

4

Deslocamentos gerados pela escavação

4.1.

Introdução

Neste capítulo são analisados os campos de deslocamentos gerados no maciço rochoso devido à escavação da mineração Pampa de Pongo, Peru, que atualmente atinge profundidades superiores a 900m. As análises foram feitas com o método dos elementos finitos, em modelos do estado plano de deformação, empregando os softwares comerciais Plaxis 2D e Phase2, e do estado 3D, com o programa computacional Plaxis 3D. Os efeitos da consideração de fraturas foram estimados pela comparação dos campos de deslocamentos obtidos com as hipóteses de ausência e existência de falhas através do corpo de mineração. A dupla série de estudos 2D com os programas Plaxis 2D e Phase2, bastante utilizados mundialmente por engenheiros geotécnicos, deveu-se ao fato de que ambos empregam diferentes métodos para simulação de falhas no meio contínuo, o que, neste trabalho de pesquisa, justifica um estudo mais detalhado para verificação de possíveis discrepâncias entre os resultados computados.

4.2.

Seções analisadas e características dos taludes

Para a análise da estabilidade dos taludes da mineração foram selecionadas 4 seções através do corpo da mina, denominadas seções 1-1, 2-2, 3-3 e 4-4, conforme Figura 4.1, consideradas em princípio as mais críticas devido à existência de falhas mergulhando nos sentidos das faces dos taludes, onde as inclinações dos taludes são máximos.

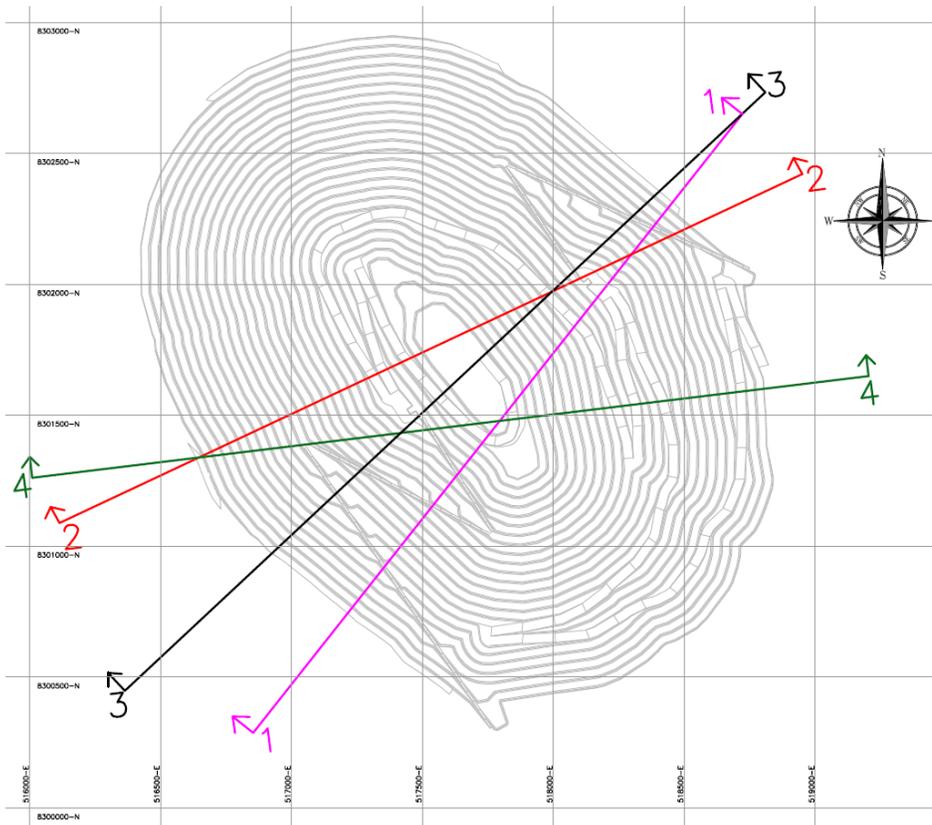


Figura 4.1 - Seções selecionadas para análise do comportamento de taludes na mineração Pampa de Pongo, Peru.

Os taludes são resultantes de um processo de escavação por fases ou etapas de mineração, por desmonte a fogo (explosão), criando bancadas com alturas entre 15 a 30m. Nas simulações numéricas foram consideradas 24 a 26 bancadas, cada uma com largura de 12m, inclinação de 75° e altura de 36m, totalizando profundidades de escavação entre 864 a 936m (Figura 4.2).

A Figura 4.3 e Figura 4.4 mostram, para a seção 1-1, as litologias e as falhas presentes na escavação.

4.3. Modelagem 2D

4.3.1. Geometria da malha e condições de contorno

Na modelagem 2D pelo método dos elementos finitos considerou-se a representação do problema na condição do estado plano de deformação. As dimensões da malha seguiram as recomendações de Sjöberg (1999), com

dimensão vertical entre 2 a 3 vezes a profundidade da escavação H (adotou-se 2,5 vezes a altura) e dimensão horizontal entre 3 a 4 vezes a máxima largura da escavação L (adotou-se 3 vezes a máxima largura). As condições de contorno para a base da malha foram estabelecidas em termos de deslocamentos horizontal e vertical nulos e para os nós dos contornos laterais foram prescritos deslocamentos horizontais iguais a zero (Figura 4.5).

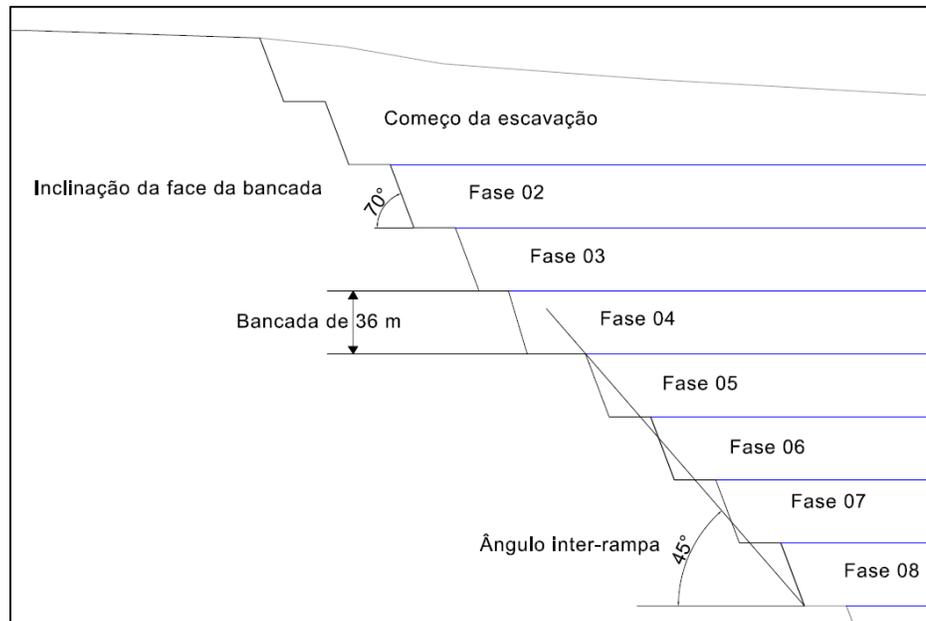


Figura 4.2 - Detalhes geométricos do avanço das fases de escavação.

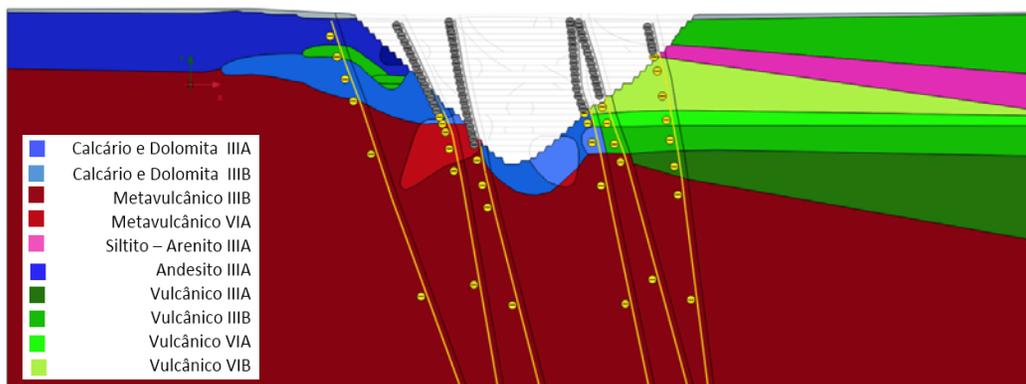


Figura 4.3 - Seção analisada 1-1 (Plaxis 2D) na última fase de escavação.

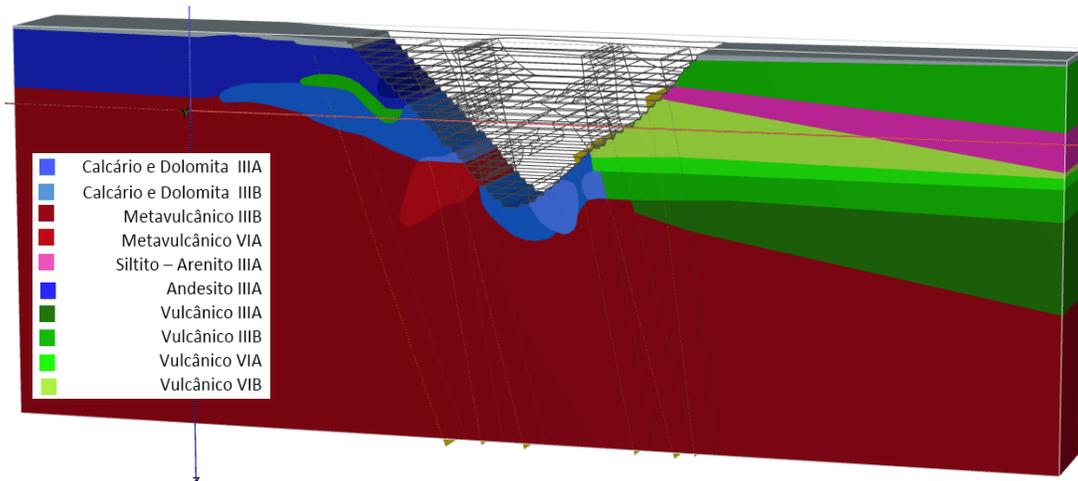


Figura 4.4 - Seção analisada 1-1 (Plaxis 3D) na última fase de escavação.

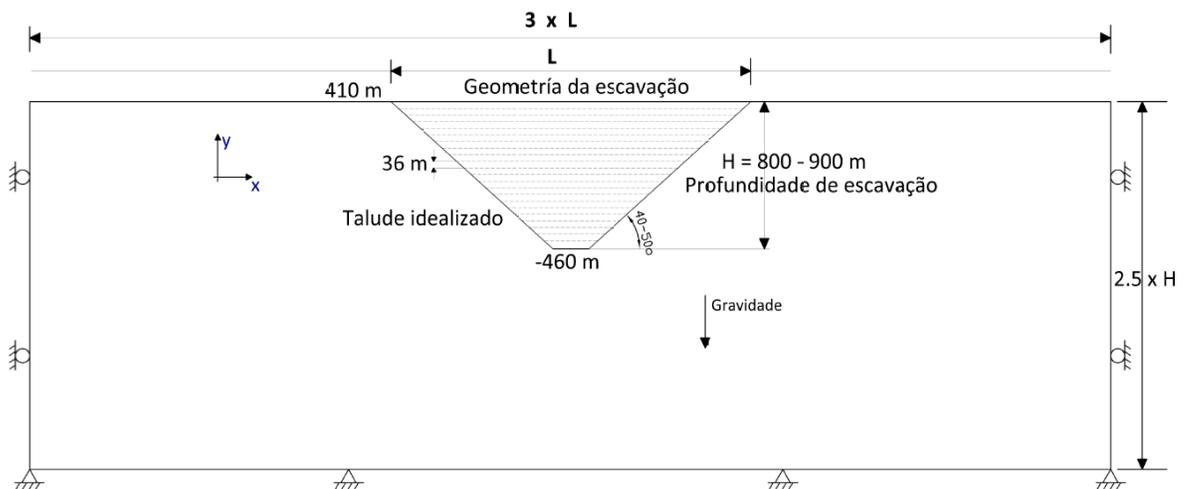


Figura 4.5 - Geometria da malha 2D de elementos finitos.

As análises numéricas foram executadas com elementos finitos triangulares quadráticos (6 nós) utilizando os programas comerciais Plaxis 2D (Plaxis, 2015a) e Phase2 (Rocsience, 2015c). A quantidade total de elementos para cada seção investigada está listada na Tabela 4.1 para as situações de taludes com e sem descontinuidades. O número total de elementos no programa Phase2 é superior porque, não se tendo controle da geração automática de malha por ambos os programas, optou-se por manter aproximadamente o mesmo número de elementos nas zonas de maior interesse, próximas à escavação e a falhas geológicas. Para fins de comparação de resultados, utilizou-se também o programa Plaxis 3D, para simulações tridimensionais do problema empregando elementos finitos tetraédricos quadráticos de 10 nós.

Tabela 4.1 - Quantidade de elementos que foram empregados neste análise.

Secção	Sem descontinuidades			Com descontinuidades		
	Phase2	Plaxis 2D	Plaxis 3D	Phase2	Plaxis 2D	Plaxis 3D
1 - 1	8363	7698	78377	15927	14571	218448
2 - 2	7695	6242	53963	10794	9215	219529
3 - 3	4817	3446	45484	18941	14297	256549
4 - 4	7200	6966	70439	15381	12193	344797

Lembra-se novamente que o programa computacional Phase2 incorpora elementos de junta para representação de descontinuidades abertas ou fechadas, lhes atribuindo diretamente propriedades de rigidez e de resistência ao cisalhamento (Tabelas 3.7 e 3.8) enquanto que o programa Plaxis 2D possui elementos de interface cujas propriedades são introduzidas de forma indireta, em função das características dos elementos finitos adjacentes, como discutido anteriormente no capítulo 3.

4.3.2. Distribuição de campos de tensões

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam exemplos das distribuições de campos de tensões efetivas σ_{xx} na fase inicial e na fase final de escavação, mostrando a mudança das tensões com o avanço da escavação; a situação do maciço rochoso é sem a presença de descontinuidades.

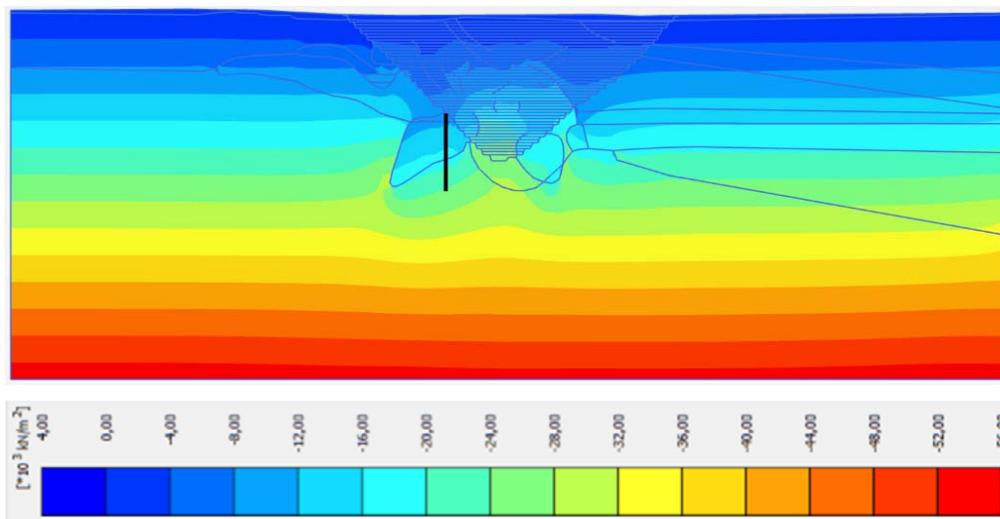


Figura 4.6 – Tensões efetivas σ_{xx} na seção 1-1, na etapa inicial sem escavação, sem presença de descontinuidades.

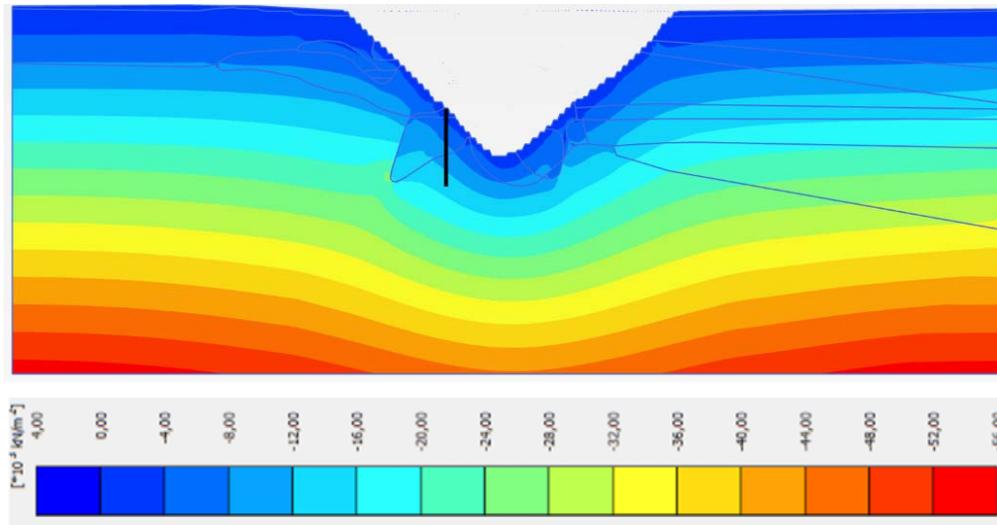


Figura 4.7 – Tensões efetivas σ_{xx} na seção 1-1, fase final de escavação, sem presença de descontinuidades.

4.3.3. Distribuição de campos de deslocamentos

As Figuras 4.8 a 4.11 apresentam exemplos das distribuições de campos de deslocamentos após várias etapas de escavação, considerando as situações do maciço rochoso com e sem a presença de descontinuidades. Agrega-se aos resultados destas figuras, para efeitos comparativos, os campos de deslocamentos obtidos com uma simulação tridimensional do problema.

Este tipo de figuras, ainda que ilustrem a forma geral dos campos de deslocamentos e a influência das falhas em suas respectivas distribuições, não são muito convenientes sob ponto de vista quantitativo de engenharia pois não permitem uma comparação detalhada dos valores, o que será feito na próxima seção, com a análise da variação dos deslocamentos ao longo de alguns perfis selecionados do maciço.

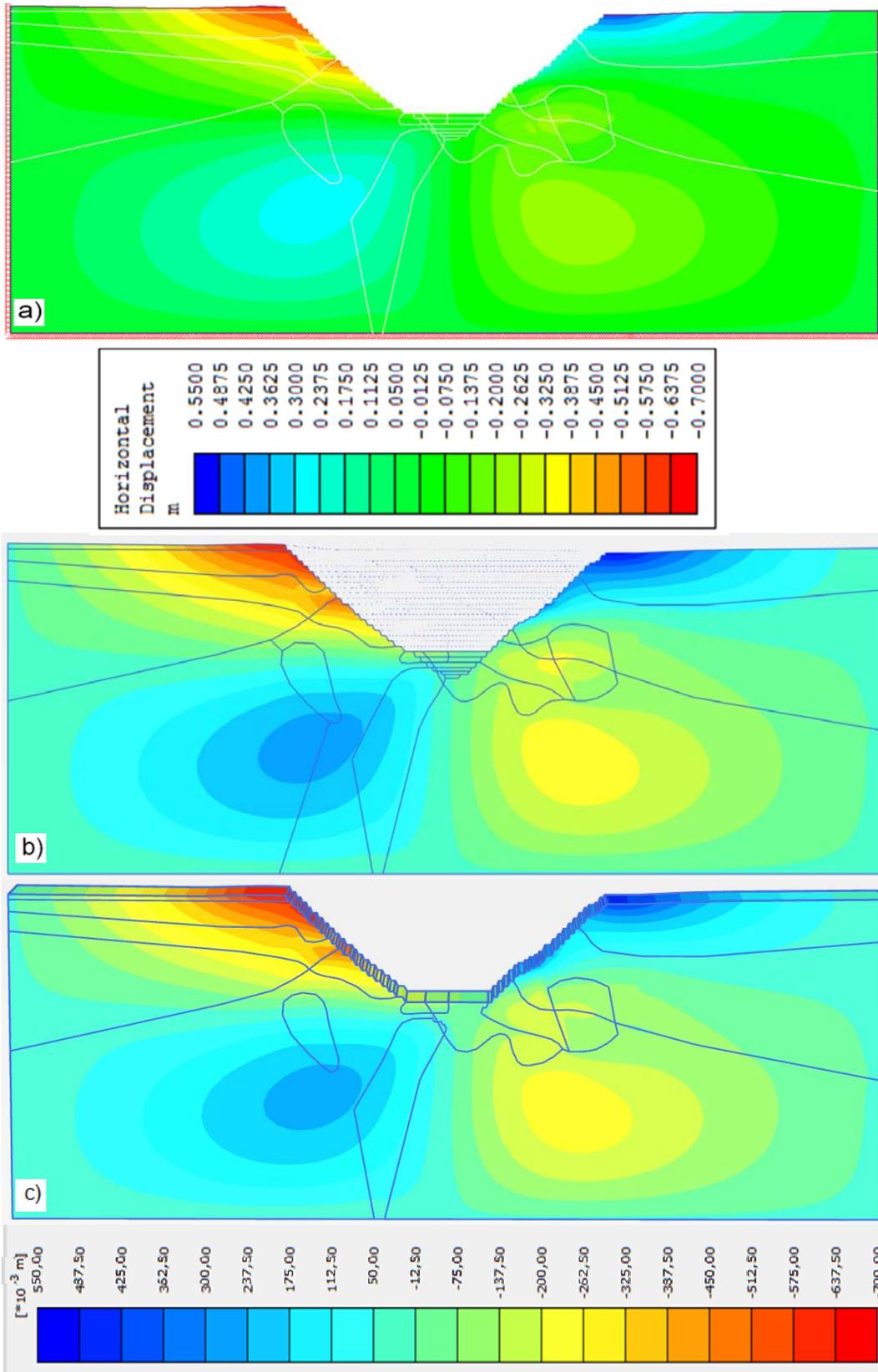


Figura 4.8 - Deslocamentos horizontais na seção 4-4, etapa de escavação 20, sem presença de descontinuidades.

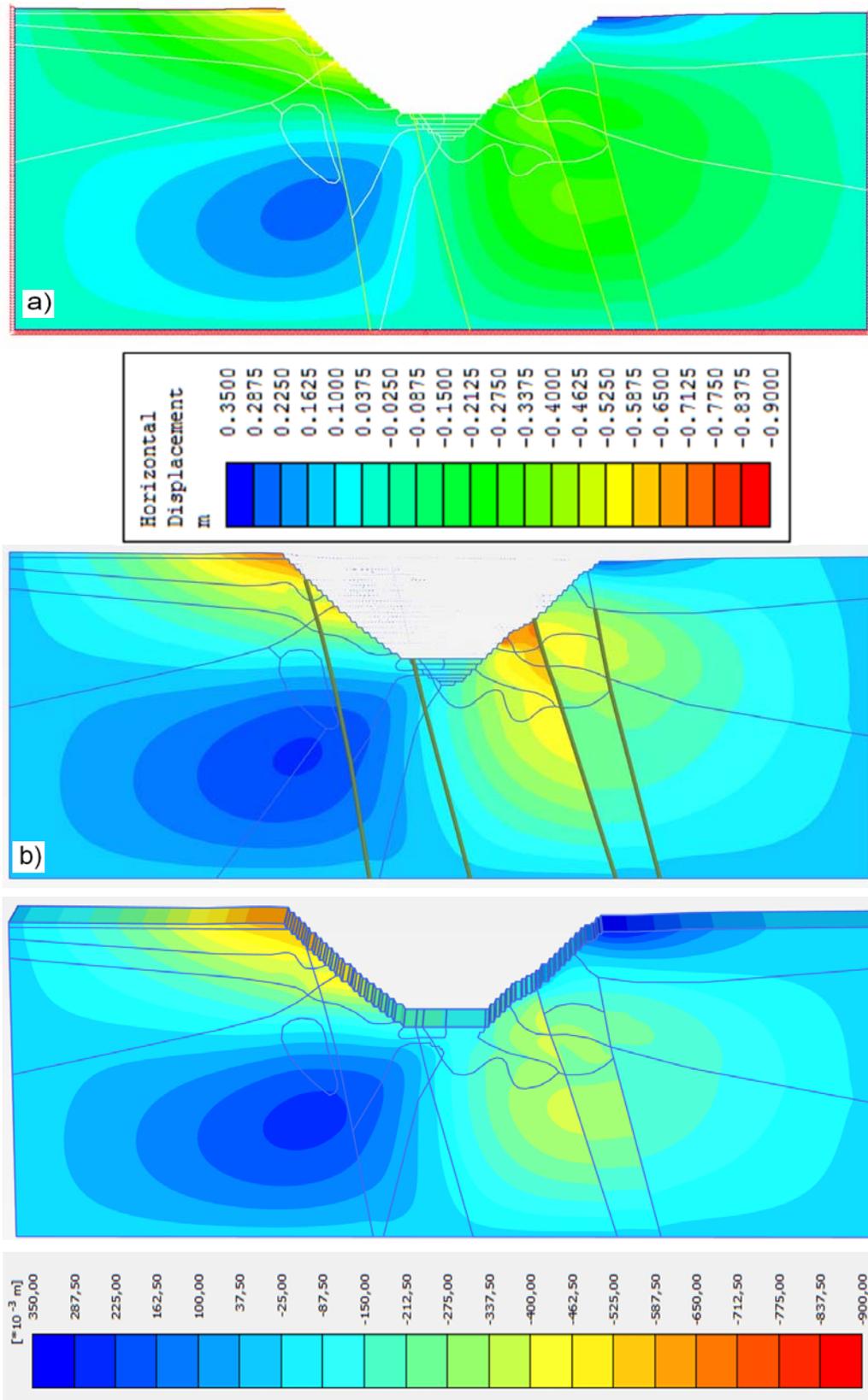


Figura 4.9 - Deslocamentos horizontais na seção 4-4, etapa de escavação 20, considerando a presença de descontinuidades a) Phase2, b) Plaxis 2D, c) Plaxis 3D.

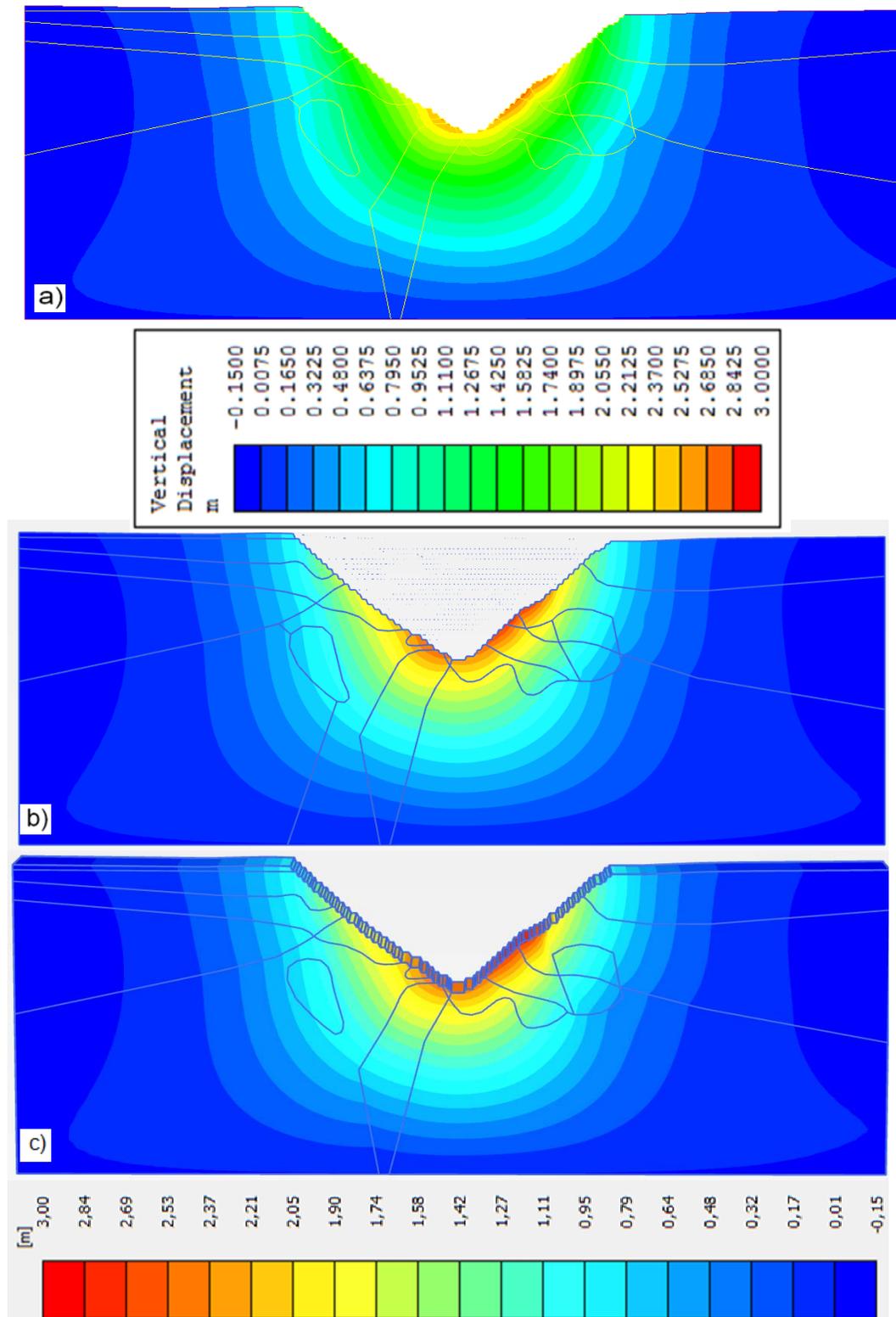


Figura 4.10 – Deslocamentos verticais na seção 4-4, etapa de escavação 26, sem a presença de descontinuidades a) Phase2, b) Plaxis 2D, c) Plaxis 3D.

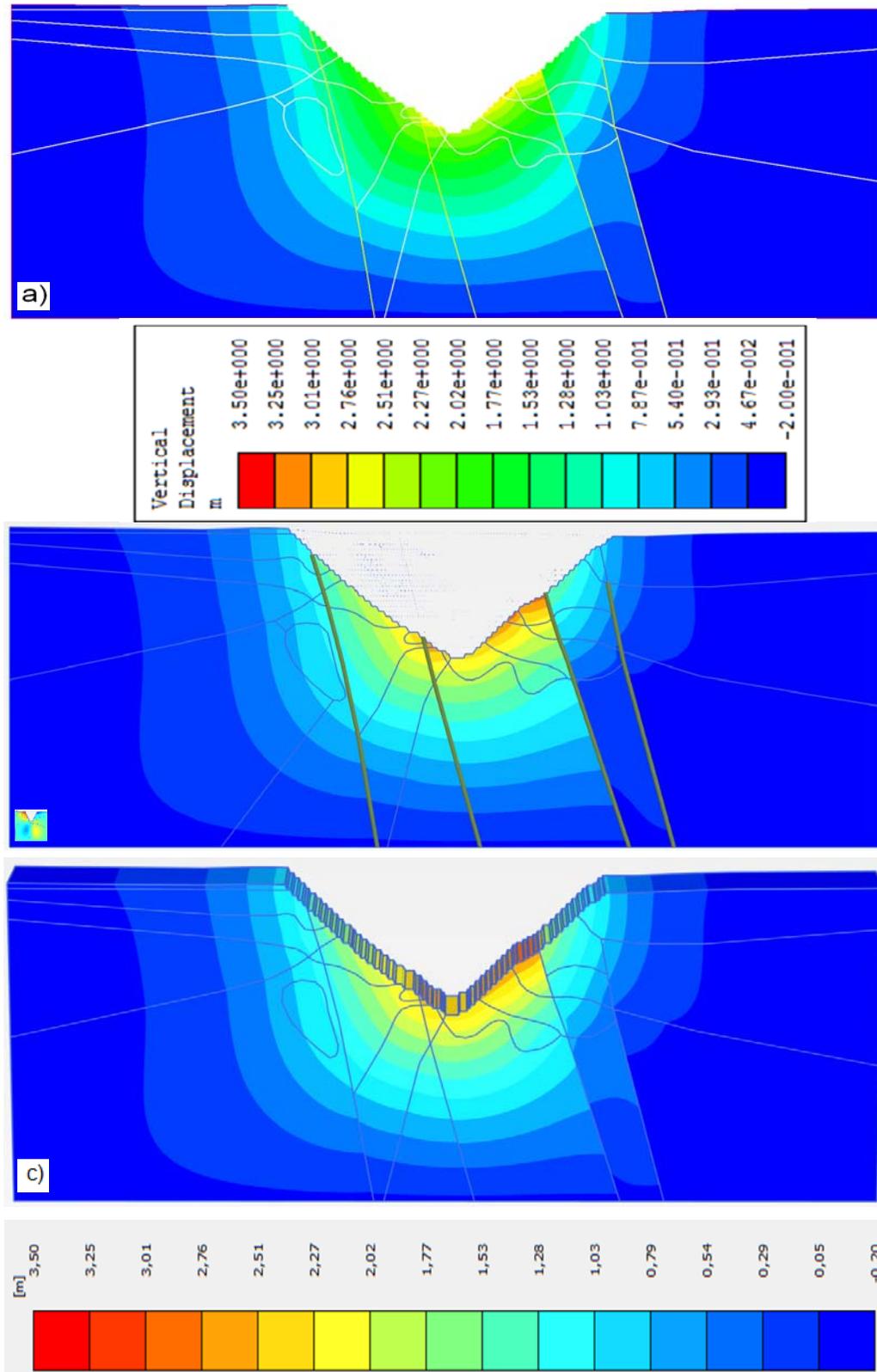


Figura 4.11 - Deslocamentos verticais na seção 4-4, etapa de escavação 26, considerando a presença de descontinuidades a) Phase2, b) Plaxis 2D, c) Plaxis 3D.

4.3.4. Distribuição de perfis de deslocamentos

Para análise da distribuição dos deslocamentos durante a escavação, alguns perfis das seções transversais analisadas são selecionados, conforme mostrado nas Figuras 4.13 a 4.16, e se referem às últimas etapas de escavação quando os deslocamentos foram mais significativos devido ao alívio de tensões no maciço rochoso.

As Figuras 4.19 e 4.21 mostram a distribuição dos deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 (Figuras 4.14), computados nas etapas de escavação 20 (720m de profundidade) e 24 (864m de profundidade), respectivamente. Nota-se que enquanto os valores dos deslocamentos verticais determinados pelos programas Plaxis 2D e Phase2 apresentam boa concordância entre si, o mesmo não pode se afirmar em relação aos deslocamentos horizontais, tanto na condição de ausência de descontinuidades (resultado inesperado) quanto na condição de existência de descontinuidades (resultado não totalmente surpreendente visto que os programas adotam técnicas diferentes para simulação de falhas). Na hipótese de existência de descontinuidades os perfis apresentam uma tendência de redução dos deslocamentos horizontais, porém com valores máximos ocorrendo na profundidade entre 200 a 300m. Valores negativos de deslocamento horizontal significam ocorrência contrária ao semi-eixo global positivo x marcado na Figura 4.5.

Quanto à comparação inesperada entre os resultados obtidos nas simulações do maciço rochoso com a ausência de descontinuidades, uma possível explicação se deve a diferenças entre os refinamentos das malhas ao longo do perfil a-a da seção 1-1, conforme mostra a Figura 4.12. Outra possível fonte das diferenças é o processo de interpolação de deslocamentos ao longo dos perfis, com maior número de pontos com deslocamentos calculados no programa Phase2 do que no programa Plaxis 2D.

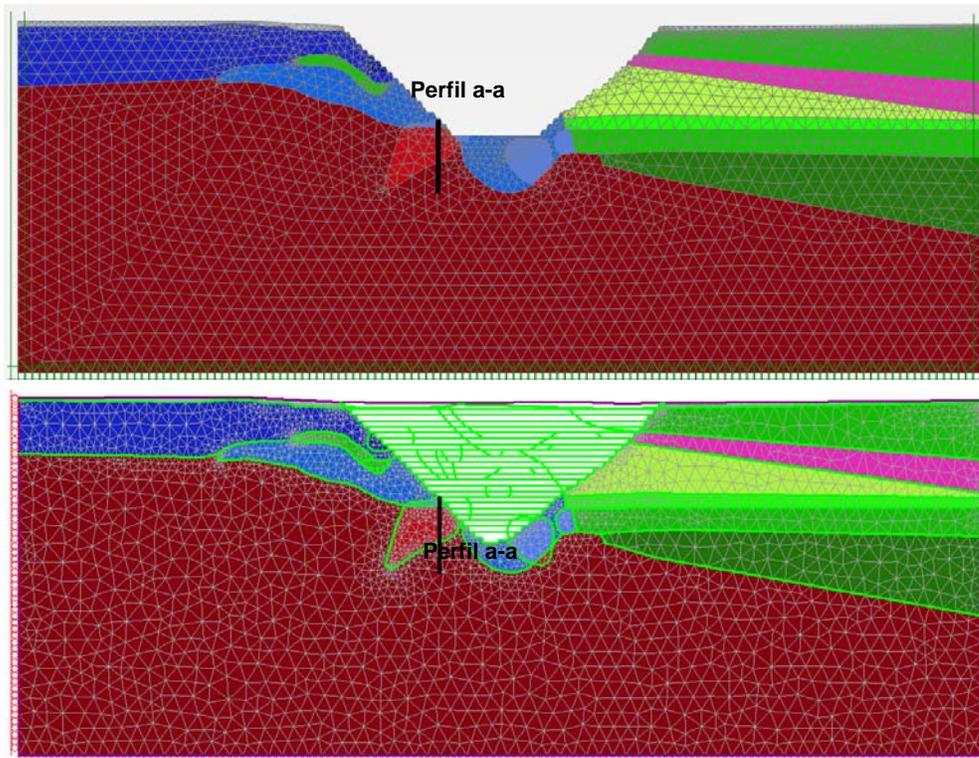


Figura 4.12 – Malha de elementos finitos elementos finitos seção 1-1. a) Plaxis 2D b) Phase2.

As Figuras 4.19 a 4.21 mostram as distribuições dos deslocamentos ao longo dos perfis b-b e c-c (Figura 4.14) de onde pode se constatar que os valores correspondentes aos deslocamentos horizontais e verticais, na situação de ausência de descontinuidades, são praticamente os mesmos avaliados pelos programas computacionais Plaxis2D e Phase2. Na hipótese de existência de falhas no maciço rochoso, os deslocamentos verticais continuam a exibir resultados semelhantes porém, e novamente, há diferenças em relação à distribuição dos deslocamentos horizontais. A tendência destes resultados é similar, com redução dos valores em relação ao caso de ausência de descontinuidades, principalmente nos pontos situados a menores profundidades.

Os valores computados com o programa Phase2 nestes perfis apresentam-se maiores do que aqueles determinados com o programa Plaxis 2D.

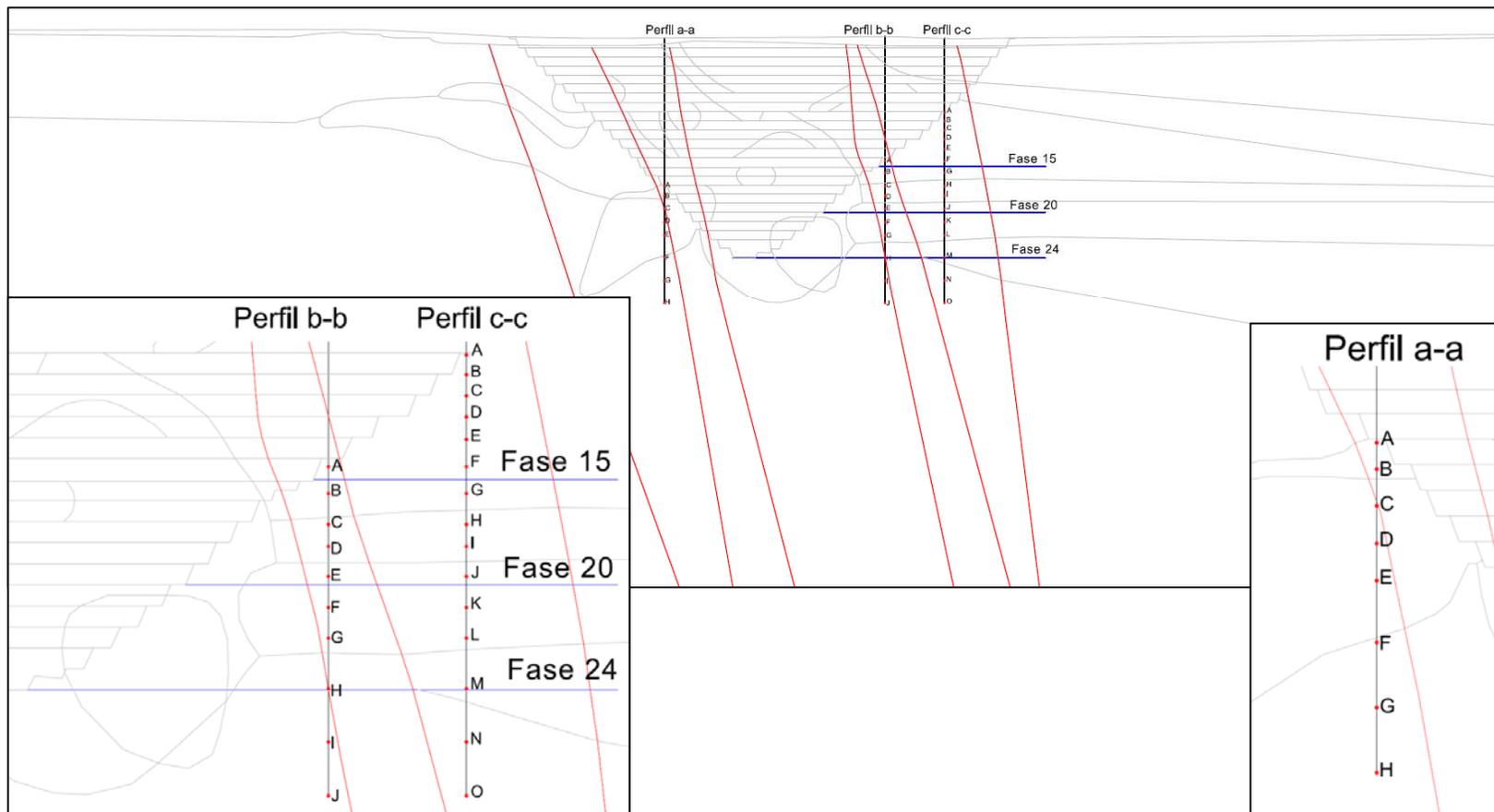


Figura 4.13 - Perfis a-a, b-b e c-c na seção transversal 1-1.

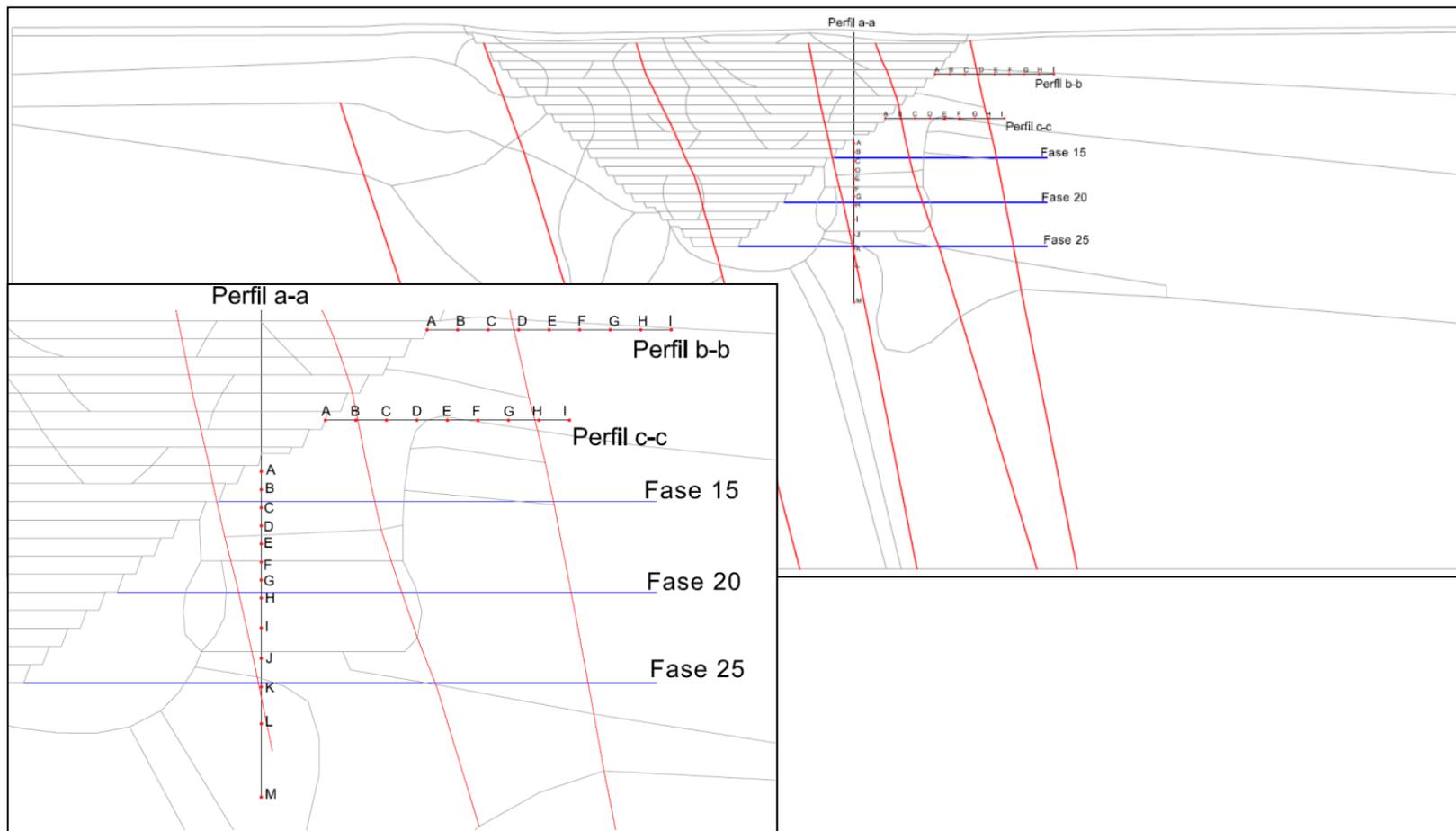


Figura 4.14 - Perfis a-a, b-b e c-c na seção transversal 2-2.

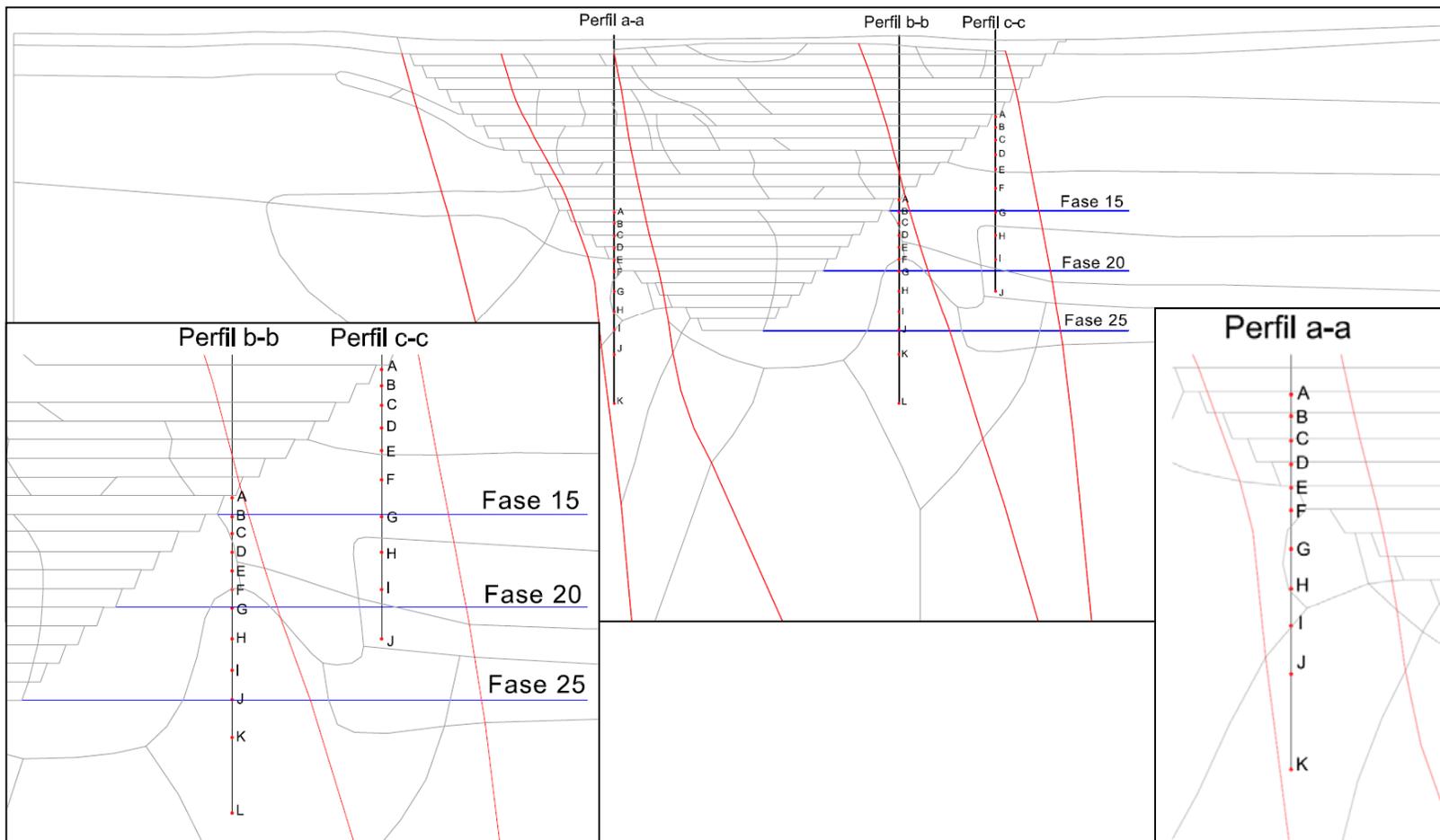


Figura 4.15 - Perfis a-a, b-b e c-c na seção transversal 3-3.

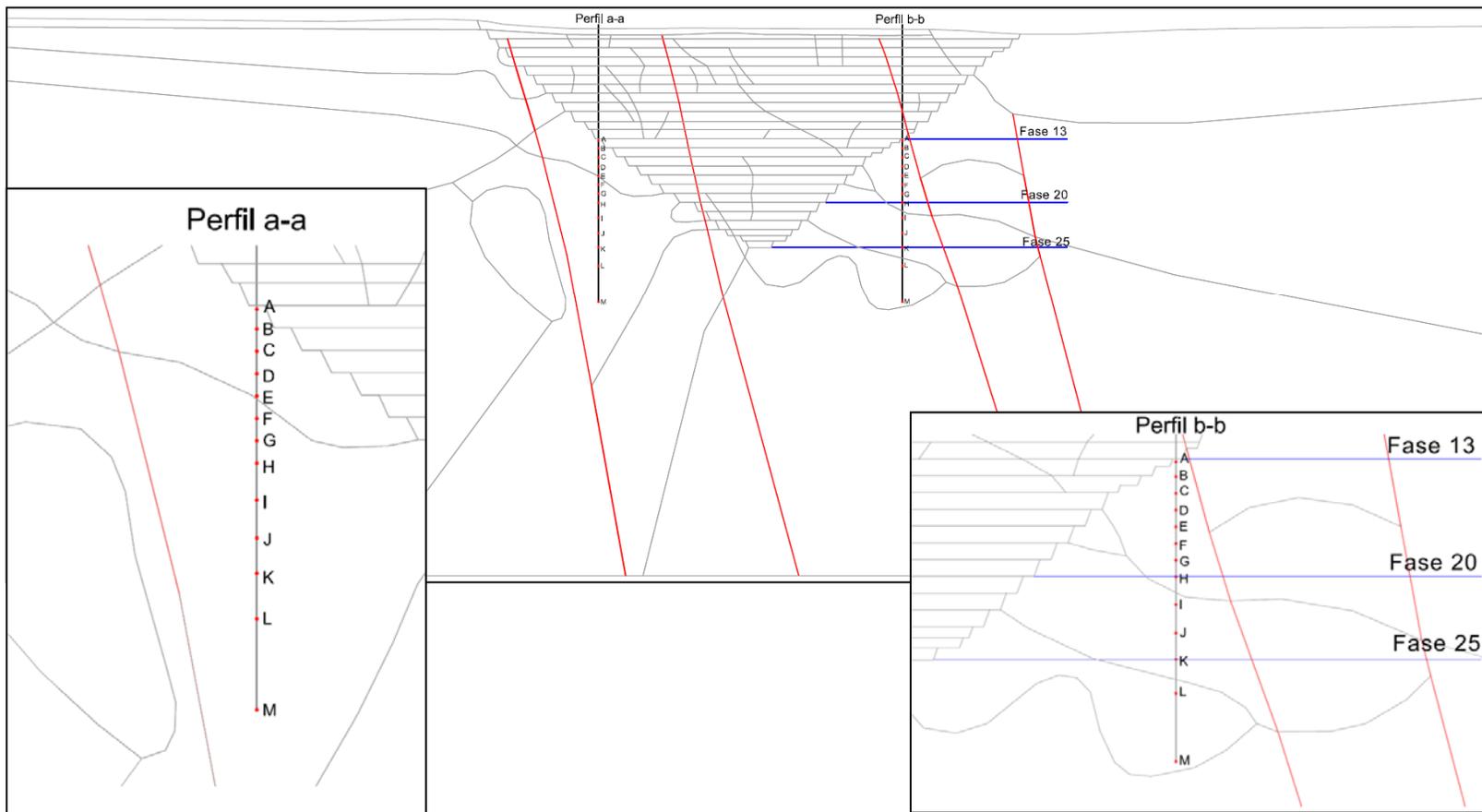


Figura 4.16 - Perfis a-a e b-b na seção transversal 4-4.

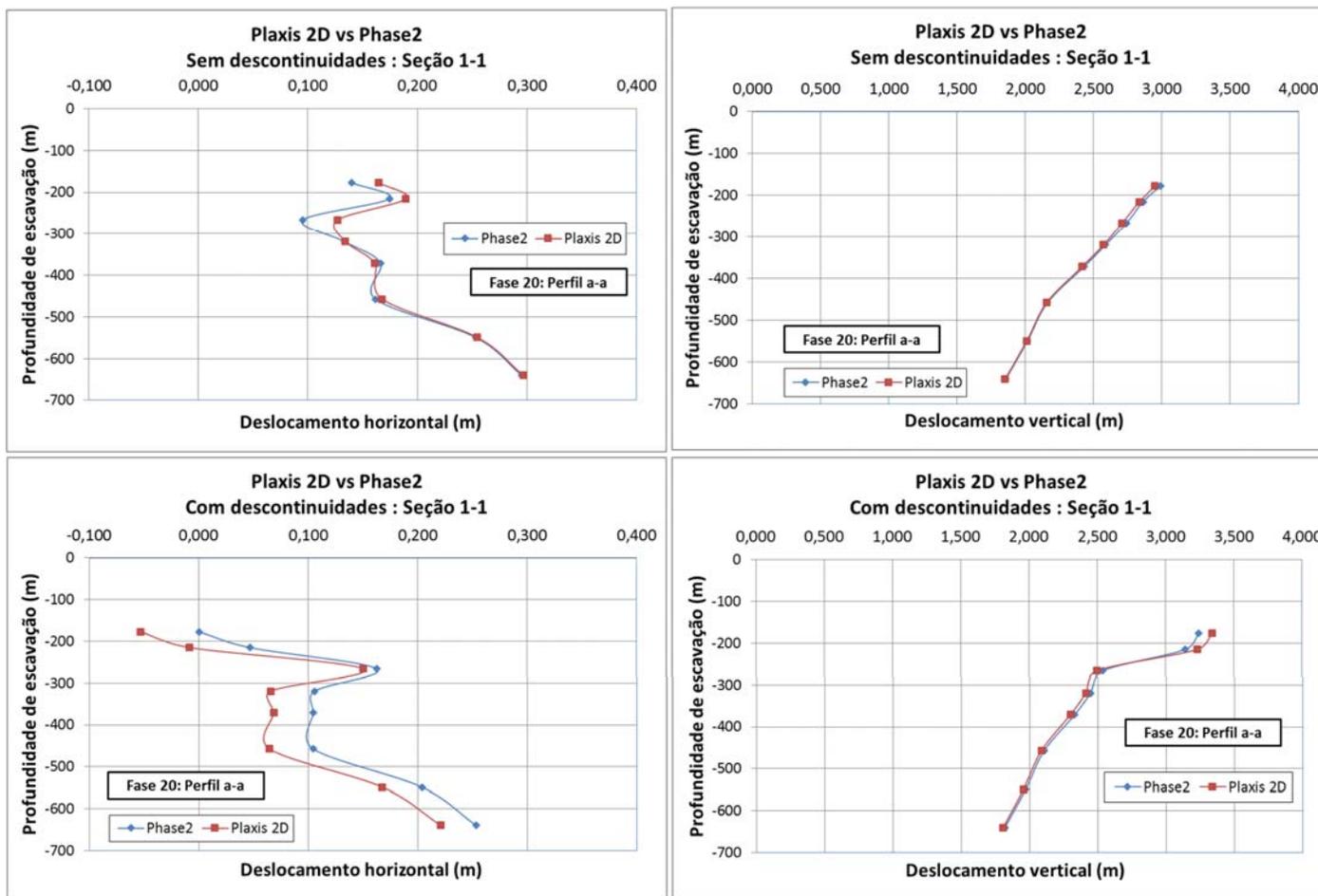


Figura 4.17 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 20.

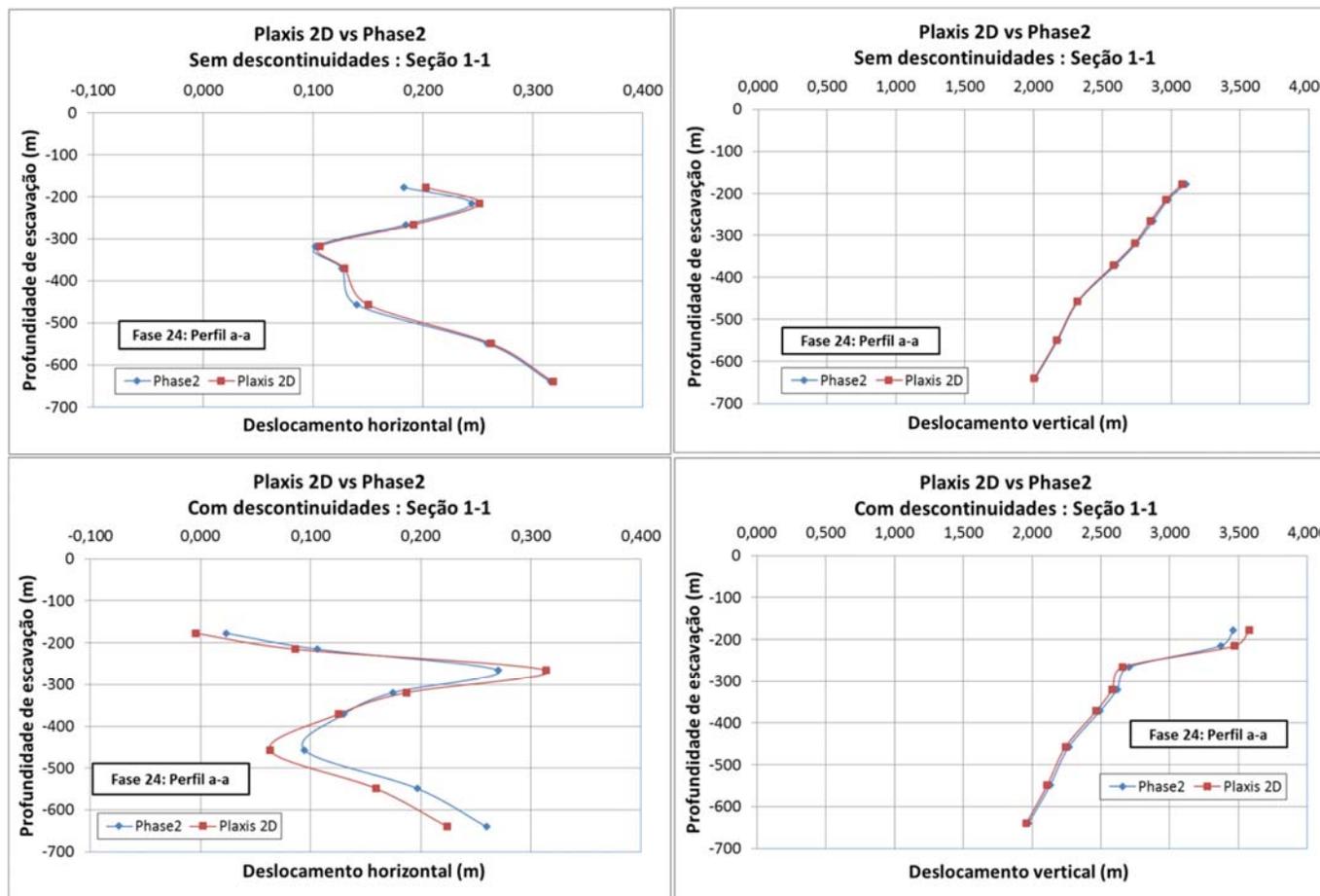


Figura 4.18 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 24.

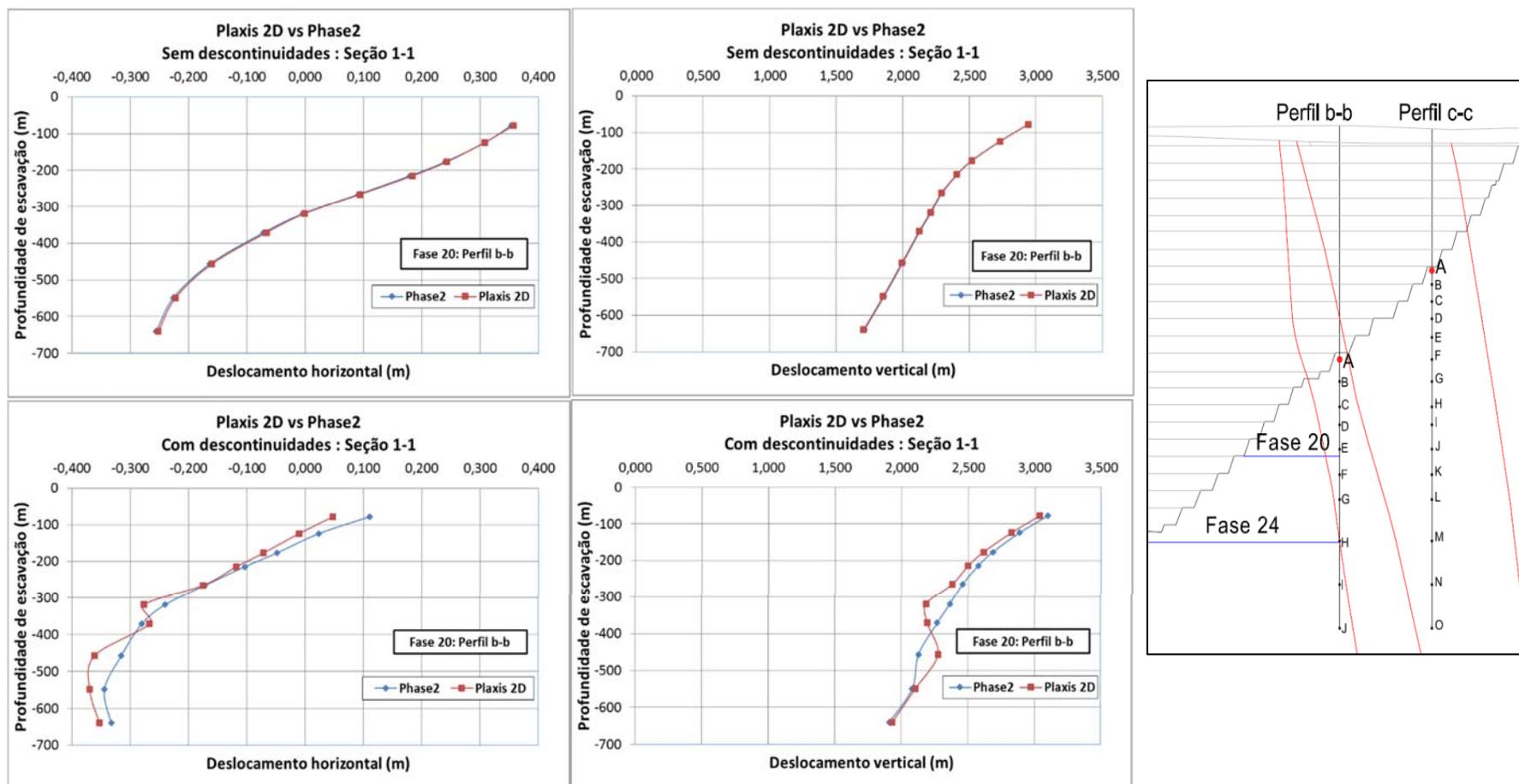


Figura 4.19 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil b-b da seção 1-1 na fase 20.

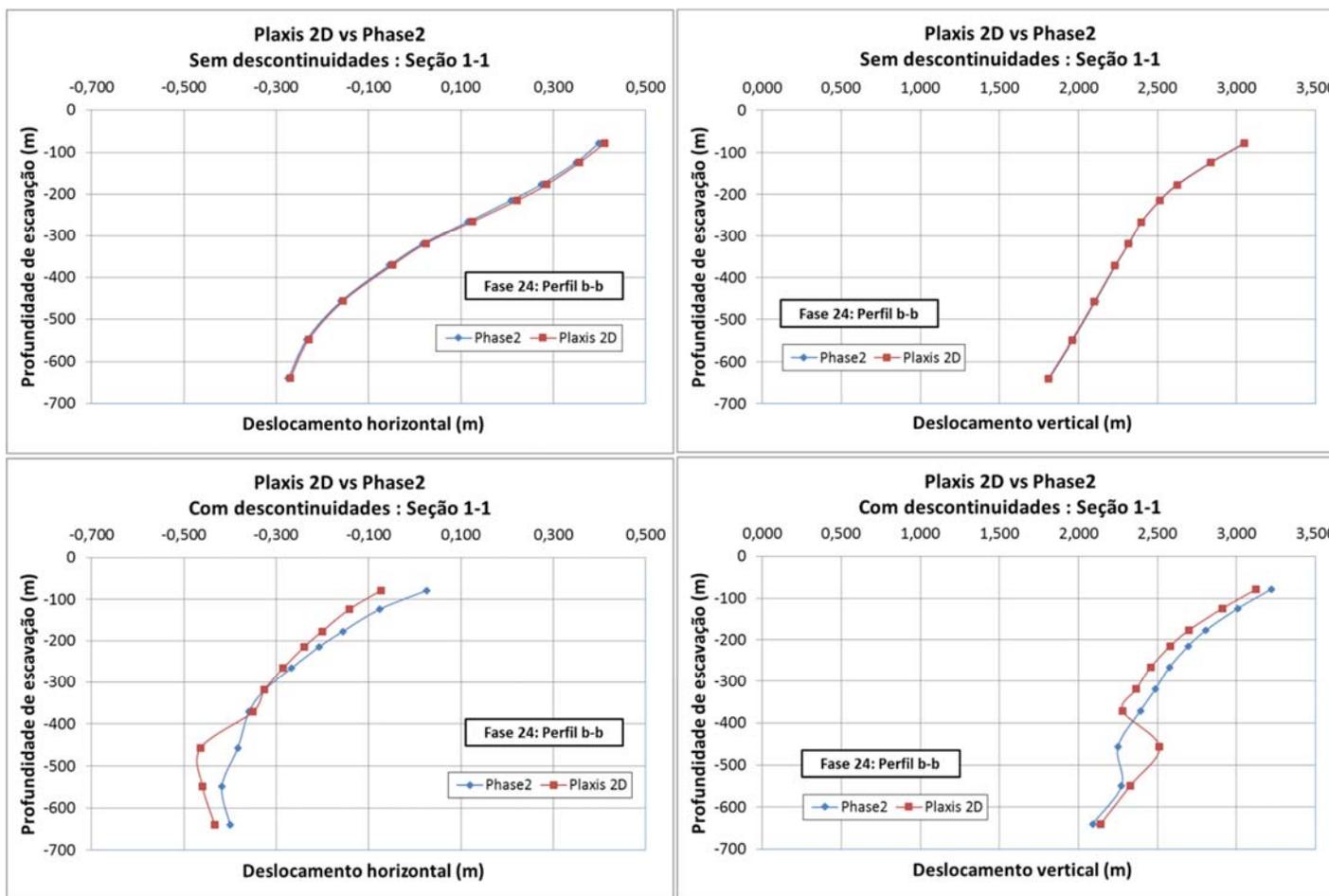


Figura 4.20 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil b-b da seção 1-1 na fase 24.

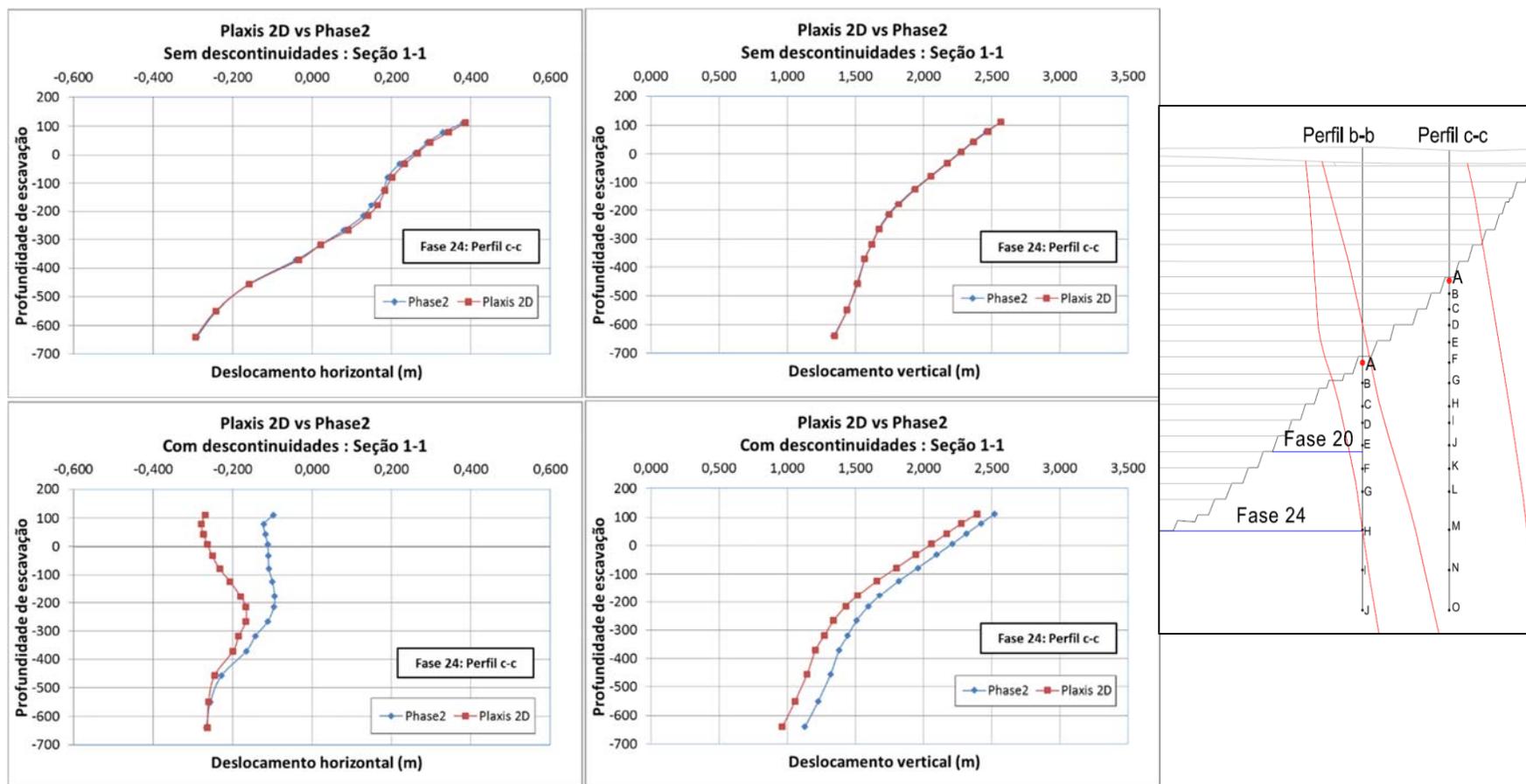


Figura 4.21 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil c-c da seção 1-1 na fase 24.

Resultados semelhantes para perfis nas seções 2-2, 3-3 e 4-4 são apresentados nas Figuras 4.22 a 4.30. De maneira geral os seguintes comentários podem ser feitos em relação a estas distribuições:

- a) Os perfis de deslocamentos verticais são os mesmos quando computados por ambos os programas e também não apresentam diferenças significativas de valores nas condições de ausência ou existência de descontinuidades;
- b) Em alguns perfis de deslocamentos horizontais na condição de ausência de falhas (Figuras 4.26, 4.29, 4.30) observou-se ligeiras diferenças nos valores dos deslocamentos horizontais determinados com os programas Phase2 e Plaxis 2D, o que pode, em princípio, ser atribuído às diferentes densidades de discretização das respectivas malhas ao longo destes perfis.
- c) Na condição de existência de falhas, as maiores diferenças observadas entre os valores de deslocamentos horizontais computados, além daquelas relacionadas com a discretização das malhas (lembra-se que os elementos são de mesmo tipo, triangulares quadráticos de 6 nós), podem ser atribuídas aos diferentes métodos para simulação de falhas em ambos os programas: prescrevendo diretamente as propriedades de rigidez e resistência ao cisalhamento nos elementos de junta do programa Phase2 e indiretamente no programa Plaxis 2D, em função das propriedades dos elementos adjacentes e de uma espessura virtual que controla a rigidez elástica dos elementos de interface.
- d) Como pode ser observado das figuras, os deslocamentos horizontais resultaram geralmente maiores, na condição de existência de falhas, quando determinados com o software Plaxis 2D.

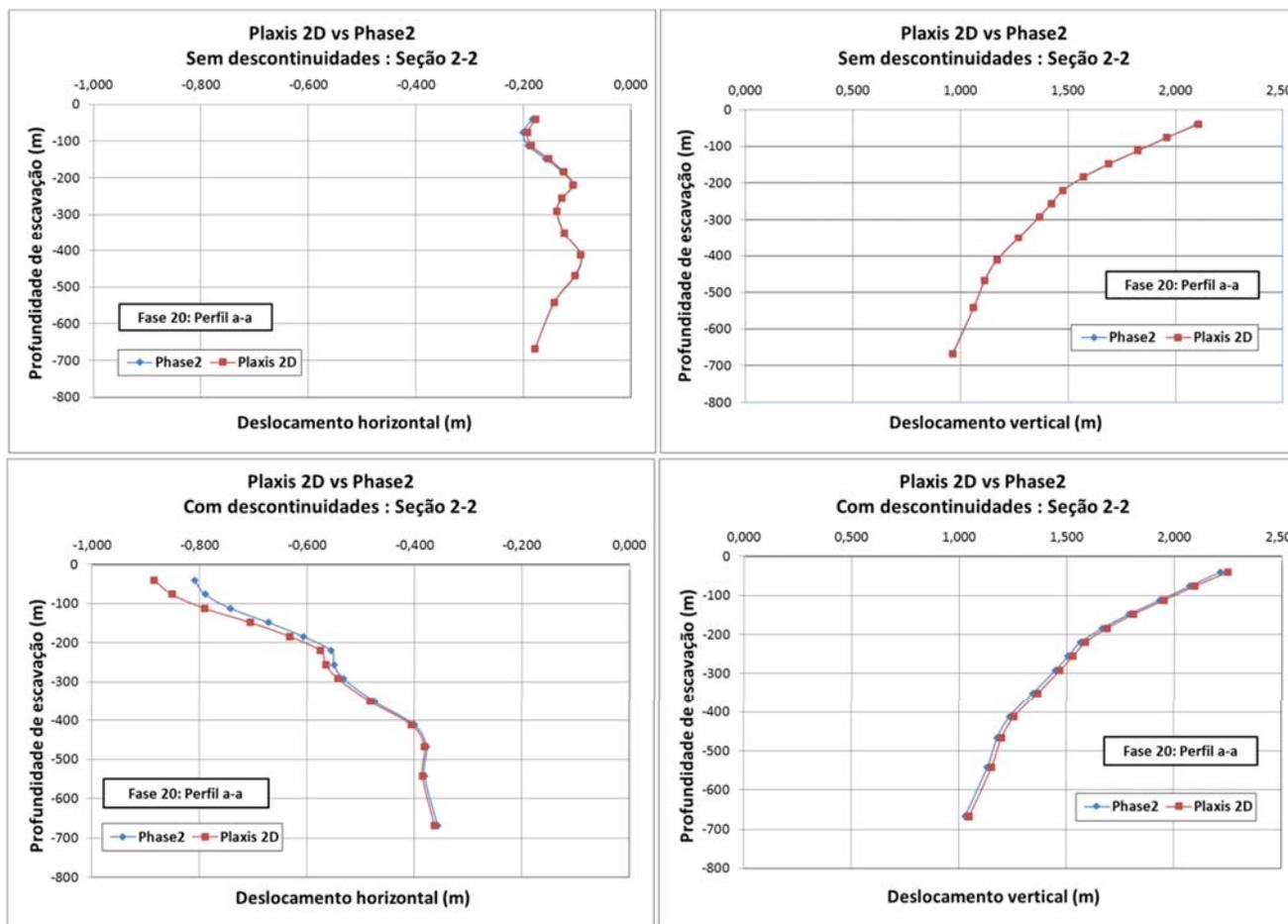


Figura 4.22 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2: na fase 20.

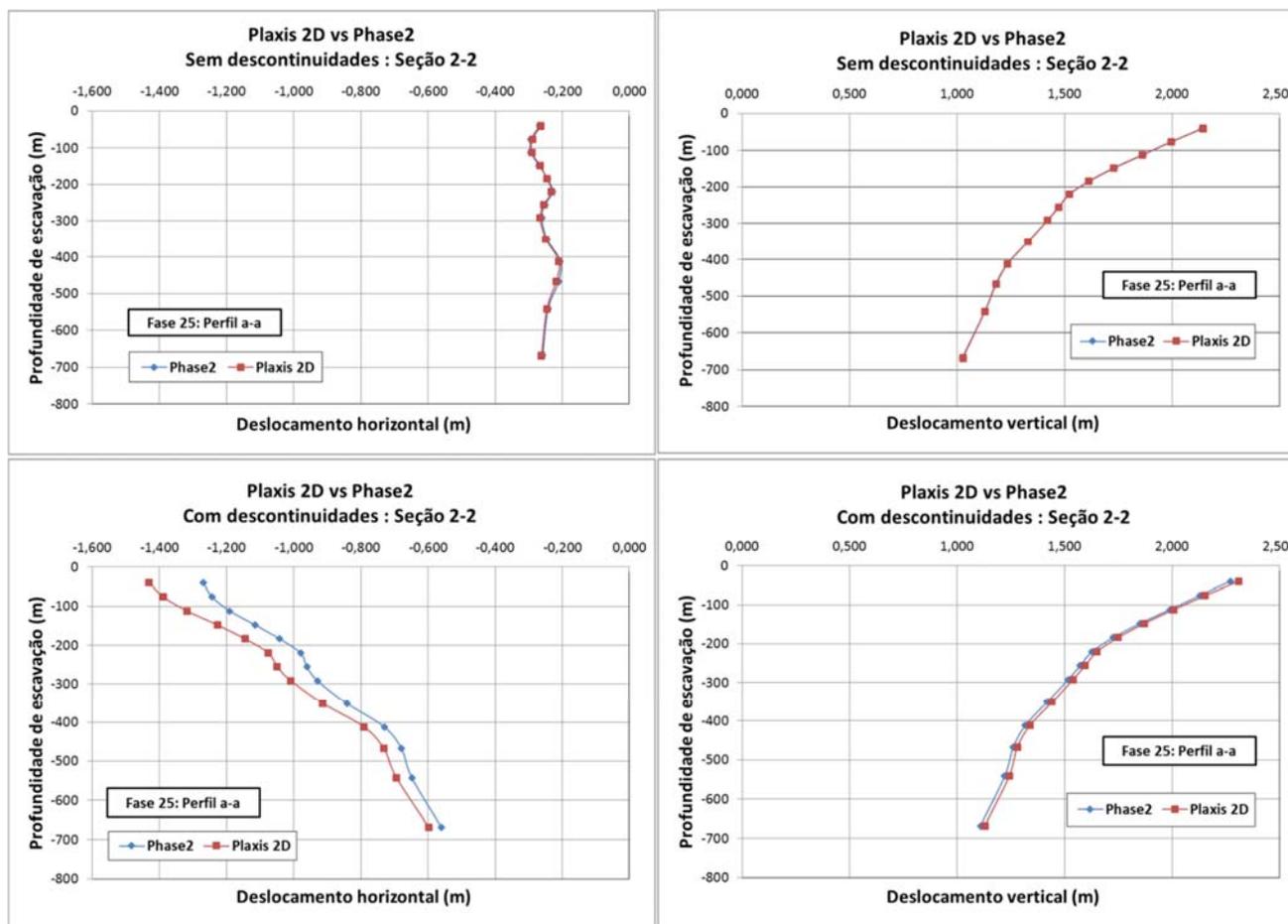


Figura 4.23 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2: na fase 25.

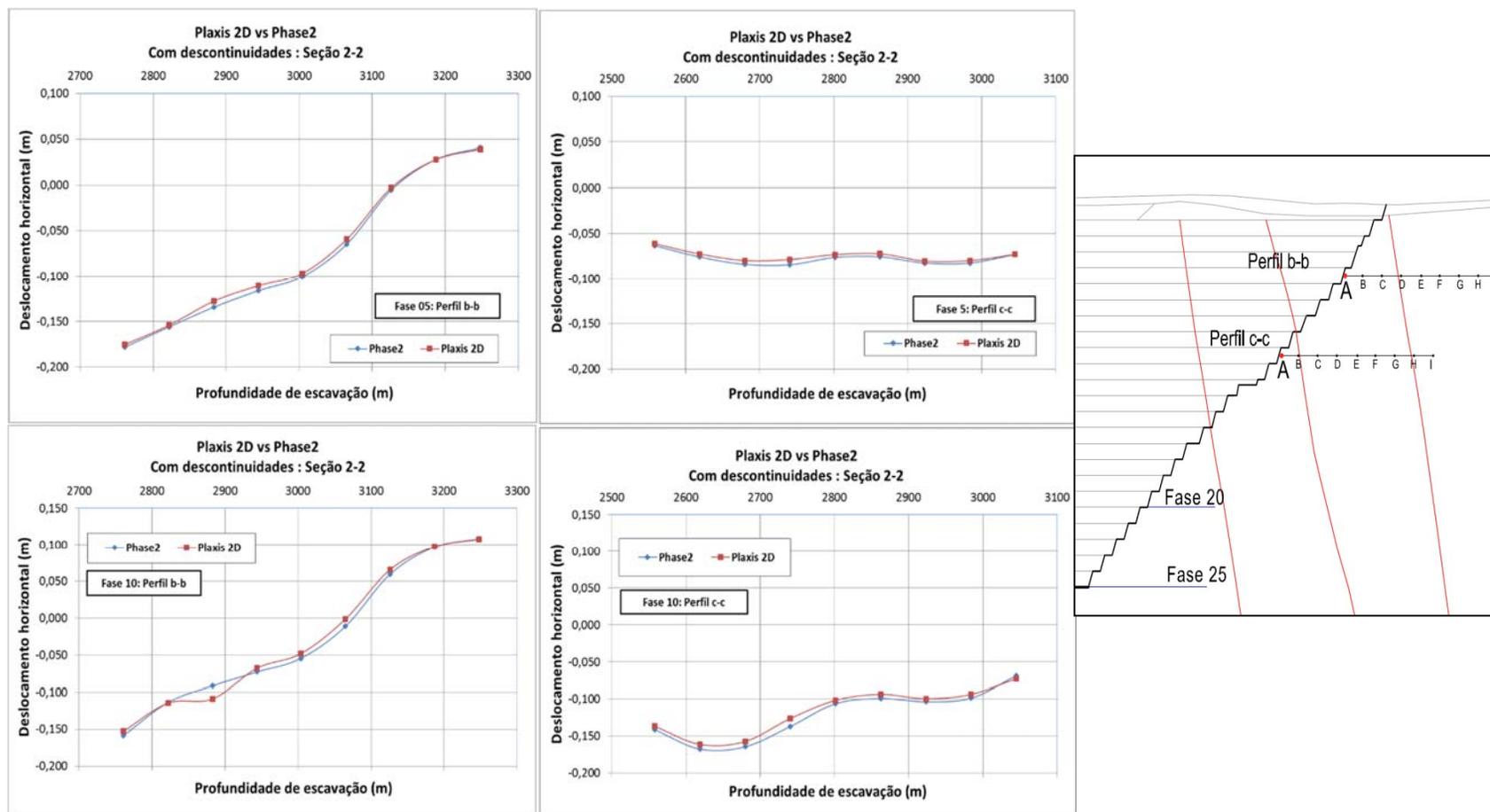


Figura 4.24 - Deslocamentos horizontais ao longo do perfil b-b e c-c da seção 2-2 nas fases 5 e 10.

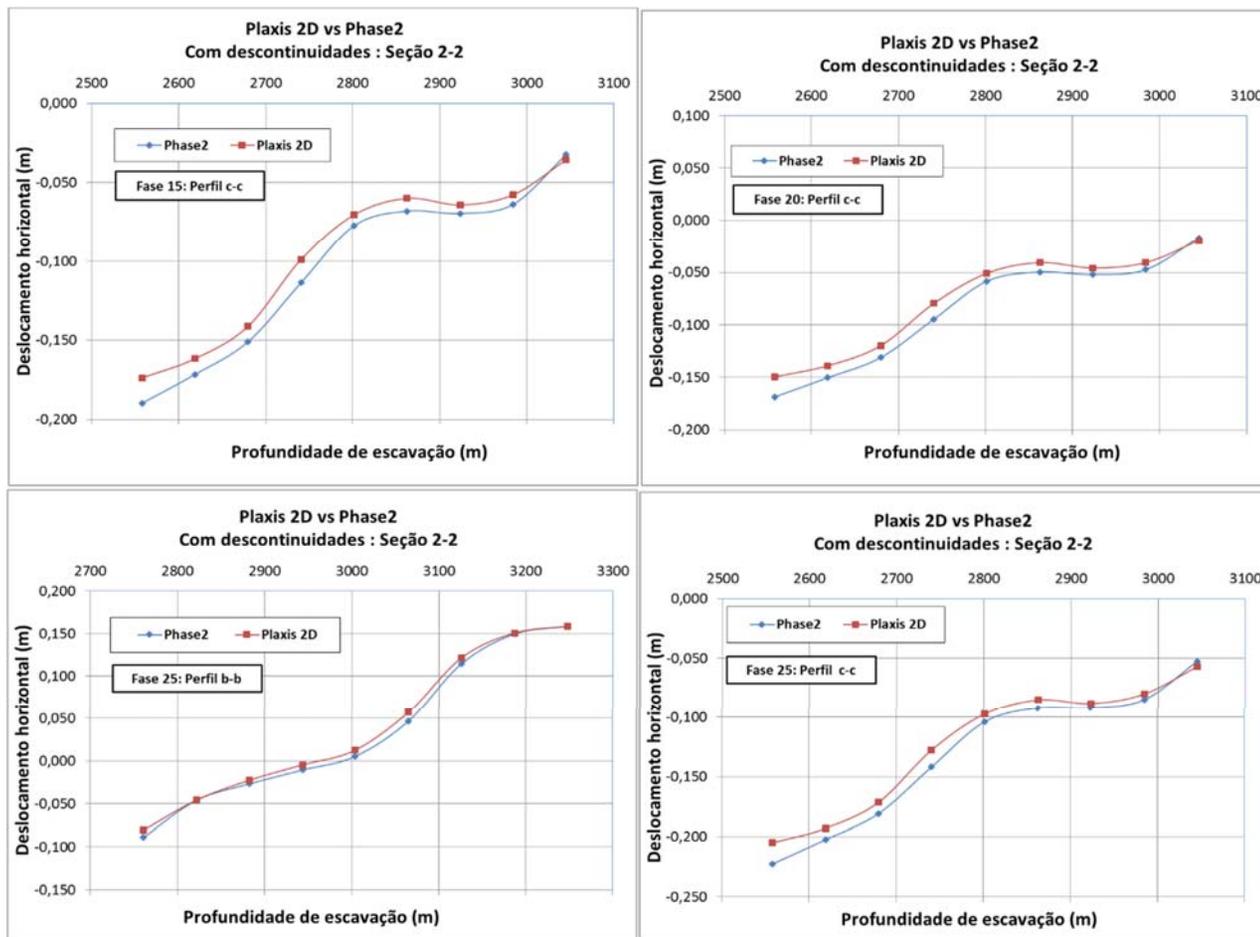


Figura 4.25 - Deslocamentos horizontais ao longo do perfil b-b e c-c da seção 2-2 nas fases 15 e 25.

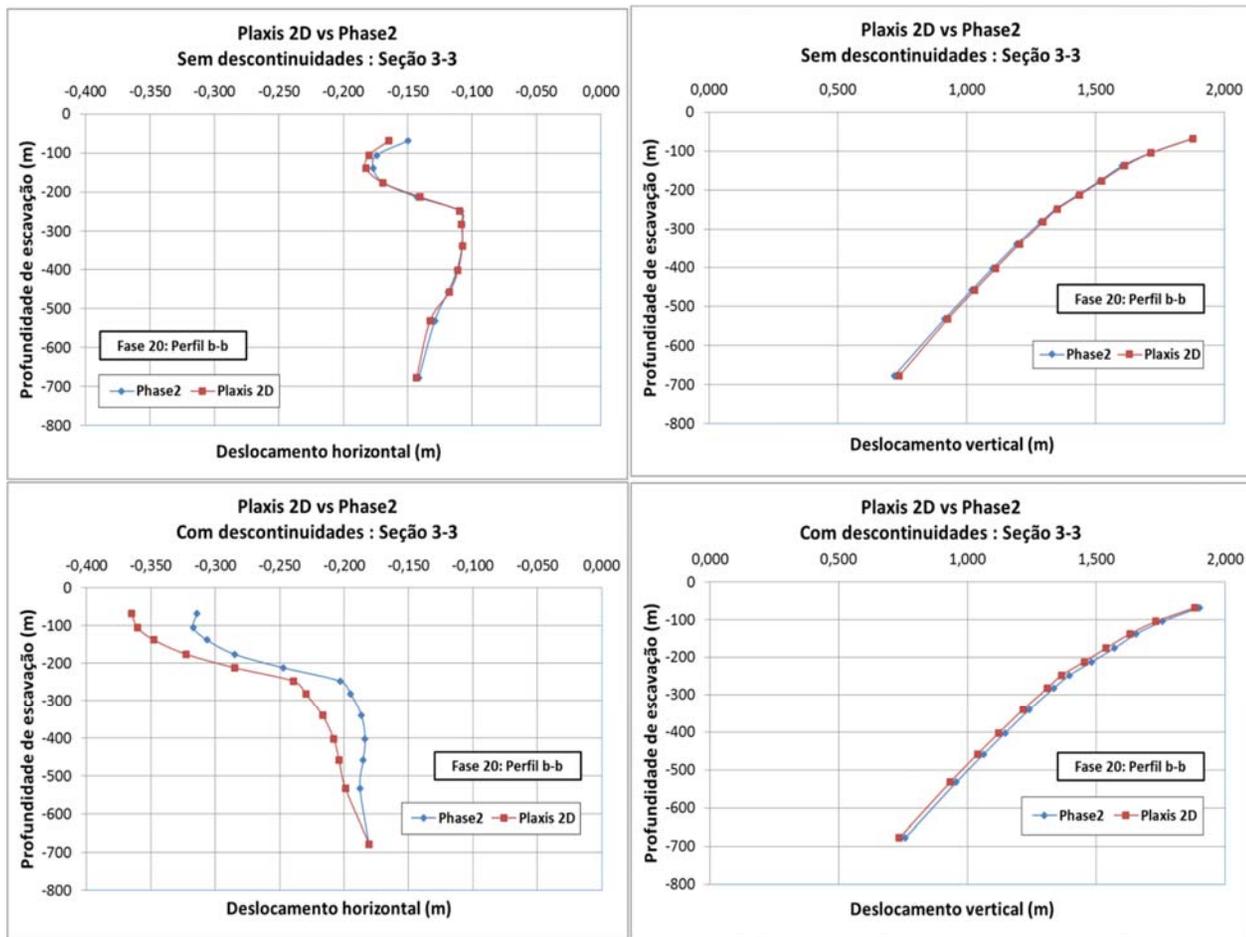


Figura 4.26 - Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil b-b da seção 3-3: Fase 20. Plaxis 2D vs Phase2.

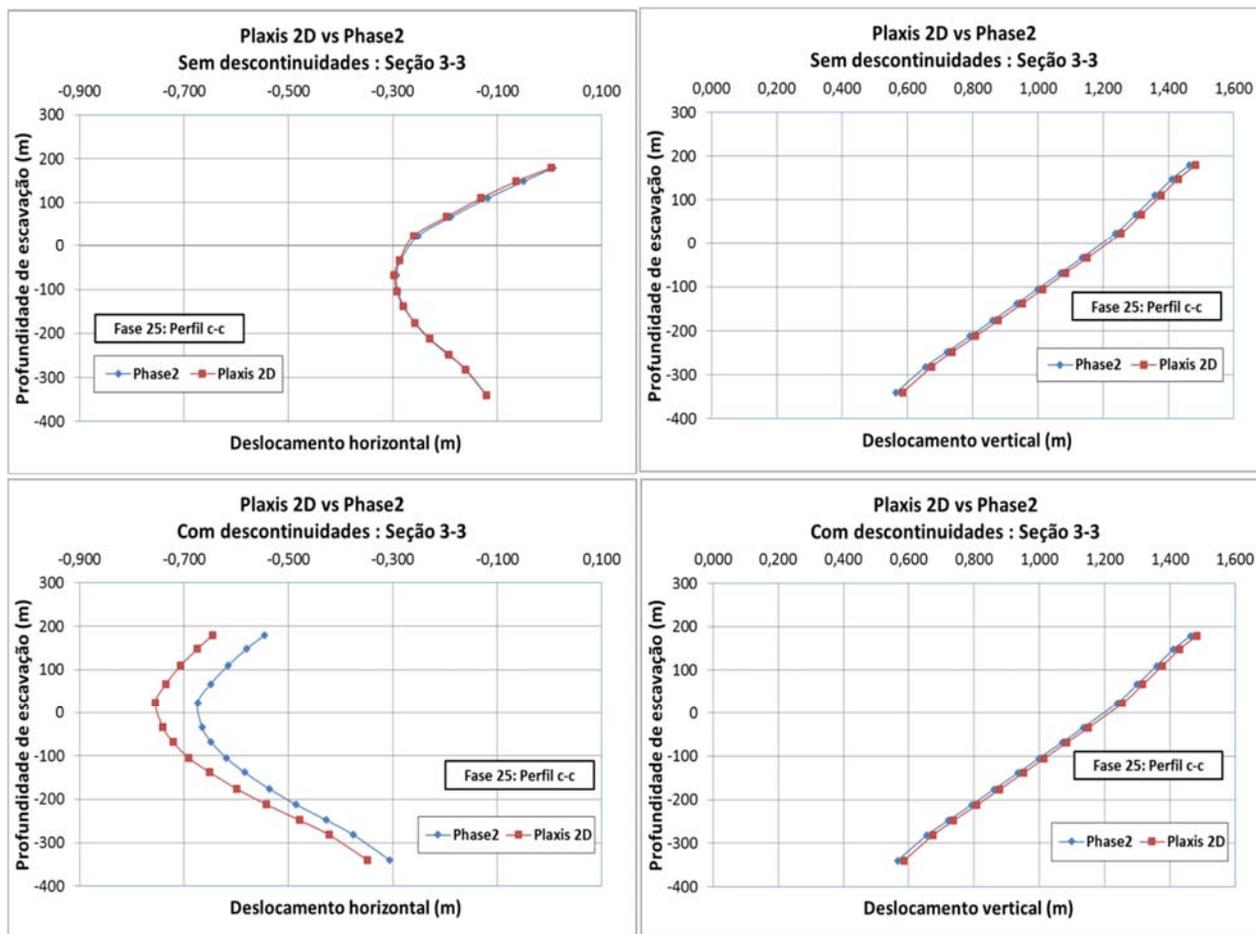


Figura 4.27 - Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil c-c da seção 3-3 na fase 25.

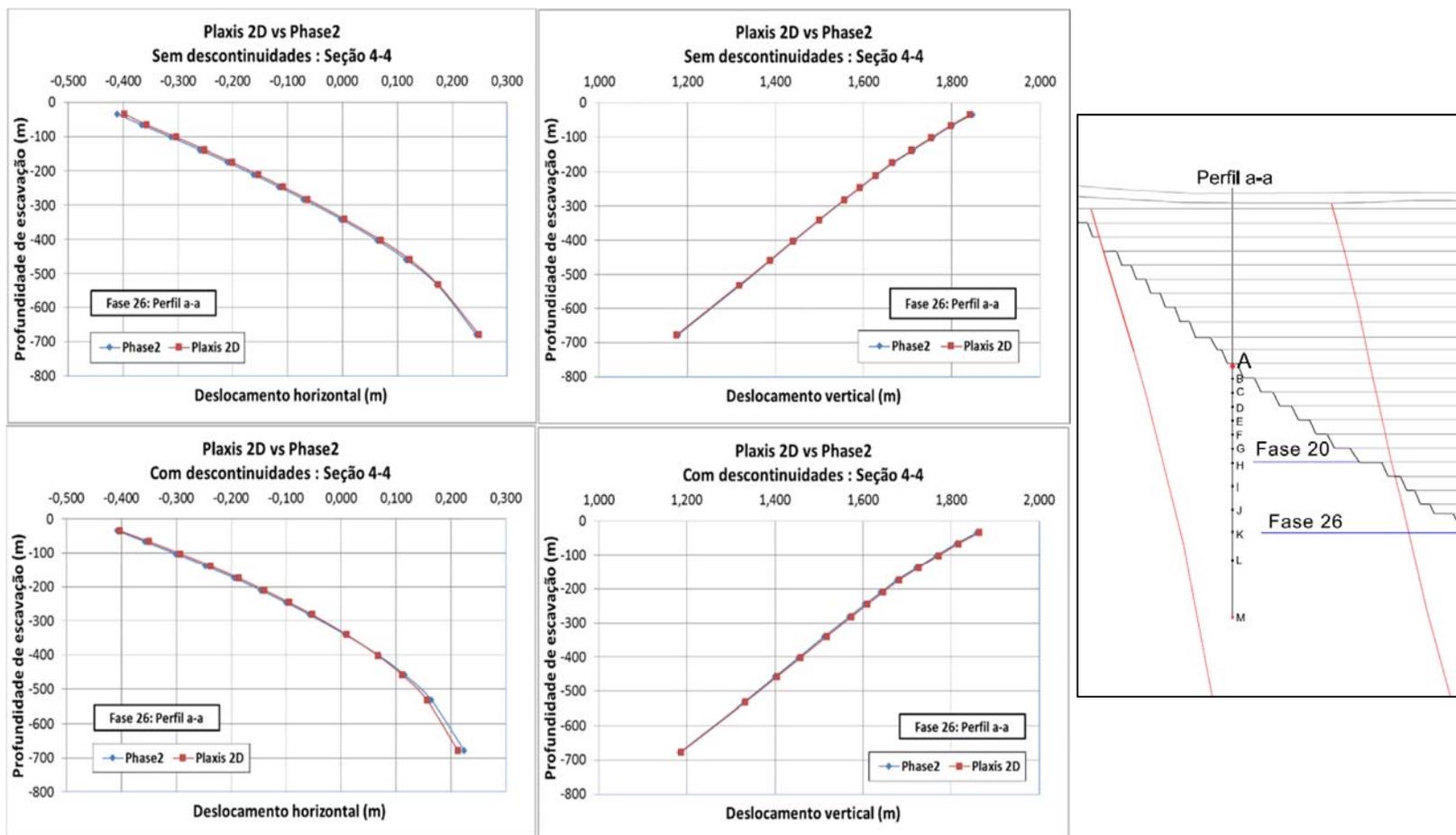


Figura 4.28 - Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil a-a da seção 4-4: na fase 26.

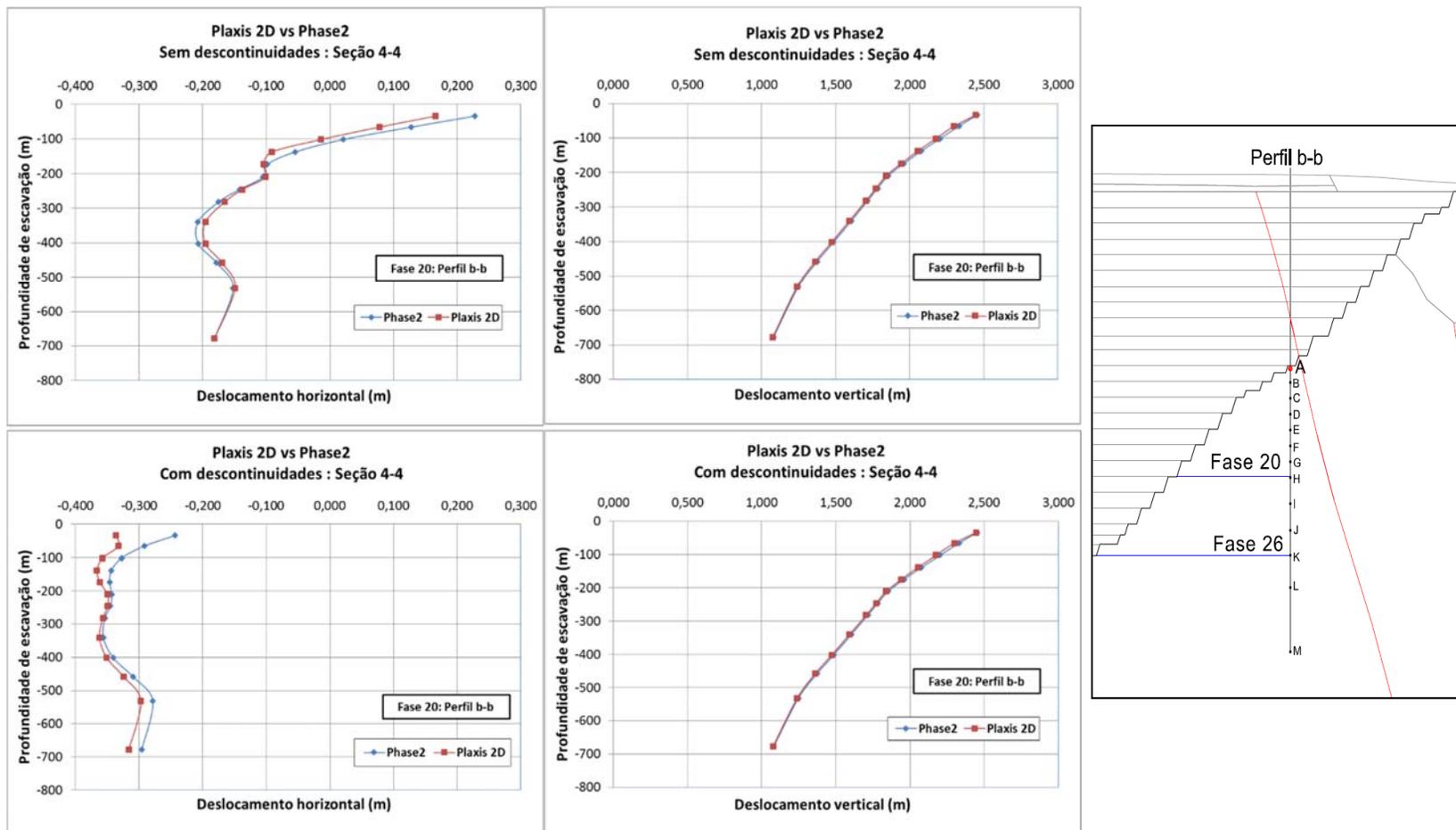


Figura 4.29 - Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil b-b da seção 4-4 na fase 20.

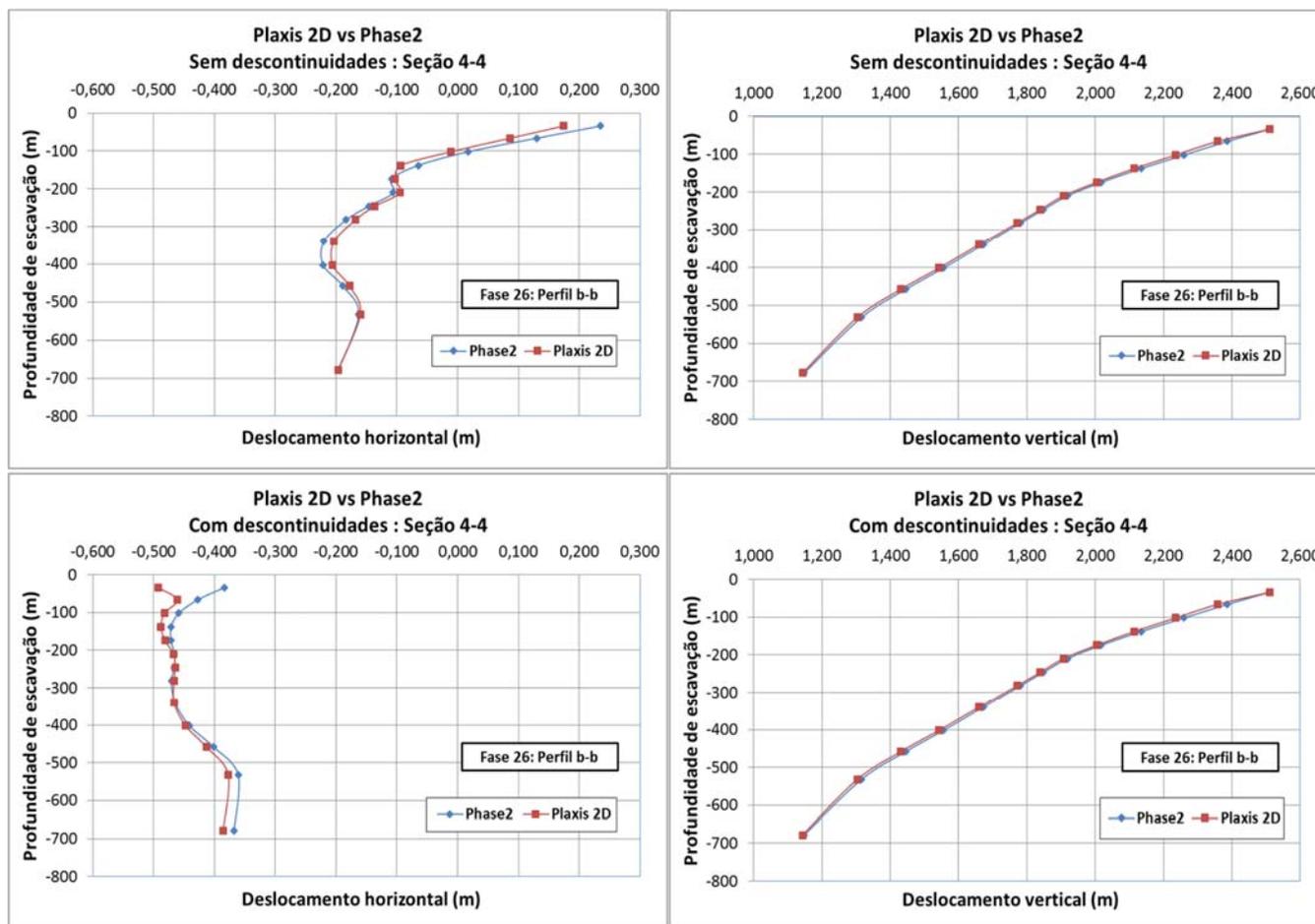


Figura 4.30 - Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil b-b da seção 4-4 na fase 26.

4.4. Modelagem 3D

4.4.1. Geometria da malha e condições de contorno

A seção transversal da malha de elementos finitos é a mesma da Figura 4.5, acrescida de uma espessura de 600m para representação de efeitos tridimensionais durante o processo de escavação da mineração. As tensões iniciais atuantes antes da escavação foram geradas apenas com o carregamento gravitacional e as condições de contorno nas bordas do modelo foram as seguintes: base com deslocamentos impedidos nas 3 direções x, y, z; faces laterais paralelas ao plano xz com deslocamento $u_y = 0$ mas livres nas direções x e z; faces laterais paralelas ao plano yz com deslocamento $u_x = 0$ mas livres nas direções x e z (Figura 4.31).

O maciço rochoso é formado por 7 tipos de rocha (Figura 4.4) e a malha de elementos finitos foi gerada com auxílio do programa Autocad Civil 3D (Autocad Civil 3D, 2013) para gerar a geometria 3D e assim conseguir exportar para o programa Plaxis 3D mediante blocos 3D (Figura 4.32).

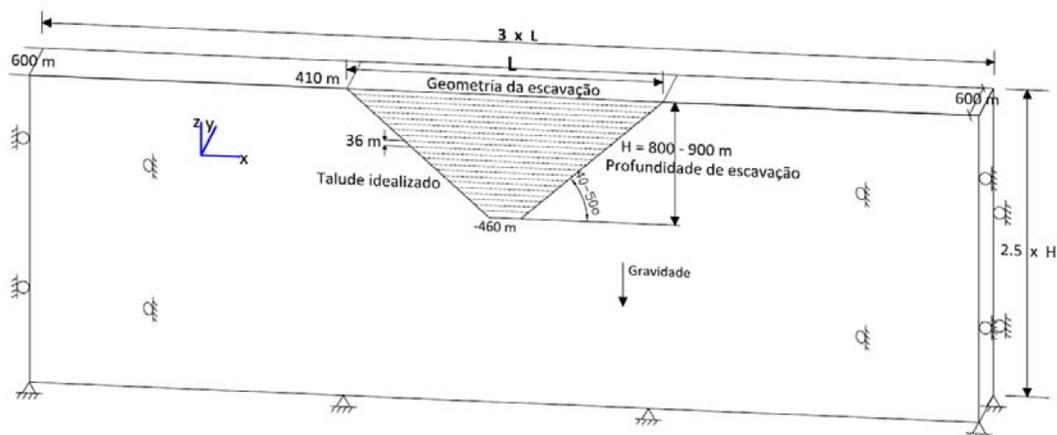


Figura 4.31 - Geometria da malha de elementos finitos 3D e condições de contorno.

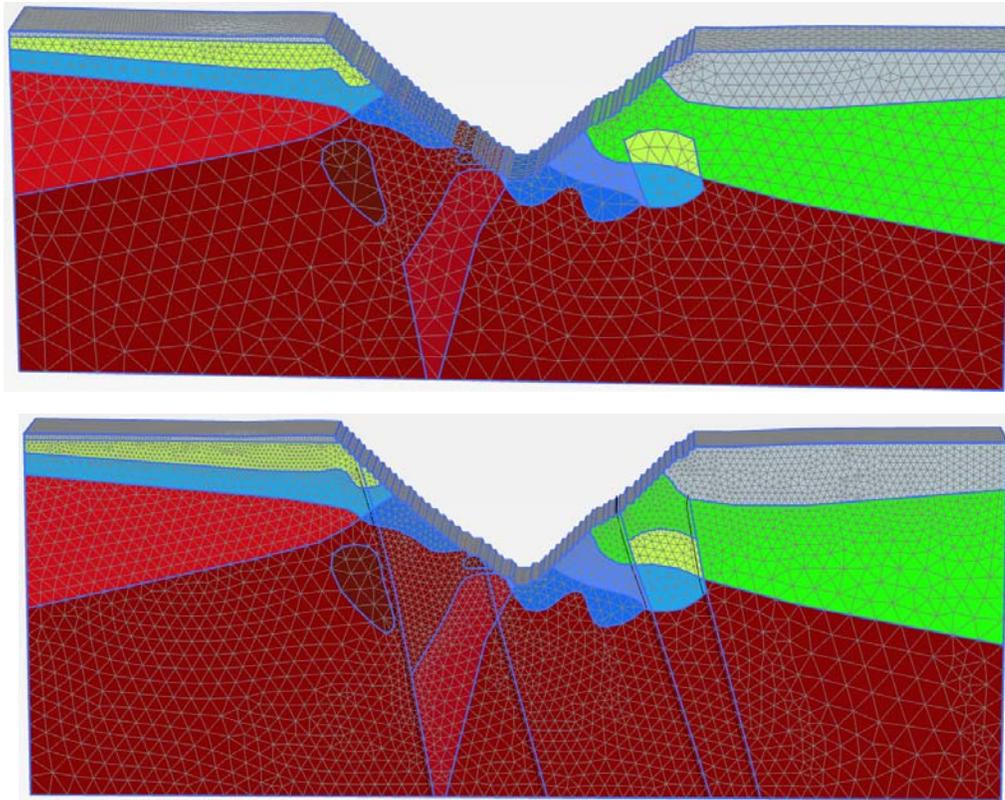


Figura 4.32 - Malha de elementos finitos utilizada no programa Plaxis 3D, seção 4-4. a) sem descontinuidade, b) com descontinuidades.

O programa computacional Plaxis 3D não dispõe de elementos específicos de juntas com os quais podem ser introduzidas diretamente na malha com suas respectivas propriedades de rigidez e resistência. De modo semelhante à versão 2D, este programa utiliza elementos de interface com propriedades que dependem das características dos elementos sólidos 3D a eles conectados. Os 12 nós dos elementos de interface são coincidentes com os 6 nós de cada elemento tetraédrico vizinho, i.e. não apresentam espessura real. O software, no entanto, calcula as constantes elásticas de rigidez normal e transversal através de uma espessura virtual t_i (Eqs. 3.19 e 3.20).

As etapas de escavação foram as mesmas já descritas na simulação 2D, considerando de 24 a 26 etapas com remoção gradual de 36m de rocha em cada fase.

4.4.2. Distribuição de perfis de deslocamentos

Para possibilitar uma comparação com os resultados 2D apresentados anteriormente, os perfis considerados nas análises seguintes são os mesmos da seção 4.3.3, porém estes se referem a distribuições de deslocamentos computadas no plano médio do modelo tridimensional com 600m de espessura.

As Figuras 4.33 e 4.34 mostram a distribuição dos deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 calculada ao final das etapas de escavação 20 e 24, enquanto que as Figuras 4.35 e 4.36 se refere à etapa 24 nos perfis b-b e c-c, respectivamente, desta mesma seção correspondente à etapa 24. Dos gráficos observados pode-se concluir:

- a) enquanto que nas análises 2D os deslocamentos verticais determinados com os programas Phase2 e Plaxis 2D foram praticamente coincidentes, na simulação tridimensional diferenças de valores aparecem, principalmente quando as falhas são incorporadas;
- b) no perfil a-a, para a condição de ausência de descontinuidades (Figuras 4.33 e 4.34), a distribuição dos deslocamentos horizontais também reflete efeitos 3D nos valores computados;
- c) O incremento dos deslocamentos horizontais, na condição de existência de descontinuidades em relação à condição de ausência das mesmas, é confirmada, com as respectivas distribuições seguindo os padrões anteriormente determinados na simulação 2D;
- d) os efeitos da simulação 3D podem ser mais claramente percebidos na comparação entre os resultados obtidos com os programas Plaxis 2D e Plaxis 3D, tendo em vista que em ambos a simulação da existência de falhas, por intermédio de elementos de interface, segue a mesma metodologia.

As Figuras 4.37 e 4.38 se referem à seção 2-2 enquanto que as distribuições de deslocamentos nas Figuras 4.39 e 4.40 à seção 4-4. Os comentários gerais sobre as distribuições dos deslocamentos nos perfis destas figuras são:

- a) os deslocamentos verticais computados com programas de elementos finitos em simulações bidimensional (Phase2, Plaxis 2D) e tridimensional (Plaxis 3D) são praticamente os mesmos, exceto na súbita variação na profundidade aproximada de 350m na seção 2-2 na condição sem descontinuidades (Figuras 4.39 e 4.40);

- b) as distribuições dos deslocamentos horizontais seguem as mesmas tendências gerais, podendo ser inferidos os efeitos tridimensionais dos resultados das simulações executadas com o programa Plaxis nas versões 2D e 3D;
- c) é evidente que a inclusão de falhas nas análises por elementos finitos têm impacto nas distribuições de deslocamentos, mais significativo nos deslocamentos horizontais que nos verticais. Estes efeitos podem ser melhor observados nas Figuras 4.41 e 4.42 para os perfis a-a e b-b da seção 1-1.
- d) O incremento do número de camadas para o dobro de fases de escavação não evidencia maiores diferenças, no entanto observa-se ligeiras diferenças nos deslocamentos horizontais. Estes efeitos podem ser melhor observados nas Figuras 4.43 e 4.44 para os perfis a-a e b-b da seção 1-1.

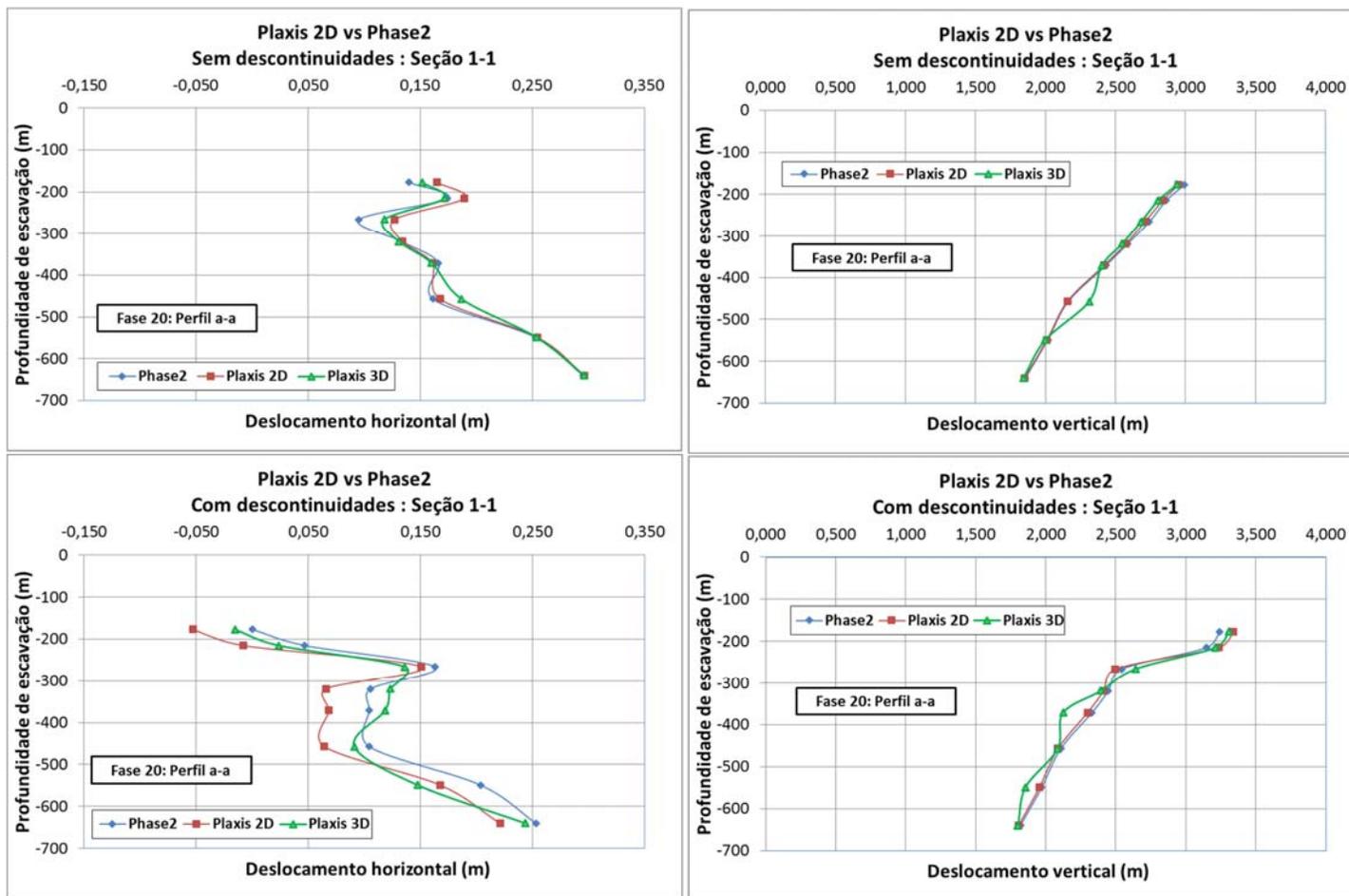


Figura 4.33 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 20.

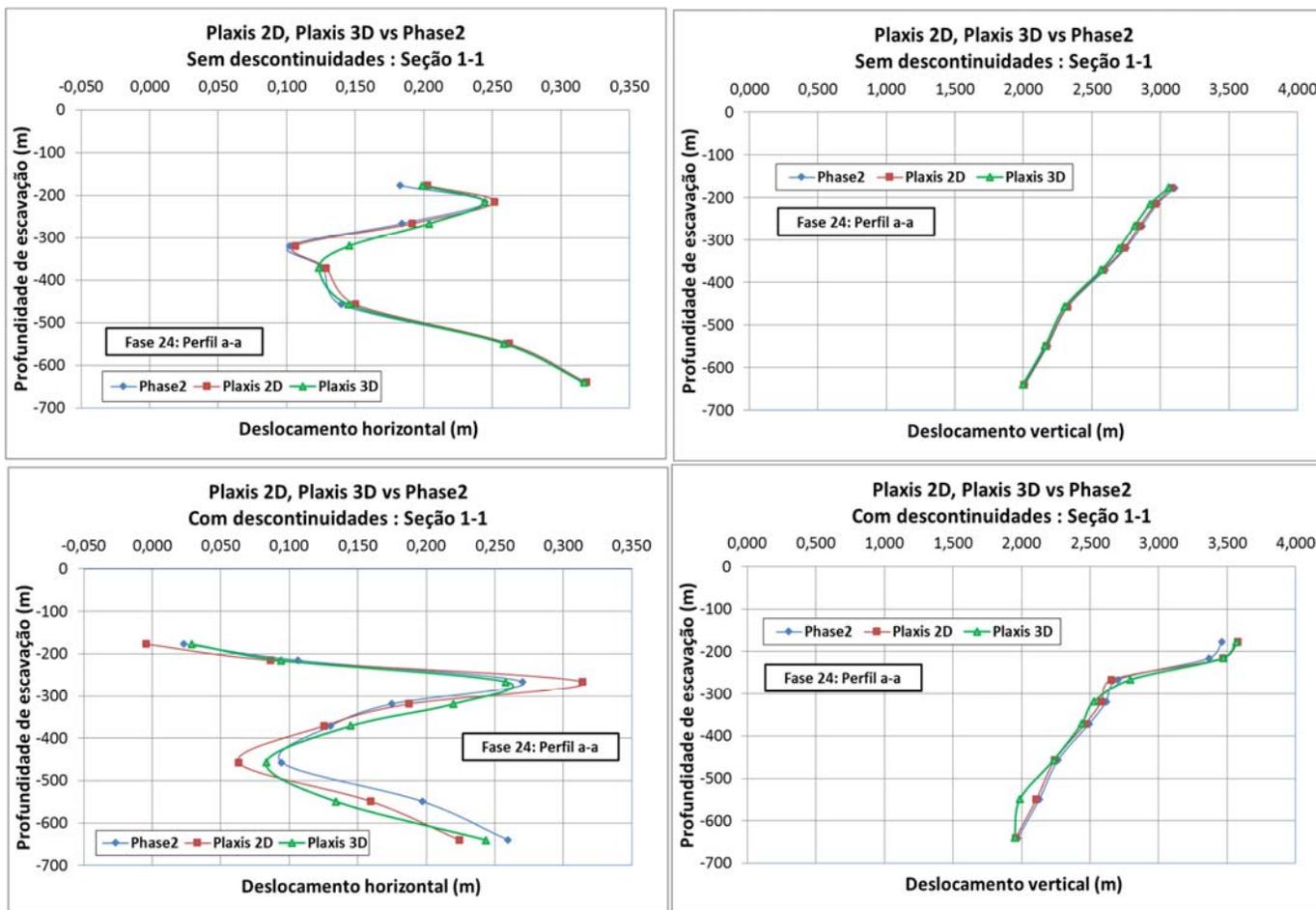


Figura 4.34 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 24.

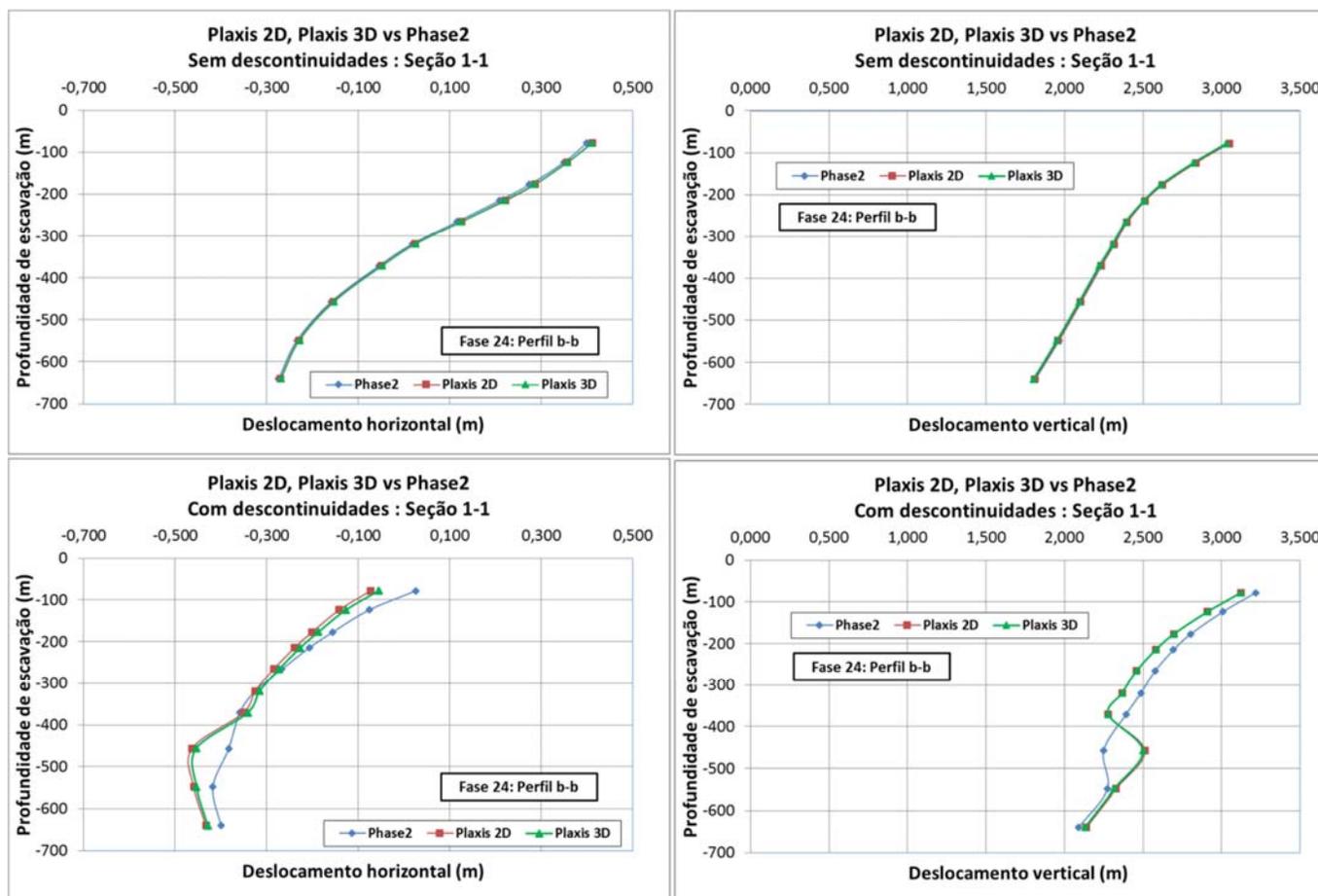


Figura 4.35 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil b-b da seção 1-1 na fase 24.

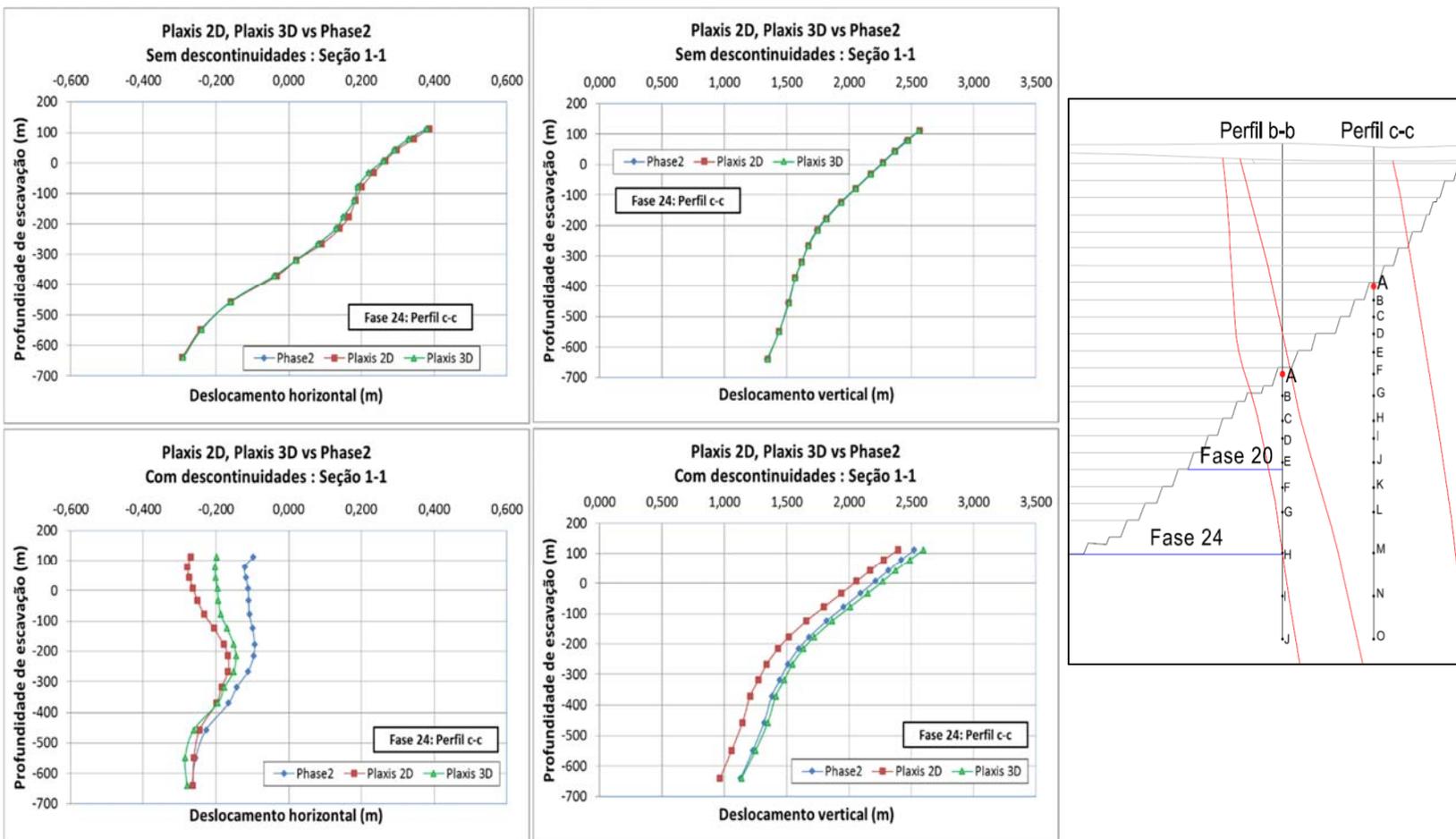


Figura 4.36 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil c-c da seção 1-1 na fase 24.

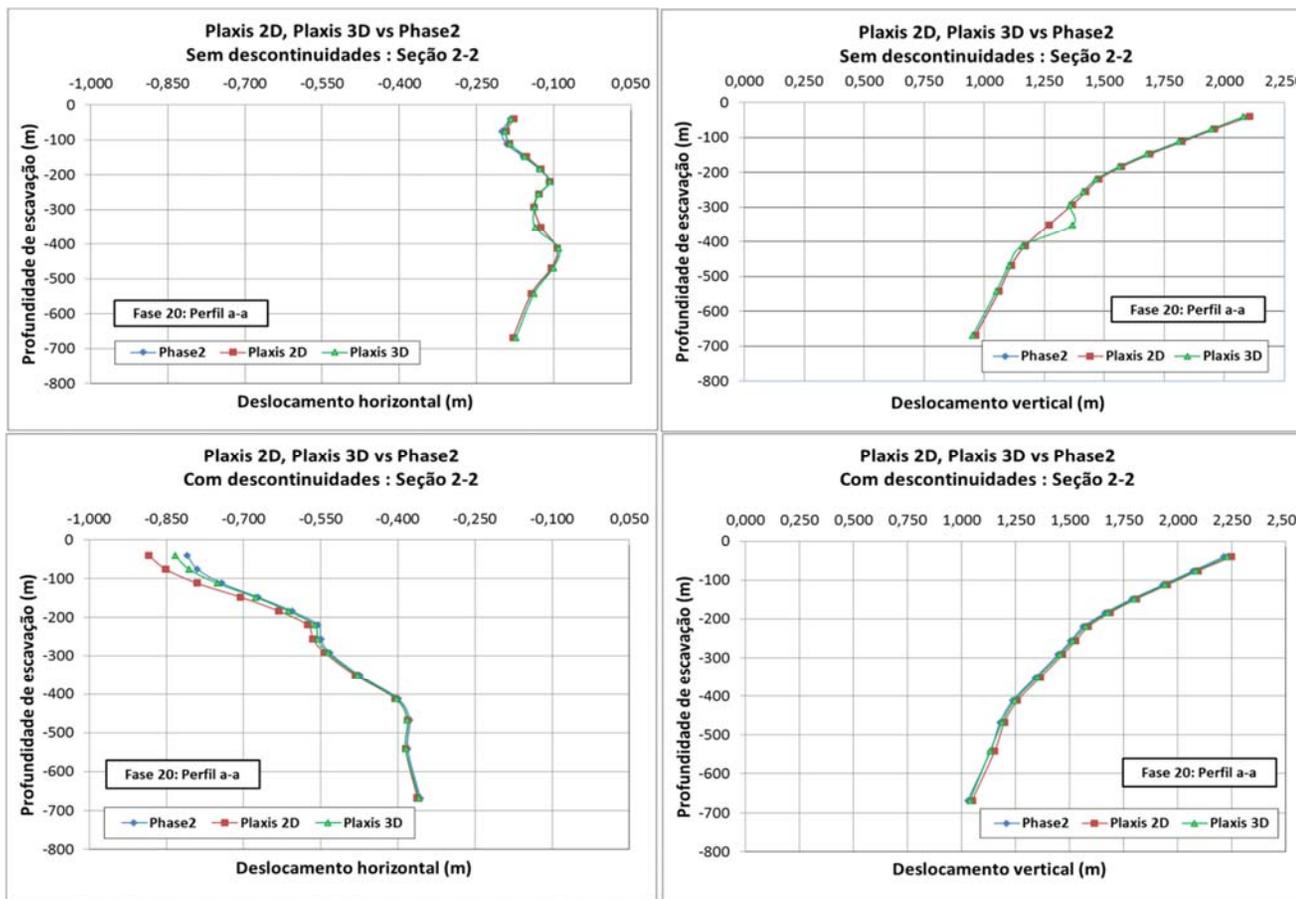


Figura 4.37 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2 na fase 20.

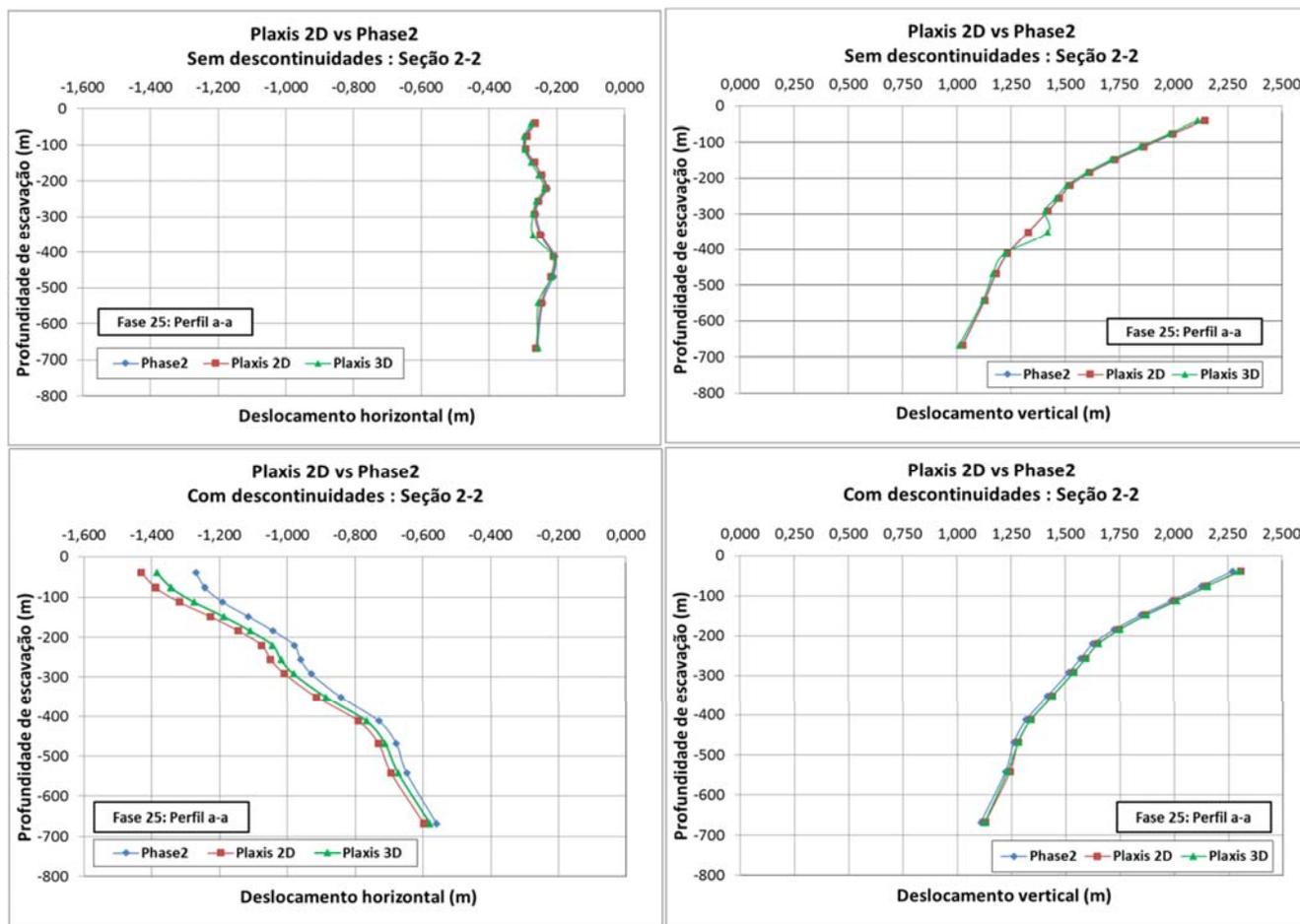


Figura 4.38 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2 na fase 25.

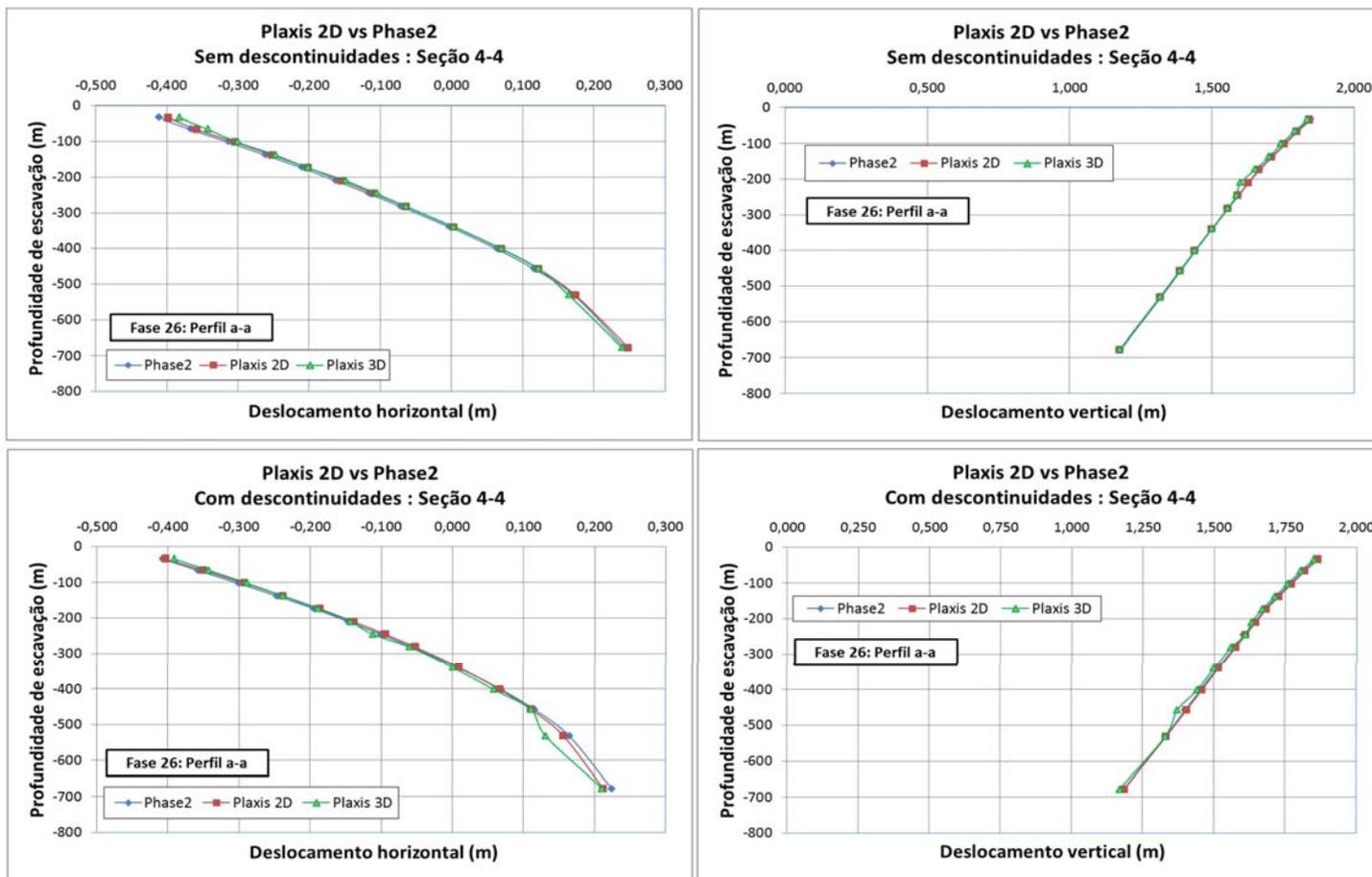


Figura 4.39 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 4-4 na fase 26.

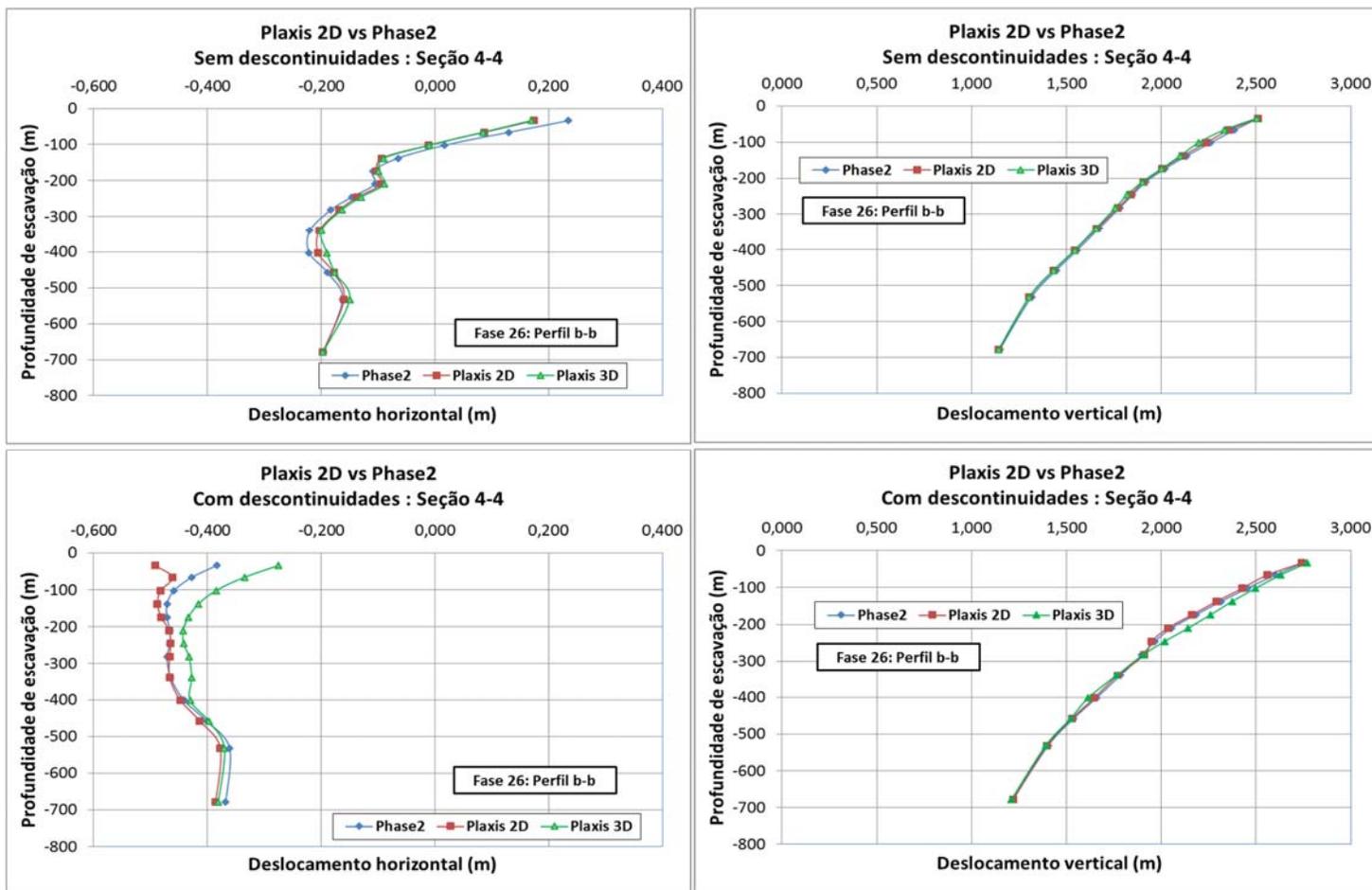


Figura 4.40 - Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil b-b da seção 4-4 na fase 26.

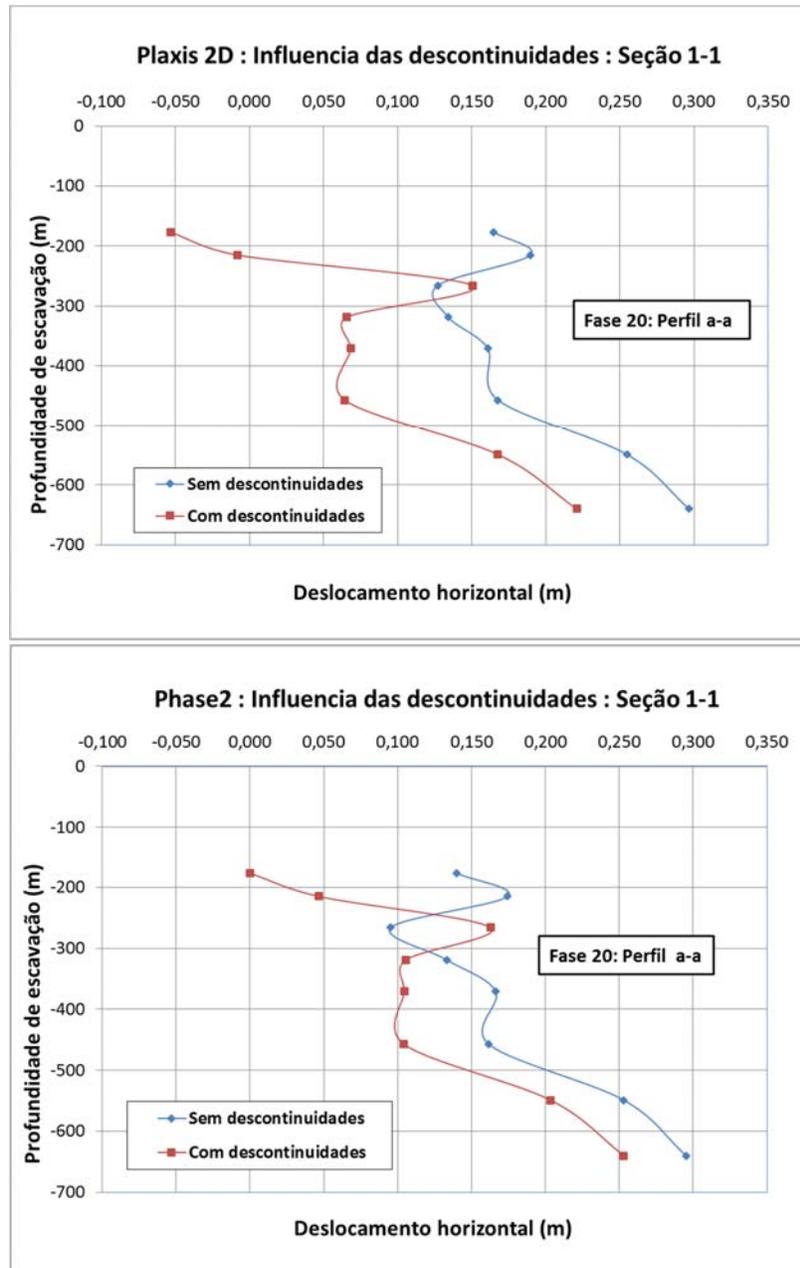


Figura 4.41 - Influência das discontinuidades na distribuição dos deslocamentos horizontais na fase 20 do perfil a-a da seção 1-1 determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.

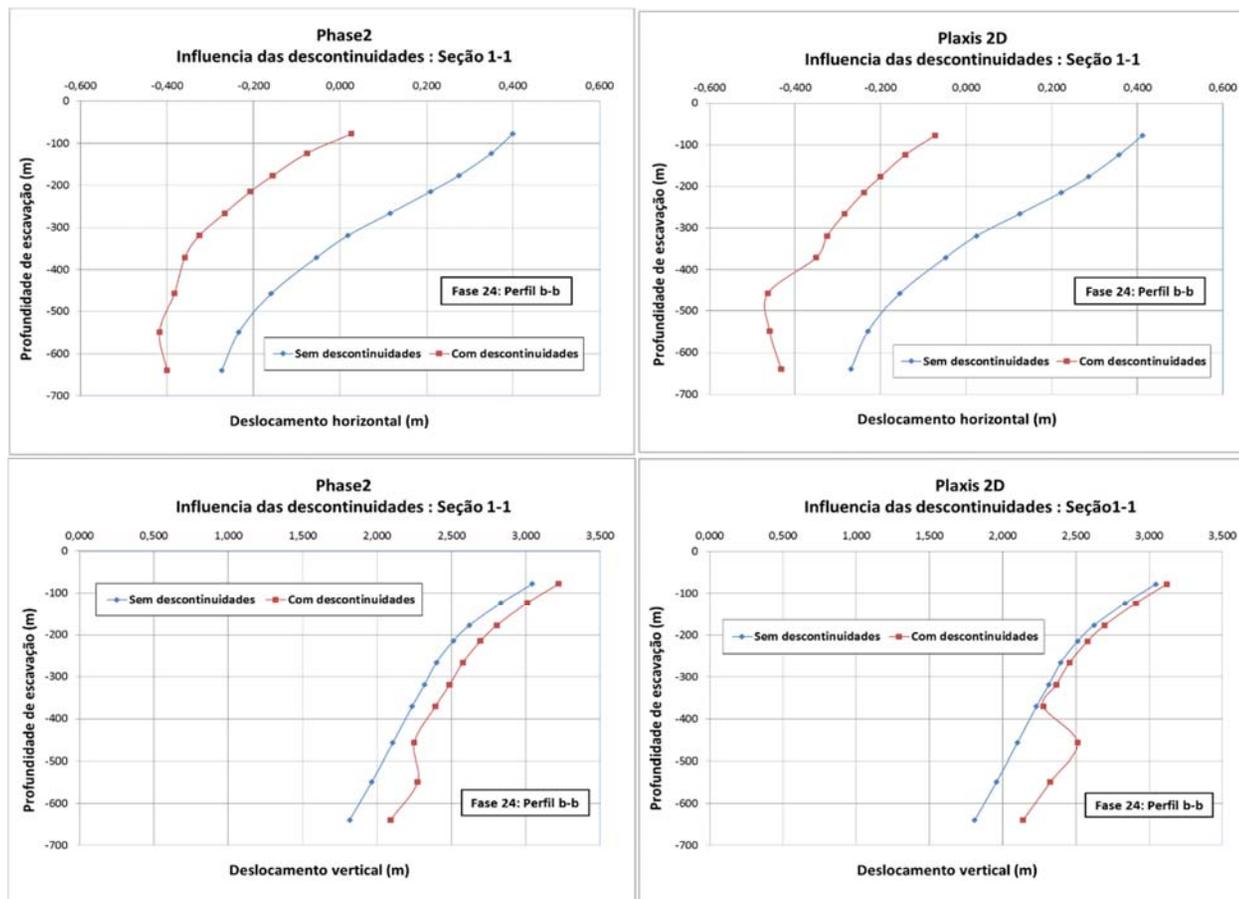


Figura 4.42 - Influência das descontinuidades na distribuição dos deslocamentos verticais e horizontais na fase 24 do perfil b-b da seção 1-1 determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.

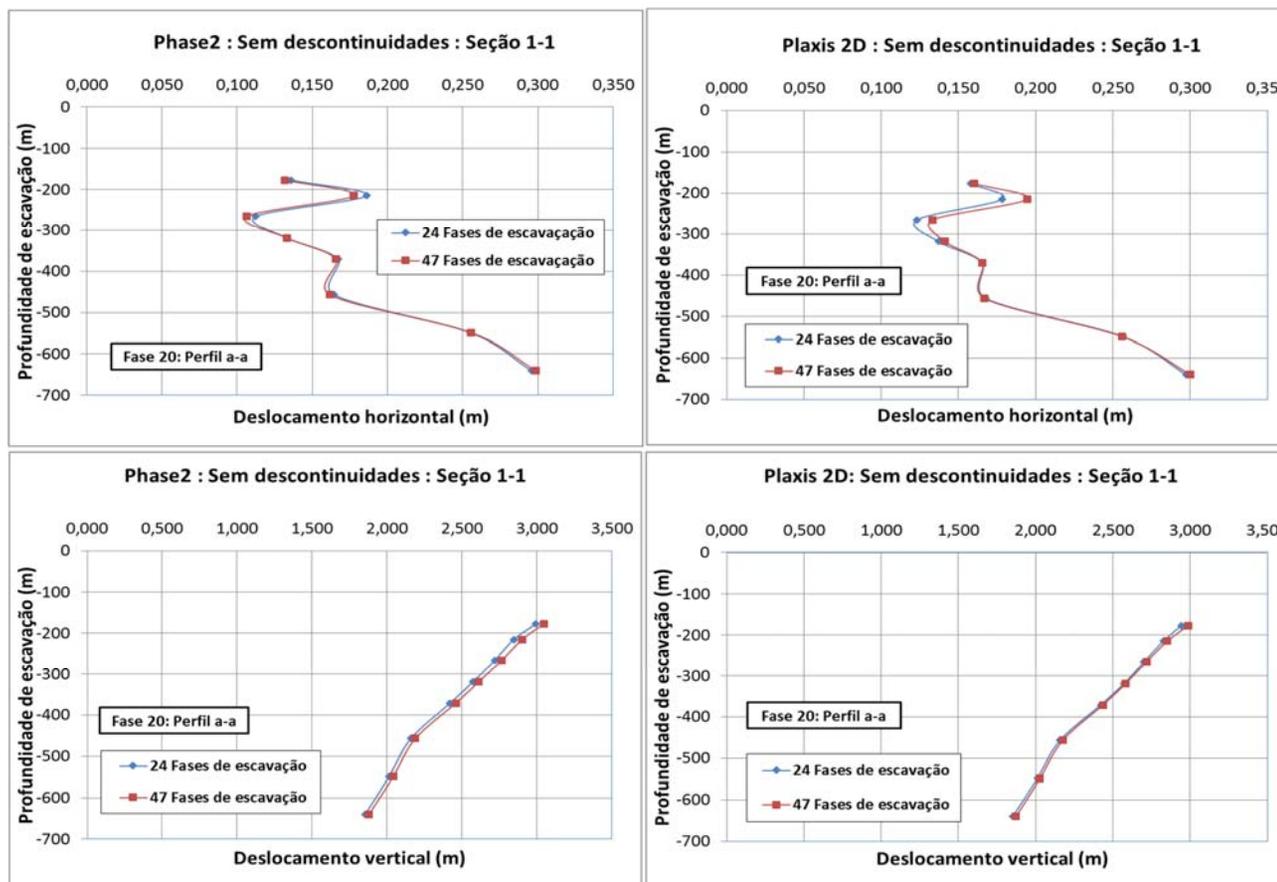


Figura 4.43 - Influência no incremento das fases de escavação nos deslocamentos verticais e horizontais do perfil b-b da seção 1-1 sem descontinuidades, determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.

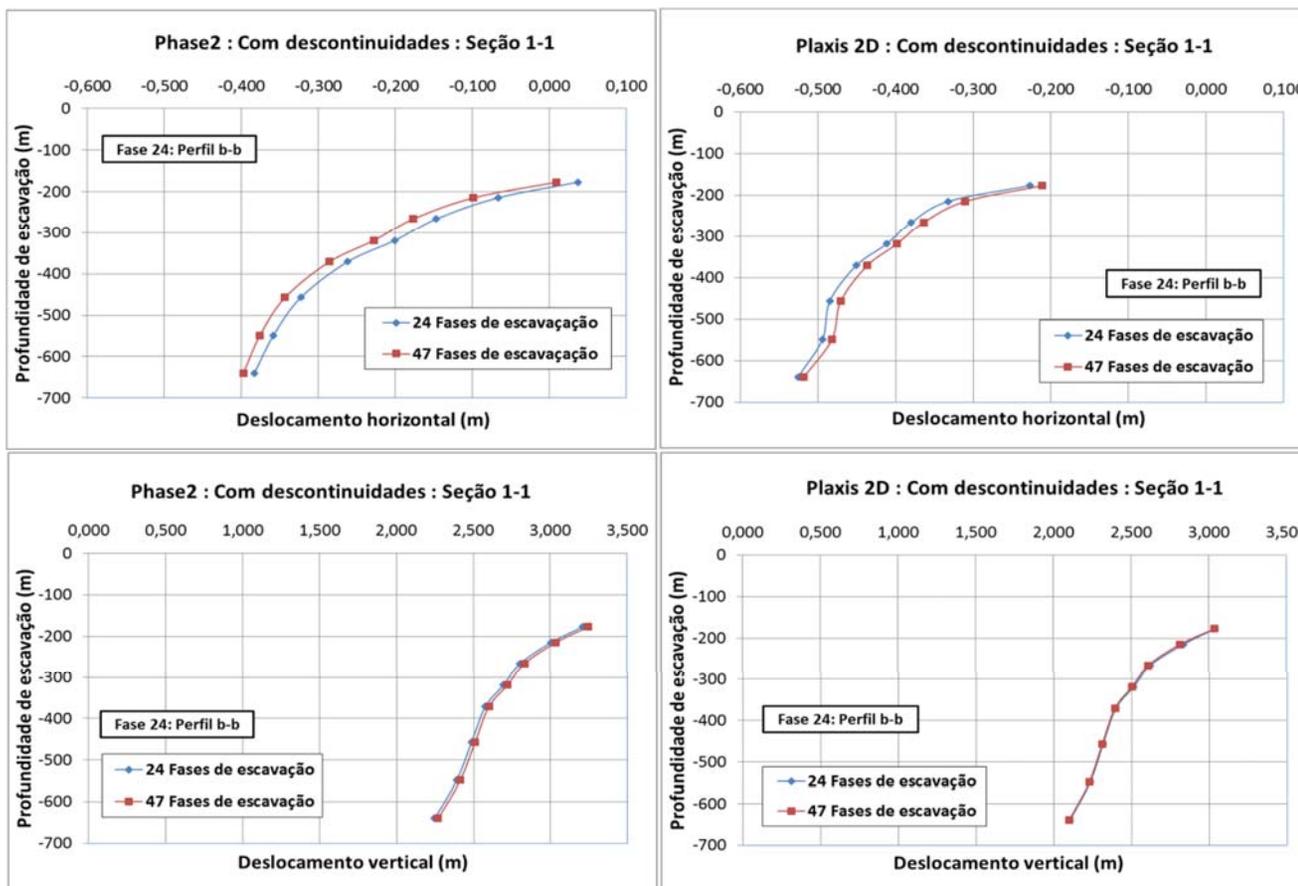


Figura 4.44 - Influência no incremento das fases de escavação nos deslocamentos verticais e horizontais do perfil b-b da seção 1-1 com descontinuidades, determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.