

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA PAREDE MOLDADA PRÉ-ESFORÇADA

Isabel Alvim TELES (*)
Manuel MATOS FERNANDES (**)
António ADÃO DA FONSECA (**)

Resumo:

O comportamento estrutural de uma parede moldada pré-esforçada em que o pré-esforço é introduzido por cabos verticais, ainda antes de iniciada a escavação, é analisado por via de um modelo de cálculo de elementos finitos que tem em consideração a interacção solo/parede, comparando-se os resultados com os obtidos para a solução de parede moldada não pré-esforçada.

Abstract:

The structural performance of a prestressed diaphragm wall with vertical prestressing cables, applied prior to the excavation, is studied by a non-linear finite element model accounting for the earth/wall interaction. Results are compared with those of the non-prestressed wall.

(*) Engenheira Civil. Bolsêira da JNICT

(**) Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia. Investigador do INIC.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da técnica de pré-esforço nas cortinas de paredes moldadas data já do princípio da década de 70 (Braun, 1972), embora no nosso país não se conheça até ao presente qualquer aplicação. Fundamentalmente, a técnica citada consiste no pré-esforço de cabos de aço de alta resistência que são englobados nos painéis de armadura frouxa e a esta cuidadosamente solidarizados. A figura 1 mostra o esquema usado para a construção das caves da embaixada da R.F.A., em Londres.

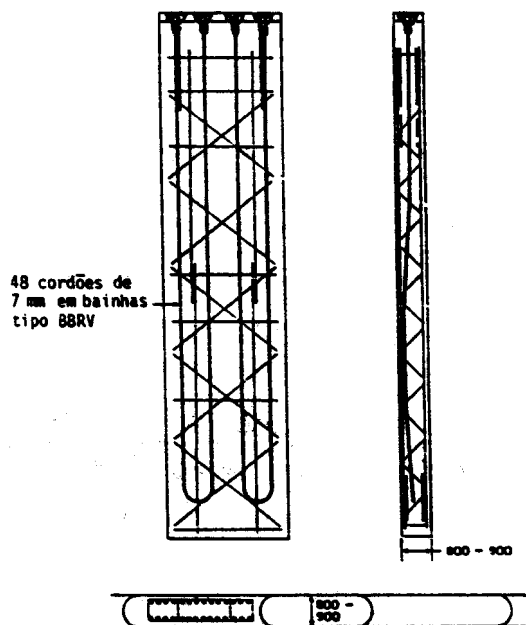


Fig.1 Painéis de parede moldada pré-esforçada (ICOS, Great Britain)

O pré-esforço de paredes moldadas tem sido usado com êxito quer em cortinas autoportantes ("cantilever", na literatura de língua inglesa) quer em cortinas dotadas de um ponto de apoio, materializado por escoras ou ancoragens, próximo do respectivo coroamento. O pré-esforço traduz-se em geral numa economia de aço e betão e numa redução dos deslocamentos da estrutura de suporte.

Como é próprio da aplicação de pré-esforço, a

excentricidade do cabo é definida de modo a criar um efeito favorável relativamente às acções previstas. No caso das paredes moldadas, a acção mais significativa é a do impulso activo suscitado pela realização da escavação, mas deve salientar-se que a força de pré-esforço é aplicada com a parede amparada pelo maciço de ambos os lados, provocando apenas o desenvolvimento de reacções do tipo passivo que, no entanto, são essenciais para o não aparecimento, pelo menos nesta fase, de tracções no betão, mesmo para as elevadas excentricidades do cabo requeridas pela fase de escavação completa.

O objectivo do presente trabalho é estudar o comportamento de uma cortina pré-esforçada e a sua interacção com o maciço envolvente, recorrendo a um modelo de elementos finitos. Em particular, pretende-se analisar os fenómenos induzidos pelo pré-esforço da parede e comparar o seu comportamento em termos de esforços e deslocamentos, com e sem a aplicação de pré-esforço.

2. MODELO DE CÁLCULO E PROBLEMA ANALISADO

O modelo de cálculo adoptado é baseado no método dos elementos finitos, admitindo-se a existência de um estado plano de deformação. Este modelo foi desenvolvido para a análise de escavações suportadas por estruturas flexíveis (Matos Fernandes, 1983), conjugando técnicas incrementais e iterativas, nele se simulando as diversas acções e fases construtivas típicas daquelas obras geotécnicas (escavação, instalação de escoras ou ancoragens, variações do nível freático, etc.), e se considerando o comportamento não linear dos materiais envolvidos, designadamente do maciço escavado, para além de se ter em conta a interacção existente entre o maciço e a cortina de suporte.

A figura 2 representa o problema considerado. Trata-se de uma escavação simétrica de 12,0 m de largura e 18,0 m de profundidade num maciço constituído por dois estratos arenosos sobrejacentes ao firme rochoso: i) o primeiro é formado por areias siltosas soltas e tem uma posseja de 20,0 m; ii) o segundo, com 15,0 m de espessura, é constituído por uma areia muito compacta e apresenta boas condições para fundação da parede. O nível freático encontra-se a 10,0 m de profundidade. A estrutura de suporte é constituída por uma cortina de paredes moldadas de 0,90 m de espessura apoiada, nas proximidades do respectivo coroamento, por um nível de escoras, não pré-esforçadas, constituídas por perfis HEB 300 de aço afastados entre si, na direcção horizontal, de 2,0 m. A altura enterrada da parede é de 10,7 m.

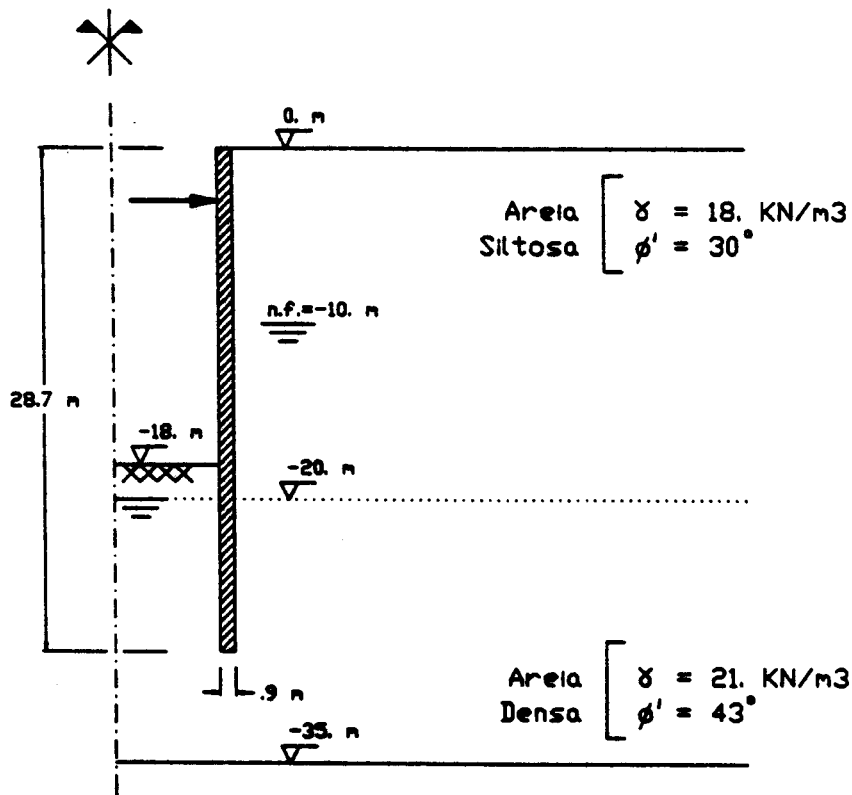


Fig. 2 Corte transversal da escavação analisada

As dimensões da escavação e a estrutura de suporte correspondente podem considerar-se típicas em relação a muitas das obras que vêm sendo realizadas para o aproveitamento do espaço subterrâneo dos grandes centros urbanos, nomeadamente para túneis de metropolitano.

A figura 3 apresenta a malha de elementos finitos adoptada para a análise do problema, compreendendo 342 pontos nodais, 276 elementos bidimensionais, do tipo subparamétrico, representando o maciço e a cortina, e 30 elementos de junta, correspondendo à superfície de contacto entre o solo e a parede moldada. Em particular, a cortina é representada por duas fiadas de 15 elementos finitos cada. O nível de escoras é representado por um elemento-barra ligando a cortina com a fronteira lateral esquerda da malha, fronteira que coincide com o plano de simetria da escavação. A fronteira lateral direita está situada a uma distância tal que os deslocamentos podem ser considerados desprezáveis. A fronteira inferior é definida pela superfície de contacto do estrato de areia compacta com o firme rochoso.

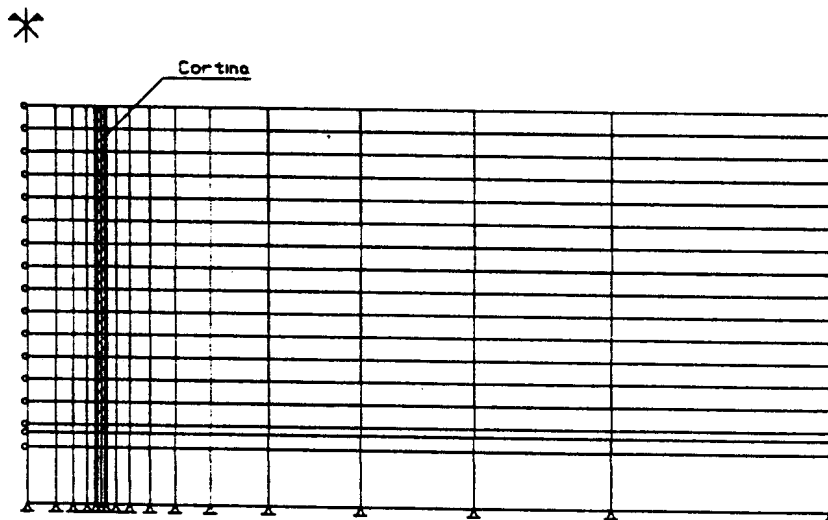


Fig.3 Malha de elementos finitos

O comportamento do solo é caracterizado por uma lei do tipo hiperbólico ("pseudo-plástico"). No Quadro I incluem-se os parâmetros definidores do estado de tensão inicial e do comportamento mecânico das duas formações constituintes do maciço.

As análises são efectuadas em tensões efectivas, por incrementos, simulando o processo de escavação e a instalação do nível de escoras. As fase de escavação abaixo dos 10 m de profundidade são precedidas de um rebaixamento do nível freático, correspondendo a uma bombagem permanente para que a retirada do solo se processe a seco. O efeito das forças de percolação no maciço, devido à diferença de níveis da água no exterior e no interior da escavação, é desprezado.

	γ	K_0	ϕ'	ν	ν_{rot}	K	K_{gr}	R_f	n
Areia Siltosa Solta	18.	0.5	30	0.3	0.49	250.	500.	.99	.12
Areia Compacta	21.	0.5	43	0.3	0.49	1000.	2000.	.99	.12

Quadro I

3. EXEMPLOS

3.1. Escavação com a parede não pré-esforçada

O nível de escoras é colocado a 4,0 m do topo da parede e admitido com uma rigidez axial igual a 50% da respectiva rigidez teórica.

A figura 4 mostra os deslocamentos laterais da parede para a escavação a profundidades de 4 m (imediatamente antes da instalação do escoramento) e de 18 m (fase final).

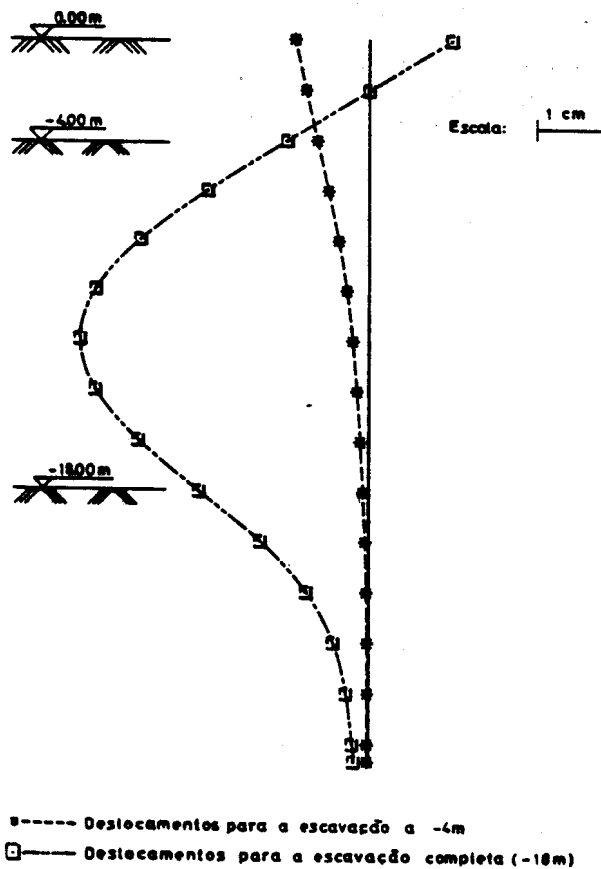


Fig.4 Deslocamentos laterais da parede para duas fases de escavação (cortina sem pré-esforço e escora a -4,0 m)

Como é usual em estruturas similares, antes da instalação de qualquer nível de apoios (escoras ou ancoragens), os deslocamentos crescem da base para o topo da cortina; instalado o escoramento e re-iniciada a escavação, o tipo de deformada modifica-se progressivamente até ao final da escavação, com deslocamentos relativamente pequenos no topo, crescendo até determinada profundidade, e voltando a tomar valores cada vez mais reduzidos até ao pé da parede.

Na figura 5 representam-se diagramas de momentos flectores no final da escavação e envolvente de todas as fases.

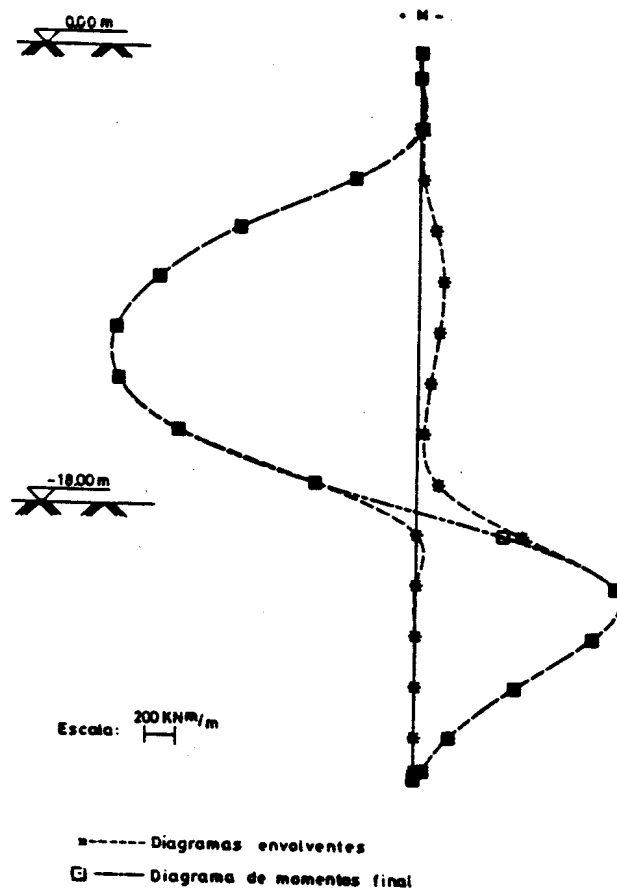


Fig.5 Diagramas de momentos flectores no final da escavação e envolvente de todas as fases (cortina sem pré-esforço e escora a -4,0 m)

De acordo com a deformada da parede, já atrás analisada, ocorrem elevados momentos positivos entre o nível de escoramento e o fundo da escavação, e momentos negativos muito significativos, embora não tão altos, na parte enterrada da parede.

3.2. Parede moldada pré-esforçada. Interação com o solo

Com base no diagrama de momentos flectores no final da escavação, representado na figura 5, propõe-se um pré-esforço da parede moldada por meio de cabos de aço de alta resistência, com o traçado indicado na figura 6.

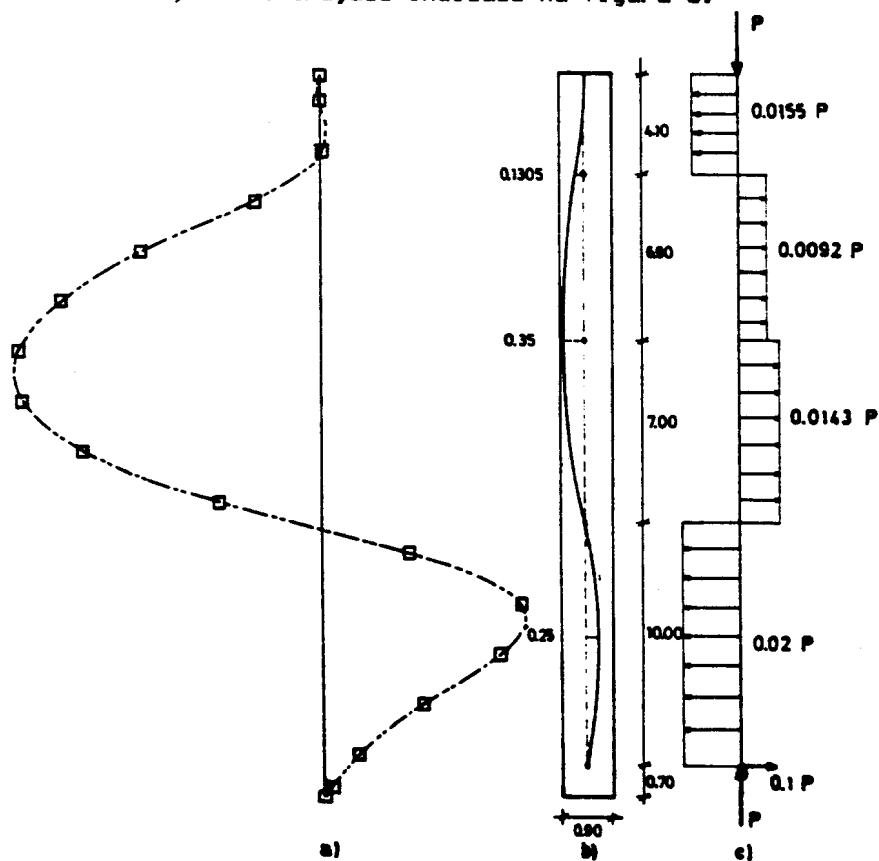


Fig.6. Pré-esforço da parede moldada: a) diagrama de momentos de projecto; b) traçado dos cabos; c) forças equivalentes ao pré-esforço

A excentricidade máxima de 0,35 m é atingida na secção onde o momento positivo tem o valor mais elevado. O valor do pré-esforço transferido para a parede é de 4080 KN por cada metro de desenvolvimento do coroamento.

Utilizando novamente o modelo de cálculo baseado no método dos elementos finitos, introduz-se o efeito do pré-esforço na cortina por via das denominadas forças equivalentes (ver figura 6), obviamente com a cortina ainda envolvida em ambas as faces pelo maciço.

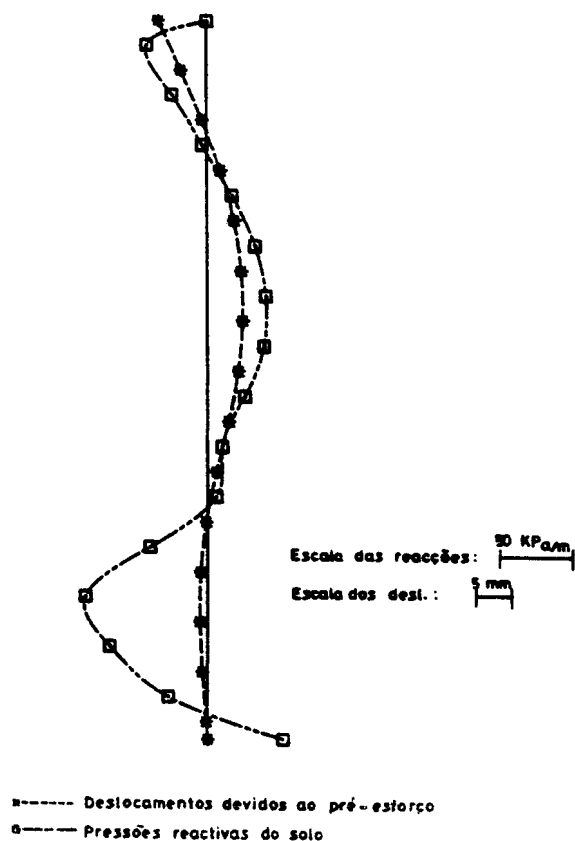


Fig.7 Deslocamentos e pressões reactivas do solo associados ao pré-esforço da parede moldada

Na figura 7 representam-se os deslocamentos horizontais obtidos e as pressões de reacção do maciço ao pré-esforço (soma vectorial das tensões normais, a cada profundidade, nos elementos de junta de um e de outro lado da parede).

Por sua vez, a figura 8 mostra os momentos flectores após o pré-esforço, bem como as tensões em diversas secções da parede. Dado o carácter altamente hiperestático da estrutura analisada, não surpreende que o diagrama de momentos seja substancialmente diferente do utilizado para definir a geometria do cabo de pré-esforço.

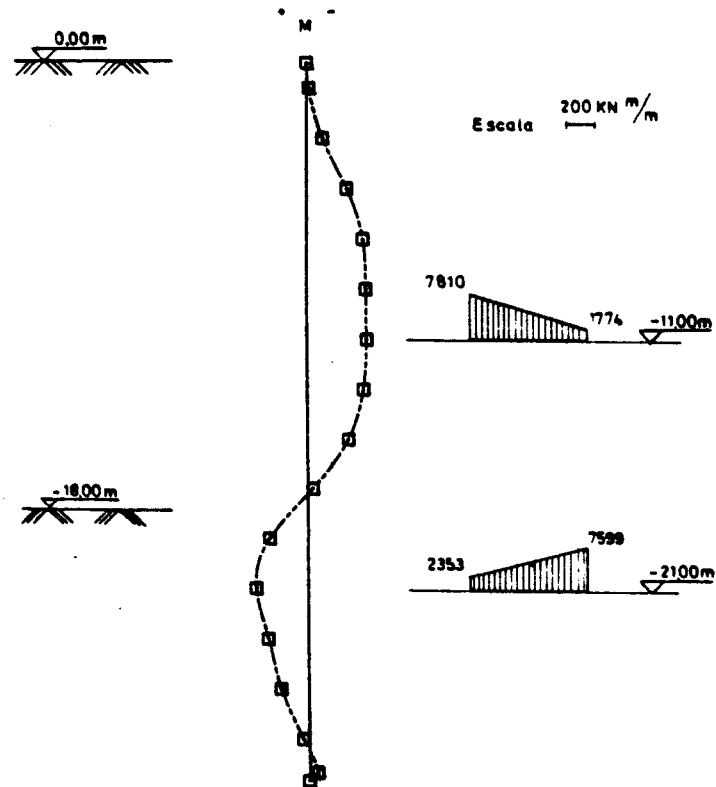


Fig.8 Momentos flectores e tensões na parede moldada, devido ao pré-esforço

Por outro lado, em nenhuma secção da parede se geram tensões de tracção. Este resultado foi aliás antecipado na introdução deste trabalho, devendo-se à mobilização das reacções no maciço envolvente (ver figura 7).

É importante comparar o encurtamento da parede devido ao pré-esforço, obtido elasticamente e por via do modelo não linear de elementos finitos. Para o estado plano de deformação em causa e desprezando o efeito das tensões normais à cortina, o encurtamento elástico tem o seguinte valor:

$$\Delta l = \frac{N \cdot l}{E \cdot A} (1 - \nu^2) = \frac{4080 \times 28,7}{29 \times 10^6 \times 0,9} (1 - 0,2^2) = 4,3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

em que N é a força vertical de pré-esforço por metro de coroamento da parede, l a altura desta, E o módulo de Young, ν o coeficiente de Poisson e A a correspondente área da secção transversal. O encurtamento no cálculo de elementos finitos tem o valor de 4.15 mm, isto é, quase idêntico ao elástico. Conclui-se, assim, que as tensões tangenciais mobilizadas na interface solo/parede têm, ao contrário das tensões normais, um efeito muito pequeno no comportamento da parede moldada, o que corrobora opiniões de outros autores (Xanthakos, 1979).

3.3. Escavação com a parede pré-esforçada

Esta situação não é exactamente a que resulta de sobrepor as estudadas em 3.1 e 3.2, pois não só o comportamento dos materiais é não linear mas também há que considerar a alteração das ligações ao exterior da estrutura ao longo do processo de escavação. A análise deste caso da parede pré-esforçada tem, portanto, de ser feita desde o início, com a introdução do pré-esforço antes de se iniciar a escavação. Tal como na parede não pré-esforçada, o escoramento é instalado à cota -4,0 m.

A figura 9 mostra os deslocamentos laterais da parede para a escavação a profundidades iguais a 4 e 18 m. Na figura 10 representam-se os diagramas dos momentos flectores finais e envolvente de todas as fases.

A comparação das figuras 4 e 9, por um lado, e 5 e 10, por outro, permite concluir que o pré-esforço da parede moldada garante uma moderada redução dos deslocamentos e um substancial decréscimo dos momentos flectores.

A evolução dos momentos flectores merece uma análise mais detalhada. Pode verificar-se (ver figuras 5 e 10) que o

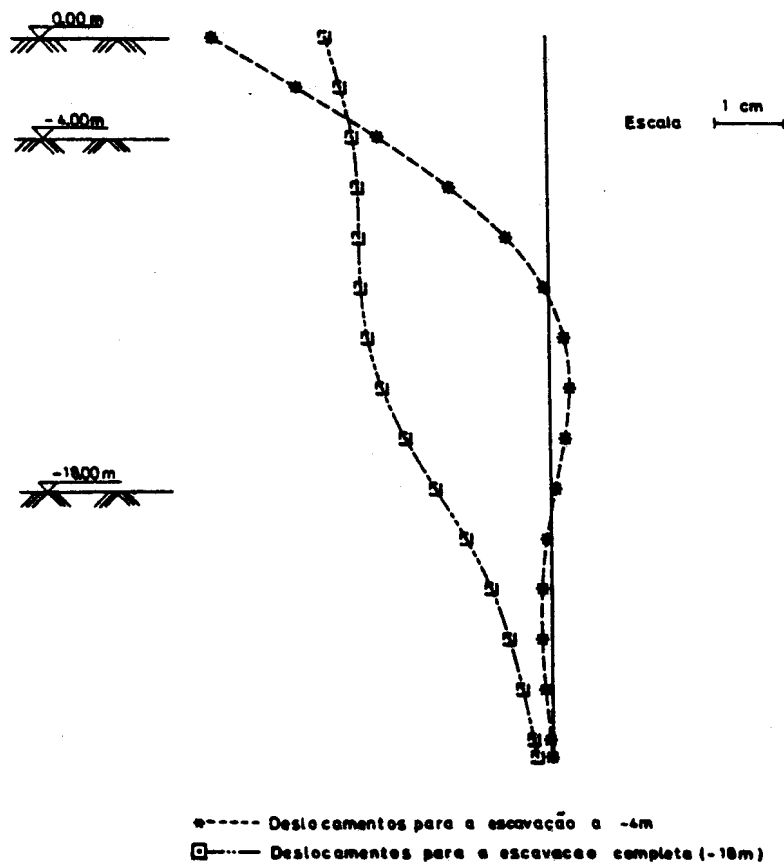


Fig.9 Deslocamentos laterais da parede moldada para duas fases de escavação (cortina pré-esforçada com escora a -4,0 m)

momento flector máximo positivo sofre uma redução da ordem dos 75%. Todavia, constata-se que, para a cortina pré-esforçada, o diagrama de momentos finais difere significativamente da envolvente, apresentando esta, na parte superior, momentos negativos não desprezáveis. Estes últimos momentos surgem na fase de escavação até 4 m de profundidade e são mais elevados do que no caso da cortina não pré-esforçada. Eles são devidos ao facto de o pré-esforço provocar, na zona mais à superfície, tensões de compressão

por consequência, do maciço suportado.

A questão que agora se levanta é como controlar aquele agravamento dos momentos negativos e dos deslocamentos na zona superior da cortina. A solução óbvia é subir a cota de aplicação do escoramento sem descuidar o aumento que, por razões de equilíbrio, se vai verificar nos momentos positivos. No limite, poderia escorar-se o topo da cortina, na própria viga de coroamento, mas neste trabalho é apresentada a solução intermédia de colocação da escora a 2,0 m de profundidade. O estudo deste caso foi realizado exactamente como para o caso da escora à cota -4,0 m, estando os diagramas dos deslocamentos e dos momentos flectores, com e sem pré-esforço aplicado, representados nas figuras 11 e 12.

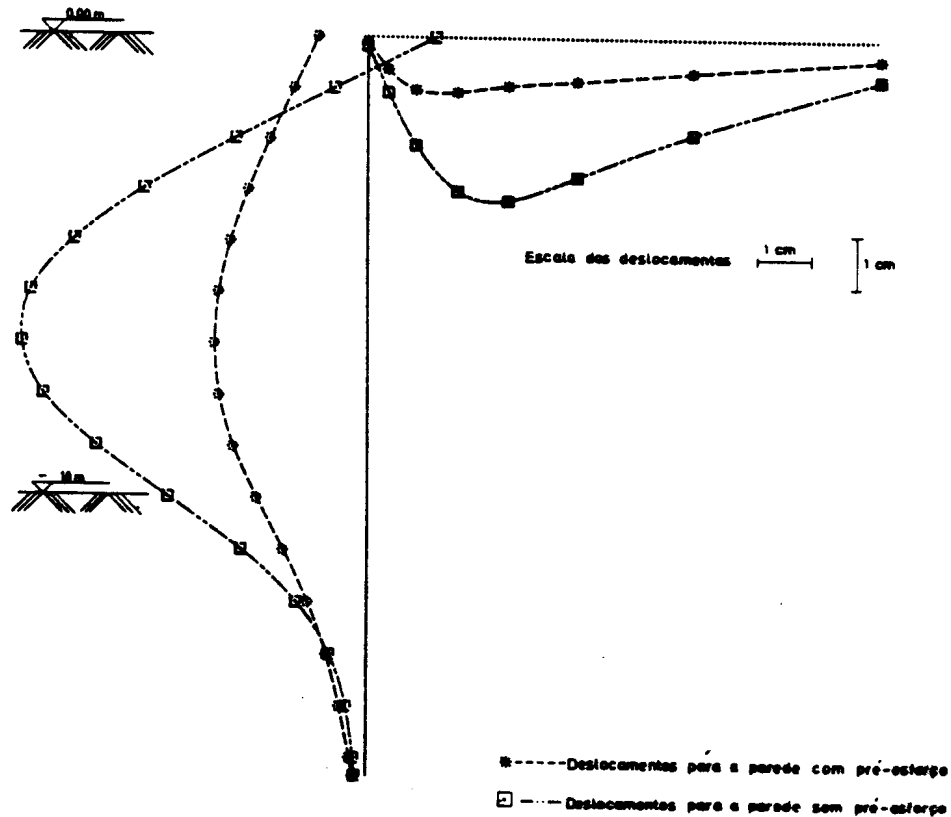


Fig.11 Deslocamentos laterais da parede e assentamentos da superfície no fim da construção, com e sem pré-esforço da cortina (escora a -2,0 m)

horizontais no solo a retirar (ver figura 7). As forças que simulam no modelo a retirada daquele solo são assim agravadas, dado que a cortina se comporta como uma consola até à colocação do escoramento, desenvolvendo-se momentos negativos maiores que implicam tensões de tracção no betão.

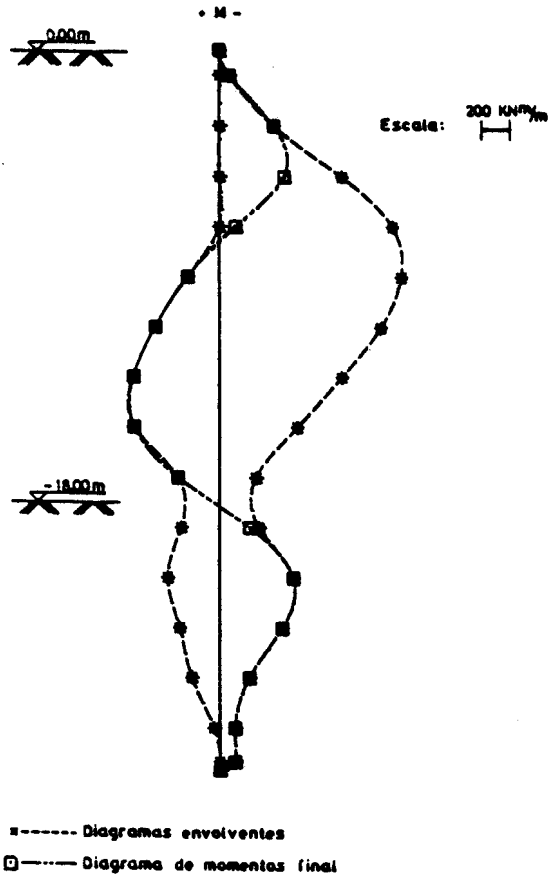
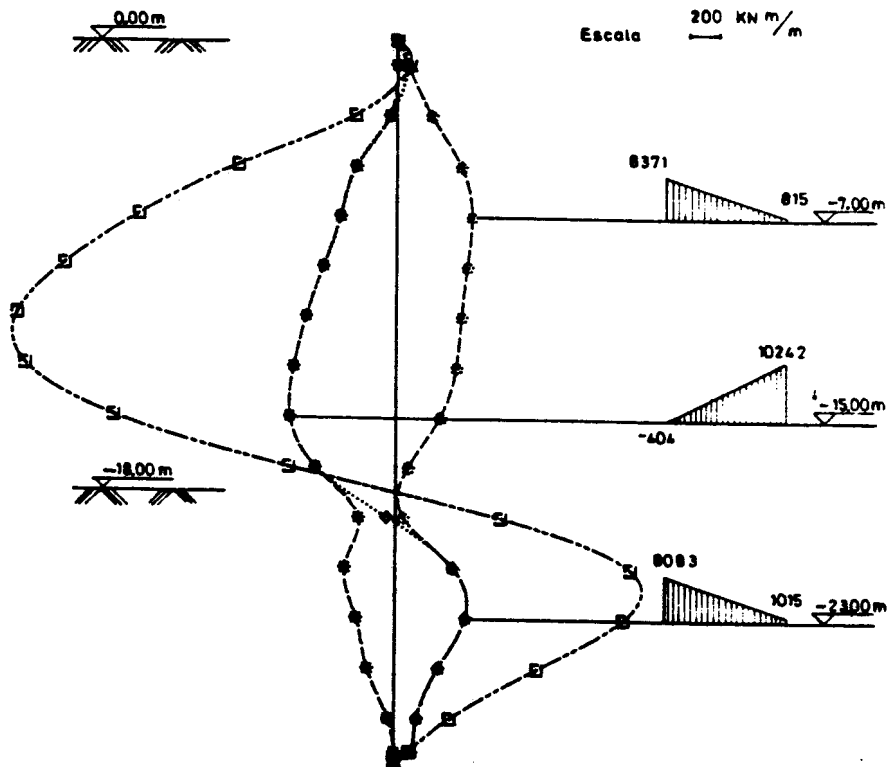


Fig.10 Diagramas de momentos flectores no final da escavação e envolvente de todas as fases (cortina pré-esforçada com escora a -4,0 m)

De qualquer modo, ressalvada que está a zona mais superficial, em que portanto o pré-esforço agrava os deslocamentos totais, conclui-se haver uma redução significativa e importante nos deslocamentos da cortina, e,



- - - - - Diagramas envolventes (parede com pré-esforço)
 - - - - - Diagrama de momentos final (parede com pré-esforço)
 - - - - - Diagrama de momentos final (parede sem pré-esforço)
- TENSÕES EM KPa

Fig.12 Momentos flectores e tensões na parede moldada, com e sem pré-esforço (escora a -2,0 m)

A situação de parede sem pré-esforço piora com a subida da escora para 2,0 m, mas a situação de parede com pré-esforço melhora significativamente tanto quanto aos deslocamentos como quanto aos momentos flectores negativos, os quais deixam de provocar tracções no betão nas primeiras fases de escavação, sem que tal melhoria implique um agravamento inconveniente dos momentos positivos.

3.4. Análise comparativa das soluções com e sem pré-esforço

A opção pela solução pré-esforçada há-de resultar de uma ou mais das seguintes considerações:

- não exequibilidade técnica da solução não pré-esforçada sem que haja um aumento da espessura da parede;
- necessidade de diminuir os deslocamentos no maciço;
- menor custo global (escavação, betão e armaduras).

No exemplo estudado, o dimensionamento da força de pré-esforço é executado cumprindo as prescrições regulamentares para peças correntes de betão pré-esforçado, em particular se conseguindo, para o caso da escora a -2,0 m, a verificação do estado limite de descompressão. Daqui resulta um valor para a força de pré-esforço que torna a solução não económica do ponto de vista das armaduras. No entanto, dado o tipo de estrutura em causa, em que o valor do pré-esforço é afinal condicionado pelas fases de construção que antecedem a execução dos pisos interiores do edifício, são aceitáveis as tensões de tracção no betão, na realidade suportadas pela armadura frouxa que está sempre presente. Consegue-se então a economia pretendida.

De qualquer modo, deve salientar-se que, no caso estudado, a quantidade de armadura requerida para resistir ao momento flector positivo na solução não pré-esforçada obriga a uma armadura de tracção de 15Ø32 por metro.

4. REFERÊNCIAS

BRAUN, W.M. (1972) "Post-tensioning diaphragm walls in Milan", Ground Engineering, Vol.5, nº2, p.21-23.

MATOS FERNANDES, M. (1983) "Estruturas flexíveis para suporte de terras. Novos métodos de dimensionamento", Tese de Doutoramento, FEUP.

XANTHAKOS, P. (1979) "Slurry walls", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.