

# ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA ESCAVAÇÃO ESCORADA

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A BRACED CUT

Martins, Francisco F., *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, ffm@civil.uminho.pt*

Teixeira, Maria O. R., *Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, ondina.teixeira@mail.telepac.pt*

### RESUMO

Neste trabalho apresenta-se a simulação numérica de uma escavação escorada que foi executada durante a construção do Metro de Oslo. Para isso recorreu-se ao programa de cálculo automático PLAXIS [1] tendo sido efectuada uma análise elastoplástica em condições não drenadas baseada no Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos (deslocamentos horizontais da cortina, assentamentos do terrapleno, esforços nas escoras e pressão exercida pelas terras na cortina nas diversas fases da escavação) são comparados com os valores calculados por Mana [2] numa análise semelhante recorrendo ao Método dos Elementos Finitos e com os valores resultantes da observação aquando da realização da referida escavação. Verifica-se existir uma concordância razoável entre os valores obtidos e os valores medidos e calculados por Mana [2].

### ABSTRACT

This paper presents a numerical simulation of a braced cut which was performed during the construction of the Oslo Subway System. An elastoplastic analysis with undrained conditions was performed with the finite element code PLAXIS [1]. The obtained results (horizontal displacements of the wall, ground settlements, strut loads and earth pressures over the different phases of excavation) are compared with the values calculated by Mana [2] in a similar analysis using the finite element method and with the measured values. It can be seen a reasonable agreement between the obtained values and the measured values and those calculated by Mana.

### 1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho é feita a simulação numérica da execução de uma escavação escorada que foi efectuada aquando da construção do metro de Oslo.

Esta escavação, designada de Vaterland 1, tem sido estudada por vários autores (Mana [2], Martins [3], Trigo [4]) devido ao facto de ter sido instrumentada e, por isso, haver muita informação disponível na bibliografia relativamente a deslocamentos, esforços, pressões, etc.

De entre os autores que estudaram a escavação Vaterland 1 destaca-se Mana [2] que fez uma análise por elementos finitos usando o modelo elastoplástico de Von Mises.

São precisamente os resultados apresentados por Mana [2] conjuntamente com os valores medidos que vão servir de base de comparação aos valores obtidos neste trabalho.

## 2. CARACTERÍSTICAS DA ENTIVAÇÃO E DO TERRENO ESCAVADO

Na figura 1 estão representados alguns detalhes da escavação escorada sendo também apresentado o perfil geotécnico do terreno. Para além disso são apresentados os valores da resistência não drenada obtidos nos ensaios realizados bem como a curva usada por Mana [2] para traduzir a variação da resistência não drenada em profundidade.

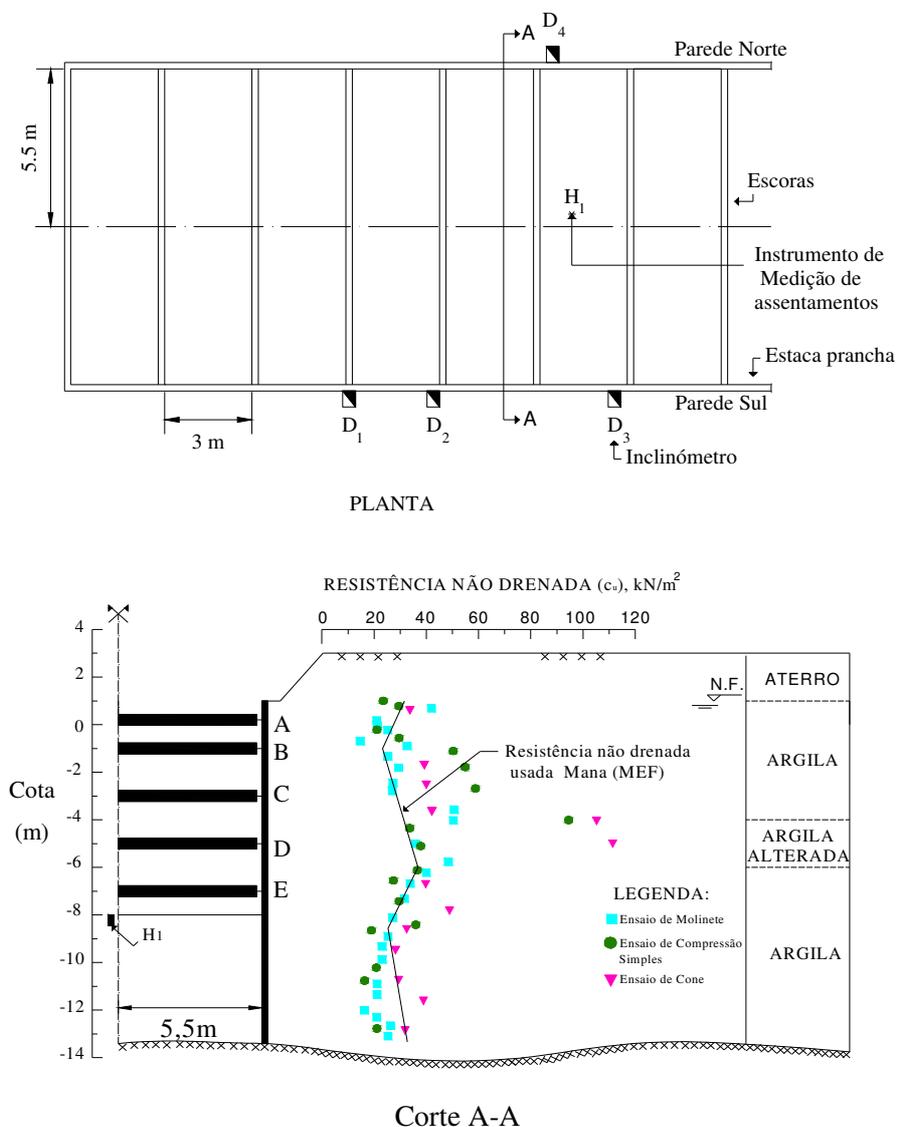


Figura 1 - Detalhes da escavação escorada

No presente trabalho, para considerar a variação da resistência não drenada em profundidade, dividiu-se o terreno em camadas sendo-lhes atribuídos os valores apresentados no quadro 1. Aos solos foi atribuído um peso volúmico de  $19,5\text{kN/m}^3$  e para o módulo de deformabilidade foram adoptados três valores diferentes: um para a camada de aterro, outro para a camada de argila inferior e outro para as duas camadas intermédias de argila. Para o aterro foi considerado um módulo de deformabilidade igual a 300 vezes a resistência ao corte equivalente, a qual, com base em Mana [2], foi tomada igual a setenta por cento da tensão vertical efectiva. Para a camada de argila inferior foi considerado um módulo de deformabilidade igual a 100 vezes a sua resistência não drenada e para as duas camadas intermédias de argila usou-se um módulo de

deformabilidade igual a 200 vezes a sua resistência não drenada. O coeficiente de Poisson do aterro foi tomado igual a 0,3 enquanto o das camadas de argila foi tomado igual a 0,5.

Em relação ao coeficiente de impulso em repouso, dada a análise ter sido efectuada em tensões totais e ter sido fornecido por Mana [2] o seu valor em termos de tensões efectivas ( $K_0=0,65$ ), foi necessário determinar um coeficiente de impulso equivalente que multiplicado pela tensão vertical total desse o valor da tensão horizontal total existente no solo. Obteve-se assim para o coeficiente de impulso equivalente que foi introduzido nos cálculos o valor 0,83.

A cortina é constituída por estacas-pranchas do tipo Belval Z-IVN-50 cujo momento de inércia é de  $2,96 \times 10^{-4} \text{ m}^4/\text{m}$  e a rigidez à flexão é igual a  $62000 \text{ kNm}^2/\text{m}$ . Ao coeficiente de Poisson da cortina foi atribuído o valor 0,33.

As escoras foram divididas em dois grupos correspondentes a diferente rigidez efectiva. Um grupo de escoras A e D cuja rigidez efectiva é  $16000 \text{ kN/m}$  por metro e o outro as escoras B, C e E cuja rigidez efectiva é  $8000 \text{ kN/m}$  por metro.

Quadro 1 - Valores da resistência não drenada adoptados nas diferentes camadas

Camada	Cotas (m)	$c_u$ (kPa)
1	2 a 1	13,65
2	1 a -4	26
3	-4 a -6	34
4	-6 a -9	30
5	-9 a -10,4	32
6	-10,4 a -13,4	36

### 3. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Dado que a escavação apresenta um grande desenvolvimento longitudinal comparado com a sua secção transversal, foi efectuada uma análise considerando o estado plano de deformação permitindo a análise de uma secção transversal intermédia da escavação.

A figura 2 representa a malha de elementos finitos usada composta por 335 elementos triangulares de 15 nós, com doze pontos de Gauss em cada elemento. A malha, que foi construída tendo em conta a simetria da escavação, tem 16,4 m de altura e 28 m de largura, tendo as seguintes condições de fronteira: deslocamentos horizontais impedidos nas fronteiras laterais, deslocamentos horizontais e verticais impedidos na fronteira inferior e deslocamentos superficiais livres.

Tendo em conta que a maioria dos parâmetros que caracterizam o solo fornecidos por Mana [2] são parâmetros não drenados, optou-se por efectuar uma análise não drenada com parâmetros não drenados sendo todos os parâmetros introduzidos em termos de tensões totais. Admitiu-se um comportamento elástico perfeitamente plástico para o solo, tendo sido seleccionada a opção do programa PLAXIS [1] correspondente a material do tipo *não poroso*. Na modelação da cortina de estacas-pranchas usou-se 13 elementos de 5 nós com quatro pontos de Gauss e para a representação das escoras usou-se 5 elementos de barra. Assumiu-se que o material da cortina e das escoras evidencia um comportamento elástico linear. Na superfície de contacto solo-cortina introduziram-se 26 elementos de junta de 5 nós com uma integração de Newton-Cotes de quatro pontos. Para os elementos de junta adoptou-se uma espessura quase nula, e foi-lhes atribuído para a razão entre a aderência da cortina e a resistência não drenada do solo o valor  $R_{inter}=0,25$ .

Para simular a escavação até à cota -8 m foram efectuadas oito fases, a saber:

Fase 1- escavação até à cota 0,2 m;

Fase 2- instalação do primeiro nível de escoras (A) à cota 0,2 m e escavação até à cota -2 m;

Fase 3- instalação do segundo nível de escoras (B) à cota -1 m e escavação até à cota -3 m;

Fase 4- instalação do terceiro nível de escoras (C) à cota -3m e escavação até à cota -4 m;

Fase 5- escavação até à cota -5 m;

Fase 6- instalação do quarto nível de escoras (D) à cota -5m e escavação até à cota -6 m;

Fase 7- escavação até à cota -7 m;

Fase 8- instalação do quinto nível de escoras (E) à cota de -7 m e escavação até à cota -8 m.

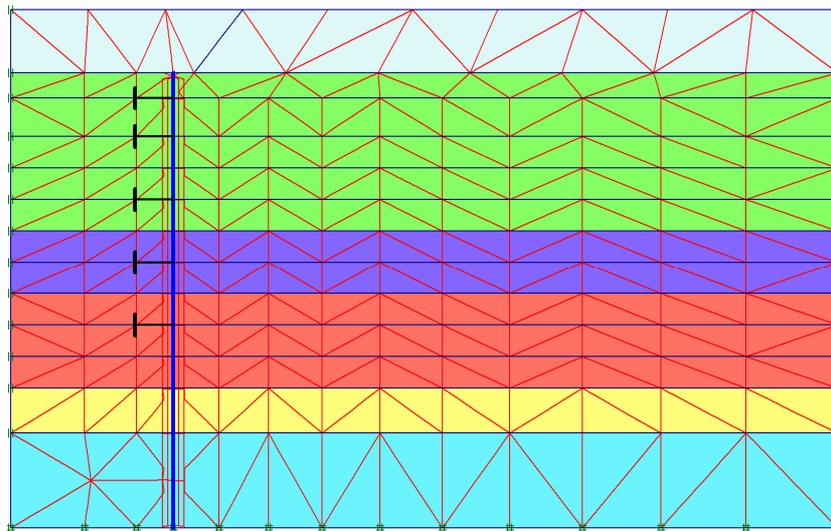


Figura 2 - Malha de Elementos Finitos utilizada no presente trabalho

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados são apresentados sob a forma gráfica, sendo só apresentadas algumas figuras representativas do estudo efectuado. Em todas as figuras são representados os valores obtidos no presente trabalho com o programa PLAXIS [1], os valores calculados por Mana [2] e os valores medidos durante a construção.

##### 4.1 Deslocamentos horizontais da cortina e assentamentos do terrapleno

Nas figuras 3 e 4 são apresentados os deslocamentos horizontais da cortina correspondentes às fases 5 e 8, respectivamente. Na figura 3, correspondente à fase 5, quer os valores calculados por Mana [2] quer os valores calculados no presente trabalho se encontram dentro da faixa dos valores medidos, existindo uma grande concordância entre os valores calculados numericamente e os valores medidos no inclinómetro  $D_4$ . Na fase 8 (figura 4) verifica-se uma boa concordância entre valores obtidos por Mana [2] e os obtidos no presente trabalho. No entanto, o valor máximo do deslocamento horizontal obtido nos dois cálculos numéricos é inferior aos valores medidos.

Tal como nas fases 5 e 8, em todas as outras fases os valores obtidos no presente trabalho estão bastante próximos dos obtidos por Mana [2]. No entanto, não existe uma boa concordância entre os valores medidos e os valores calculados na fase 2. Na fase 7 existe uma concordância razoável entre os valores calculados e os valores medidos em  $D_4$  tendo mesmo um valor

máximo muito semelhante. Os perfis dos assentamentos calculados e medidos apresentam uma forma semelhante em todas as fases que pode ser visualizada nas figuras 5 e 6 (fases 5 e 8).

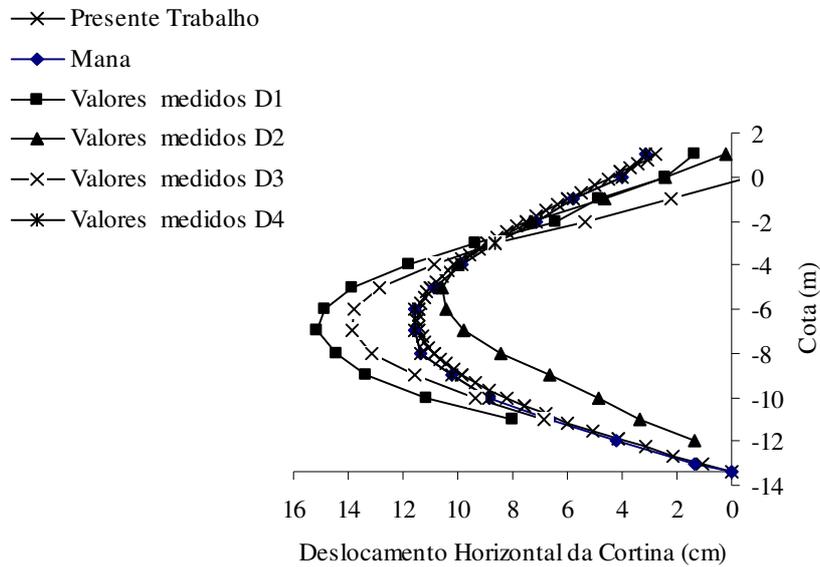


Figura 3 - Deslocamentos horizontais da cortina na fase 5

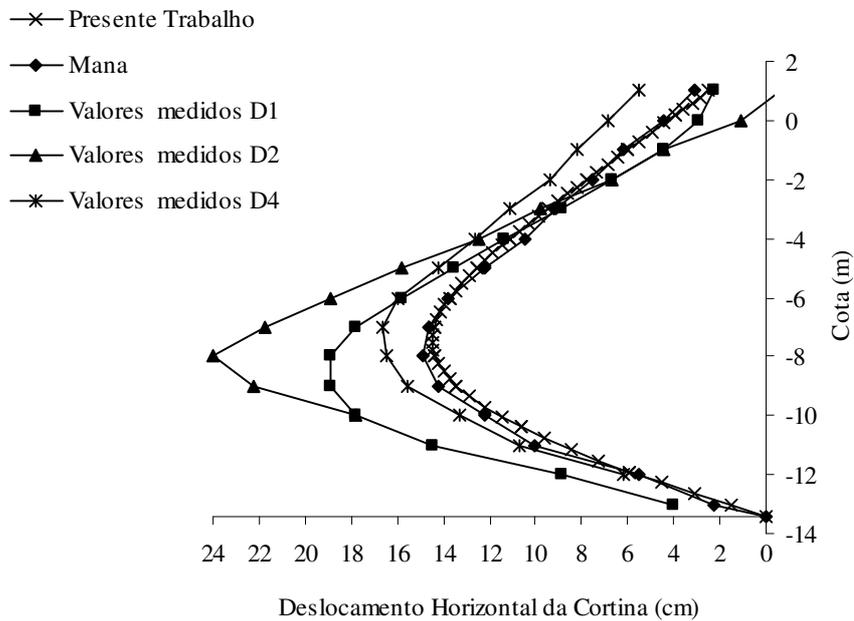


Figura 4 - Deslocamentos horizontais da cortina na fase 8

Exceptuando a fase 2, onde o assentamento máximo medido está muito próximo do valor obtido no presente trabalho e é inferior ao calculado por Mana [2], em todas as outras fases o assentamento máximo medido é superior aos valores calculados nas análises por elementos finitos sendo aproximadamente o dobro na fase 8. Nas restantes fases o assentamento máximo calculado no presente trabalho é da mesma ordem de grandeza do obtido por Mana [2]. No

entanto, o assentamento máximo obtido no presente trabalho ocorre a uma distância da cortina superior às distâncias obtidas por Mana [2] e medidas. No presente trabalho foi feita uma análise de sensibilidade dos resultados fazendo variar a razão  $R_{inter}$  mas não foram conseguidos melhores resultados do que os que são aqui apresentados.

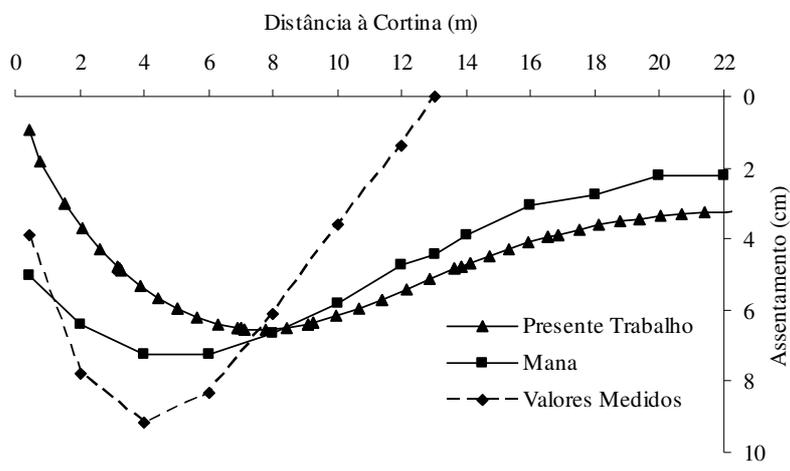


Figura 5 - Assentamentos do terrapleno na fase 5

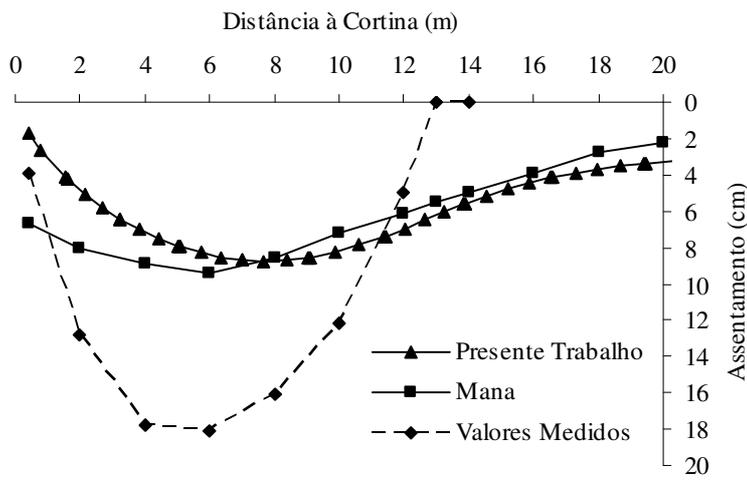


Figura 6 - Assentamentos do terrapleno na fase 8

É notório que os assentamentos do terrapleno obtidos com os programas de elementos finitos se estendem até uma maior distância para trás da cortina do que os valores medidos. Mana [2] refere que isto acontece habitualmente, sendo atribuída como possível causa a existência de fundações de edifícios próximos, as quais não são geralmente tidas em conta em programas de elementos finitos. No caso da escavação Vaterland 1 estava construído um edifício assente em estacas profundas a uma distância aproximada de 10 metros medidos a partir da cortina onde foram colocados os instrumentos de medida  $D_1$  e  $D_2$ .

A relação entre o assentamento máximo do terrapleno e o deslocamento horizontal máximo da cortina de estacas-pranchas é, neste estudo, igual a 0,59. Este valor enquadra-se entre os valores 0,5 e 1,0 obtidos por Mana e Clough [5]. Aliás, já era de esperar que esta relação se enquadrasse

nos limites por eles obtidos já que os estudos efectuados por Mana e Clough [5] incluíram a cidade de Oslo.

#### 4.2 Esforços nas escoras

Os resultados obtidos em termos de esforços nos níveis de escoramento B e D são apresentados nas figuras 7 e 8. Nestes gráficos encontram-se representados os limites dos valores medidos durante a realização da escavação, os valores obtidos neste trabalho e os valores obtidos por Mana [2].

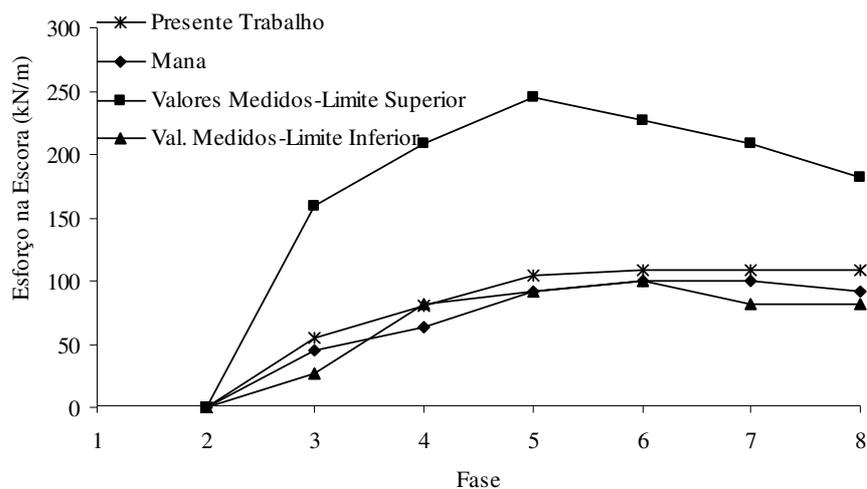


Figura 7 - Esforços no nível de escoramento B

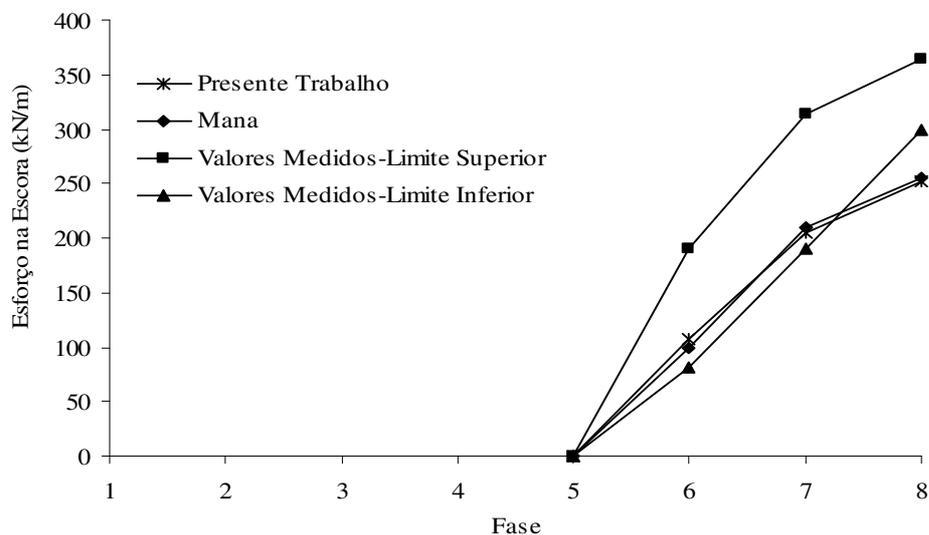


Figura 8 - Esforços no nível de escoramento D

No nível de escoramento B (figura 7) os valores calculados tanto no presente trabalho como por Mana [2] enquadram-se dentro dos limites dos valores medidos, com excepção do valor calculado por Mana [2] na fase 4 que é inferior aos valores medidos. Os valores calculados neste trabalho são um pouco superiores aos obtidos por Mana [2].

A figura 8 ilustra os valores dos esforços no nível de escoramento D. Verifica-se uma grande proximidade entre os valores calculados por Mana [2] e os valores obtidos no presente trabalho, estando estes dentro dos limites dos valores medidos nas fases 6 e 7. Na fase 8 os valores calculados são inferiores aos valores medidos.

Em relação aos restantes níveis de escoramento pode-se dizer que, de um modo geral, os esforços obtidos no presente trabalho se aproximam dos esforços obtidos por Mana [2]. Excepção à regra acontece nas primeiras fases do escoramento A em que os valores obtidos no presente trabalho são bastante superiores aos obtidos por Mana [2]. No que diz respeito ao posicionamento dos esforços calculados em relação aos limites dos valores medidos, em todos os níveis de escoramento existem valores situados entre os limites dos valores medidos e valores fora dos limites dos valores medidos.

Na Figura 9 são comparados, para todas as fases de escavação, os valores da soma dos esforços nas escoras.

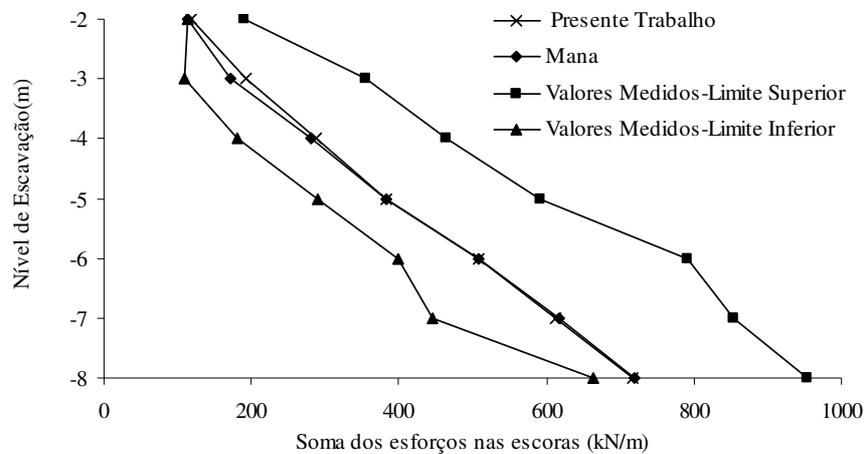


Figura 9 - Soma dos Esforços nas Escoras

Analisando a figura 9, verifica-se uma grande concordância entre os valores obtidos por Mana [2] e os valores correspondentes ao cálculo realizado no presente trabalho. Esta concordância é maior considerando a soma dos esforços nas escoras do que considerando os esforços individuais nas escoras. Ambos os valores calculados se aproximam da média dos limites dos valores medidos.

### 4.3 Pressões de terras

Nas figuras 10 e 11 são apresentadas as pressões actuantes nas duas faces da cortina nas fases 5 e 7.

Analisando todas as fases construtivas vê-se que, no “lado activo” existe uma concordância razoável entre os valores medidos e os valores calculados pelos dois programas de elementos finitos (PLAXIS [1] e usado por Mana [2]). No entanto, existem maiores diferenças entre os valores obtidos com os programas de elementos finitos e os valores medidos no “lado passivo” do que no “lado activo”. Essas diferenças são mais acentuadas ao nível da escavação. Mana [2] aponta como razão possível para isso o assumir de uma resistência ao corte não drenada maior do que a real, já que, a argila da escavação é anisotrópica apresentando uma resistência ao corte não drenada sob condições de resistência passiva cerca de 1/3 da sua resistência ao corte sob condições de tensão activa.

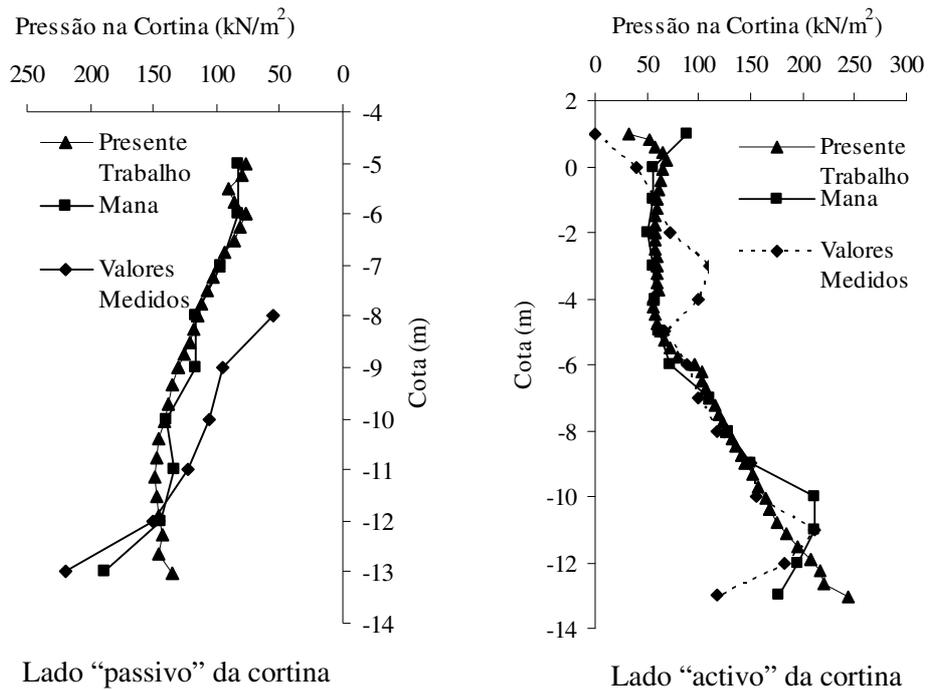


Figura 10 - Pressões actuantes nas duas faces da cortina na fase 5

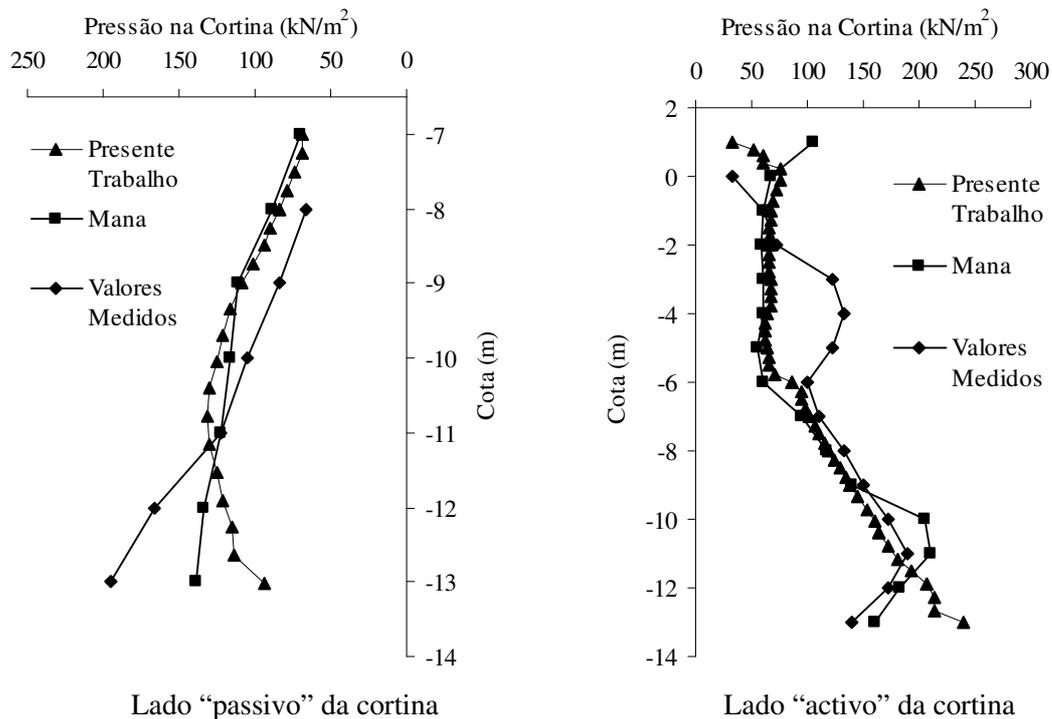


Figura 11 - Pressões actuantes nas duas faces da cortina na fase 7

Em relação ao “lado activo” as maiores diferenças situam-se no pé da cortina, onde o afastamento em relação aos valores medidos é maior quando se usa o programa PLAXIS [1], e ao nível das escoras C e D nas fases 5 e 7, onde as pressões calculadas pelos programas de cálculo automático são inferiores às medidas. A diferença no pé da cortina em relação às pressões obtidas por Mana [2] pode dever-se às diferentes condições de apoio usadas por ele

que não estão bem esclarecidas no trabalho por ele apresentado. Enquanto que, em relação às pressões ao nível das escoras C e D, a diferença pode residir no facto dos programas de cálculo usados não contemplarem a redistribuição de esforços devida ao efeito de arco que pode existir nestas situações.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos na análise por elementos finitos da escavação escorada estudada neste trabalho apresentam uma concordância razoável com os valores medidos. No entanto, aqueles resultados aproximam-se mais dos resultados obtidos na análise por elementos finitos efectuada por Mana [2].

No presente trabalho foi usado um modelo que considera o material *Não Poroso* para efectuar a análise não drenada usando parâmetros não drenados. Talvez os resultados pudessem ter sido ainda melhores caso tivesse sido usado um modelo mais avançado para modelar o comportamento mecânico do solo. No entanto, tal modelo exigiria outros parâmetros para caracterizar o comportamento do solo que os autores deste trabalho não conseguiram obter na bibliografia sobre a escavação aqui analisada.

Outros factores que terão tido influência nos resultados obtidos:

- a) A análise efectuada não contemplar o tempo passado entre a escavação e a colocação das vigas e escoras o qual, aliás, não é referido por Mana [2].
- b) A escavação até ao nível -8,0 m e a instalação do nível de escoras E foi feita em pequenas secções seguindo-se a betonagem da laje da base. Esta sequência não foi simulada quer na análise por elementos finitos apresentada neste trabalho quer na apresentada por Mana [2].
- c) Os resultados calculados baseiam-se na resolução de um problema bidimensional, isto é, com uma distribuição contínua e uniforme de escoras na direcção normal às figuras, enquanto que os deslocamentos, assentamentos e esforços medidos se referem ao caso real que é tridimensional; isto é, a distribuição de escoras é periódica na direcção em causa. Também não é tida em conta a variação das características de deformação do terreno nessa direcção.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] PLAXIS, User's Manual, Version 8, Delft University of Technology & PLAXIS, The Netherlands, 2002.
- [2] Mana, A. I., Finite Element Analyses of Deep Excavation Behaviour in Soft Clay, Ph. D. Thesis, Stanford University, USA., 1978.
- [3] Martins, F. F., Cálculo Elasto-Plástico de Maciços Terrosos em Consolidação. Programa e Aplicações, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 1993.
- [4] Trigo, J. F. C., A Estabilidade de Cortinas Ancoradas em Relação às Acções Verticais. Análise por Elementos Finitos, Tese de Mestrado em Geotecnia, Universidade de S. Paulo, Brasil, 1990.
- [5] Mana, A. I. and Clough, G. W., Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107 (1981), N.º GT8, pp. 759-777.