

# Comportamento de três estruturas de contenção tipo Berlin\*

## Performance of three Berlin-type retaining walls

ANTÓNIO GOMES CORREIA\*\*

NUNO M. DA COSTA GUERRA\*\*\*

ALEXANDRE PINTO\*\*\*\*

RESUMO - As paredes de contenção tipo Berlin são utilizadas frequentemente em Lisboa nas escavações em terrenos Miocénicos, muito representativos da Geologia da região. O uso destas estruturas de contenção, frequentemente junto de estruturas antigas e sensíveis aos movimentos, requer, muitas vezes a nível de projecto, a previsão de deslocamentos provocados pela escavação. Para validação dos modelos de cálculo que permitem esta previsão, foi estabelecido um programa de investigação com vista à obtenção de dados experimentais provenientes da instrumentação de escavações realizadas em Lisboa com estruturas de contenção tipo Berlin.

Na primeira parte deste artigo apresentam-se resultados da instrumentação de três estruturas de contenção tipo Berlin, envolvendo medições de: deslocamentos horizontais e verticais, variações de esforços em ancoragens e, num caso particular, deformações num perfil metálico HEB.

Na segunda parte do artigo, apresentam-se os resultados de cálculos de elementos finitos realizados para a previsão do comportamento das escavações, procedendo-se à comparação com os dados obtidos da instrumentação.

SYNOPSIS - 'Berlin-type' concrete retaining walls are often used in Lisbon in the Miocene soils, very representative of this region. The use of these walls, frequently near sensitive and old structures, require at design level accuracy in the prediction of deformations caused by excavation. To validate the calculation models being used, a research program has been undertaken to obtain experimental results from monitoring of 'Berlin-type' retaining walls' excavations.

The first part of this paper deals with the results of monitoring of three 'Berlin-type' concrete walls involving the following measurements: wall horizontal and vertical displacements, anchor load variations and, in a particular case, the strains in the vertical steel profiles.

In the second part of the paper, 2D and 3D finite element calculations were used to predict the behaviour of these structures and their results were compared with those obtained from monitoring.

## 1 - INTRODUÇÃO

Um grande número de escavações realizadas em Lisboa, como as que são executadas para caves de edifícios ou para estacionamento automóvel, são frequentemente realizadas em terrenos miocénicos, sobreconsolidados, com boas características mecânicas e com o nível

---

\* Comunicação apresentada ao XIV Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Hamburgo, 1997.

\*\* Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado com Agregação do IST

\*\*\* Mestrado em Mecânica dos Solos, Assistente do IST

\*\*\*\* Mestre em Engenharia de Estruturas, Tecnasol-FGE

freático habitualmente abaixo da profundidade de escavação. Nestes terrenos, são frequentemente utilizadas estruturas de contenção de betão armado tipo Berlim, também designadas como tipo Lisboa.

Para o projecto da fase provisória destas estruturas de contenção, válido ao longo da construção, é adequado considerar o comportamento não drenado para as formações envolvidas. Nestes materiais sobreconsolidados, é possível realizar uma escavação vertical com 15 m ou mais, atestando assim que o problema principal para o projecto não é, portanto, a resistência do solo, da parede ou das ancoragens; o problema principal são os movimentos da parede, em especial quando próximo da área de escavação existem edifícios antigos ou estruturas e serviços sensíveis aos movimentos. Para fazer face a estes problemas, torna-se particularmente importante a previsão de deslocamentos, a instrumentação de obras e a respectiva observação.

Neste artigo, apresentam-se três casos de estudo envolvendo paredes de contenção tipo Berlim. Indicam-se brevemente as propriedades geotécnicas e a descrição geológica das formações, assim como os equipamentos de instrumentação e os respectivos resultados de observação. Para dois dos três casos de estudo, foram realizados cálculos bidimensionais por elementos finitos; para um dos casos procedeu-se igualmente a cálculos tridimensionais. Comparam-se, depois, os resultados do cálculo e da observação, especialmente no que diz respeito aos efeitos de canto tridimensionais.

Os casos de estudo apresentados neste artigo são: 1. Escavação realizada na Av. Duque d'Ávila; 2. Escavação realizada para o Centro Colombo; 3. Escavação realizada na Rua Ivens. Todas as obras foram executadas pela empresa Teixeira Duarte.

## 2 - LOCALIZAÇÃO. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

Todos os casos de estudo dizem respeito a escavações realizadas em Lisboa, em solos miocénicos sobreconsolidados, com a cobertura superficial de aterros heterogéneos. Nos casos de estudo 1 e 2, os solos miocénicos envolvidos são siltes e argilas; no caso de estudo 3, os solos são principalmente constituídos por areias e siltes finos.

### 2.1 - Caso de estudo 1: Av. Duque d'Ávila

O desenho esquemático da localização deste caso de estudo está representado na Figura 1a. A estratigrafia do terreno, bem como as respectivas propriedades mecânicas, são apresentadas no Quadro 1. Para os solos sobreconsolidados (OC) foi estimado um coeficiente de impulso em repouso,  $K_0$ , de 0,8.

Quadro 1 - Caso de estudo 1: estratigrafia do terreno

Solo #	Descrição	Profund. (m)	$c_u$ (kPa)	$E_u$ (kPa)
1	aterro argiloso	0-2,6	30	6000
2	argila siltosa OC	2,6-9,2	175	35000
3	silte arenoso OC	9,2-10,8	-	75000
4	calcário argiloso	>10,8	-	75000

## 2.2 - Caso de estudo 2: Centro Colombo

Uma planta esquemática do local deste caso de estudo é apresentada na Figura 1b. A parede tipo Berlim de betão armado foi realizada apenas no lado junto à Rua Ana de Castro Osório.

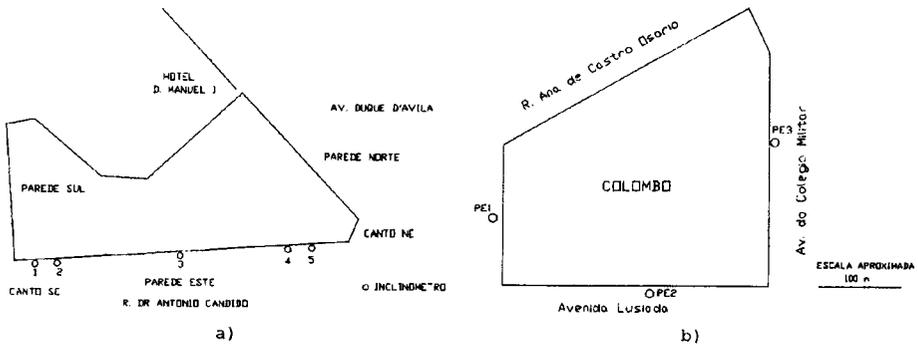


Figura 1 – Casos de estudo: a) Av. Duque de Ávila; b) Centro Colombo: esquema de localização

A estratigrafia do terreno, bem como as respectivas propriedades mecânicas, são apresentadas no Quadro 2. Para os solos sobreconsolidados (OC) foi estimado um coeficiente de impulso em repouso,  $K_0$ , de 1,0.

Quadro 2 - Caso de estudo 2: estratigrafia do terreno

Solo #	Descrição	Profund. (m)	$c_U$ (kPa)	$E_U$ (kPa)
1	Aterro argiloso	0-4,0	75	7500
2	Argila OC	4,0-12,0	75-225	7500-30000
3	Argila OC	12,0-16,0	225-300	30000-95000

## 2.3 - Caso de estudo 3: R. Ivens

O objectivo deste caso de estudo é sobretudo a descrição de uma técnica de instrumentação dos perfis metálicos verticais das paredes de contenção tipo Berlim com vista, especialmente, à determinação dos momentos flectores nos perfis. A informação geotécnica existente sobre o local é limitada e pode ser descrita da seguinte forma: dos 0 aos 3,0 m os solos são aterros constituídos por areias argilosas; dos 3,0 aos 9,0 m os solos miocénicos são areias finas compactas, por vezes com siltes argilosos e argilas siltosas; a profundidades superiores a 9,0 m os terrenos tornam-se calcários.

Na Figura 2 apresenta-se esquematicamente a localização do local.

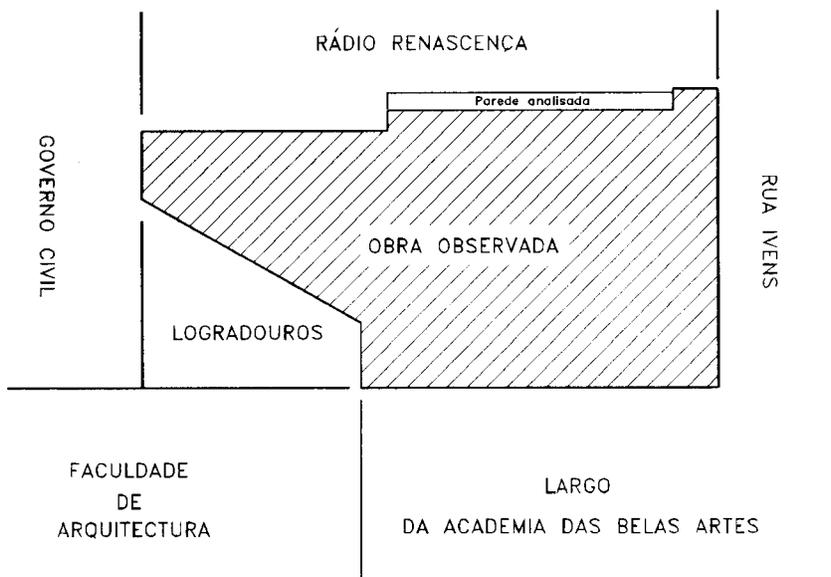


Figura 2 – Caso de estudo 3: esquema de localização

### 3 - MÉTODO DE CONSTRUÇÃO

As paredes de contenção tipo Berlim, tal como são usualmente executadas em Portugal, têm um procedimento construtivo semelhante ao das paredes tipo Berlim clássicas, mas em lugar das pranchas de madeira, são utilizados painéis de betão armado. Na Figura 3 apresentam-se as fases de construção consideradas na modelação deste tipo de estrutura de contenção: a) colocação dos perfis metálicos; b) escavação do 1º nível; c) execução do 1º nível de painéis de betão; d) instalação das ancoragens e aplicação do pré-esforço; e) escavação do 2º nível; f) execução dos painéis do 2º nível e seguintes; etc.

Após a instalação dos perfis metálicos verticais, a escavação é executada por níveis e, em cada nível, por painéis alternados: durante a escavação de um painel primário, os painéis adjacentes - painéis secundários - são deixados por escavar, até que a superfície vertical do terreno escavado esteja protegida com betão e, preferencialmente, a ancoragem seja instalada. Este procedimento tem como objectivo a minimização de movimentos no terreno, através da mobilização de efeitos de arco.

### 4 - TÉCNICAS DE INSTRUMENTAÇÃO

Para os casos de estudo 1 e 2 a parede foi instrumentada com inclinómetros, células de ancoragem mecânicas e foram realizadas observações utilizando métodos topográficos de precisão. Os inclinómetros foram instalados no terreno, a 0,75 m da parede, tendo sido utilizados para a medição dos deslocamentos horizontais da parede. Os erros envolvidos nestas medições são variáveis com a profundidade e têm um valor máximo de 2 mm no topo do inclinómetro. Os métodos topográficos de precisão foram utilizados para a medição de deslocamentos horizontais e verticais. As células de carga foram usadas para medir as cargas iniciais nas ancoragens e as suas variações ao longo da obra, com uma precisão de 3 kN.

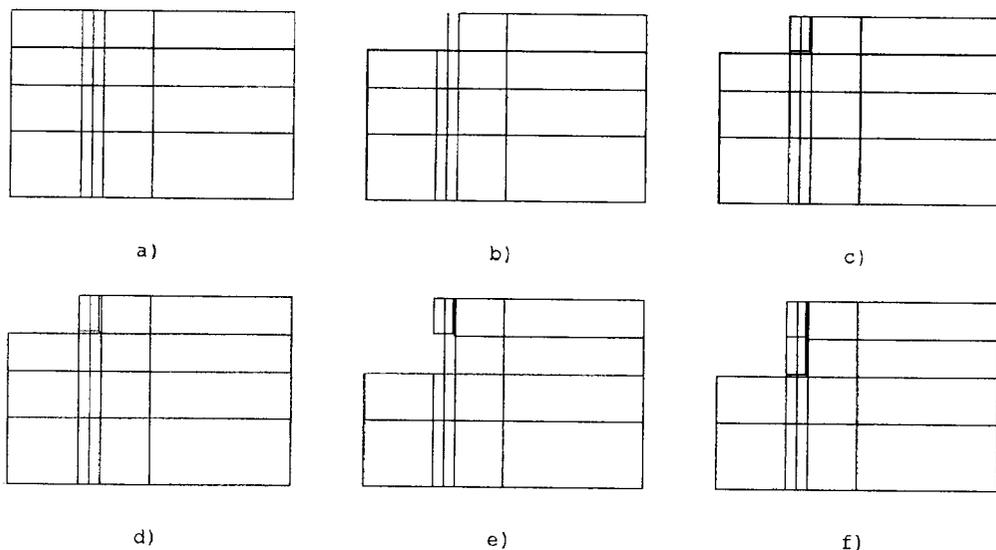


Figura 3 - Procedimento construtivo de uma cortina de contenção tipo Berlim.

O sistema usado para o cálculo dos deslocamentos utilizando os métodos topográficos de precisão encontra-se descrito em Matos et al. (1992); no caso de estudo 1, os pontos estação PQ, PHO e PHE representados na Figura 4 não foram considerados fixos, os alvos foram colados à superfície da parede (MINCII, M16I, etc.) e os pontos fixos foram alvos colocados em edifícios do outro lado da rua (RDIR, RDE, etc.) No caso de estudo 2 o procedimento foi semelhante mas os pontos estação (PE1, 2 e 3, representados na Figura 1b) puderam ser considerados fixos. Os erros dos deslocamentos horizontais são estimados por elipses de erro; os erros dos deslocamentos verticais dependem da localização dos pontos observados e são variáveis entre 0,5 e 0,9 mm.

A localização dos inclinómetros para os casos de estudo 1 e 2 está representada nas Figuras 1a e 5, respectivamente.

Devido ao carácter experimental das observações realizadas no caso de estudo 3, foi apenas instalado um inclinómetro, próximo de um perfil metálico instrumentado em 12 secções com 54 extensómetros eléctricos. O equipamento de medição e as técnicas utilizadas foram escolhidos para evitar os erros devido a variações de temperatura. Informações mais detalhadas foram apresentadas por Pinto e Gomes Correia (1994).

## 5 - RESULTADOS DA OBSERVAÇÃO

### 5.1 - Caso de estudo 1: Av. Duque d'Ávila

Os painéis deste caso de estudo tinham 3 a 3,5 m de altura e 3 m de largura. Foram utilizados quatro níveis de ancoragens com carga instalada de 360 kN, espaçadas na horizontal de 3 m. As ancoragens tinham 18, 15 e 12 m de comprimento total, sendo 6 m de comprimento de selagem. A rigidez real das ancoragens foi determinada *in situ*, durante a operação de pré-esforço das ancoragens.

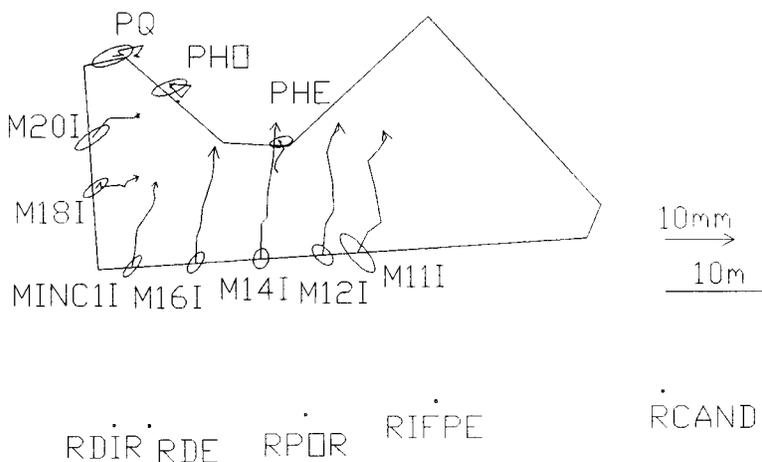


Figura 4 - Caso de estudo 1: método topográfico de precisão. Localização dos pontos de medição e resultados dos deslocamentos

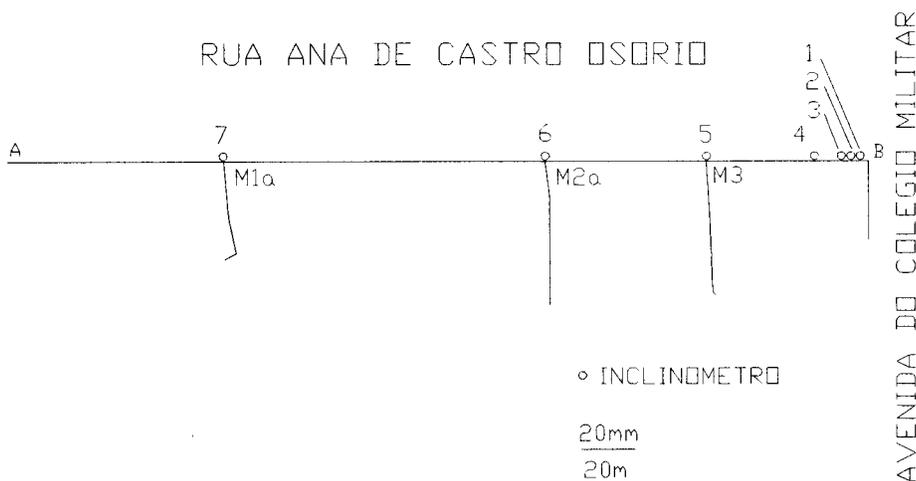


Figura 5 - Caso de estudo 2: localização dos meios de observação

Apresentam-se na Figura 6 exemplos dos resultados obtidos da observação com inclinômetros (para os inclinômetros 1 e 4). A importância dos efeitos tridimensionais pode ser verificada comparando as duas figuras, assim como através da observação da Figura 4, onde se representa os sucessivos deslocamentos do topo da parede obtidos dos métodos topográficos de precisão. A relação entre o máximo deslocamentos horizontal e a altura de escavação teve um valor máximo de 0,15% e ocorreu no inclinômetro 3. A Figura 7 apresenta a evolução desta relação com a altura de escavação para o inclinômetro 4.

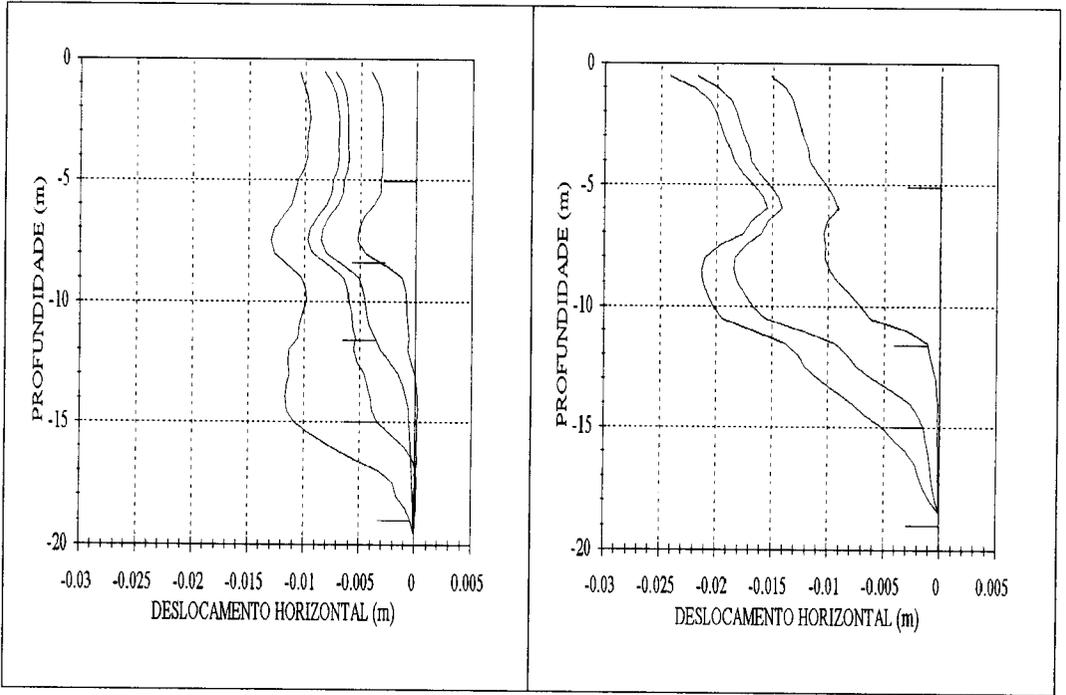


Figura 6 - Caso de estudo 1: resultados das leituras com inclinômetro

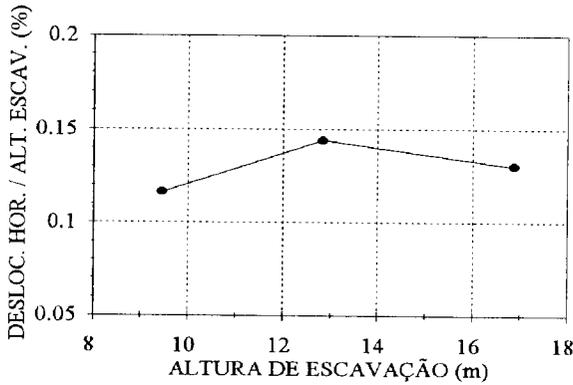


Figura 7 - Caso de estudo 1: relação deslocamento horizontal / altura de escavação para o inclinômetro 4.

A Figura 8 apresenta um exemplo da comparação e da concordância entre os resultados dos inclinômetros e dos métodos topográficos de precisão; os números presentes nesta figura dizem respeito às diversas etapas de medição, ao longo da obra.

Os deslocamentos verticais da parede obtidos através de métodos topográficos de precisão são apresentados na Figura 9, sendo igualmente observados efeitos tridimensionais de canto.

As variações de carga nas ancoragens não foram muito significativas: o máximo decréscimo de carga foi de 4,8% e o máximo acréscimo de 7,8%, referidos à carga inicial da ancoragem.

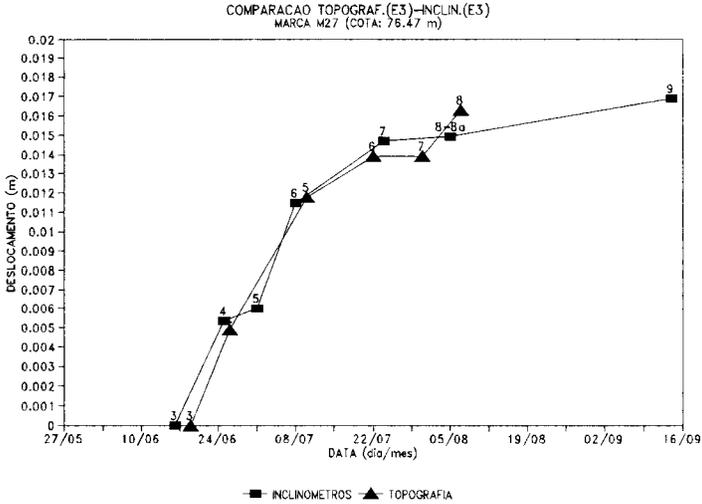


Figura 8 - Caso de estudo 1: comparação entre os deslocamentos horizontais obtidos do inclinómetro 3 e os provenientes dos métodos topográficos de precisão.

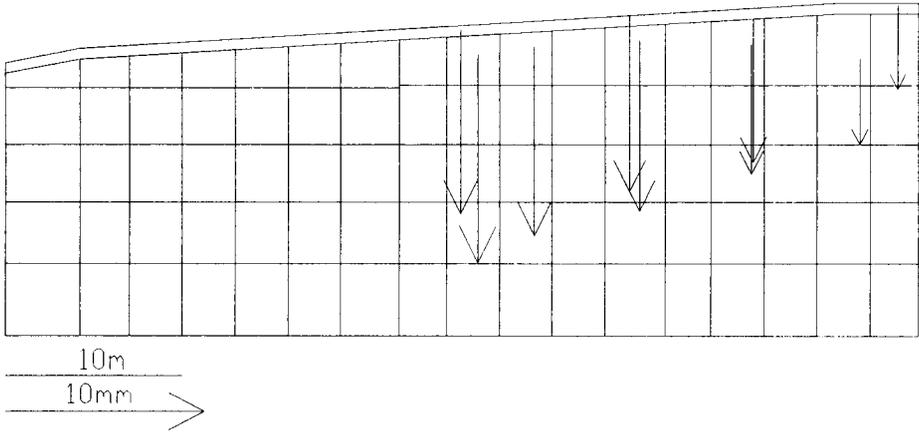


Figura 9 – Caso de estudo 1: método topográfico de precisão. Resultados dos deslocamentos verticais

5.2 - Caso de estudo 2: Centro Colombo

O método de construção foi idêntico ao adoptado no caso de estudo 1. A largura dos painéis foi de 4 m e foram usados três níveis de ancoragem de 420 kN, espaçados na horizontal de 4 m. O comprimento total das ancoragens foi de 14 e 12 m.

Os deslocamentos obtidos em dois dos inclinómetros (inclinómetros 2 e 5) são apresentados na Figura 10. A relação entre o deslocamento horizontal máximo e a altura de escavação tem um valor máximo de 0,69% e foi obtida no inclinómetro 5. A Figura 11 apresenta a evolução desta relação com a altura de escavação para o inclinómetro 4.

Mesmo se as condições da escavação são tão próximas quanto possível da deformação plana (como neste caso de estudo), próximo do canto da parede há claramente um importante efeito tridimensional, reduzindo os deslocamentos. No que diz respeito à variação do esforço nas ancoragens verificou-se um decréscimo máximo de 6,0% e um acréscimo máximo de 6,9%.

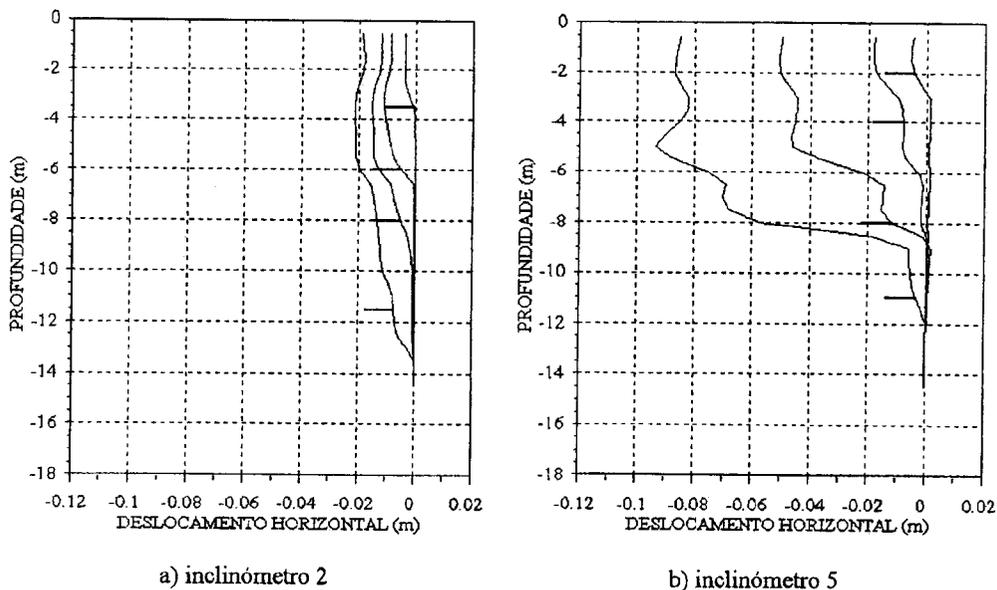


Figura 10 – Caso de estudo 2: resultados das leituras com inclinómetro

### 5.3 - Caso de estudo 3: Rua Ivens

Os deslocamentos horizontais medidos são baixos, com excepção dos que foram afectados por um incidente durante a construção, como ilustrado na Figura 12.

A instrumentação com extensómetros permitiria conhecer os momentos flectores, assim como o esforço normal de compressão no perfil metálico. No entanto, devido a uma degradação prematura dos extensómetros instalados para permitir a correcção de temperatura, foi apenas possível realizar a análise de momentos flectores. No futuro, uma protecção mais efectiva dos extensómetros deverá ser realizada. Os resultados dos momentos flectores são também apresentados na Figura 12.

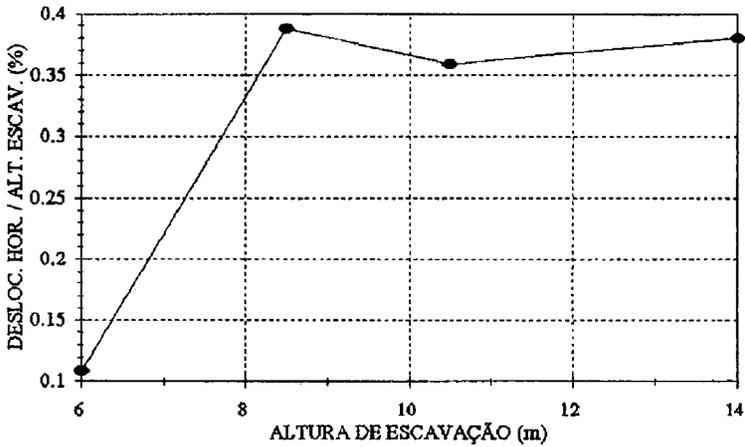


Figura 11 – Caso de estudo 2: Relação deslocamento horizontal/altura de escavação para o inclinómetro 4

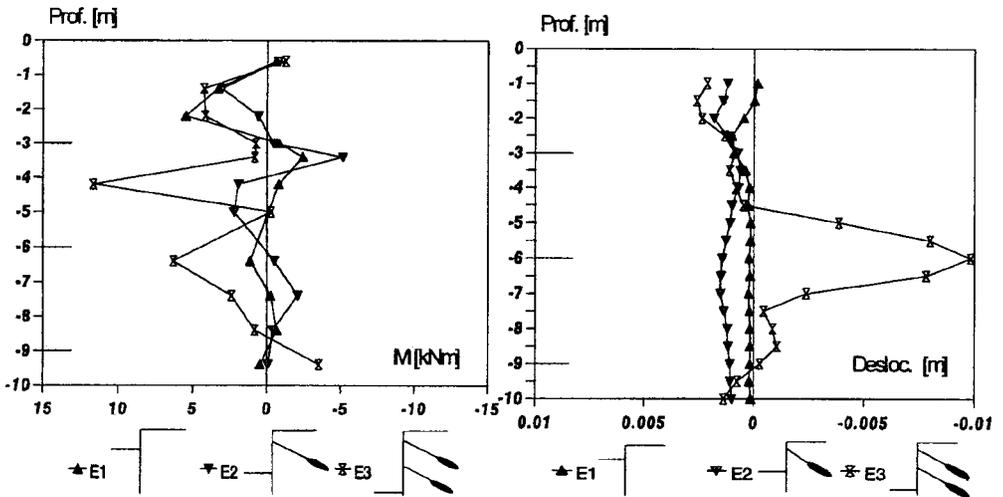


Figura 12 – Caso de estudo 3: resultados das leituras com inclinómetro e momentos flectores

A comparação entre estes resultados e os dos deslocamentos horizontais revela uma boa concordância entre as duas técnicas de instrumentação usadas.

## 6 - CÁLCULOS POR ELEMENTOS FINITOS

### 6.1 - Introdução

A modelação bidimensional e tridimensional destas estruturas de contenção flexíveis (Guerra, 1993; Gomes Correia e Guerra, 1994) foi realizada com a utilização do programa de elementos finitos CRISP (Britto e Gunn, 1987, 1990).

Para o comportamento do solo foram utilizados os modelos elástico linear e elástico - perfeitamente plástico.

A natureza do processo construtivo impõe que o solo deva manter-se vertical na altura correspondente à diferença entre níveis de escavação. A fase construtiva foi, assim, analisada, assumindo comportamento não drenado para o solo. A parede de contenção de betão e os perfis metálicos foram considerados com comportamento elástico linear. Os elementos utilizados para o solo e para a parede foram os quadriláteros de 8 nós. Para a modelação dos perfis verticais foram utilizados elementos barra e, para a modelação da interface parede-solo, elementos junta.

A forma de modelar o comportamento das ancoragens depende da existência de movimentos causados pela escavação na zona de selagem. Se a zona de selagem não tem movimentos significativos causados pela escavação, o pré-esforço poderá ser modelado utilizando uma força nodal aplicada num ponto da parede e a própria ancoragem através de um elemento barra. O caso em que a zona de selagem tem movimentos significativos causados pela escavação, é mais complexo. A solução tradicional tenta representar a zona de selagem na malha de elementos finitos, o que apresenta diversos inconvenientes (Matos Fernandes, 1983). No modelo que se apresenta neste artigo foi considerado aceitável assumir para as ancoragens um comportamento elástico linear, sendo, no entanto, atribuída às barras que as representam a rigidez real medida para as ancoragens (dividida pelo espaçamento horizontal entre ancoragens). O elemento barra que representa a ancoragem é limitado por um nó na parede (representando a cabeça da ancoragem) e por um outro no interior do maciço de terreno, representando a zona de selagem. Faz-se notar que o ponto no interior do maciço não tem aplicada a carga total da ancoragem mas apenas as variações nas cargas das ancoragens.

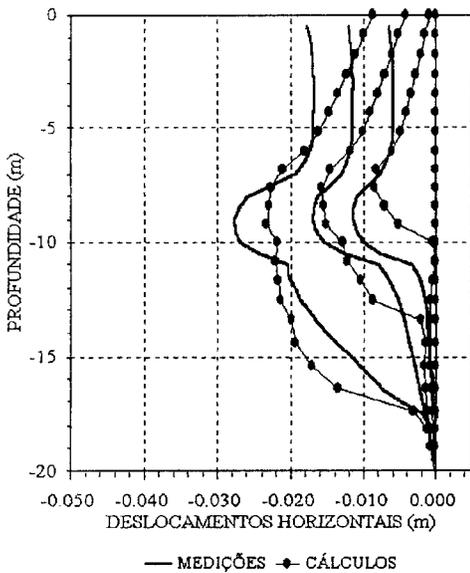
## 6.2 - Caso de estudo 1: Av. Duque d'Ávila

O comportamento da escavação da Av. Duque d'Ávila foi previsto por cálculos bidimensionais e tridimensionais, utilizando modelos elástico-perfeitamente plástico e elástico, respectivamente.

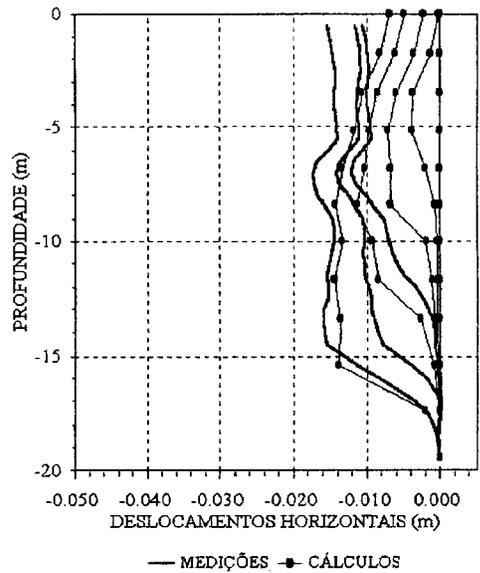
No modelo de cálculo bidimensional, os elementos de junta foram considerados com uma adesão não drenada  $c_a=50\text{kPa}$ , um ângulo de atrito nulo, uma rigidez normal não drenada  $k_n=850000\text{kPa}$  e uma rigidez tangencial não drenada  $K_t=20000\text{kN/m}$ .

Os deslocamentos obtidos nos cálculos bidimensionais numa secção da parede em deformação plana são apresentados na Figura 13, com os resultados obtidos para o inclinómetro 3.

Pode verificar-se que há uma razoável concordância entre os resultados dos cálculos e os observados em obra, especialmente tendo em atenção a grande influência das particularidades do processo construtivo nos deslocamentos. A concordância não se apresenta tão boa junto à superfície do terreno, o que poderá ser explicado pelo facto de, numa fase de descarga (pré-esforço), o solo apresentar maior rigidez, aspecto que não foi considerado na modelação.



a) inclinômetro 3 - cálculo 2D



b) inclinômetro 2 - cálculo 3D

Figura 13 – Caso de estudo 1: comparação entre o comportamento observado e os resultados dos cálculos

A Figura 13 mostra igualmente os resultados da instrumentação (inclinômetro 2) e dos cálculos tridimensionais. O modelo tridimensional, apesar de simplificado, parece adequado à modelação deste tipo de escavação em solos com boas características mecânicas e nos quais, em consequência, o comportamento seja sobretudo elástico. Verifica-se uma boa concordância entre os resultados da observação e os resultados dos cálculos por elementos finitos, assim como um nítido efeito tridimensional.

### 6.3 - Caso de estudo 2: Centro Colombo

A escavação do Centro Colombo foi modelada através de cálculo bidimensional. Foram consideradas as mesmas características dos elementos de junta adoptadas no caso de estudo 1. Na Figura 14 apresenta-se os resultados obtidos da modelação em confronto com os obtidos do inclinômetro 4. Verifica-se igualmente uma relativa boa concordância nos resultados obtidos.

## 7 - CONCLUSÕES

A execução de escavações em solos sobreconsolidados, com boas características mecânicas pode conduzir a deslocamentos significativos, em especial quando as tensões iniciais são elevadas, as alturas de escavação importantes e os níveis de pré-esforço baixos.

A instrumentação é um aspecto muito importante para no futuro se retirarem importantes dados da experiência adquirida, em especial porque permite a calibração de modelos de cálculo.

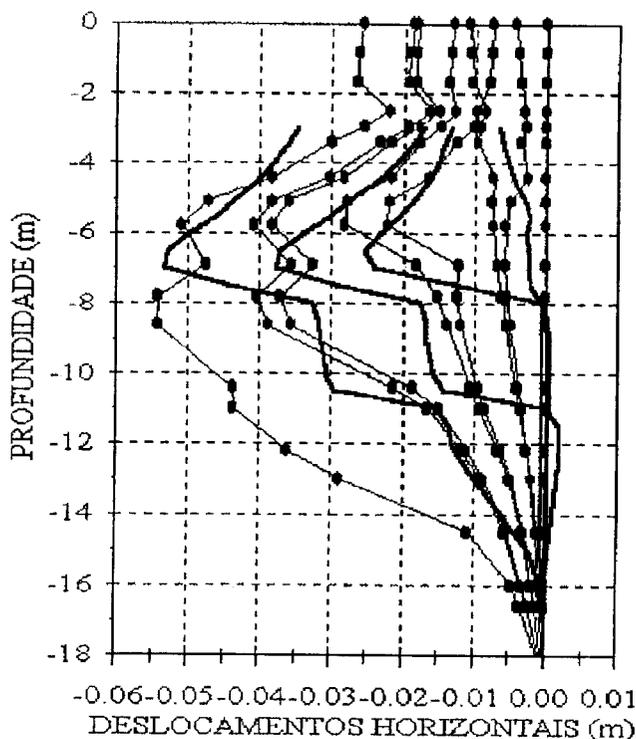


Figura 14 – Caso de estudo 2: comparação entre o comportamento observado e os resultados dos cálculos

A instrumentação com extensómetros dos perfis metálicos utilizados no caso de estudo 3 conduziu a resultados aceitáveis e parece constituir uma técnica prometedora para obter as forças de compressão e os momentos flectores nos perfis metálicos. Para uso futuro, são necessárias algumas correcções ao procedimento adoptado, em particular no que diz respeito a mecanismos de protecção dos extensómetros mais eficientes.

Foi obtida uma relativa concordância entre os movimentos previstos para a parede através do método dos elementos finitos e o comportamento observado durante a fase construtiva de duas paredes de contenção tipo Berlim, em Lisboa.

Para a previsão de deslocamentos em condições próximas da deformação plana os cálculos bidimensionais por elementos finitos parecem apropriados. Próximo dos cantos, são necessários cálculos tridimensionais, com o objectivo de tirar partido, para a economia, destas zonas na parede de contenção.

## 8 - AGRADEDIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as contribuições do Prof. Manuel de Matos Fernandes, da empresa Teixeira Duarte e o apoio financeiro de JNICT - Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica e do Programa Praxis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRITTO, A.M. e GUNN, M.J. - *Critical state soil mechanics via finite elements*. Ellis Horwood Series in Civil Engineering, 1987.
- BRITTO, A.M. e GUNN, M.J. - *Crisp 90. Users and programmer's guide*. Cambridge University, 1990.
- GUERRA, N.M. - *Paredes de contenção tipo Berlim. Análise de efeitos tridimensionais*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 1993.
- GOMES CORREIA, A. e GUERRA, N.M. - *Previsão do Comportamento e Observação de uma Estrutura de Contenção Tipo Berlim em Lisboa*. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Foz do Iguaçu, Vol. 3, pp. 913-920, 1994.
- MATOS, J.; GUERRA, N.M.; BAIO, M. e HENRIQUES, M.J. - *Observação e Análise de Deslocamentos de uma Estrutura de Contenção Flexível em Zona Urbana*. Seminário Tendências Evolutivas da Cartografia, Lisboa, pp. 61-67, 26-27, 1992.
- MATOS FERNANDES, M.A. - *Estruturas flexíveis para suporte de terras. Novos métodos de dimensionamento*. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, 1983.
- PINTO, A. e GOMES CORREIA, A. - *Previsão do comportamento e observação de uma estrutura de contenção tipo Berlim em Lisboa*. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Foz do Iguaçu, Vol. 3, pp. 913-920. 1994.