

# MODELAÇÃO BIDIMENSIONAL DE ANCORAGENS EM ESCAVAÇÕES SUPPORTADAS POR ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO FLEXÍVEIS

## TWO-DIMENSIONAL MODELLING OF ANCHORS IN EXCAVATIONS SUPPORTED BY FLEXIBLE RETAINING WALLS

Santos Josefino, Cláudia, *Instit. Sup de Eng. de Lisboa, Lisboa, Portugal, cjosefino@dec.isel.ipl.pt*  
Guerra, Nuno M. da C. *Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, nguerra@civil.ist.utl.pt*  
Matos Fernandes, Manuel, *Universidade do Porto, Porto, Portugal, mfern@fe.up.pt*

### RESUMO

Recorre-se em Portugal, de forma quase generalizada, à utilização de ancoragens para a realização de escavações em meio urbano suportadas por estruturas de contenção flexíveis. A análise destas estruturas de suporte passa, em muitos casos, pela realização de análises numéricas tensão-deformação, recorrendo geralmente ao método dos elementos finitos. Muitas destas análises são realizadas em condições bidimensionais, assumindo com frequência a validade do estado plano de deformação. As ancoragens, como elementos lineares que impõem, na zona de selagem, importantes efeitos tridimensionais, apresentam algumas dificuldades de modelação que têm sido abordadas por diversos autores. Apresentam-se neste trabalho as diferentes metodologias de modelação bidimensional de ancoragens e realiza-se um estudo comparativo dos resultados da sua aplicação, discutindo as suas vantagens e inconveniente

### ABSTRACT

anchors are widely used in Portugal in urban excavations supported by flexible retaining walls. The analysis of these structures usually involves stress-strain numerical analysis using the finite element method. The analyses are often made under two-dimensional assumptions, frequently considering the validity of plane strain conditions. Anchors are linear elements imposing significant three-dimensional effects and therefore involve modelling difficulties in 2D calculations. The different methods of 2D anchor modelling are described and compared. The advantages and inconvenients of each method are presented and discussed.

### 1. INTRODUÇÃO

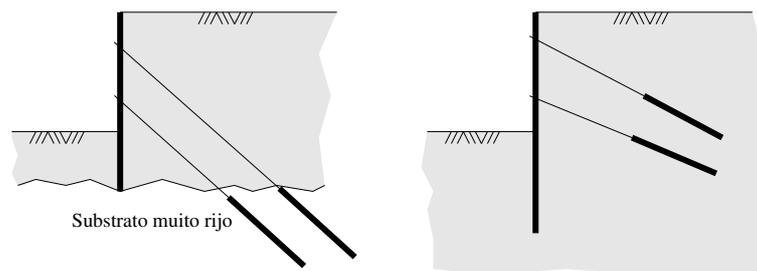
O projecto de estruturas de suporte flexíveis é, cada vez mais, apoiado por resultados de análises numéricas, usualmente utilizando o método dos elementos finitos. Na maior parte dos casos as análises realizadas são bidimensionais, habitualmente considerando a hipótese do estado plano de deformação.

A utilização de análises bidimensionais em lugar de cálculos tridimensionais justifica-se com:

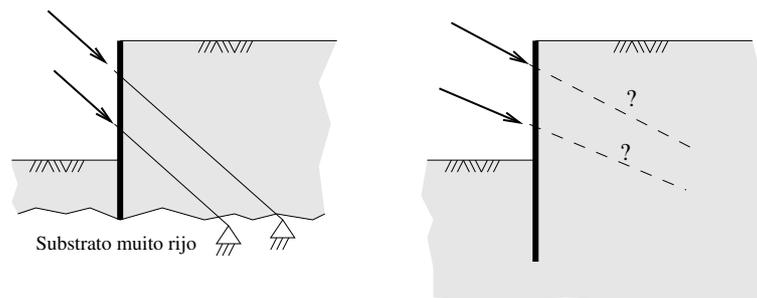
- as significativas maiores dificuldades de definição de geometria e de análise de resultados que as análises 3D necessariamente envolvem, assim como um tempo de cálculo bastante superior;

- a existência, para alguns casos, de uma razoável correspondência entre a geometria da escavação real e a condição de deformação plana;
- o carácter habitualmente conservativo das análises em deformação plana.

Em Portugal um número muito significativo de escavações urbanas que recorrem a estruturas de suporte flexíveis utilizam ancoragens provisórias pré-esforçadas, seladas no terreno. Tratando-se de elementos lineares que exercem uma acção concentrada quer na cabeça da ancoragem quer na selagem, envolvendo importantes efeitos tridimensionais, constituem uma dificuldade para a modelação em condições bidimensionais. A importância desta dificuldade é diferente consoante a zona de selagem possa ou não ser considerada fixa para as solicitações decorrentes da escavação (ver Figura 1(a)). Com efeito, tratando-se de uma escavação em que a selagem é realizada num maciço com características de resistência e deformabilidade significativamente melhores do que a dos restantes materiais (à esquerda, na figura), os deslocamentos que a selagem experimenta face às solicitações decorrentes da escavação são desprezáveis; ao contrário, se a selagem for realizada em zona do maciço com características semelhantes às do solo suportado e com relativa proximidade à cortina (à direita, na figura), os deslocamentos devidos à escavação podem já não ser desprezáveis.



(a) Representação esquemática



(b) Modelação bidimensional

Figura 1 - Ancoragens pré-esforçadas seladas no terreno com selagem fixa (à esquerda) e móvel (à direita).

O problema que decorre do carácter tridimensional da acção concentrada da cabeça da ancoragem na parede é comum em ambos os casos e é resolvido considerando a sua acção por unidade de comprimento longitudinal e procedendo ao dimensionamento de vigas de distribuição em regra embebidas na parede. Não é, por isso, objecto de análise no presente trabalho. A questão da acção

tridimensional do bolbo de selagem tem, como se compreende, no que respeita à sua modelação bidimensional, tratamento diferente num e noutra caso.

No caso de selagem fixa, a modelação é habitualmente feita aplicando à parede a carga correspondente ao pré-esforço inicial, simulando a selagem através de um apoio fixo e usando um elemento barra para representar o comprimento livre (ver Figura 1(b), à esquerda). Esta forma de modelação não apresenta questões em aberto, pelo que não será, também, abordada no presente trabalho.

No caso da selagem móvel (ver Figura 1(b), à direita), o pré-esforço é igualmente simulado através de uma força concentrada aplicada na parede no local da cabeça da ancoragem e a modelação dos restantes elementos pode ser feita de diferentes formas. No presente trabalho, descrevem-se sumariamente algumas desses métodos de modelação e comparam-se os resultados obtidos.

## **2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE MODELAÇÃO DE ANCORAGENS PRÉ-ESFORÇADAS COM SELAGEM MÓVEL**

Apresenta-se na Figura 2 os métodos de modelação de ancoragens pré-esforçadas com selagem móvel considerados no trabalho, indicando-se igualmente as designações adoptadas para os referir.

Os métodos  $F$  e  $FA$  constituem referências para os restantes e não correspondem a procedimentos de modelação habitualmente utilizados. No primeiro, a ancoragem é modelada apenas por uma força aplicada na cortina no ponto correspondente à cabeça, com valor igual ao pré-esforço inicial que, por conseguinte, se manterá constante ao longo da modelação do procedimento construtivo. No segundo, aplica-se ao caso da selagem móvel a metodologia correntemente adoptada para a modelação da selagem fixa, o que implica que não são considerados os movimentos da zona de selagem. A ancoragem é, assim, modelada por um elemento barra e por um apoio fixo. O método  $FN$  foi usado em [1] e corresponde à modelação da ancoragem através de uma barra que simula o comprimento livre e que une a cabeça da ancoragem,  $C$  a um nó  $N$  da malha de elementos finitos representativo da zona de selagem. Neste método, tal como no método  $FA$ , o elemento barra irá suportar apenas as variações de carga na ancoragem e, conseqüentemente, apenas estas variações são aplicadas ao maciço através do nó  $N$ . O método  $F2N$  é uma variante do método  $FN$  em que, para além da força de pré-esforço aplicada à cortina, se considera igualmente uma força com igual valor e sentido contrário aplicada ao maciço, concentrada no nó  $N$ . No método  $FS$ , modela-se explicitamente o bolbo de selagem, através de elementos barra que unem nós que pertencem também à malha que modela o maciço, sendo no restante análogo ao método  $FN$ . Este método tem uma variante no método  $F2S$ , mais corrente, que foi usado em [2, 3, 4] e que é, presentemente, utilizado no programa de cálculo Plaxis: a força de pré-esforço, além de aplicada à cortina, é aplicada à selagem. O método  $FNA$  corresponde ao método de Matos Fernandes [5] na versão, equivalente, apresentada em [6]. Neste método, o pré-esforço é aplicado à parede através de uma força concentrada e é activado posteriormente um elemento barra com comportamento correspondente à curva tracção-deslocamento pretendida, obtida de ensaios de ancoragens, e que une a cabeça da ancoragem a um ponto inicialmente fixo ( $A$ ) com coordenadas iguais às de um ponto do maciço representativo da zona de selagem ( $N$ ). Nas fases seguintes, ao ponto  $A$  vão sendo aplicados os deslocamentos do ponto  $N$ , nas diversas iterações do cálculo. Procura-se, deste modo, ter em conta o comportamento da ancoragem no seu conjunto (comprimento livre e de selagem) e, simultaneamente, ter em atenção os deslocamentos da zona de selagem.

Não se abordam neste trabalho métodos que consideram a modelação do contacto bolbo-maciço através de elementos de junta. Não se abordam, igualmente, os métodos em que o bolbo de selagem

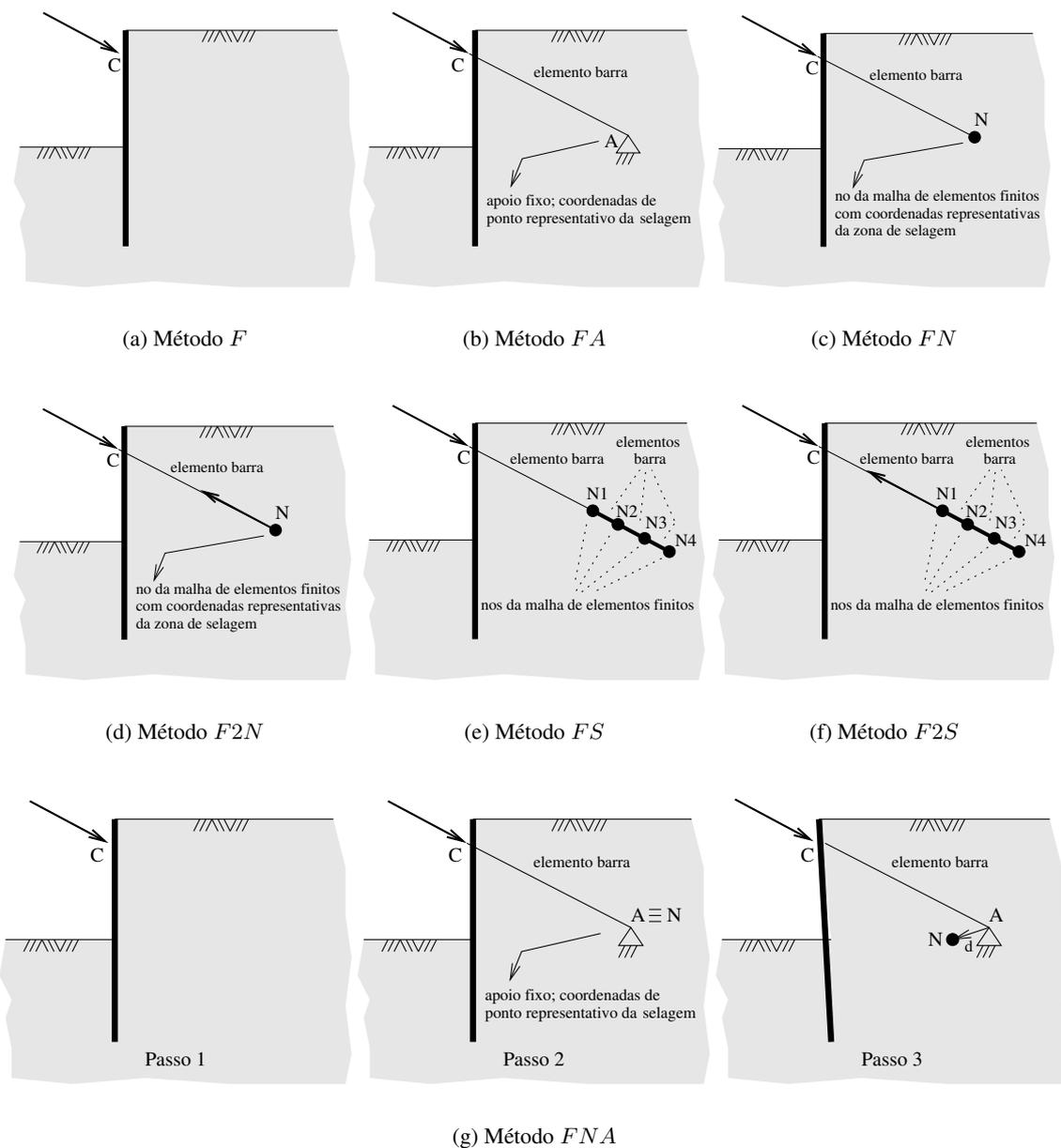


Figura 2 - Métodos de modelação bidimensional de ancoragens analisados.

é modelado explicitamente usando elementos bidimensionais em lugar dos elementos lineares de barra adoptados nos métodos  $FS$  e  $F2S$ . Crê-se, no entanto, que o efeito da (pequena) espessura destes elementos é desprezável, pelo que se esperam conclusões semelhantes às que são obtidas para os referidos métodos.

### 3. DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

Para testar os métodos referidos na secção anterior, considerou-se o caso de estudo que se indica esquematicamente na Figura 3. Trata-se de uma escavação simétrica, com 14 m de profundidade e 16 m de largura, suportada por uma parede moldada de betão armado, ancorada em quatro níveis, com 0.4 m de espessura. O maciço suportado é um solo para o qual foram consideradas duas

hipóteses,  $A$  e  $B$ , tal como se indica no Quadro 1. Neste quadro,  $K_0$  é o coeficiente de impulso em repouso,  $E$  é o módulo de deformabilidade,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\phi'$  é o ângulo de atrito em tensões efectivas,  $c_u$  é a resistência não drenada,  $\delta$  é o ângulo de atrito solo–parede,  $c_a$  é a adesão solo–parede e  $K_s$  é a rigidez tangencial da junta.

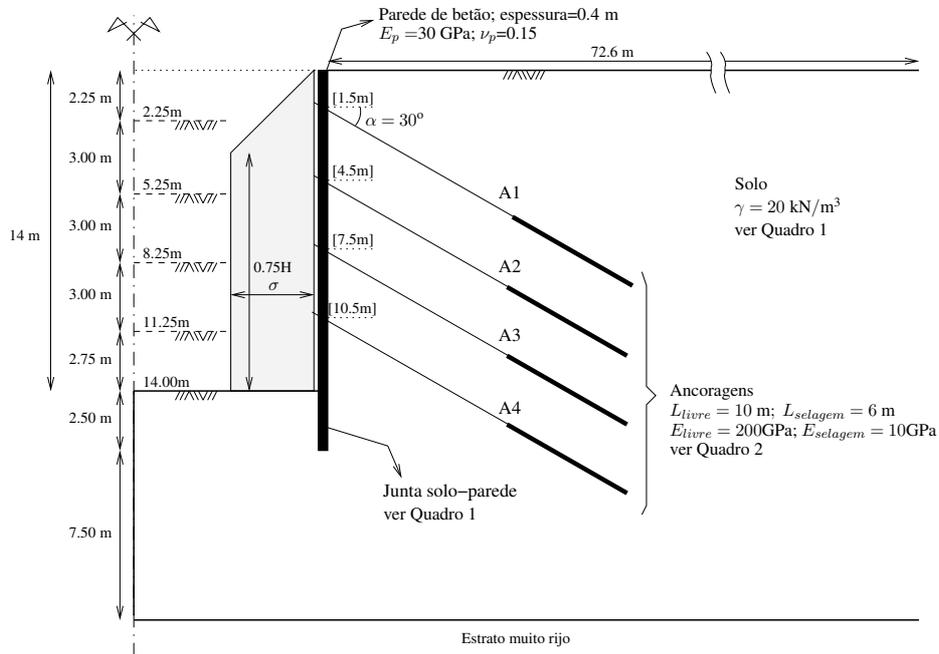


Figura 3 - Caso de estudo

Os solos foram modelados admitindo comportamento elástico–perfeitamente plástico. Sob estes materiais considerou-se que existia um estrato com elevadas características mecânicas.

Quadro 1 - Características adoptadas para os solos e juntas solo–parede

Solo	Descrição	$K_0$	$E$ (kPa)	$\nu$	$\phi'$ (°)	$c_u$ (kPa)	$\delta$ (°)	$c_a$ (kPa)	$K_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
A	areia	0.5	$50000 \left( \frac{\sigma'_v}{p_a} \right)^{0.5}$	0.333	30	—	20	—	22928
B	argila	0.7	48000	0.49	—	80	—	40	—

O pré-esforço nas ancoragens foi definido considerando o diagrama que se representa na Figura 3, com tensão horizontal  $\sigma$  igual a 69.3 kPa (cuja resultante é igual à resultante do diagrama rectangular de Terzaghi e Peck para as areias com tensão horizontal igual a  $0.65K_a\gamma H$  e igual à resultante do diagrama trapezoidal de Terzaghi e Peck para argilas rijas com tensão horizontal igual a  $0.29\gamma H$ ). O valor das forças de pré-esforço aplicadas (segundo a direcção da ancoragem) foi de 103.1 kN/m (1º nível), 238.1 kN/m (2º nível), 242.1 kN/m (3º nível) e 402.0 kN/m (4º nível). As características adoptadas para as ancoragens são as resumidas no Quadro 2 e na Figura 3.

#### 4. MODELO DE CÁLCULO

O programa de elementos finitos utilizado [7, 8, 6], em linguagem Fortran 77, foi desenvolvido para aplicações geotécnicas e permite a resolução de diversos problemas bidimensionais, em deformação plana, tensão plana e estado axissimétrico. As análises podem ser realizadas adoptando

Quadro 2 - Áreas de aço (comprimento livre) e de calda de cimento (comprimento de selagem) adoptadas para as ancoragens

Ancoragens	$A_{livre}$ (m <sup>2</sup> /m)	$A_{selagem}$ (m <sup>2</sup> /m)
A1	$1.4 \times 10^{-4}$	$1.047 \times 10^{-2}$
A2	$2.8 \times 10^{-4}$	$1.047 \times 10^{-2}$
A3	$2.8 \times 10^{-4}$	$1.047 \times 10^{-2}$
A4	$4.2 \times 10^{-4}$	$1.570 \times 10^{-2}$

um modelo de comportamento elastoplástico, com endurecimento e amolecimento, com critérios de Von Mises, Drucker-Prager, Tresca ou Mohr-Coulomb e possui diversos algoritmos de resolução que se baseiam nos métodos de Newton-Raphson e Newton-Raphson modificado.

O solo e a parede foram modelados por elementos finitos subparamétricos de 5 nós, o contacto entre o solo e a parede com elementos junta de 4 nós e as ancoragens (comprimentos livre e de selagem) através de elementos barra de 2 nós. As análises foram realizadas em condições drenadas (solo A) e não drenadas (solo B), usando modelo elástico-perfeitamente plástico, com módulo crescente (solo A) e constante (solo B) em profundidade e usando os critérios de rotura de Mohr-Coulomb (solo A) e Tresca (solo B).

Considerou-se que a escavação seria feita em 5 níveis, indicados na Figura 3, através do procedimento indicado no Quadro 3. Apresenta-se na Figura 4 a malha de elementos finitos usada, na última fase de escavação.

Quadro 3 - Faseamento construtivo adoptado

Fase	Descrição
1	Escavação do 1º nível
2	Activação do bolbo de selagem do 1º nível de anc. ( $F_S$ e $F_{2S}$ ) e aplicação do pré-esforço
3	Activação do comprimento livre do 1º nível de anc. (excepto $F$ ) e escavação do 2º nível
4	Activação do bolbo de selagem do 2º nível de anc. ( $F_S$ e $F_{2S}$ ) e aplicação do pré-esforço
5	Activação do comprimento livre do 2º nível de anc. (excepto $F$ ) e escavação do 3º nível
6	Activação do bolbo de selagem do 3º nível de anc. ( $F_S$ e $F_{2S}$ ) e aplicação do pré-esforço
7	Activação do comprimento livre do 3º nível de anc. (excepto $F$ ) e escavação do 4º nível
8	Activação do bolbo de selagem do 4º nível de anc. ( $F_S$ e $F_{2S}$ ) e aplicação do pré-esforço
9	Activação do comprimento livre do 4º nível de anc. (excepto $F$ ) e escavação do 5º nível

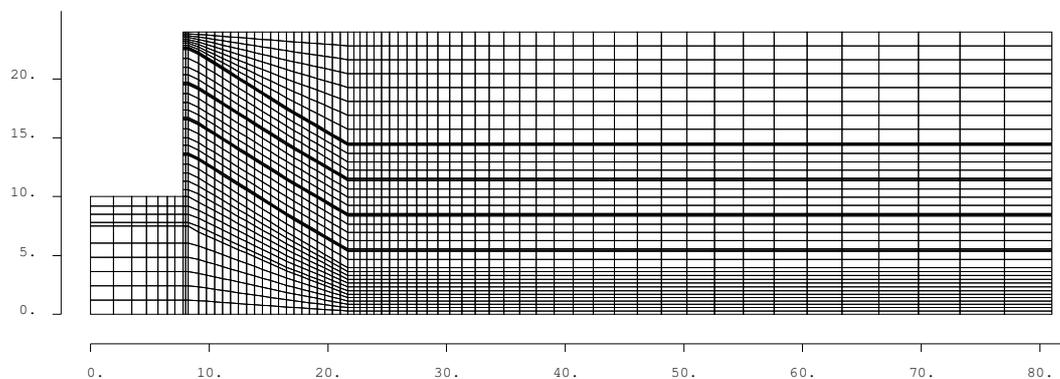


Figura 4 - Malha de elementos finitos na última fase de escavação.

## 5. CÁLCULOS REALIZADOS. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para os dois solos (*A* e *B*) apresentados na secção anterior, foram aplicados os métodos referidos no ponto 2. Os pontos *A* e *N* foram considerados localizados nos locais de ligação entre a zona do comprimento livre e o bolbo de selagem e a rigidez da ancoragem adoptada no método *FNA* foi 90% da rigidez teórica (rigidez do comprimento livre).

Apresenta-se na Figura 5 os resultados dos deslocamentos horizontais da parede e dos assentamentos do terreno suportado na última fase de cálculo obtidos usando os diferentes métodos referidos para os solos *A* e *B*. Não se apresentam resultados para o método *F2N*, no caso do solo *B*, por não ter sido possível terminar o cálculo com um nível de convergência adequado.

A análise desta figura permite constatar que os deslocamentos obtidos pelos métodos *F2N* e *F2S* se afastam claramente dos resultados dos restantes métodos. Em menor grau e apenas claramente visível no caso do solo *B*, o método *FA* fornece resultados um pouco diferentes. Faz-se notar que, neste método, não são tidos em consideração os movimentos devidos ao processo de escavação da zona em que se realizam as selagens das ancoragens, pelo que as diferenças (que, aliás, no caso do solo *A*, praticamente não existem) se explicam facilmente.

Em relação aos métodos *F2N* e *F2S*, o que os distingue dos seus homólogos *FN* e *FS* é o facto de as cargas devidas ao pré-esforço, para além de aplicadas à parede, na zona da cabeça da ancoragem, serem igualmente aplicadas na zona de selagem. Estas transmitem-se pontualmente ao maciço (no caso do método *F2N*) ou distribuem-se pelo comprimento de selagem (no caso do método *F2S*). É, assim, interessante verificar que o efeito desta força seja tão significativo no que respeita aos deslocamentos.

Uma outra conclusão interessante é a que se tira da análise dos resultados dos restantes métodos. Pelo facto de serem praticamente idênticos, os resultados dos deslocamentos permitem constatar que em todos os métodos em que se procura, de algum modo (diferente consoante o método) ter em conta os deslocamentos da zona de selagem conduzam, na prática, aos mesmos resultados dos deslocamentos.

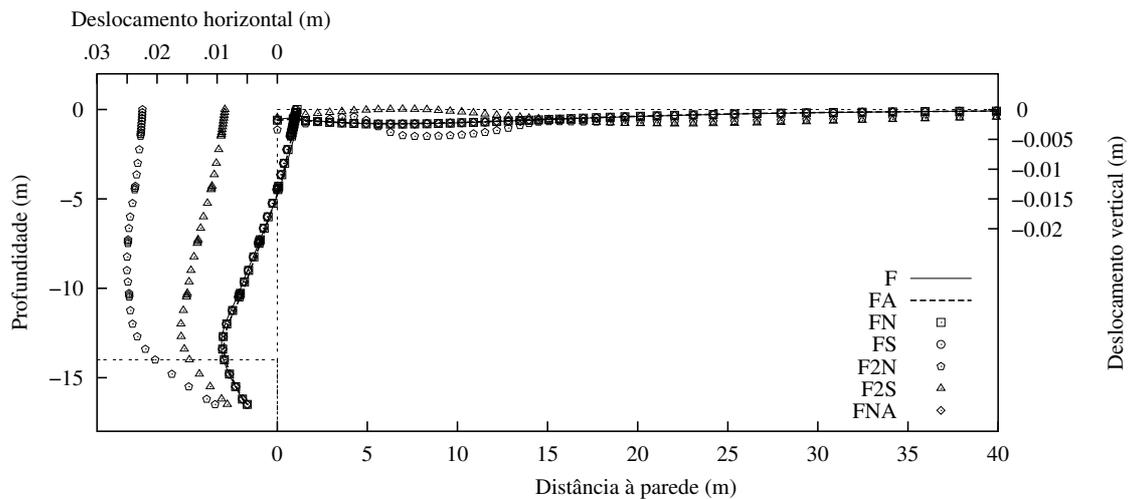
Chama-se, finalmente, a atenção para o facto de o método *F* fornecer também resultados dos deslocamentos praticamente idênticos. Naturalmente que tal se verifica, como se pode constatar pela observação da Figura 6, pelo facto de o pré-esforço ter, nos cálculos apresentados sido escolhido de forma adequada, pelo que se observam, na generalidade dos restantes métodos, variações de carga nas ancoragens relativamente pequenas.

A mesma figura permite observar que as maiores variações de carga são, agora, as do método *FA*, devido à maior rigidez global das ancoragens causada pelo facto de as selagens serem simuladas por apoios fixos. Verifica-se ainda que o método *F2N* apresenta decréscimos de carga significativo e que os restantes apresentam resultados muito próximos entre si.

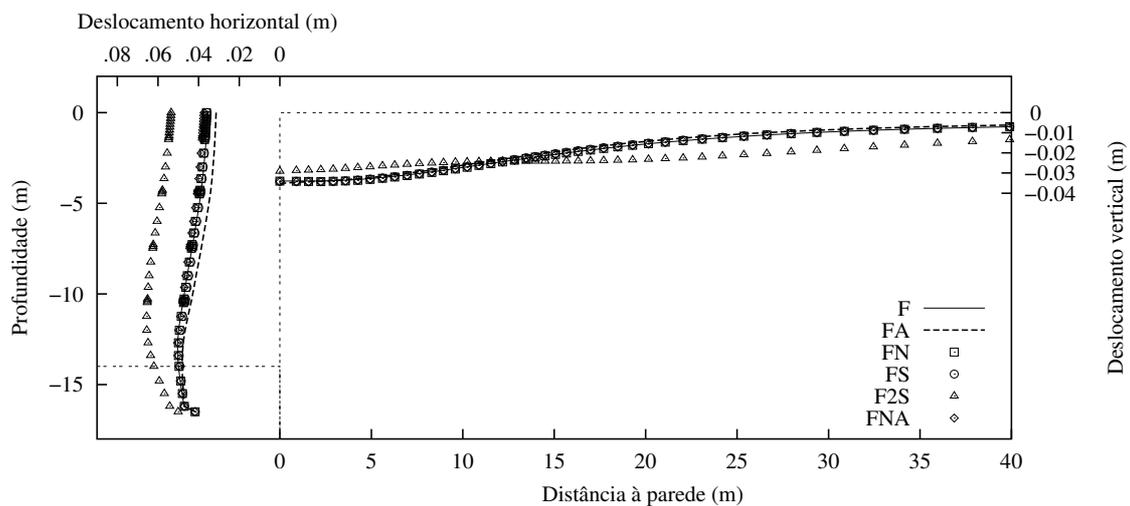
## 6. CONCLUSÕES

A análise dos diversos métodos de modelação bidimensional de ancoragens permitiu concluir que:

- os métodos *FA* e *F2N* não são adequados; o primeiro porque não tem em consideração os deslocamentos da selagem devidos ao processo construtivo e o segundo porque ao aplicar



(a) Solo A

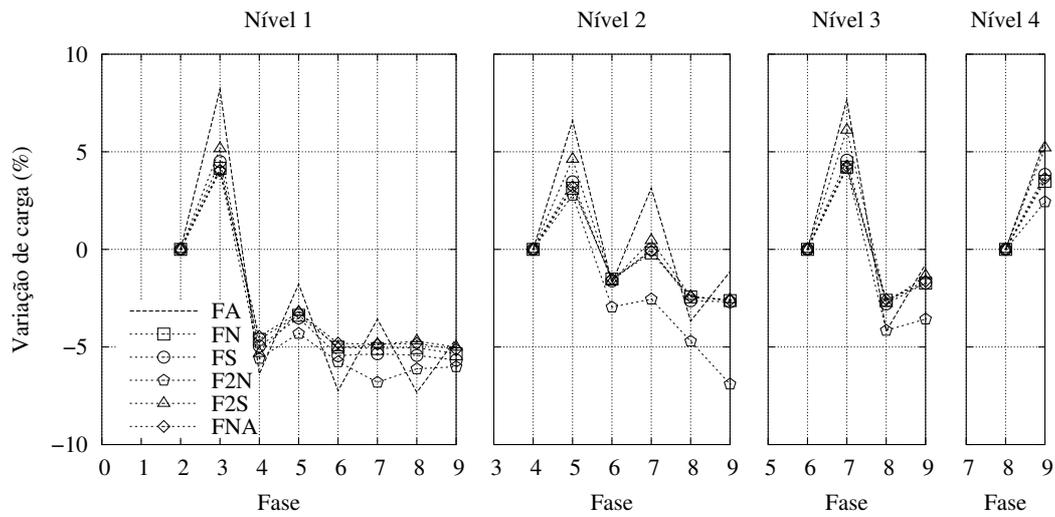


(b) Solo B

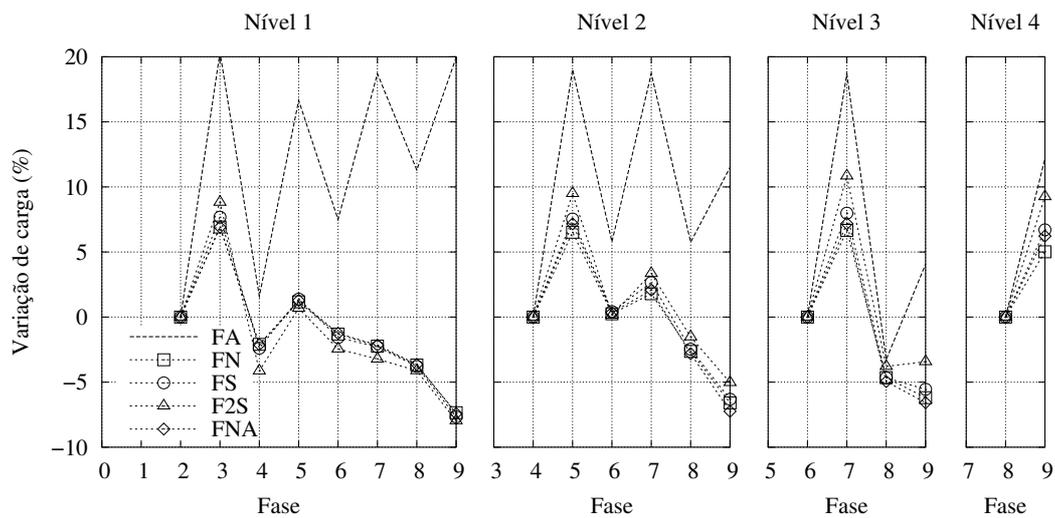
Figura 5 - Deslocamentos horizontais da parede e deslocamentos verticais do maciço suportado na última fase de cálculo.

pontualmente no maciço a carga devida ao pré-esforço causou uma resposta irrealista do maciço que se traduz em deslocamentos elevados e (ou) mesmo na não convergência do processo iterativo de cálculo;

- o método  $F$  pode usar-se como primeira estimativa para avaliação dos deslocamentos nas situações em que não se esperem grandes variações de pré-esforço; não pode, devido à sua natureza, prever variações de carga nas ancoragens;
- os restantes métodos parecem, para as situações analisadas (pré-esforço definido adequadamente e, conseqüentemente, adequado comportamento da escavação) fornecer resultados credíveis; todos estes métodos têm em atenção, de alguma forma, os deslocamentos do ma-



(a) Solo A



(b) Solo B

Figura 6 - Variações de carga nas ancoragens.

ção na zona de selagem;

- verifica-se, praticamente, uma coincidência entre os deslocamentos obtidos dos métodos *FN*, *FS* e *FNA* mas uma clara diferença em relação ao método *F2S*;
- tal diferença deve-se ao efeito sobre os deslocamentos do maciço da aplicação de pré-esforço na selagem;
- as diferenças nas variações de carga nas ancoragens são menos evidentes do que nos deslocamentos e os métodos *FN*, *FS*, *F2S* e *FNA* apresentam resultados semelhantes.

Pode, assim, concluir-se que, nas condições dos cálculos realizados, os métodos que têm em consideração os deslocamentos da zona de selagem devidos ao processo construtivo mas não consideram a acção da selagem no maciço, fornecem praticamente os mesmos resultados.

O método analisado que considera explicitamente o bolbo e a aplicação a este das forças de pré-esforço, de uso corrente em alguns programas comerciais, fornece resultados de deslocamentos superiores. A aplicação destas forças parece ser, à partida, uma opção realista; no entanto, o facto de as forças reais serem concentradas e espaçadas levanta a dúvida de a sua representação bidimensional produzir efeito semelhante. Um passo para o esclarecimento de tal dúvida poderá ser a realização de análises tridimensionais modelando explicitamente o bolbo de selagem e aplicando-lhe as forças devidas ao maciço.

## REFERÊNCIAS

- [1] N. M. C. Guerra, “Paredes de contenção tipo Berlim. Análise de efeitos tridimensionais,” Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1993.
- [2] G. W. Clough e Y. Tsui, “Performance of tied-back walls in clay,” *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, vol. 100, no. 12, pp. 1259–1273, 1974.
- [3] A. C. J. Mineiro, J. A. M. Brito, e J. S. Fernandes, “Étude d’une paroi moulée multi-ancrée,” in *Proceedings of 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 2, (Stockholm, Sweden), pp. 187–192, A. A. Balkema, 1981.
- [4] A. C. Mineiro, J. Mateus de Brito, e J. S. Fernandes, “Estudo duma parede moldada multi-ancorada,” *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, no. 33, 1981.
- [5] M. A. Matos Fernandes, *Estruturas flexíveis para suporte de terras. Novos métodos de dimensionamento*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1983.
- [6] N. M. C. Guerra, *Mecanismo de colapso de cortinas de contenção tipo Berlim por perda de equilíbrio vertical*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 1999.
- [7] A. J. M. S. Cardoso, *A técnica das pregagens em solos aplicada a escavações; métodos de análise e dimensionamento*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1987.
- [8] J. Almeida e Sousa, *Túneis em maciços terrosos. Comportamento e modelação numérica*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 1998.