

# 1 Introdução

Uma das principais etapas no projeto e monitoramento de barragens de terra e de enrocamento é a avaliação da vazão, dos gradientes hidráulicos e das poropressões em diversos pontos e regiões da barragem a fim de se estimar os riscos decorrentes do fluxo de água através do corpo da barragem, de sua fundação e/ou ombreiras.

Na engenharia geotécnica a análise deste problema normalmente requer a utilização de modelos bi-dimensionais, por meio da seleção de uma seção transversal da barragem e de sua fundação que seja considerada a mais representativa, ou crítica, do problema. Esta metodologia tem vários apelos a favor, como a tradição do projeto de barragem considerando um problema de fluxo no plano, a maior rapidez de processamento numérico em microcomputadores, maior facilidade na construção do modelo e na imposição de condições de contorno, menor dificuldade na obtenção dos relevantes parâmetros de engenharia através de ensaios de campo ou de laboratório, etc.

Entretanto, a adoção da representação no plano de um problema inerentemente tridimensional pode causar a obtenção de respostas incorretas, como no caso de barragens de terra construídas em vales profundos e estreitos, em forma de V, situação típica de regiões montanhosas, como ao longo da cordilheira dos Andes na América do Sul.

Programas computacionais baseados no método dos elementos finitos para análise de fluxo de água 3D através de maciços de solo, incluindo a resposta transiente e aspectos relativos ao comportamento de materiais parcialmente saturados, são raramente encontrados e, quando disponíveis comercialmente, revelam-se ainda bastante caros ou com limitações.

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta numérica GEOFLUX3D, com base no método dos elementos finitos escrito na linguagem Fortran, para a análise das condições de fluxo transiente em barragens

com geometrias tridimensionais irregulares, a partir do programa computacional GEOFLUX elaborado por Machado (2000) para situações de fluxo bidimensional.

Os efeitos 3D no comportamento hidráulico de barragens de terra podem ser então verificados pelas diferenças de resultados obtidos na simulação computacional do mesmo problema através da utilização simultânea de malhas de elementos finitos bi e tridimensionais, respectivamente. Conforme será observado, os erros introduzidos pela simplificação 2D podem ser importantes, justificando a realização de análises 3D a despeito da maior dificuldade na modelagem geométrica do problema e do maior tempo necessário para processamento e análise dos resultados.

A estrutura desta dissertação está dividida em 6 capítulos:

No segundo capítulo são introduzidos conceitos básicos associados ao fluxo não saturado, das curvas características de sucção com os modelos utilizados para sua implementação numérica, bem como é apresentada a equação geral governante do problema de fluxo 3D transiente (equação de Richards), em forma matricial tendo em vista a solução deste problema de valor inicial através da aplicação do método dos elementos finitos.

O terceiro capítulo refere-se às implementações computacionais executadas durante o desenvolvimento do programa GEOFLUX3D, as discretizações feitas nos domínios do espaço e do tempo, a solução da não-linearidade da equação de Richards pelo método de Picard Modificado, os critérios de convergência adotados e, finalmente, as matrizes e vetores característicos para a solução numérica do problema.

O quarto capítulo apresenta os exemplos de verificação do programa desenvolvido nesta dissertação, comparando os resultados analíticos determinados em algumas análises uni e bidimensionais com os correspondentes valores numéricos calculados com base no programa GEOFLUX3D.

O quinto capítulo trata dos exemplos de aplicação da ferramenta numérica em barragens projetadas em vales estreitos, com a ocorrência de efeitos 3D no fluxo de água. No primeiro exemplo, analisa-se o comportamento da barragem de enrocamento Gouhou, localizada na China, comprando-se os resultados numéricos da análise transiente com aqueles reportados por Chen e Zhang (2006). No segundo, analisam-se as condições de fluxo (sob regime transiente e permanente)

na barragem de terra Macusani, também se comparando os resultados na condição permanente com aqueles obtidos por Huertas (2006) que utilizou o programa comercial **SEEP3D**, v.1.15. Em ambos os exemplos, a potencialidade do programa computacional **GEOFLUX3D** é demonstrada e justificada como ferramenta de projeto para análise de problemas de fluxo 3D em barragens de terra.

Finalmente, o sexto capítulo resume as principais conclusões obtidas neste trabalho e apresenta também algumas sugestões para pesquisas futuras nesta área.