

## Introdução

A transferência de umidade sob a influência de gradientes de temperatura em solos não-saturados está presente em muitas aplicações práticas da engenharia. Técnicas de remediação de áreas contaminadas que envolvem diretamente a imposição de calor, projetos de cabos de potência aterrados, tanques de armazenamento subterrâneos, entre outros, dependem do conhecimento das propriedades que estão envolvidas no transporte de massa e energia no solo. Para o estudo de tal fenômeno, é necessário o conhecimento das propriedades difusivas e termofísicas do solo, que são fortemente influenciadas pela temperatura e pelo teor de umidade. Desse modo, a transferência de umidade e calor, tanto na forma líquida quanto de vapor, depende de ambos os gradientes, térmico e de umidade, fazendo com que seja um fenômeno que envolve processos que interagem e influenciam-se mutuamente.

Estudos do movimento de umidade em meios não-saturados são realizados desde o início do século passado, porém no início da década de 50, tais estudos sofreram um significativo avanço com a publicação de modelos que incorporaram a influência da temperatura no transporte de umidade. A análise do processo de transporte de umidade em condições isotérmicas, em situações com presença de expressivos gradientes de temperatura, pode apresentar erros significativos na estimativa de umidade no meio poroso. Como exemplo, temos as regiões áridas e semi-áridas, com altas temperaturas na superfície do solo ou casos de transporte de contaminantes químicos em águas subterrâneas.

*Philip e de Vries* (1957) descreveram o processo do movimento de umidade em solos sob a influência de gradientes térmicos através de um modelo físico-matemático que se tornou referência básica no assunto. A partir do modelo de *Philip e de Vries*, inúmeros outros modelos foram desenvolvidos. *Milly* (1982) modificou o modelo de *Philip e de Vries* onde generalizou a formulação em

função da carga de pressão, incluiu os efeitos da temperatura na solução do fluxo de umidade, um fator que *Philip e de Vries* negligenciavam, e também efeitos de histerese no fenômeno.

*Wilson et al* (1994) apresenta a teoria do acoplamento termo-hidráulico a partir de gradientes carga total e de pressão de vapor, com a inclusão de um módulo de mudança de volume com respeito à fase de vapor d'água. *Thomas e Sansom* (1995) apresentam a formulação do acoplamento termo-hidráulico com a inclusão da transferência de ar no processo. Isso se torna importante devido a complexibilidade do fenômeno na presença da fase ar durante o processo de resaturação e a necessidade de incluir a influência de elevadas pressões de ar na resaturação. Também são descritos estudos sobre a migração de contaminantes gasosos (*Thomas e Ferguson*, 1999) através de um liner de argila de um aterro sanitário, tratando a migração de água, calor ar e contaminante gasoso separadamente.

*Khalili e Loret* (2002) apresentam a teoria para o fenômeno do acoplamento termo-hidro-mecânico (THM) em meios porosos não-saturados deformáveis, baseada nas equações de equilíbrio, conceito de tensões efetivas, lei de Darcy, lei de Fourier e conservação de massa e energia. *Thomas et al* (1995) também apresentam a modelagem de processos termo-hidro-mecânicos em contaminantes de rejeitos nucleares, com a utilização de barreiras reativas. A utilização de modelos termo-hidráulicos também esta presente na mecânica das rochas com a análise multifásica de fluxo de umidade, transporte de calor, e deformação em rochas fraturadas (*Rutqvist et al*, 2002)

Tais modelos baseiam-se em conceitos derivados da mecânica dos fluídos, da difusão de umidade e da condução de calor. Partindo-se do pressuposto que ainda não são claramente compreendidos os processos físicos e termodinâmicos dos solos não saturados, todas as análises feitas adotam hipóteses simplificadoras e fornecem resultados considerados aproximados.

Entre os diversos fatores que dificultam uma análise correta nos processos de transferência de umidade e calor em meios não-saturados podemos citar o simples entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem na matriz sólida de solo, e a compreensão das equações dos modelos citados acima e suas simplificações, as quais serão citadas no decorrer do trabalho.

A principal motivação deste estudo é a compreensão do processo de migração da umidade no solo em resposta a gradientes de temperatura existentes ou impostos. Este processo, especificamente na geotecnia ambiental, está envolvido diretamente em técnicas de remediação de áreas contaminadas que utilizam a aplicação de calor, como por exemplo, a desorção térmica.

A dissertação tem como objetivo a validação de implementações de efeitos de gradientes de temperatura no fluxo de umidade em um programa originalmente desenvolvido para a simulação bidimensional de fluxo em meios não-saturados, transporte de calor e transporte de soluto. A idéia inicial consistia da validação de resultados de simulações numéricas contra resultados gerados a partir de uma solução analítica, porém devido à alta não-linearidade do fenômeno juntamente com as hipóteses simplificadoras envolvendo as condições iniciais e condições de contorno, tornam as soluções analíticas existentes muito limitadas, sendo difícil sua utilização. Assim sendo, as simulações numéricas realizadas foram comparadas com resultados gerados experimentalmente por *Bach* (1989).

No capítulo 2 é apresentada uma breve introdução do processo de transferência de umidade e calor no solo, mostrando os aspectos físicos que estão envolvidos no fenômeno. São também mencionados os principais modelos de fluxo e de calor em meios não-saturados destacando o modelo desenvolvido por *Philip e de Vries* (1957) e o modelo desenvolvido por *Milly* (1982) que foi adotado no programa, assim como outros modelos existentes na literatura.

O capítulo 3 descreve a metodologia da solução numérica, onde são demonstradas as formulações numéricas e em elementos finitos das equações governantes do modelo termo-hidráulico. Neste capítulo é mostrada ainda a estratégia de solução numérica para as equações de fluxo utilizada pelo programa, descrevendo o processo de iteração numérica adotado. Ainda neste capítulo são demonstradas as implementações que foram realizadas no código do programa e que representam os efeitos dos gradientes térmicos na solução numérica do fluxo de umidade e os efeitos dos gradientes de pressão no fluxo de calor.

A validação do programa é realizada no capítulo 4, através de resultados experimentais, com a descrição das condições iniciais e condições de contorno, assim como uma breve introdução ao experimento. Também são descritos os exemplos utilizados na simulação numérica, com sua geometria, condições iniciais e de contorno, e simplificações numéricas que foram adotadas.

Finalizando, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões sobre os estudos realizados durante o desenvolvimento da dissertação, e também sugestões para futuros trabalhos no assunto.