

5 Estimativa de Parâmetros e Análise Direta

5.1 Introdução

O programa utilizado para a modelagem numérica e para a avaliação de parâmetros foi o HYDRUS 2D-3D (Simunek *et al.*, 2006). Este programa resolve a equação de Richards para fluxo saturado e não saturado assim como as equações de dispersão-advecção para o transporte de solutos. HYDRUS 2D-3D pode representar domínios de fluxo delineados por limites irregulares. O fluxo e o transporte podem ocorrer no plano vertical ou no plano horizontal, numa região bidimensional ou tridimensional.

O programa também permite o uso de elementos triangulares ou quadrangulares para problemas bidimensionais ou tetraedros, hexaedros e elementos prismáticos triangulares no caso de problemas tridimensionais. As condições de contorno que estão implementadas também são flexíveis e dinâmicas, e estão categorizadas em condições de contorno constantes (ex. carga de pressão constante, fluxo constante) e condições de contorno variáveis (ex. atmosférico, fluxo ou carga de pressão variáveis). Além disso o HYDRUS consegue minimizar o problema inverso através do método de Marquardt-Levenberg implementado. As equações que resultam da discretização do problema são resolvidas usando a eliminação gaussiana para matrizes, ou o método de ORTHOMIN para matrizes assimétricas (Mendoza, 1991).

O HYDRUS 2D-3D inclui diversos modelos para a descrição das propriedades hidráulicas: van Genuchten (1980), Brooks e Corey (1964) e van Genuchten modificado por Vogel e Cislérova (1988). Neste trabalho é utilizado o modelo de van Genuchten.

5.2 Estimativa de Parâmetros

Neste item são apresentadas as condições de contorno e os parâmetros de entrada usados no processo de retroanálise para determinar as características hidráulicas dos solos em estudo.

São apresentados também os resultados das estimativas para quatro solos: Campo Experimental II, Duque de Caxias, encosta do túnel Rebouças, e a pilha de estéril n° 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas.

5.2.1 Condições de Contorno e Parâmetros Iniciais

Para o ensaio de infiltração monitorada (ver item 3.4.1.2), as condições de contorno aplicadas são apresentadas na figura 5.1, na parte (a) apresenta o esquema geral do ensaio de infiltração monitorada, e a parte (b) o esquema axi-simétrico das condições de contorno, este último é o utilizado na presente dissertação.

Velloso (2000) indica que a condição inicial deve ser considerada uniforme e igual à medida pelo tensiômetro no instante $t=0$.

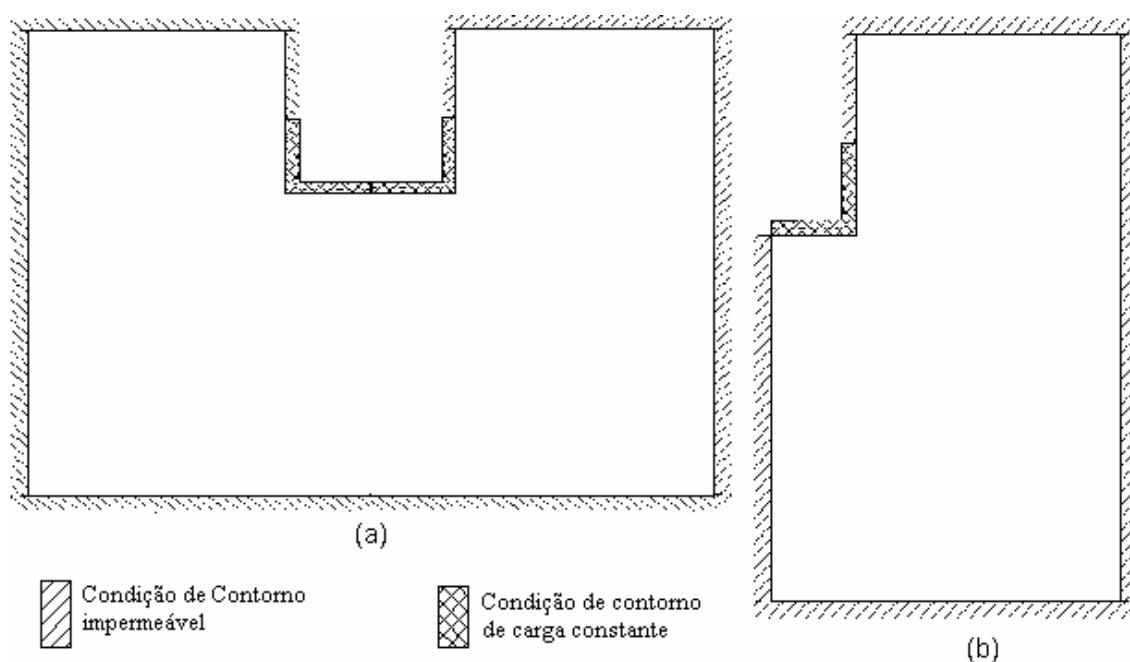


Figura 5.1 - Condições de contorno do ensaio de infiltração monitorada, (a) esquema geral. (b) esquema axi-simétrico (modificado de Velloso, 2000).

Para o ensaio de laboratório de Marinho (2006), descrito no item 3.4.2.2, as condições de contorno são mostradas na figura 5.2.

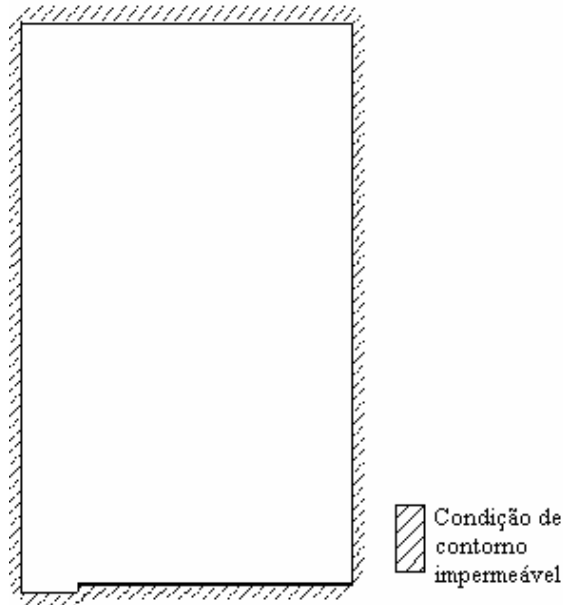


Figura 5.2 - Condição de Contorno para o ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006).

Os parâmetros iniciais considerados para o Campo Experimental II da PUC-Rio estão mostrados na tabela 5.1. Os valores de θ_r e θ_s foram extraídos de Velloso (2000) e os valores de condutividade hidráulica (k_s) foram retirados de Diniz (1998).

Tabela 5.1 - Parâmetros iniciais do Campo Experimental II PUC-Rio.

Medição	θ_r	θ_s	α [cm^{-1}]	n	k_s [cm/s]
Ensaio 1	0,34	0,43	5×10^{-3}	1,15	$2,03 \times 10^{-3}$
Ensaio 2	0,34	0,43	5×10^{-3}	1,15	1×10^{-2}

Os parâmetros iniciais para o solo de Duque de Caxias estão resumidos na tabela 5.2. Todos os valores da fração arenosa foram extraídos de Velloso (2006).

Tabela 5.2 - Parâmetros iniciais para o solo de Duque de Caxias (Velloso, 2006).

Medição	θ_r	θ_s	α [cm^{-1}]	n	k_s [cm/s]
Ensaio 1	0,34	0,43	$7,1 \times 10^{-2}$	1,53	$1,67 \times 10^{-2}$

O ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006), requer o conhecimento das características hidráulicas do solo 2 que é composto uma pasta de caulim (ver item 3.4.2.2), assim os parâmetros do modelo de van Genuchten para este solo foram determinados por Marinho (2006) e são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros do Caulim (solo 2).

θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]
0,46	0,6	0,01	1,488	8×10^{-6}

As condições iniciais de carga de pressão assumidas para o ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006), estão apresentadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Condições iniciais para os ensaios de laboratório.

Material	h [cm]
Solo 1 (desconhecido)	-20395
Solo 2 (pasta de caulim)- Medição	-200
Solo 2 (pasta de daulim)- Medição	-10

2

Os parâmetros iniciais para os solos do túnel Rebouças estão apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Parâmetros iniciais para o solo do túnel Rebouças.

Medição	θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]
Material 1	0,34	0,43	0,01	2,5	$4,3 \times 10^{-4}$
Material 2	0,04	0,38	0,3	1,80	$2,03 \times 10^{-3}$

Os parâmetros iniciais (θ_r , θ_s , α e n) do material 1 foram obtidos da curva característica de sucção, determinada pelo método do papel filtro no laboratório do DEC/PUC-Rio.

Os valores iniciais (θ_r , θ_s , α e n) do material 2 foram estimados através da informação da textura do solo, utilizando funções de pedo-transferência (Schaap, 1999). Essas funções incluídas no HYDRUS 2D-3D, permitem estimar as propriedades hidráulicas a partir de dados básicos dos solos, como, por exemplo, o percentual de areia, silte, cascalho e de matéria orgânica. Finalmente, os valores iniciais de k_s provêm da tabela 5.9.

Os parâmetros iniciais para os solos da pilha estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas estão resumidos na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Parâmetros iniciais para os solos da pilha estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas.

Medição	θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]
EnTen_01	0,04	0,39	0,011	2	$1,5 \times 10^{-3}$
EnTen_02	0,04	0,39	0,043	2	$1,8 \times 10^{-3}$
EnTen_05	0,04	0,39	0,032	1,3	$1,1 \times 10^{-3}$
EnTen_08	0,05	0,35	0,009	1,13	$2,1 \times 10^{-3}$
EnTen_09	0,05	0,35	0,009	1,33	$1,8 \times 10^{-3}$

Novamente neste caso os dados de entrada foram estimados através de funções de pedo-transferência (Shapp *et al.*, 1999) usando os dados da caracterização granulométrica.

As geometrias, malhas de elementos finitos, número de nós e número de elementos considerados em cada uma das retroanálises estão detalhados no anexo A.

5.2.2 Resultados da Estimativa de Parâmetros

Neste item apresentam-se os resultados da estimativa de parâmetros. Foram estimados três dos cinco parâmetros do modelo de van Genuchten, α , n e k_s , e mantidos como fixos os valores de θ_s e θ_r . Velloso (2001) observou que θ_r e θ_s eram os parâmetros mais sensíveis na retroanálise do ensaio de infiltração monitorada. Também foi observado que na retroanálise dos cinco parâmetros produz valores de correlações altas, acima de 0,9 (ver item 3.3), além que o E.I.M. não fornece dados que permitam a estimação destes.

A seguir apresentam-se os resultados para os diversos locais de ensaios.

5.2.2.1 Resultados no Campo Experimental II PUC-Rio

A tabela 5.7, resume os valores dos parâmetros estimados para o solo do Campo Experimental II, apresentando os valores estimados dos parâmetros de van Genuchten - Mualem (θ_r , θ_s , α , n, k_s) na solução do problema inverso, assim como o valor final da função objetivo $F(p^*)$. A tabela 5.8, apresenta os valores dos coeficientes de correlação obtidos para os parâmetros retroanalizados; onde $\rho_{\alpha n}$, $\rho_{\alpha k_s}$ e $\rho_{n k_s}$, simbolizam os valores

de correlação entre os parâmetros simulados, já a figura 5.3 mostra a comparação entre os dados observados e os calculados pelo modelo.

Tabela 5.7 - Parâmetros estimados do Campo Experimental II.

Medição	θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]	F(p*)
Ensaio 1	0,34	0,43	$3,33 \times 10^{-2}$	1,65	$1,43 \times 10^{-4}$	0,01327
Ensaio 2	0,34	0,43	$1,86 \times 10^{-3}$	1,54	$1,25 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{-3}$

Tabela 5.8 - Coeficientes de correlação do Campo Experimental II.

Medição	$\rho_{\alpha n}$	$\rho_{\alpha k_s}$	$\rho_{n k_s}$
Ensaio 1	-0,78	0,01	0,605
Ensaio 2	-0,87	0,64	-0,17

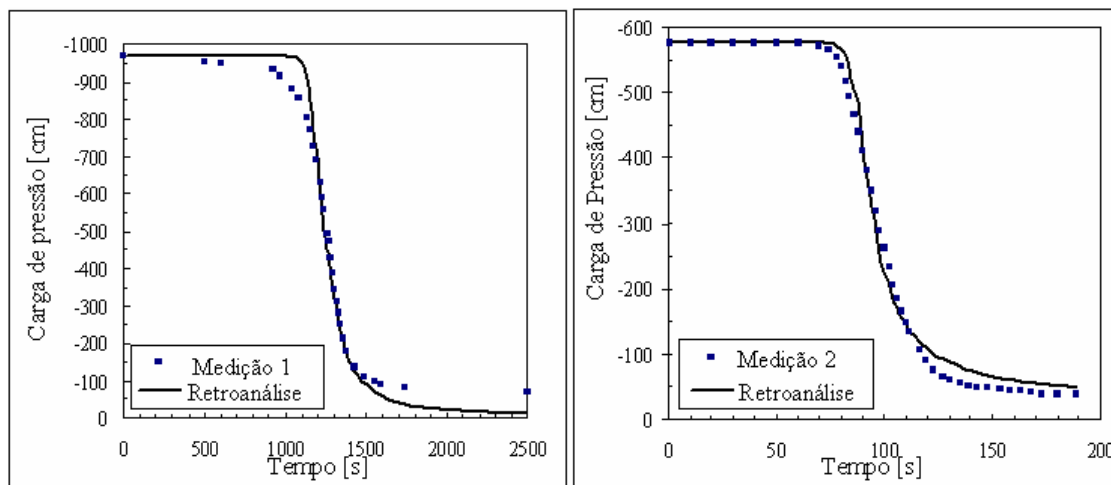


Figura 5.3 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidas, no E.I.M. e retroanalizadas, para o solo do Campo Experimental II.

Os resultados apresentados na tabela 5.8 mostram que os valores representam uma baixa correlação, na maioria dos resultados, pois observa-se que a correlação $\rho_{\alpha n}$ é alta nas duas retroanálises; o que significa que existe uma alta dependência entre esses parâmetros, como as outras duas correlações não atingem o valor de 0,9, pode-se dizer que a confiabilidade dos valores estimados está garantido. A figura 5.3 mostra uma excelente resposta entre os valores medidos e os retroanalizados.

A figura 5.4 mostra uma comparação entre as curvas características obtidas em estudo anteriores e as calculadas com os valores dos parâmetros estimados.

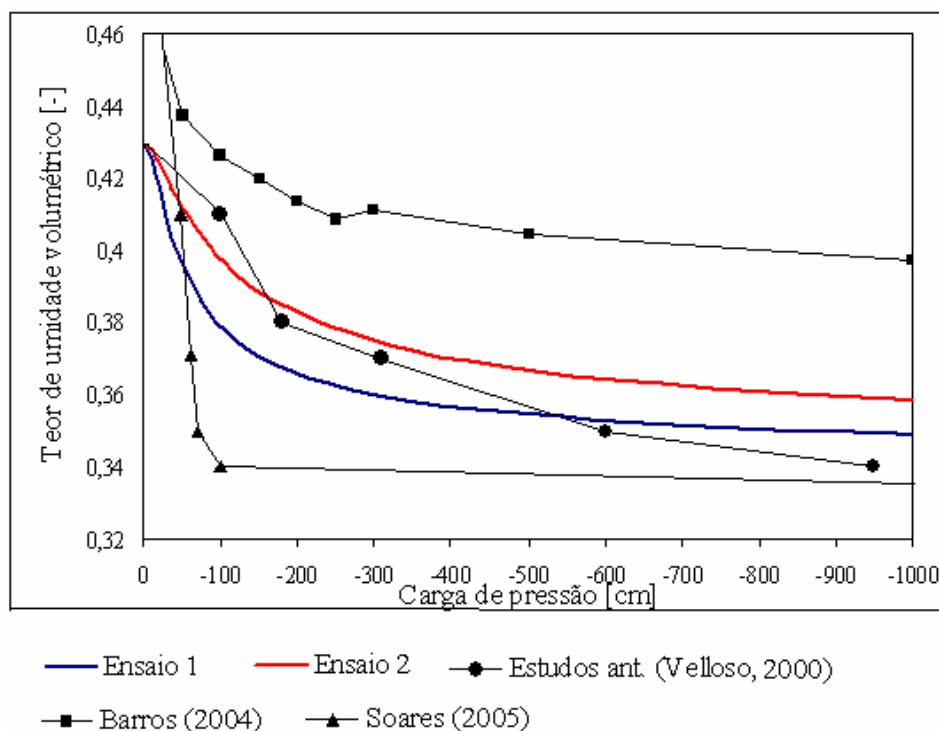


Figura 5.4 - Curvas características calculadas das retroanálises e estudos anteriores para o solo do Campo Experimental II.

A diferença existente entre as curvas determinadas em estudo anteriores e os calculados neste trabalho pode se dever à estimativa inicial do valor de θ_s usado neste trabalho, que difere do valor encontrado nos ensaios de laboratório de Soares (2005) e Barros (2004), esta diferença pode estar influenciada pela porosidade, já que os ensaios foram feitos em diferentes locais, além do que existe uma diferença de profundidade entre os ensaios simulados nesta dissertação de aproximadamente de 0,80m com relação aos estudos anteriores.

5.2.2.2 Resultados para o Perfil de Solo de Duque de Caxias

O solo de Duque de Caxias foi submetido a dois tipos de ensaios, o E.I.M. (ver item 3.4.1.2) e o ensaio de laboratório proposto (ver item 3.4.2.2).

As tabelas 5.9 e 5.10 resumem os valores dos parâmetros estimados, a função objetivo, e seus respectivos coeficientes de correlação. Já a figura 5.5 apresenta a comparação entre os valores calculados pelo modelo e os dados obtidos pelo E.I.M.

Tabela 5.9 - Parâmetros estimados para o solo de Duque de Caxias, E.I.M.

Medição	θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]	F(p*)
Ensaio 1	0,34	0,43	0,01	1,15	$1,17 \times 10^{-3}$	0,0091

Tabela 5.10 - Coeficientes de correlação de Duque de Caxias, E.I.M.

Medição	$\rho_{\alpha n}$	$\rho_{\alpha k_s}$	$\rho_{n k_s}$
Ensaio 1	0,27	0,55	0,9

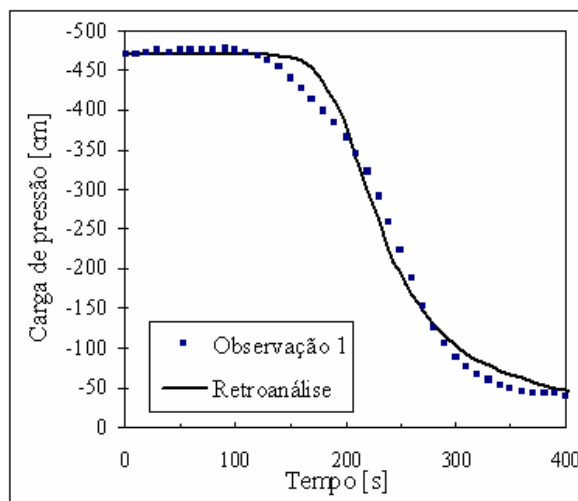


Figura 5.5 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidos no E.I.M. e retroanalizadas para o solo de Duque de Caxias.

Os resultados apresentados mostram valores dos coeficientes de correlação dentro do sugerido, com exceção do valor de $\rho_{n k_s}$, isso pode ser explicado ao observar que a retroanálise utilizou um intervalo pequeno de dados de carga de pressão, isto afeta o resultado pois só se tem dados reais de uma parte de curva característica, apesar desse comportamento a figura 5.5 apresenta uma boa relação entre o calculado e o observado no campo.

Para o ensaio de laboratório proposto por Marinho no item 3.4.2.2 foram retroanalizados dois parâmetros, α e n, e mantidos constantes θ_r , θ_s e k_s . Os resultados estão mostrados nas tabelas 5.11 e 5.12.

Tabela 5.11 - Parâmetros estimados para o solo de Duque de Caxias, ensaio de laboratório.

Medição	θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]	F(p*)
Medição	0,34	0,43	0,2956	1,72	$1,67 \times 10^{-2}$	0,25
Medição	0,34	0,43	0,162	1,27	$1,67 \times 10^{-2}$	0,26

Tabela 5.12 - Coeficientes de correlação para o solo Duque de Caxias, ensaio de laboratório.

Medição	$\rho_{\alpha m}$
Medição	-0,996
Medição	-0,989

2

Os valores da tabela 5.12 mostram que os valores dos coeficientes de correlação são muito altos (acima de 0,9), isso pode se explicar devido à grande variação de pressões ocorridas durante o processo de secagem da pasta de caulim, esses valores de correlação indicam que diversas combinações de parâmetros poderão produzir os parâmetros estimados.

A figura 5.6 mostra os resultados da retroanálise para o ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006), como pode se observar, não existe uma convergência adequada entre os valores calculados e os dados medidos. Isto se deve às grandes variações de pressões em intervalos de tempo pequenos, além de considerar que o processo de secagem da pasta de caulim acontece num volume de amostra muito pequeno. Desse, pode-se dizer que os resultados do ensaio de laboratório proposto por Marinho (2006) não se aplica na estimativa de parâmetros por retroanálise.

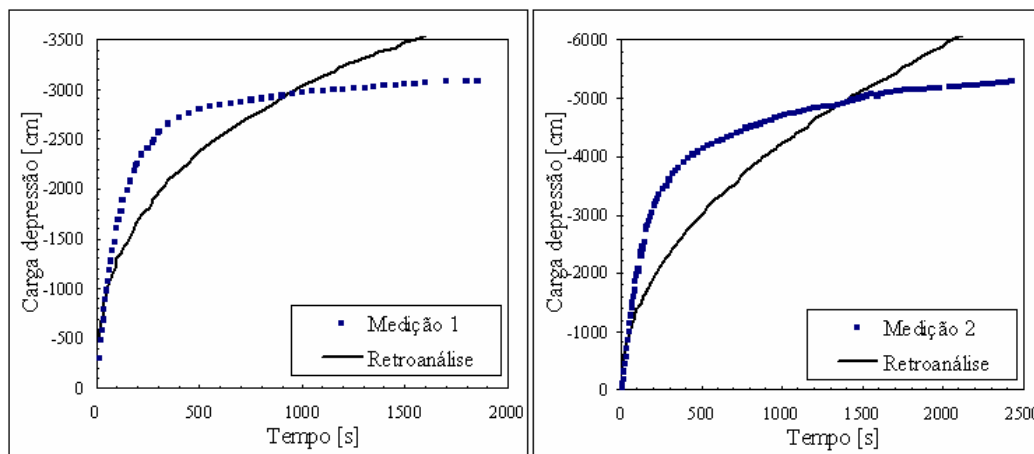
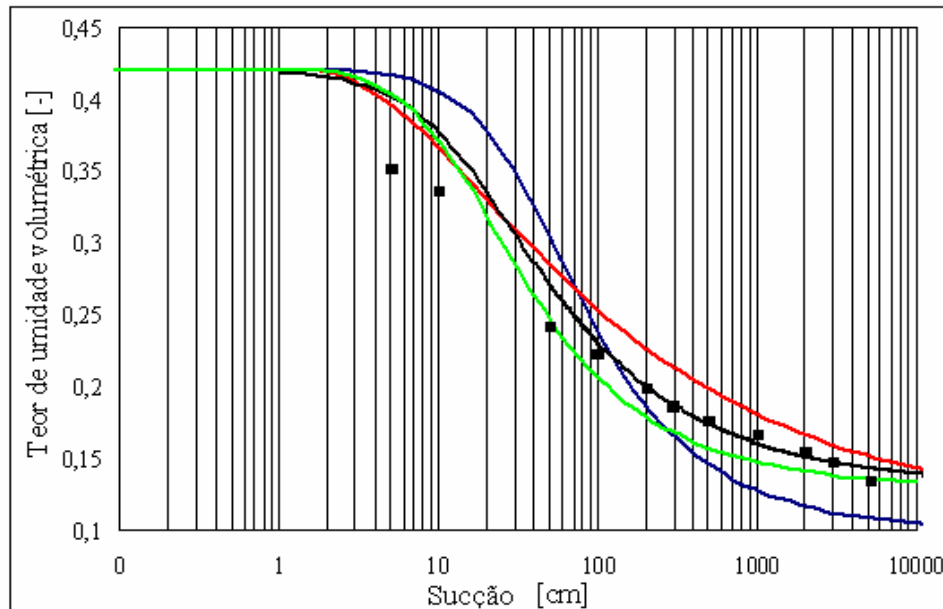


Figura 5.6 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidas e retroanalizadas, para o solo de Duque de Caxias (ensaio de laboratório proposto).

A figura 5.7 apresenta as curvas características obtidas a partir dos parâmetros estimados dos ensaios de campo e laboratório proposto e as curvas características estimadas em estudos anteriores. Observa-se que, embora os valores dos coeficientes de correlação para o ensaio de laboratório sejam altos, os parâmetros estimados fornecem

uma curva característica parecida com os estudos anteriores e os dados de ensaios de laboratório, da retroanálise do E.I.M. observa-se que este se acha dentro das curvas características determinadas em estudos anteriores.



— Medição 1 - Ensaio de lab. (retroanalise) — Fração arenosa (Velloso, 2006)
 — Medição 2 - Ensaio de la. (retroanalise)
 — Ensaio 1 - E.I.M. (retroanalise) ■ Dados de ensaios de anteriores (Marinho, 2006)

Figura 5.7 - Curvas características para os parâmetros estimados com o ensaio de laboratório proposto e estudos anteriores para o solo de Duque de Caxias.

5.2.2.3 Resultados Para os Solos do Túnel Rebouças

Os parâmetros estimados estão apresentados nas tabelas 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13 - Parâmetros estimados para o solo túnel Rebouças.

Medição	θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]	F(p*)
Material 1	0,34	0,43	0,022	2,29	$3,71 \times 10^{-4}$	0,0094
Material 2	0,04	0,35	0,034	1,08	$1,01 \times 10^{-3}$	0,00254

Tabela 5.14 - Coeficientes de correlação para o solo túnel Rebouças.

Medição	$\rho_{\alpha n}$	$\rho_{\alpha k_s}$	$\rho_{n k_s}$
Material 1	0,18	0,52	-0,74
Material 2	-0,42	-0,46	0,66

Os resultados da retroanálise para os solos do túnel Rebouças e as curvas características calculadas usando os parâmetros estimados são apresentados nas figuras 5.9 e 5.10, respectivamente.

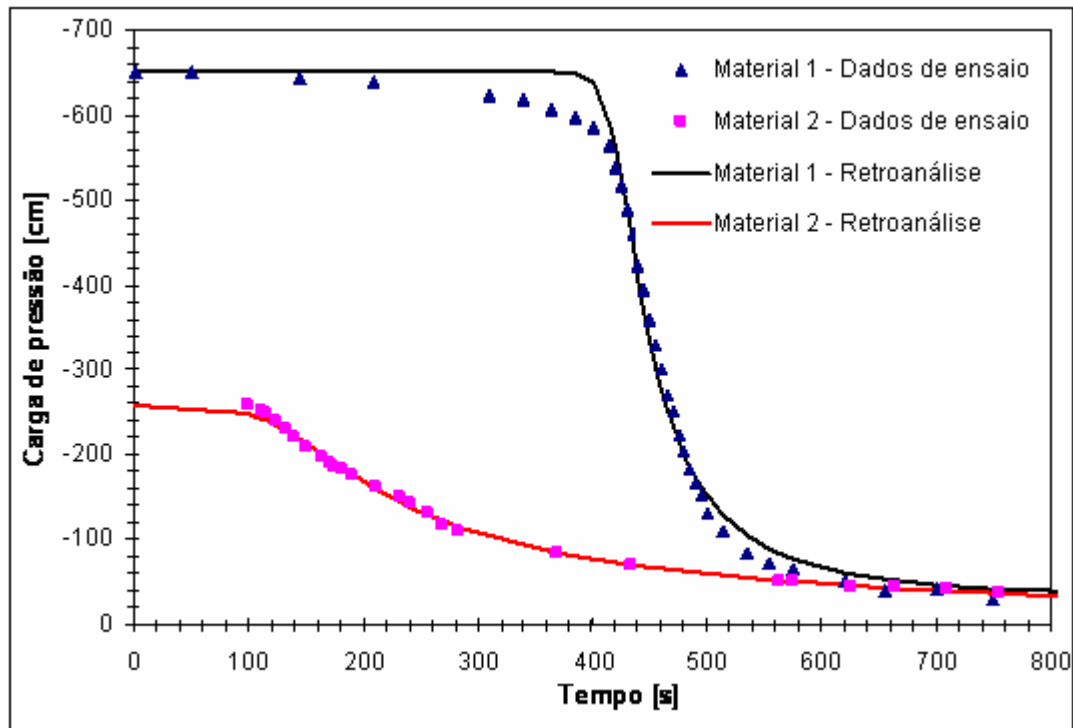


Figura 5.8 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidas no E.I.M. e retroanalizadas para os solos do túnel Rebouças.

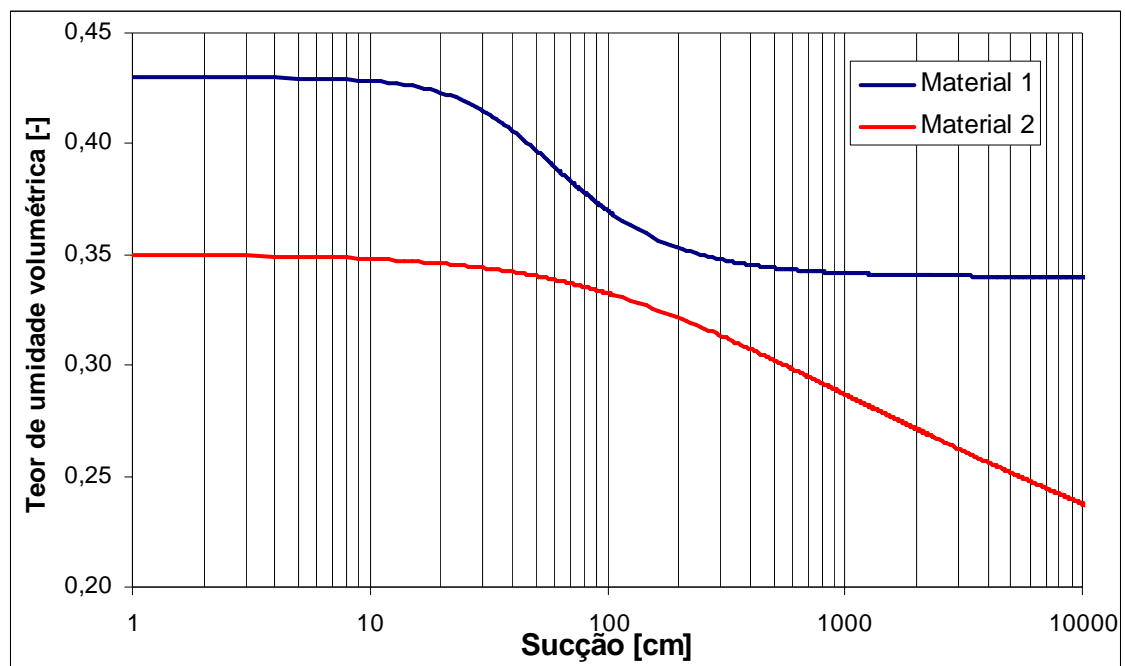


Figura 5.9 - Curvas características para os parâmetros estimados dos solos do túnel Rebouças.

Observa-se que no caso do material 2 que foi retroanalisado para condições de baixa sucção, os resultados dos coeficientes de correlação se encontram dentro do sugerido. As relações de carga de pressão no tempo calculadas e observadas no campo (figura 5.9) não diferem muito.

5.2.2.4

Resultados na Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas

Os parâmetros estimados para a Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade assim como os coeficientes de correlação estão resumidos nas tabelas 5.15 e 5.16.

Tabela 5.15 - Parâmetros estimados para a Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade,

Ensaio	θ_r	θ_s	α [cm ⁻¹]	n	k_s [cm/s]	F(p*)
EnTen_01	0,04	0,39	0,014	1,09	$9,23 \times 10^{-4}$	0,00157
EnTen_02	0,04	0,39	0,024	1,35	$1,02 \times 10^{-3}$	0,006
EnTen_05	0,04	0,39	0,011	1,29	$9,52 \times 10^{-4}$	0,015
EnTen_08	0,05	0,35	0,004	1,05	$7,6 \times 10^{-4}$	0,0075
EnTen_09	0,05	0,35	0,013	1,25	$1,81 \times 10^{-3}$	0,013

Tabela 5.16 - Coeficientes de correlação para o a Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade.

Ensaio	$\rho_{\alpha n}$	$\rho_{\alpha K_s}$	$\rho_{n K_s}$
EnTen_01	-0,65	0,98	-0,50
EnTen_02	0,55	0,71	-0,19
EnTen_05	0,41	0,56	-0,53
EnTen_08	0,49	-0,31	0,53
EnTen_09	0,88	0,96	0,74

Os ajustes das curvas calculadas na retroanálise e os dados obtidos no E.I.M. apresentadas na figura 5.10 e as curvas características obtidas com os parâmetros estimados são apresentadas na figura 5.11.

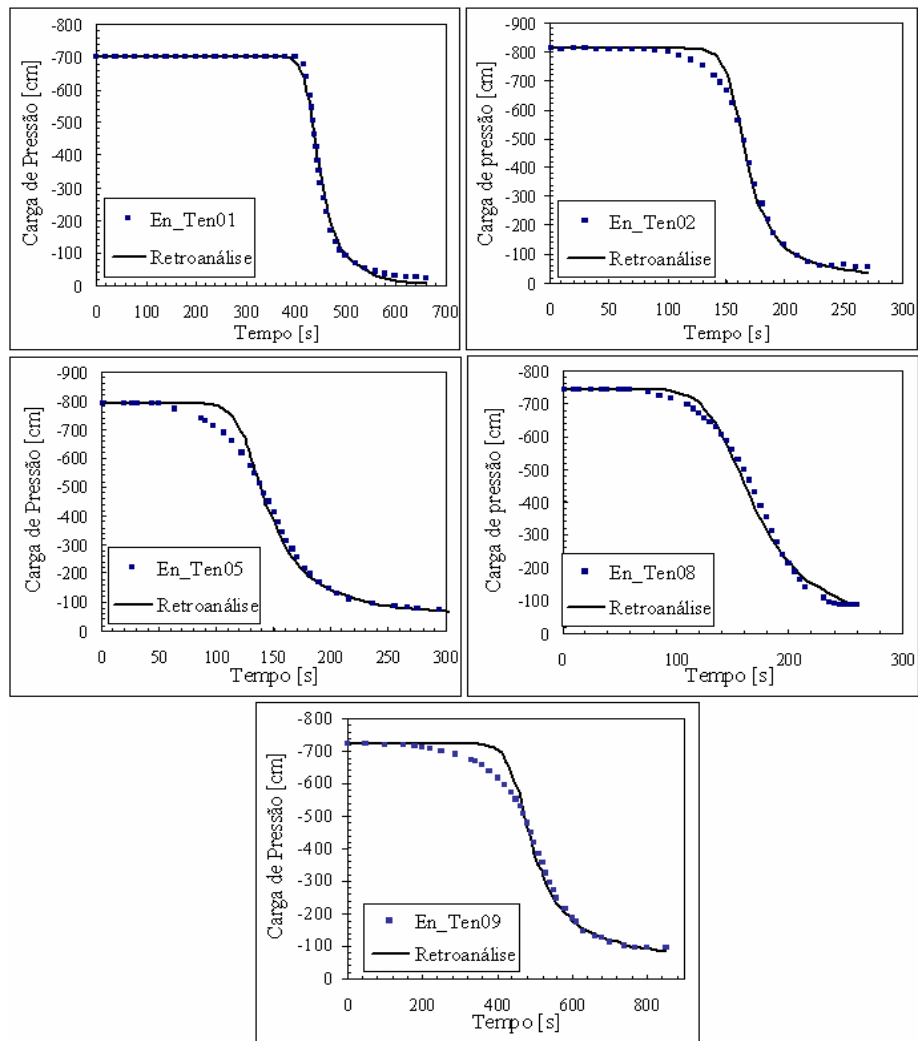


Figura 5.10 - Ajuste das curvas de carga de pressão x tempo medidos no E.I.M. e retroanalizadas para a Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade.

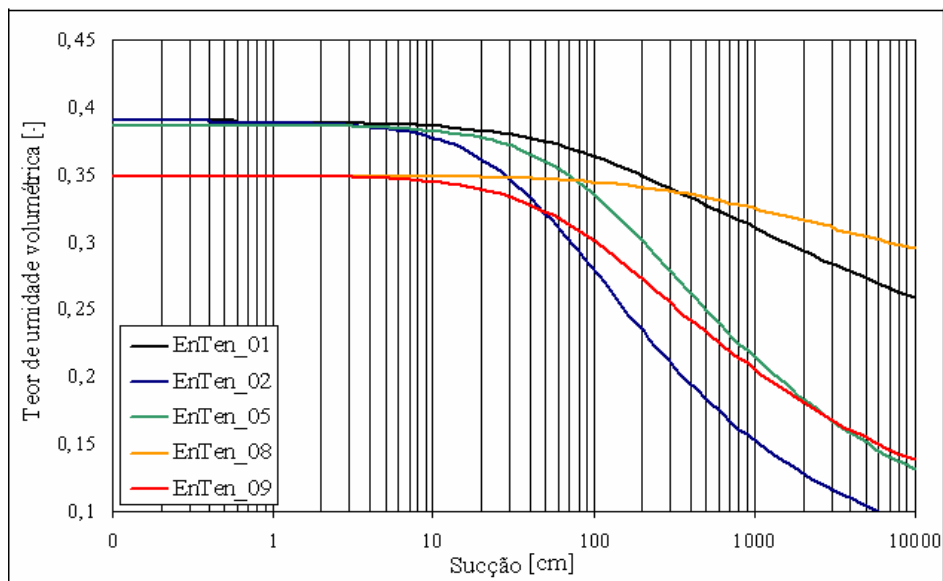


Figura 5.11 - Curvas características para os parâmetros estimados da Pilha de Estéril nº 5 da Mina do Andrade.

5.3 Análise Direta

A análise direta realizada nesta dissertação é a simulação de fluxo saturado – não saturado para a Vista Chinesa e para o túnel Rebouças apresentados a seguir.

5.3.1 Análise Direta da Encosta da Vista Chinesa

Considerou-se aqui, para a simulação do evento descrito no item 5.3, o perfil geométrico mostrado na figura 5.12.

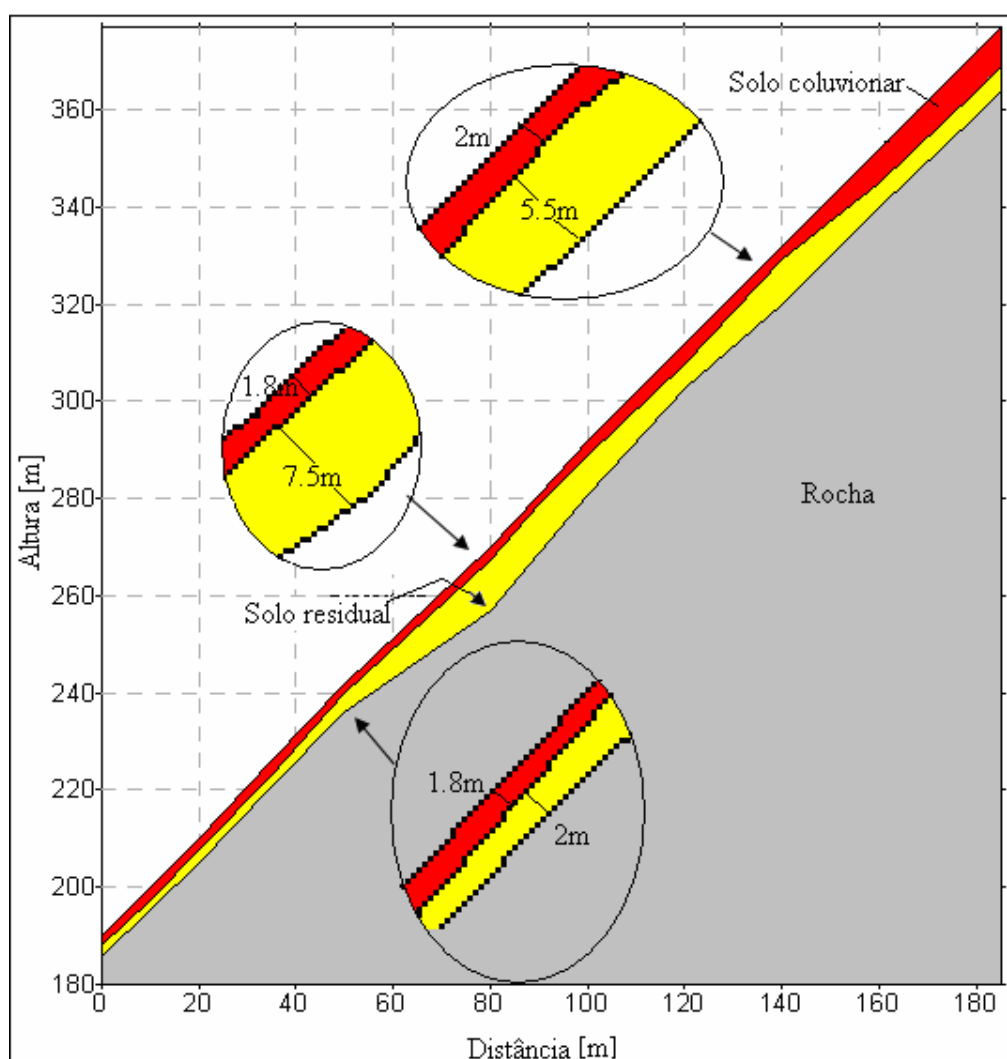


Figura 5.12 - Perfil geométrico da Vista Chinesa (adaptado de Soares, 1999).

A simulação considerou as precipitações de fevereiro de 1988, conforme o apresentado na tabela 4.7. A partir do dia 18 de fevereiro de 1988, incrementou-se uma

região saturada no topo da encosta, devido à presença de um escoamento superficial de água proveniente da rodovia localizada no topo da encosta, produto do acúmulo de água na rodovia.

As condições iniciais da encosta estão resumidas na tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Condições iniciais da encosta da Vista chinesa.

Material	Carga de pressão inicial	Condutividade hidráulica saturada
Solo coluvionar	-4,8m	1×10^{-3} cm/s
Solo residual	-6m	$4,4 \times 10^{-4}$ cm/s

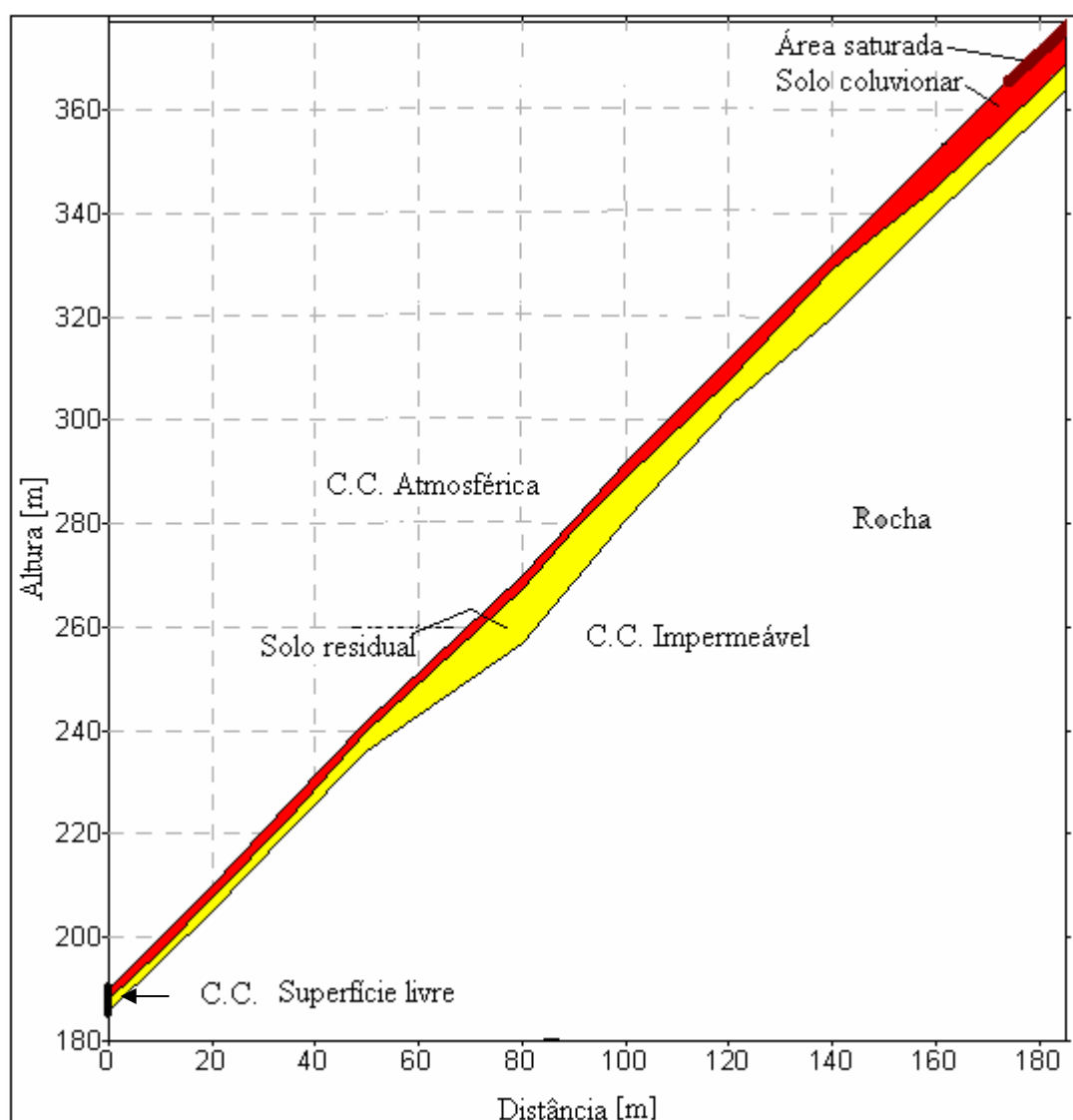


Figura 5.13 - Condições de contorno do talude da Vista Chinesa.

Para a simulação destes eventos, no HYDRUS 2D-3D, considerou-se como condições de contorno (figura 5.13): a parte superficial da encosta foi considerada como atmosférica, o contato solo rocha foi considerada como impermeável e na base considerou-se como superfície livre.

A região saturada no HYDRUS 2D-3D é assumida como uma área de carga constante igual a zero.

Os resultados da análise de fluxo bidimensional (2D) estão apresentados nas figuras 5.14 e 5.15 que apresentam comparações entre a simulação das precipitações sem considerar a região saturada (figura 5.14) e a simulação que considera a região saturada no topo da encosta (figura 5.15).

Na figura 5.14 observa-se que as poropressões tornaram-se positivas no solo coluvionar, mas a precipitação não afeita à camada inferior de solo residual, mantendo negativas as poropressões.

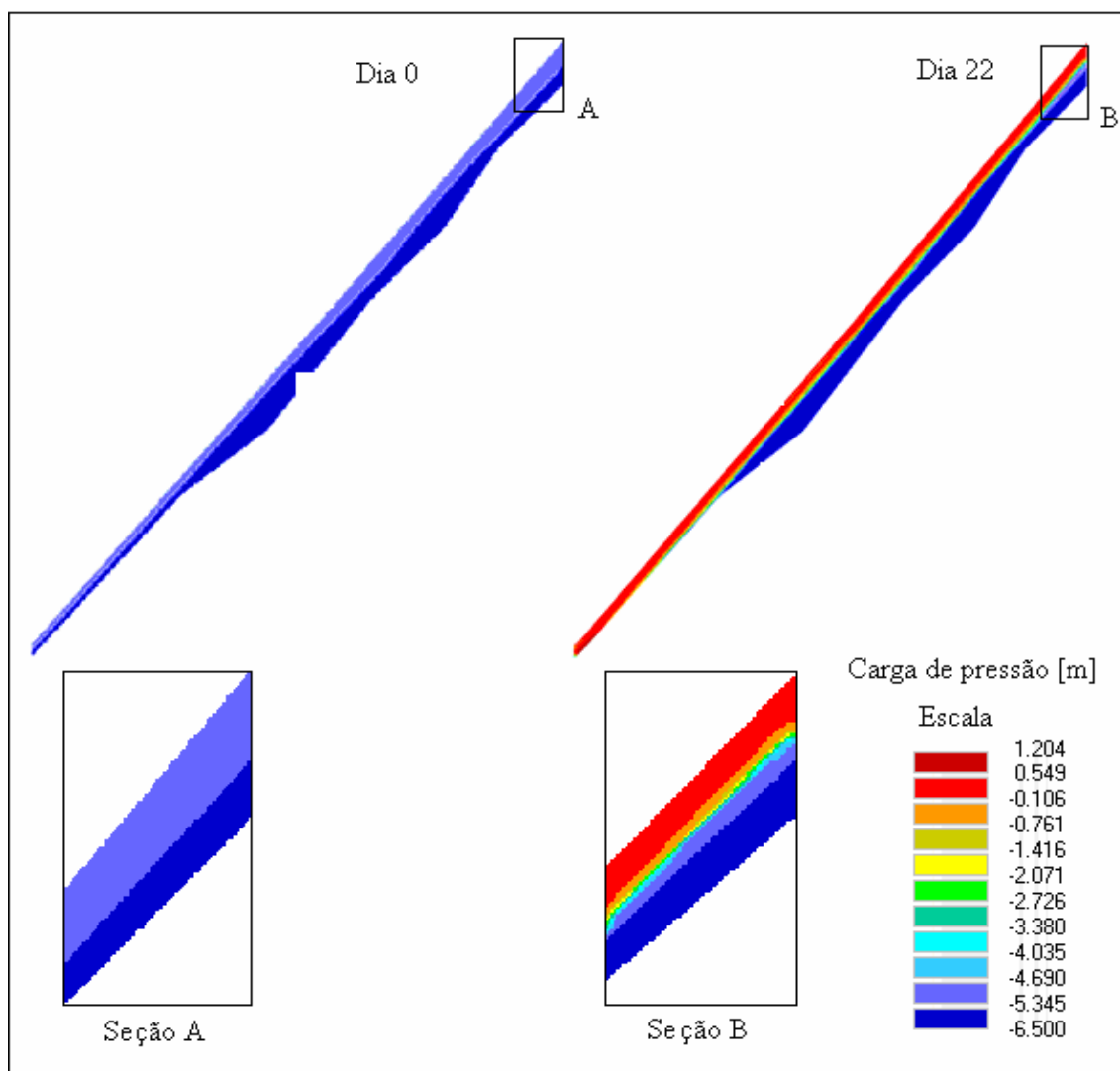


Figura 5.14 - Simulação da Vista China 2D, sem considerar a região saturada.

Da figura 5.15 pode-se observar que o fato de considerar uma região saturada influencia notavelmente na parte superior da encosta, mas não produz uma variação nas poropressões fora do área considerada como saturada. Da análise da zona de interface entre o solo coluvionar e residual verifica-se que as poropressões se mantêm negativas para os dois casos considerados.

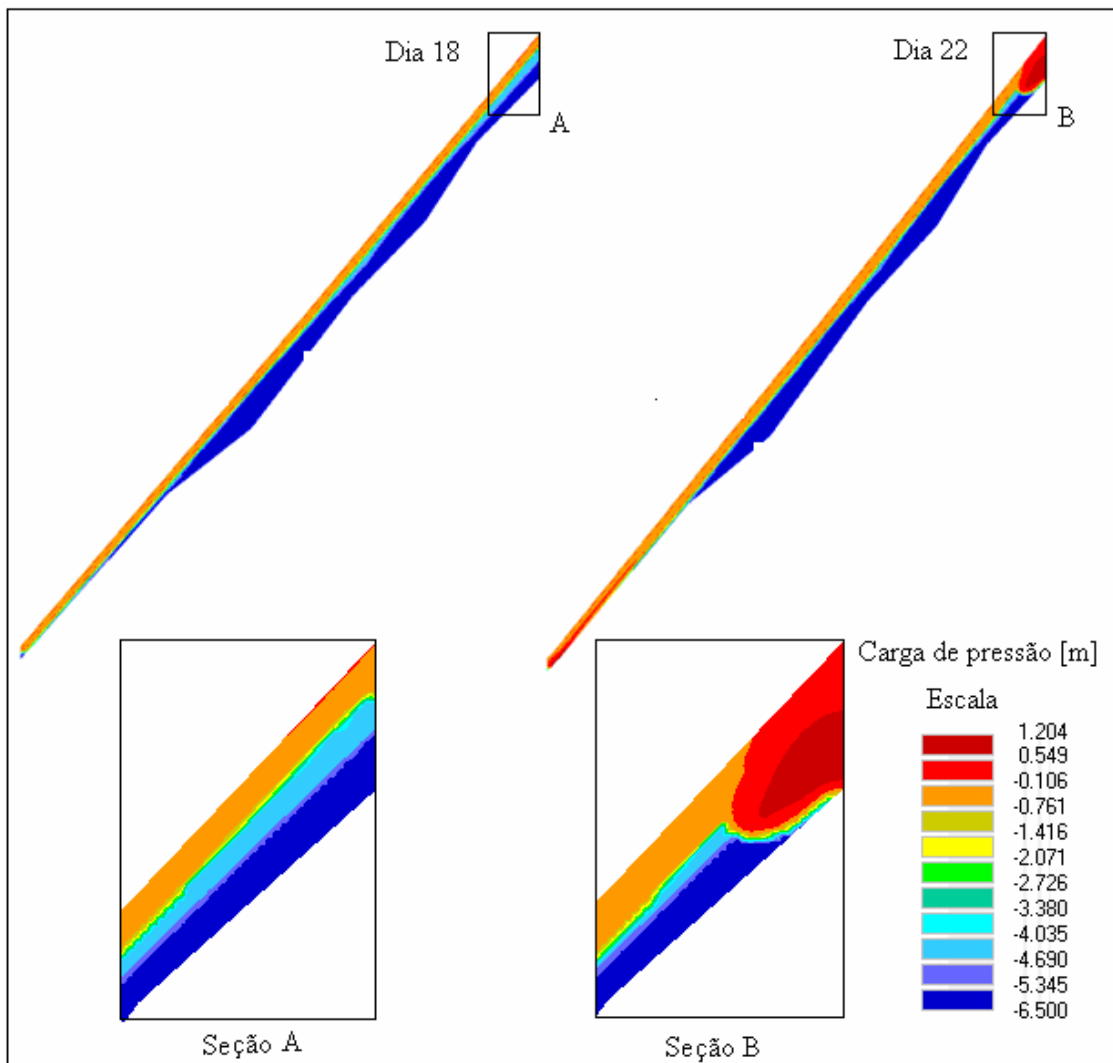


Figura 5.15 - Simulação Vista Chinesa 2D considerando uma região saturada.

Na figura 5.16 apresentam-se as curvas de variação de carga de pressão no tempo. Estes resultados referem-se a um ponto de observação localizado na interface entre o solo coluvionar e residual. Como se pode observar não aparecem mudanças significativas nas poro-pressões, nem a aparição de poro-pressões positivas. Observa-se que ainda nos dias com maior precipitação as poropressões não se tornam positivas.

Estes resultados podem estar influenciados ao valor inicial da carga pressão considerado e aos valores de condutividade hidráulica utilizados.

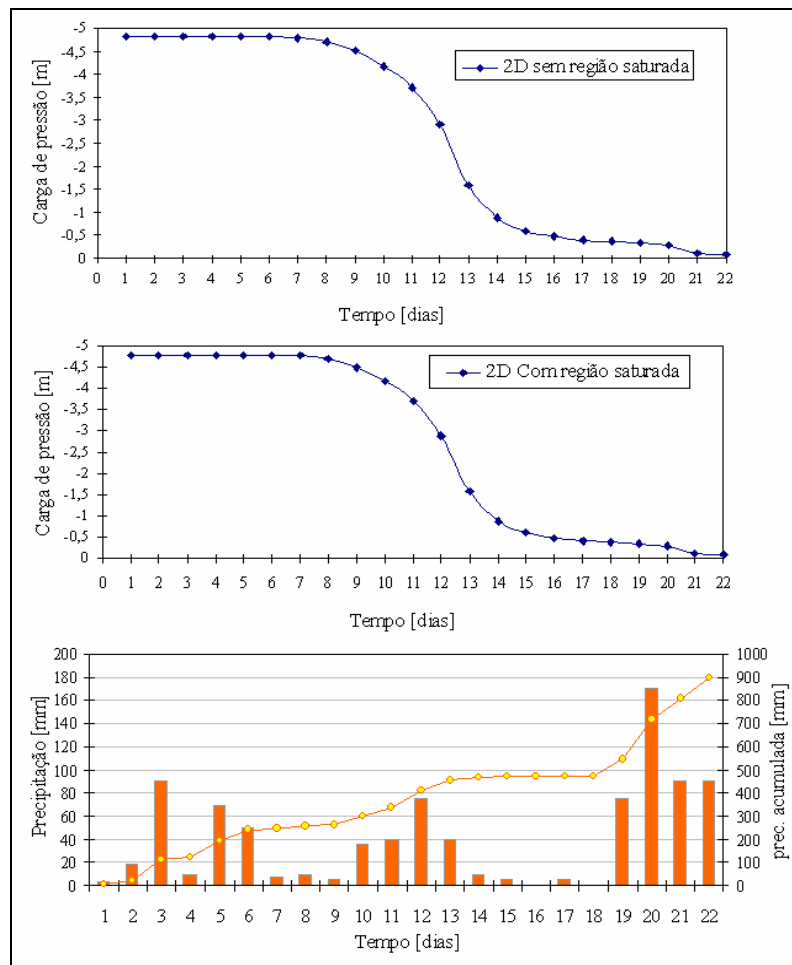


Figura 5.16 - Carga de pressão x tempo calculados para a simulação 2D, e a precipitação utilizada nas análises da Vista Chinesa.

Realizou-se também uma simulação considerando uma geometria tridimensional (3D), nesta simulação foi considerada uma largura de 50m, a largura da área de infiltração foi de 5m. As condições de contorno laterais desta simulação foram consideradas como impermeáveis.

A figura 5.17 apresenta os resultados considerando a região saturada no topo do talude.

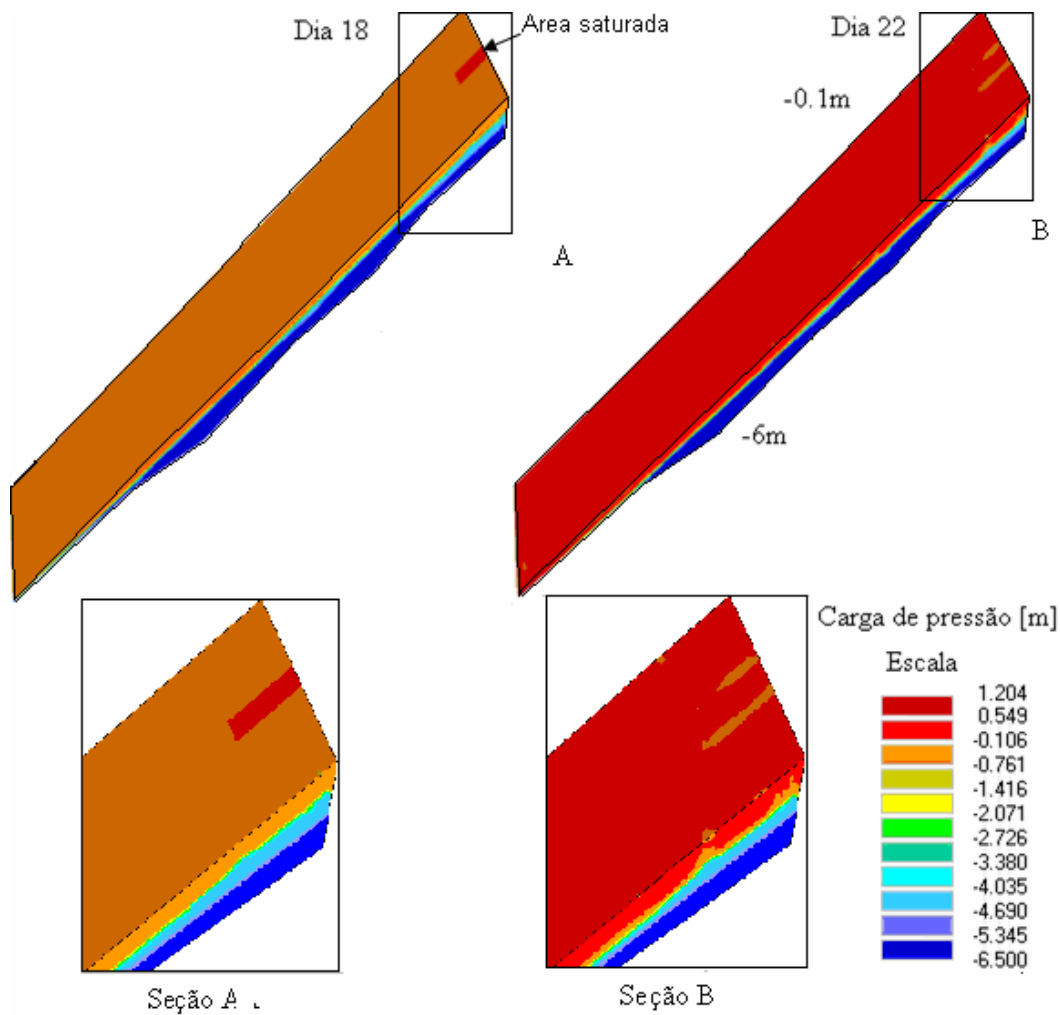


Figura 5.17 - Simulação tridimensional entre os dias 18 e 22 considerando a região saturada da Vista Chinesa.

A figura 5.18 apresenta-se a variação da carga de pressão no tempo. Como pode se observar estes resultados sugerem que não existe diferença entre o simulado sem ou com região saturada.

Das figuras 5.17 e 5.18 pode-se observar que os resultados não diferem muito da análise bidimensional, novamente o solo coluvionar satura-se, mas, o solo residual permanece inalterado, nesta análise observa-se também que a influência da área saturada é menor, isto pode ser consequência da largura considerada na análise.

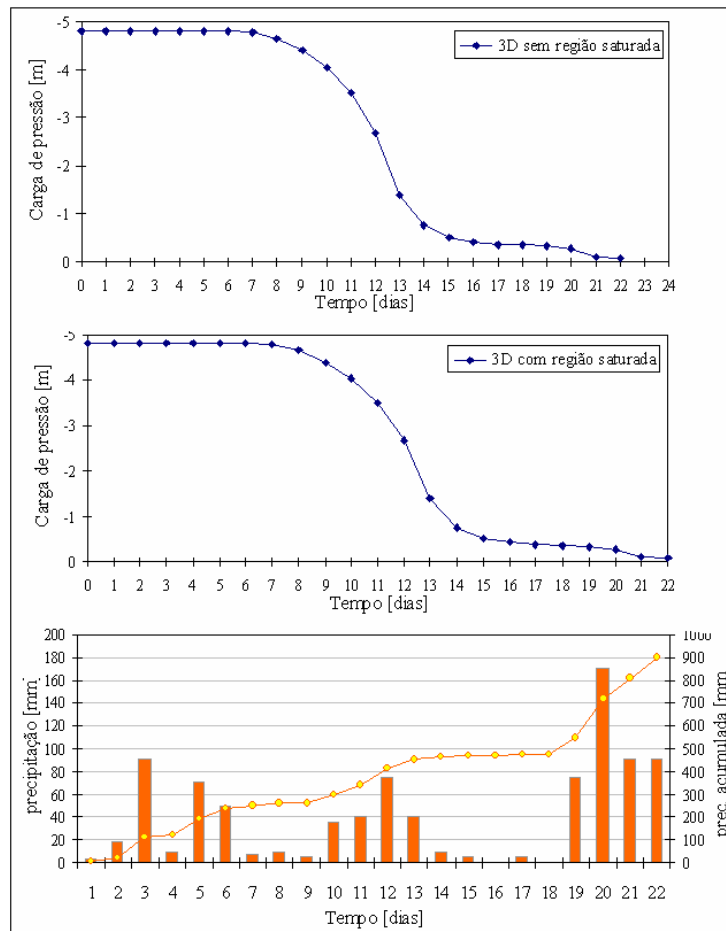


Figura 5.18 - Carga de pressão x tempo e precipitação empregada nas análises da simulação 3D da Vista Chinesa.

5.3.2 Análise Direta da Encosta do Túnel Rebouças

Para a análise direta foram considerados os resultados obtidos no item 4.4. As condições iniciais de carga de pressão foram consideradas como uma distribuição linear com a profundidade com valores que variam entre 0,10m e -0,85m.

Os valores da condutividade hidráulica saturada utilizados estão na tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Valores da condutividade hidráulica saturada da encosta do túnel Rebouças.

Material	k_s (cm/s)
Material 1	$3,17 \times 10^{-4}$
Material 2	$2,03 \times 10^{-3}$

A geometria desta análise foi assumida para tentar representar os processos de fluxo saturado e não saturado, as considerações geométricas adotadas estão apresentadas na figura 5.22.

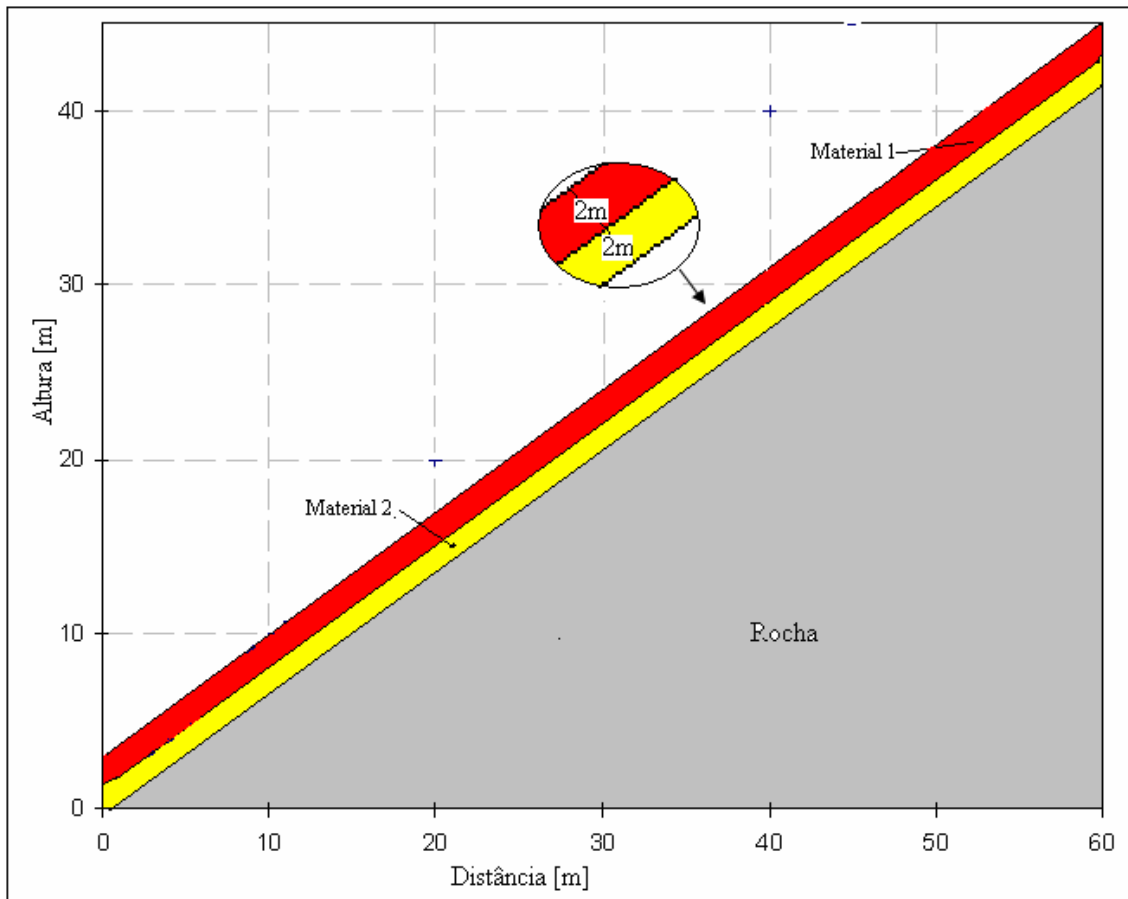


Figura 5.19 - Perfil considerado na encosta do túnel Rebouças.

As condições de contorno assumidas nesta simulação estão apresentadas na figura 5.20, na parte superior do talude considerou-se a condição de contorno atmosférica, no contato solo rocha ela foi considerada como impermeável e na base a condição de contorno é de superfície livre.

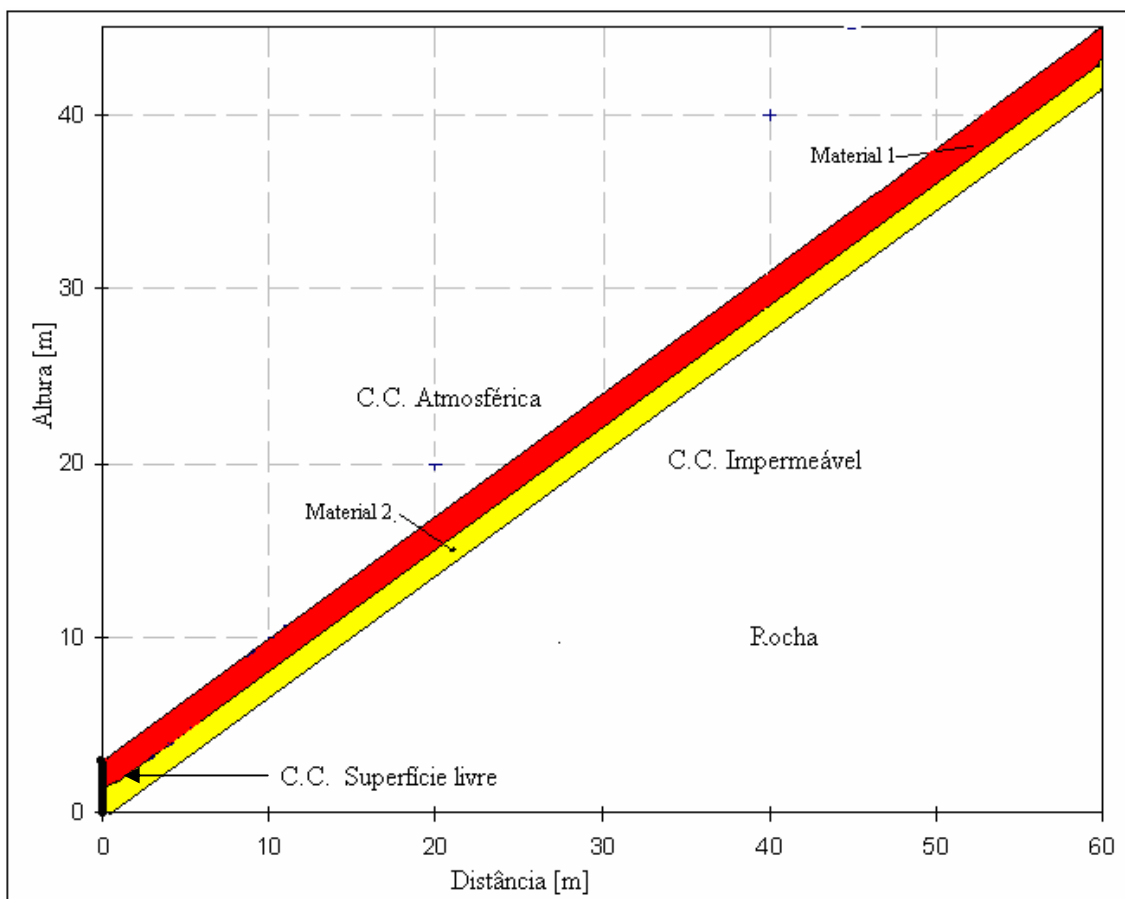


Figura 5.20 - Condições de contorno assumidas para a análise do talude no túnel Rebouças.

Na análise direta foram consideradas geometrias bidimensional e tridimensional.

As análises foram realizadas em três etapas:

Etapa 1: a partir das cargas de pressão iniciais simulou-se as precipitações ocorridas entre janeiro e abril de 2007. Os valores dessas precipitações foram as médias entre as estações pluviométricas Tijuca e Laranjeiras conforme o apresentado nas figuras 4.13 e 4.14.

Etapa 2: a partir do mês de abril até outubro de 2007, além das precipitações foi considerado-se um vazamento no topo do talude, produto da ruptura de uma tubulação localizada no topo do talude a uma profundidade de 0,5m.

Etapa 3: no final de outubro de 2007, foi simulado juntamente ao vazamento uma precipitação de 200 mm/dia durante 24 horas.

A primeira etapa foi considerada tentando estabelecer uma carga de pressão inicial mais realista, assim como, obter uma distribuição da carga de pressão inicial ao longo do talude. Nessa primeira etapa obteve-se uma variação da carga de pressão de

0,1 até -0,8m, observando-se que as poropressões tornaram-se positivas na base do talude, isto se deve à inclinação da encosta.

A figura 5.21 apresenta os resultados da simulação bidimensional (2D), etapa 1 da análise.

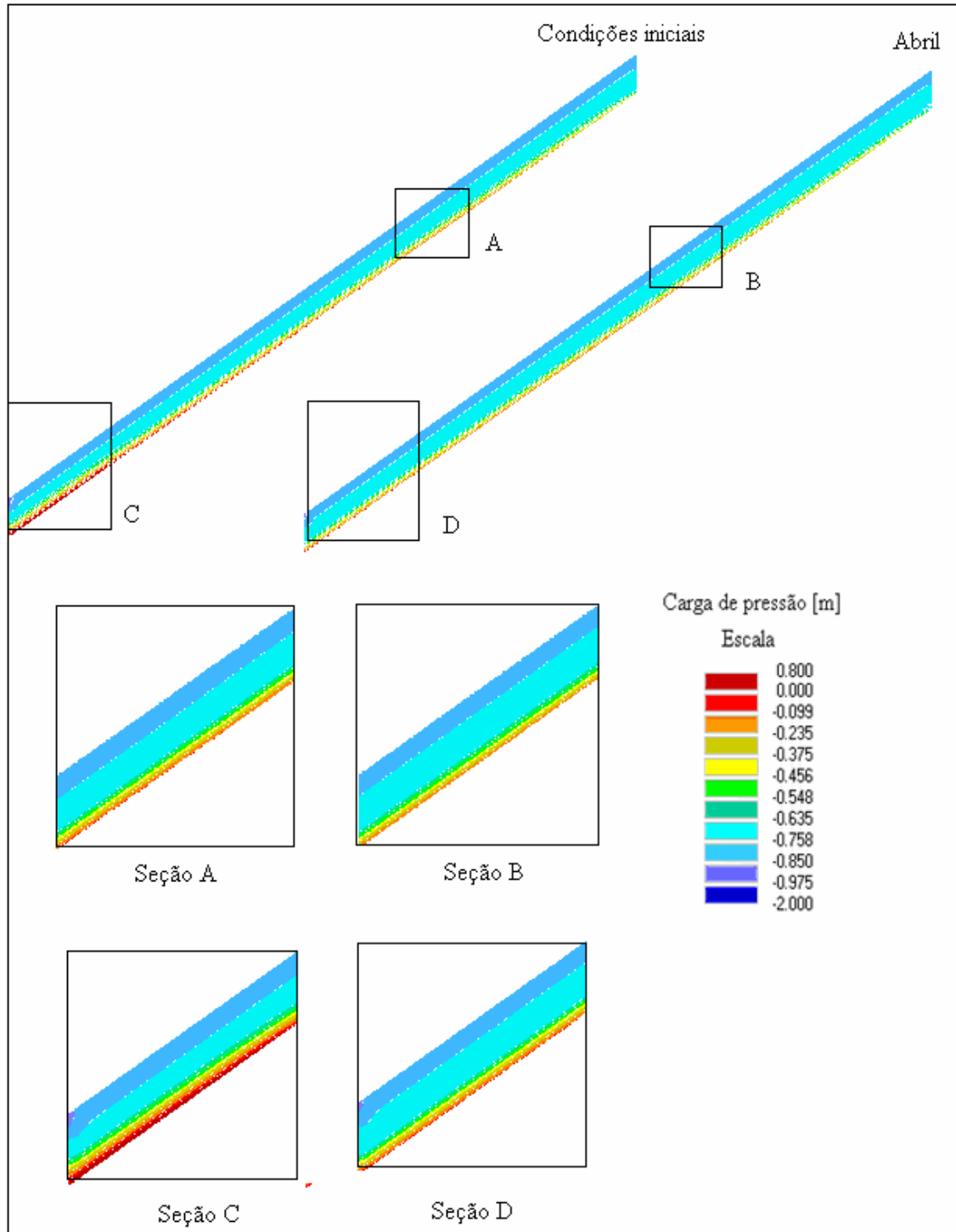


Figura 5.21 - Resultado da análise bidimensional da etapa 1 no túnel Rebouças.

A figura 5.22 apresenta a simulação das precipitações e o vazamento durante os seis meses seguintes.

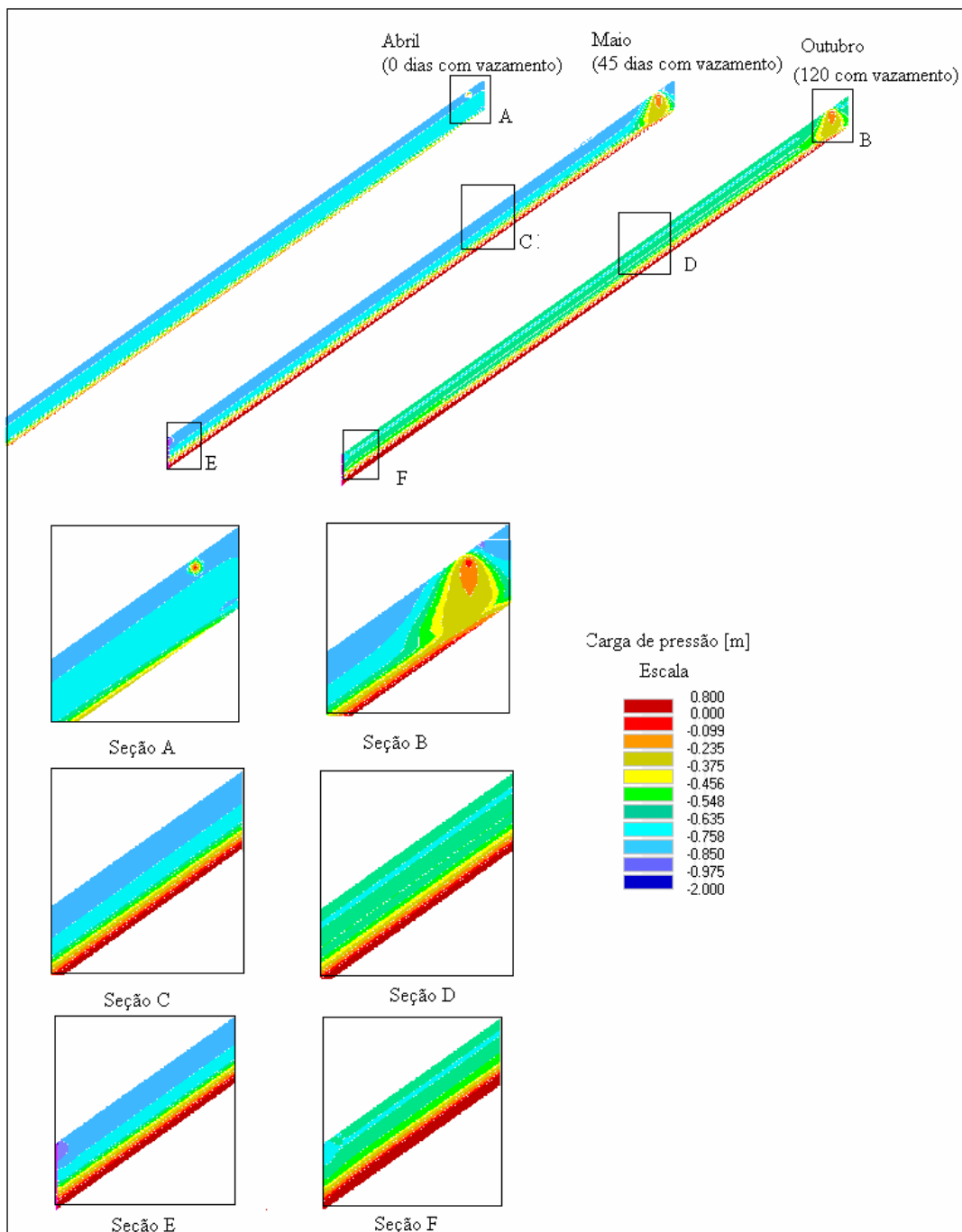


Figura 5.22 - Resultado da análise bidimensional da etapa 2 precipitações médias e o vazamento.

Como se observa na figura 5.22 as poropressões positivas incrementaram-se ao longo do contato solo-rocha, na seção B observa-se o comportamento do vazamento na simulação, contribuindo com o incremento das poropressões. Ao final desta simulação

o contato solo-rocha apresentou poropressões positivas podendo isto ter contribuído com a instabilidade do talude, mesmo antes da precipitação dos 200 mm/dia.

Finalmente, realizou-se a simulação da etapa 3, as condições iniciais para este último evento foram as obtidas para o mês de outubro de 2007 (ver figura 5.22). A figura 5.23 apresenta os resultados desta simulação.

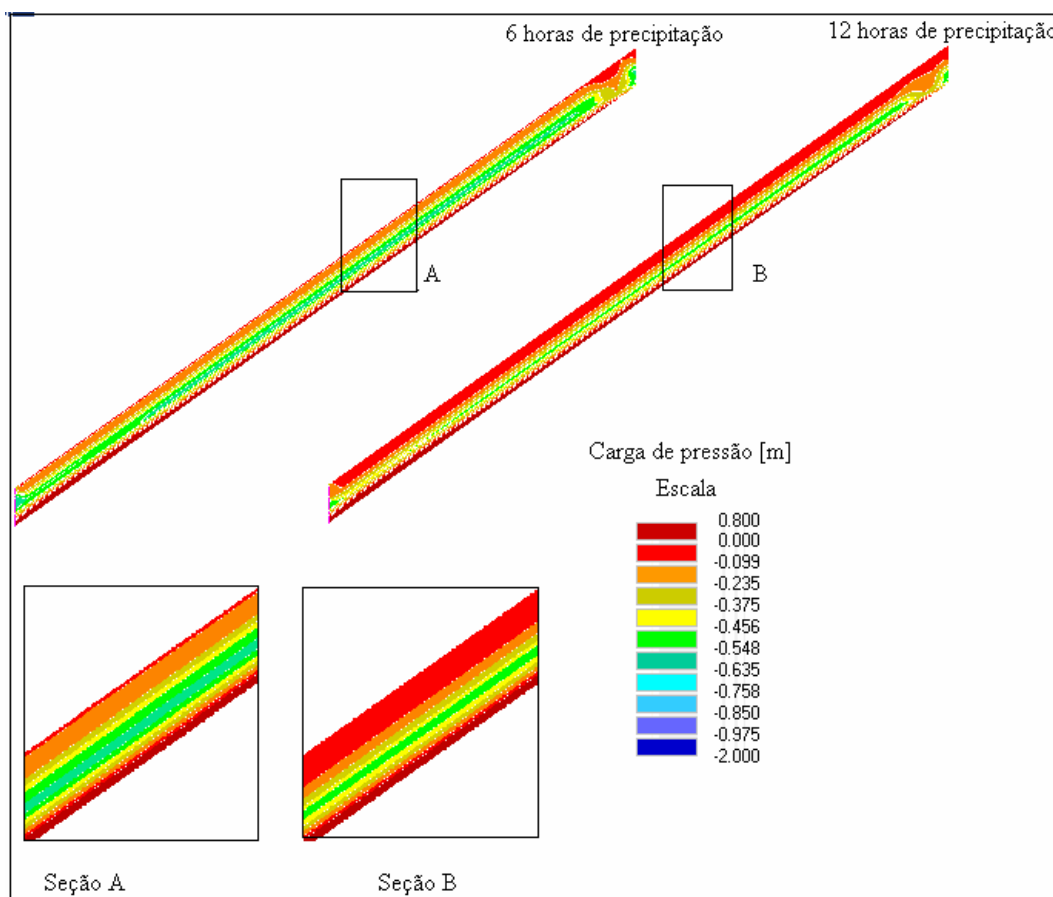


Figura 5.23 - Resultado da análise bidimensional durante a etapa 3 do túnel Rebouças.

Como pode ser observado na figura 5.23, o processo de saturação no solo do material 1 é muito rápido, 12 horas após o início da chuva todo o solo de material 1 está apresentando-se próximo a perto da saturação. Os resultados da etapa 3 indicam que o efeito da precipitação de 200 mm/dia teria sido a potencialização do deslizamento,.

As figuras 5.24 - 5.27 mostram a variação da carga de pressão ao longo dos 300 dias da simulação. Estes valores são comparados com os resultados de outra simulação na qual não existia o vazamento. Os valores correspondem a pontos de observação localizados na interface solo rocha no meio e na base do talude.

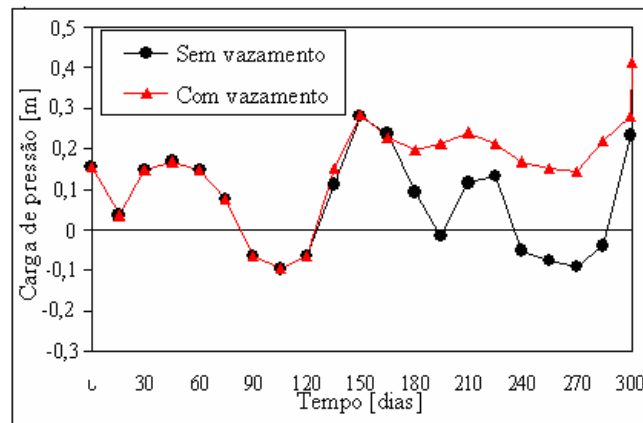


Figura 5.24 - Carga de pressão x tempo ponto na base do talude na interface solo- rocha no túnel Rebouças (2D).

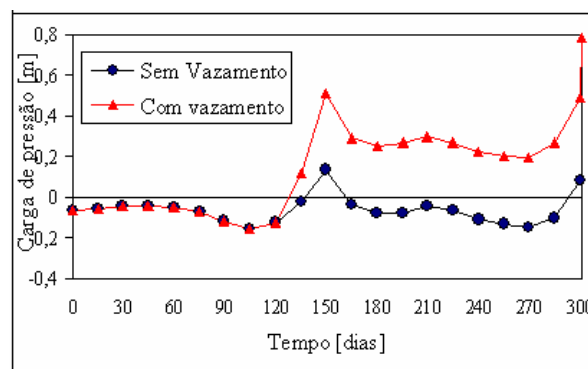


Figura 5.25 - Carga de pressão x tempo ponto no meio do talude na interface solo- rocha no túnel Rebouças (2D).

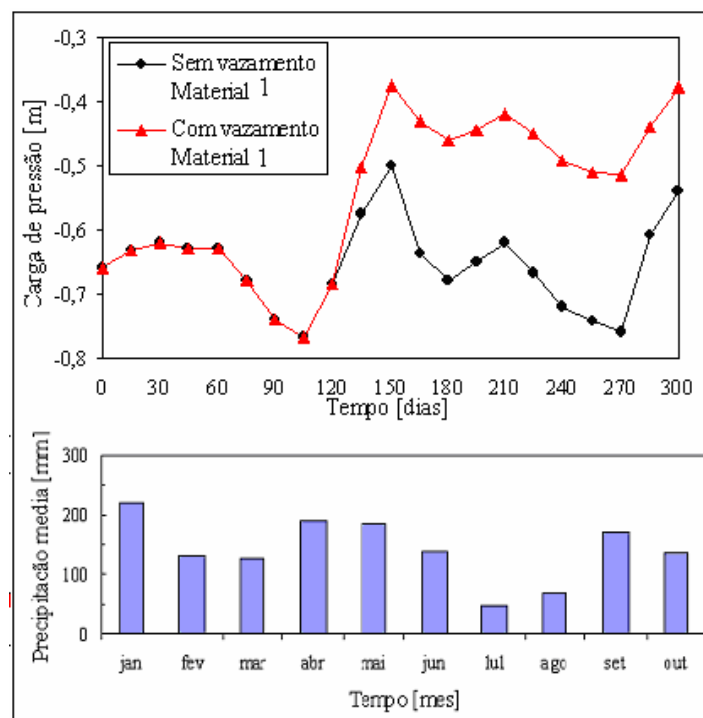


Figura 5.26 - Carga de pressão x tempo ponto no meio do material 2 e a variação da precipitação média do túnel Rebouças (2D).

Os resultados desta análise sugerem que a presença de vazamento na encosta incrementou o valor das poro-pressões positivas e as manteve assim durante o processo da simulação.

A análise tridimensional também foi feita seguindo as três etapas consideradas na simulação bidimensional.

Para isto, considerou-se uma largura no talude de 10m. A figura 5.27 mostra o comportamento tridimensional do talude na etapa 1.

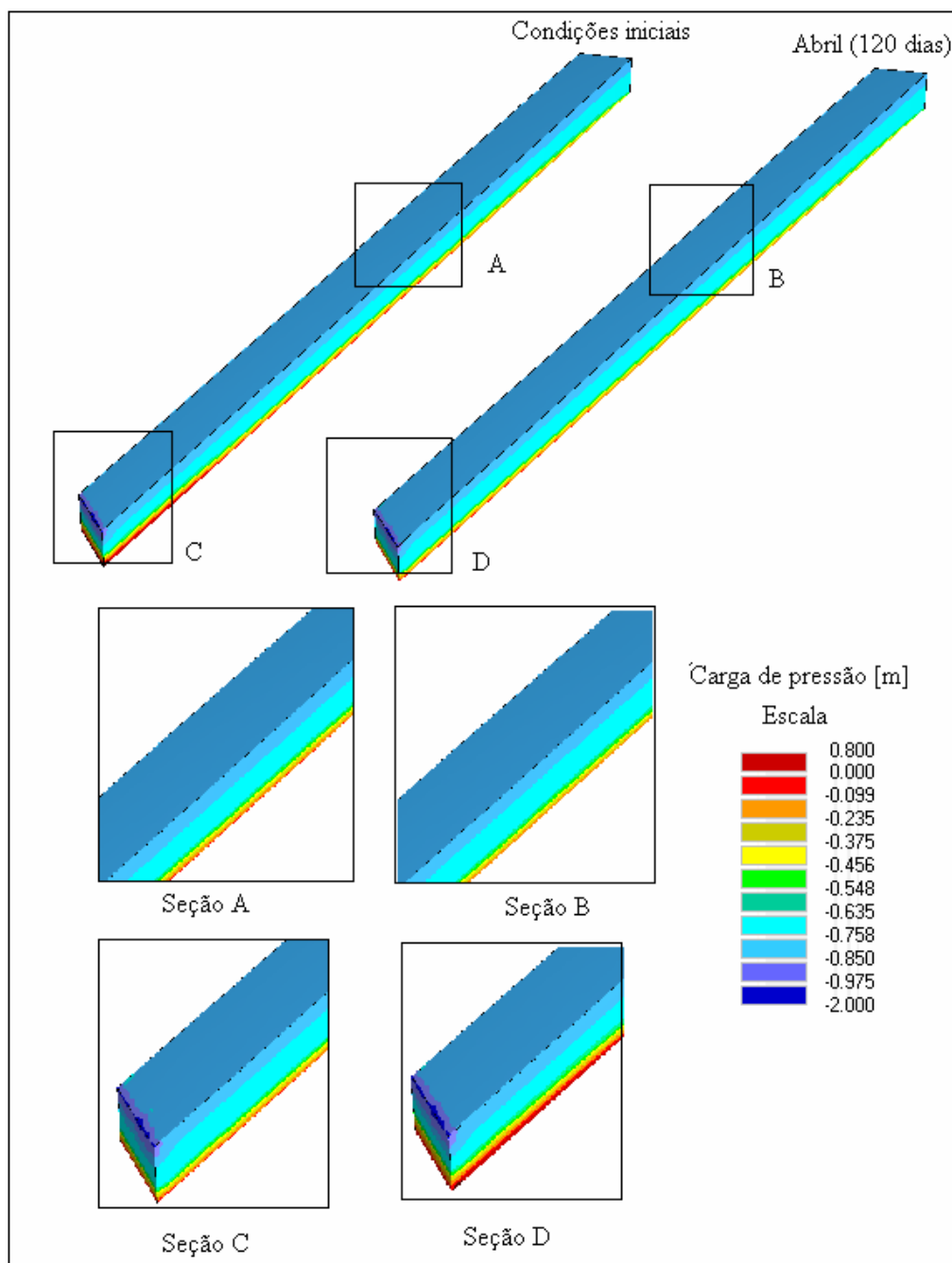


Figura 5.27 - Resultado da análise tridimensional da etapa 1 no túnel Rebouças.

Para a análise tridimensional as condições de contorno laterais foram consideradas como impermeáveis.

A figura 5.28 apresenta o resultado da análise tridimensional durante a etapa 2.

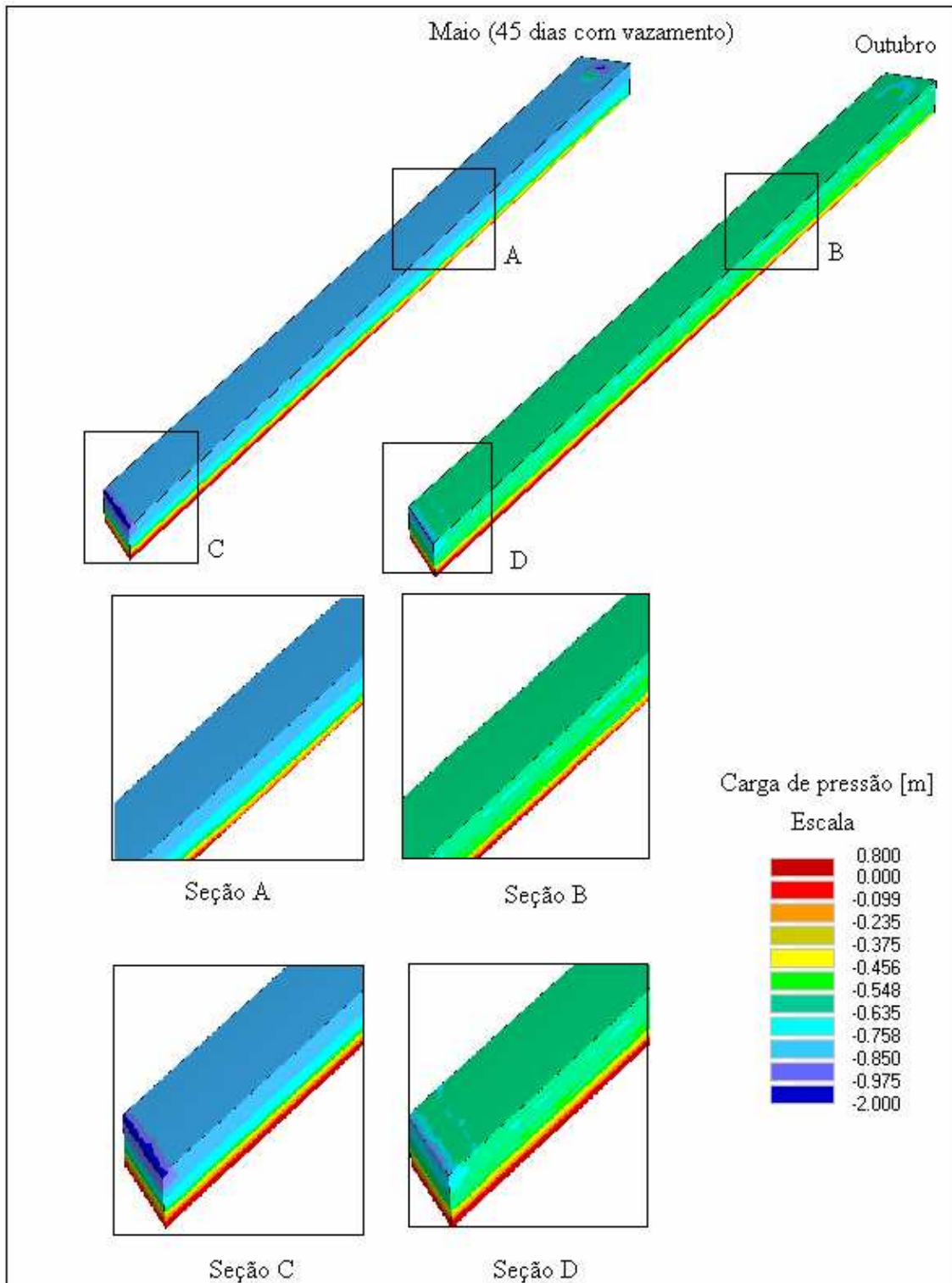


Figura 5.28 - Resultado da análise tridimensional da etapa 2 no túnel Rebouças.

A figura 5.29 mostra o resultado do análise tridimensional da etapa 3.

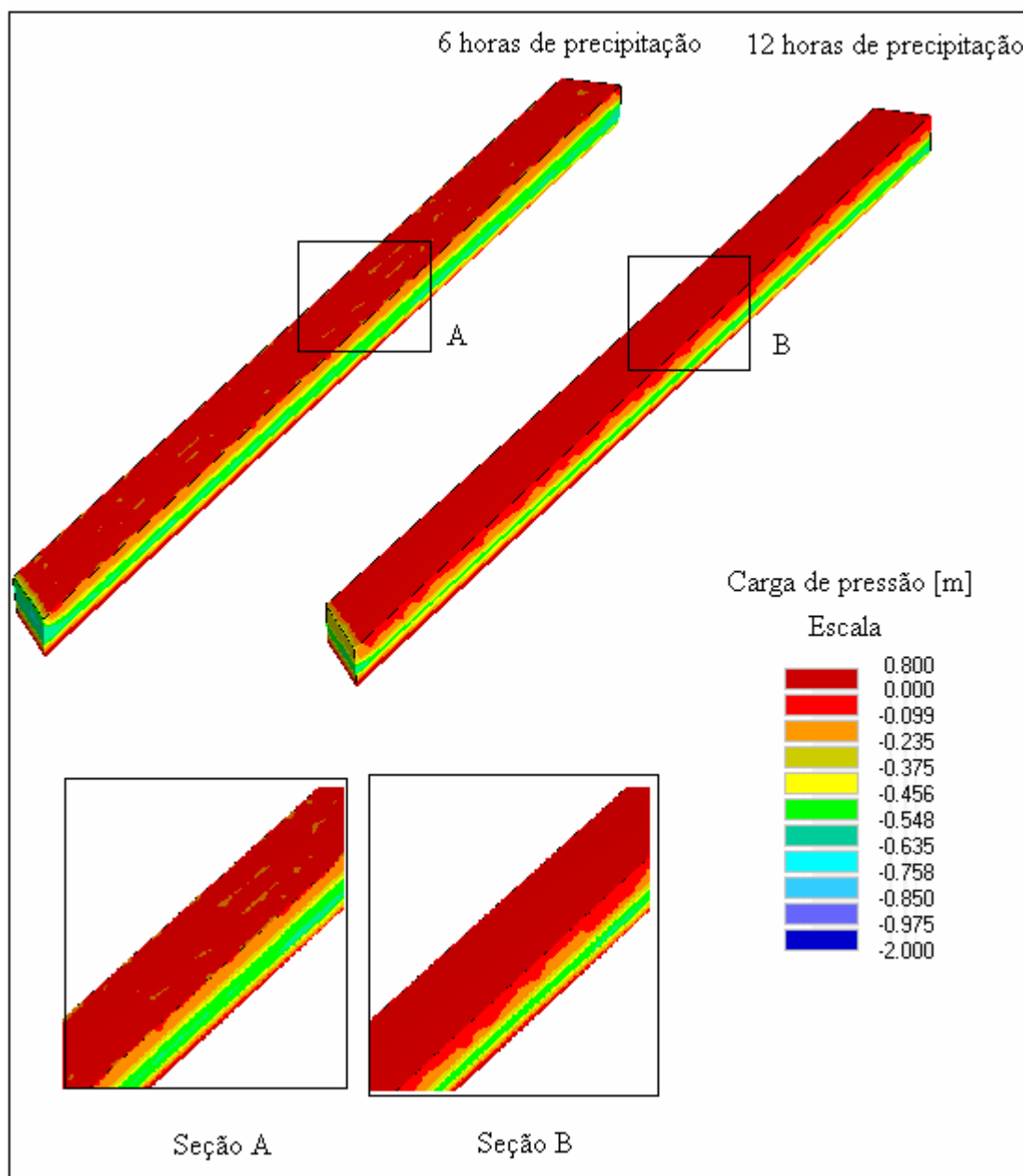


Figura 5.29 - Resultado da análise tridimensional da etapa 3 no túnel Rebouças.

Do mesmo modo que na análise bidimensional, observou-se que o umedecimento do solo do material 1 aconteceu rapidamente durante a precipitação de 200 mm/dia da etapa 3.

As figuras 5.30 e 5.31 apresentam a variação da carga de pressão no tempo, para a análise tridimensional. Estas variações são comparadas com valores de carga de pressão de uma simulação na qual não acontece vazamento. As observações são feitas para dois pontos na interface solo rocha, na base e no meio do talude.

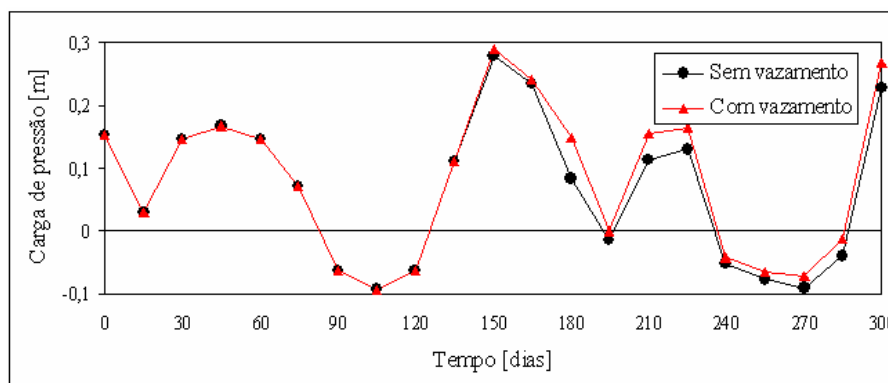


Figura 5.30 - Carga de pressão x tempo num ponto da base do talude para a simulação tridimensional no túnel Rebouças.

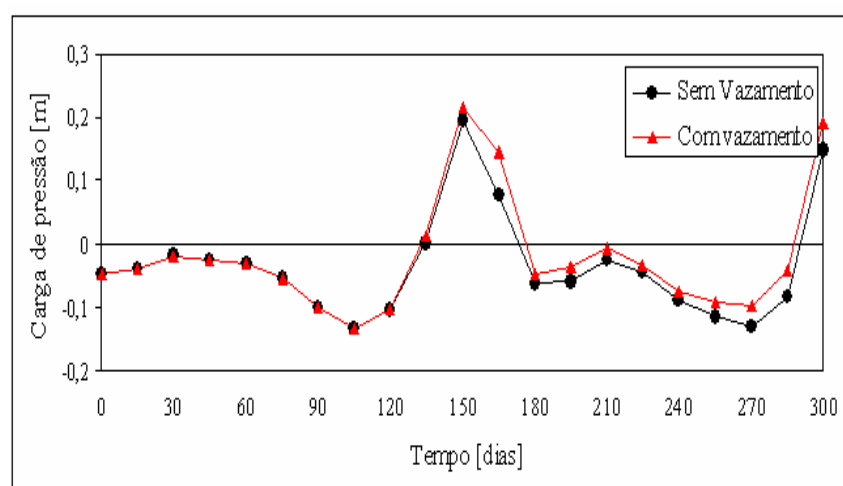


Figura 5.31 - Carga de pressão x tempo num ponto no meio do talude para a simulação tridimensional no túnel Rebouças.

Das figuras 5.30 e 5.31 observa-se que o valor das cargas de pressão quando se considera um sistema sem vazamento não varia de outro sistema quando se está considerando o vazamento. Este efeito pode ter ocorrido devido à geometria utilizada na simulação, sendo esta muito grande para o vazamento considerado, já que para esta análise se considerou uma largura do talude de 10m.

Também deve-se lembrar que a carga de pressão imposta para esta análise foi zero, sendo provável que ao incrementar a carga de pressão do vazamento o processo de umedecimento seja muito mais rápido e que as poropressões alcancem valores mais altos.