

ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO TIPO BERLIM COM PERFIS EXTERIORES: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO POR VIA NUMÉRICA

Berlin-type retaining walls with external soldier piles: numerical performance evaluation

Nuno M. da Costa Guerra*

Manuel Matos Fernandes**

António Gomes Correia*

António Silva Cardoso**

RESUMO - São por vezes executadas escavações urbanas com recurso a estruturas de contenção tipo Berlim em que os perfis metálicos verticais são instalados externamente à parede. O recurso a esta solução é normalmente justificado pela dificuldade de realização de furos tangentes ou muito próximos de empenas de edifícios vizinhos. Para além da sua maior exposição a impactos de equipamentos que circulam no interior da escavação, o funcionamento de tais perfis será sempre menos adequado do que o de perfis incorporados na parede a construir. Neste artigo modela-se numericamente uma escavação com recurso a estrutura de contenção tipo Berlim considerando duas hipóteses: uma em que os perfis são interiores (incorporados na parede) e uma outra em que os perfis são exteriores. Compara-se os resultados obtidos, com ênfase para os esforços instalados nos perfis metálicos, e analisa-se os factores referentes às ligações entre estes e a parede que mais influenciam o comportamento da estrutura.

SYNOPSIS - Urban excavations are occasionally performed with the support of Berlin-type retaining walls with soldier piles external to the concrete wall. This solution is usually justified by the difficulty in drilling holes tangent to the walls of contiguous buildings. Besides the greater exposure to impacts from equipments circulating inside the excavation, the behaviour of such soldier piles will always be less adequate than the one of piles inside the concrete wall. In this paper an excavation using a Berlin-type retaining wall is numerically modelled considering two possibilities: one in which soldier piles are incorporated in the wall and another with external soldier piles. The results are compared with emphasis on the stresses on the soldier piles. The factors related to pile-wall connections which influence the most the performance of the structure are analysed.

1 - INTRODUÇÃO

Entre as estruturas de contenção flexíveis, as cortinas tipo Berlim definitivas são das mais frequentes em Portugal. São paredes de contenção tipo Berlim aquelas em que se procede à instalação prévia de perfis verticais em furos realizados na periferia da área a escavar e em que a escavação é conduzida por níveis e acompanhada da execução alternada de painéis de betão armado, primários - executados em primeiro lugar - e secundários - executados após os primários.

A betonagem dos painéis vai, assim, sendo realizada de cima para baixo, isto é, executando em primeiro lugar os painéis mais superficiais, ficando os perfis metálicos verticais incorporados na parede. A estabilidade e a manutenção de deformações compatíveis com o meio envolvente são asseguradas normalmente por ancoragens pré-esforçadas, seladas no terreno.

*Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura.

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil.

Neste tipo de estruturas de contenção, a função dos perfis verticais é a de transmissão das cargas verticais que provêm do peso próprio da parede de betão e da habitualmente forte componente vertical das forças das ancoragens, não sendo usualmente considerada no dimensionamento qualquer função de absorção de momentos flexores, uma vez que esta função é assegurada pelo elemento de betão armado, betonado no local, que possui rigidez à flexão consideravelmente superior.

Esta hipótese não é válida quando se usam perfis exteriores à parede, como é o caso apresentado na Figura 1. O recurso a esta solução é, por vezes, justificado pela dificuldade de realização de furos tangentes ou muito próximos da empena de um edifício vizinho. Como é fácil de compreender, o funcionamento de tais perfis será sempre menos adequado do que o de perfis incorporados na parede a construir, pelo que se considera tal expediente pouco conveniente. No entanto, caso sejam utilizados, será necessário ter bem presentes as consequências da sua colocação do modo descrito, para o que o estudo preliminar apresentado em Guerra et al. (2002b) pretendeu dar alguma contribuição e que com este artigo se pretende complementar.



Fig. 1 - Perfis exteriores em estrutura de contenção tipo Berlim.

2 - DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Considera-se um caso de estudo numérico de uma escavação realizada com recurso a solução de contenção tipo Berlim, com características correntes, e procede-se à análise da influência do recurso a perfis exteriores face à solução, mais desejável, de perfis incorporados na parede. Realiza-se igualmente uma análise paramétrica dos factores que mais directamente influenciam o comportamento das cortinas com perfis exteriores.

O caso numérico analisado é o de uma escavação simétrica, esquematicamente representada na Figura 2, de 12 m de profundidade e 20 m de largura, realizada em terreno argiloso com resistência não drenada, c_u , constante em profundidade e igual a 80 kPa, com um coeficiente de impulso em repouso, K_0 , de 0,7 e com um peso volúmico, γ , de 20 kN/m³. Considerou-se um módulo de deformabilidade não drenado E_u igual a $300c_u$ e, para a interface solo-parede, uma adesão de 50 kPa e uma rigidez tangencial de 25000 kN/m³. Sob o maciço argiloso considerou-se um estrato com elevadas características mecânicas.

A parede foi considerada com 0,40 m de espessura e o pré-esforço das ancoragens foi de-

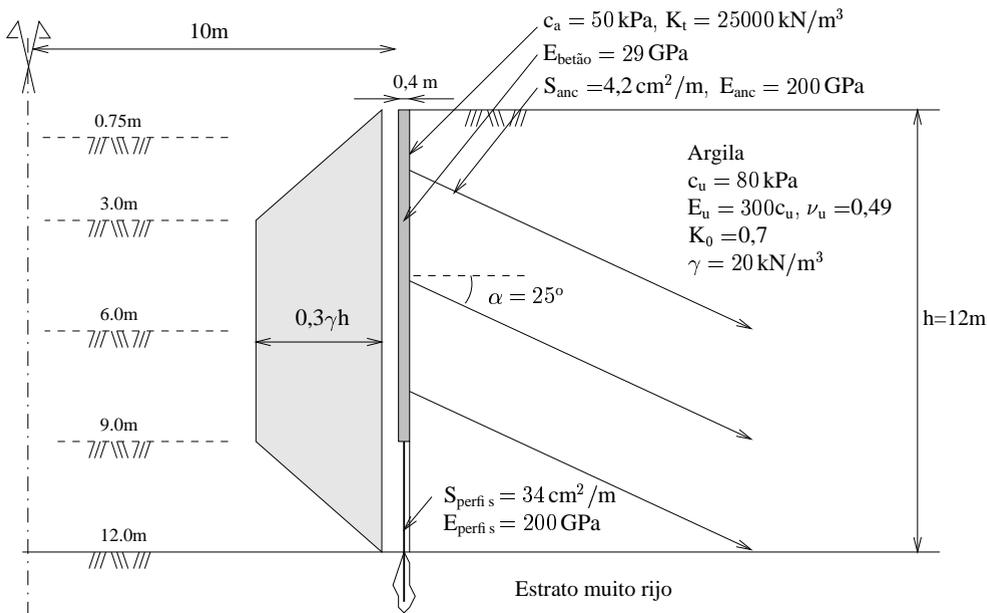


Fig. 2 - Geometria do caso de estudo e propriedades dos materiais.

fi nido por forma a que a sua componente horizontal equilibrasse o diagrama semi-empírico de Terzaghi e Peck (Terzaghi e Peck, 1967) para argilas rijas a duras, de forma trapezoidal e com tensão máxima de $0,3\gamma h$. Considerando as ancoragens inclinadas a 25° , distribuídas em 3 níveis, e admitindo, por simplificação, uma carga idêntica em todas elas, é-se conduzido a cargas de pré-esforço de 238 kN/m. Para as armaduras das ancoragens foi considerada uma secção de $4,2\text{ cm}^2/\text{m}$. Admitiu-se ainda a rigidez efectiva das ancoragens igual a 90% da rigidez teórica. Considerou-se os perfis verticais HEB120 de aço S235, afastados, em média, de 1 m, o que corresponde a uma secção de $34\text{ cm}^2/\text{m}$.

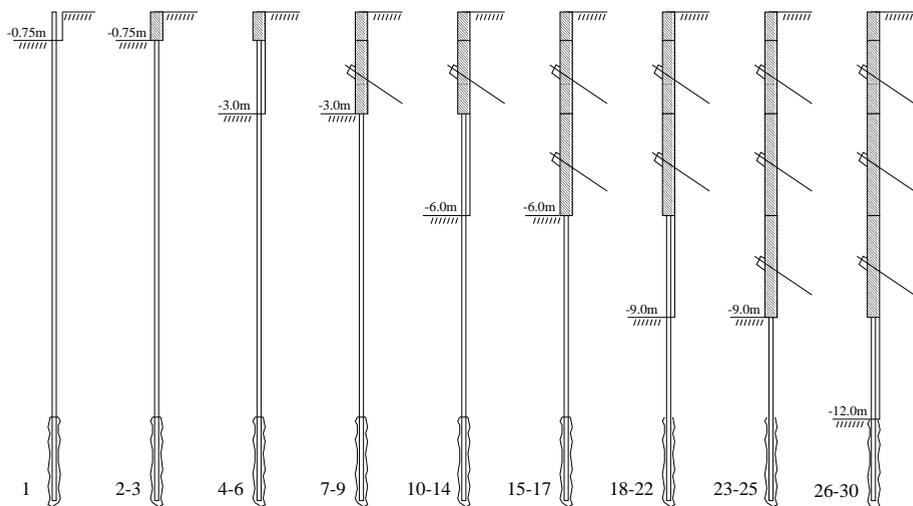
Foram realizadas 11 análises, com as características que se indicam no Quadro 1. Em todas elas admitiu-se que na proximidade imediata da escavação não existe qualquer carregamento motivado por construções vizinhas.

O procedimento construtivo adoptado é o indicado na Figura 3(a), para as análises A e J, e

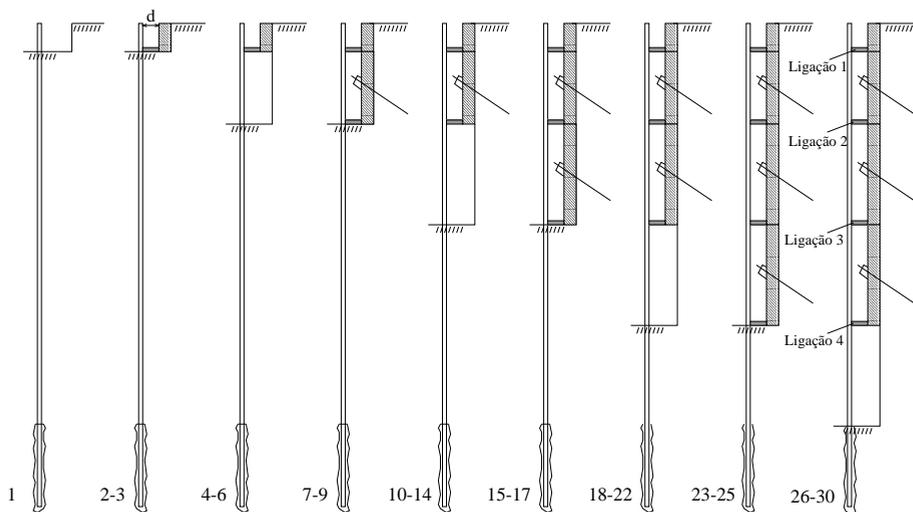
Quadro 1 - Análises realizadas

Análise	Perfis	d (m)	$\frac{(EI)_{lig}}{(EI)_{perfil}}$	Comportamento de perfis e ligações	Observações
A	interiores	–	–	elástico-perfeitamente plástico	–
B	exteriores	0,8	1	elástico	–
C	exteriores	1,2	1	elástico	–
D	exteriores	0,4	1	elástico	–
E	exteriores	0,1	1	elástico	–
F	exteriores	0,8	4	elástico	–
G	exteriores	0,8	50	elástico	–
H	exteriores	0,8	1	elástico-perfeitamente plástico	–
I	exteriores	0,8	1	elástico-perfeitamente plástico	rotura de ligações
J	interiores	–	–	elástico-perfeitamente plástico	ancoragens a 45°
L	exteriores	0,8	1	elástico-perfeitamente plástico	ancoragens a 45°

Obs: d é a distância entre os perfis (exteriores) e a face da parede; $(EI)_{lig}/(EI)_{perfil}$ é a relação entre as rigidezes à flexão das ligações e dos perfis.



(a) Análises A e J



(b) Análises B, C, D, E, F, G, H, I e L

	Viga	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Descrição da fase
Fase número	1	4-6	10-14	18-22	26-30	escavação
	2	7	15	23	–	betonagem
	3	8	16	24	–	colocação em serviço do painel de betão
	–	9	17	25	–	aplicação da força na ancoragem

Fig. 3 - Descrição esquemática do processo construtivo das estruturas de contenção tipo Berlim definitivas (adaptado de Guerra (1999))

o da Figura 3(b) para as restantes análises. Foi admitido que a ligação perfil s-parede se situa na base de cada nível betonado, o que corresponde à situação menos gravosa para o comportamento do perfil l em relação à encurvadura. No caso de esta ligação se fazer no topo de cada nível o comprimento do perfil l não confiado é o dobro (Figura 4), o que é, naturalmente, de evitar.

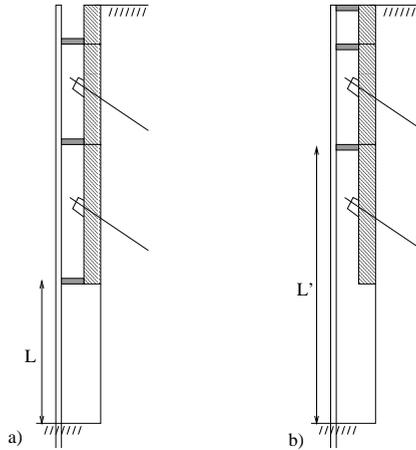


Fig. 4 - Ligação perfil-parede executada ao nível da base (a) e do topo (b) do painel.

Nas paredes de contenção tipo Berlim com perfis interiores, é habitual realizar-se o dimensionamento dos perfis verticais considerando apenas o esforço normal. No caso da estrutura correspondente à análise A, admitindo que não há mobilização de adesão na interface solo-parede, a carga actuante é igual à soma do peso da parede com as componentes verticais das cargas nas ancoragens. Na fase condicionante (última fase de escavação), considerando um coeficiente de segurança parcial de 1,35, a carga actuante de cálculo assume o valor $N_{Sd} = 528 \text{ kN/m}$. Admitindo um comprimento de encurvadura de 2 m e os perfis HEB120 com afastamento de 1,0 m, tal como está indicado na Figura 2, obtém-se, de acordo com ENV 1993-1.1 (1992), uma carga resistente de cálculo $N_{Rd} = 528 \text{ kN/m}$, pelo que se considera verificada a segurança.

3 - MODELO DE CÁLCULO

O programa de elementos finitos utilizado (Cardoso, 1987; Almeida e Sousa, 1998; Guerra, 1999), em linguagem Fortran 77, foi desenvolvido para aplicações geotécnicas e permite a resolução de uma grande variedade de problemas bidimensionais, em deformação plana, tensão plana e estado axissimétrico. As análises podem ser realizadas adoptando um modelo de comportamento elastoplástico, com endurecimento e amolecimento, com critérios de Von Mises, Drucker-Prager, Tresca ou Mohr-Coulomb.

O método de resolução do sistema de equações usado no programa é o método frontal de resolução de matrizes definidas positivas. As análises são realizadas por incrementos e por iterações, correspondendo os incrementos às diversas fases construtivas e sendo as iterações realizadas para garantir a resposta do solo de forma globalmente equilibrada. Para a resolução do problema não linear podem ser usados diversos algoritmos de resolução que se baseiam nos métodos de Newton-Raphson e Newton-Raphson modificado.

Para a modelação das diversas componentes de uma estrutura geotécnica, estão disponíveis elementos finitos tipo barra de 2 e 3 nós (Zienkiewicz, 1977), elementos de junta de 4 e 6 nós (Goodman et al., 1968), elementos bidimensionais isoparamétricos de 4 e 8 nós (Zienkiewicz, 1977) e elementos bidimensionais subparamétricos de 5 nós (Doherty et al., 1969).

Diversas solicitações podem ser simuladas, nomeadamente a colocação de reforços ou apoios estruturais (como pregagens, escoras, ancoragens), a realização de escavações, a construção de

aterros, a aplicação de forças concentradas e distribuídas, a imposição de deslocamentos e a retirada de apoios.

No caso em estudo, o solo, a parede e os perfis verticais foram modelados por elementos de 8 nós, o contacto entre o solo e a parede com elementos junta de 6 nós e as ancoragens através de elementos barra de 2 nós.

Dado que as zonas de selagem das ancoragens e dos perfis verticais estão localizadas no substrato de elevadas características mecânicas, não existem, praticamente, movimentos destas zonas. Por este motivo, os pontos representativos das zonas de selagem podem ser considerados fixos. Além disso, no que respeita aos perfis metálicos verticais, admitiu-se que não poderia ocorrer rotura da sua fundação, pelo que a carga vertical limite será condicionada pela encurvadura.

As análises foram efectuadas em tensões totais, admitindo para o solo comportamento elástico-perfeitamente plástico, usando o critério de cedência de Tresca. A parede foi considerada elástica linear, com as propriedades de um betão C20/25 (ENV 1992-1.1, 1991).

O contacto solo-parede foi modelado através de elementos junta, com as características indicadas anteriormente. Os elementos barra (ancoragens) foram considerados com comportamento elástico-perfeitamente plástico. A descrição detalhada da simulação do processo construtivo de paredes tipo Berlim definiativas pode ser encontrada em Guerra (1999) e Guerra et al. (2002a).

4 - PERFIS INCORPORADOS NA PAREDE *VERSUS* PERFIS EXTERIORES

Na análise A os perfis foram considerados com comportamento elástico-perfeitamente plástico (ver Quadro 1), sendo a tensão limite a correspondente à carga de rotura por encurvadura. Não tendo no entanto ocorrido plastificação em nenhuma fase, faz-se a comparação com a análise B, em que os perfis foram considerados com comportamento elástico-linear. A ligação dos perfis à parede foi também considerada elástica-linear e admitiu-se que a sua rigidez à flexão é igual à dos perfis. A possibilidade de ocorrência de plastificação será analisada na secção 6.

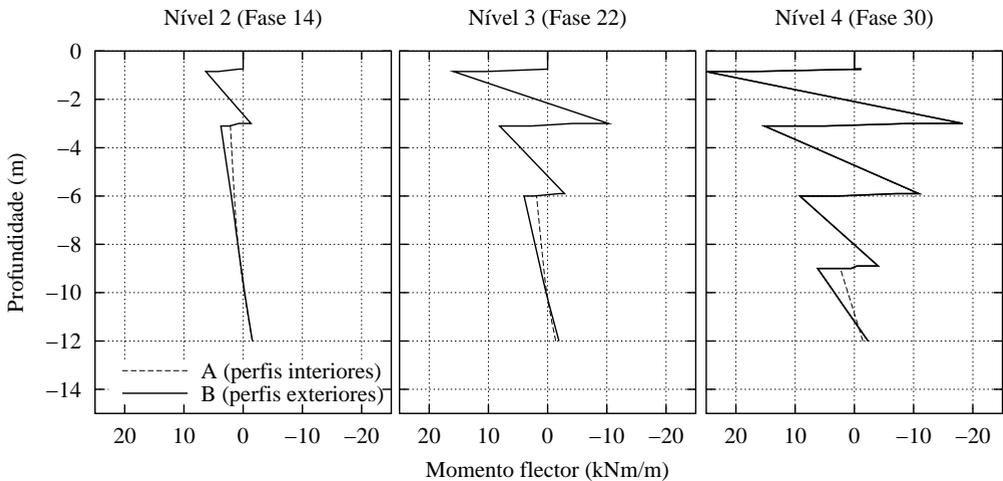


Fig. 5 - Comparação entre os momentos flectores nos perfis verticais obtidos das análises A e B.

A Figura 5 indica os valores dos momentos flectores nos perfis metálicos verticais, nas fases de escavação correspondentes aos níveis 2, 3 e 4, o que permite observar que há diferenças notórias entre os resultados das duas análises. Na análise A apenas são indicados os momentos dos perfis abaixo da base da parede uma vez que, acima desta, aqueles se encontram inseridos nos painéis de betão armado. Verifica-se, no caso desta análise, que tais momentos são praticamente nulos, pelo que a hipótese habitualmente considerada em projecto de admitir apenas a

solicitação por esforço normal parece adequada. Os momentos flectores são, no entanto, bastante significativos na análise B, sendo, portanto, imprescindível considerá-los no dimensionamento.

Os momentos flectores no caso da análise B são devidos às cargas verticais descendentes aplicadas pela parede às ligações (e por estas aos perfis) e são maiores nas cotas mais elevadas, o que se deve ao facto de as sucessivas fases de escavação e pré-esforço terem como consequência um sucessivo incremento dos momentos nos perfis, pelo que as zonas limitadas pelas ligações existentes desde fases construtivas anteriores apresentam maiores esforços. Isto faz com que seja de dar particular atenção aos esforços instalados nos perfis verticais exteriores nos casos de escavações com grande profundidade, logo com um número elevado de níveis de ancoragens.

A ocorrência destes momentos nos perfis implica a transmissão de esforços à própria parede, nos pontos de ligação parede-perfil, o que resulta numa alteração não desprezável do diagrama de momentos habitual, em particular no que respeita à sua forma, conforme pode ser observado na Figura 6, pelo que o dimensionamento da parede deverá considerar a aplicação de momentos concentrados naqueles pontos. Verifica-se, no entanto, que os diagramas, na sua forma global, acabam por ser sobretudo condicionados, tal como no caso de perfis interiores à parede, pelas cargas aplicadas nas ancoragens.

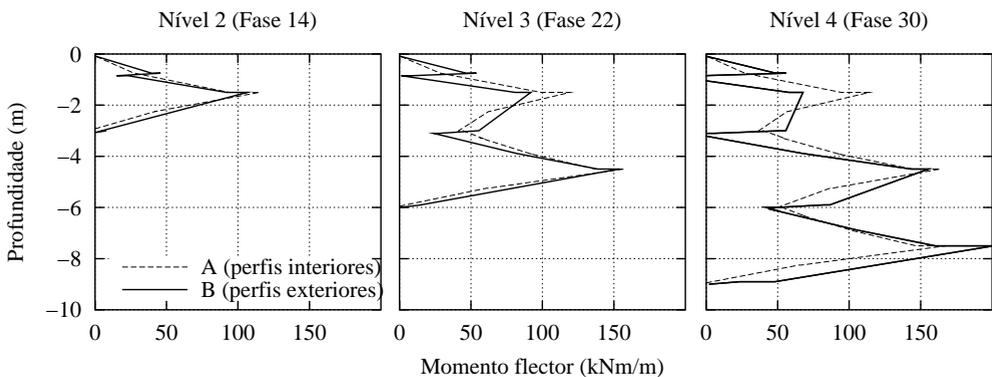


Fig. 6 - Comparação entre os momentos flectores na parede obtidos das análises A e B.

Os elementos horizontais de ligação perfil-parede são sobretudo sujeitos a esforços de corte e a momentos flectores, que atingem valores bastante significativos, conforme se mostra na Figura 7. Tais esforços seriam susceptíveis de causar a plastificação, caso fosse considerada no cálculo a possibilidade da sua ocorrência.

Em acordo com o constatado nos momentos flectores nos perfis verticais, verifica-se nas ligações perfil-parede que os maiores momentos ocorrem nas ligações superiores. Em cada ligação, os momentos de maior valor ocorrem, como esperado, na extremidade da ligação encastrada na parede, devido à rigidez desta última ser substancialmente superior à do perfil.

Em relação ao esforço normal instalado nos perfis verticais, que se apresenta na Figura 8, verifica-se que é superior no caso da análise A, o que é explicado pela ligação entre o perfil e a parede, que é de menor rigidez no caso da análise B.

Os incrementos de esforço normal estão, naturalmente, no caso da análise B, localizados nas ligações perfil-parede, verificando-se que os maiores incrementos ocorrem nas ligações superiores, o que confirma os resultados dos momentos flectores indicados na Figura 7.

A menor capacidade de absorção de cargas verticais do sistema da análise B traduz-se na necessidade de uma maior mobilização da resistência lateral, conforme se observa na Figura 9.

Efectivamente, apesar de a evolução da percentagem de mobilização da força de corte na interface solo-parede apresentar forma globalmente similar nas duas análises, constata-se que, em especial nas fases de pré-esforço (fases 9, 17 e 25), existe uma maior mobilização da força de sentido ascendente no caso da análise B. Na análise A verifica-se que no final da escavação (como, aliás, ocorreria no início) a força de corte é descendente, implicando portanto cargas mais

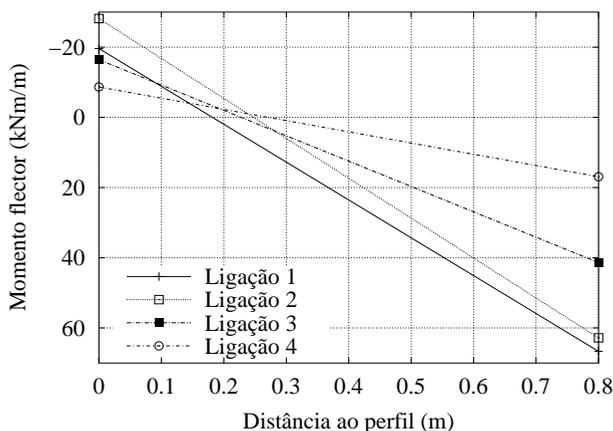


Fig. 7 - Momentos flectores nas ligações parede-perfil obtidos da análise B, para a fase 30 (ver na Figura 3 a localização das ligações indicadas).

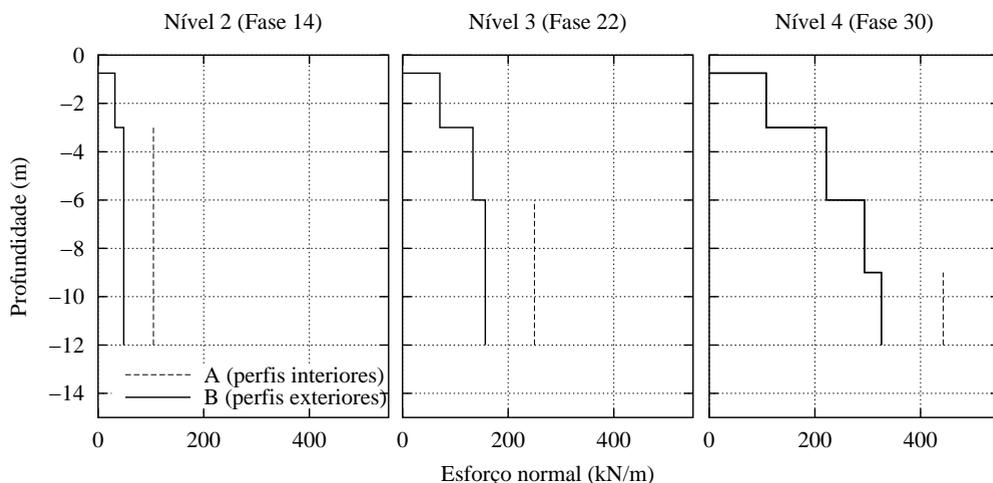


Fig. 8 - Comparação entre o esforço normal nos perfis verticais obtidos das análises A e B.

elevadas no perfil vertical.

A menor rigidez da ligação perfil-l-parede e a maior mobilização da resistência ao corte na interface solo-parede no caso da análise B implicam um comportamento globalmente inferior, que se traduz em maiores deslocamentos, conforme se pode constatar pela observação da Figura 10.

Na referida figura pode verificar-se que os assentamentos da superfície do terreno são, no caso da análise B, superiores na proximidade da parede, o que se explica pela deformabilidade vertical do sistema perfil-s-ligações-parede face ao mais satisfatório suporte vertical oferecido pelos perfis no caso da análise A. Note-se ainda que a concavidade da deformada da superfície do terreno suportado existente no caso da análise A, típica de escavações com um adequado suporte relativamente às cargas verticais (Matos Fernandes et al., 1993), é consideravelmente atenuada no caso da análise B, indiciando assim comportamento deficiente em relação a estas solicitações.

É também típica de estruturas de contenção com deficiente apoio vertical a significativa perda de carga nas ancoragens. No entanto, conforme mostra a Figura 11 a evolução das cargas ao longo do cálculo para as análises A e B apresenta apenas pequenas diferenças. Isto deve-se ao

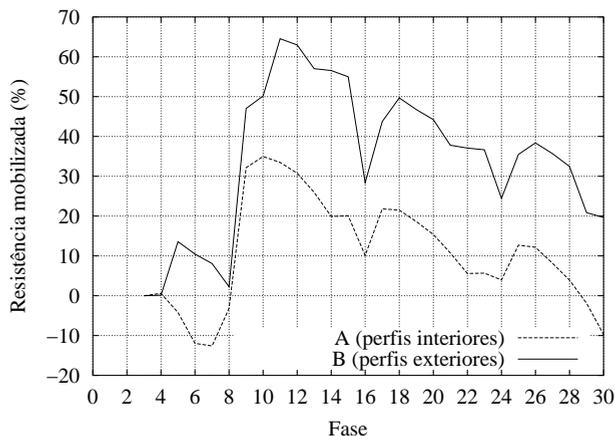


Fig. 9 - Comparação entre as percentagens de mobilização da resistência ao corte na interface solo-parede para as análises A e B (valores positivos correspondem ao sentido ascendente das forças tangenciais aplicadas à parede).

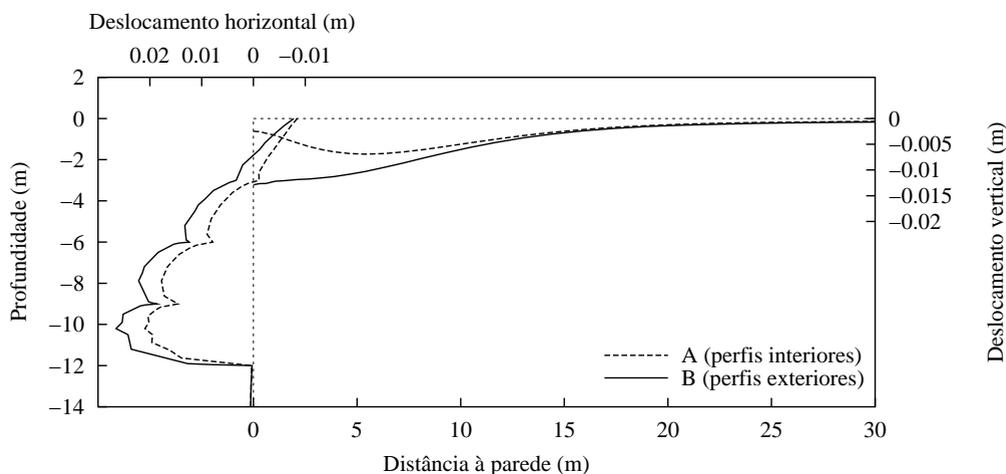


Fig. 10 - Comparação entre os deslocamentos obtidos das análises A e B, na última fase construtiva (fase 30).

facto de, apesar de superiores aos da análise A, os deslocamentos verticais da análise B serem, ainda assim, relativamente pequenos.

5 - INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO DO PERFIL À PAREDE

As diferenças evidenciadas pelas análises A e B são sobretudo devidas à introdução, na análise B, de momentos factores nos perfis verticais e à menor rigidez para as acções verticais do conjunto perfil-ligação. Pretendendo-se analisar a influência da rigidez da ligação do perfil à parede poderá estudar-se as consequências da alteração da distância d , da alteração da rigidez à flexão, EI , das ligações ou dos próprios perfis. Dado que uma alteração destes últimos não permite a comparação directa com a análise A, optou-se por apresentar apenas os resultados da influência dos outros dois parâmetros.

Analisa-se em seguida as consequências da adopção de outras distâncias d através da análise

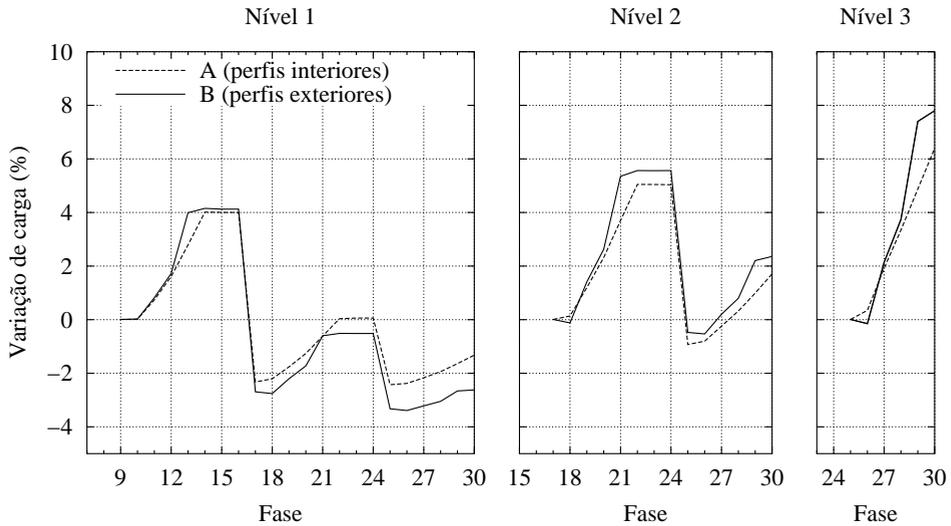


Fig. 11 - Evolução das cargas nas ancoragens nas análises A e B.

C, com uma distância $d=1,2$ m, correspondente a uma situação extrema, e das análises D e E com, respectivamente, $d=0,4$ m e $d=0,1$ m (ver Quadro 1). Todos os restantes parâmetros foram mantidos constantes e, tal como na análise B, não foi considerada a possibilidade de ocorrência de plastificação nos perfis verticais e suas ligações à parede.

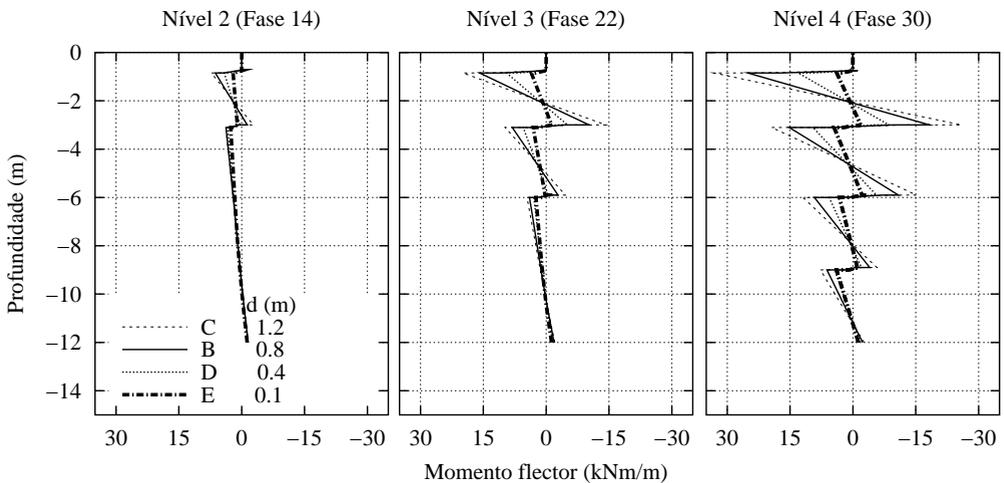


Fig. 12 - Comparação entre os momentos flectores nos perfis verticais obtidos das análises B, C, D e E.

Os resultados dos momentos flectores na cortina são apresentados na Figura 12, verificando-se, tal como esperado, que ocorrem menores momentos para menores distâncias entre os perfis e a parede. Continua a verificar-se a ocorrência de maiores momentos flectores nos perfis nas zonas a menor profundidade, aspecto que, no entanto, parece atenuar-se para pequenas distâncias (caso da análise E).

Os esforços normais transmitidos ao perfil I, que não se apresentam, são naturalmente superiores no caso das menores distâncias, o que é devido à maior rigidez do conjunto perfil-ligação.

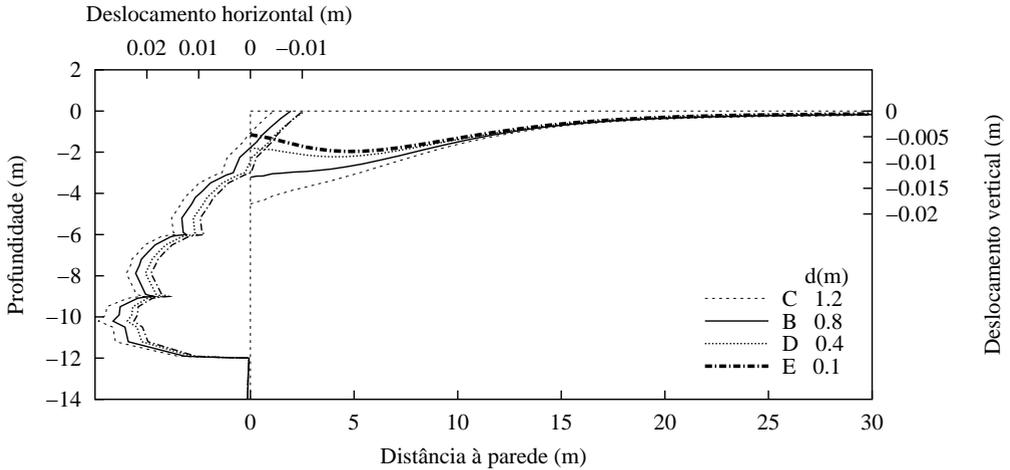


Fig. 13 - Comparação entre os deslocamentos obtidos das análises B, C, D e E na última fase construtiva (fase 30).

As análises com menor distância d mostram, assim, como seria de esperar, que a estrutura exibe um melhor comportamento, o que se traduz em menores deslocamentos, tal como ilustra a Figura 13. Nesta figura pode ainda observar-se que na análise C a concavidade da deformada da superfície do terreno se perdeu completamente, indiciando assim um deficiente comportamento em relação às cargas verticais. Recordar-se que nestes resultados, tal como nos apresentados anteriormente, não se considerou a hipótese de ocorrência de plastificação dos perfis nem dos elementos de ligação.

Influência semelhante tem a alteração da rigidez à flexão das ligações perfil-parede, o que é analisado através dos cálculos F e G, respectivamente com 4 e 50 vezes a rigidez à flexão adoptada no cálculo B (ver Quadro 1), sendo nos três comum a distância dos perfis à parede.

A Figura 14 apresenta os momentos flectores instalados nos perfis verticais para as fases de escavação, podendo constatar-se que se obtém o mesmo tipo de resultados exibidos pela Figura 12: menores momentos nos perfis para maiores valores da rigidez à flexão. Verifica-se igual-

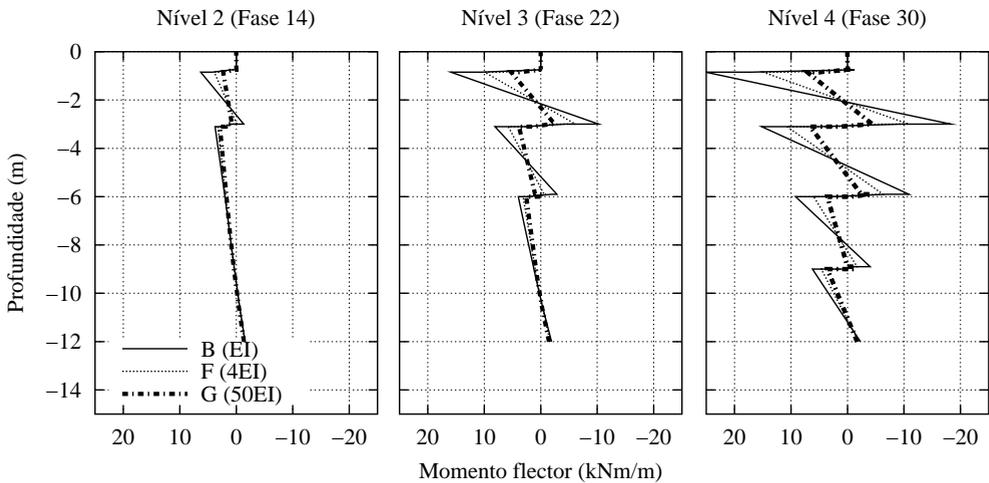


Fig. 14 - Comparação entre os momentos flectores nos perfis verticais obtidos das análises B, F e G.

mente que os maiores momentos ocorrem nas zonas a menores profundidades e que este efeito é atenuado para valores elevados da rigidez à flexão (tal como o é para pequenos comprimentos da ligação).

Os momentos flectores na ligação perfil-parede são, no entanto, no caso das análises com ligações mais rígidas, significativamente superiores, o que se poderá concluir da comparação dos resultados apresentados na Figura 15, referente à análise F, com os anteriormente indicados na Figura 7, para a análise B. Há, portanto, que ter em consideração estes aspectos no que respeita ao dimensionamento da parede.

Os deslocamentos, que não são apresentados, mostram igualmente um decréscimo com o aumento da rigidez à flexão.

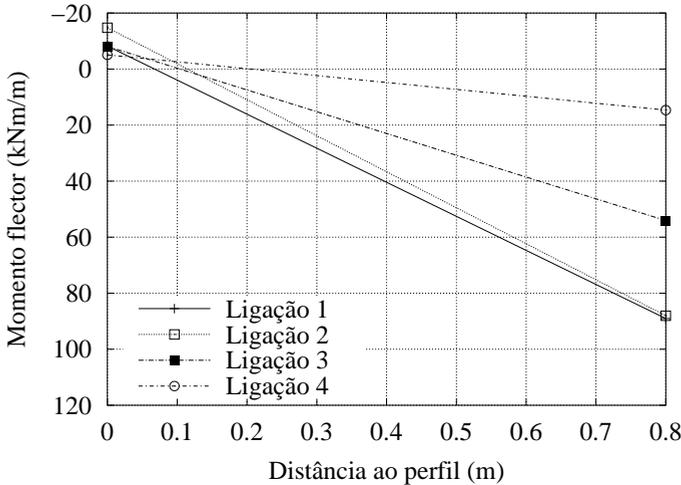


Fig. 15 - Momentos flectores nas ligações parede-perfil obtidos da análise F, para a fase 30 (ver na Figura 3 a localização das ligações indicadas).

6 - INFLUÊNCIA DA PLASTIFICAÇÃO DOS PERFIS

Nos cálculos anteriormente apresentados referentes aos perfis exteriores foi sempre considerado que os perfis e suas ligações à parede de betão apresentam comportamento elástico-linear. As análises H e I são análogas à análise B, com excepção do facto de em ambas ser contemplada a possibilidade de plastificação dos perfis e das suas ligações à parede (ver Quadro 1). No caso da análise H considera-se que a plastificação corresponde à formação de uma rótula plástica, quer no perfil quer nas ligações deste à parede. Para a análise I admitiu-se o mesmo tipo de comportamento para o perfil, enquanto que para a ligação perfil-parede se considerou que caso seja atingida a plastificação de toda a secção se dá a rotura do elemento, simulando, por exemplo, o que poderia ocorrer com uma rotura do cordão de soldadura.

Considere-se, em primeiro lugar o caso da análise H. Os momentos flectores nos perfis verticais, que se apresentam na Figura 16, em comparação com os fornecidos pela análise B, são idênticos até à ocorrência de plastificação, na fase 19; a partir desta fase são, naturalmente, inferiores, uma vez que são limitados pela plastificação do perfil e das suas ligações.

Também notória é a influência da plastificação no esforço normal transmitido aos perfis verticais, ilustrado na Figura 17, assim como no aumento dos momentos flectores na parede de betão, que não se apresentam.

Um apoio estrutural vertical substancialmente menos eficaz tem como consequência um maior apoio da cortina na interface com o terreno suportado, o que implica a mobilização de

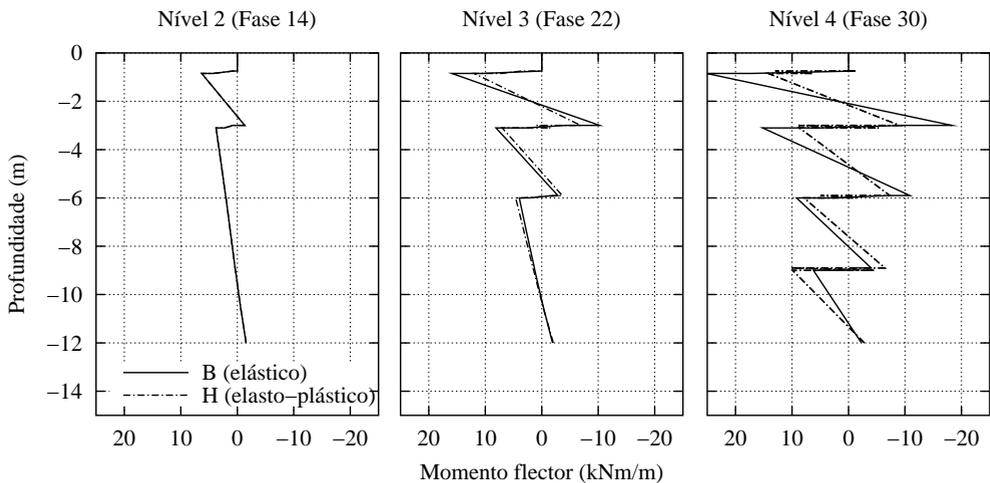


Fig. 16 - Comparação entre os momentos flectores nos perfis verticais obtidos das análises B e H.

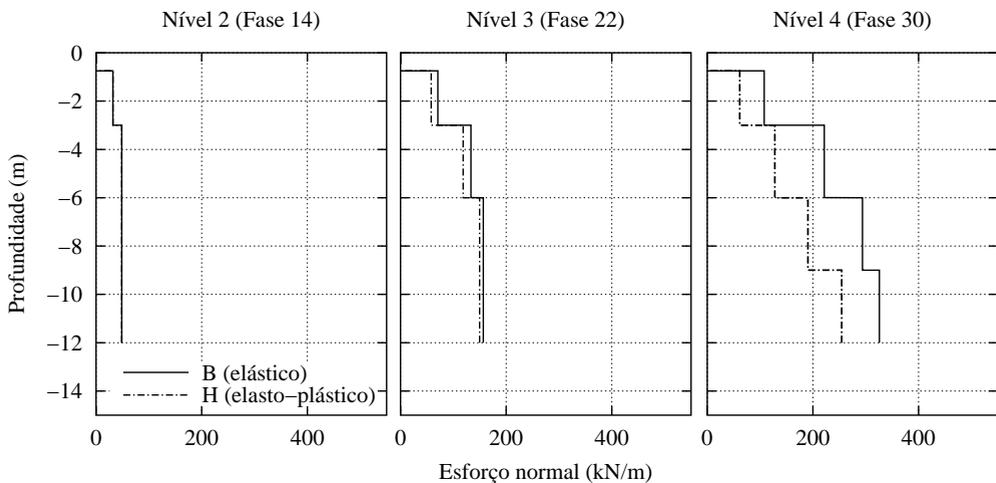


Fig. 17 - Comparação entre o esforço normal nos perfis verticais obtidos das análises B e H.

uma maior percentagem da resistência na interface e a ocorrência de maiores assentamentos de superfície do terreno, com efeitos nos deslocamentos horizontais. É o que mostra a Figura 18 que, para além dos resultados das análises B e H, inclui igualmente os resultados de duas outras análises: A e I.

A análise A corresponde ao caso de perfis interiores à parede, já analisado na secção 4, e é representada nesta figura para permitir a comparação com a análise H que é aquela, por prever plastificação, cujas hipóteses mais se aproximam da análise A. A análise I é semelhante à análise H, com excepção de que quando ocorre a plastificação das ligações perfis-parede se simular a rotura da soldadura na ligação ao perfil ou do encastramento à parede. Tal fenómeno, conforme foi referido, ocorre na fase 19, fase em que estão já colocadas as ligações 1 a 3, iniciando-se o processo de rotura pela ligação superior (ligação 1). A rotura desta ligação implica, no entanto, a sucessiva rotura das ligações 2 e 3, pelo que nesta fase os perfis se separam completamente da parede.

Naturalmente que nestas circunstâncias não seria razoável admitir que a escavação prosse-

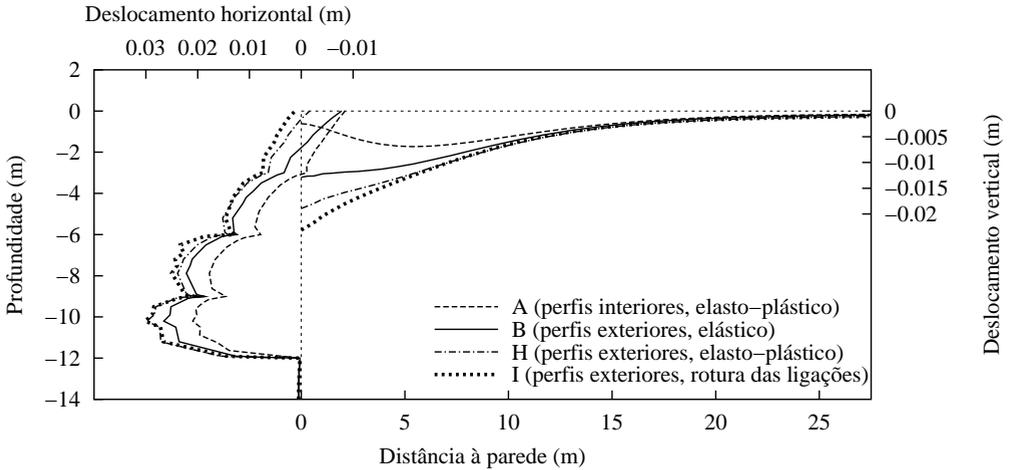


Fig. 18 - Comparação entre os deslocamentos obtidos das análises A, B, H e I, na última fase construtiva (fase 30).

guise da forma habitual. Assim, simulou-se a reposição das ligações que sofreram rotura, com rigidez e resistência substancialmente superiores, continuando então a escavação com o mesmo procedimento construtivo. Verificou-se que os deslocamentos sofrem aumentos significativos.

A solução de perfis verticais considerada neste estudo, podendo ser considerada adequada no que respeita à resistência estrutural para as condições da análise A - com perfis interiores à cortina - já não o é, manifestamente, caso os perfis sejam instalados no exterior, conforme é mostrado pelas análises H e I.

Na Figura 19 apresenta-se a evolução nas cargas das ancoragens para as quatro análises em estudo, verificando-se que, apesar das diferenças importantes entre o comportamento das escavações em estudo, os deslocamentos verticais da análise I não são suficientemente elevados para provocar significativas perdas de carga nas ancoragens, para o que também contribui a modesta inclinação das mesmas.

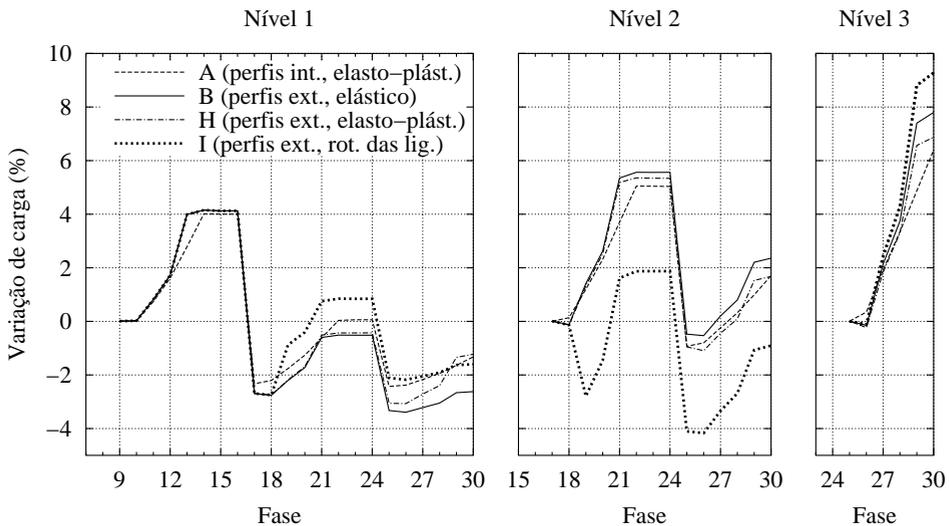


Fig. 19 - Evolução das cargas nas ancoragens nas análises A, B, H e I.

O inadequado comportamento das análises com perfis exteriores evidencia-se mais claramente através da maior mobilização das forças de corte ascendentes na interface solo-parede, conforme mostra a Figura 20.

A partir da fase de plastificação das ligações perfis-parede (fase 19) verifica-se na análise H um ligeiro aumento da percentagem de mobilização da força na interface e, na análise I, um muito significativo aumento quando ocorre a rotura das ligações.

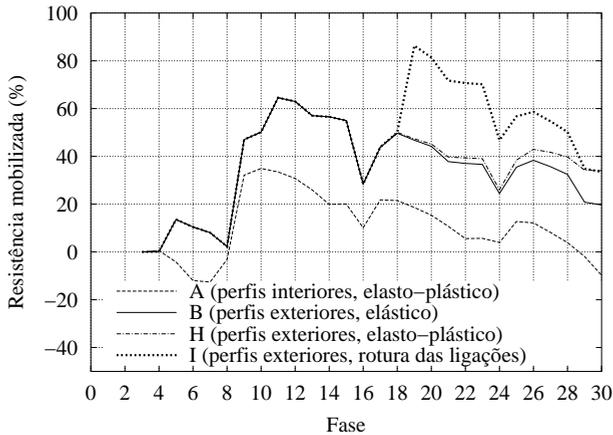


Fig. 20 - Comparação entre as percentagens de mobilização da resistência ao corte na interface solo-parede para as análises A, B, H e I (valores positivos correspondem ao sentido ascendente das forças tangenciais aplicadas à parede).

7 - ASPECTOS DE CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO

O caso da escavação retratado neste trabalho corresponde a uma situação que pode ser considerada corrente, em que o dimensionamento dos perfis verticais, para o caso dos perfis interiores, foi realizado da forma adequada e não se verificando, em consequência disso, plastificação destes (análise A).

Soluções com perfis exteriores baseadas na análise A foram estudadas considerando a influência da alteração da rigidez da ligação e da consideração da possibilidade de ocorrência de plastificação, tendo-se concluído da influência que cada um dos aspectos estudados tem no comportamento da escavação.

Os perfis exteriores conduzem, naturalmente, a comportamento menos adequado do que o de soluções com perfis interiores à parede, mesmo em casos como o apresentado de maciços relativamente resistentes, profundidades de escavação moderadas, inclinações das ancoragens relativamente pequenas e apoio vertical significativo. No entanto, a influência da colocação de perfis exteriores agrava-se naturalmente quando qualquer destas condições não é respeitada.

Não está no âmbito deste artigo o estudo detalhado da influência destes factores. Foram todavia realizadas duas análises suplementares com eles relacionadas: as análises J e L, análogas respectivamente às análises A e H, com excepção da consideração de ancoragens inclinadas a 45° transmitindo a mesma carga horizontal (ver Quadro 1). Em ambos os casos das análises J e L verifica-se a plastificação do perfil metálico, o que no caso da análise J é devido à maior inclinação das ancoragens, uma vez que na análise A tal plastificação não ocorre. No entanto, tal como expressa a Figura 21, os efeitos no caso da análise L são muito mais relevantes, induzindo deslocamentos muito elevados.

O comportamento particularmente inadequado que a análise L mostra é também evidenciado através da evolução das cargas nas ancoragens, que se apresenta na Figura 22, na qual se

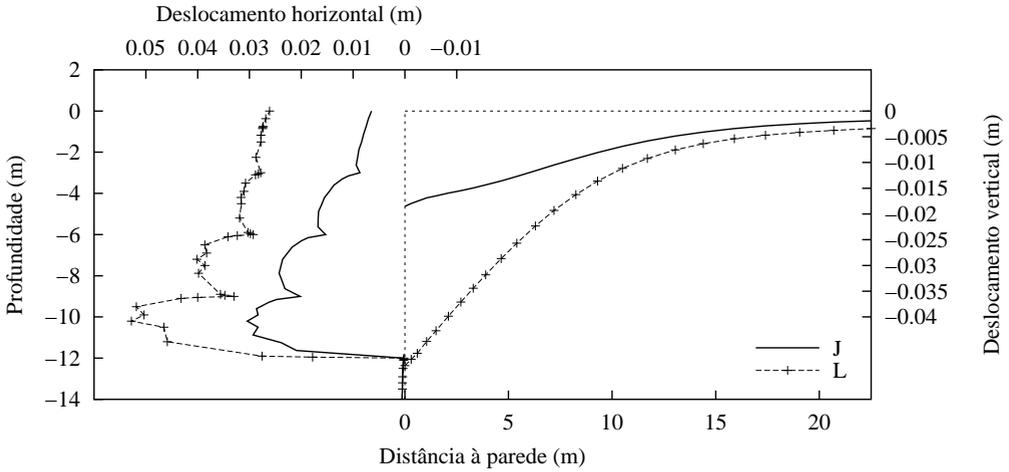


Fig. 21 - Comparação entre os deslocamentos obtidos das análises J e L, na última fase construtiva (fase 30).

observam decréscimos de carga muito importantes, devido ao movimento vertical da estrutura de suporte, por cedência dos perfis, no caso em que estes são exteriores.

Este comportamento deficiente é igualmente evidenciado pela percentagem muito elevada de mobilização da resistência ao corte na interface, como mostra a Figura 23,

É de notar que na análise L se admitiu a possibilidade de plastificação da ligação perfil-parede mas não a de rotura deste elemento, o que teria, naturalmente consequências ainda mais graves para a escavação.

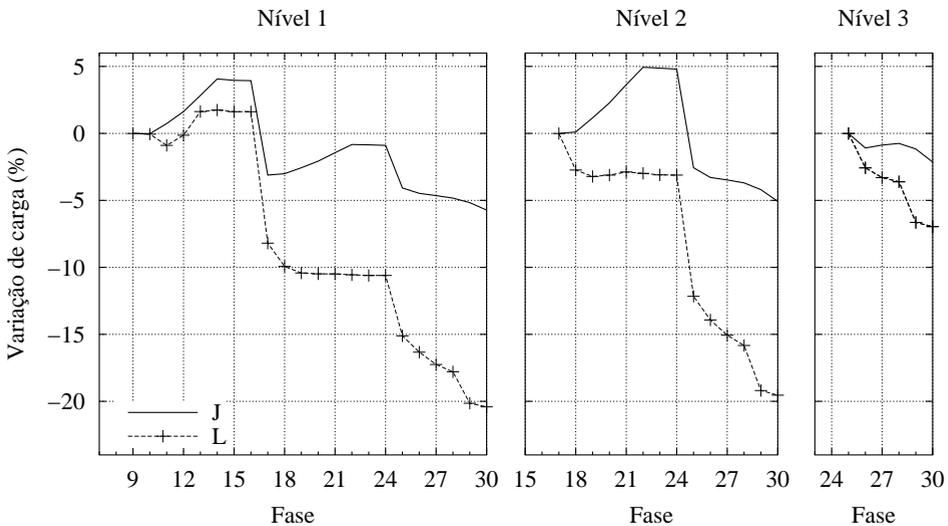


Fig. 22 - Evolução das cargas nas ancoragens nas análises J e L.

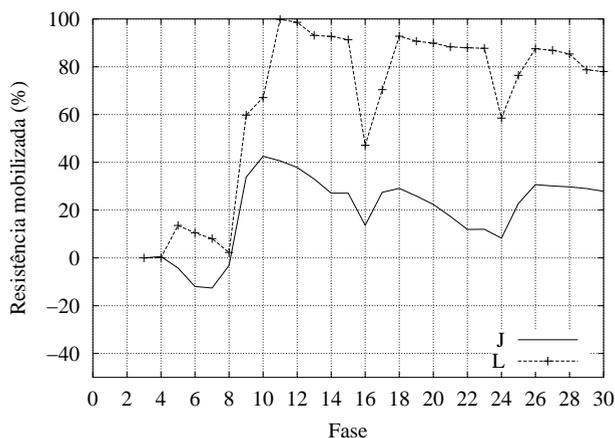


Fig. 23 - Comparação entre as percentagens de mobilização da resistência ao corte na interface solo-parede para as análises J e L (valores positivos correspondem ao sentido ascendente das forças tangenciais aplicadas à parede).

8 - CONCLUSÕES

A utilização de perfis verticais exteriores nas cortinas tipo Berlim definitivas, habitualmente justificada pela dificuldade de realização de furos na imediata proximidade de empenas de construções contíguas à obra, constitui uma solução pouco conveniente para a transmissão de cargas verticais impostas pelas ancoragens e pelo peso próprio da parede. Há, por isso, que conhecer as consequências da adopção de tal solução, assunto para o qual este artigo pretendeu contribuir. Do trabalho apresentado pode, assim, concluir-se que, nas soluções com perfis exteriores:

- as ligações dos perfis aos painéis de betão armado devem ser realizadas na base dos painéis, por forma a diminuir o comprimento não confinado e, conseqüentemente, o comprimento de encurvadura;
- o dimensionamento dos perfis verticais deve ser realizado tendo em atenção os momentos flectores, contrariamente ao que ocorre com as cortinas com perfis interiores em que, salvo situações especiais, o dimensionamento pode considerar apenas o esforço normal;
- os esforços transmitidos às ligações são sobretudo esforços de corte e de flexão, podendo atingir valores bastante significativos; as cargas transmitidas à parede pelas ligações perfil-parede não são, portanto, desprezáveis;
- os momentos flectores nas zonas superiores dos perfis assumem valores mais significativos, assim como são maiores as cargas transmitidas à parede pelas ligações superiores;
- a transmissão de cargas verticais dá-se de forma menos adequada, o que implica maior mobilização de tensões tangenciais na interface solo-parede e, conseqüentemente, maiores deslocamentos, em particular no que respeita a assentamentos da superfície do solo suportado; o decréscimo das cargas nas ancoragens acompanha os assentamentos da parede quando estes atingem valores elevados;
- a adopção de comprimentos elevados nas ligações perfil-parede originam maiores momentos nos perfis, nas ligações e na parede; por sua vez, o esforço normal nos perfis é reduzido devido à transmissão mais eficiente das cargas verticais, o que causa maiores deslocamentos da cortina e do terreno;
- ligações com rigidez à flexão baixa produzem efeitos semelhantes aos anteriores, com excepção dos momentos nas ligações (e dos momentos transmitidos à parede);

- nos perfis com ligações muito rígidas não se observam momentos flectores mais elevados nas zonas superiores dos perfis verticais;
- é bastante provável que uma parede bem dimensionada com uma solução de perfis verticais interiores não o seja se os mesmos perfis forem colocados no exterior, causando a formação de rótulas plásticas e o consequente aumento de deslocamentos; em caso de absoluta necessidade de utilização de uma solução com perfis exteriores, deverá proceder-se ao seu re-dimensionamento tendo em atenção as diferentes solicitações;
- os efeitos negativos da instalação exterior dos perfis que se observam em escavações em solos de boas características mecânicas, com adequado apoio vertical, inclinações das ancoragens baixas e profundidades de escavação moderadas são amplificados para situações à partida menos favoráveis; o caso da adopção de ancoragens com inclinação superior, como exemplo destas condições, mostra uma muito clara degradação do comportamento no caso dos perfis exteriores, face à resposta, mesmo não ideal, dada pela solução com perfis interiores.

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.
- Doherty, W., Wilson, E., e Taylor, R. (1969). Stress analysis of axisymmetric solids utilizing higher-order quadrilateral finite elements. Relatório S.E.S.M. 69-3, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.
- ENV 1992-1.1 (1991). Eurocode 2, Design of concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- ENV 1993-1.1 (1992). Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.1, General rules and rules for buildings. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- Goodman, R., Taylor, R., e Brekke, T. (1968). *A model for the mechanics of jointed rock*. ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 94(3), páginas 637–659.
- 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., Matos Fernandes, M., Cardoso, A. S., e Gomes Correia, A. (2002a). *Perda de equilíbrio vertical de estruturas de contenção tipo Berlim ancoradas: mecanismo de colapso*. Em 1o. Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, páginas 401–411, S. Paulo, Brasil.
- Guerra, N. M. C., Matos Fernandes, M., Gomes Correia, A., e Cardoso, A. S. (2002b). *Estruturas de contenção tipo Berlim com perfis exteriores: avaliação preliminar do comportamento por via numérica*. Em 8o. Congresso Nacional de Geotecnia, A Geotecnia Portuguesa e os Desafios do Futuro, volume 2, páginas 969–978, Lisboa.
- Matos Fernandes, M. A., Cardoso, A. J. S., Trigo, J. F. C., e Marques, J. M. M. C. (1993). *Bearing capacity failure of tied-back walls: a complex case of soil-wall interaction*. Computers and Geotechnics, 15, páginas 87–103.
- Terzaghi, K. e Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, New York, 2a edição.
- Zienkiewicz, O. C. (1977). *The Finite Element Method*. McGraw-Hill, London, 3a edição.