

5 Exemplos

Este capítulo apresenta o modelo analítico de escoamento superficial e os exemplos para validação e demonstração das implementações computacionais realizadas. A validação do modelo superficial será dada pela comparação, entre os resultados numéricos e obtidos através da solução analítica. Em seguida, um exemplo para validação do modelo acoplado será apresentado, considerando a conservação da massa no sistema como parâmetro de validação. A escolha desse parâmetro foi dada, considerando que, os modelos de escoamento já validados, tratam corretamente seu fenômeno, dependendo somente das trocas de massa entre os sistemas, a qual é gerenciada pela rotina de acoplamento. Após a validação dessa rotina, serão apresentados exemplos que demonstrarão a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos.

5.1. Análise de sensibilidade do modelo Analítico

Expressões analíticas, para fluxo superficial, são deduzidas para planos retangulares, de comprimento definido L , largura W e declividade S , abaixo de taxa de chuva constante i_e . É considerado que o plano está inicialmente seco ($h=0$ e $q=0$) antes do início de precipitação ($t=0$). A altura da coluna de água aumenta linearmente com o tempo ($h=i_e t$), até atingir a vazão de equilíbrio no exutor. Quando o tempo de concentração (t_c) é menor que o tempo de precipitação (t_p), sua vazão de saída é dada por $q = i_e L$. Durante o período de equilíbrio, o fluxo é permanente e não uniforme, com a vazão em um ponto do plano definido a uma distancia x da montante (origem), dada por $q = i_e x$. A depleção da vazão inicia-se, com o fim da precipitação ou, a partir do tempo de concentração, dependendo das relações entre eles.

A solução analítica será o parâmetro de validação dos modelos numéricos de escoamento superficial, visto que, nenhum programa computacional existente foi adotado para comparações de resultados. Os dados utilizados para validação foram retirados de Gotardi *et al.*, 1993, também adotados por outros autores

como em Jaber *et al.* (2003), para validação dos modelos numéricos desenvolvidos.

Cinco análises de sensibilidade foram apresentadas, a fim de, verificar as diferentes respostas do hidrograma no exutor do plano de escoamento, para variações de somente um parâmetro por análise.

5.1.1. Variação do coeficiente de Manning

Os parâmetros utilizados para obtenção do Figura 5.1, foram: declividade do plano = 0.0005m/m , comprimento do plano = 400m , precipitação = 19.8 mm/h , duração = 3.3h . Os coeficientes de Manning e os tempos de concentração calculados estão na Tabela 5.1.

Curva	1	2	3
Manning [$\text{m}^{-1/3}\text{h}$]	5.56E-05	5.56E-06	5.56E-07
tc [h]	4.78	1.2	0.793

Tabela 5.1 – Parâmetros do coeficiente de Manning utilizados e tempos de concentração.

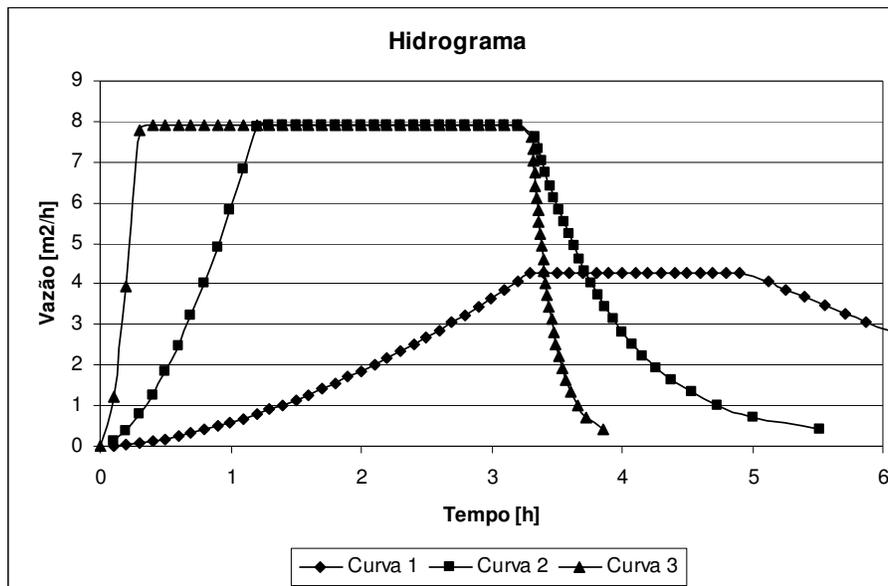


Figura 5.1 – Hidrogramas no exutor para diferentes coeficientes de Manning.

A curva 3, com menor coeficiente de Manning, apresenta menor resistência ao escoamento, reduzindo seu valor de t_c , alcançando a vazão de pico neste tempo. ($t_c = 0.793h$, $n = 0.000000556m^{-1/3}.h$).

Para a curva 2, com coeficiente 10 vezes maior, o tempo de concentração calculado (1.2h) foi inferior ao período de precipitação, conseqüentemente a característica hidrológica é a mesma apresentada pela curva 3.

A curva 1 (grande resistência ao escoamento) apresentou período de concentração (4.78h) superior ao período chuvoso, iniciando o regime permanente, após término da chuva. Esse resultado implica que a vazão de saída, a partir de 3.3h, será alimentada apenas pelo fluxo de montante, sem contribuição externa, até que a onda alcance o fim do plano e ocorra o decréscimo do fluxo.

5.1.2. Variação do comprimento do plano

Os parâmetros utilizados para obtenção da Figura 5.2, foram: declividade do plano = 0.0005, coeficiente de Manning = $5.56E-06m^{1/3}h$, precipitação = 19.8mm/h, duração = 3.3h. Os comprimentos e os tempos de concentração calculados estão na tabela 5.2.

Curva	1	2	3
Comprimento [m]	200	400	600
t_c [h]	0.793	1.2	1.53

Tabela 5.2 – Comprimentos dos planos utilizados e tempos de concentração.

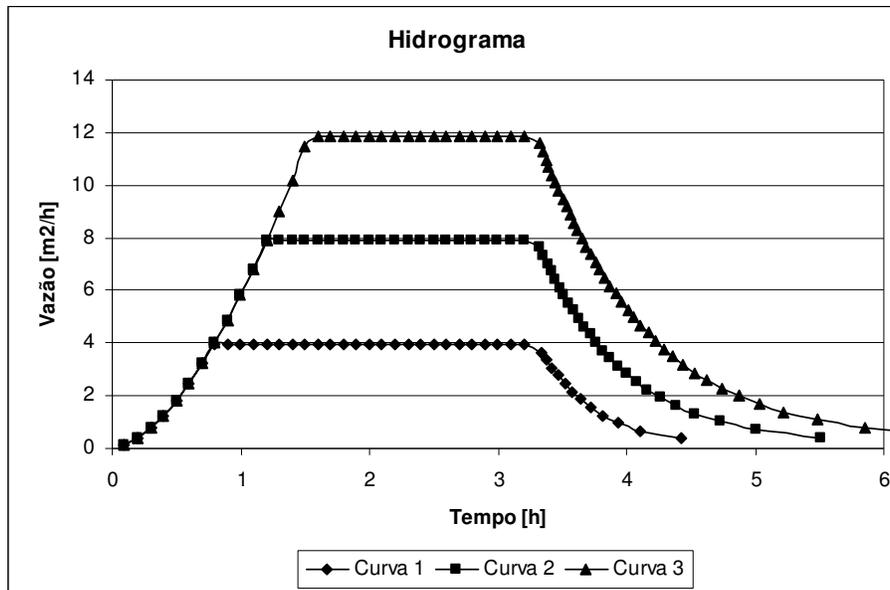


Figura 5.2 - Hidrogramas no exutor para diferentes comprimentos de planos.

A variação do comprimento do plano, utilizando o mesmo conjunto de dados, altera o volume de água no sistema e o tempo de concentração. Desta forma, planos maiores possuem pico de vazão mais elevados e maiores t_c . O comportamento hidráulico decorrente da relação t_c , t_p (tempo de precipitação), segue a teoria de acordo com o item 2.1.4 para $t_c < t_p$.

5.1.3. Variação da declividade do plano

Os parâmetros utilizados para obtenção da Figura 5.3, foram: comprimento = 400m, coeficiente de Manning = $5.56E-05 m^{1/3}h$, precipitação = 19.8 mm/h, duração = 3.3 h. Os declives e os tempos de concentração calculados estão na Tabela 5.3.

Curva	1	2	3	4
Declividade [-]	0.5	0.05	0.005	0.0005
t_c [h]	0.6	1.2	2.4	4.78

Tabela 5.3 – Declividade dos planos e tempos de concentração.

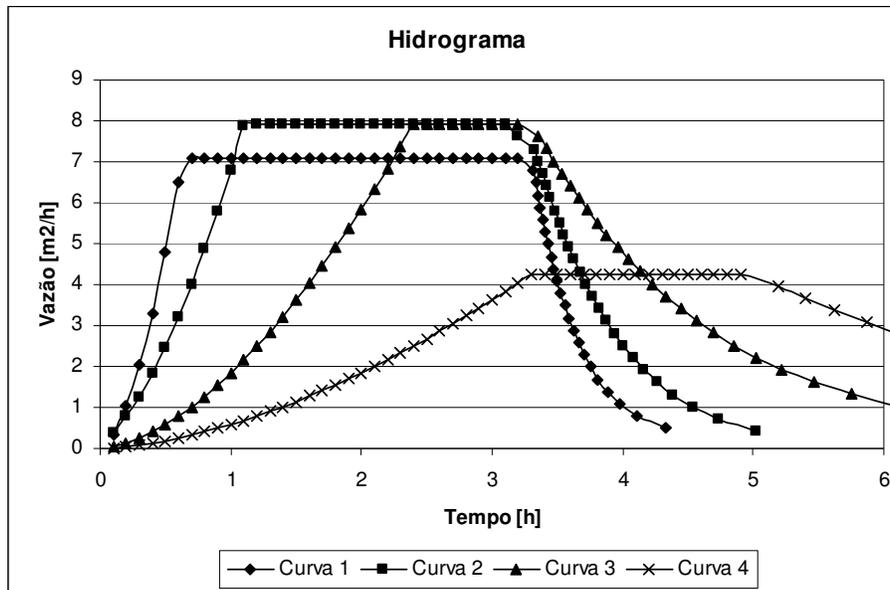


Figura 5.3 - Hidrogramas no exutor para diferentes declives de planos

Analisando a Figura 5.3, verifica-se que a cada redução de uma ordem de grandeza da declividade, ocorre um aumento de t_c e a variação de volume de água no plano. Cabe salientar que, com o aumento do declive, há uma redução de área efetiva de chuva, pois, essa é considerada perpendicular ao plano de declive nulo. Essa formulação caracteriza a redução do pico de vazão ($7.08 \text{ m}^2/h$) para o caso de maior declive, curva 1 ($S = 0.5$). As demais curvas 2, 3 e 4, possuem os respectivos valores de vazão de pico no exutor, 7.910 , 7.919 e $4.32 \text{ m}^2/h$ verificando seu comportamento não linear.

5.1.4. Variação da intensidade da chuva

Os parâmetros utilizados para obtenção do gráfico 5.4, foram: comprimento = $400m$, coeficiente de Manning = $5.56E-06m^{1/3}h$, declividade = 0.0005 e duração de $3.3h$. As precipitações e os tempos de concentração calculados estão na Tabela 5.4.

Curva	1	2	3
Precipitação [mm/h]	19.8	10.	1
t_c [h]	1.2	1.58	3.96

Tabela 5.4 - Precipitações adotadas - tempos de concentração.

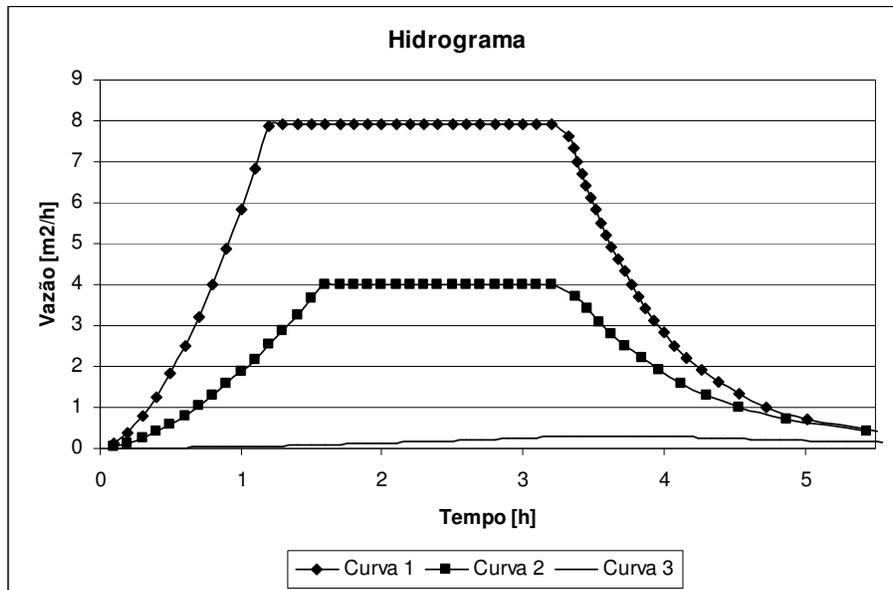


Figura 5.4 - Hidrogramas no exutor para diferentes precipitações incidentes.

A variação da intensidade de precipitação afeta diretamente o valor de vazão máxima e o t_c no exutor, notando que, quanto mais raso for o escoamento, menor será a velocidade de propagação da onda, para um mesmo declive, comprimento e coeficiente de Manning.

5.1.5. Variação do período de precipitação.

Os parâmetros utilizados para obtenção da Figura 5.5, foram: comprimento = 400m, coeficiente de Manning = $5.56E-06m^{1/3}h$, precipitação = 19.8mm/h, declividade = 0.0005m/m e tempo de concentração resultante de 1.2h. Os períodos de precipitação estão na Tabela 5.5.

Curva	1	2	3
Duracao [h]	3.3	1.2	.6

Tabela 5.5 – Períodos de precipitações.

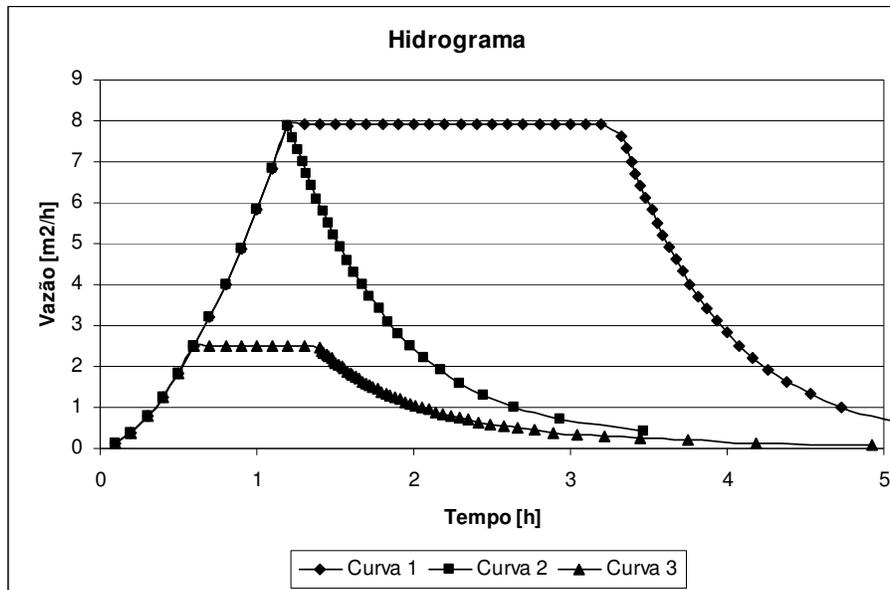


Figura 5.5 - Hidrogramas no exutor para diferentes períodos de precipitações.

A variação do período chuvoso influencia a forma do hidrograma, não alterando o t_c do plano. Os diferentes hidrogramas na Figura 5.5 representam a relação entre t_c e t_p . A curva 1 possui $t_p > t_c$, alcançando o regime permanente no exutor no tempo t_c e o tempo de depleção no tempo t_p , a curva 2 tem $t_c = t_p$, alcançando o pico de vazão, ao mesmo tempo em que a onda atinge o fim do plano, não estabelecendo o regime permanente. A curva 3 com $t_c > t_p$ alcança o regime permanente no tempo t_p e a vazão máxima inicia sua depleção no momento em que a onda chega ao fim do plano no tempo t^* (definido no item 2.1.4).

5.2.

Validação dos modelos numéricos de escoamento superficial

Os parâmetros utilizados para a validação dos modelos numéricos, foram apresentados no item 5.1.5, sendo analisados para os diferentes períodos de precipitação da Tabela 5.5 e considerando uma tolerância de erro de 5%. Desta forma, utilizou-se à formulação do erro relativo dado por:

$$\varepsilon = \frac{(N - \bar{N})}{N} 100.$$

Onde ε é o erro relativo em porcentagem, N é o valor real e \bar{N} é o valor estimado.

5.2.1. Validação do modelo cinemático

$t_c < t_p$

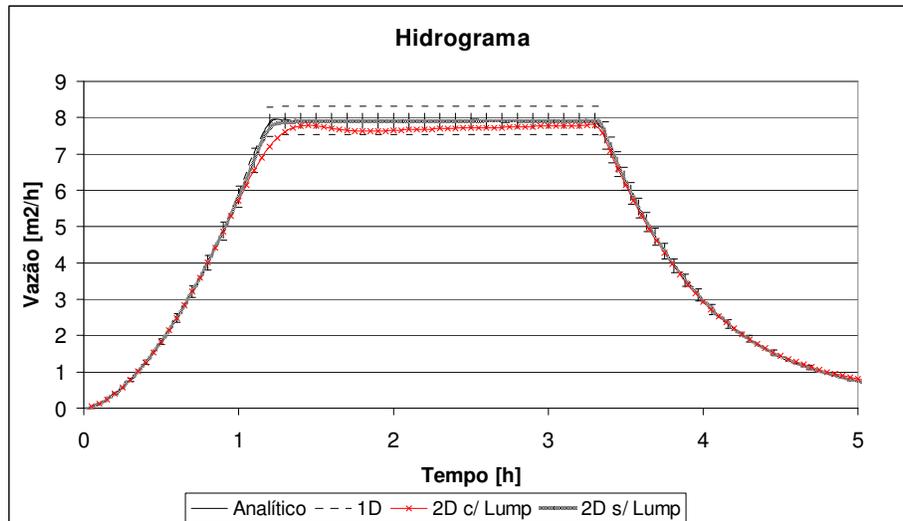


Figura 5.6 – Hidrograma no exutor, dos modelos cinemáticos e analítico $t_c < t_p$.

A Figura 5.6 apresenta o resultado analítico e a faixa de erro de 5% de tolerância. O modelo numérico utilizou os parâmetros da Tabela 5.5, coluna *curva 1*. Os resultados cinemáticos 1D e 2D sem o emprego de LUMPING, estiveram muito próximos da solução analítica, no entanto, para o modelo bidimensional com LUMPING o valor de vazão de pico foi subestimado na ordem de 3% em relação a solução analítica, com erros maiores que a tolerância no início do regime permanente.

$t_c = t_p$

Para a análise entre períodos coincidentes de t_c e t_p , adotaram-se os parâmetros da Tabela 5.5, coluna *curva 2*.

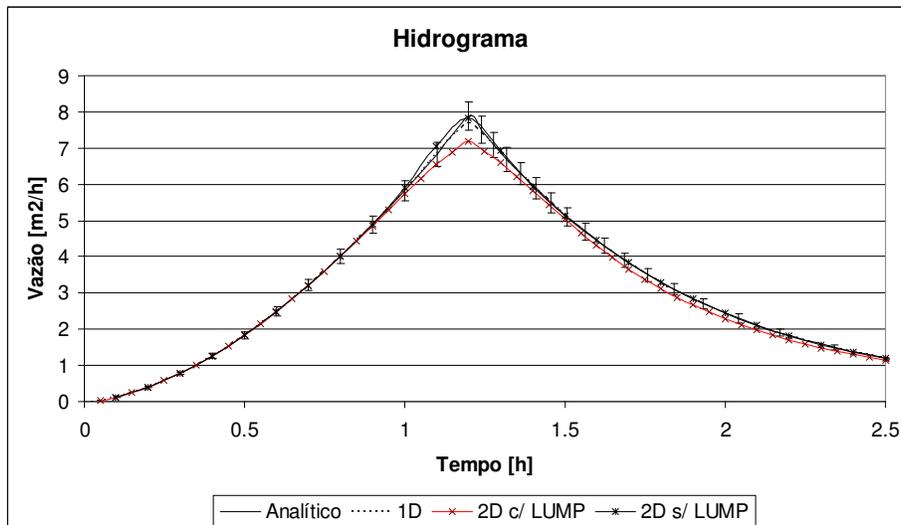


Figura 5.7 – Hidrograma no exutor, dos modelos cinemático e analítico $t_c = t_p$.

Novamente as curvas que não utilizaram o LUMPING na matriz de massa aferiram melhores resultados, no entanto, para a curva com LUMPING (curva 2D c/ LUMP), o erro na de vazão de pico em relação a solução analítica foi superior a 5%.

$t_c > t_p$

Para o gráfico de $t_c > t_p$ foram utilizados os parâmetros da Tabela 5.5, curva 3.

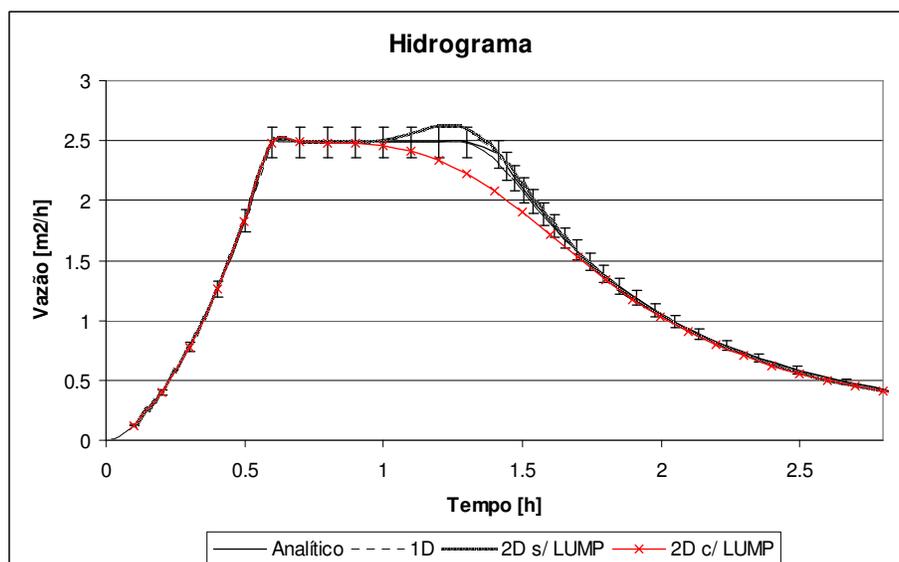


Figura 5.8 – Hidrograma no exutor, dos modelos cinemático e analítico $t_c > t_p$.

Para o caso onde o t_p é inferior ao t_c , o regime permanente inicia-se quando $t = t_p$. Neste tempo, tanto o modelo utilizando LUMPING quanto os que não utilizaram, aproximaram-se da solução analítica obtendo erros na ordem de: 0.02% para o modelo 1D, 0.28% para o modelo 2D sem LUMPING e 0.27% para o modelo 2D com LUMPING. Ao fim do regime permanente, nota-se um pico para o modelo bidimensional e uma queda gradativa na vazão do modelo 2D com LUMPING antecedendo o tempo $t^* = 1.29h$.

5.2.2. Validação do modelo de difusão

Para validação do modelo de difusão, foi adotado o mesmo conjunto de dados utilizado para verificação do modelo cinemático.

$t_c < t_p$

O período de precipitação utilizado ($t_c < t_p$) está apresentado na Tabela 5.5, coluna “curva 1”. Este modelo apresenta a particularidade de amortecimento da onda ao longo do escoamento, suavizando o início do regime permanente. Sua validação está baseada na curva da solução analítica do modelo cinemático, a qual esteve muito próxima dos resultados numéricos obtidos (Figura 5.9).

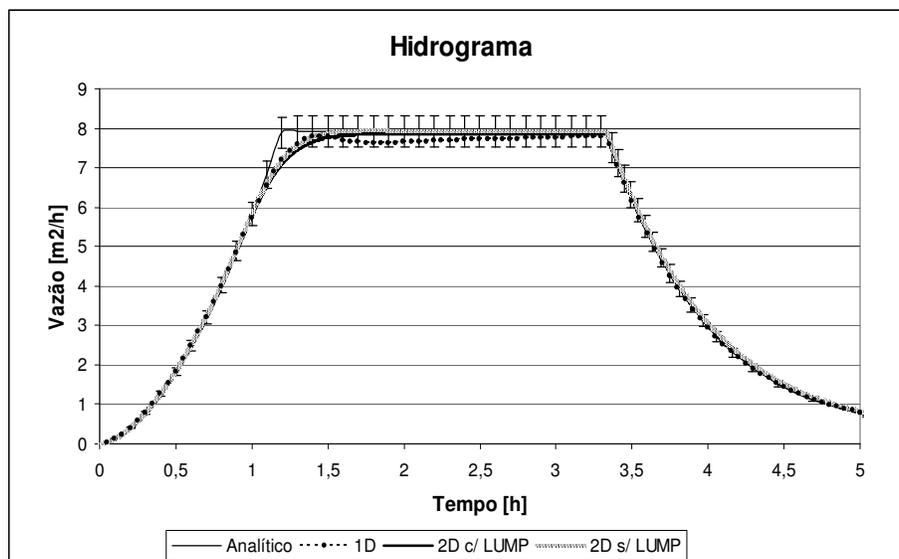


Figura 5.9 – Hidrograma no exutor, dos modelos de difusão e analítico $t_c < t_p$.

$t_c = t_p$

Utilizando os parâmetros da Tabela 5.5, coluna “curva 2”, para $t_c = t_p$, o hidrograma apresenta um pico de vazão bem definido, tanto para o modelo numérico quanto para o modelo analítico. No entanto, devido à suavização aferida ao modelo de difusão o valor de vazão máxima é inferior ao analítico (Figura 5.10).

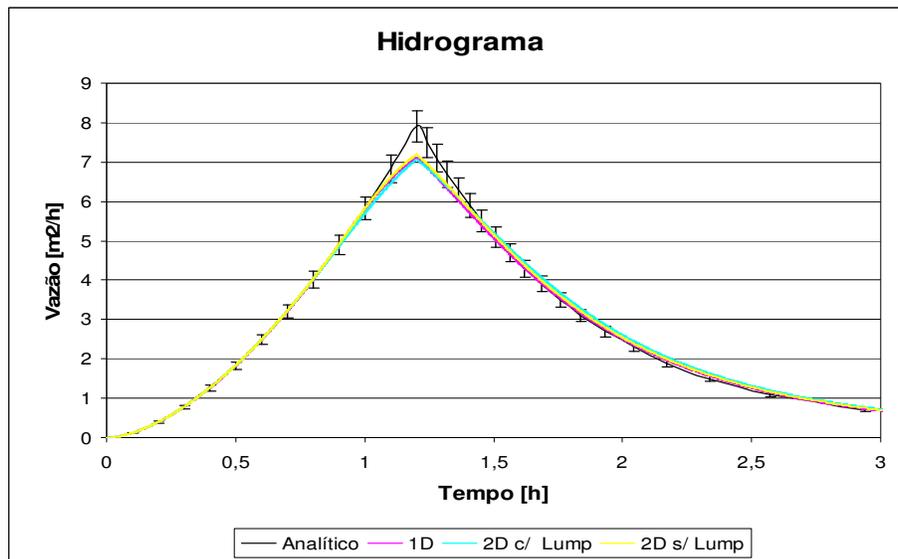


Figura 5.10 – Hidrograma no exutor, dos modelos de difusão e analítico $t_c = t_p$.

$t_c > t_p$

Utilizando os parâmetros da Tabela 5.5, coluna “curva 3”, para $t_c > t_p$, neste caso o efeito difusivo não foi percebido no início do regime permanente, mas sim no término da precipitação, com depleção gradativa da vazão no exutor. Todas as curvas situam-se fora do limite de erro estimado em 5% ao fim do período permanente.

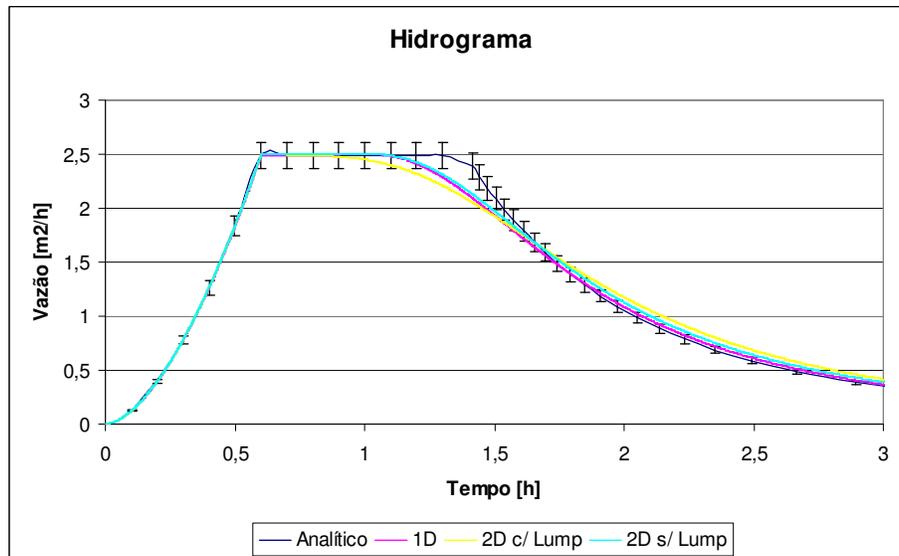


Figura 5.11 – Hidrograma no exutor, dos modelos de difusão e analítico $t_c > t_p$.

5.3. Validação da implementação numérica de acoplamento

A validação do modelo acoplado será dada, através da análise da velocidade de infiltração e da conservação da massa no domínio, para um exemplo simples de infiltração, em uma coluna cilíndrica vertical com diâmetro de 8cm e altura de 20cm .

5.3.1. Dados utilizados

Para a geração das malhas, primeiramente foi utilizado o modelador MG (gerador da malha tridimensional) seguido da rotina de extração, responsável pela obtenção da malha superficial e do vetor de correspondências nodais. A malha tridimensional conta com 753 nós e 3361 elementos e a malha superficial contém 61 nós e 100 elementos. O período de modelagem foi de 4300 segundos, com intervalo mínimo de tempo de 0.01 e máximo de 60 segundos para o SWMS3D' e de 1 segundo para o modelo superficial. A precipitação teve duração de 2600 segundos e intensidade de 0.002 cm/s ou 7.2 cm/h , com início no tempo 0 (zero) e distribuição uniforme sobre o domínio superficial. A condição inicial foi definida em termos de carga de pressão e adotou-se um valor de -150 cm . Uma condição de contorno impermeável foi imposta na superfície inferior e ao redor do domínio do cilindro. Com relação aos contornos laterais do modelo

superficial, este foi considerado impermeável, como se houvesse um recipiente que confinasse o fluido, permitindo apenas o empoçamento da precipitação efetiva e sua distribuição sobre a superfície. Os dados hidrológicos utilizados para cada domínio estão apresentados na Tabela 5.6.

SWMS3D'	θ_r	θ_s	θ_a	θ_m	Alfa	n	Ks [cm/s]	Kk [cm/s]	θ_k
	0.02	0.35	0.02	0.35	0.041	1.96	1) 7.2E-04 2) 7.2E-06	6.95E-04 6.95E-06	
SURF	Manning [$m^{1/3}h^{-1}$]					Declividade			
	5.56E-06					0.0			

Tabela 5.6 – Parâmetros hidrológicos.

A simulação foi realizada para dois valores de K_s e K_k , como apresentados na Tabela 5.6, de modo que, os pares utilizados na mesma simulação apresentam-se alinhados.

A partir dos dados apresentados, quatro simulações foram realizadas, de modo que, para cada valor de permeabilidade saturada, utilizaram-se dois valores de armazenamento específico, a fim de avaliar seu efeito. Nesse exemplo, será apresentado: os históricos de carga de pressão, velocidade de infiltração e precipitação efetiva para um nó no centro da malha circular superficial, um estudo de balanço de massa no sistema e os perfis de carga de pressão no cilindro 3D.

5.3.2. Resultados Obtidos

Cargas na superfície

Tomando os valores de K_s e K_k da linha 1 da Tabela 5.6, a análise da carga superficial no centro do cilindro, para os valores de armazenamento específico de 0.00001 e $0.0cm^{-1}$ estão apresentados na Figura 5.12.

A Figura 5.12 delimita a escala temporal durante o intervalo de empoçamento. A carga de pressão, inicialmente de $-150cm$ apresenta um pico no instante da saturação, que pode variar de nó para nó, como mostrado na

Figura 5.13, pela variação espacial, das cargas de pressão positivas na superfície. Dada sua variabilidade espacial, cabe ressaltar que seu valor é muito baixo, tornando o efeito do pico desprezível e puntual.

Para estes dados, o efeito do armazenamento específico não reduziu o pico inicial, apresentando um resultado muito próximo do modelo com armazenamento nulo.

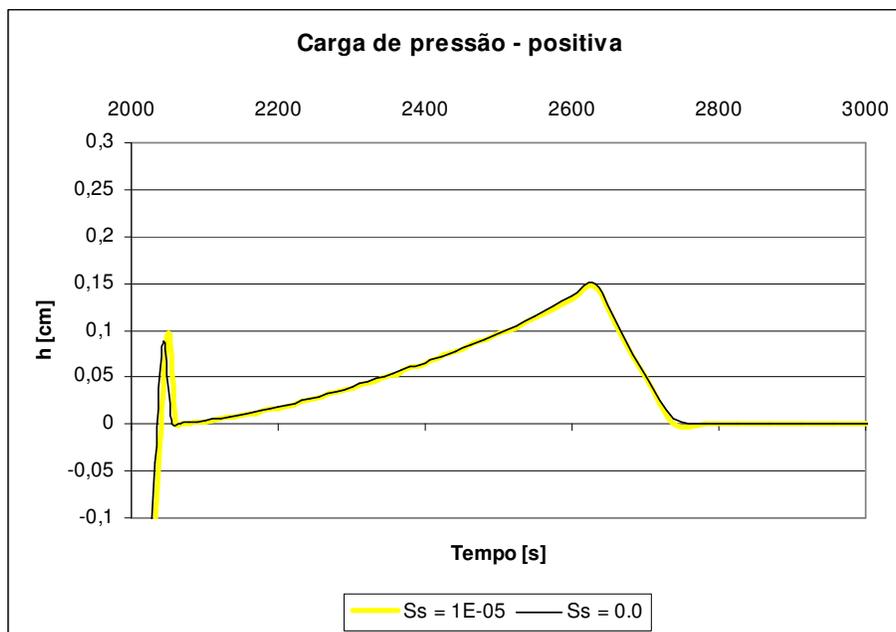


Figura 5.12 - Carga de pressão no centro da superfície superior do cilindro.

Neste gráfico, o início do empocamento ocorreu no tempo 2044s. No tempo 2600s, ocorreu o término da precipitação permanecendo apenas o processo de infiltração no solo, responsável pela redução da carga de pressão na superfície. A carga foi zerada no tempo 2781.25s, passado a atuar apenas o processo de redistribuição da umidade no solo.

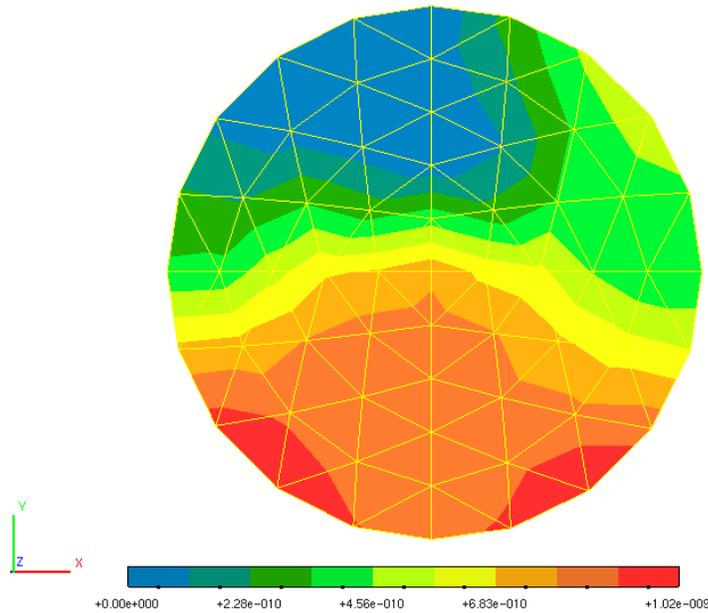


Figura 5.13 – Carga de pressão na superfície superior do cilindro.

A Figura 5.14, utilizando os valores de permeabilidade da linha 2 na Tabela 5.6, apresenta uma redução no tempo de empoçamento. O pico da carga de pressão na transição de não saturado para saturado, na superfície, é mais expressivo para a curva com armazenamento nulo, sendo reduzido significativamente para a curva com armazenamento específico de 0.00001cm^{-1} . Os valores de pico estão indicados através de pontos plotados no início das curvas da Figura 5.14.

A redução da permeabilidade antecipou o tempo de empoçamento, assim como reduziu a velocidade de infiltração, aumentando a coluna de água sobre o solo.

Este gráfico apresenta toda a escala temporal da simulação, reduzindo apenas a escala representativa da carga de pressão, que começa com o valor de -25cm .

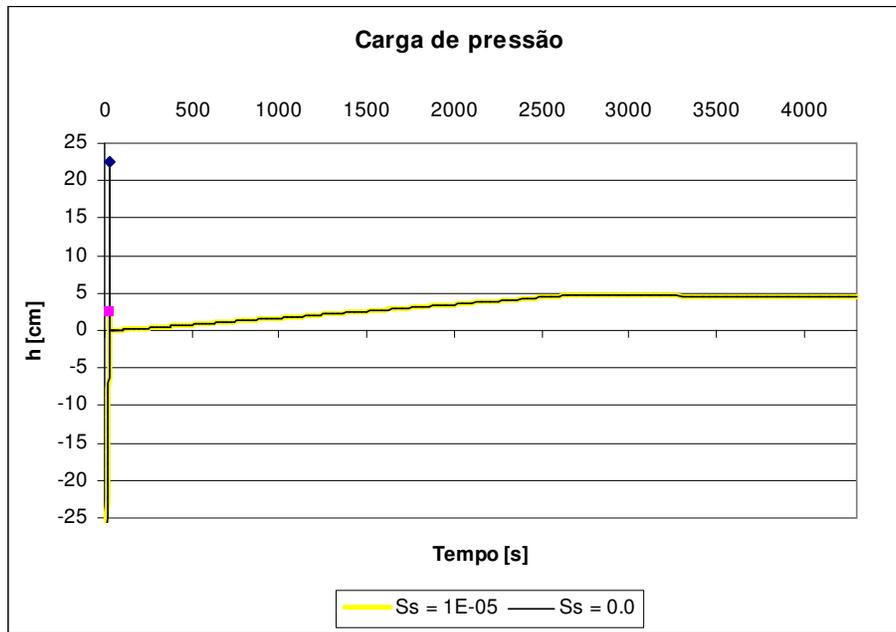


Figura 5.14 – Carga de pressão no centro da superfície superior do cilindro.

Velocidade de infiltração e precipitação efetiva

A velocidade de infiltração é dependente do grau de saturação do solo e de suas propriedades. Neste exemplo, o grau de saturação é variável ao longo do tempo, e dita a capacidade do solo em absorver a precipitação incidente.

A Figura 5.15 apresenta o comportamento da infiltração (I [cm/s]), precipitação efetiva (i_e [cm/s]) e o valor da permeabilidade do solo (Ks [cm/s]), que corresponde ao limite mínimo de infiltração, para um gradiente unitário. Nesta curva utilizaram-se como parâmetros a linha 1 na coluna de permeabilidades da Tabela 5.6 e o coeficiente de armazenamento de 0.00001 cm^{-1} .

A curva da velocidade de infiltração (curva I) apresenta um comportamento linear, desde o início da simulação, até o tempo 2044s, quando, a capacidade de infiltração torna-se inferior ao fluxo imposto na superfície. Neste ponto a taxa de empocamento é dada pela diferença entre a velocidade de infiltração e de precipitação. A curva de precipitação efetiva (curva i_e) inicia-se no tempo 2044s e passa a ser negativa no tempo 2600s, quando possui apenas a parcela subtrativa da infiltração. É este valor negativo que é passado ao modelo superficial, reduzindo o valor da carga de pressão na superfície.

Quando cessada a precipitação e toda a água acumulada na superfície infiltra no solo, não há mais fluxo no contorno superficial e tanto a curva I quanto

a curva i_e tornam-se nulas, passando a haver somente a redistribuição da umidade do solo advindo da força gravitacional.

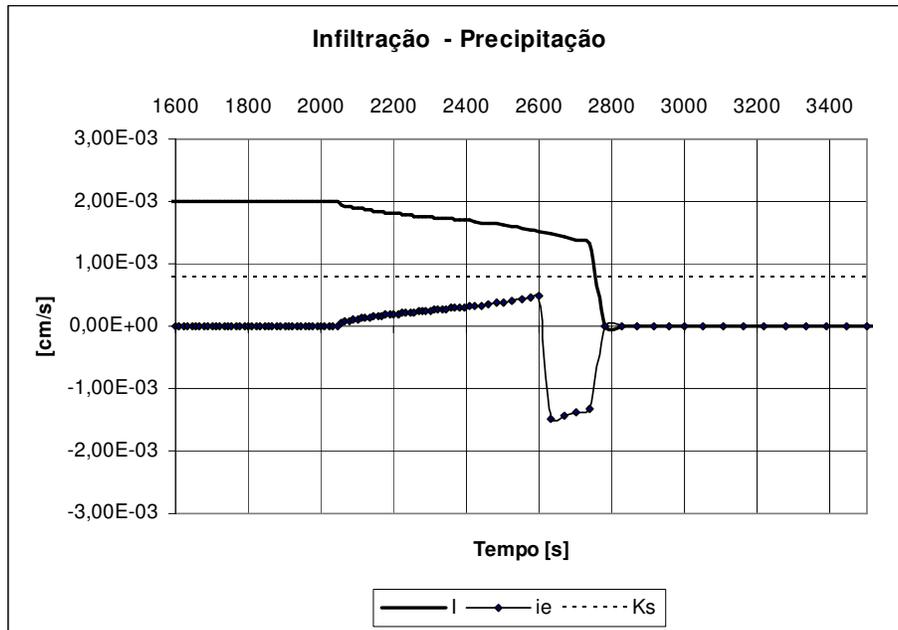


Figura 5.15 – Velocidade de infiltração e de precipitação no centro da superfície superior do cilindro.

A Figura 5.16 apresenta os resultados utilizando os parâmetros da linha 2 da coluna de permeabilidade da Tabela 5.6 e o coeficiente de armazenamento específico de 0.00001 cm^{-1} . Como visto na Figura 5.14, o tempo de empoçamento é pequeno, reduzindo o período com velocidade de infiltração linear (curva I). Nesta curva a permeabilidade (K_s) é duas ordens de grandeza inferior à utilizada na Figura 5.15, gerando um aumento de precipitação efetiva (curva i_e). Como apresentado na curva 5.14, há um significativo acúmulo de água na superfície e a baixa velocidade de infiltração, após o término da precipitação (tempo 2600s), não foi suficiente para zerar a carga de pressão na superfície, mostrando que para essas condições a maior parte de uma precipitação, fará parte da água superficial no ciclo hidrológico.

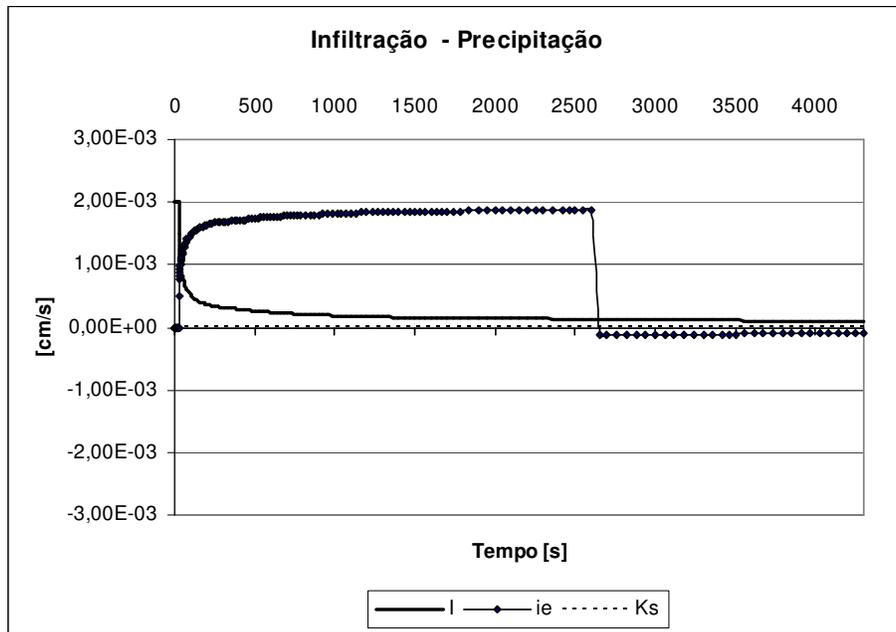


Figura 5.16 - Velocidade de infiltração e de precipitação no centro da superfície superior do cilindro.

Balanco de massa no sistema

Conhecendo a velocidade de precipitação e seu tempo de duração, calcula-se analiticamente o volume de água que adentra ao sistema. A comparação com o resultado numérico está apresentada nas Figura 5.17 e Figura 5.18, onde se representa o volume total de água ao longo do tempo de simulação.

O cálculo do volume numérico é dado pela parcela de água no solo somada a parcela que se encontra empoçada na superfície. A parcela subterrânea é subtraída da umidade inicial para se obter apenas o volume acrescido pelo evento de precipitação. Estes volumes são mostrados pelas curvas tracejadas das Figura 5.17 e Figura 5.18 que representam as simulações com permeabilidades da linha 1 e 2 respectivamente e coeficiente de armazenamento específico de 0.00001 cm^{-1} para ambas as curvas.

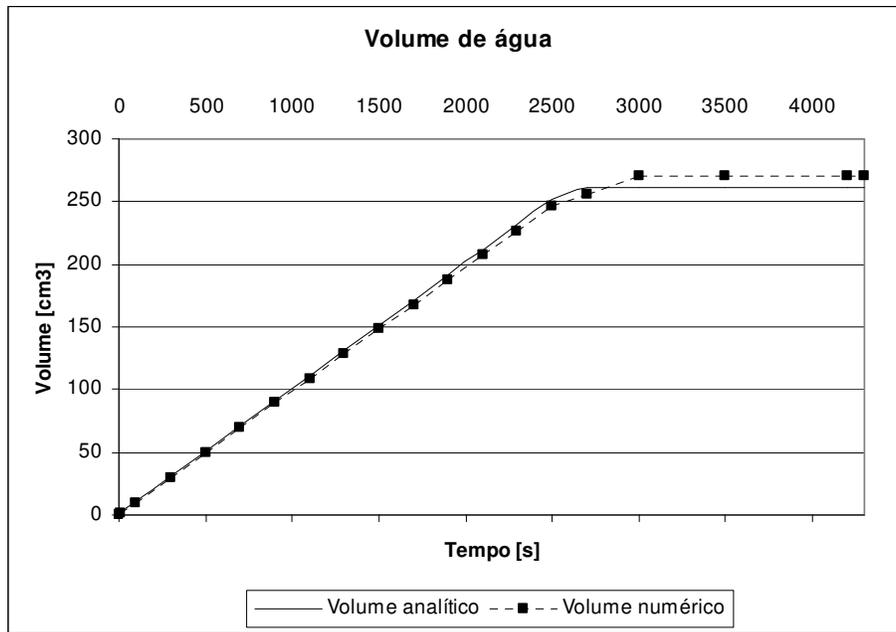


Figura 5.17 – Gráfico de volume de água ao longo do tempo, utilizando os seguintes parâmetros: $K_s = 0.000772\text{cm/s}$, $K_k = 0.000695\text{cm/s}$, $S_s = 0.0001\text{cm}^{-1}$

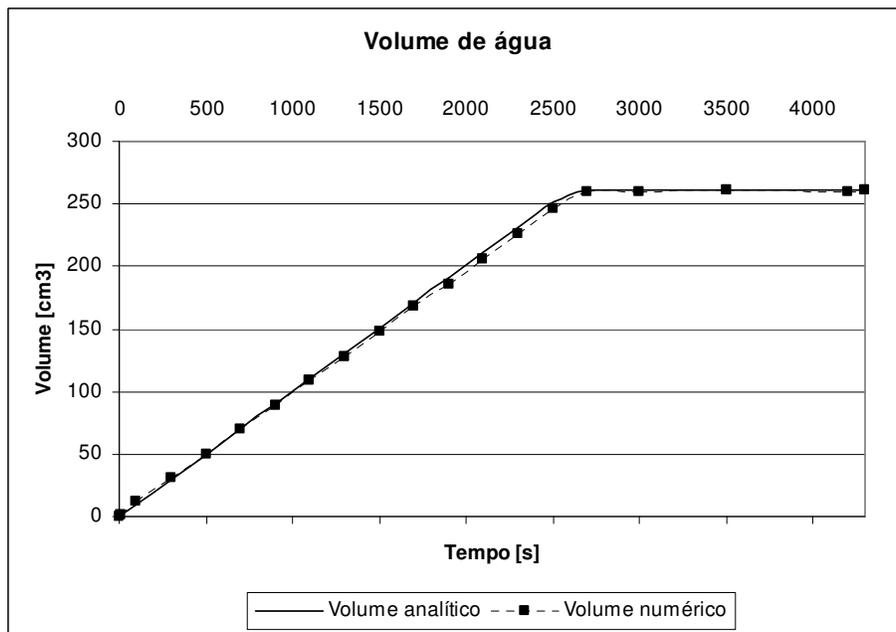


Figura 5.18 – Gráfico de volume de água ao longo do tempo, utilizando os seguintes parâmetros: $K_s = 0.0000772\text{cm/s}$, $K_k = 0.0000695\text{cm/s}$, $S_s = 0.0001\text{cm}^{-1}$

A avaliação das curvas de volume ao longo do tempo é a principal ferramenta para validação do modelo acoplado. A Figura 5.19 apresenta o erro

relativo entre os volumes calculados e analíticos, para ambas as Figura 5.17 e Figura 5.18 ao longo do tempo.

No início da simulação, para a curva $Ks = 7.7E-06\text{cm/s}$, nota-se uma superestimação do volume de água no sistema, esse tempo coincide com o tempo de empoçamento desta curva e seu erro pode estar associado à rotina de acoplamento e ao pico de carga calculado nesse instante que é passada ao sistema superficial. No entanto, esse erro retrata uma situação com pequeno volume de água no sistema, dando a falsa impressão de um erro significativo, mas, quando comparado com a Figura 5.18 esse erro pode ser desprezado.

No tempo 2044s, quando se inicia o empoçamento na curva $Ks = 7.7E-04\text{cm/s}$, não se nota um pico de erro dado pelo evento do pico de carga calculada neste instante para alguns nós, afirmando que essa oscilação é desprezível. No entanto, para essa mesma curva houve um crescimento do erro após o termino da precipitação, no tempo 2600s, assim como, uma redução do erro, após esse tempo, para a curva $Ks = 7.7E-06\text{cm/s}$.

Considerando o efeito do pico no instante da saturação na superfície desprezível, torna-se válido o algoritmo que atribui o valor da carga nesse instante para o sistema superficial, possibilitando a ocorrência de superfícies de percolação.

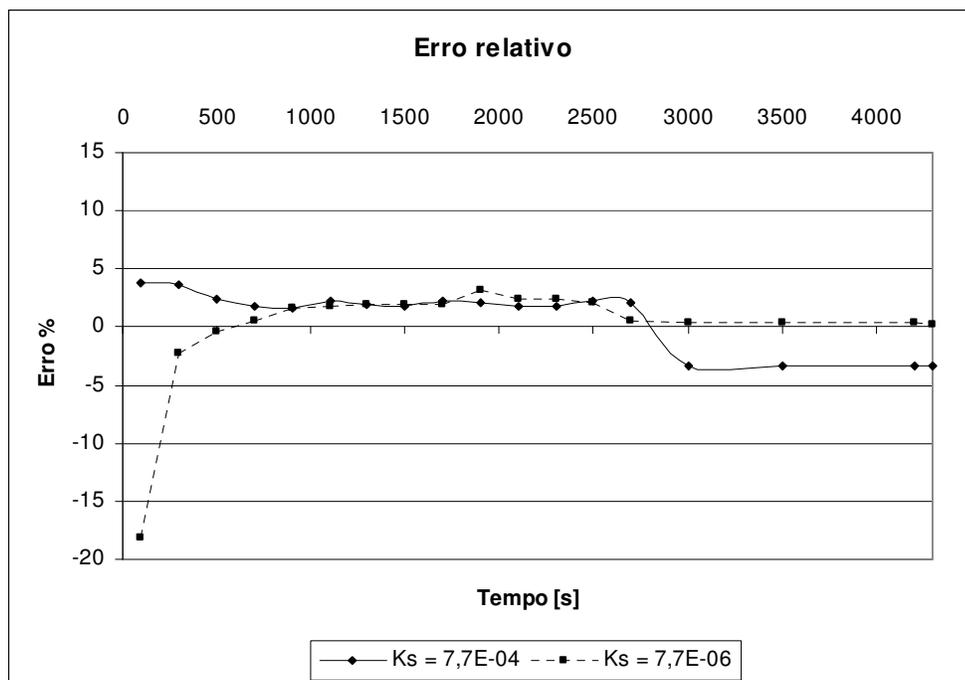
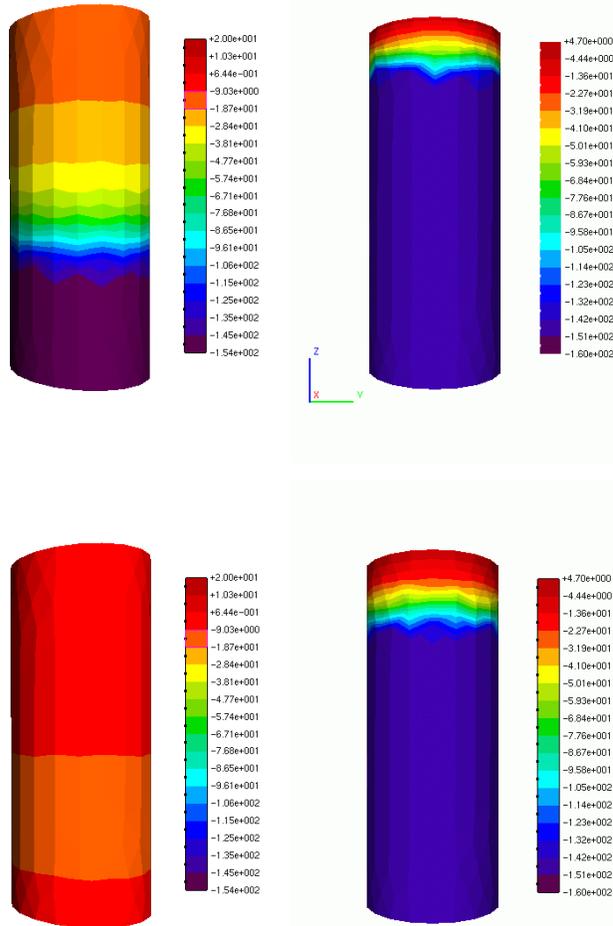


Figura 5.19 – Gráfico do erro relativo entre o volume no modelo numérico e o volume analítico.

Perfis de carga de pressão

A visualização 3D dos perfis de cargas de pressão, apresenta o avanço da frente de molhamento no tempo, como mostra a Figura 5.20.



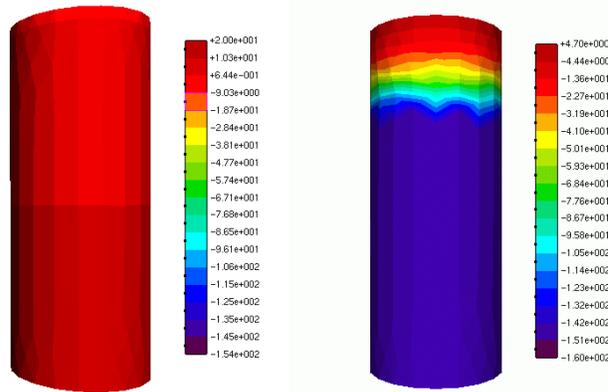


Figura 5.20 – Seqüência nos tempos 1100, 2700 e 4300 s para o perfil de infiltração.

5.4.

Exemplo 1 – escoamento superficial com infiltração constante

Neste exemplo, resolve-se o escoamento em superfície livre, considerando uma velocidade de precipitação e infiltração uniforme. O evento de precipitação tem duração de uma hora e intensidade de 5 mm/h . Uma velocidade de infiltração de 1 mm/h foi imposta durante toda a simulação, resultando numa velocidade de precipitação efetiva de 4 mm/h . A malha consiste em 14337 nós e 28160 elementos. A topografia é complexa e está apresentada na Figura 5.21.

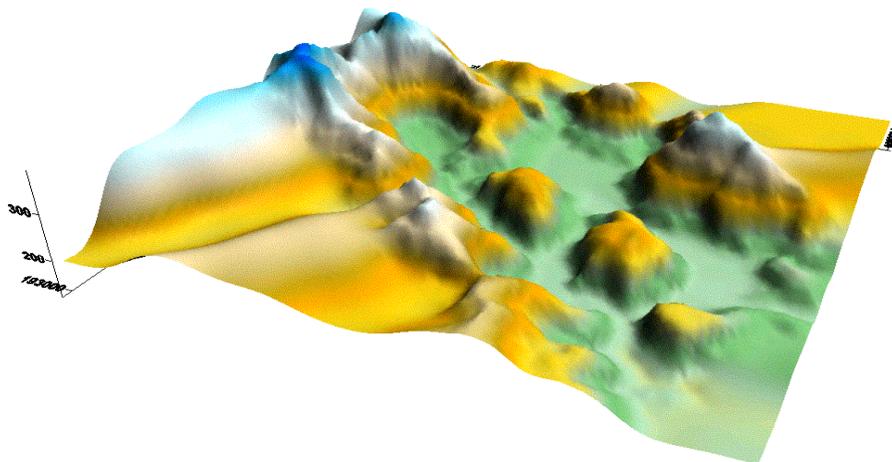


Figura 5.21 – Exemplo 1: Relevo adotado para simulação de escoamento superficial cinemático.

A condição inicial adotada foi de carga nula na superfície e o coeficiente de Manning de $0.9m^{1/3}/h$, aferindo grande resistência ao escoamento. Valores testados, inferiores a $0.07m^{1/3}/h$, apresentaram pontos de instabilidade numérica durante as simulações. O modelo cinemático foi adotado, a fim de verificar sua aplicabilidade, desprezando os efeitos difusivos e advectivos. Essa consideração é condizente nas regiões das encostas, no entanto gera erros significativos nas regiões de baixadas onde o efeito do gradiente de pressão é preponderante.

A Figura 5.22 apresenta o resultado de carga de pressão para o tempo 4h de simulação, onde se pode observar, as formações de córregos nas partes baixas do relevo.

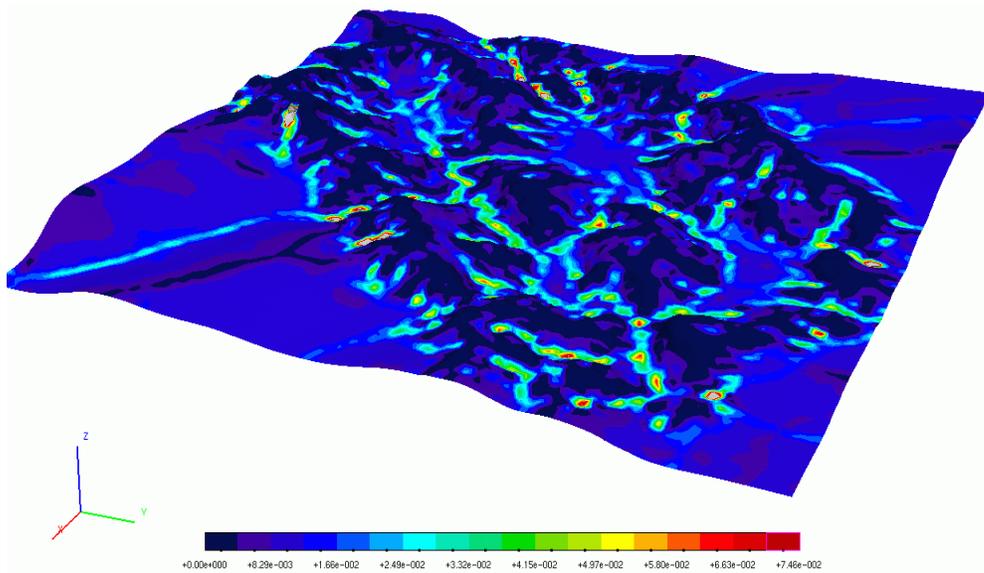


Figura 5.22 – Exemplo 1: Resultados de carga de pressão no tempo 4h.

5.5.

Exemplo 2 – Drenagem superficial

Este exemplo representa o rebaixamento do nível de água no solo, através da drenagem superficial. Trata-se de um relevo em forma de cela com espessura constante (Figura 5.24), sua condição inicial é saturada, com carga de pressão nula na superfície. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 5.6, adotando a permeabilidade da linha 1 e declive variável. As condições de contorno para o meio poroso são consideradas impermeáveis, com exceção da

superfície. No domínio superficial, foi adotada a condição inicial de carga nula ($h = 0$), assim como nenhum fluxo foi imposto. A malha utilizada é constituída de 121 nós e 200 elementos no domínio superficial e 2170 nós e 10386 elementos no domínio subterrâneo.

A Figura 5.23, apresenta o mapa dos declives superficiais calculados pelo programa superficial cinemático. Os declives são calculados por elemento e atribuídos por nó. Cada nó recebe o maior declive dos elementos a que ele pertence, fixando a direção e o sentido do fluxo conforme a declividade nodal.

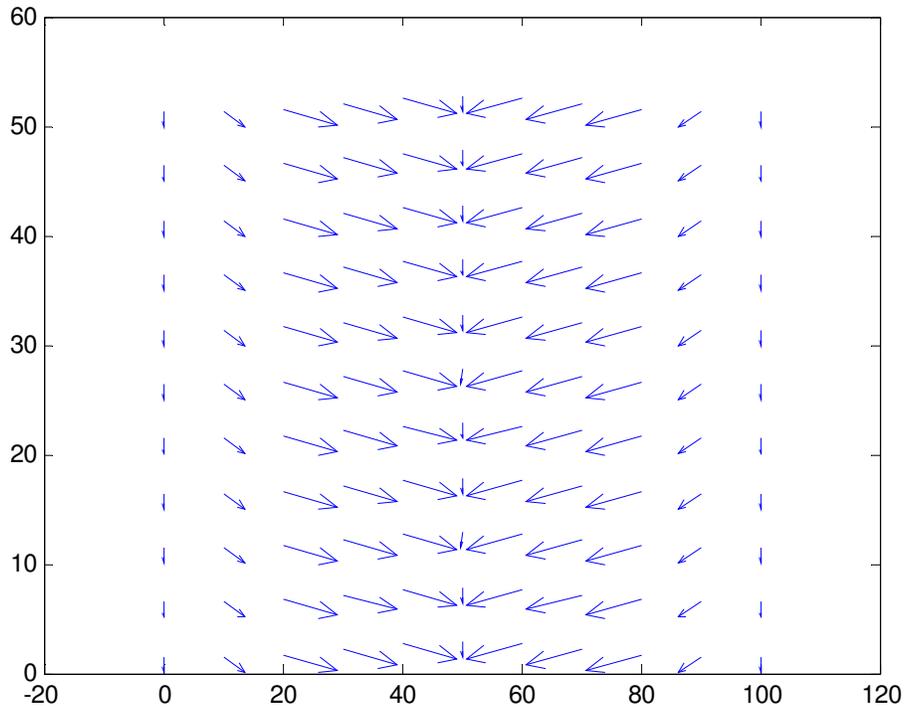


Figura 5.23 – Mapa dos declives superficiais calculados pelo programa superficial cinemático.

O modelo de escoamento superficial cinemático foi adotado para este caso, visto que, as percolações no sentido solo – superfície são lentas e de pequenas dimensões em relação à lâmina de água resultante. A Figura 5.24 apresenta os resultados de carga de pressão para vários passos de tempos de simulação, com o domínio subterrâneo à esquerda e o domínio superficial à direita.

A condição inicial está apresentada na Figura 5.24a com o nível da água coincidindo com superfície. A Figura 5.24b apresenta o início do rebaixamento do lençol freático e seu afloramento na superfície. Na seqüência, a Figura 5.24c apresenta um nível freático mais abaixo e um padrão de cargas superficiais

parecido com o anterior. O último passo de tempo representa uma situação de equilíbrio, com o nível freático estabelecido na menor cota topográfica.

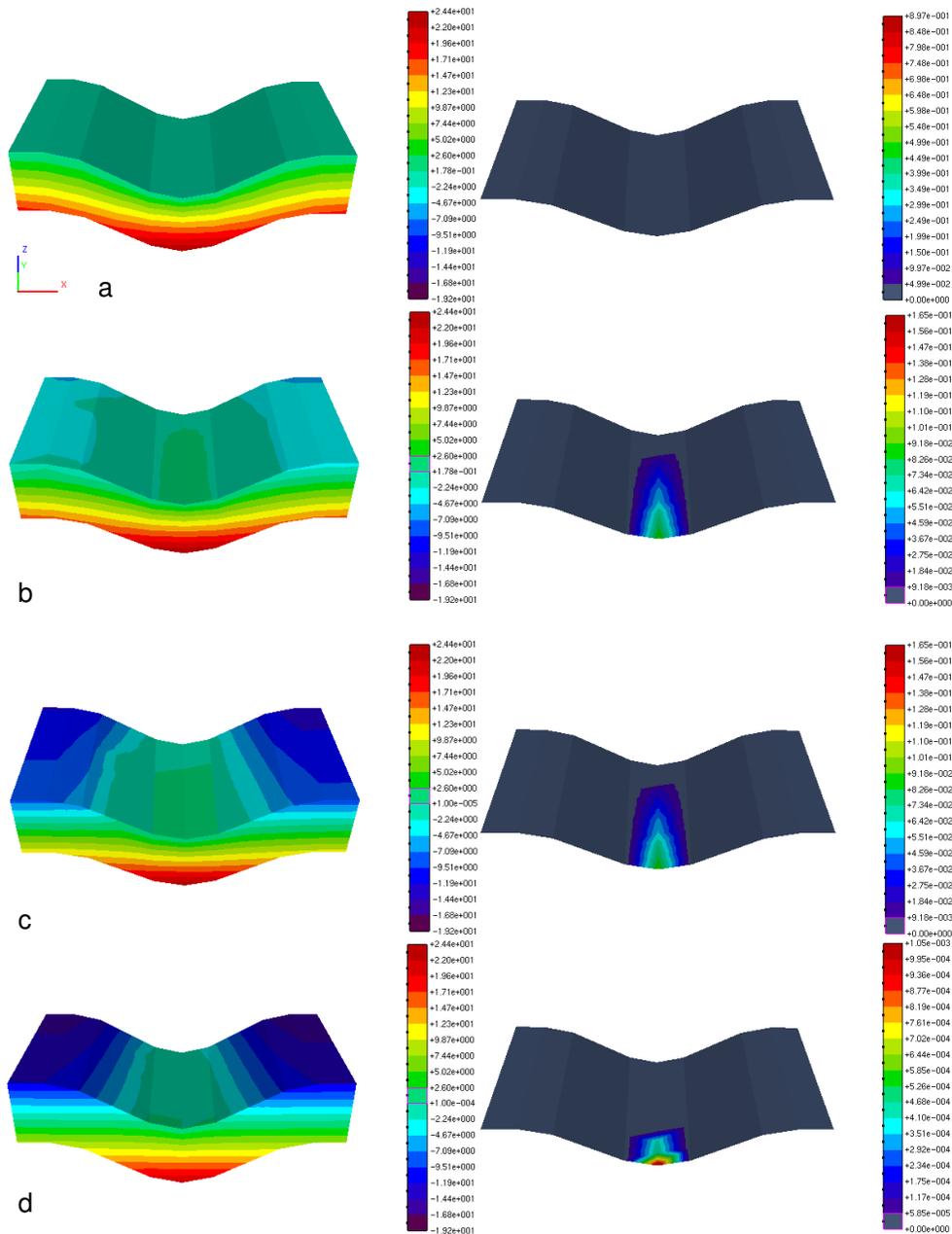


Figura 5.24 – Seqüência temporal do rebaixamento do nível da água no solo, pelo efeito da drenagem superficial.

5.6.

Exemplo 3 – Interação entre fluxo superficial imposto e solo não saturado utilizando o modelo cinemático

A imposição de fluxo a montante do domínio superficial, sobre um domínio não saturado, faz com que a interação entre esses sistemas seja dinâmica. A

carga gerada na superfície é contraposta pela velocidade de infiltração, fazendo com que nos instantes iniciais, esta carga seja depreciada totalmente.

Esta interação pode representar um sistema rio – solo, onde o rio abastece o lençol freático até atingirem uma condição de equilíbrio. Os parâmetros hidrológicos foram os mesmos que os utilizados no exemplo 2, variando a condição inicial para uma carga uniforme de -50cm e impondo uma carga constante, a montante da superfície, de 0.5cm , em apenas 1 (um) nó, como apresentado na figura abaixo:

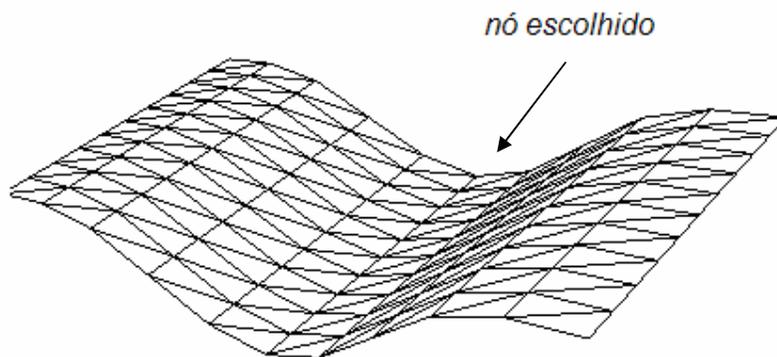


Figura 5.25 – Nó de atribuição de condição de contorno de montante.

O modelo cinemático foi empregado dado que, o escoamento ocorre exclusivamente de montante para jusante como mostra a Figura 5.23. Dois eventos foram permitidos neste exemplo, sendo estes: evento de precipitação no tempo $t = 0$, com duração de 30 minutos e intensidade de 5mm/h e início de fluxo imposto no tempo $t = 2\text{h}$ durante o restante da simulação. A Figura 5.26 apresenta os resultados para vários passos de tempos de simulação.

A Figura 5.26a, apresenta a distribuição das cargas no domínio subterrâneo, após o evento de precipitação e equilíbrio de fluxo. Na seqüência, a Figura 5.26b mostra a interação do fluxo superficial imposto sobre um solo não saturado. Nesse instante, o fluxo subsuperficial ocasionado pela infiltração da água superficial, caminha a frente do escoamento superficial, fazendo com que a frente de molhamento subsuperficial atinja mais rapidamente o exutor do sistema. Em seguida a Figura 5.26c apresenta a situação onde o “rio” está formado, atingindo o exutor. As figuras seguintes apresentam a formação do nível freático, de modo a obter o equilíbrio entre os sistemas.

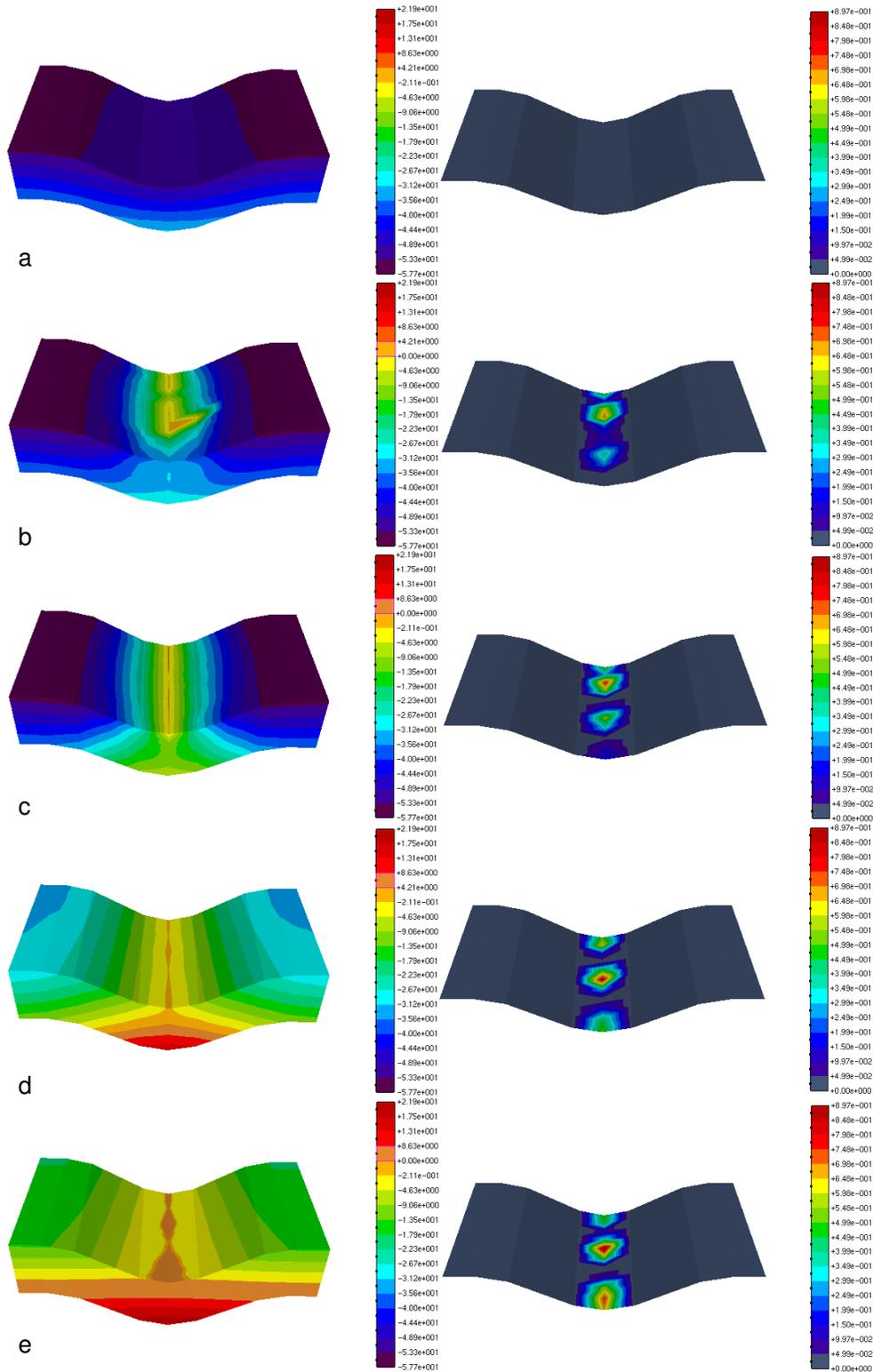


Figura 5.26 - Seqüência temporal da formação lençol freático, através da interação “rio” – solo.

5.7.

Exemplo 4 - Interação entre fluxo superficial imposto e solo não saturado, com evento de runoff, utilizando modelo de difusão

Neste exemplo, utilizou-se ou mesmos parâmetros hidrológicos dos exemplos anteriores, no entanto, atribuindo um evento de precipitação. As condições iniciais de carga de pressão foram às mesmas do exemplo anterior e na condição de contorno foi imposta uma velocidade de precipitação de 0.002cm/s durante 2600s e uma vazão de entrada a montante de $0.4\text{cm}^3/\text{s}$. O nó escolhido para atribuição da vazão de contorno está apresentado na Figura 5.25.

A Figura 5.27 apresenta os resultados para vários passos de tempos de simulação. Neste exemplo, não se utiliza o mapa dos declives, dado que o fluxo é calculado em função dos gradientes de cargas totais do escoamento. A Figura 5.27a, apresenta os instantes iniciais de simulação e na Figura 5.27b é observado o fluxo subsuperficial ditado pela influência do escoamento superficial e da frente de infiltração dado o evento de precipitação. As Figura 5.27c, Figura 5.27d e Figura 5.27e apresentam a evolução do sistema até o início do escoamento hortoniano e a saturação completa do domínio subterrâneo. Após o término da precipitação, inicia-se o processo de drenagem, através do escoamento superficial, estabelecendo o nível freático, em função das cargas superficiais. Neste exemplo observa-se uma distribuição mais uniforme das cargas superficiais.

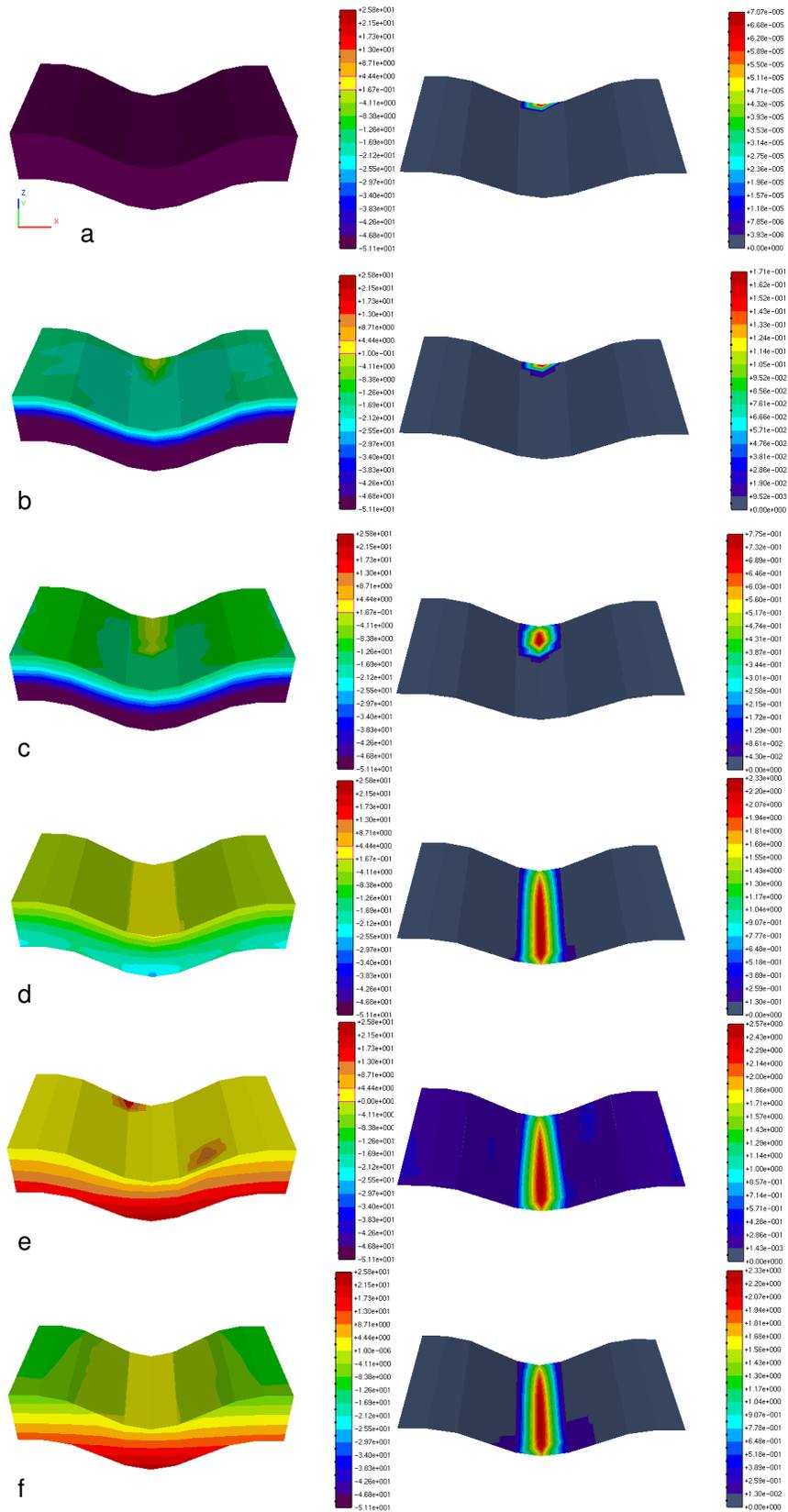


Figura 5.27 – Seqüência de resultados entre formação do lençol freático, “runoff” e drenagem do solo.