

# MODELAÇÃO DE ANCORAGENS NAS ANÁLISES 2D POR ELEMENTOS FINITOS DE CORTINAS DE CONTENÇÃO: A QUESTÃO DA SIMULAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO

Modelling anchors in 2D finite element analyses of flexible retaining walls: simulation of pre-stressing

Cláudia Mónica Jerónimo dos Santos Josefino\*

Nuno Manuel da Costa Guerra\*\*

Manuel Matos Fernandes\*\*\*

**RESUMO** – Apresenta-se e testa-se os principais métodos de modelação bidimensional de ancoragens. Conclui-se que a modelação da força de pré-esforço aplicada na selagem tem influência significativa nos resultados de deslocamentos e mostra-se a sua adequabilidade através da análise de resultados de modelação tridimensional. Estuda-se a importância da consideração desta força através de uma análise paramétrica do comprimento livre, do comprimento de selagem, do nível de pré-esforço, da espessura do bolbo de selagem e da rigidez da ancoragem. Tira-se algumas conclusões.

**SYNOPSIS** – The main methods for the simulation of pre-stressed soil anchors in 2D conditions are analysed and tested. It is shown by means of 2D and 3D analyses that applying a pre-stress force at the seal zone has a significant influence on the displacement results. The importance of considering this force is studied in a parametric analysis of: the free length of the anchor, the length of the seal zone, the pre-stress level, the seal zone thickness and the anchor stiffness. Some conclusions are drawn.

**PALAVRAS CHAVE** – Modelação; ancoragens; método dos elementos finitos; cortinas de contenção.

## 1 – INTRODUÇÃO

A modelação numérica de obras geotécnicas é, actualmente, bastante frequente. Com este tipo de cálculos é possível analisar problemas de geometria e faseamento construtivo relativamente complexos, prever o seu comportamento e realizar análises de sensibilidade de diversos parâmetros. O caso das estruturas de suporte flexíveis não é excepção.

Todos os problemas da Engenharia Civil e, em particular, da Geotecnia, são problemas tridimensionais. No entanto, ainda não é frequente a utilização de cálculos numéricos tridimensionais para a modelação de problemas geotécnicos correntes. Os problemas geotécnicos em geral e, em especial, os problemas de escavações suportadas por cortinas ancoradas são, em geral, modelados por meio de análises em deformação plana, tirando partido da maior ou menor adequabilidade da

---

\* Estudante de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

E-mail: claudiajosefino@netcabo.pt

\*\* UNIC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. E-mail: nguerra@fct.unl.pt

??? Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

E-mail: mfern@fe.up.pt

geometria real a este estado plano ou assumindo a simplificação que a ele está inerente por, simplesmente, se tratar de uma análise “conservativa”.

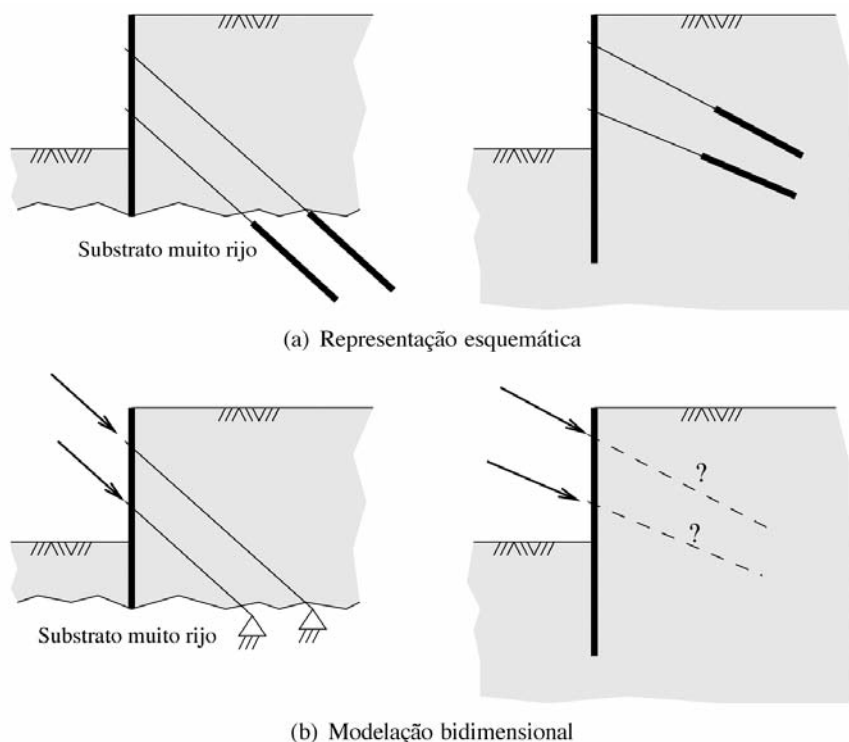
As simplificações do problema na passagem do real ao modelo plano são conhecidas e facilmente compreendidas no que respeita ao terreno, à geometria da escavação ou às características da parede. No entanto, com este tipo de modelação está-se a fazer uma simplificação cujas consequências são difíceis de avaliar no que respeita à modelação de ancoragens. Com efeito, tratando-se de elementos lineares e em regra relativamente espaçados, envolvem sem dúvida um equilíbrio claramente tridimensional. Como, então, modelar bidimensionalmente as ancoragens?

O presente artigo pretende contribuir para o esclarecimento desta questão, analisando, nas secções 2 e 3 resultados previamente publicados (Santos Josefino *et al.*, 2006; Guerra *et al.*, 2007) e procedendo no restante trabalho à análise mais detalhada das implicações desses resultados, através de análise paramétrica que os pretende aprofundar.

## 2 – MÉTODOS DE MODELAÇÃO BIDIMENSIONAL DE ANCORAGENS

### 2.1 – A simplificação bidimensional

As ancoragens são elementos lineares que exercem uma acção concentrada quer na cortina, onde se situa a cabeça da ancoragem, quer no maciço de selagem e envolvem, portanto, importantes efeitos tridimensionais. Constituem, assim, uma dificuldade para a modelação da escavação 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 (Figura 1).



**Fig. 1** – Ancoragens pré-esforçadas seladas no terreno com selagem fixa, à esquerda, e móvel, à direita (Santos Josefino *et al.*, 2006).

Tratando-se de uma escavação em que a selagem é realizada num maciço com características de resistência e de deformabilidade significativamente superiores às do maciço a suportar (à esquerda, na Figura 1), os deslocamentos que o maciço de selagem experimenta induzidos pela 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 1), os deslocamentos da zona de selagem devidos à escavação poderão já não ser desprezáveis.

O problema que decorre do carácter tridimensional da acção concentrada da cabeça da ancoragem na parede é comum a ambos os casos e é resolvido considerando a sua acção por unidade de comprimento longitudinal. A questão da acção tridimensional do bolbo de selagem tem, no que respeita à sua modelação, tratamento distinto num caso e noutro.

No caso da selagem fixa a modelação é habitualmente feita aplicando à parede a força 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 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, em seguida discutidas.

## 2.2 – Principais métodos de modelação bidimensional de ancoragens

Santos Josefino *et al.* (2006) apresentaram os principais métodos bidimensionais de modelação de ancoragens, que se resumem na Figura 2.

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 induzidos pela escavação na zona de selagem. A ancoragem é, assim, modelada por um elemento barra e por um apoio fixo.

O método *FN* (Guerra, 1993) 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 força na ancoragem e, consequentemente, 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 *FSB* 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 *F2SB*, mais corrente, que foi usado por Clough e Tsui (1974) e por Mineiro *et al.* (1981) 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 (1983) na versão, equivalente, apresentada em Guerra (1999). 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. Esta barra 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

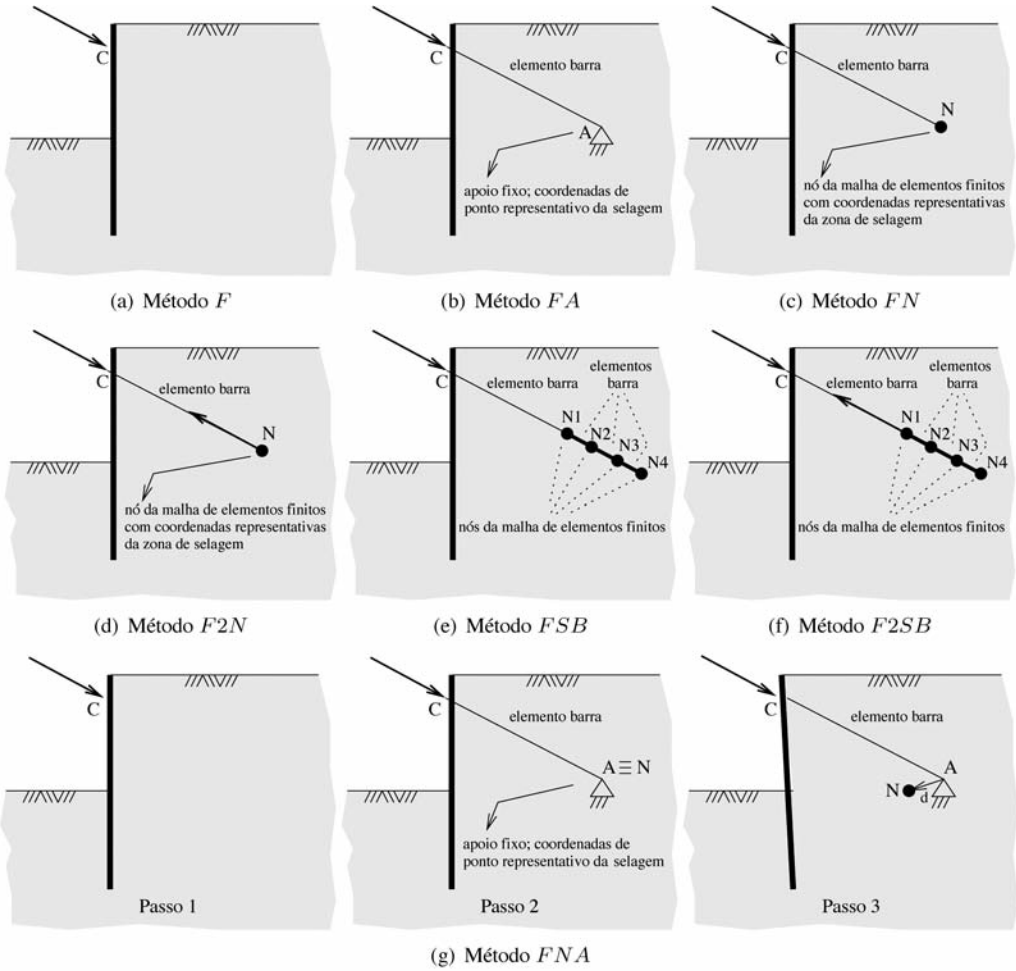


Fig. 2 – Secção de instrumentação tipo.

o comportamento da ancoragem no seu conjunto (comprimento livre e de selagem) e, simultaneamente, ter em atenção os deslocamentos da zona de selagem.

Para além destes métodos, poderá ainda considerar-se aqueles em que o bolbo de selagem é modelado explicitamente usando elementos bidimensionais em lugar dos elementos lineares de barra adoptados nos métodos *FSB* e *F2SB*. Designar-se-ão estes métodos como *FSP* e *F2SP*. Como se verá, o efeito da pequena espessura destes elementos é desprezável.

Poderia ainda considerar-se métodos em que o contacto da selagem com o solo é modelado através de elementos de junta. A introdução destes elementos permite, por um lado, a reprodução das condições de deslizamento entre o bolbo de selagem e o maciço, mas, por outro, dada a condição plana, favorece a formação de superfícies de deslizamento no maciço que são irreais. Com efeito, desprezando a resistência de ponta do bolbo, se se considerar um bolbo de selagem com comprimento  $L_{\text{selagem}}$  e diâmetro  $D_{\text{selagem}}$  poderá, numa análise simplificada, considerando uma resistência ao corte no contacto solo-bolbo de selagem igual a  $\tau_r$ , admitir-se que a resistência total é:

$$F_r = \pi D_{\text{selagem}} L_{\text{selagem}} \tau_r \quad (1)$$

Considerando um espaçamento longitudinal entre ancoragens igual a  $s_{anc}$ , a resistência por unidade de comprimento é, portanto:

$$\frac{F_r}{s_{anc}} = \frac{\pi D_{selagem} L_{selagem} \tau_r}{s_{anc}} \quad (2)$$

No modelo, no entanto, a resistência por unidade de comprimento será:

$$\frac{\pi D_{selagem} L_{selagem} \tau_r}{s_{anc}} = 2 L_{selagem} \tau_r^{modelo} \Rightarrow \tau_r^{modelo} = \frac{\pi D_{selagem}}{2 s_{anc}} c_u \quad (4)$$

Se se substituir, como exemplo,  $D_{selagem}$  por 0,2 m e  $s_{anc}$  por 3 m, a equação anterior resulta em:

$$\tau_r^{modelo} \simeq 0,1 c_u \quad (5)$$

Como conclusão a esta análise simplificada, pode dizer-se que a adopção de elementos junta exigiria que a resistência que lhes fosse atribuída fosse significativamente mais baixa do que a resistência do solo. Tal poderia, como se afirmou, favorecer a formação de superfícies de deslizamento irreais no maciço. Conclusão semelhante poderia tirar-se para o caso da análise da deformabilidade do contacto solo-bolbo. Não é, por isso, um método habitualmente aconselhado.

### 2.3 – Caso de estudo numérico para o estudo dos principais métodos de modelação bidimensional de ancoragens

Para testar os métodos referidos na secção anterior, Santos Josefino *et al.* (2006) consideraram 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, com 0,4 m de espessura, ancorada em quatro níveis. 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 resistência ao corte 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 que representa a interface solo–parede.

Os solos foram modelados admitindo comportamento elástico–perfeitamente plástico, com comportamento drenado (solo A) e não drenado (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 de Tresca (solo B). Sob estes materiais considerou-se que existia um estrato com elevadas características mecânicas. A parede foi admitida com comportamento elástico–linear.

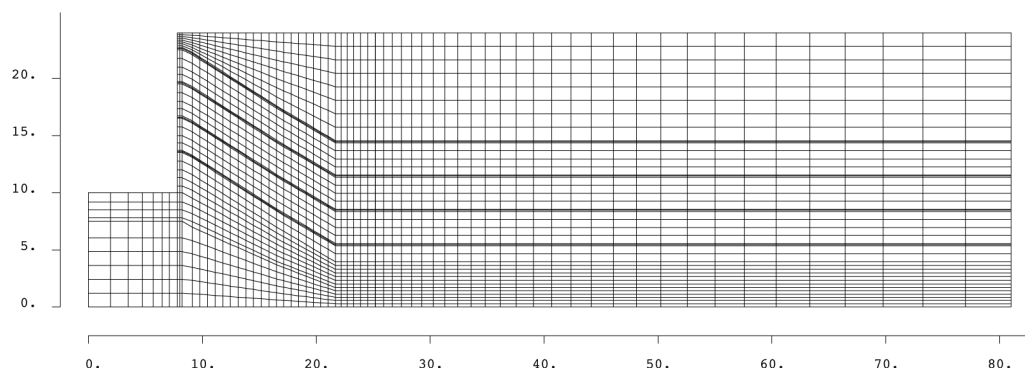
O pré-esforço nas ancoragens foi definido considerando o diagrama que se representa na Figura 3, com tensão horizontal igual a 69,3 kPa (cuja resultante é igual à resultante do diagrama rectangular de Terzaghi e Peck para as areias com tensão horizontal igual a  $0,65 K_a \gamma H$  e igual à resultante do diagrama trapezoidal de Terzaghi e Peck para argilas rijas com tensão horizontal igual a  $0,29 \gamma H$ ). Os valores das forças de pré-esforço aplicadas (segundo a direcção da ancoragem) foram 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.

Os métodos referidos na secção 2.2 foram testados usando análises numéricas por elementos finitos através de programa de cálculo desenvolvido para aplicações geotécnicas (Cardoso, 1987; Almeida e Sousa, 1998; Guerra, 1999).



**Quadro 3** – Faseamento construtivo adoptado (Santos Josefino et al., 2006).

Fase	Descrição
1	Escavação do 1o nível
2	Activação do bolbo de selagem do 1º nível de anc. ( <i>FSB</i> e <i>F2SB</i> ) e aplicação do pré-esforço
3	Activação do comprimento livre do 1º nível de anc. (excepto <i>F</i> ) e escavação do 2º nível
4	Activação do bolbo de selagem do 2º nível de anc. ( <i>FSB</i> e <i>F2SB</i> ) e aplicação do pré-esforço
5	Activação do comprimento livre do 2º nível de anc. (excepto <i>F</i> ) e escavação do 3º nível
6	Activação do bolbo de selagem do 3º nível de anc. ( <i>FSB</i> e <i>F2SB</i> ) e aplicação do pré-esforço
7	Activação do comprimento livre do 3º nível de anc. (excepto <i>F</i> ) e escavação do 4º nível
8	Activação do bolbo de selagem do 4º nível de anc. ( <i>FSB</i> e <i>F2SB</i> ) e aplicação do pré-esforço
9	Activação do comprimento livre do 4º nível de anc. (excepto <i>F</i> ) e escavação do 5º nível



**Fig. 4** – Malha de elementos finitos na última fase de escavação.

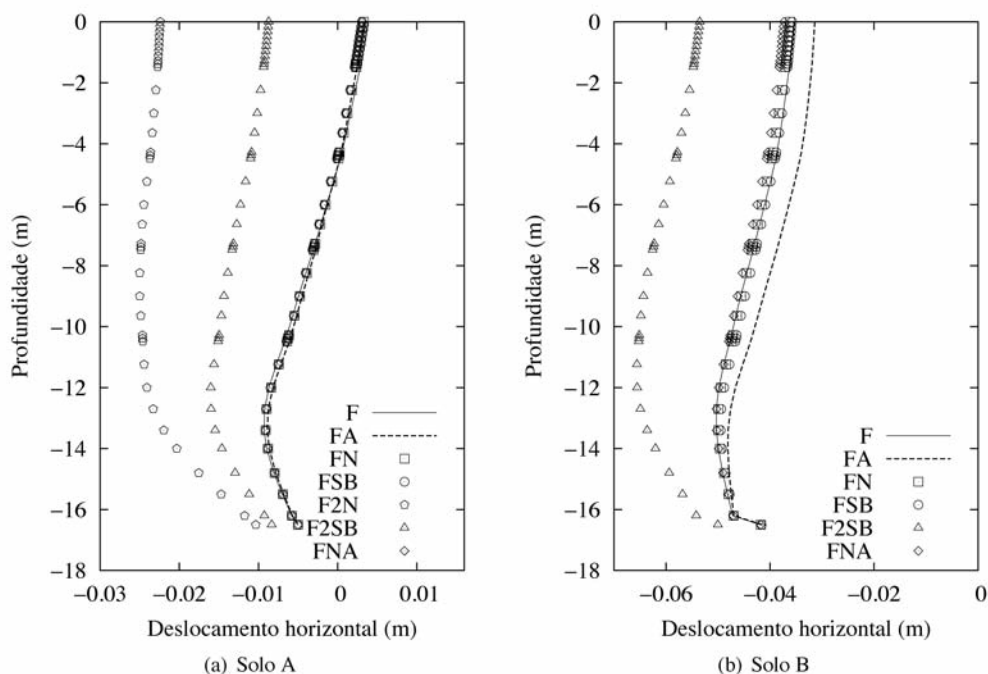
Para o caso do método *FNA*, os pontos *A* e *N* foram considerados na ligação entre a zona do comprimento livre e o bolbo de selagem e a rigidez da ancoragem adoptada foi 90% da rigidez teórica (rigidez do comprimento livre), admitindo comportamento elástico-linear.

Apresenta-se na Figura 5 os resultados dos deslocamentos horizontais da parede na última fase de cálculo obtidos para os solos A e B usando os diferentes métodos referidos. 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 Figura 6 mostra as correspondentes variações de força nas ancoragens. A análise conjunta destas figuras permite constatar que:

- em termos de deslocamentos, apenas se distinguem os métodos *F2N* e *F2SB*; trata-se dos métodos em que a força devida ao pré-esforço é aplicada no maciço, para além de o ser na cabeça da ancoragem, o que mostra, portanto, a importância daquela força; no caso do solo B, distingue-se igualmente o método *FA*; os restantes métodos fornecem resultados praticamente iguais;
- os restantes métodos, para as situações analisadas (pré-esforço definido adequadamente e, consequentemente, adequado comportamento da escavação) fornecem resultados praticamente coincidentes; todos estes métodos têm em atenção, de alguma forma, os deslocamentos do maciço na zona de selagem;
- o método *F2N* fornece resultados de deslocamentos bastante superiores no caso do solo A e não foi possível obter a convergência, no caso do solo B; a razão para isso parece ser a aplicação pontual, no maciço, da força devida ao pré-esforço;





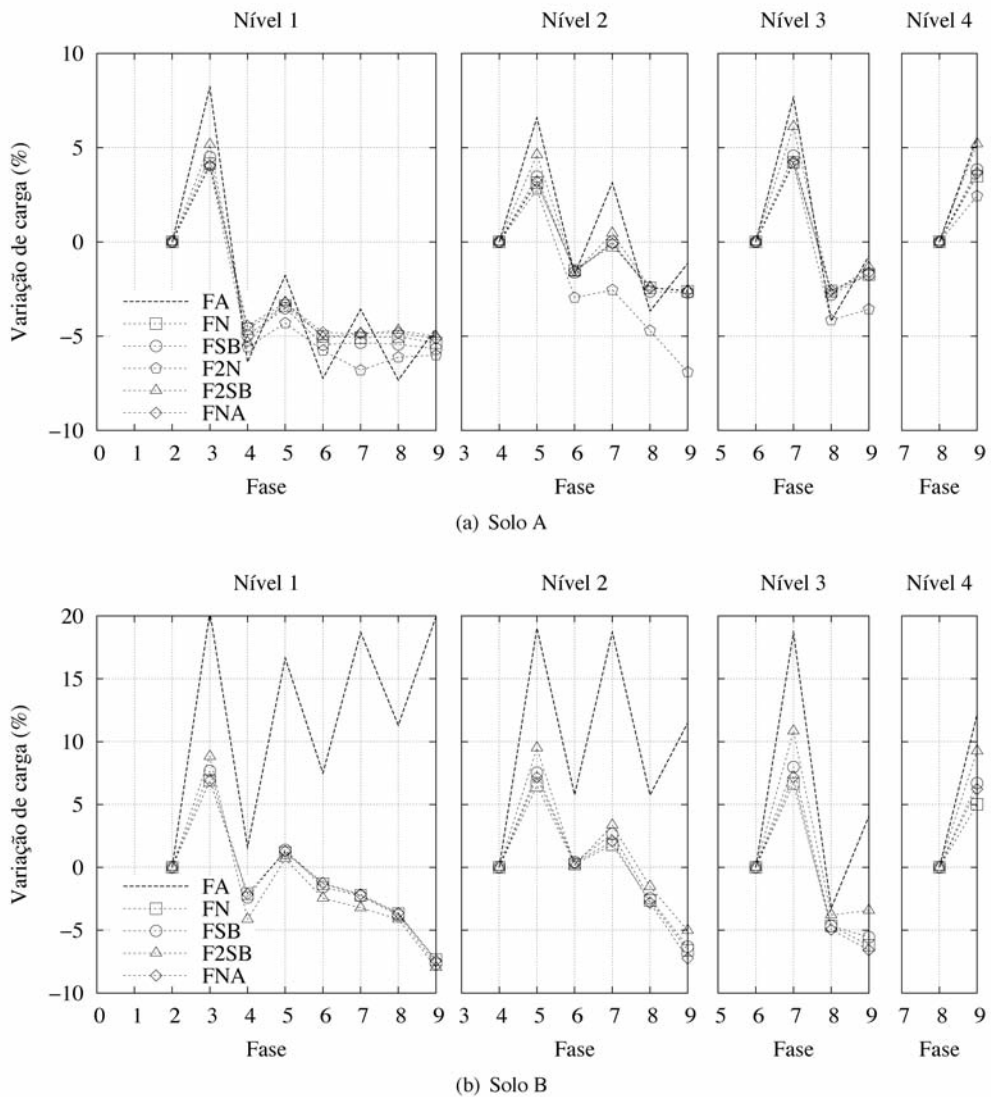
**Fig. 5** – Deslocamentos horizontais da parede na última fase nos cálculos para teste dos métodos de modelação bidimensional de ancoragens (adaptado de Santos Josefino *et al.* (2006)).

- o método *FA* não tem em consideração os deslocamentos da selagem devidos ao processo construtivo; tal revelou-se mais importante no caso do solo B do que no A, em que os resultados são muito semelhantes;
- 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 força nas ancoragens;
- excluindo-se da análise os métodos *F2N* e *FA*, verifica-se que a principal diferença está entre o método *F2SB* e os restantes; tal diferença deve-se ao efeito sobre os deslocamentos do maciço da aplicação de pré-esforço na selagem;
- as diferenças nas variações de força nas ancoragens são menos evidentes do que nos deslocamentos e os métodos *FN*, *FSB*, *F2SB* 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. Para além destes, o método *F* (e *FA*, no caso do solo A) forneceram resultados semelhantes. Tais resultados devem-se, no entanto, às adequadas condições de pré-esforço escolhidas; se o pré-esforço aplicado tivesse sido menor, as variações de carga nas ancoragens teriam sido superiores e o método *F* seria, naturalmente, incapaz de as considerar.

Por outro lado, o modo de aplicação da força parece ser muito relevante. O método analisado que considera explicitamente o bolbo e a aplicação a este das forças de pré-esforço fornece resultados de deslocamentos superiores. A aplicação destas forças no modelo parece ser, à partida, uma opção realista; no entanto, o facto de as forças reais serem concentradas e espaçadas levanta a dú-





**Fig. 6** – Variações de força nas ancoragens nos cálculos para teste dos métodos de modelação bidimensional de ancoragens (Santos Josefino *et al.*, 2006).

vida de a sua representação bidimensional produzir efeito semelhante. Um passo para o esclarecimento de tal dúvida será a realização de análises tridimensionais modelando explicitamente o bolbo de selagem e aplicando-lhe as forças devidas ao pré-esforço.

### 3 – EFEITO DA FORÇA DE PRÉ-ESFORÇO APLICADA NA SELAGEM: ESTUDO TRIDIMENSIONAL

As referidas análises tridimensionais foram apresentadas em Guerra *et al.* (2007). Para o caso do solo *B*, anteriormente apresentado, foram realizadas duas análises por elementos finitos, através do programa de cálculo Plaxis 3D. Em ambos os casos a selagem foi explicitamente modelada

através de elementos finitos tridimensionais (a forma da selagem foi simplificada considerando paralelepípedica, consistindo num método de modelação que se designa por *FST*); as ancoragens aplicam uma força concentrada na cabeça e foram consideradas com um espaçamento longitudinal de 3 m, pelo que foi modelada através de uma “fatia” de 1,5 m de espessura, admitindo uma escavação muito longa e tirando partido da simetria do problema (Figura 7). Na Figura 8 representa-se a malha de elementos finitos tridimensional utilizada. Numa das análises não foi aplicada qualquer força à selagem (*FST*) e na outra análise a força de pré-esforço foi-lhe aplicada (*F2ST*).

A rigidez à flexão  $EI$  adoptada para a cortina corresponde a uma parede de betão armado com 0,4 m de espessura.

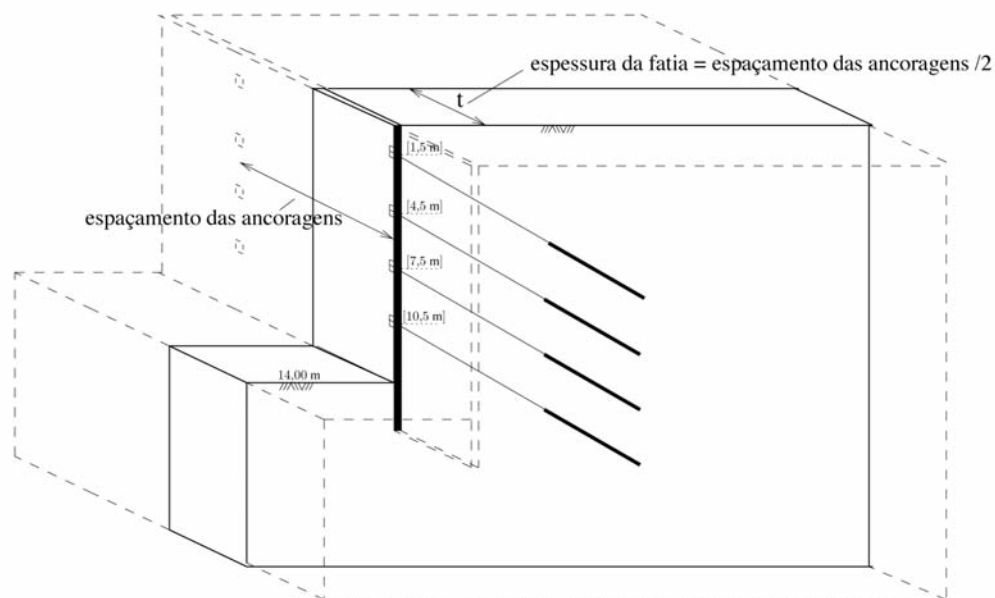


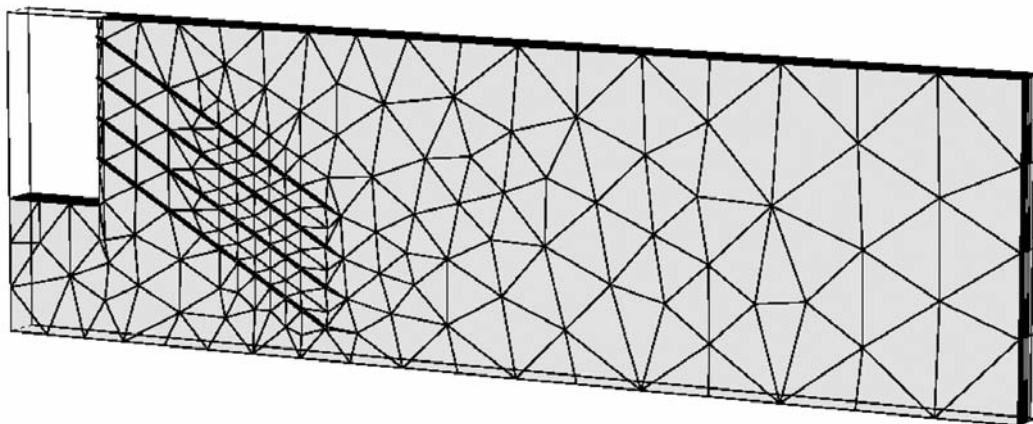
Fig. 7 – Geometria do problema tridimensional (adaptado de Guerra *et al.* (2007)).

Apresenta-se os resultados dos deslocamentos obtidos de ambos os cálculos na Figura 9(a), na qual se incluem também os anteriormente obtidos dos cálculos bidimensionais. No caso dos cálculos 3D, mostra-se os deslocamentos para dois planos extremos da fatia: o plano da frente (*PF*), que é o plano das ancoragens, no qual as forças são aplicadas e o plano de trás (*PT*), que dista 1,5 m do da frente e que se encontra, portanto, a meio de dois planos das ancoragens.

A análise da figura mostra que:

- não há, na prática, diferença entre os resultados dos dois planos das análises 3D;
- não há, na prática, diferença entre os resultados dos cálculos 2D e 3D e, portanto, as diferenças entre os métodos *FSB* e *F2SB* observam-se igualmente em condições tridimensionais.

O facto de os resultados dos planos da frente e de trás serem coincidentes pode explicar-se pelo espaçamento relativamente pequeno das ancoragens (3 m) e pela relativamente elevada rigidez da parede. Um segundo conjunto de dois cálculos tridimensionais considerando espaçamento longitudinal das ancoragens de 6 m e uma rigidez da parede dez vezes inferior conduziu aos resultados



**Fig. 8** – Malha de elementos finitos tridimensional (adaptado de Guerra *et al.* (2007)).

que se apresentam na Figura 9(b), em que os deslocamentos são comparados com correspondentes análises 2D com igual valor da rigidez. A análise desta figura mostra resultados diferentes entre os dois planos e que os deslocamentos do cálculo 2D estão, aproximadamente, entre ambos.

As conclusões mais relevantes dos cálculos 3D são, no entanto, que as diferenças entre os cálculos *FSB* e *F2SB* persistem em condições tridimensionais (*FST* e *F2ST*), o que mostra que a aplicação das forças na selagem é realista e relevante e, portanto, deve ser tida em consideração na modelação das ancoragens.

## **4 – CLARIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DA FORÇA DE PRÉ-ESFORÇO APLICADA NA SELAGEM. ANÁLISE PARAMÉTRICA**

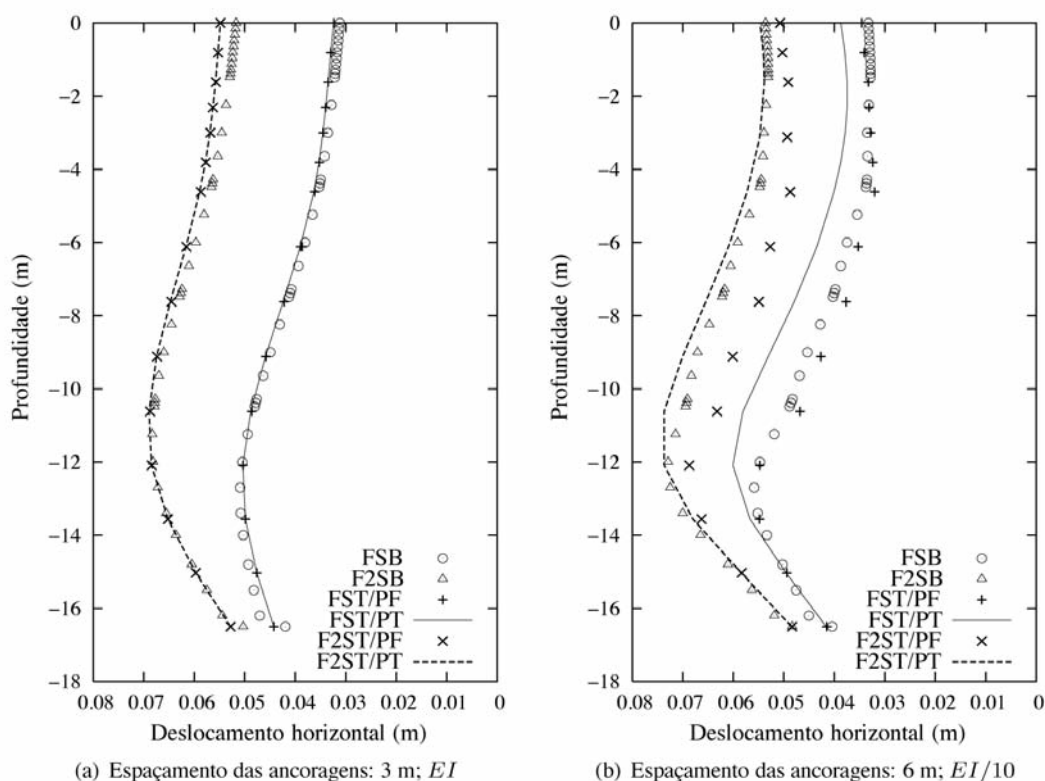
### **4.1 – Introdução**

Nas secções anteriores concluiu-se da importância da consideração no modelo de cálculo bidimensional das duas forças que simulam o pré-esforço: uma aplicada na parede e uma outra na selagem. Nesta secção procede-se a uma análise paramétrica dos factores que mais influência têm no comportamento de estruturas de contenção ancoradas. O método base para a realização da referida análise é o *F2SB*, ou seja, aquele que considera ambas as forças referidas e que se mostrou mais adequado, de entre os métodos analisados, para reproduzir o comportamento da estrutura. Confrontam-se os resultados obtidos com os que resultam da aplicação do método *FSB*, isto é, do método correspondente ao anterior sem a contribuição da força na selagem.

A análise incide sobre os seguintes aspectos:

- comprimento livre;
- comprimento de selagem;
- nível de pré-esforço;
- espessura do bolbo de selagem;
- rigidez da ancoragem.

Como se verá, na análise da influência da espessura do bolbo de selagem serão utilizados também os métodos *FSP* e *F2SP*.



**Fig. 9** – Deslocamentos horizontais da parede na última fase de escavação: comparação entre os métodos *FSB* (2D) e *FST* (3D).

## 4.2 – Apresentação do problema base

A geometria do problema base é idêntica ao caso de estudo apresentado na secção 2. Considerou-se igualmente uma parede de 0,4 m de espessura com as propriedades do betão. As zonas de comprimento livre e de selagem dos quatro níveis de ancoragens têm as propriedades descritas no Quadro 2. Os comprimentos livre e de selagem da situação de referência são, respectivamente, 10 e 6 m. O bolbo foi, na situação de referência, simulado por elementos barra, ou seja, com espessura nula, conforme anteriormente descrito. Consideraram-se quatro tipos de solos diferentes, dois arenosos (solos *C1* e *C2*) e dois argilosos (solos *D1* e *D2*). É de notar que os solos *C2* e *D2* são mais deformáveis que os solos *C1* e *D1*, respectivamente.

Considerou-se que os quatro tipos de solo seriam modelados pela utilização do modelo de comportamento *Hardening Soil* disponível no programa de cálculo *Plaxis 2D*, utilizado para efetuar os cálculos necessários à presente análise paramétrica. Consideraram-se os parâmetros que se indicam no Quadro 4 para os quatro solos analisados.

Os parâmetros do solo *C1* (areia) foram escolhidos com base na proposta de Guedes de Melo (2007) para a formação das areolas da Estefânia (Lisboa), que corresponde a um solo arenoso denso, fortemente sobreconsolidado. Os parâmetros do solo *C2* correspondem a uma areia solta a medianamente compacta.

Os parâmetros do solo *D1* correspondem a um solo argiloso rijo, sobreconsolidado, com as características das Argilas e Calcários dos Prazeres (Lisboa). O solo *D2* corresponde a um material argiloso ligeiramente sobreconsolidado.

**Quadro 4** – Características do maciço suportado.

	Solo C1	Solo C2	Solo D1	Solo D2
Tipo de solo	areia	areia	argila	argila
Comportamento considerado	drenado	drenado	não drenado	não drenado
$c'$ (kPa)	0	0	0	0
$\phi'$ (°)	41	32	35	28
$\psi$ (°)	8	2	5	0
$m$	0,5	0,5	0,7	1
$K_0$	0,8	0,470	0,68	0,7
$K_{0nc}$	0,344	0,470	0,425	0,531
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	18	21	21
$E_{50}^{ref}$ (kPa)	$9 \times 10^4$	$2,5 \times 10^4$	$3,2180 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$
$E_{oesi}^{ref}$ (kPa)	$9 \times 10^4$	$2,5 \times 10^4$	$3,2180 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$
$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	$2,7 \times 10^5$	$7,5 \times 10^4$	$9,6540 \times 10^4$	$4,5 \times 10^4$
$R_f$	0,90	0,90	0,95	0,95

As análises correspondentes aos solos C1 e C2 (arenosos) foram conduzidas em condições drenadas; as análises correspondentes aos solos D1 e D2 (argilosos) foram conduzidas em condições não drenadas. Todas as análises foram realizadas em tensões efectivas.

Os parâmetros atribuídos ao solo D1 basearam-se nos parâmetros em tensões totais obtidos para as formações das Argilas e Calcários dos Prazeres por Moreira *et al.* (2004). Os parâmetros atribuídos, em tensões efectivas, foram tais que o comportamento não drenado seja, tanto quanto possível, equivalente ao que é obtido considerando os parâmetros em tensões totais fornecidos pelos referidos autores.

O pré-esforço das ancoragens foi escolhido por forma a que as suas componentes horizontais equilibrassem o diagrama indicado na Figura 3; o valor de  $\sigma$  foi definido em todos os casos de modo a que os deslocamentos sejam razoáveis. Define-se o parâmetro  $\eta$  por forma a que:

$$\sigma = \eta \gamma H \quad (6)$$

Os valores definidos como referência foram:  $\eta_{ref} = 0,132$  no caso do solo C1; 0,170 no caso do solo C2; 0,215 nos casos dos solos D1 e D2.

As componentes horizontais das forças de pré-esforço consideradas indicam-se no Quadro 5. As características adoptadas para as ancoragens no que respeita aos comprimento livre e de selagem são as resumidas no Quadro 2 e na Figura 3.

### 4.3 – Análises Efectuadas

As análises realizadas tiveram como objectivo concluir acerca da importância dos vários aspectos anteriormente mencionados na modelação bidimensional de ancoragens: comprimento livre, comprimento de selagem, espessura do bolbo de selagem, nível de pré-esforço e rigidez da ancoragem, resumindo-se no Quadro 6 as variações consideradas. Apresenta-se a **negrito** os parâmetros considerados na situação base. Faz-se notar que os cálculos foram realizados considerando o bolbo de selagem sem espessura (modelação do comprimento de selagem por meio de elementos barra), com excepção dos cálculos para análise da consideração do efeito da espessura do bolbo, em que este foi admitido com 20 cm e 40 cm, através da introdução de elementos planos e, portanto, da utilização dos métodos *FSP* e *F2SP*.

**Quadro 5** – Componentes horizontais do pré-esforço.

Nível de ancoragem	Solo C1 (kN/m)	Solo C2 (kN/m)	Solo D1 (kN/m)	Solo D2 (kN/m)
1º	26	31	53	53
2º	103	119	205	205
3º	111	129	221	221
4º	214	247	295	295

**Quadro 6** – Análise paramétrica: valores dos parâmetros  
(indica-se a **[negrito]** os parâmetros da situação base.

Parâmetro analisado	Análise (a)	Análise (b)	Análise (c)	Análise (d)	Análise (e)
Comprimento Livre (m)	5	<b>[10]</b>	20	30	–
Comprimento de Selagem (m)	3	<b>[6]</b>	12	–	–
Espessura do Bolbo (cm)	<b>[0]</b>	20	40	–	–
Nível de Pré-esforço	$\eta_{ref}/2$	<b><math>[\eta_{ref}]</math></b>	$2\eta_{ref}$	–	–
Rigidez da Ancoragem	$EA/10$	$EA/2$	<b><math>[EA]</math></b>	$EA \times 2$	$EA \times 10$

#### 4.4 – Influência do comprimento livre

Uma das razões pelas quais o comprimento livre é importante, numa estrutura de suporte ancorada, é porque o seu valor condiciona a distância do bolbo de selagem à estrutura de suporte. Esta distância é importante, por um lado, por considerações de estabilidade (ver Figura 10) e, por outro, pelo facto de quanto mais afastado estiver o bolbo de selagem menos significativo será, em princípio, o efeito que terá sobre a estrutura de suporte, em especial se se modelar o efeito da força aplicada na selagem.

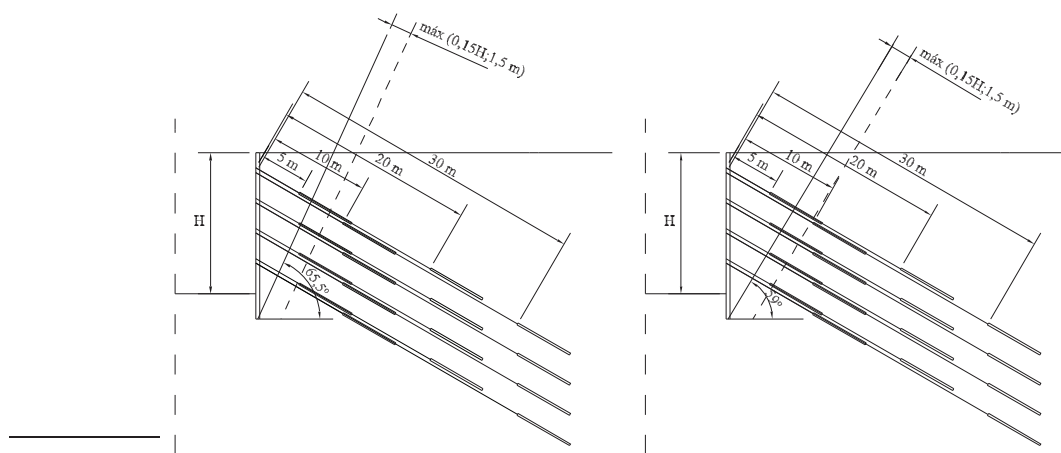
É este último aspecto que justifica a análise da influência do comprimento livre no presente trabalho. Considerou-se, como foi referido, os valores do comprimento livre de 5, 10, 20 e 30 m. O valor de 5 m de comprimento livre corresponde ao mínimo correntemente utilizado.

As Figuras 11 a 14 exibem os deslocamentos horizontais da parede e os assentamentos da superfície do maciço suportado face à variação do comprimento livre para os quatro solos referidos e para os métodos *F2SB* e *FSB*.

A análise destas figuras permite concluir que:

- há uma influência muito significativa do comprimento livre nos deslocamentos da estrutura de suporte e do terreno suportado, no caso do método *F2SB*;
- esta influência não se manifesta, praticamente, no método *FSB*; neste caso, as diferenças entre os diversos cálculos são, sobretudo, dependentes da rigidez; ora sendo a rigidez da ancoragem um aspecto relativamente secundário no comportamento de cortinas ancoradas, as diferenças não são, portanto, muito significativas, o que se confirma pela observação das figuras;
- as diferenças nos deslocamentos são mais significativas nos deslocamentos horizontais da parede do que nos assentamentos da superfície do terreno;
- no caso do menor valor do comprimento livre analisado verifica-se, para o caso do método *F2SB*, deslocamentos substancialmente superiores aos restantes, não só os deslocamentos horizontais da cortina mas também, e especialmente, os assentamentos do terreno suportado; tais assentamentos, especialmente observáveis nos casos dos solos C1, C2 e D2, são prova-

velmente justificados pelo facto de o bolbo de selagem do primeiro nível de ancoragens ser, neste caso, bastante superficial; podem, no entanto, indiciar um muito inicial problema de estabilidade global, conforme se poderá compreender da análise da Figura 10;

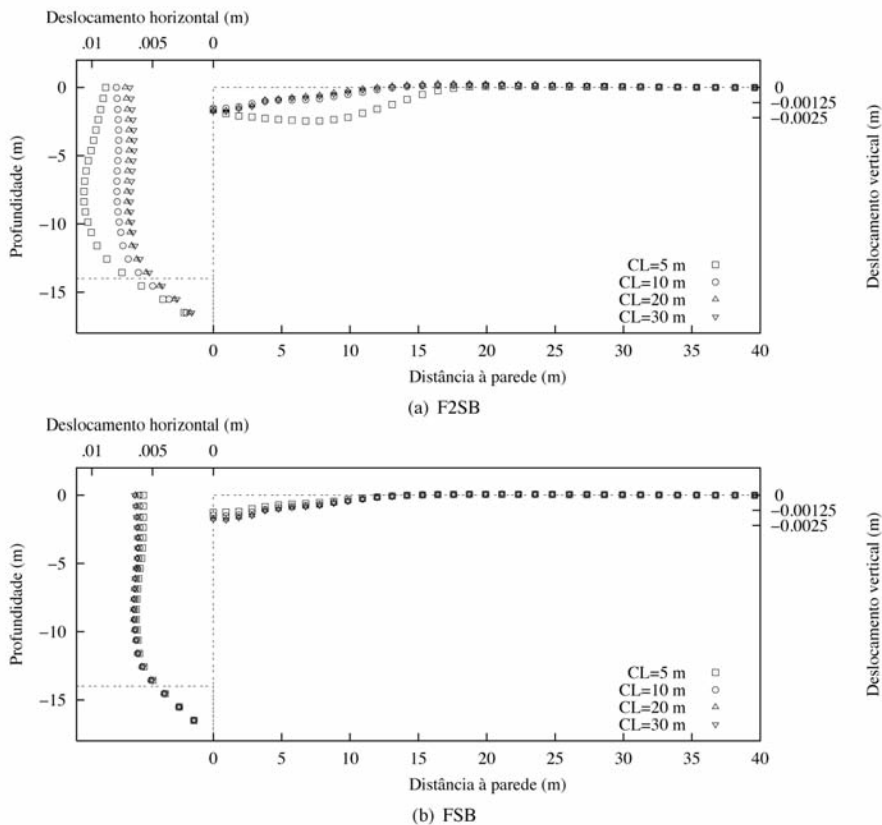


**Fig. 10** – Localização dos bolbos de selagem para os cálculos realizados; as cunhas de solo indicadas fazem um ângulo de  $45^\circ + \phi/2$  com a horizontal e correspondem aos solos com maior (à esquerda) e menor (à direita) ângulos de resistência ao corte, respectivamente solos C1 e D2.

- os deslocamentos obtidos para o método *F2SB* são superiores aos do método *FSB*, tal como anteriormente se verificou; no entanto, conforme se pode concluir da análise das figuras, os deslocamentos obtidos do método *F2SB* são, normalmente, tanto maiores quanto menor é o comprimento livre e, portanto, quanto mais próximo da cortina se localizar o comprimento de selagem; faz-se, no entanto, notar que se verifica o oposto no caso do método *FSB*, o que se justifica por, neste método, um menor comprimento de selagem significar, simplesmente, uma maior rigidez; este comportamento foi igualmente observado por Matos Fernandes (1983);
- o que se referiu no ponto anterior pode observar-se em maior detalhe na Figura 15; nesta figura pode verificar-se que os deslocamentos do método *FSB* são crescentes (mesmo que, em alguns casos, muito ligeiramente) com o comprimento livre, o que traduz o facto de maior comprimento livre implicar menor rigidez da ancoragem; no caso dos resultados do método *F2SB* verifica-se, numa análise simples, o oposto, ou seja, maiores deslocamentos para os casos de menores comprimentos livres; uma análise mais rigorosa, no entanto, mostra que, por exemplo, no caso do solo C2 este efeito se verifica apenas para comprimentos livres inferiores a 20 m; para o caso de comprimento livre de 30 m verifica-se que a influência volta a ser a contrária; trata-se, na realidade, de dois efeitos contraditórios: por um lado, tal como no método *FSB*, maior comprimento livre implica menor rigidez e, portanto, maiores deslocamentos; por outro, maior comprimento livre implica maior distância do bolbo de selagem à parede e, portanto, menor deslocamento desta devido ao pré-esforço; este último aspecto é, como se observa na Figura 15, dominante; note-se ainda que o aumento do comprimento livre reduz o deslocamento na zona de selagem induzido pela escavação; trata-se, contudo, de algo comum aos métodos *F2SB* e *FSB*;
- os deslocamentos do método *F2SB* parecem tender para aqueles que se obtêm no método *FSB* quando aumenta o comprimento livre; a razão para este comportamento é simples de



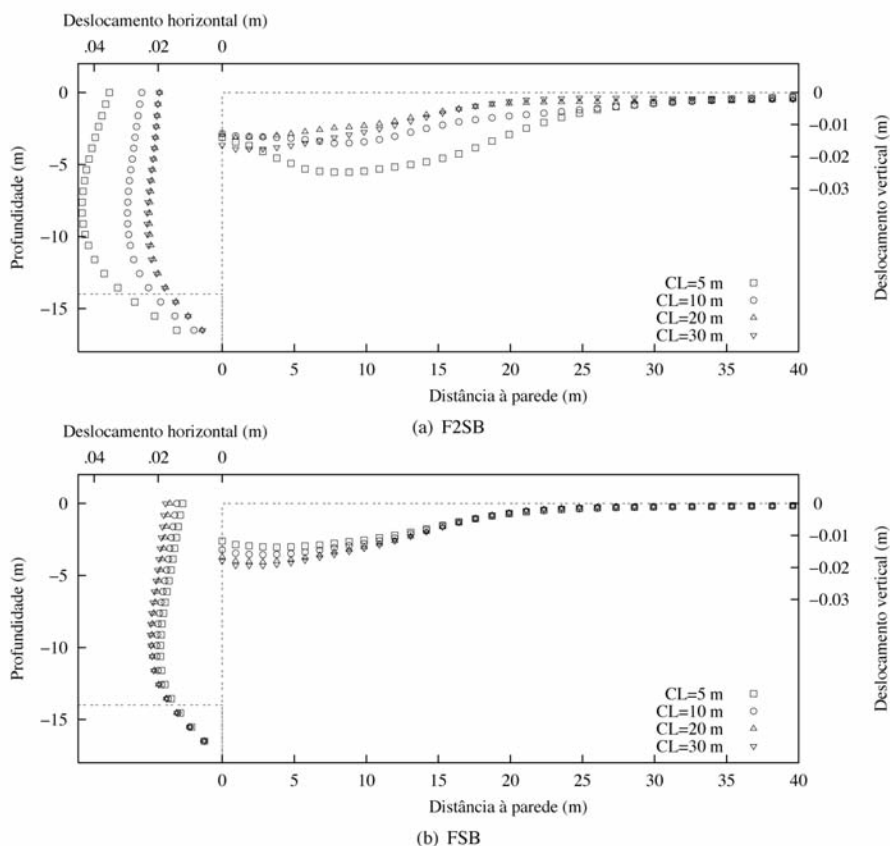
compreender: para os maiores comprimentos livres a força de pré-esforço aplicada na selagem está mais afastada da parede e, portanto, não exerce efeito nesta, do que resulta que os deslocamentos quando a força é considerada e quando não o é tendem a ser idênticos.



**Fig. 11** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação do comprimento livre para o caso do solo C1.

As Figuras 16 e 17 traduzem as variações de força que ocorrem em cada nível de ancoragem quando o comprimento livre experimenta as variações analisadas para os casos dos solos mais deformáveis (C2 e D2). Observa-se que, tal como esperado, o aumento do comprimento livre conduz a uma diminuição das variações de força nas ancoragens. A análise das referidas figuras permite ainda constatar que:

- as variações de força não são significativamente diferentes no caso dos métodos *F2SB* e *FSB*; com efeito, as variações de força não são influenciadas pela aplicação (ou não) da força na selagem;
- as variações de força nas ancoragens para comprimentos livres de 10 m e superiores mantêm-se em níveis razoáveis; a exceção será o caso do solo C2 em que as variações de força atingem 35%; no caso dos comprimentos livres de 5 m as variações de força são mais elevadas, atingindo no caso indicado, 45%;
- as variações de força são mais significativas no caso dos solos arenosos (C2 e também C1, cujos resultados não são apresentados) do que nos argilosos (D2 e também DI, cujos resultados não são, igualmente, apresentados).



**Fig. 12** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação do comprimento livre para o caso do solo C2.

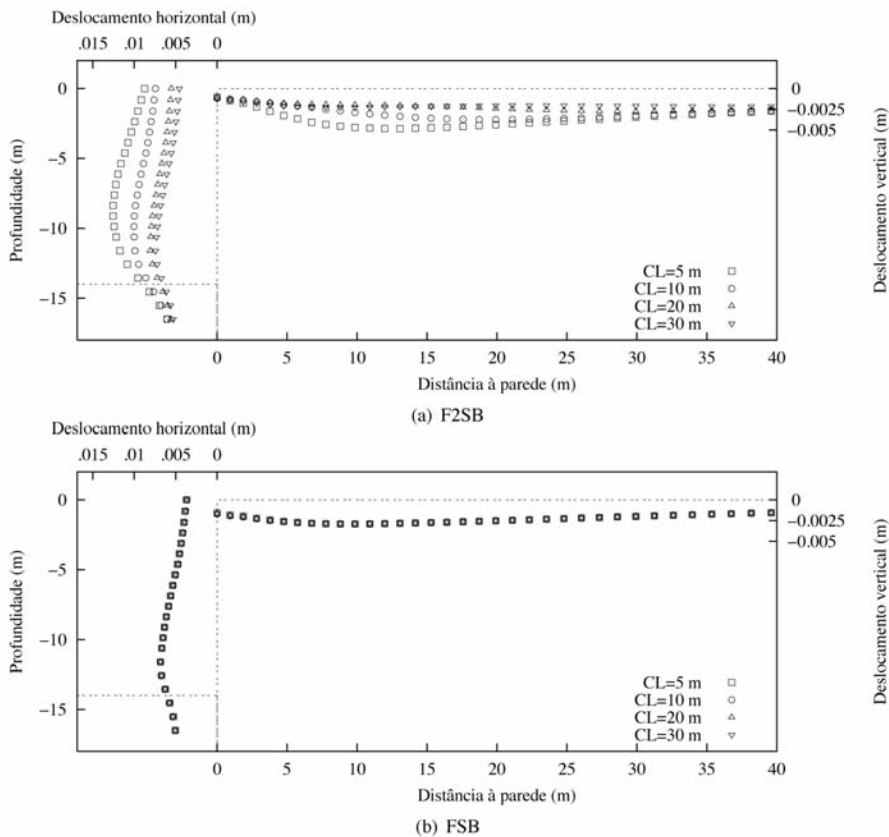
A pouca influência que a escolha do método tem nas variações de força nas ancoragens é, aliás, transversal na análise paramétrica que se realiza neste trabalho; por esse motivo, opta-se por, nas secções seguintes, omitir a sua representação.

#### 4.5 – Influência do comprimento de selagem

O caso base e os cálculos anteriormente apresentados consideraram que o comprimento de selagem era igual a 6 m. Nesta secção procede-se à análise do efeito da alteração deste comprimento de selagem, tendo-se realizado cálculos com metade deste valor e com o dobro. A Figura 18(b) é um exemplo do tipo de resultados obtidos, ou seja, verificou-se que os deslocamentos eram coincidentes.

Os resultados das análises realizadas mostraram que o comprimento de selagem, tal como considerado, não tem, praticamente, efeito nos deslocamentos e nas variações de força das ancoragens. Com efeito, para a maior parte dos cálculos realizados, não se verificou, quer para o método *FSB* quer para o método *F2SB* diferenças significativas dos deslocamentos obtidos.

O caso em que se verificaram maiores diferenças é o do método *F2SB*, para o solo C2. A Figura 18 inclui os resultados dos deslocamentos obtidos para este caso.

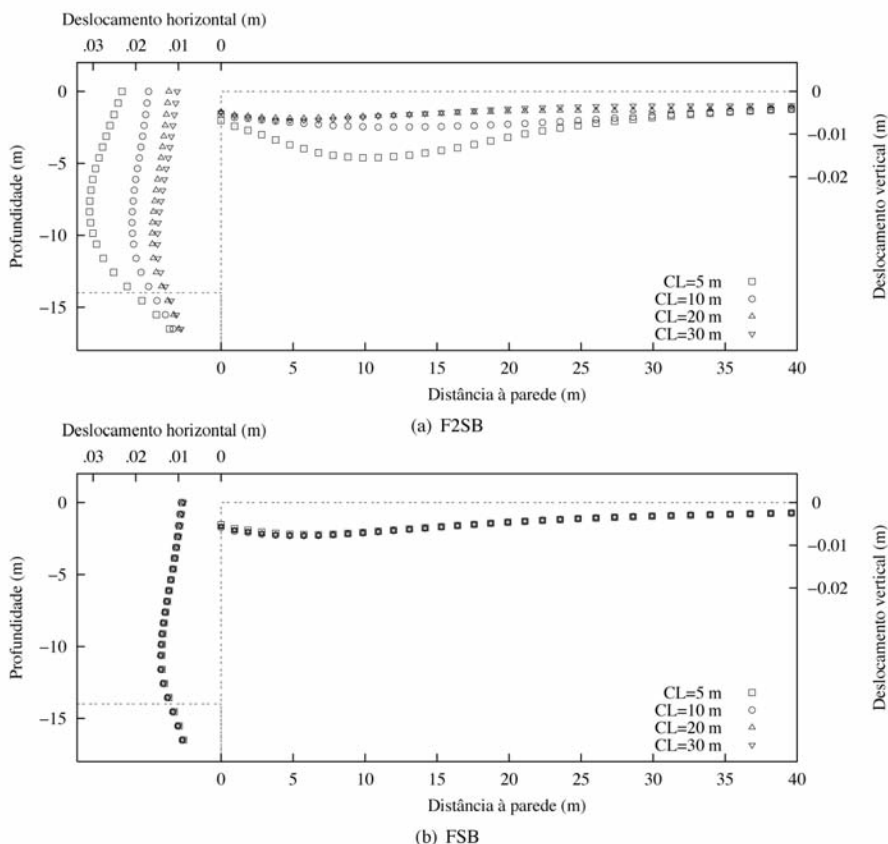


**Fig. 13** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação do comprimento livre para o caso do solo D1.

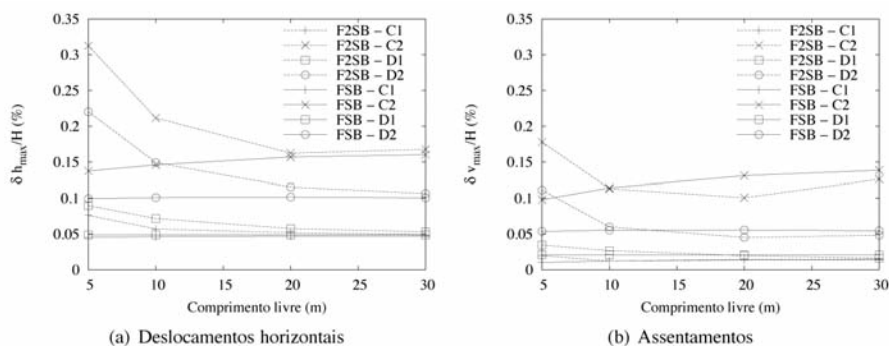
A ausência de efeito significativo do comprimento de selagem nos resultados pode justificar-se se os comprimentos considerados forem substancialmente superiores aos necessários ou se a análise realizada não os considerar de forma adequada. Com efeito, um comprimento de selagem de 3 m é consideravelmente inferior ao comprimento que seria necessário para uma ancoragem real, com uma força de pré-esforço adequada; no entanto, a forma (bidimensional) como o problema é modelado confere à selagem um comportamento (resistência e rigidez) superiores aos reais, pelo facto de, conforme se referiu anteriormente, se modelar a selagem em estado plano de deformação como se se tratasse de uma placa. Não é, assim, possível traduzir de forma bidimensional um problema que é, sobretudo, tridimensional.

Apesar disso, no caso a que a Figura 18 diz respeito, alguma influência se verificou existir. Essa influência é compreensível e razoável, como interpretação da forma como as ancoragens estão a ser modeladas. Mas não traduz o problema real. Com efeito, crê-se que no problema real (ou na sua modelação tridimensional) uma alteração do comprimento da selagem de 6 m para 3 m teria, mesmo nos outros casos, influência muito significativa nos deslocamentos e nas variações de força nas ancoragens.

A Figura 19 mostra os resultados obtidos para os níveis de tensão na última fase de cálculo para dois dos solos considerados (C1 e C2) e para os valores extremos do comprimento de selagem considerado: 3 m e 12 m. A análise desta figura permite concluir que não há diferenças significati-

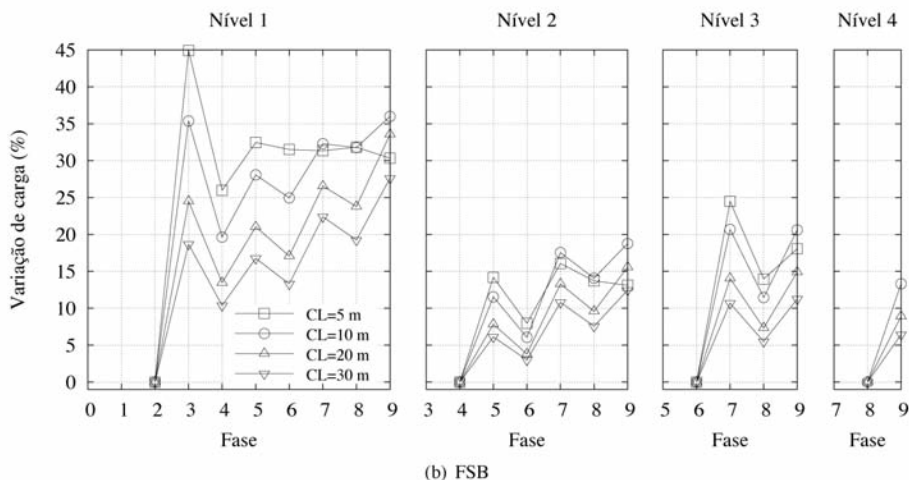
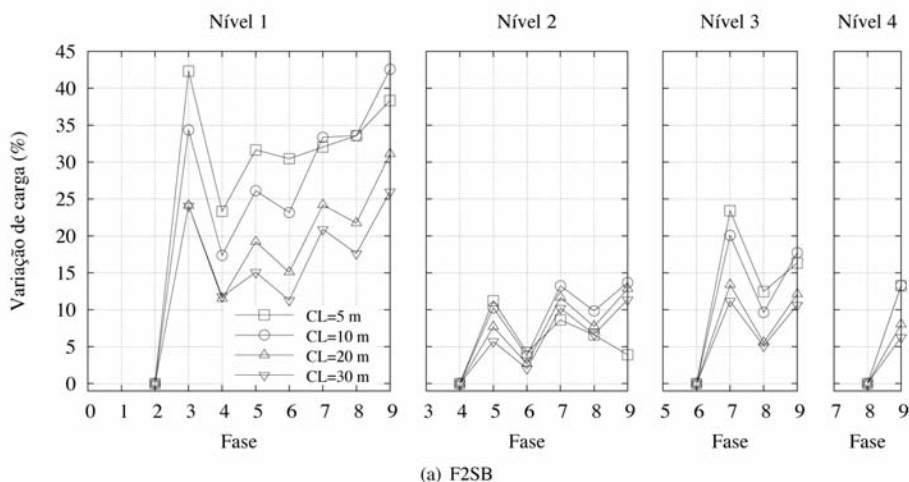


**Fig. 14** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação do comprimento livre para o caso do solo *D2*.



**Fig. 15** – Relações  $\delta h_{\max}/H$  e  $\delta v_{\max}/H$  obtidas dos cálculos realizados para avaliação da influência do comprimento livre;  $\delta h_{\max}$  e  $\delta v_{\max}$  são, respectivamente, os valores máximos do deslocamento horizontal da cortina e do assentamento do terreno suportado.

vas nos níveis de tensão para os dois comprimentos de selagem no caso do solo *C1*. Tal é compatível, portanto, com o facto de os deslocamentos determinados para esta situação serem muito semelhantes. Quanto ao solo *C2*, no entanto, verifica-se que os níveis de tensão são muito mais



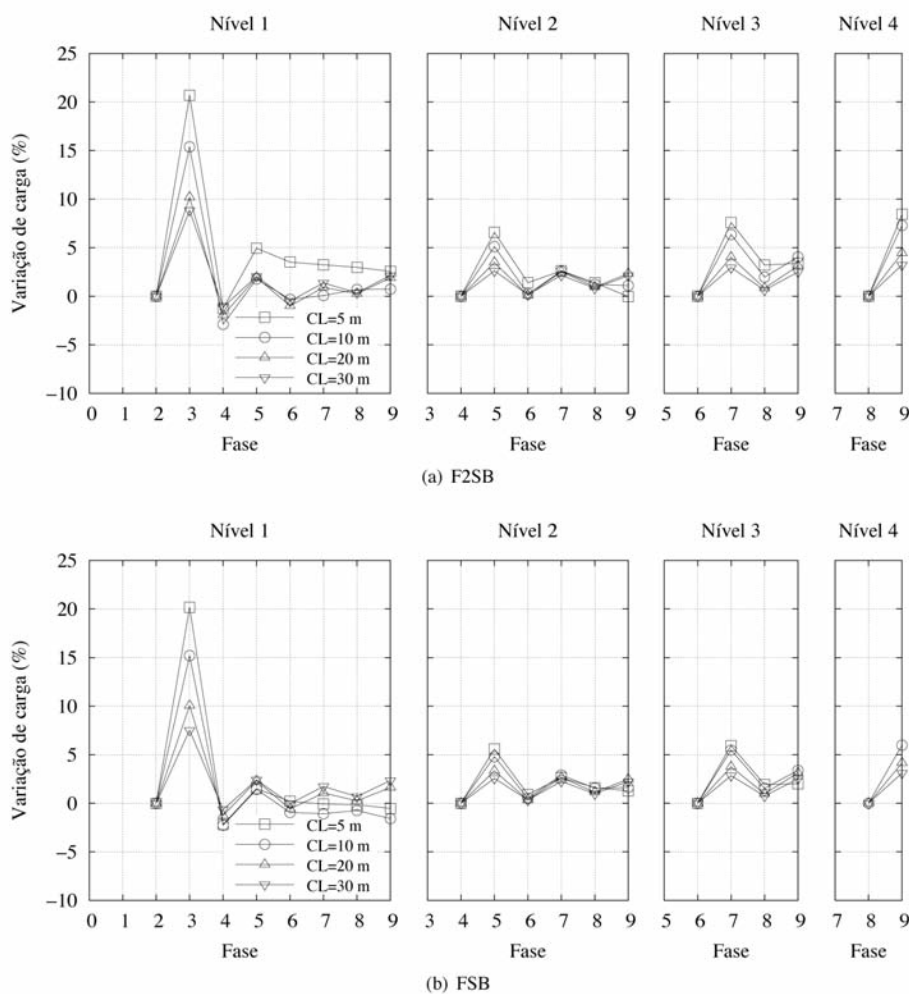
**Fig. 16** – Variação de força das ancoragens em resultado da variação do comprimento livre para o caso do solo C2.

claramente diferentes, apesar de a sua ordem de grandeza não ser, claro, completamente alterada. As maiores diferenças observadas no caso deste solo justificam, assim, as diferenças nos deslocamentos que se referiram anteriormente.

#### 4.6 – Influência do nível de pré-esforço das ancoragens

O nível de pré-esforço das ancoragens aplicado nos casos anteriormente analisados foi o trazido pela Figura 3 e pelos valores de  $\eta$  de referência (equação 6),  $\eta_{ref}$ , que correspondem às forças indicadas no Quadro 5. Nesta secção estuda-se a influência do nível de pré-esforço: para além dos casos base anteriormente analisados, apresenta-se os resultados obtidos para outros dois níveis de pré-esforço, correspondentes a metade ( $0,5 \eta_{ref}$ ) e ao dobro ( $2 \eta_{ref}$ ) do do caso base.

As Figuras 20 e 21 mostram os resultados dos deslocamentos obtidos para os níveis de pré-esforço considerados e para os solos C1 e C2.



**Fig. 17** – Variação de força das ancoragens em resultado da variação do comprimento livre para o caso do solo D2.

A análise das figuras permite constatar que:

- o efeito do nível de pré-esforço é bem evidente: os deslocamentos são significativamente afectados, conforme seria de esperar; em particular, quando o nível de pré-esforço é muito baixo, os deslocamentos podem assumir valores muito significativos, em especial no caso dos solos mais deformáveis;
- a importância da aplicação da força na selagem (método *F2SB*) é muito mais significativa no caso de níveis de pré-esforço mais elevados; quando o nível de pré-esforço é baixo, o aspecto condicionante do comportamento da escavação é esse, pelo que a aplicação ou não da força na selagem é menos importante, podendo observar-se que, para esta situação, os deslocamentos obtidos dos métodos *F2SB* e *FSB* são bastante semelhantes; pelo contrário, quando o nível de pré-esforço é elevado, o facto de a força estar ou não aplicada na selagem condiciona os resultados obtidos;
- este efeito pode verificar-se igualmente da observação da Figura 22.

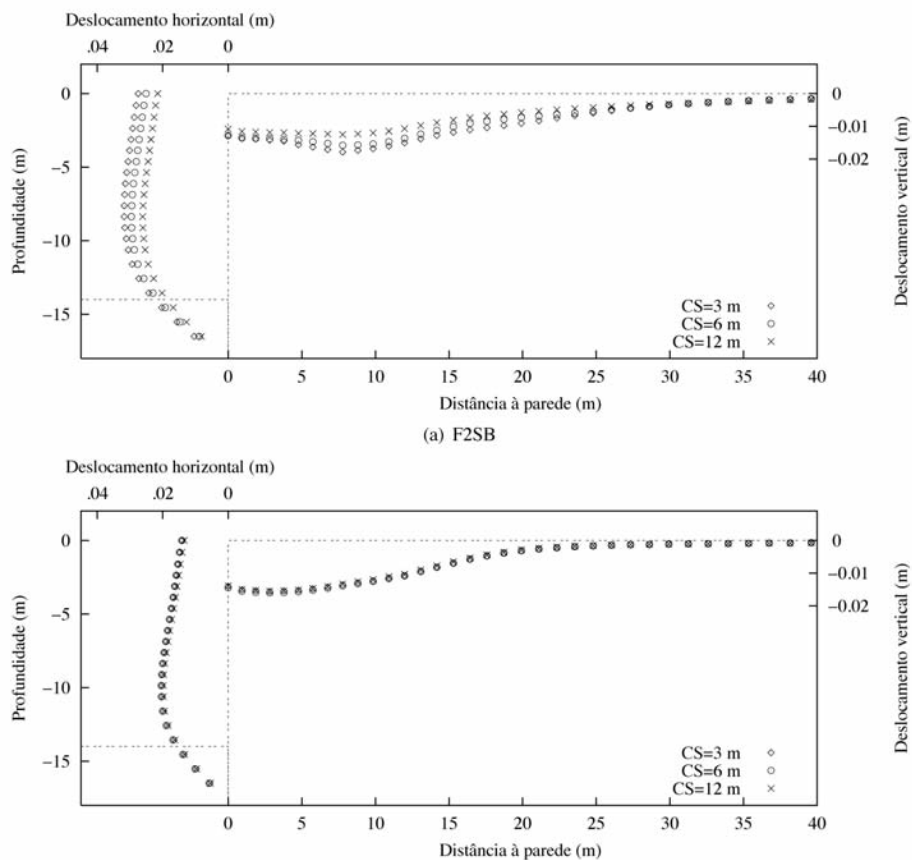


Fig. 18 – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação do comprimento de selagem para o caso do solo C2.

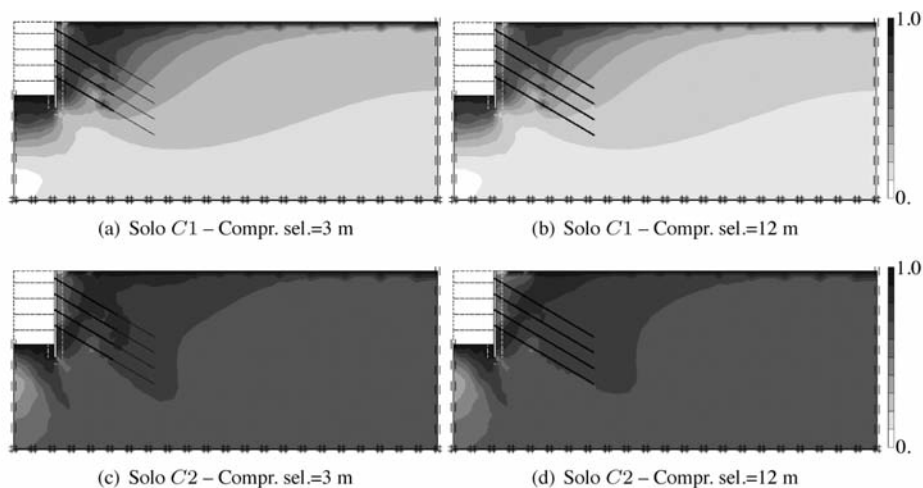


Fig. 19 – Níveis de tensão na última fase de cálculo, para os solos C1 e C2: influência do comprimento de selagem.

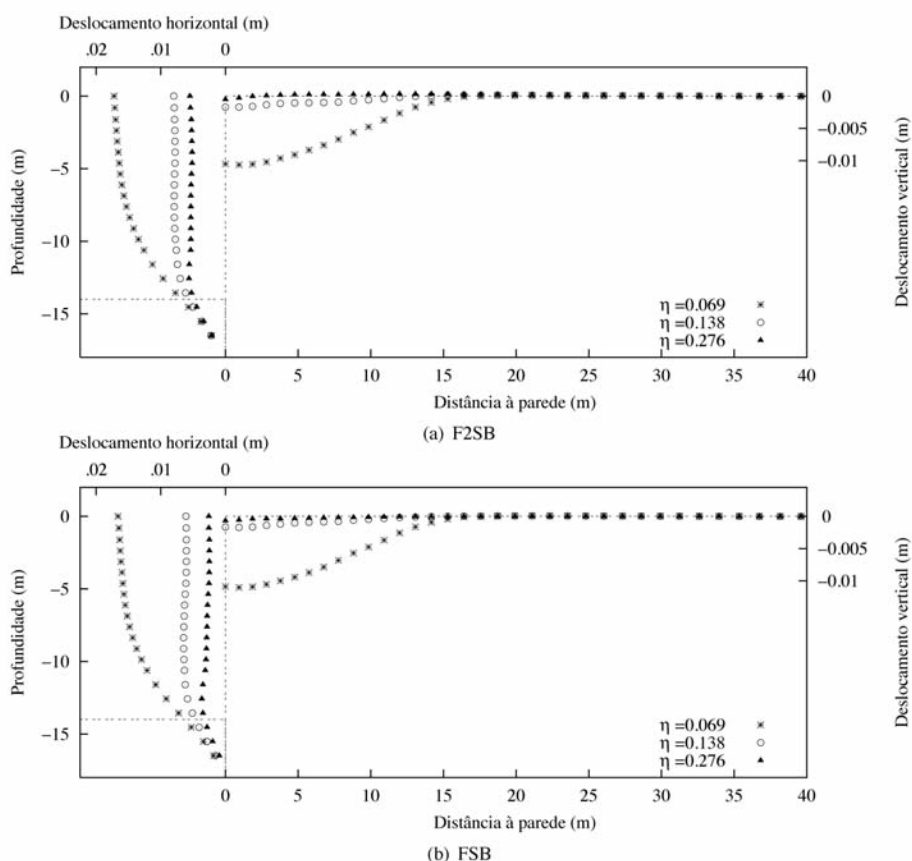


Conclusões análogas poderiam ser tiradas dos resultados dos deslocamentos nos casos dos solos *D1* e *D2*, que não são apresentados.

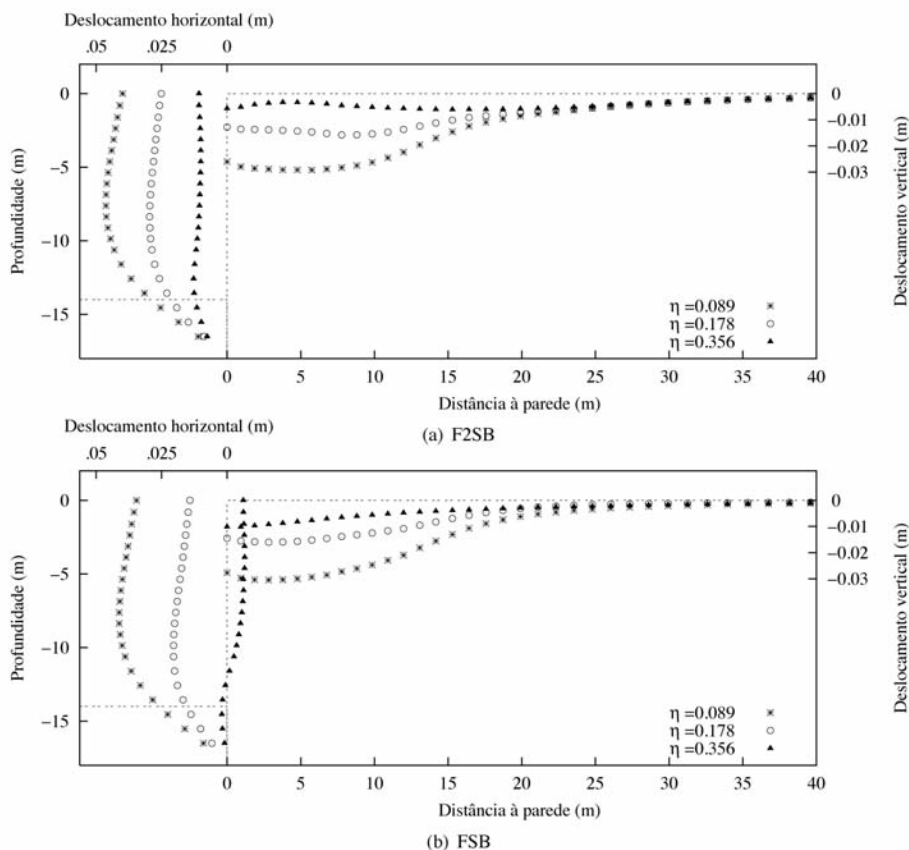
#### 4.7 – Influência da espessura do bolbo de selagem

A espessura do bolbo de selagem foi, nas análises apresentadas, considerada nula. Aliás, é esse o princípio subjacente aos métodos que têm sido usados na presente secção (*FSB* e *F2SB*), em que a selagem é representada por uma barra. A selagem real, no entanto, possui um diâmetro que poderá ser da ordem de 20 cm. Nos métodos em que não seja aplicada a força de pré-esforço na selagem, a consideração do seu diâmetro deverá ser um aspecto secundário, dado que as forças que nele ficam aplicadas serão, apenas, as provenientes das alterações de força nas ancoragens. No entanto, nos métodos em que são aplicadas forças de pré-esforço nas selagens, o efeito do diâmetro do bolbo poderá ser significativo.

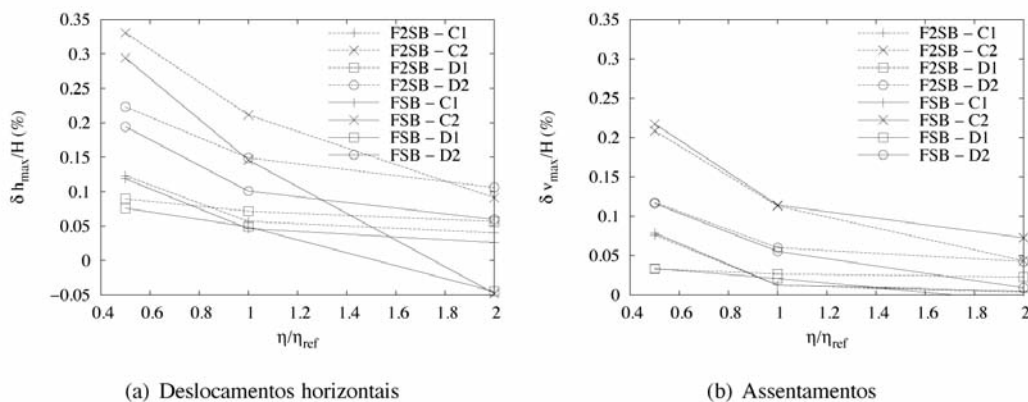
Na modelação bidimensional, no entanto, a consideração do “diâmetro” do bolbo traduz-se, na realidade, na consideração de uma “espessura”; o método em causa, portanto, possui a desvantagem já amplamente abordada de a selagem (e, agora, a sua espessura) ser modelada como se se tratasse de uma laje e não com a forma cilíndrica mais correspondente à realidade. Trata-se, assim, dos métodos *FSP* e *F2SP*.



**Fig. 20** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação do nível de pré-esforço para o caso do solo *C1*.



**Fig. 21** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação do nível de pré-esforço para o caso do solo C2.

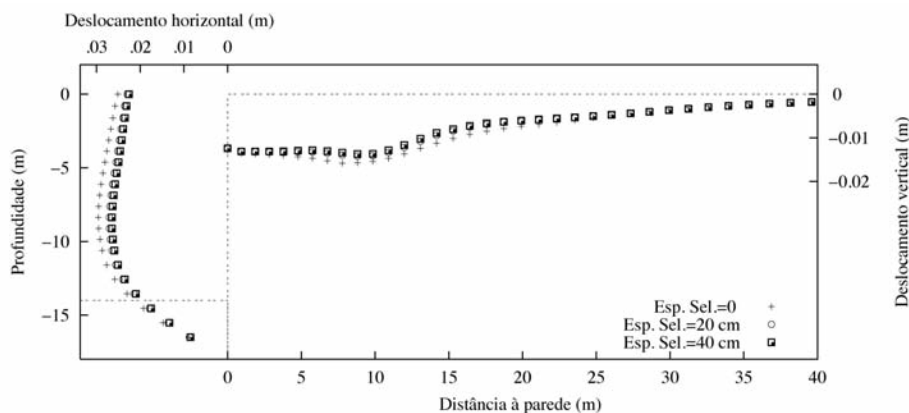


**Fig. 22** – Relações  $\delta h_{\max}/H$  e  $\delta v_{\max}/H$  obtidas dos cálculos realizados para avaliação da influência do nível de pré-esforço.

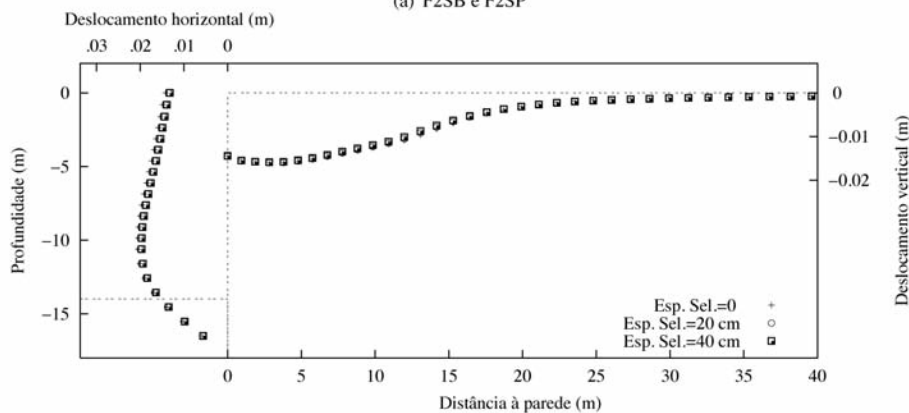
Para uma mais correcta consideração da espessura talvez fosse mais adequado considerar uma espessura média, isto é, considerar a espessura equivalente da “laje”, tendo em atenção o diâmetro real da selagem e o espaçamento das ancoragens. No entanto, tratando-se apenas de avaliar a importância da consideração desta grandeza nos métodos em que se aplica a força na selagem face aos métodos em que essa força não é aplicada, decidiu-se considerar dois valores significativos: 20 cm e 40 cm.

Os resultados obtidos das análises realizadas mostraram que a variação da espessura da selagem não tem influência significativa nos resultados dos deslocamentos do maciço: existe alguma influência, que se traduz, no caso do método *F2SB*, em deslocamentos ligeiramente menores quando a espessura é considerada, mas essa influência é muito ligeira. A Figura 23 é típica dos resultados obtidos: deslocamentos praticamente coincidentes nos métodos em que não é aplicada a força de pré-esforço na selagem e as pequenas variações já referidas nos métodos em que tal força é aplicada.

A razão para este comportamento é simples de compreender: no caso dos métodos em que a força de pré-esforço não é aplicada à selagem, as forças nela instaladas são muito pequenas e, portanto, não afectam os resultados. No outro caso, em que tal força é aplicada, os deslocamentos são ligeiramente superiores para a situação em que a espessura é nula, dado o carácter pontual das forças que resultam aplicadas ao maciço.



(a) F2SB e F2SP



(b) FSB e FSP

**Fig. 23** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação da espessura da selagem para o caso do solo C2.

No que respeita às variações de força nas ancoragens, de que não se apresenta resultados, não se verifica, praticamente, qualquer efeito.

4.8 – Influência da rigidez da ancoragem

A rigidez  $EA$  do comprimento livre que tem sido considerada nos cálculos anteriormente apresentados é a que consta do Quadro 2. Nesta secção analisa-se o efeito da alteração desta grandeza através de quatro análises complementares para cada solo. Considerou-se, assim, relativamente ao valor de referência  $EA$ , os seguintes valores:  $EA/10$ ,  $EA/2$ ,  $2EA$  e  $10EA$ .

As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados obtidos para os deslocamentos horizontais da parede e para os assentamentos do terreno suportado, nos casos dos solos  $C2$  e  $D2$ . No caso dos deslocamentos do solo  $D2$  a figura apresenta apenas o caso base, de referência, e os dois extremos, dado o facto de os deslocamentos obtidos serem muito semelhantes.

A análise desta figura permite constatar que o efeito da rigidez do comprimento livre da ancoragem é muito semelhante nos casos dos métodos  $F2SB$  e  $FSB$ . Os deslocamentos obtidos são claramente diferentes num e noutro método e são influenciados, como seria de esperar, pela rigidez do comprimento livre. No entanto, essa influência aparenta traduzir-se da mesma forma nos dois métodos.

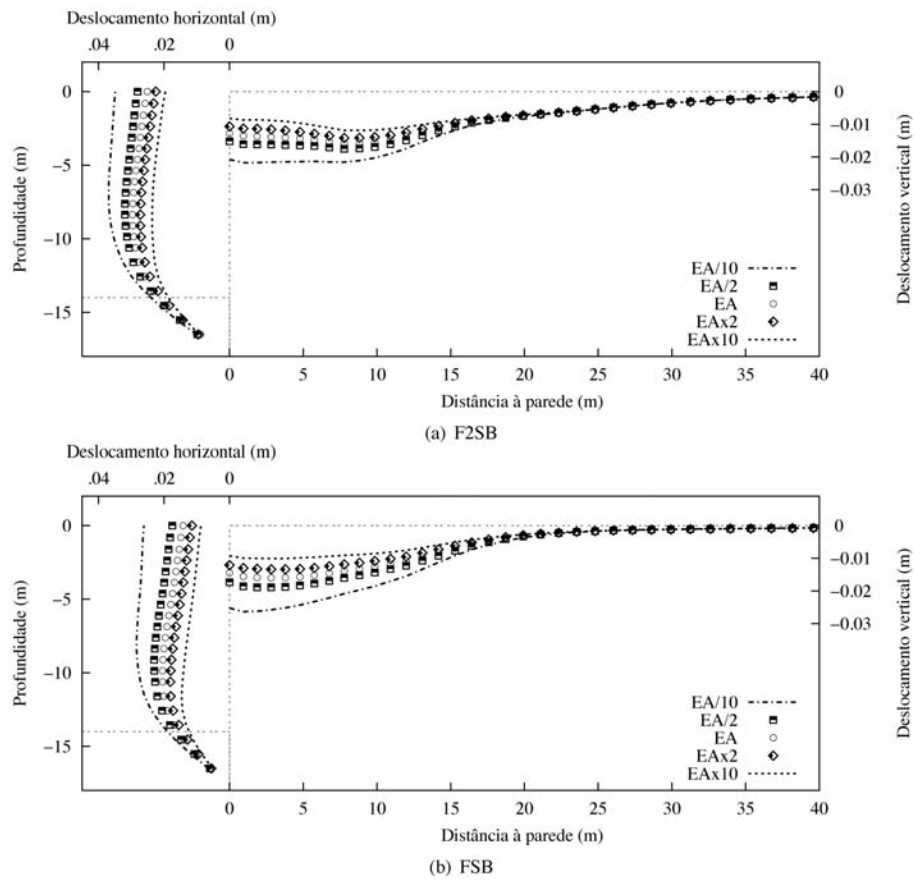
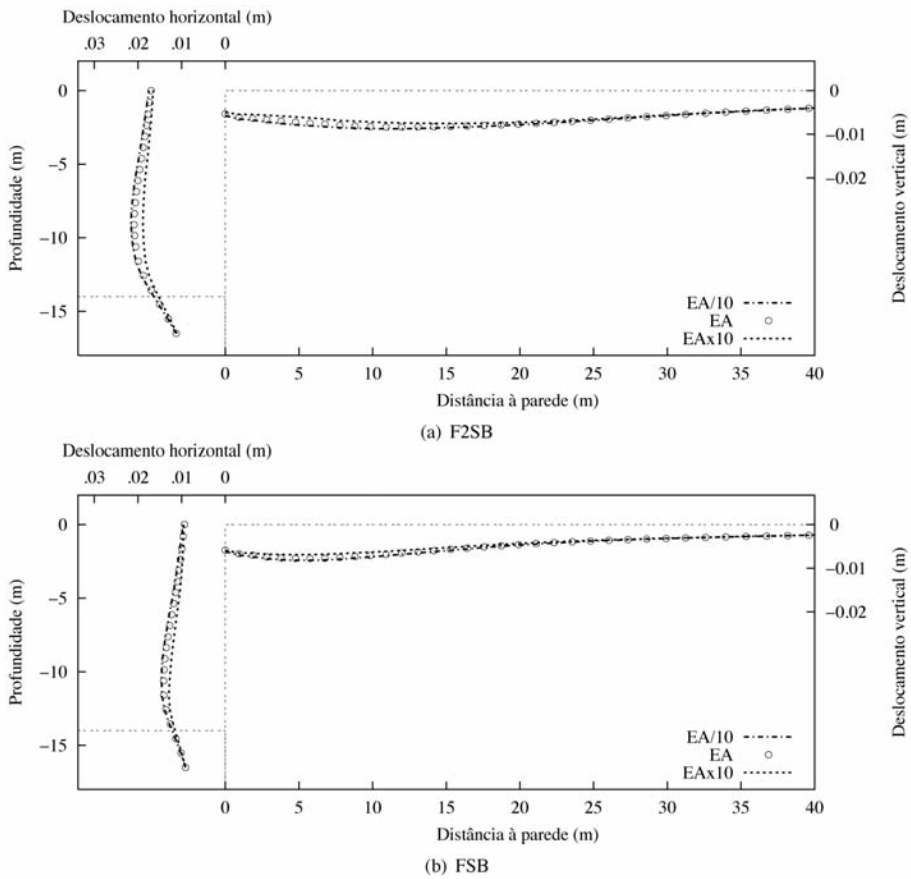


Fig. 24 – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação da rigidez da ancoragem para o caso do solo  $C2$ .



**Fig. 25** – Deslocamentos horizontais da parede e assentamentos da superfície do maciço suportado em resultado da variação da rigidez da ancoragem para o caso do solo D2.

## 5 – CONCLUSÕES

Estudos anteriores mostraram a importância da consideração da força de pré-esforço na selagem, na modelação bidimensional de ancoragens fazendo parte de estruturas de suporte de escavações. Esta importância foi confirmada por análises tridimensionais.

Tendo este aspecto em atenção, comparou-se no presente trabalho os resultados obtidos da modelação de duas metodologias em que se procede à modelação explícita da selagem: numa, simulou-se o pré-esforço apenas pela força aplicada na parede, enquanto na outra se considerou igualmente a força na selagem. Tal comparação foi realizada através de uma análise paramétrica, por forma a mostrar a importância da consideração da força na selagem. Essa análise incidiu sobre o comprimento livre, o comprimento de selagem, o nível de pré-esforço das ancoragens, a espessura do bolbo de selagem e a rigidez das ancoragens.

Os cálculos realizados mostraram a importância desta segunda força, pelo que a adopção destes dois métodos pretende, para além da exploração paramétrica dos resultados obtidos, enfatizar a importância da sua consideração.

Os resultados obtidos permitem concluir que:

- a espessura da selagem não influi, praticamente, nos resultados;
- o comprimento de selagem tem muito pouca influência nos resultados; a sua influência é praticamente inexistente se a força de pré-esforço na selagem não é aplicada;
- a rigidez da ancoragem tem uma influência relativamente pequena nos deslocamentos, excepto no caso do solo arenoso analisado quando os valores dessa rigidez são significativamente superiores ou inferiores aos valores base; afecta mais significativamente as variações de força nas ancoragens;
- o comprimento livre tem influência significativa nos resultados:
  - a influência nos deslocamentos é apenas visível no caso do método em que a força de pré-esforço é também aplicada na selagem;
  - o incremento do comprimento livre conduz à diminuição dos deslocamentos, apesar da menor rigidez da ancoragem; tal justifica-se pela maior distância a que está a força aplicada na selagem;
  - as variações de força nas ancoragens são afectadas de forma muito semelhante nos dois métodos (com e sem a força de pré-esforço aplicada na selagem): maiores comprimentos livres conduzem a menores variações de força nas ancoragens; o efeito é mais evidente nos solos arenosos;
- o nível de pré-esforço das ancoragens tem influência significativa nos resultados; os efeitos são observáveis nos dois métodos, mas as diferenças entre os resultados são tanto maiores quanto maior é o nível de pré-esforço.

Pode, assim, afirmar-se que os efeitos dos parâmetros relacionados com a geometria da selagem – comprimento e espessura – são praticamente inexistentes nos cálculos realizados. Crê-se que estes resultados correspondem apenas ao que é obtido no modelo e não propriamente ao real efeito que tais parâmetros teriam no comportamento das ancoragens. Julga-se, assim, que a alteração do comprimento ou da espessura do bolbo numa situação real teria consequências bem mais significativas do que as que foram obtidas. Trata-se, efectivamente, da consequência da incapacidade que modelos bidimensionais têm para reproduzir um comportamento que é, sobretudo, tridimensional.

A rigidez das ancoragens e o nível de pré-esforço têm alguns efeitos no comportamento da cortina que são observáveis do mesmo modo quer se considere a força de pré-esforço aplicada na selagem quer esta força não seja considerada. No caso do nível de pré-esforço observou-se, como seria de esperar, que a diferença entre as duas metodologias analisadas é tanto menor quanto menor é o valor do pré-esforço.

A influência do comprimento livre é muito significativa nos métodos em que a força na selagem é aplicada mas é muito menor no caso de o pré-esforço ser simulado apenas pela força na parede. O efeito, apesar de em grau bem diferente, é mesmo o oposto.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida e Sousa, J. (1998). *Túneis em Maciços Terrosos. Comportamento e Modelação Numérica*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Cardoso, A. J. M. S. (1987). *A Técnica das Pregagens em Solos Aplicada a Escavações; Métodos de Análise e Dimensionamento*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Clough, G. W. e Tsui, Y. (1974). Performance of tied-back walls in clay. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 100(12), pp. 1259–1273.
- Guedes de Melo, P. (2007). Comunicação pessoal.
- Guerra, N.M. C. (1993). Paredes de Contenção tipo Berlim. Análise de Efeitos Tridimensionais. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Guerra, N. M. C. (1999). *Mecanismo de Colapso de Cortinas de Contenção Tipo Berlim por Perda de Equilíbrio Vertical*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- Guerra, N. M. C., Santos Josefino, C., e Matos Fernandes, M. (2007). *Methods of two-dimensional modelling of soil anchors: preliminary results of the application to flexible retaining walls*. Proceedings of the 5th International Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering (Sousa et al., editors), pp. 257–268, Guimarães. Taylor & Francis.
- Matos Fernandes, M. A. (1983). *Estruturas Flexíveis para Suporte de Terras. Novos Métodos de Dimensionamento*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Mineiro, A. C., Mateus de Brito, J., e Fernandes, J. S. (1981). *Estudo duma parede moldada multi-ancorada*. *Geotecnia*, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 33, pp. 35–50.
- Moreira, C., Almeida e Sousa, J., e Lemos, L. L. (2004). *Túnel do término da estação da Alameda II. Identificação dos parâmetros geotécnicos*. *Geotecnia*, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 102, pp. 5–32.
- Santos Josefino, C., Guerra, N. M. C., e Matos Fernandes, M. (2006). *Modelação bidimensional de ancoragens em escavações suportadas por estruturas de contenção flexíveis*. Em *Actas do 10º Congresso Nacional de Geotecnia*, volume 2, pp. 389–398, Lisboa. Universidade Nova de Lisboa, Sociedade Portuguesa de Geotecnia.