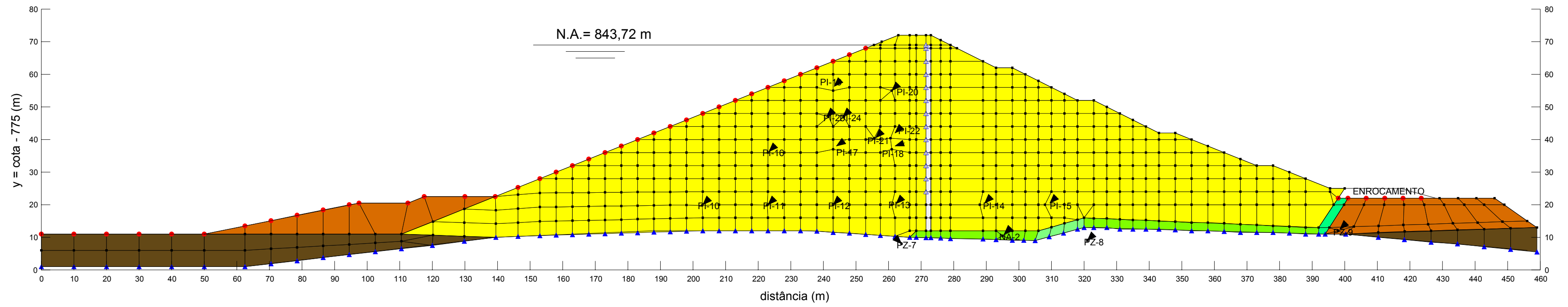


Fig. 4.6 - Malha de elementos finitos traçada para a seção transversal da Barragem do Jaguari na altura da estaca 25+00

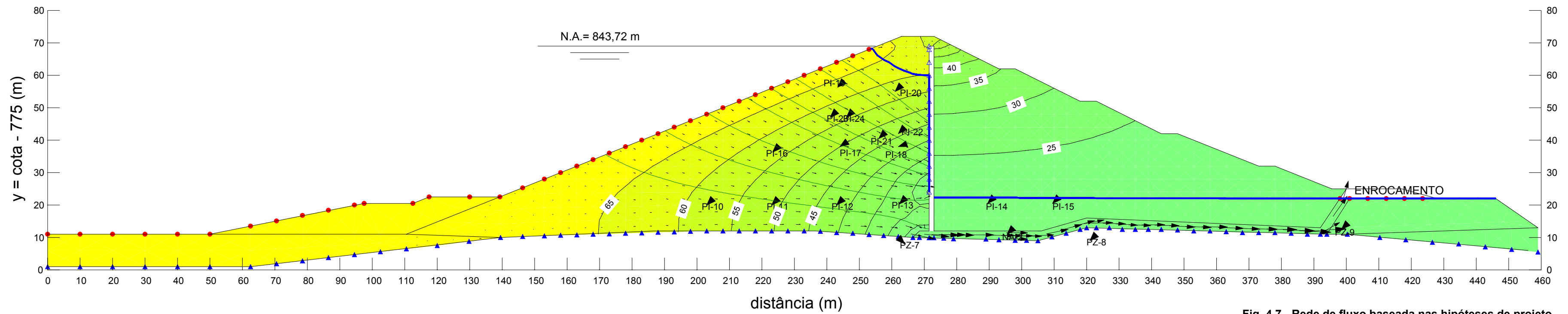


Fig. 4.7 - Rede de fluxo baseada nas hipóteses de projeto.

A matriz \underline{S} representa o quanto \underline{Z} é influenciado por variações de \underline{m}'_k , conforme apresentado na eq. 3.3. Este estudo foi feito variando-se a permeabilidade de cada uma das 14 regiões em que a seção transversal foi dividida separadamente e computando a respectiva variação nas cargas piezométricas.

Foram adotados os seguintes valores das escalas de flutuação horizontal e vertical para o cálculo da matriz de covariâncias: 10 m na horizontal, de acordo com o resultado encontrado por Gimenes (1988) e 0,5 m e 1,0 m na vertical, valores adotados considerando-se a espessura média das camadas de compactação e a influência mútua de camadas adjacentes.

Os piezômetros pneumáticos são instrumentos que apresentam uma boa precisão em termos de leitura, cerca de 0,5% do fundo de escala do manômetro utilizado. Entretanto, existem outros fatores que influenciam a leitura da pressão neutra e que aumentam as imprecisões de tais medidas. Entre estes fatores pode-se citar: a localização no campo diferente da prevista em projeto, o tempo necessário para que a água escoe de ou para o instrumento, o tempo necessário para a ocorrência de adensamento ou recalques, montagem ou calibração inadequada do instrumento ou dos manômetros, entre outros (HANNA, 1985; HVORSLEV, 1951). Em barragens de terra, segundo Hanna (1985), as medidas de pressão neutra podem apresentar uma diferença de até 0,5 m do valor real devido a esses fatores. Desta forma, foi feito um estudo variando-se a chamada imprecisão do instrumento (σ_v) entre 0,10 m e 2,00 m, conforme apresentado adiante no item 4.3.

Neste estudo foram adotados os seguintes valores para a aplicação da metodologia proposta, tendo em vista o âmbito acadêmico: escala de flutuação horizontal (d_1) igual a 10 m, de acordo com o resultado obtido por Gimenes (1988), escala de flutuação vertical igual a 0,5 m (d_3) e imprecisão do instrumento igual a 0,5 m ($\sigma_v^2=0,25$). A tabela 4.3 a seguir apresenta as

permeabilidades atualizadas e a figura 4.8 apresenta a variação da permeabilidade em termos de $\log K$ para cada região.

Tabela 4.3 - Permeabilidades atualizadas após aplicação da metodologia proposta

	k (m/s)
	$d_1=10$ m; $d_3= 0,5$ m
	$\sigma_v^2=0,25$ m²
R-1	6,61E-07
R-2	5,38E-08
R-3	1,45E-07
R-4	2,77E-10
R-5	8,50E-08
R-6	6,31E-08
R-7	1,20E-08
R-8	5,49E-10
R-9	2,07E-07
R-10	3,80E-08
R-11	9,70E-08
R-12	1,02E-07
R-13	7,16E-08
R-14	1,00E-07

Com estes novos campos de permeabilidade, foi possível determinar as redes de fluxo correspondentes e, assim, obter as novas estimativas para as cargas piezométricas de cada instrumento. A figura 4.9 apresenta a rede de fluxo obtida para os valores de escalas de flutuação e imprecisão dos instrumentos escolhidos anteriormente.

A atualização do campo de permeabilidades traz implícita a validade das hipóteses de trabalho e caso tais hipótese não sejam confirmadas, um novo modelo deve ser proposto e analisado (HACHICH, 1981). Contudo, uma vez que o campo de permeabilidades posterior representa aquele mais compatível com as observações, é possível utilizá-lo como subsídio para se determinar qual o modelo de comportamento mais provável.

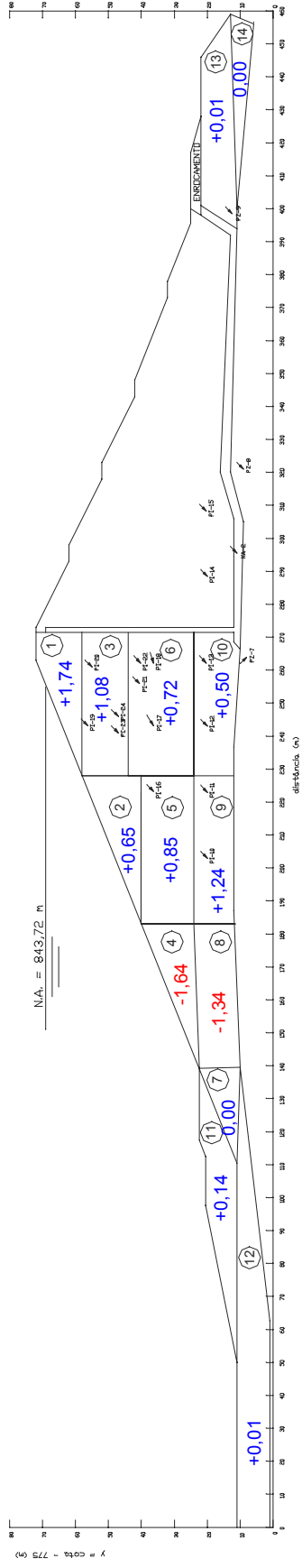


Fig. 4.8 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguarí considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=0,5$ m e $\sigma_v^2=0,25$ m.

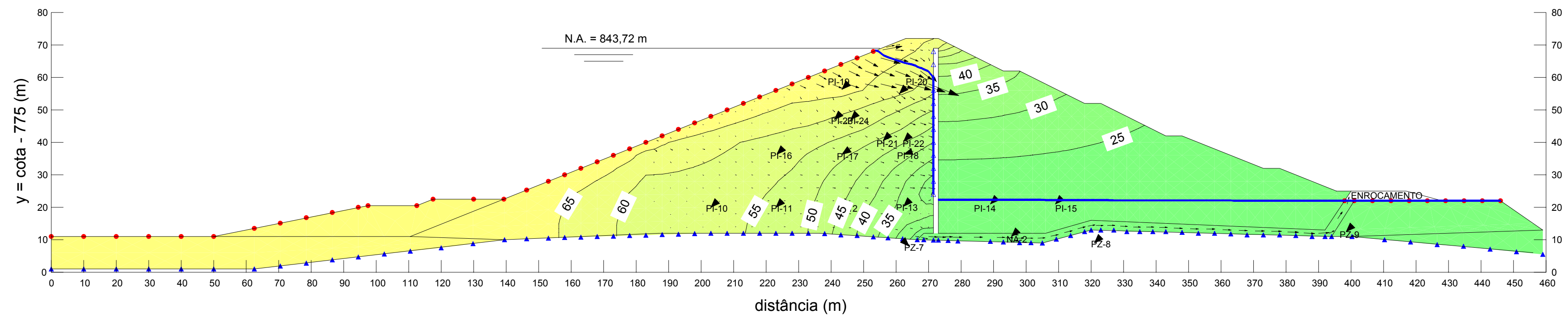


Fig. 4.14 - Rede de fluxo obtida a partir do novo campo de permeabilidades para a situação $d_1=10$ m, $d_3=0,5$ m e $s^2v=0,25m^2$.

4.3 Estudo paramétrico

Além da aplicação prática da metodologia apresentada neste trabalho, foram feitos alguns estudos paramétricos em relação à variação das escalas de flutuação e da imprecisão do instrumento, ou seja, o quanto o valor adotado para cada um desses parâmetros afeta os valores do campo de permeabilidades posterior. As tabelas 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, as permeabilidades atualizadas e as novas diferenças entre as cargas piezométricas observadas e previstas para algumas das situações estudadas.

Tabela 4.4 - Permeabilidades atualizadas após aplicação da metodologia proposta

	k (m/s)				
	d ₁ =10 m e d ₃ = 0,5 m		d ₁ =10 m e d ₃ = 1,0m		
	$\sigma_v = 0,5 \text{ m}^2$	$\sigma_v = 1,0 \text{ m}^2$	$\sigma_v = 0,25 \text{ m}^2$	$\sigma_v = 0,5 \text{ m}^2$	$\sigma_v = 1,0 \text{ m}^2$
R-1	3,67E-07	2,02E-07	1,13E-06	6,58E-07	2,40E-07
R-2	3,97E-08	3,05E-08	6,59E-08	5,36E-08	5,51E-08
R-3	9,69E-08	6,48E-08	2,09E-07	1,45E-07	7,39E-08
R-4	4,34E-10	7,57E-10	1,77E-10	2,78E-10	9,72E-10
R-5	4,43E-08	2,88E-08	2,12E-07	8,50E-08	1,23E-08
R-6	3,34E-08	1,93E-08	1,14E-07	6,28E-08	2,50E-08
R-7	1,15E-08	1,14E-08	1,34E-08	1,20E-08	8,69E-09
R-8	8,10E-10	1,28E-09	3,62E-10	5,49E-10	1,61E-09
R-9	1,63E-07	1,10E-07	2,27E-07	2,07E-07	2,18E-07
R-10	2,43E-08	1,70E-08	6,29E-08	3,80E-08	1,83E-08
R-11	8,24E-08	7,61E-08	1,34E-07	9,67E-08	8,32E-08
R-12	1,01E-07	1,00E-07	1,06E-07	1,02E-07	1,01E-07
R-13	7,13E-08	7,11E-08	7,25E-08	7,16E-08	7,12E-08
R-14	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07

Tabela 4.5 - Diferenças entre valores observados e previstos para cada caso analisado e erro quadrático médio (EQM)

	Projeto	d ₁ =10 m e d ₃ =0,5 m			d ₁ =10 m e d ₃ =1,0m		
		$\sigma_v^2 = 0,25$ m ²	$\sigma_v^2 = 0,5$ m ²	$\sigma_v^2 = 1,0$ m ²	$\sigma_v^2 = 0,25$ m ²	$\sigma_v^2 = 0,5$ m ²	$\sigma_v^2 = 1,0$ m ²
PI-10	-3,49	-1,05	-0,76	-1,30	-1,95	-1,05	-0,88
PI-11	2,33	-0,35	-0,37	-0,87	-0,66	-0,35	-0,50
PI-12	1,72	-1,11	-1,13	-1,38	-1,23	-1,11	-1,21
PI-13	3,96	2,58	2,60	2,53	2,53	2,58	2,56
PI-14	4,49	4,47	4,47	4,47	4,46	4,47	4,47
PI-15	2,14	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
PI-17	3,57	1,42	1,26	0,49	1,72	1,41	0,91
PI-18	2,51	1,19	0,99	0,80	1,37	1,19	0,96
PI-19	-0,71	-4,25	-4,08	-3,87	-4,39	-4,25	-4,08
PI-20	4,41	1,38	1,54	1,74	1,27	1,39	1,54
PI-21	0,94	-1,45	-1,87	-2,19	-1,03	-1,45	-1,91
PI-22	2,40	0,50	0,17	-0,06	0,84	0,50	0,15
PI-23	3,27	0,41	-0,07	-0,41	0,95	0,40	-0,12
PI-24	1,88	-1,22	-1,68	-1,98	-0,71	-1,23	-1,72
EQM	8,63	4,36	4,37	4,57	4,67	4,36	4,36

As figuras 4.10 a 4.14 apresentam as variações em termos de log k para cada uma das regiões de estudo consideradas. Pode-se notar que, no geral, a permeabilidade do aterro aumentou entre 0,00 e 2,00 ordens de magnitude. As exceções foram as regiões 4 e 8 que tiveram as suas permeabilidades diminuídas entre 0,97 e 1,83 ordens de magnitude, devido principalmente à influência do PI-10. No caso dos materiais de fundação, as variações de permeabilidade obtidas foram pouco significativas, principalmente pelo fato de não existirem instrumentos instalados nessas camadas que possam fornecer novas informações acerca de suas permeabilidades.

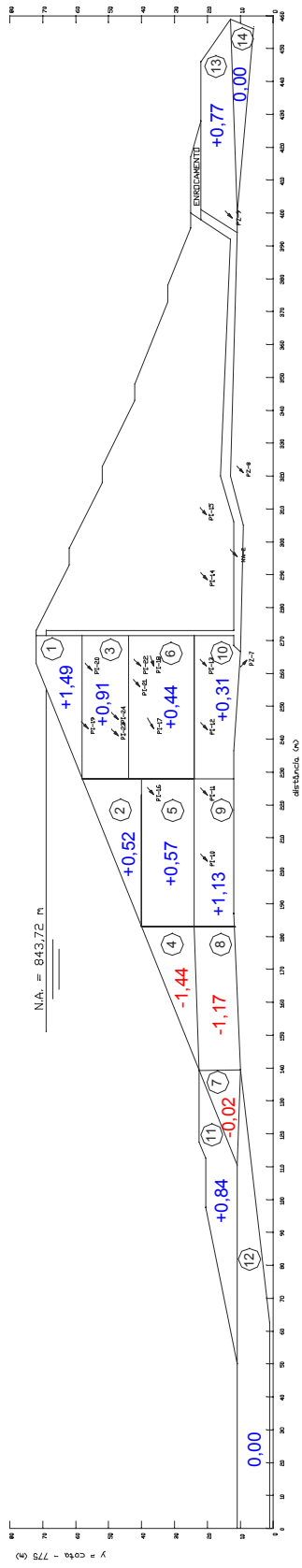


Fig. 4.10 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=0,5$ m e $\sigma_v^2=0,50$ m.

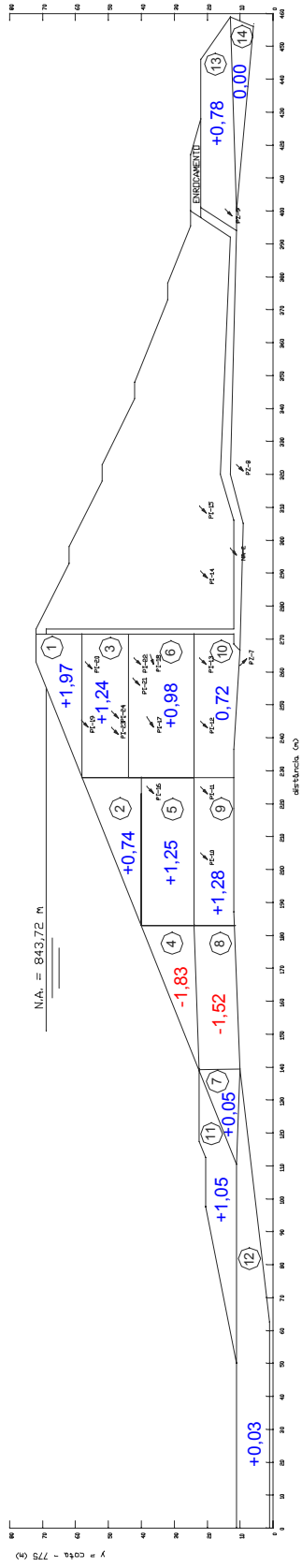


Fig. 4.12 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguarí considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=1,0$ m e $\sigma_v^2=0,25$ m.

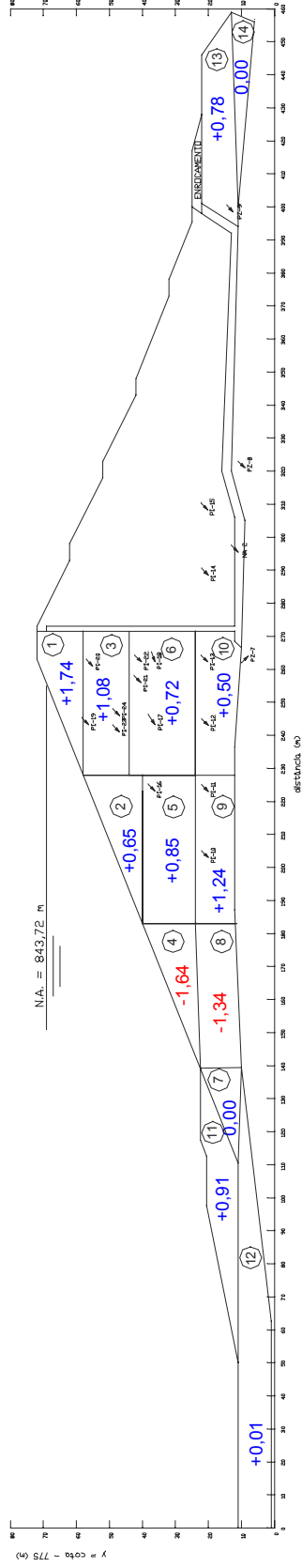


Fig. 4.13 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguarí considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=1,0$ m e $\sigma_v^2=0,50$ m.

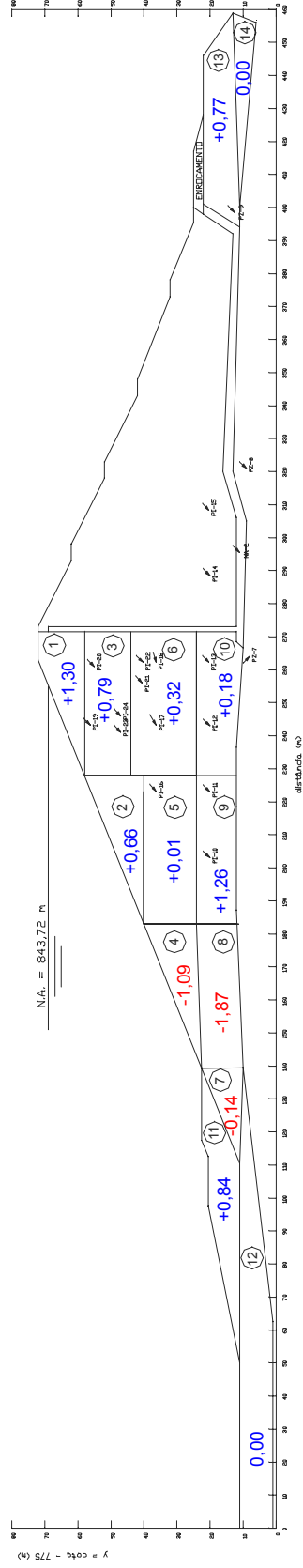


Fig. 4.14 - Variação em termos de ordens de magnitude das permeabilidades do maciço e da fundação da Barragem do Jaguari considerando-se $d_1=10$ m, $d_3=1,0$ m e $\sigma_v^2=1,00$ m.

Para que seja possível comparar a estimativa de projeto com os resultados obtidos, utilizou-se um erro quadrático médio (EQM) definido como a soma dos quadrados das diferenças dividida pelo número de instrumentos. É fácil perceber que o ideal a ser atingido é encontrar o menor EQM possível e, desta forma, comparando-se o EQM inicial com os EQM finais, conclui-se que as novas permeabilidades calculadas permitem obter melhores estimativas das cargas piezométricas.

O estudo paramétrico relativo à imprecisão do instrumento mostrou que esta variável tem uma importância significativa nas permeabilidades atualizadas. Na verdade, conforme pode ser visto na figura 4.15, se a imprecisão da leitura é muito pequena significa que o instrumento é assumido como praticamente perfeito, prejudicando a convergência do método. Pode-se observar que as curvas obtidas apresentam um mínimo para σ_v variando entre 0,5 m e 1,0 m, conforme já apresentado por Hanna (1985).

Outra observação importante é o formato das curvas apresentadas na figura 4.15. Conforme a imprecisão do instrumento aumenta, o EQM diminui até atingir um mínimo e depois torna a crescer, porém com uma declividade sensivelmente menor. Isto pode ser explicado através do seguinte raciocínio: as diferenças entre as cargas piezométricas observadas e calculadas podem ser divididas em duas componentes. Uma delas é relacionada à imprecisão do instrumento e a outra é relacionada ao valor atribuído à permeabilidade do maciço.

O entendimento deste conceito fica mais intuitivo se for feita uma analogia com uma balança de pratos onde um prato representa a componente da imprecisão do instrumento e o outro representa o valor atribuído à permeabilidade.

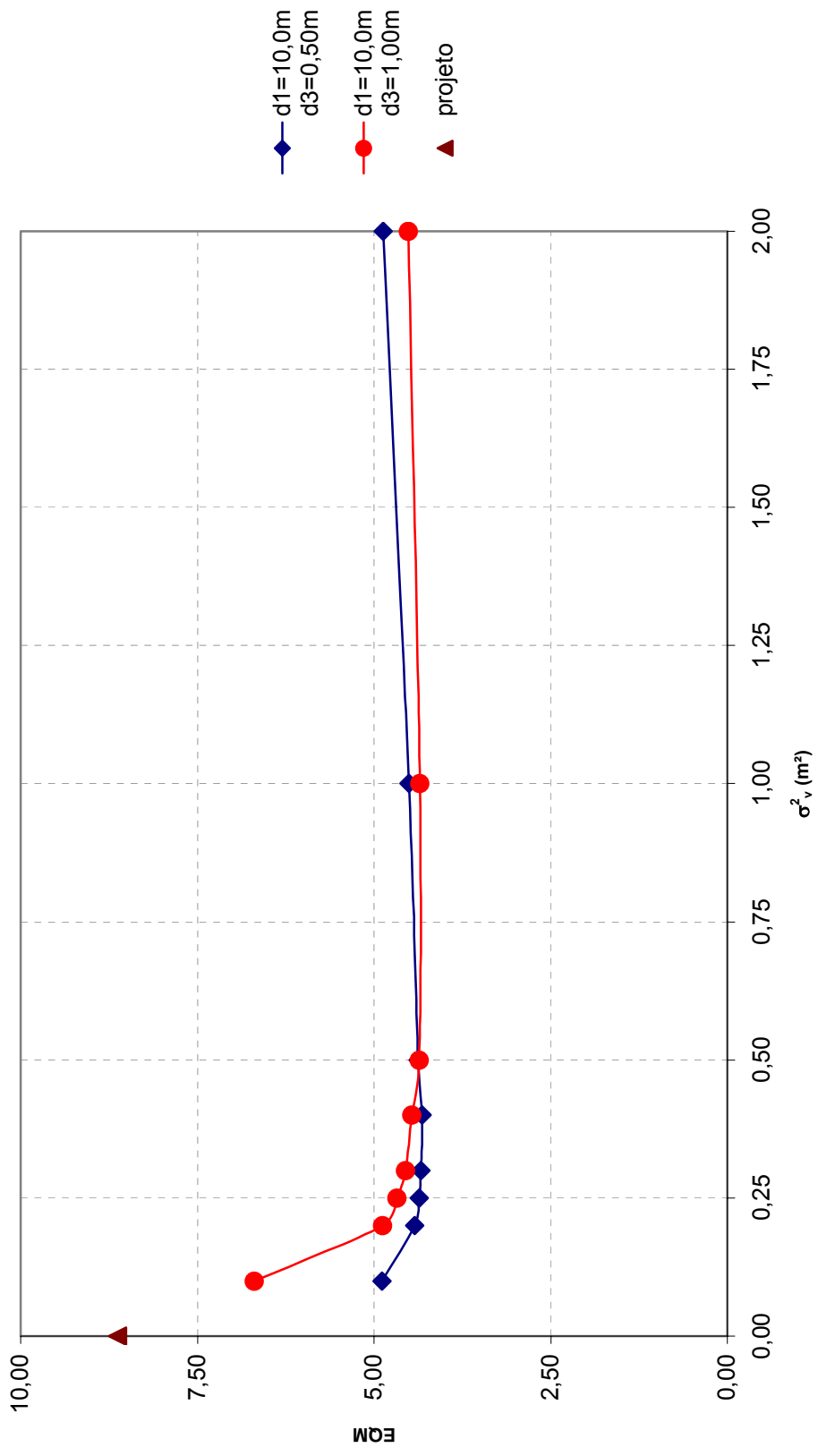


Fig. 4.15 - Variação do EQM em função da imprecisão do instrumento e da escala de flutuação.

Como a metodologia apresentada tem como objetivo atualizar o valor da permeabilidade utilizando as leituras da instrumentação instalada como nova informação, tem-se no cenário inicial a balança desequilibrada, com todo peso da diferença observada atribuído ao valor da permeabilidade do maciço. A nova informação trazida pelo instrumento deve ser confiável o bastante para que a permeabilidade possa ser alterada. No entanto, se a imprecisão do instrumento for muito baixa, a balança continuará desequilibrada do lado da permeabilidade, uma vez que o seu peso permanece muito maior. Conforme a imprecisão do instrumento aumenta, a balança tende a se equilibrar, pois parte do peso é transferido para o prato correspondente à informação do instrumento. Quando a imprecisão do instrumento começar a ficar muito grande, praticamente todo o peso será transferido para o seu prato e a nova informação passa a ter pouco valor, o que faz com que a permeabilidade quase não se altere e, portanto, as diferenças tendem a aumentar novamente, embora numa velocidade menor.

Deste modo, pode-se concluir que a imprecisão do instrumento é maior do que apenas a imprecisão de sua leitura e que o valor atribuído a esta variável influi de maneira significativa nos resultados finais, conforme apresentado na figura 4.15.

Os resultados obtidos indicam que para o caso do piezômetro pneumático a sua imprecisão acarreta variações nas cargas piezométricas medidas entre 0,50 m e 1,00 m, valores um pouco superiores dos indicados na bibliografia pesquisada.

As permeabilidades obtidas durante a retroanálise variam de acordo com a combinação escolhida de escalas de flutuação e imprecisão do piezômetro. Por exemplo, a figura 4.16 apresenta a variação do EQM para $d_1=10$ m, $d_1=50$ m e $d_1=100$ m e $d_3=0,50$ m e imprecisões $\sigma_v=0,50$ m, $\sigma_v=0,71$ m e $\sigma_v=1,00$ m. Pode-se notar que conforme aumenta a escala de flutuação horizontal, o EQM aumenta. Isto ocorre porque como a escala de flutuação representa a distância de influência da leitura do instrumento e

valores muito grandes causam uma superposição de informações, diminuindo a eficiência do método.

Uma das formas de tentar evitar que isto aconteça seria diminuir o tamanho das regiões de variação de permeabilidade, de forma que cada região contenha apenas um único instrumento, tornando a sua influência significativamente maior que a dos demais.

Por outro lado, pode-se notar que para a escala de flutuação horizontal variando entre 10 m e 50 m, o EQM permanece praticamente constante.

A figura 4.17 apresenta a variação do EQM em função da escala de flutuação vertical. Pode-se notar que o valor atribuído a essa variável não apresenta influência significativa no EQM para o intervalo de valores estudados.

O programa utilizado nas análises de percolação também pode ter influência nos resultados obtidos conforme descrito por Hachich (1981), principalmente aqueles que utilizam o método de malha variável. No caso desta pesquisa, o software utilizado foi o SEEP/W, o qual utiliza o método da malha fixa, diminuindo os problemas relacionados ao domínio de percolação.

No entanto, um dos principais problemas encontrados durante as análises diz respeito à má convergência do método quando existem duas ou mais camadas de solo adjacentes com grandes diferenças no coeficiente de permeabilidade saturado. Por grandes diferenças pode-se entender a partir de duas ordens de magnitude. Em geral, estes problemas ocorrem na interface do aterro compactado com o filtro vertical.

Inicialmente, a Barragem do Rio Atibainha foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho, mas devido ao problema de convergência descrito e a algumas características peculiares do sistema de drenagem desta barragem, foi necessária a troca do objeto de estudo.

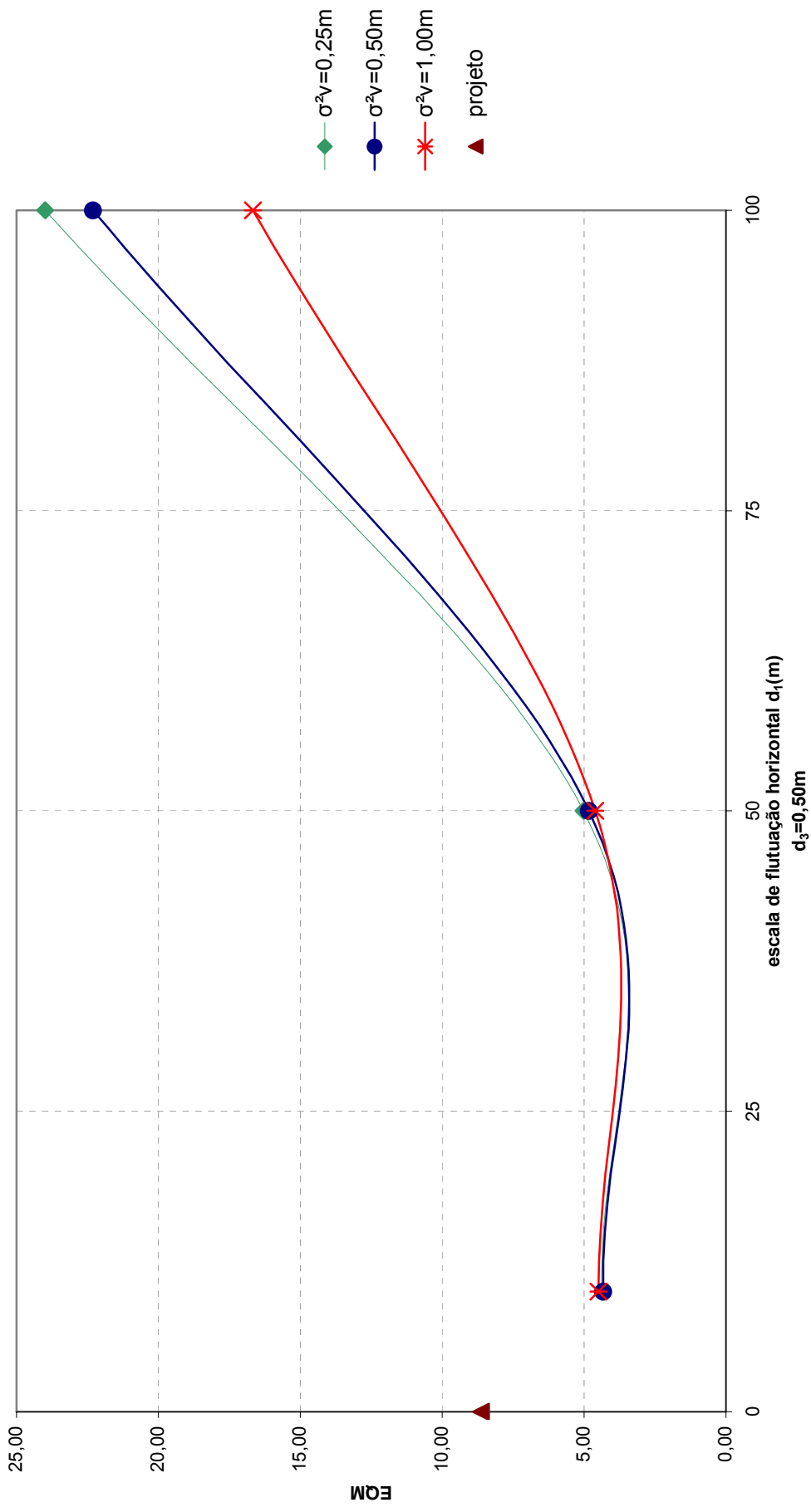


Fig. 4.16 - Variação do EQM em função da escala de flutuação horizontal

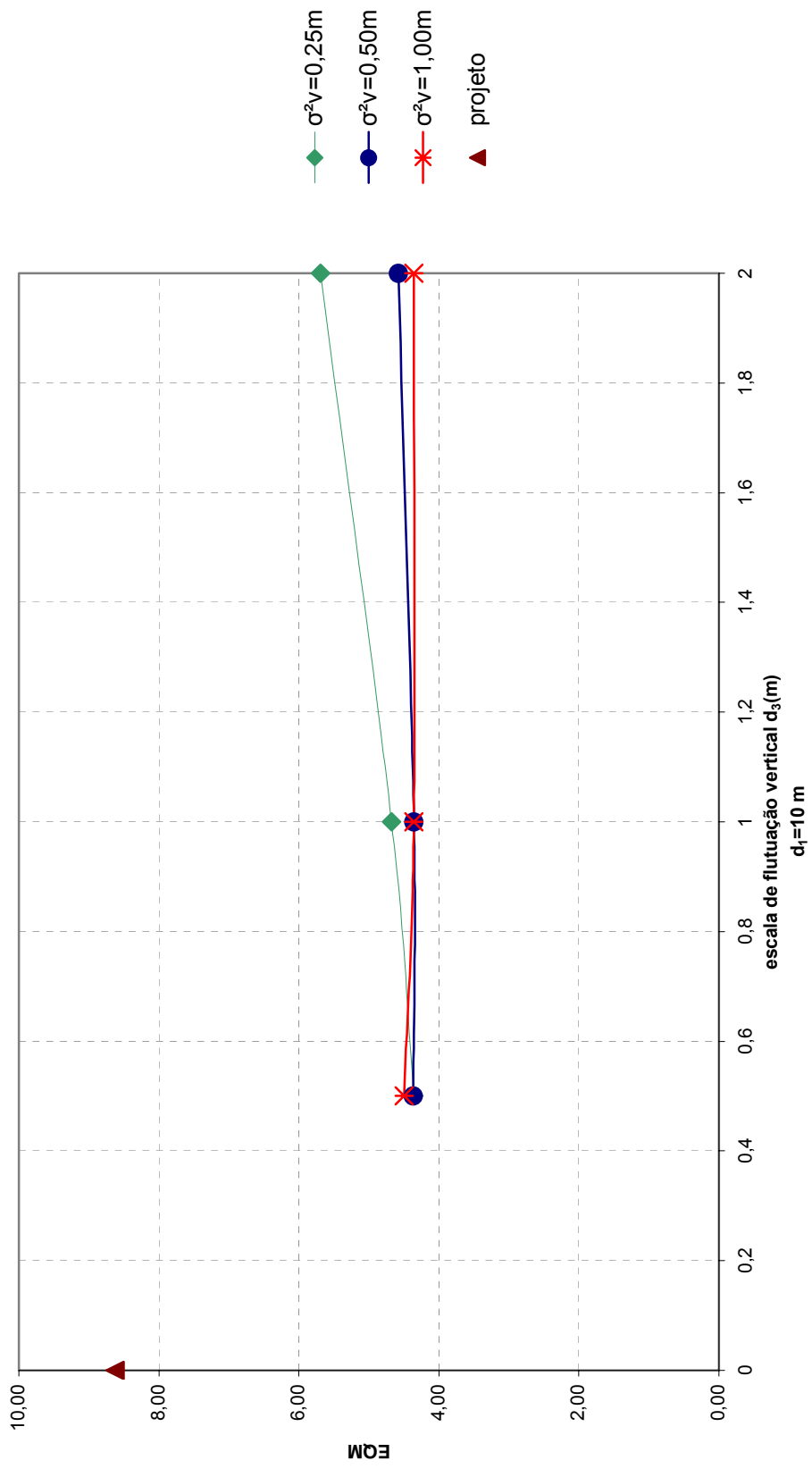


Fig. 4.17 - Variação do EQM em função da escala de flutuação vertical

A não linearidade da linha freática foi o principal obstáculo encontrado durante as análises de percolação realizadas para se determinar a matriz de sensibilidade \underline{S} . Sabe-se que esta linha faz parte da solução a ser encontrada no caso de um problema de fluxo não confinado. Tal comportamento da linha freática altera o domínio de percolação, dificultando a comparação entre as várias situações estudadas. Este problema foi contornado aumentando-se o intervalo entre as permeabilidades estudadas. No caso da obtenção do campo de permeabilidade posterior, não foram encontradas dificuldades relacionadas ao programa de percolação.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma aplicação prática de retroanálise probabilista para a atualização do campo de permeabilidades de uma barragem. A partir de um conjunto de hipóteses de trabalho, coincidentes com as hipóteses de projeto, construiu-se um modelo de comportamento da barragem e executou-se uma análise de percolação.

O modelo linear de observação proposto, aliado à aplicação do Teorema de Bayes, permitiu, então, que as informações fornecidas pela instrumentação instalada fossem utilizadas para atualizar o campo de permeabilidades, tendo como critério a minimização da diferença entre as cargas piezométricas observadas e as calculadas.

Deste modo, a partir dos resultados obtidos pode-se tecer as seguintes conclusões:

1. A metodologia proposta mostrou-se uma ferramenta bastante útil e poderosa para auxiliar na avaliação do comportamento de uma estrutura utilizando-se dados da instrumentação instalada. Com a sua aplicação, foi possível não apenas atualizar o campo de permeabilidades e melhorar as estimativas de cargas hidráulicas, mas como também validar o modelo de comportamento e as hipóteses de trabalho admitidas durante a fase de projeto.
2. Um projeto de engenharia apresenta incertezas relacionadas ao modelo e aos parâmetros. Não é possível eliminar completamente todas as incertezas, mas é possível diminuí-las. As incertezas dos parâmetros podem ser diminuídas quando se aplica a metodologia proposta, uma vez que a adição de novas informações sempre reduz os valores dos termos da matriz de covariâncias. No entanto, as incertezas do modelo são de tratamento mais difícil. O auxílio da metodologia proposta neste trabalho é indicar ao engenheiro qual dos desvios de hipótese de trabalho, dentre aqueles porventura vislumbrados por ele, apresenta

maior probabilidade de haver gerado o campo de permeabilidades posterior.

3. Os resultados obtidos sugerem que o modelo de comportamento previsto é compatível com o comportamento observado (comparar as figuras 4.7 e 4.9). Contudo, existe um sem número de modelos que poderiam gerar um mesmo campo de permeabilidades. É neste momento que a experiência do engenheiro torna-se indispensável, pois é dele a responsabilidade de analisar as hipóteses a serem adotadas e a sua validade, bem como avaliar os resultados obtidos e propor um eventual modelo alternativo de comportamento. Este fato ficou bastante claro quando da determinação da imprecisão do instrumento, por exemplo, quando uma escolha de hipótese inadequada (imprecisão muito pequena), prejudicou a aplicação da metodologia levando a resultados incoerentes.
4. Observando-se a tabela 4.2 nota-se que, com exceção dos instrumentos PI-10 e PI-19, as cargas hidráulicas observadas são maiores que as previstas. Uma vez que a matriz de sensibilidade \underline{S} , a qual indica o quanto a variação da permeabilidade de um elemento influi na resposta de um determinado instrumento, apresenta a maioria de seus elementos com sinal positivo, ou seja, há um aumento da carga hidráulica conforme o aumento da permeabilidade, obteve-se um aumento, no geral, dos valores das permeabilidades após sua atualização. (Tabela 4.3 e Figura 4.8)
5. Em todos os casos estudados, observou-se a diminuição das permeabilidades das regiões 4 e 8 quando comparadas com os valores de projeto. Isto ocorreu devido à combinação da direção de fluxo preferencialmente horizontal e pela influência do PI-10, que apresentava cargas hidráulicas medidas inferiores às previstas. O PI-19 também apresenta cargas hidráulicas observadas menores que as previstas, mas além da diferença ser menor, pelo fato deste instrumento estar muito próximo à face do talude de montante, não havia flexibilidade o

suficiente para que o método diminuísse mais a permeabilidade da região 2.

6. Comparando-se o EQM referente ao campo de permeabilidades de projeto e ao campo de permeabilidades posterior, observa-se uma redução significativa deste indicador, demonstrando a eficiência do método para encontrar o campo de permeabilidades mais compatível com as observações. (Tabela 4.5)
7. O parâmetro imprecisão do instrumento mostrou-se de grande importância para a adequada convergência do método. Quando foram adotados valores muito pequenos para este parâmetro ($\sigma_v^2 < 0,20\text{m}^2$) o método não convergiu adequadamente, sendo que em alguns casos o EQM obtido foi superior ao EQM da situação de projeto. Desta forma, fica clara a necessidade de um estudo que quantifique este parâmetro, a fim de melhorar as estimativas de permeabilidades e cargas hidráulicas obtidas com a aplicação da metodologia proposta. (Figura 4.15)
8. A escala de flutuação horizontal tem um peso importante nos resultados a serem obtidos. Ao se adotar valores elevados para este parâmetro (por exemplo, $d_1=100\text{m}$), observou-se o aumento do EQM devido à superposição das informações de vários instrumentos, diminuindo a eficiência do método. (Figura 4.16)
9. A escala de flutuação vertical, para o intervalo de valores estudado, não representou impacto significativo nos resultados obtidos. (Figura 4.17)
10. A baixa sensibilidade da posição da linha freática às variações de permeabilidades é uma condição desejada para a aplicação da metodologia proposta neste trabalho. Quando isso não acontece, a determinação da matriz de sensibilidade é bastante prejudicada, não sendo possível determinar de forma adequada a influência do valor da permeabilidade na leitura do instrumento.

11. Neste trabalho, o domínio de percolação foi discretizado em 14 regiões (macro-elementos) para a aplicação da metodologia proposta. Entretanto, caso tais regiões fossem menores, ou ainda, se os elementos de retroanálise correspondessem exatamente a cada elemento finito, os resultados obtidos seriam diferentes. De acordo com a tabela 4.2, a maioria dos instrumentos apresenta cargas hidráulicas superiores às previstas, sugerindo permeabilidades maiores. Deste modo, espera-se que o resultado a ser obtido com o domínio de percolação discretizado em mais elementos ainda seria de permeabilidades superiores às iniciais, porém com variação mais suave entre as regiões.

Com base nestas conclusões apresentam-se a seguir algumas sugestões de pesquisas futuras que podem complementar e melhorar a metodologia proposta:

- Maior discretização dos elementos de retroanálise, que neste estudo ficou limitada pela opção de utilização de uma planilha eletrônica para as operações com matrizes; essa providência exigiria rotinas especiais para o tratamento das matrizes mas permitiria a determinação de um campo de permeabilidades mais realista;
- Investigar as imprecisões de medida dos variados tipos de instrumento de auscultação, bem como as escalas de flutuação (principalmente a horizontal), uma vez que estes parâmetros têm influência significativa nos resultados obtidos com a aplicação da retroanálise probabilista proposta;
- Desenvolver um modelo matemático capaz de representar toda a imprecisão das leituras do instrumento. Vários fatores podem influenciar nas leituras dos instrumentos e um modelo matemático que consiga representá-los de maneira formal propiciará uma melhor formulação estatística do seu desempenho;

- Incluir a variável tempo. Além do fato de análises de fluxo transiente serem importantes, principalmente nos primeiros anos de utilização de uma barragem, o completo entendimento e a inclusão do comportamento da instrumentação ao longo do tempo aumentarão ainda mais a abrangência da metodologia proposta; e
- Utilização de um modelo de observação "não linear". A metodologia apresentada neste trabalho baseia-se em um modelo linear que relaciona permeabilidades e cargas hidráulicas. Um estudo interessante seria o desenvolvimento de outros modelos que possam representar de maneira mais adequada a relação entre estas duas grandezas, permitindo também que se analise qual a influência de tal modelo nos resultados obtidos.

Finalmente, cabe salientar que a retroanálise apresentada neste trabalho pode ser aplicada a diferentes tipos de estruturas, não se restringindo apenas a barragens de terra, auscultadas por outros tipos de instrumentos, diferentes de piezômetros pneumáticos. Alguns ajustes se mostrarão necessários, mas não invalidam o estudo apresentado nem a metodologia em si.

6 LISTA DE REFERÊNCIAS

ANG, A.H-S.; TANG, W.H. **Probability concepts in engineering planning and design**. New York: Jonh Wiley & Sons, 1975. 409p.

AYYUB, B.M.; McCUEN, R.H. **Numerical methods for engineers**. Upper Saddle River: Prentice Hall International, 1996. 362p.

BAECHER, G.B. Simplified geotechnical data analysis. In: NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE RELIABILITY THEORY AND ITS APPLICATIONS IN STRUCTURAL AND SOIL MECHANICS, Bornholm, 1982. **Proceedings**. Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 1983. p.257-277.

BAECHER, G.B.; INGRA, T.S. Stochastic FEM in settlement predictions. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 107, n. GT4, p.449-463, April 1981.

BAECHER, G.B.; PATÉ, M.E; DE NEUFVILLE, R. Risk of dam failure in benefit-cost analysis. **Water Resources Research**, Washington, D.C., v. 16, n. 3, p. 449-456, June 1980.

BATHE, K.J.; KHOSHGOFTAAR, M.R. Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, Chichester, v. 103, n.1, p. 13-22, 1979.

BENJAMIN, J.R. ; CORNELL, C.A. **Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers**. New York : McGraw-Hill Book. 1970. 684p.

BENSON, C.H. ; DANIEL, D.E. Minimum thickness of compacted soil liners: I. Stochastic models. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.120, n. 1, p. 129-152, Jan. 1994.

BRUCH, P.G. **A laboratory study on evaporative fluxes in homogeneous and layered soils**. Dissertação (Mestrado) - University of Saskatchewan. Saskatoon, 1993.

BRYSON Jr., A.E.; HO, Y.-C. **Applied optimal control**. Washington, D.C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1975. 481p.

CASTILLO, E. ; ALONSO, E.E. Probabilistic versus deterministic modeling: Filling a gap. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., San Francisco, 1985.

Proceedings. Rotterdam: A.A. Balkema, 1985. p.813-824.

CAMBOU, B. Applications of first-order uncertainty analysis in the finite elements method in linear elasticity. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF STATISTICS AND PROBABILITY IN SOIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, 2., Aachen, 1975. **Proceedings**. Essen: Deutsche Gesellschaft für Erd-und Grundbau e.V., 1976. p. 67-81.

CEDERGREN, H.R. **Seepage Drainage and Flow Nets**. New York: John Wiley & Sons, 1967. 489p.

CORNELL, C.A. First-order uncertainty analysis of soils deformation and stability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF STATISTICS AND PROBABILITY IN SOIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, 1., Hong Kong, 1971. **Proceedings**. Hong Kong: Hong Kong University Press, 1972. p. 130-144.

DA CRUZ, P.T. **100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de textos, 1996. 648p.

DE ZAGOTTIS, D.L. Os modelos matemáticos no projeto estrutural de barragens. Relato Geral do Tema II. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 11., Fortaleza, 1976. **Anais**. [S.l.:sn.],1976. p. 1-98.

DESAI, C.S. Some aspects of theory and applications of numerical methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL METHODS IN GEOMECHANICS, 2., Blacksburg, 1976. **Proceedings**. New York: ASCE, 1976. p. 58-78.

FENTON, G.A. Estimations for stochastic soil models. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 125, n. 6, p. 470-485, June 1999.

FENTON, G.A.; GRIFFITHS, D.V. Statistics of free surface flow through stochastic earth dam. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York: v. 122, n. 6, p. 427-436, June 1996.

FENTON, G.A.; GRIFFITHS, D.V. Extreme hydraulic gradient statistics in stochastic earth dam. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 123, n. 11, p.995-1000, Nov. 1997.

FREDLUND, D.G. Microcomputers and saturated/unsaturated continuum modeling in geotechnical engineering. In: SIMPÓSIO DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA. INFOGEO 96, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo: ABMS/NRSP, 1996. v.2. p. 29-50.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 131, p. 553-546, 1994.

GEO-SLOPE. SEEP/W for finite element seepage analysis Version 5. Geo-Slope Int. 2002. (User's manual).

GIMENES, E.A. **Contribuição à obtenção de parâmetros estatísticos de medições geotécnicas irregularmente espaçadas**.1988.72p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo, 1988.

GIODA, G.; DESIDERI, A. Some numerical techniques for free-surface seepage analysis. In: NUMERICAL METHODS IN GEOMECHANICS, Innsbruck, 1988. **Proceedings**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. p.71-84.

HACHICH, W.C. **Seepage-related reliability of embankment dams**. 1981. 164 p. Tese (Doutorado) - Massachusetts Institute of Technology , Cambridge, 1981.

HACHICH, W.C.; VANMARCKE, E.H. (1983). Probabilistic updating of pore pressure fields. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v. 109, n.3, p. 373-387, Mar. 1983.

HANNA, T.H. **Field instrumentation in technical engineering**. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1985. 843 p.(Series on Rock and Soil mechanics; v.10).

HVORSLEV, M.J. **Time lag and soil permeability in ground water observations**. S.I.: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1951. (Bulletin, 36).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ensaio de laboratório em três amostras indeformadas do tipo bloco, provenientes do Aterro Experimental para a Barragem do Jacareí**. São Paulo: IPT, 1979a. (Certificado, 564626).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ensaio de laboratório em uma amostra indeformada do tipo bloco proveniente do Aterro Experimental e uma amostra deformada coletada na Área de Empréstimo nº 1, ambos da Barragem do Jacareí**. São Paulo: IPT, 1979b. (Certificado, 572558).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ensaio de laboratório em duas amostras indeformadas do tipo bloco provenientes do Aterro Experimental da Barragem do Jacareí**. São Paulo: IPT, 1980. (Certificado, 585741).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ensaio de laboratório em três amostras indeformadas do tipo bloco provenientes de locais instrumentados da Barragem do Jacareí**. São Paulo: IPT, 1981. (Certificado, 611229).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Inspeção das barragens da Região Metropolitana - Fase de cadastramento das Barragens do Jacareí e Jaguari, Emboque do Túnel 7 e Desemboque do Túnel 2.** São Paulo: IPT, 1983. (Relatório Técnico, 17665).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Análise de percolação das Barragens do Jaguari e Jacareí.** São Paulo: IPT, 1993. (Relatório Técnico, 31029).

KRAHN, J. **Seepage modeling with SEEP/W: an engineering methodology.** Calgary: Geo-Slope International. 2004. 398p.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics.** New York: John Wiley and Sons. 1979. 553p.

LEDESMA, A.; GENS,A.; ALONSO, E.E. Probabilistic back analysis using a maximum likelihood approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., Rio de Janeiro, 1989. **Proceedings.** Rotterdam: A.A. Balkema, 1989. p. 849-852.

LI, G.C.; DESAI, C.S. Stress and seepage analysis of earth dams. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.109, n.7, p.946-960, July 1983.

MASSAD et al. **Interpretação de ensaios *in situ* e instrumentação em obras.** São Paulo: FDTE/EPUSP/IPT, 1980. (Notas de aula).

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 170p.

NEUMAN, S.P; WITHERSPOON, P.A. Finite element method of analyzing steady seepage with a free surface. **Water Resources Research**, Washington, D.C.,v.6, n.3, p. 889-897, Mar. 1970.

NEUMAN, S.P.; WHITERSPOON, P.A. Analysis of non-steady flow with a free surface using the finite element method. **Water Resources Research**, Washinton, D.C., v.7, n.3, p. 611-623, Mar. 1971.

PECK, R.B. Advantages and limitations of the Observational Method in applied Soil Mechanics. Ninth Rankine Lecture. **Géotechnique**, London, v.19, n. 2, p. 171-187, June 1969.

ROGOWSKI, A.S. **Relationship of laboratory and field determined hydraulic conductivity in compacted clay liners**. Cincinnati, 1990 (EPA/600/S2-90/025).

SMITH, G.N. **Probability and statistics in civil engineering: an introduction**. London: Collins, 1986. 244p.

SRIDHARAN, A. Engineering properties of tropical soils. General report - Technical Session II. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2., Singapore, 1988. **Proceedings**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. p.42-56. (Supplementary Documentation).

TANG, W.H. A bayesian evaluation of information for foundation engineering design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF STATISTICS AND PROBABILITY TO SOIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, 1., Hong Kong, 1971. **Proceedings**. Hong Kong: Hong Kong University Press, 1972. p. 173-185.

TAYLOR, R.L.; BROWN, C.B. Darcy flow solutions with a free surface. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 93, n. HY2, p. 25-33, Mar./Apr. 1967.

TEIXEIRA, H.R. et al. Aspectos do controle e da construção dos maciços de terra das barragens do Jaguari e Jacareí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7., Olinda/Recife, 1982. **Anais**. São Paulo: ABMS, 1982. p. 154-173.

TERZAGHI, C. Effect of minor geologic details on the safety of dams. In: TERZAGHI, K. **From theory to practice in soil mechanics**: selections from the writings. New York: John Wiley & Sons, 1960. p. 119-132.

VANMARCKE, E.H. Probabilistic modeling of soil profiles. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 103, n. GT11, p. 1227-1246, Nov. 1977.

VANMARCKE, E.H. **Averages and extremes of random functions**. Cambridge: MIT, 1979 (Research report, R79-43).

VARGAS, M. A história da matematização dos fenômenos geotécnicos. In: SIMPÓSIO DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA, INFOGEO 96., São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo: ABMS/NRSP, 1996. p. 81-98.

VENEZIANO, D.; FACCIOLI, E. Bayesian design of optimal experiments for the estimation of soil properties. IN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF STATISTICS AND PROBABILITY TO SOIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, 2., Aachen, 1975. **Proceedings**. Essen: Deutsche Gesellschaft für Erd. und Grundbau, 1976. p. 191-213.

WOLFF, R.W. **Stochastic modeling and the theory of queues**. Upper Saddle River: Prentice Hall International, 1988. 556p. (Series in Industrial and Systems Engineering).

ERRATA

Página	Linha	Onde se lê	Leia-se
3	5	... assume-se que admite-se que ...
3	rodapé	caracteríssticas	características
6	24	escolhido	escolhida
4	20	... não se tivesse se tivesse ...
9	12	pressão neutra	pressão piezométrica
10	2	... a mesma permite as mesmas permitem ...
16	14	representa	represente
16	24	coincidam	coincidem
19	25	assumido	adotado
24	7	Lambe e Whitman (1979)	Lambe e Whitman (1969)
27	21	pressão neutra	pressão piezométrica
31	18	$\underline{m}_k = \underline{m}_k + \underline{C}_k \cdot \underline{S}^T \cdot (\underline{S} \cdot \underline{C}_k \cdot \underline{S}^T + \underline{V})^{-1} \cdot (\underline{Z} - \underline{A} - \underline{S} \cdot \underline{m}_k)$	$\underline{m}_k = \underline{m}_k + \underline{C}_k \cdot \underline{S}^T \cdot (\underline{S} \cdot \underline{C}_k \cdot \underline{S}^T + \underline{V})^{-1} \cdot (\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{m}_k)$
31	21	$(\underline{A} - \underline{S} \cdot \underline{m}_k)$	$(\underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{m}_k)$
32	1	$(\underline{Z} - \underline{A} - \underline{S} \cdot \underline{m}_k)$	$(\underline{Z} - \underline{a} - \underline{S} \cdot \underline{m}_k)$
38	8	figura 2.6	figura 3.4
43	25	... das eq. 3.14 da eq. 3.14
64	11	instrumente	instrumento
80	12	1979	1969

Página 4 - linha 3:

Complementação: Baseado nos resultados e no método proposto por estes autores, esta dissertação tem como principais objetivos:

- Fazer uma revisão da retroanálise probabilista e sua aplicação prática em uma barragem de terra;
- Rever os valores dos parâmetros do modelo;
- Avaliar a adequação do modelo e, se necessário, sugerir um novo modelo de comportamento; e
- Desenvolver um estudo paramétrico que indique a influência de cada uma das variáveis da retroanálise probabilista nos resultados obtidos.

Página 6 - linha 27:

Comentário: os valores de pressões neutras podem ser determinados em locais e tempos determinados, pois a instrumentação instalada tem este objetivo. No entanto, a expressão “valores reais” deve ser entendida dentro do conceito probabilista, ou seja, não é possível determinar o valor **real** de uma grandeza mas sim, **estimá-la** a partir de dados disponíveis como leituras de piezômetros por exemplo.

Página 11 - linha 6:

Complementação: O *basic time lag* é o tempo de resposta de um piezômetro, ou seja, o tempo que o instrumento demora pra refletir as variações de pressões piezométricas do seu entorno.

Página 15 - linha 13 (eq. 2.3):

\underline{I} é a matriz de transmissibilidade, \underline{h} é a carga hidráulica e \underline{q} é o fluxo nodal.

Página 27 - linha 4:

Complementação: A chamada estatística bayesiana utiliza todas as ferramentas da estatística clássica (ou freqüentista), mas ela apresenta algumas características peculiares, destacando-se:

- Probabilidade é o grau de confiança que se tem na ocorrência de um determinado evento (quando para os freqüentistas, probabilidade é, necessariamente, uma freqüência relativa); e
- Um parâmetro de distribuição pode ser tratado como uma variável aleatória (quando para os freqüentistas, um parâmetro é apenas uma constante desconhecida).

Página 41 - figura 3.5b:

S é a escala de flutuação.

Página 44 - figura 4.1:

Informações complementares:

- PZ são piezômetros tipo Casagrande;
- PI são piezômetros pneumáticos tipo IPT;
- NA são medidores de nível d'água;
- O aterro da barragem e o filtro horizontal fazem contato com a rocha sã da fundação; e
- A cota representa a elevação em metros.

Página 49 - linha 3:

Comentário: Utilizou-se os dados do aterro experimental da Barragem do Jacareí, pois os materiais construtivos das duas barragens são muito semelhantes e apresentam, na média, as mesmas propriedades, apesar de não serem oriundos da mesma área de empréstimo.

Página 50 - tabela 4.2:

Cotas e diferenças expressas em metros (m).