

PREVISÃO NUMÉRICA DE DESLOCAMENTOS DE ESCAVAÇÕES REALIZADAS POR “TOP-DOWN”

NUMERICAL DISPLACEMENT PREDICTION IN TOP-DOWN CONSTRUCTION

Carvalho, Ana Teresa. *Engenheira Civil. Geotest, Consultores Geotécnicos e Estruturais, Lda.*
Santos Pereira, Carlos. *Professor Associado. Instituto Superior Técnico.*

RESUMO

Analisa-se alguns factores responsáveis pelos deslocamentos das escavações realizadas por “top-down”. Discute-se o processo tradicionalmente utilizado para a simulação da influência de alguns destes factores. Apresenta-se uma metodologia para simulação do comportamento deste tipo de estruturas com recurso ao método dos elementos finitos. Procura demonstrar-se a adequabilidade desta metodologia através da aplicação a um caso de obra.

ABSTRACT

Some important factors that are responsible for displacement on top-down construction are analysed. The simulation process normally used for these factors influence is discussed. A simulation methodology for the behaviour of these structures with finite element is presented. The numerical model is used to analyse a well-documented top-down case-study.

1. INTRODUÇÃO.

O comportamento de uma estrutura de contenção flexível é influenciado por diversos factores que estão relacionados essencialmente com as características dos terrenos, da própria estrutura de contenção e do processo construtivo utilizado. A influência de alguns destes factores pode ser considerada recorrendo a simulação através de modelos numéricos, sendo actualmente o MEF o método mais utilizado na previsão de comportamento de estruturas de contenção flexíveis. Este método permite modelar escavações tendo em conta diversos factores, como sejam: a existência de terrenos com diversas camadas com características distintas; a existência de nível freático e seu rebaixamento; as características da estrutura de contenção; a interacção solo/estrutura; a sequência construtiva.

Para uma previsão realista do comportamento da estrutura através do MEF são necessários, assim, uma adequada caracterização dos terrenos e o conhecimento da sequência construtiva que será utilizada durante a execução da obra.

No caso de estruturas de contenção realizadas pelo processo “top-down”, para além das questões gerais relacionadas com a simulação de escavações suportadas por cortinas flexíveis, há que ter particular atenção à adequada simulação do comportamento das lajes, o que constitui um aspecto fundamental e específico deste método construtivo. Isto deve-se ao facto de estes elementos estruturais serem os apoios da cortina, controlando os deslocamentos desta e tendo decisiva influência nos seus esforços.

2. O COMPORTAMENTO DAS LAJES.

As lajes são, em princípio, elementos com elevada rigidez axial, constituindo, sob o ponto de vista das suas propriedades elásticas, importantes impedimentos aos deslocamentos. Há, no entanto, factores que podem aumentar significativamente os deslocamentos permitidos por estes elementos, alterando, como consequência, o comportamento de toda a estrutura. A consideração dos factores que influenciam o comportamento das lajes tem sido feita de uma forma simplificada, através da adopção de uma rigidez reduzida. Considera-se que o aspecto da modelação das lajes não se encontra devidamente resolvido e que o referido procedimento não é suficientemente rigoroso, não permitindo ter em atenção algumas características importantes do comportamento das lajes. Por este motivo procedeu-se ao estudo dos factores considerados mais relevantes neste comportamento.

A observação de escavações realizadas com recurso ao processo “top-down” tem evidenciado deslocamentos superiores aos espectáveis considerando apenas a deformação elástica das próprias lajes.

A influência da retracção, da temperatura e da fluência tem sido referida por diversos autores, tais como St. John (1975), Burland e Hancock (1977), Hashash (1992), St. John *et al* (1993), Whittle *et al* (1993) e Ng e Lings (1995). No entanto, à excepção do trabalho apresentado por St. John (1975), os valores resultantes destas grandezas não parecem ter sido explicitamente calculados. O mesmo autor refere que a ligação deficiente da laje à cortina poderá igualmente influenciar o comportamento deste tipo de estrutura. Hashash (1992), no estudo de uma escavação realizada em Boston, refere que as diferenças entre os valores de deslocamentos que tinham sido previstos e os observados durante a execução da obra se deveram a deformações das lajes, na sua maior parte provocadas por fenómenos de retracção.

As tentativas para a consideração dos diversos efeitos nos deslocamentos das lajes têm sido realizadas através de modelos simplificados que consideram uma rigidez axial da laje inferior ao valor teórico. É o caso de autores como Burland e Hancock (1977) que adoptaram 1/3 do referido valor e St John *et al* (1993) que tomaram uma rigidez para as lajes igual a 20% da rigidez teórica.

Indicam-se em seguida os principais componentes que poderão contribuir para o deslocamento total das lajes:

- por deformação elástica;
- por retracção;
- por variação de temperatura;
- por fluência;
- devido à existência de juntas;
- devido a deficiente ligação entre a laje e a cortina.

3. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS LAJES.

A parcela elástica do deslocamento, considerando as eventuais aberturas, constitui o aspecto de modelação mais simples num modelo de cálculo. O material das lajes é habitualmente caracterizado através do módulo de elasticidade do betão aos 28 dias, no entanto, o facto de se proceder à escavação antes dos 28 dias, não parece ser um factor muito importante na definição da rigidez da laje, uma vez que a diferença entre os módulos de elasticidade não é considerável.

St. John (1975) refere que um aspecto que pode ser responsável por grande parte do deslocamento é a deficiente ligação das lajes à cortina. Apesar disso, considera-se que os métodos construtivos correntemente utilizados, dado que prevêm a betonagem da laje contra a parede, permitem ultrapassar esta questão, julgando-se por este motivo que estes deslocamentos se possam desprezar.

No que diz respeito às juntas de dilatação, a sua existência diminui a rigidez da laje, o que poderá ter influência no valor do deslocamento. Esta rigidez poderá ter em atenção, para efeitos de cálculo, a presença de material deformável nas juntas.

Factores como o deslocamento elástico, a retracção, a temperatura e a fluência parecem ser aqueles que poderão apresentar maior influência no comportamento das lajes. A este propósito refere-se no entanto que, devido ao facto de o nível de tensão nas lajes não ser muito significativo, a fluência não deverá, nas situações correntes, apresentar grandes consequências nos deslocamentos. Este facto foi referido por St. John (1975) e pôde ser comprovado por Carvalho (1997).

As variações de temperatura poderão ser responsáveis por deslocamentos significativos na laje de topo mas crê-se que a sua acção nas lajes inferiores não é muito relevante.

Investigadores como St. John (1975) referem, com base em observações de obras realizadas pelo processo “top-down”, que alguns deslocamentos medidos são inferiores aos correspondentes à situação de ocorrência da totalidade da retracção teórica. Este facto poderá ser explicado em parte devido à betonagem descontínua das lajes (execução faseada) e também ao facto de a secagem se processar em ambiente húmido, o que tem como consequência uma secagem muito lenta e como consequência uma diminuição dos deslocamentos devido à retracção.

Estes aspectos podem no entanto ser incluídos no modelo através da consideração da humidade do ar e, de forma simplificada, corrigindo os tempos de secagem. Apesar das dificuldades apontadas por St. John (1975), este investigador e outros, como Hashash (1992), não deixam de considerar a retracção como o factor com maior importância no comportamento das lajes.

Os factores que têm vindo a ser descritos podem ser incorporados no cálculo através de deslocamentos aplicados. No modelo adoptado no âmbito deste artigo as lajes são simuladas através de elementos barra, com comportamento elástico (o que permite ter em conta a parcela elástica) e a retracção, a fluência e variações de temperatura são simuladas aplicando um deslocamento na sua extremidade. Este deslocamento pode ser aplicado fase a fase de escavação e calculado, para cada fase, tendo em atenção o fenómeno de retracção, de fluência e da variação de temperatura. O cálculo destes factores, no caso da fluência e da retracção, deve ter em consideração os tempos decorridos entre fases.

4. ANÁLISE DE UMA ESCAVAÇÃO REALIZADA POR “TOP-DOWN” EM LONDRES.

4.1. Introdução.

Procedeu-se à análise de uma escavação realizada pelo processo “top-down”, comparando os valores obtidos do cálculo com os observados em obra. O caso em estudo é a escavação para construção do parque de estacionamento da Câmara dos Comuns, em Londres, realizada em 1973. Trata-se de uma estrutura completamente enterrada, construída na zona frontal ao Parlamento Britânico.

A escavação atingiu 18.5 m de profundidade, realizada numa área de aproximadamente 50×66 m², e foi efectuada muito próximo de estruturas de grande valor histórico como é o caso do Big Ben, a 16 m, e Westminster Hall, a 3 m. A sensibilidade destas estruturas a deformações do terreno levou a que fosse adoptado o processo “top-down” na realização da escavação.

A estrutura de contenção é constituída por uma parede moldada, com 1 m de espessura, atingindo os 30 m de profundidade. O escoramento da cortina foi realizado através das lajes do edifício, em número de 6, apoiadas na própria cortina e em pilares metálicos fundados em estacas. A primeira e última lajes apresentam uma espessura de 0.6 m e as restantes 0.4 m.

Esta escavação foi objecto de divulgação em diversos trabalhos, citando-se os de St. John (1975), Burland e Hancock (1977), Creasy e Zinn (1977) e Burland *et al.* (1979). Nos trabalhos de St. John (1975), Burland e Hancock (1977) e Burland *et al.* (1979) foram realizados cálculos por elementos finitos em que os efeitos da retracção foram considerados de forma simplificada através da redução da deformabilidade das lajes.

4.2. Malha de elementos finitos.

A malha de elementos finitos utilizada apresenta-se na Figura 1 e tem um comprimento de 115 m e uma altura de 60 m, sendo constituída por 516 elementos e 545 nós. No estudo realizado utilizou-se o programa de cálculo CRISP (Britto e Gunn, 1990), da Universidade de Cambridge.

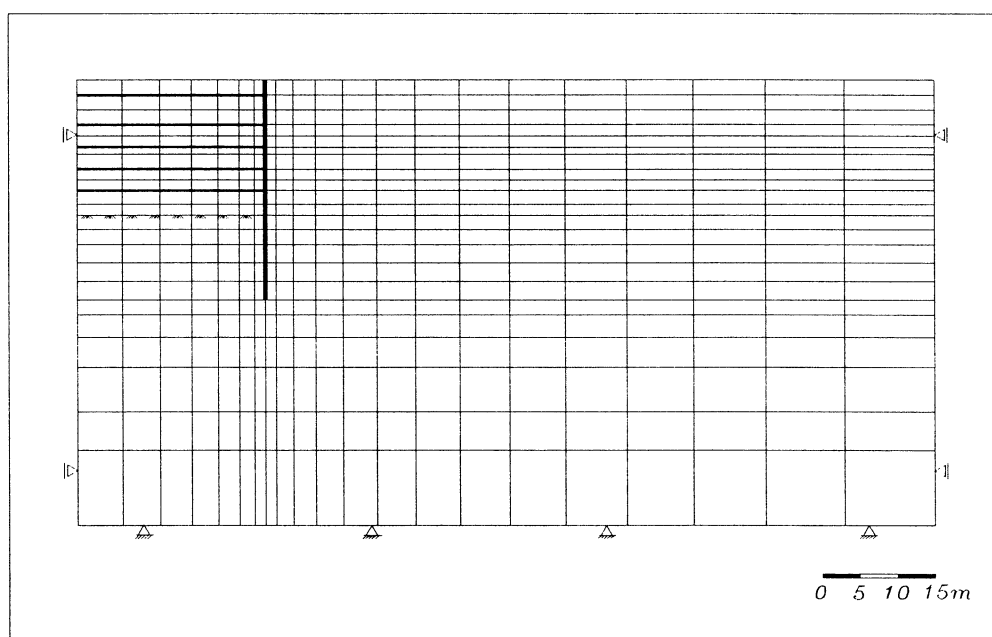


Figura 1 - Malha de elementos finitos.

A análise realizada é bidimensional, admitindo deformação plana, simétrica e considerando-se, por isso, metade da largura total de escavação.

4.3. Características geotécnicas.

O terreno é constituído por três camadas com características distintas e que a seguir se descrevem:

- entre os 0 e os 10 m, ocorrem superficialmente materiais de aterro, constituídos por cascalho, areia e argila, até aos 3 m de profundidade; segue-se uma argila orgânica mole e areia, por vezes com intercalações de cascalho de dimensão fina a média, com espessura de 6 m; inferiormente ocorre uma areia fina a média, medianamente densa e cascalho;
- entre os 10 e os 44 m, existe a formação da Argila de Londres; esta é constituída, nos 9 m iniciais, por uma argila rija a dura fissurada, cinzenta escura, passando a castanha em profundidade, por vezes com intercalações de areia ou silte; entre os 19 e os 30 m de profundidade ocorre uma argila siltosa, por vezes com intercalações de areia fina, diminuindo a sua frequência em profundidade, e ocasionalmente com fissuras verticais e diagonais; a partir dos 30 m de profundidade existe uma argila muito dura, cinzenta, fissurada;
- a partir dos 44 m, ocorre formação argilosa dura, castanha avermelhada.

O nível freático, determinado a partir de leituras realizadas em piezómetros colocados no local, encontrava-se a uma profundidade da ordem dos 6 m.

Os solos foram considerados com comportamento elástico-perfeitamente plástico, obedecendo ao critério de rotura de Tresca e Mohr-Coulomb.

O solo argiloso foi considerado com comportamento não drenado, excepto nos 10 m iniciais onde se considerou comportamento drenado. No que diz respeito à resistência ao corte não drenada dos solos e ao coeficiente de impulso em repouso, estes valores foram obtidos a partir do descrito em Burland e Hancock (1977).

Na primeira análise (cálculo 1) foram utilizados os parâmetros de deformabilidade indicados no Quadro 1, apresentados por St. John (1975) e Burland e Hancock (1977). De acordo com estes autores, estes valores foram determinados a partir de retro-análises de obras do mesmo tipo realizadas em formações semelhantes.

Quadro 1 - Parâmetros de cálculo utilizados no cálculo 1.

Profundidade (m)	c_u (kPa)	ϕ' (°)	E_u (E') (kPa)	ν_u (ν')	K_0	γ_t (kN/m ³)
0 - 10	-	30	(10 000)	(0.3)	0.5	19
10 - 30	80 a 300	-	55 000 a 215 000	0.49	1.3 a 2.1	21
30 - 45	360	-	215 000	0.49	2.1 a 2.3	21
45 - 60	500	-	215 000	0.49	2.3 a 2.4	21

Na segunda análise (cálculo 2) utilizaram-se os parâmetros de deformabilidade corrigidos por St. John (1975), tendo em conta os deslocamentos observados em obra. Apresentam-se estes valores no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros de cálculo utilizados no cálculo 2.

Profundidade (m)	c_u (kPa)	ϕ' (°)	E_u (E') (kPa)	ν_u (ν')	K_0	γ_t (kN/m ³)
0 - 10	-	30	(10 000)	(0.3)	0.5	19
10 - 30	70 a 405	-	50 000 a 285 000	0.49	1.3 a 2.1	21
30 - 45	425	-	300 000	0.49	2.1 a 2.3	21
45 - 60	500	-	400 000	0.49	2.3 a 2.4	21

A primeira análise foi realizada, para além do cálculo em que se considera explicitamente os efeitos da retracção, em duas outras variantes: uma considerando unicamente as propriedades elásticas das lajes (cálculo 1A) e uma outra simulando de forma simplificada aqueles efeitos (cálculo 1B). Resumem-se no Quadro 3 as análises realizadas.

Quadro 3 - Descrição das análises realizadas.

Cálculo	Descrição
1	com retracção; parâmetros de deformabilidade apresentados por St. John (1975) e Burland e Hancock (1977)
1A	sem retracção; parâmetros de deformabilidade apresentados por St. John (1975) e Burland e Hancock (1977)
1B	sem retracção; $E_{laje}=1/3E_{teórico}$; parâmetros de deformabilidade apresentados por St. John (1975) e Burland e Hancock (1977)
2	com retracção; parâmetros de deformabilidade corrigidos por St. John (1975)

4.4. Características da estrutura de contenção.

Optou-se por simular a cortina através de elementos de viga, para os quais foi adoptado comportamento elástico linear.

O contacto solo/cortina foi modelado através de elementos de junta para os quais se assumiu comportamento elástico-perfeitamente plástico.

Para a simulação das lajes, que constituem os apoios, foram considerados elementos barra que não transmitem momentos flectores à cortina.

Para a parede e para as lajes foi considerado, tal como Burland e Hancock (1977) um módulo de elasticidade do betão, E_c , de 21 GPa e um coeficiente de Poisson, ν_c , de 0.2. Nas análises em que o efeito da retracção foi considerado simplificada, o módulo de elasticidade adoptado para as lajes foi de 1/3 do anteriormente referido, valor este também adoptado na análise realizada por Burland e Hancock (1977).

Dado que a aplicação dos deslocamentos devidos às variações de temperatura e a fenómenos de fluência são realizados de forma idêntica, optou-se por apenas considerar os efeitos da retracção.

4.5. Acção da retracção.

Os valores resultantes da acção da retracção foram calculados com base nos tempos de construção de cada fase, referidos por Burland e Hancock (1977) e conforme o descrito no EC2 (1991).

As extensões devidas à retracção tiveram como base uma humidade ambiente de 50% (BS8110, 1985), uma temperatura média de 20°C e um betão fabricado por cimento de presa normal, com propriedades correspondentes ao módulo de elasticidade adoptado.

Foi considerado um tempo de construção, entre cada nível de escavação, de 30 dias.

Apresenta-se no Quadro 4 os tempos considerados e os deslocamentos acumulados devidos a fenómenos de retracção. Nas fases de consideração dos efeitos da retracção o deslocamento aplicado corresponde à diferença entre o valor acumulado nesta fase e o valor correspondente à fase anterior.

Quadro 4 - Tempo de construção e deslocamentos aplicados (retracção).

Nível	Tempo acumulado (dias)				
	Deslocamento acumulado (mm)				
	1ª laje	2ª laje	3ª laje	4ª laje	5ª laje
1º	$\frac{60}{1.10}$	-	-	-	-
2º	$\frac{105}{1.45}$	$\frac{45}{1.42}$	-	-	-
3º	$\frac{150}{1.73}$	$\frac{90}{2.00}$	$\frac{45}{1.42}$	-	-
4º	$\frac{180}{1.89}$	$\frac{120}{2.31}$	$\frac{75}{1.83}$	$\frac{30}{1.16}$	-
5º	$\frac{210}{2.04}$	$\frac{150}{2.57}$	$\frac{105}{2.16}$	$\frac{60}{1.64}$	$\frac{30}{1.16}$

4.6. Sequência construtiva.

A análise foi realizada por fases, tendo em conta a sequência construtiva, cujo procedimento é sugerido na Figura 2 e que a seguir se indica:

- a) construção da 1ª laje (laje de topo);
- b) escavação do 1º nível;
- c) aplicação de deslocamento na 1ª laje (1ª retracção);
- d) construção da 2ª laje;
- e) escavação do 2º nível;
- f) aplicação de deslocamentos na 1ª e 2ª lajes (2ª retracção);
- g) repetição da sequência indicada, para os restantes níveis, até se atingir a cota final de escavação.

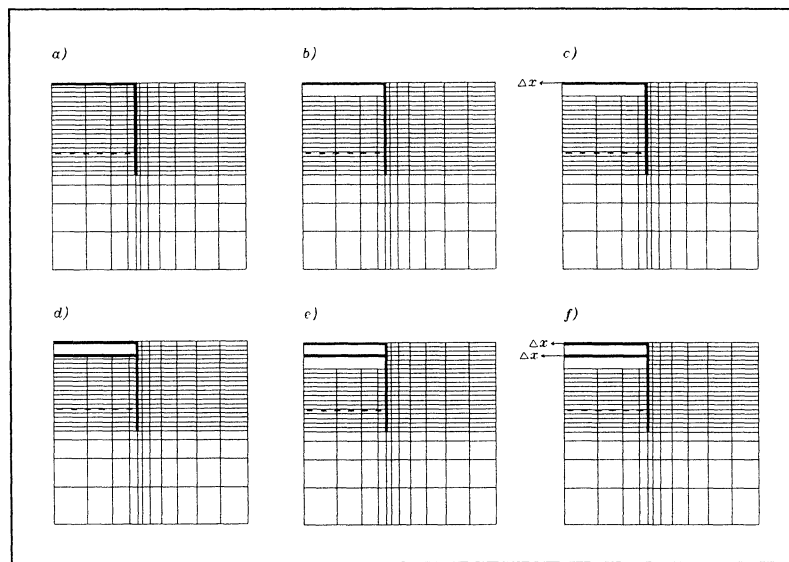


Figura 2 - Sequência construtiva.

5. RESULTADOS OBTIDOS E SUA COMPARAÇÃO COM OS VALORES OBSERVADOS.

5.1. Deslocamentos horizontais da cortina.

Apresenta-se na Figura 3a os resultados obtidos do cálculo 1 em comparação com os valores dos deslocamentos horizontais da cortina observados, para as diversas fases de execução. Verifica-se que a ordem de grandeza dos valores obtidos do cálculo é concordante com as observações registadas, mas apenas na zona escavada. Constata-se, no entanto, que esta relativa proximidade dos resultados é conseguida à custa de deslocamentos na base da cortina muito superiores aos observados.

Na Figura 3b, para demonstrar a importância da consideração dos fenómenos de retracção no comportamento das escavações realizadas pelo processo “top-down”, apresenta-se os resultados do cálculo 1A. Nessa figura verifica-se um claro afastamento entre resultados observados e previstos com o modelo utilizado.

A consideração de um método simplificado, adoptando 1/3 do módulo de elasticidade para as lajes, melhora significativamente os resultados obtidos para o cálculo 1A, conforme se pode observar na Figura 3c em que se apresentam os deslocamentos da análise 1B.

Na Figura 3d apresenta-se os resultados do cálculo 2, o qual corresponde às correcções dos parâmetros proposta por St. John (1975). Observa-se uma melhor modelação do comportamento da base da cortina mas os deslocamentos acima do nível de escavação não traduzem tão correctamente os reais.

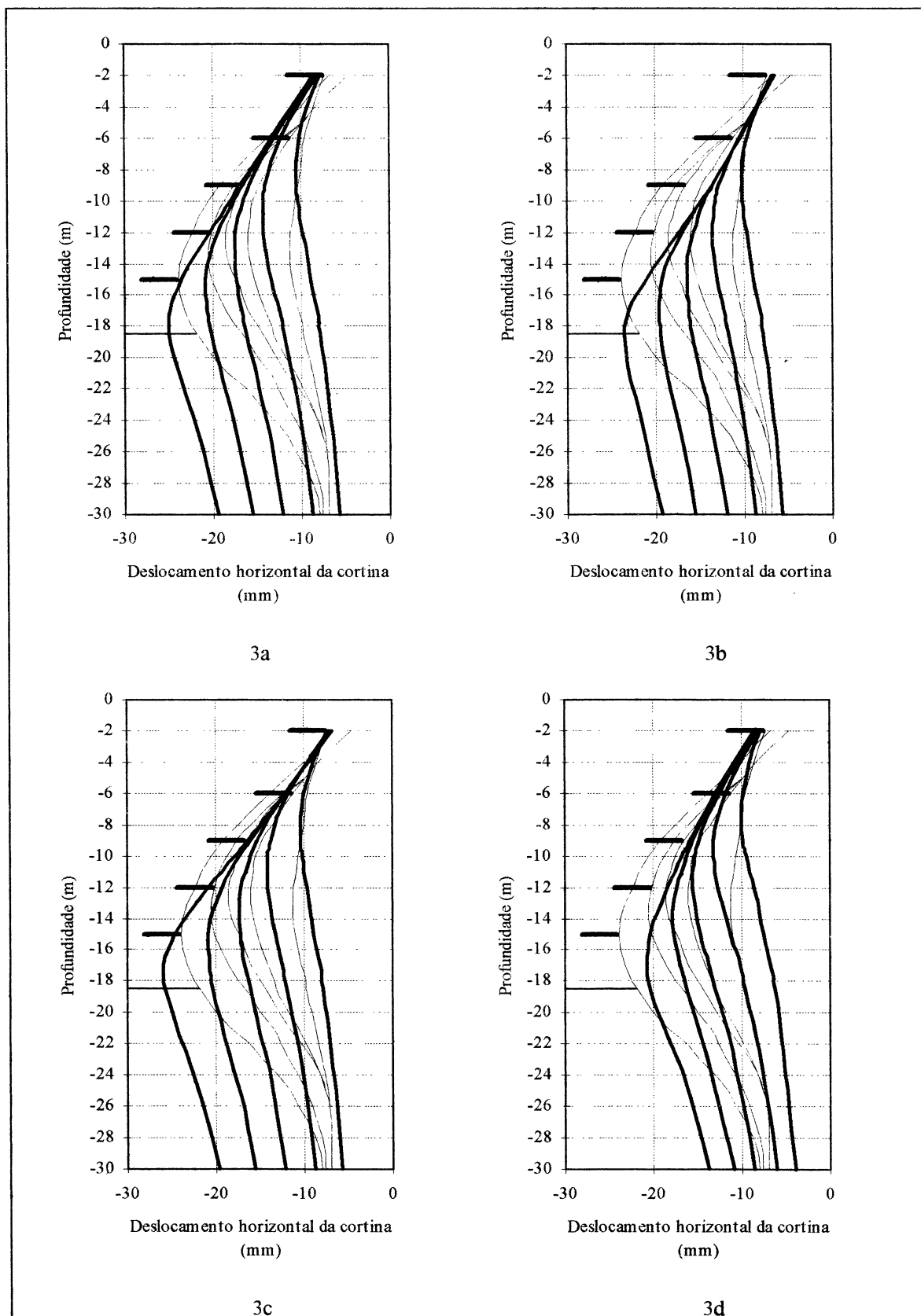


Figura 3 - Deslocamentos horizontais da cortina (cálculo — ; valores observados —).

5.2. Assentamentos da superfície do terreno no tardo da cortina.

Apresenta-se na Figura 4 os resultados dos assentamentos obtidos do cálculo comparados com os valores medidos na última fase construtiva. Chama-se a atenção para o facto de as operações de instalação da cortina e das estacas terem, só por si, conduzido a assentamentos da superfície no terreno. Dado que, no modelo de cálculo adoptado, este efeito não foi tido em consideração, os pontos relativos à observação representam as diferenças entre os valores medidos na última fase e os lidos imediatamente antes do início da escavação.

Os valores medidos e observados apenas se aproximam nos pontos mais próximos da parede (7 a 20 m). Constata-se que os valores observados a distâncias superiores a 20 m se afastam consideravelmente dos calculados. Com efeito, verificam-se assentamentos muito pequenos para distâncias superiores a 40 m, constatando-se, no entanto, que os assentamentos calculados se prolongam a grandes distâncias.

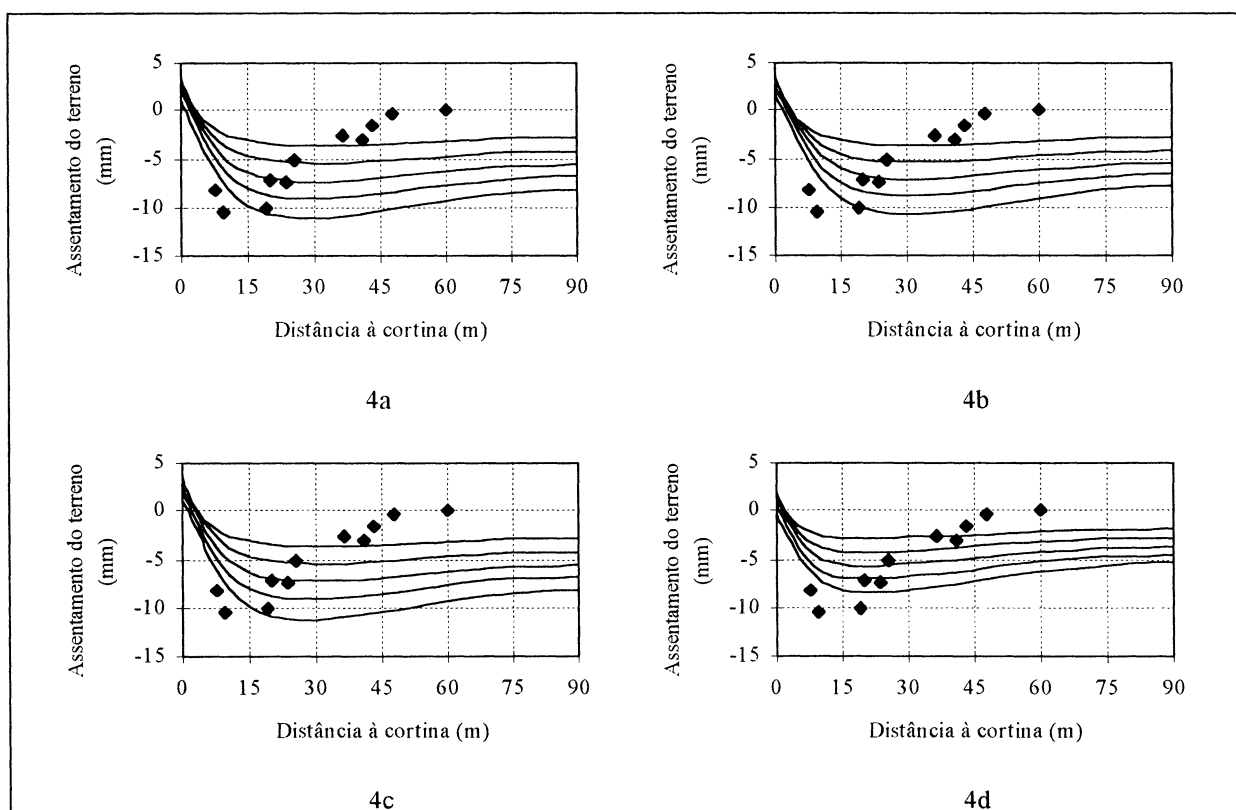


Figura 4 - Assentamentos da superfície do terreno no tardo da cortina.

6. CONCLUSÕES.

Apresenta-se metodologia, por aplicação de deslocamentos, para simulação do comportamento de estruturas de contenção realizadas por “top-down” recorrendo ao método dos elementos finitos. Com esta metodologia pretende-se ter em conta os principais factores responsáveis pelos deslocamentos naquele tipo de estruturas.

Aplica-se o modelo proposto a um caso de obra realizado por “top-down”. São realizadas diversas análises considerando ou não fenómenos de retracção. Da comparação dos deslocamentos horizontais da cortina, verifica-se que a melhor aproximação aos valores observados resulta da consideração explícita dos fenómenos de retracção. Verifica-se ainda uma boa aproximação no caso em que se adopta um método simplificado para ter em conta a retracção, com redução do módulo de elasticidade das lajes. Em ambos os casos esta aproximação é mais evidente na zona da cortina acima da base da escavação, afastando-se dos valores observados abaixo deste nível. A consideração da retracção parece, assim ser

importante para uma adequada descrição do comportamento da cortina. O modelo de cálculo adoptado consegue, para o caso real estudado, descrever de forma que se pode considerar muito razoável os deslocamentos horizontais observados na cortina. No que diz respeito aos assentamentos, todos os cálculos efectuados conduziram a valores que apenas se aproximam dos observados até uma distância de 20 m da cortina. Para distâncias superiores os valores calculados afastam-se bastante dos observados. O modelo de cálculo parece, assim, evidenciar menor capacidade para uma adequada descrição do comportamento da escavação no que diz respeito à previsão dos assentamentos da superfície do terreno no tardo da cortina.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Secção de Geotecnia, Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico pela disponibilização do programa CRISP, ao Eng. Nuno Guerra pela colaboração prestada, à empresa Geotest, Consultores Geotécnicos e Estruturais, Lda, a disponibilização de meios materiais e humanos e à Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, que, através do Programa Praxis XXI, contribuiu para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Britto, A. M. e Gunn, M. J. (1990) - Users and Programmer's Guide. Vols. 1 e 3, Cambridge University.

BS8110 (1995) - Structural use of concrete, Part 2, Code of practice for special circumstances.

Burland, J. B. e Hancock, R. J. R. (1977) - Underground car park at the House of Commons, London: Geotechnical aspects. The Structural Engineer. No.2, Vol. 55, Fev.

Burland, J. B.; Simpson, B. e St John, H. D. (1979) - Movements around excavations in London Clay. Design parameters in geotechnical engineering. BGS, Londres, Vol. 1.

Carvalho, A. T. (1997) - Comportamento de escavações suportadas por cortinas escoradas com lajes. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos (em apreciação).

Creasy, L. R. e Zinn, W. V. (1977) - Underground car pack at the House of Commons, London: design and contractual aspects. The Structural Engineer. No 2, Vol. 55, Fev.

EC2 (1991) - Eurocódigo 2. Projecto de estruturas de betão. Pré-norma europeia. Versão portuguesa.

Hashash, Y. M. A. (1992) - Analysis of Deep Excavations in Clay. PhD thesis, MIT, Abril.

Ng, C. W. W. e Lings, M. L. (1995) - Effects of Modeling Soil Nonlinearity and Wall Installation on Back-Analysis of Deep Excavation in Stiff Clay. Journal of Geot. Engineering, Vol. 121, Out, No. 10.

St John, H. D. (1975) - Field and theoretical studies of the behaviour of ground around deep excavations. PhD thesis, Cambridge University.

St John, H. D.; Potts, D. M.; Jardine, R. J. e Higgins, K. G. (1993) - Prediction and performance of ground response due to construction of a deep basement at 60 Victoria Embankment. Predictive soil mechanics, págs 581-608, Thomas Telford, London.

Whittle, A. J.; Hashash, Y. M. A. e Whitman, R. V. (1993) - Analysis of Deep Excavation in Boston. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 1, págs 69-90, Jan.