4 Exemplos de verificação

Neste capitulo são apresentados exemplos para verificar o programa computacional desenvolvido para fluxo 3D em meios porosos saturados ou nãosaturados, nas condições de regime de fluxo transiente ou permanente. Esses exemplos foram testados por Machado (2000) para validação do GEOFLUX na sua versão original, utilizando malhas bidimensionais.

São também feitas comparações entre resultados numéricos e valores analíticos da solução da equação de Richards, estes últimos obtidos por Srivastava e Yeh, (1991), para situação 1D, e Warric e Lomen (1976), para situação 2D.

Cabe observar aqui que não se validou o código com domínios genéricos tridimensionais, já que não foi possível encontrar na literatura soluções analíticas para domínios 3D. No próximo capítulo, resultados de exemplos de aplicação são comparados com soluções numéricas 3D obtidos pelo programa computacional GEOFLUX3D e similares.

As evoluções dos contornos de poropressão no espaço e no tempo determinados pelo programa GEOFLUX3D mostraram-se bastante próximas às soluções analíticas, indicando que a solução do problema não-linear pelo método de Picard modificado é algoritmo bastante eficiente para este tipo de problema.

4.1. Fluxo transiente unidimensional

São apresentados exemplos de fluxo em regime transiente unidimensional através de colunas formadas por um e dois materiais, cujas soluções analíticas foram obtidas por Srivastava e Yeh (1991). Para as simulações numéricas no GEOFLUX3D empregou-se o modelo exponencial para a descrição das curvas características dos solos não-saturados.

4.1.1.

Infiltração e drenagem em uma coluna de solo constituída por um único material

A primeira análise corresponde ao processo de infiltração devido a uma condição de fluxo 1D prescrito no valor de 0,009 m/h no topo de uma coluna de solo de um metro de altura constituída de um único material, como mostrado na figura 4.1. Também é apresentada nesta figura a malha de elementos finitos adotada (222 nós e 668 elementos do tipo TETR4) juntamente com as condições de contorno e a condição inicial do problema. Os valores selecionados para as propriedades do material são os apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material - parâmetros do modelo exponencial. (Srivastava e Yeh, 1991).

α_{exp}	$K_s(m/h)$	$\theta_{\rm r}$	$\theta_{\rm s}$
1.0	0,01	0,20	0,45



Figura 4.1 - Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno.

A condição inicial desse processo de infiltração, indicada na Figura 4.1, é igual à condição estacionária estabelecida a partir de uma análise preliminar indicada na figura 4.2. Esta análise preliminar consiste na simulação de um processo de infiltração devido a um fluxo de 0,001m/h prescrito no topo da coluna sendo a mesma sujeita, inicialmente, a uma distribuição de carga hidráulica total nula, como indicado na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material - análise preliminar.

O tempo foi discretizado em 1000 passos de tempo de 0,1 horas de duração até atingir a condição de regime permanente depois de 100 horas. Adotou-se para o tratamento da não-linearidade uma tolerância de 1% e um máximo de 50 iterações para atingir esta convergência.

A velocidade de processamento foi muito rápida, com toda a simulação executada em menos de 1 minuto de processamento. Os resultados computados pelo GEOFLUX3D são apresentados na figura 4.3 em termos da distribuição da carga de pressão no tempo e no espaço. A partir desta figura pode-se notar que a

solução numérica apresentou uma excelente concordância com a solução analítica (Srivastava e Yeh, 1991) para todos os instantes de tempo avaliados.

A condição estacionária para este problema foi observada em aproximadamente 100 horas. Cabe ressaltar que a camada de solo não atingiu a saturação completa, ou seja, a velocidade de fluxo imposta não foi suficiente para saturar a camada de solo. Para isto, seria necessária a aplicação de uma velocidade de fluxo prescrita maior do que o valor da condutividade hidráulica saturada.



Figura 4.3 – Infiltração em uma coluna de solo constituída de um único material – resultados numéricos e analíticos.

O segundo exemplo analisado corresponde ao processo de drenagem da mesma coluna de solo, desta vez prescrevendo-se um fluxo de 0,001 m/h no topo da camada, como indicado na figura 4.4. A condição inicial corresponde à distribuição das pressões finais obtidas para condição estacionária no processo anterior de infiltração. O material, a discretização do tempo, o tipo de marcha no tempo e os parâmetros para o tratamento da não-linearidade são iguais aos do primeiro exemplo.



Figura 4.4 - Drenagem em uma coluna de solo constituída de um único material – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.5 em termos da distribuição no tempo e no espaço da carga de pressão. Observa-se novamente uma boa concordância entre os resultados das soluções numérica e analítica (Srivastava e Yeh, 1991), em todos os instantes de tempo avaliados.

A condição estacionária foi obtida em aproximadamente 100 h. Ou seja, a drenagem da camada de solo ocorreu no mesmo período de tempo que o processo de infiltração. A distribuição das cargas de pressão no regime permanente é praticamente a distribuição inicial de pressões utilizada no processo de infiltração.



Figura 4.5 – Drenagem em uma coluna de solo constituída de um único material – resultados numéricos e analíticos.

4.1.2. Infiltração e drenagem em uma coluna de solo constituída por dois materiais

O exemplo adota a mesma estratégia de solução do exemplo anterior (único solo), ou seja, analisa-se inicialmente o processo de infiltração devido a um fluxo prescrito no topo da coluna de solo e, em seguida, investiga-se o processo de drenagem desta coluna devido à variação do fluxo imposto. A diferença com os exemplos do item 4.1.1 é que desta vez o solo é constituído por dois materiais com diferentes condutividades hidráulicas.

A primeira situação estudada é o processo de infiltração devido a um fluxo prescrito de 0,009 m/h imposto no topo da coluna de dois metros de altura, formada por dois materiais, como indicado na figura 4.6. Apresenta-se também nesta figura a malha de elementos finitos utilizada (429 nós e 1314 elementos tipo

TETR4) juntamente com as condições de contorno e a condição inicial do problema. Esta condição inicial foi definida, de maneira análoga à apresentada no item 4.1.1, sendo igual à condição em regime permanente obtida a partir da simulação prévia de um fluxo prescrito de 0.001 m/hr no topo da coluna.



Figura 4.6 - Infiltração em uma coluna de solo constituída de dois materiais – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno.

Os valores adotados para as propriedades dos materiais são apresentados na tabela 4.2. Cabe observar que Srivastava e Yeh (1991) empregaram uma única curva de retenção de água para materiais diferentes. O fato aparentemente não traz inconvenientes numéricos, porém é fisicamente inconsistente.

Material	α_{exp}	K _s (m/h)	$\theta_{\rm r}$	$\theta_{\rm s}$
1 (camada superior)	10,0	0,10	0,06	0,40
2 (camada inferior)	10,0	0,01	0,06	0,40

Tabela 4.2 – Infiltração e drenagem em uma coluna de solo constituída de dois materiais - parâmetros do modelo exponencial. (Srivastava e Yeh, 1991)

O tempo foi discretizado em 1000 passos com 0,1 horas de duração até atingir a condição de regime permanente após 100 horas. Adotou-se para o tratamento da não-linearidade uma tolerância de 1 %, com número máximo de iterações igual a 50.

Os resultados fornecidos pelo programa GEOFLUX3D são apresentados na figura 4.7. Mais uma vez, uma concordância satisfatória entre resultados das soluções numérica e analítica (Srivastava e Yeh, 1991) foi observada para todos os instantes de tempo analisados.



Figura 4.7 - Drenagem em uma coluna de solo constituída de dois materiais – resultados numéricos e analíticos.

Cabe observar que a velocidade de fluxo (0,009m/h) imposta no topo da coluna é aproximadamente um décimo do valor da condutividade hidráulica saturada (0,1m/h) do material da camada superior de solo. Isso indica que esta camada, mesmo ao atingir o regime de fluxo permanente, não se encontrará totalmente saturada, enquanto que a camada inferior, com condutividade hidráulica saturada de 0,01m/h, aproximadamente igual à velocidade de fluxo prescrito, atingirá o regime de fluxo permanente com saturação bastante próxima a 100%.

A segunda situação analisada corresponde ao processo de drenagem desta mesma coluna de solo, devido à variação do fluxo prescrito no topo da camada de 0,009 m/h para 0,001 m/h. A condição inicial indicada na figura 4.8, é igual à distribuição de poropressões obtida na condição estacionária do processo de infiltração. Os materiais, a discretização do tempo, o tipo de marcha no tempo e os parâmetros para o tratamento da não-linearidade são também iguais.



Figura 4.8 - Drenagem de uma coluna de solo constituída de dois materiais – malha de elementos finitos e valores das condições iniciais e de contorno.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.9 em termos da distribuição, no espaço e no tempo, da carga de pressão. A partir dessa figura, pode-se observar que existe uma boa concordância entre a solução numérica e a solução analítica obtida por Srivastava e Yeh (1991) para todos os instantes de tempo considerados chegando-se em regime permanente na condição inicial do processo de infiltração analisado no item anterior.



Figura 4.9 - Drenagem em uma coluna de solo constituída de dois materiais – resultados numéricos e analíticos.

4.2. Fluxo transiente bidimensional

Este exemplo tem como propósito validar o programa para condições bidimensionais de fluxo, comparando-se os resultados numéricos com soluções analíticas obtidas por Warrick e Lomem (1976).

Investiga-se o processo de infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado sobre uma faixa da superfície da camada, como ilustrado na figura 4.10. Na solução analítica do problema Warrick e Lomen (1976) adotaram funções exponenciais semelhantes àquelas utilizadas por Srivastava e Yeh (1991). Deste modo, na solução numérica pelo programa GEOFLUX3D, o modelo exponencial foi utilizado na representação do comportamento hidráulico dos solos não-saturados.



Figura 4.10 – Infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado numa faixa da superfície, com indicação das condições iniciais e de contorno.

A figura 4.11 apresenta a malha de elementos finitos adotada (1871 nós e 9011 elementos do tipo TETR4) e a tabela 4.3 lista os valores das propriedades dos materiais.

Tabela 4.3 – Infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado a uma faixa da superfície – parâmetros do modelo exponencial. (Warrick e Lomen, 1976)

α_{exp}	K _s (m/min)	$\theta_{\rm r}$	$\theta_{\rm s}$
4.0	0,000694	0,00	0,50

O tempo foi discretizado em 72 intervalos de 1 minuto. No tratamento da não-linearidade adotou-se uma tolerância de 1 % e um número máximo de 50 iterações.



Figura 4.11 – Malha de elementos finitos, utilizada para simulação da infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado em uma faixa da superfície.

Os resultados fornecidos pelo programa GEOFLUX3D em termos das curvas com mesma carga de pressão (isóbaras) para dois instantes representativos da simulação (36 e 72 minutos) são ilustrados na figura 4.12.



(a) 36 minutos (b) 72 minutos Figura 4.12 - Evolução das cargas de pressão computadas pelo GEOFLUX3D.

Finalmente, a figura 4.13 faz uma comparação entre as isóbaras obtidas analítica e numericamente para os mesmos intervalos de tempo (36 min e 72 min). Conforme pode ser verificado, a solução numérica obtida pelo programa computacional desenvolvido nesta dissertação apresentou uma excelente concordância com a solução analítica, tanto no espaço quanto no tempo.



Figura 4.13 - Infiltração em uma camada de solo sujeita a um fluxo constante aplicado numa faixa da superfície – comparação dos resultados numéricos e analíticos em (a) 36 min; (b) 72 min.