

CORTINAS AUTOPORTANTES: MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE VERSUS ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS

Castorina Silva Vieira ¹; Manuel Matos Fernandes ¹ & Jorge Almeida e Sousa ²

Resumo

Neste trabalho aborda-se alguns dos métodos de equilíbrio limite mais usualmente empregues no dimensionamento das cortinas autoportantes, comparando-se os seus resultados com os obtidos por meio de análises elastoplásticas de elementos finitos, para situações muito próximas da de equilíbrio limite. Os resultados são comparados no que respeita à máxima profundidade atingida pela escavação e ao correspondente momento flector máximo na cortina. O efeito das tensões tangenciais desenvolvidas no contacto solo-estrutura, que não é explicitamente considerado nos métodos convencionais, é posto em destaque nessa comparação.

Abstract

The paper presents a comparative study on flexible cantilever retaining walls using conventional limit equilibrium methods and finite element analyses for conditions as close as possible to failure. The results are compared in terms of the depth of excavation and the correspondent maximum bending moment on the wall. The effect of the tangential stresses mobilized at the soil-to-wall interface, which is not accounted for in the conventional methods, is emphasized.

Palavras-Chave – Cortinas autoportantes; Métodos de equilíbrio limite; Método dos elementos finitos.

INTRODUÇÃO

As chamadas cortinas autoportantes (“cantilever”, na literatura de língua inglesa) podem constituir soluções atractivas para o suporte de escavações de baixa a média profundidade quando estas não se situam nas imediatas proximidades de estruturas e infraestruturas particularmente sensíveis aos movimentos do terreno.

Como o próprio nome indica, a estabilidade das cortinas autoportantes depende exclusivamente das tensões desenvolvidas ao longo da sua altura enterrada. O cálculo desta altura enterrada, bem como o dos esforços na cortina, são usualmente efectuados com base em métodos de equilíbrio limite.

Todavia, dispondo-se actualmente de modelos por elementos finitos muito fiáveis e de meios computacionais extremamente poderosos, começa a ser aliciante cotejar os resultados dos métodos convencionais com os resultados fornecidos por modelos numéricos para situações de equilíbrio limite, ou muito próximas desta. Nos modelos numéricos esta situação pode ser identificada como aquela imediatamente precedente da fase de cálculo em que deixou de haver convergência no algoritmo não linear de redistribuição das forças residuais. Como se compreende, para que as comparações possam ser fiáveis, é necessário proceder a uma cuidada discretização da malha de elementos finitos, de forma a que nos problemas em causa possam ser realizadas fases de escavação de muito pequena dimensão, em particular às profundidades mais próximas da situação limite. De igual modo, é necessário algoritmos não lineares eficientes e robustos.

Neste trabalho aborda-se alguns dos métodos de equilíbrio limite mais usualmente empregues no dimensionamento das cortinas autoportantes comparando-se os seus resultados com os obtidos por meio de análises elastoplásticas de elementos finitos. O efeito das tensões tangenciais desenvolvidas no contacto solo-estrutura, que não é explicitamente considerado nos métodos convencionais, é posto em destaque nessa comparação.

MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE CORTINAS AUTOPORTANTES

Generalidades

A Figura 1a mostra a distribuição de pressões admitida para as cortinas autoportantes no chamado *método britânico*. Abaixo do ponto de rotação da cortina, P, ocorre a transformação das pressões activas em pressões passivas atrás da cortina e o inverso em frente a esta. A localização do ponto P não é conhecida e é dependente da própria altura enterrada.

Com os meios de cálculo actualmente disponíveis é possível obter, por exemplo através de uma folha de cálculo, a solução “exacta” para a altura enterrada da cortina admitindo a distribuição de pressões representada na Figura 1a. O equilíbrio de forças e de momentos flectores pode obter-se através da soma algébrica das áreas e dos momentos de 1ª ordem relativos às áreas dos diversos triângulos que surgem no diagrama de pressões ilustrado naquela figura. Contudo,

¹ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

² Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Pinhal de Marrocos, 3030 Coimbra, Portugal

este método, que seguidamente se designa por *método britânico exacto*, pode tornar-se complexo no caso de maciços estratificados.

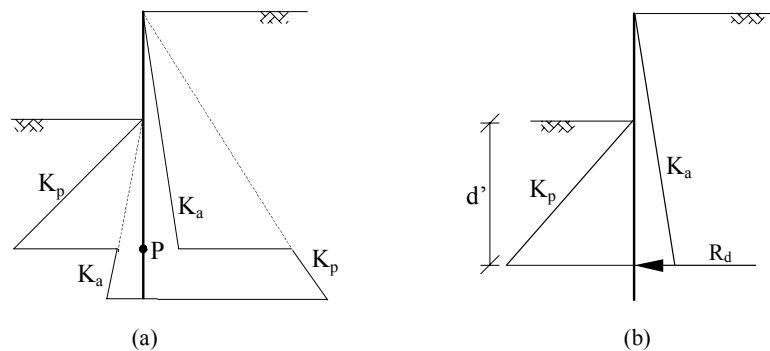


Figura 1 - *Método britânico* de equilíbrio limite no dimensionamento de cortinas autoportantes: (a) - distribuição de pressões idealizada; (b) - sistema considerado no método simplificado

No método simplificado, como mostra a Figura 1b, a soma algébrica das pressões abaixo do centro de rotação da cortina pode ser substituída por uma força R_d [1], designada por “*contra-impulso passivo*”. Através de uma equação de equilíbrio de momentos em relação ao ponto de aplicação de R_d determina-se a distância d' daquele ponto ao fundo da escavação. Estabelecendo o equilíbrio de forças na direcção horizontal, calcula-se o contra-impulso passivo, R_d . Conhecida a geometria da estrutura e as cargas actuantes, o problema é estaticamente determinado, podendo facilmente aceder-se à distribuição dos momentos flectores na cortina, e em particular ao seu valor máximo. A altura enterrada da cortina, d , obtém-se majorando em 20% o valor de d' .

No chamado *método americano*, por seu turno, a distribuição de pressões assume a forma apresentada na Figura 2. Essa distribuição é caracterizada pelos parâmetros p_a , p_1 , p_2 e y e assenta nos seguintes pressupostos [2,3]:

- i) estabelecem-se as pressões activas atrás da cortina no solo suportado, $p_a = K_a \gamma h$;
- ii) as pressões passivas são totalmente mobilizadas imediatamente abaixo do fundo da escavação, logo o gradiente de pressões entre p_a e p_1 é igual a $\gamma(K_p - K_a)$;
- iii) no pé da cortina mobilizam-se pressões passivas atrás da cortina e pressões activas em frente a esta, logo $p_2 = K_p \gamma (h+d) - K_a \gamma d$.

Tendo em consideração os pressupostos anteriores, a altura enterrada da cortina e a distribuição de pressões são determinadas através de uma equação de equilíbrio de forças na direcção horizontal e de uma equação de equilíbrio de momentos em relação ao pé da cortina [2]. Conhecida a geometria da estrutura calcula-se a distribuição dos momentos flectores e o seu valor máximo.

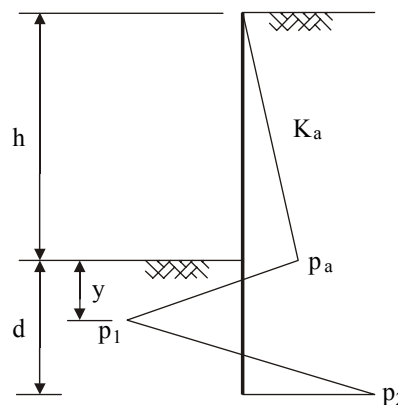


Figura 2 - *Método americano* de equilíbrio limite no dimensionamento de cortinas autoportantes

Comparação dos métodos de dimensionamento em situações de equilíbrio limite

Apresenta-se nesta secção um resumo de um estudo comparativo [4] envolvendo os métodos de equilíbrio limite anteriormente descritos. Considerou-se uma escavação num maciço homogéneo em condições drenadas e com um ângulo de atrito em tensões efectivas, ϕ' , variando entre 20° e 40°, de modo a cobrir a gama mais comum de valores deste parâmetro, desde os maciços argilosos de alta plasticidade aos solos granulares compactos. O peso volúmico do solo foi variado em concomitância com o ângulo de atrito. O estudo envolveu ainda a consideração de dois valores para o ângulo de atrito da interface solo-estrutura ($\delta = 0$ e $\delta = (2/3)\phi'$). As pressões de terras foram calculadas pela teoria de Caquot-Kérisel.

Considerando um maciço homogéneo, a altura enterrada da cortina, d , é directamente proporcional à profundidade da escavação, h :

$$d = \alpha h \tag{1}$$

enquanto o momento flector máximo, M_{\max} , é proporcional ao cubo dessa mesma profundidade, dependendo ainda do peso volúmico do solo, γ :

$$M_{\max} = \beta \gamma h^3 \tag{2}$$

Assim, conhecidos os valores das constantes de proporcionalidade α e β , é possível determinar para uma cortina de altura H , a profundidade de escavação que conduz a uma situação de equilíbrio limite e o correspondente valor máximo do momento flector através das equações:

$$h = \frac{H}{1 + \alpha} \tag{3}$$

$$M_{\max} = \frac{\beta}{(1 + \alpha)^3} \gamma H^3 \tag{4}$$

A Figura 3 ilustra os resultados em termos de altura enterrada da cortina (valores da constante de proporcionalidade α) e do momento flector máximo (valores da constante de proporcionalidade β) obtidos pelos métodos de equilíbrio limite descritos na secção anterior para um maciço homogéneo seco. É de sublinhar que os resultados correspondem a estimativas dos parâmetros mencionados em situações de equilíbrio limite, já que não foram introduzidos nos cálculos quaisquer coeficientes de segurança. A análise da Figura 3a permite concluir que: i) o método britânico simplificado fornece para a altura enterrada resultados superiores em média cerca de 14% em relação ao método britânico “exacto”- isto confirma que a simplificação efectuada neste método está do lado da segurança; ii) o método americano e o método britânico “exacto” fornecem para aquela altura resultados semelhantes, para os valores da resistência na interface solo-cortina considerados, sendo o método americano ligeiramente mais conservativo (cerca de 2%).

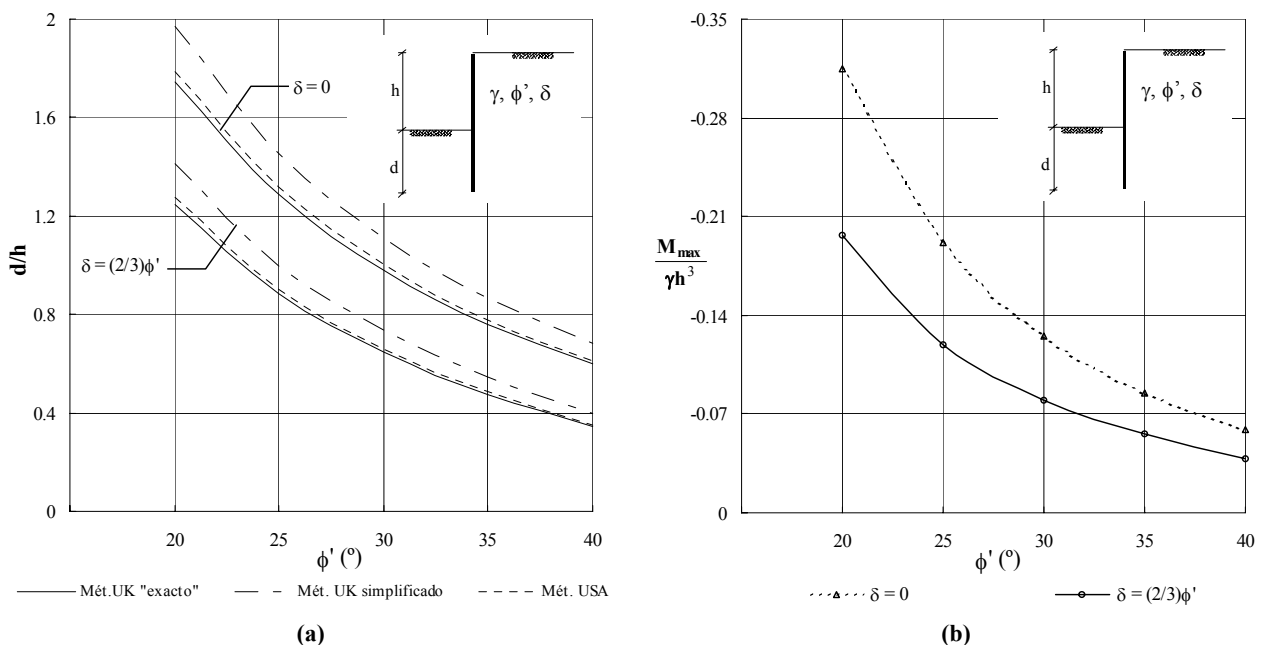


Figura 3 - Altura enterrada da cortina (a) e momento flector máximo (b) para um maciço homogéneo emerso obtidos por diversos métodos de equilíbrio limite.

Comentando agora a Figura 3b, importa notar que, pelo facto de nos métodos de equilíbrio limite apresentados a distribuição de pressões de terras ser comum até à profundidade $(h+y)$ (ver Figura 2), o momento flector máximo obtido pelos diversos métodos é coincidente, isto é, a constante de proporcionalidade β é independente do método de equilíbrio limite. Porém, para uma determinada altura de cortina, H , a profundidade de escavação que conduz à situação

de equilíbrio limite obtida por cada um dos métodos é diferente, logo de acordo com a equação (2) resultam valores distintos para o momento flector máximo.

ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS

Condições de base para a análise numérica

Apresenta-se seguidamente um estudo utilizando um modelo de cálculo baseado no método dos elementos finitos [5, 6]. Considerou-se uma escavação num maciço homogéneo de areia suportada por uma parede diafragma de betão armado. A Figura 4 ilustra as condições admitidas nas análises, bem como a malha de elementos finitos, representada para determinada fase de escavação, que inclui 3260 pontos nodais, 1008 elementos quadrangulares isoparamétricos de 8 nós, representando o maciço e a cortina, e 96 elementos de junta de 6 pontos nodais para a representação da interface entre o terreno e a cortina. Como mostra a figura, considerou-se uma escavação simétrica de 30 m de largura num estrato com 20 m de possança e duas condições para a resistência da interface, representada pelo respectivo ângulo de atrito, $\delta = 0$ ou $\delta = (2/3)\phi'$.

As análises foram efectuadas em tensões efectivas, admitindo um estado plano de deformação. Admitiu-se igualmente que a instalação da parede diafragma não altera o estado de tensão inicial e as características mecânicas do maciço. Para este foi adoptada uma lei constitutiva elástica-perfeitamente plástica com fluxo plástico associado ou não associado (ver valores do ângulo de dilatância, ψ). A parede diafragma foi considerada com comportamento elástico linear ($E = 20 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,2$).

Nas análises seguidamente apresentadas a cortina foi dimensionada, tomando 5,0 m para a profundidade da escavação, por meio do método britânico simplificado, aplicando um coeficiente de segurança de 2,0 à soma vectorial das pressões passivas e activas abaixo da base da escavação [4, 7, 8].

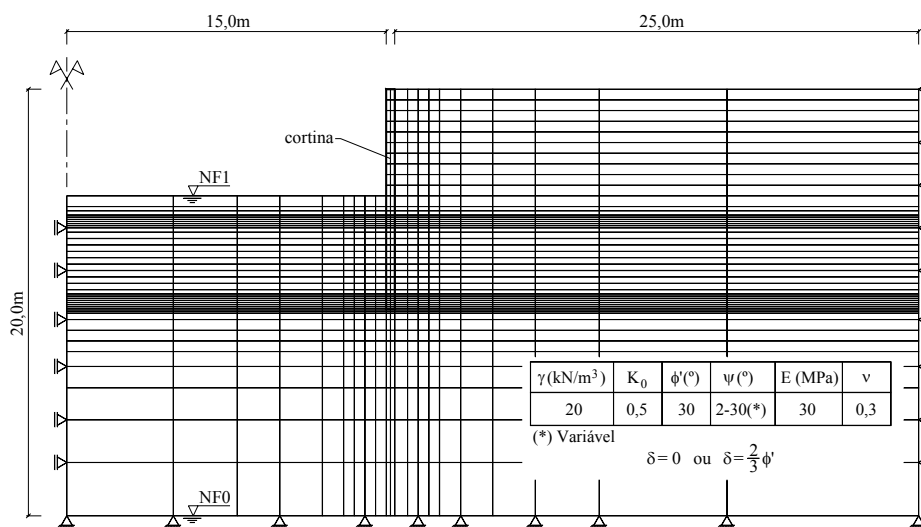


Figura 4. Condições de base e malha de elementos finitos para as análises numéricas

Efeito da lei de fluxo plástico

Começou por se proceder à avaliação da influência da hipótese referente à lei de fluxo plástico. Assim, para as duas condições já mencionadas referentes à resistência da interface solo-cortina e considerando todo o maciço emerso ou o nível freático coincidente com a base da escavação, efectuaram-se análises com lei associada e com lei não associada, neste caso com $\psi = 2^\circ$. A escavação até 5 m de profundidade foi simulada em 10 fases, impondo-se um erro máximo no algoritmo não linear de 0,01%.

Na Figura 5a mostram-se os deslocamentos laterais da cortina e os assentamentos da superfície do terreno quando a escavação atingiu a profundidade de projecto, para um dos pares de análises (cujas condições se encontram indicadas na própria figura).

Pode constatar-se que a influência da hipótese respeitante à lei de fluxo plástico é muito pequena para os deslocamentos laterais (diferenças máximas de 2%), mas é muito substancial para os assentamentos na superfície. Tendo em consideração que os deslocamentos laterais da cortina são muito próximos nas duas análises, se a massa de solo suportado se comportasse como material elástico, os assentamentos teriam que ser também praticamente coincidentes. A discrepância encontrada é naturalmente induzida pela resposta plástica de expansão do solo, resposta essa que é amplificada (de modo presumivelmente irrealista) pela dilatância muito alta admitida no cálculo com lei associada. Os momentos flectores relativos às duas análises são muito semelhantes, o que se compreende pela proximidade dos deslocamentos da parede.

Tendo em conta os objectivos do trabalho, no mesmo par de análises simulou-se o prosseguimento da escavação até atingir a situação de equilíbrio limite, que no caso presente corresponde a 6,2 m de profundidade (ver adiante). A Figura 5b representa os resultados obtidos para os deslocamentos laterais da cortina e os assentamentos da superfície (é de notar que a escala dos deslocamentos nesta figura é distinta da anterior). As diferenças de resultados são agora mais significativas, estendendo-se também aos deslocamentos da parede. Este resultado é certamente devido ao facto de a zona plastificada do maciço ser para a situação em causa muito mais ampla, sendo pois mais nítidas as consequências das distintas leis constitutivas elasto-plásticas. É interessante notar, todavia, que os momentos flectores (não representados) se mantêm praticamente coincidentes. Uma explicação que se afigura plausível é que as discrepâncias nos deslocamentos da parede sejam já devidas a movimentos de corpo rígido associados ao colapso iminente, movimentos esses que não contribuem para esforços de flexão.

As conclusões apresentadas mantêm-se válidas no essencial para as outras condições referentes ao nível freático e à resistência da interface.

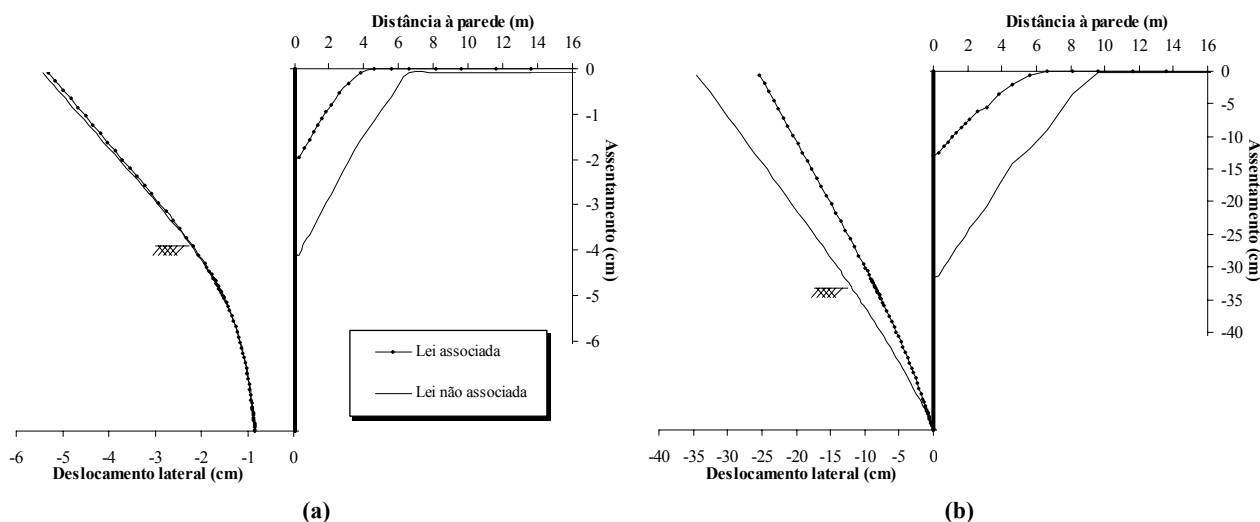


Figura 5. Deslocamentos laterais da cortina e assentamentos da superfície para duas leis constitutivas - altura da cortina de 10,3 m, maciço emerso e $\delta = (2/3)\phi'$: a) $h = 5,0$ m; b) $h = 6,2$ m (situação de equilíbrio limite)

Situações de equilíbrio limite

O objectivo dos cálculos efectuados nesta parte do trabalho é comparar, para uma situação muito próxima da de equilíbrio limite, os resultados dos métodos convencionais atrás apresentados com os fornecidos pelo modelo de elementos finitos.

A metodologia seguida consistiu basicamente no seguinte:

1 - dimensionar a cortina (considerando em qualquer caso a escavação com 5 m de profundidade e todo o maciço emerso) por meio do método de equilíbrio limite já atrás mencionado;

2 - para a cortina obtida de acordo com 1, usando as equações 3 e 4 e recorrendo aos valores das constantes de proporcionalidade da Figura 3, obter a profundidade da escavação correspondente a uma situação de equilíbrio limite, h_{lim} , e o momento máximo correspondente, M_{lim} ; estes valores encontram-se resumidos no Quadro 1;

3 - para cada caso, correr análises de elementos finitos prolongando a escavação até deixar de se obter convergência no algoritmo não linear (tolerância de 0,01% ao fim de 6000 iterações), de modo a comparar os resultados no que diz respeito à profundidade atingida e aos momentos flectores máximos.

Quadro 1. Resumo dos resultados obtidos pelos métodos de equilíbrio limite

Método	$\delta = 0$		$\delta = (2/3)\phi'$	
	UK "exacto"	USA	UK "exacto"	USA
h_{lim} (m)	6,71	6,64	6,26	6,21
M_{lim} (kNm/m)	-756	-732	-393	-383

Para as análises por elementos finitos foram consideradas três diferentes espessuras para a cortina: 0,10, 0,40 e 0,80 m, mas mantendo constante a rigidez à flexão, equivalente a uma parede de betão armado de 0,40 m de espessura e $E = 20$ GPa. No total foram assim realizadas seis análises, três para cada valor de δ indicado no quadro. Tendo em consideração que se pretende comparar os resultados destas análises com os fornecidos por métodos de equilíbrio limite, as mesmas foram efectuadas admitindo para o solo uma lei de fluxo associada.

A Figura 6 ilustra a evolução do deslocamento do topo da cortina com a profundidade da escavação para as análises em causa, bem como os respectivos valores de h_{lim} . Para cada caso, considerou-se como h_{lim} o valor da

profundidade da escavação na fase imediatamente precedente daquela em que o cálculo não convergiu (a espessura de solo escavada em cada fase à profundidade em causa era de 10 cm).

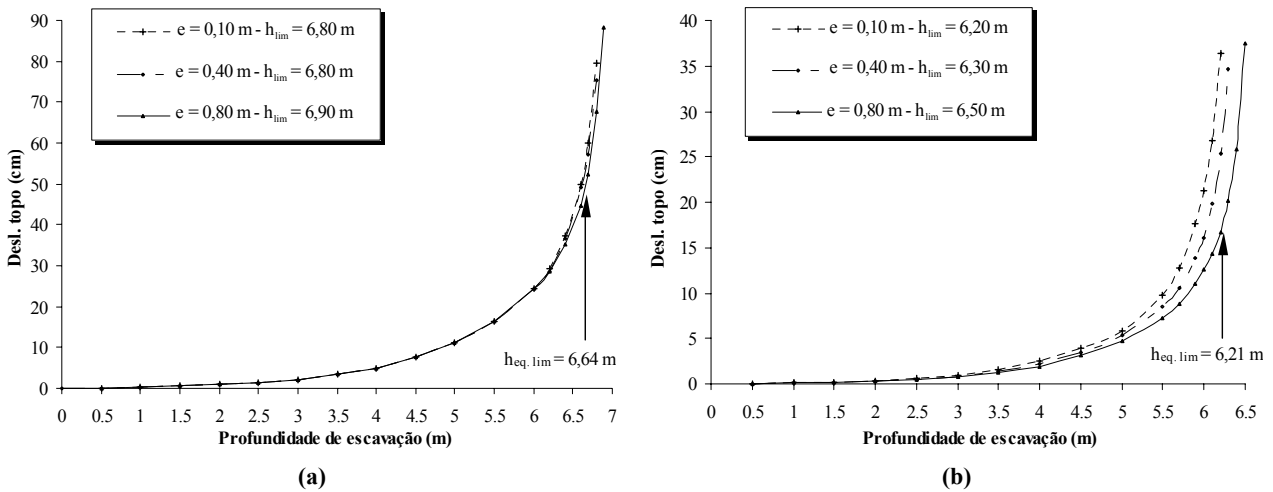


Figura 6. Evolução do deslocamento do topo da cortina com a profundidade de escavação e valores de h_{lim} : a) altura da cortina 13,3 m, maciço emerso e $\delta = 0$; b) altura da cortina 10,3 m, maciço emerso e $\delta = (2/3)\phi^7$

A comparação dos valores de h_{lim} da figura e do Quadro 1 sugere uma excelente concordância dos resultados numéricos com os fornecidos pelos métodos clássicos.

Na Figura 7 representa-se os deslocamentos laterais da cortina e os diagramas de momentos flectores fornecidos pelos cálculos de elementos finitos para $\delta = 0$ e $\delta = (2/3)\phi^7$, para a profundidade da escavação igual a 6,20 m e 6,80 m, respectivamente. Estes valores da profundidade foram escolhidos por serem, para cada uma das séries de três análises, as máximas profundidades para as quais se verificou convergência em todas as análises da série. Para referência, inclui-se ainda os diagramas decorrentes dos cálculos de equilíbrio limite – método americano, correspondentes praticamente à mesma profundidade, como se comprova pelo Quadro 1.

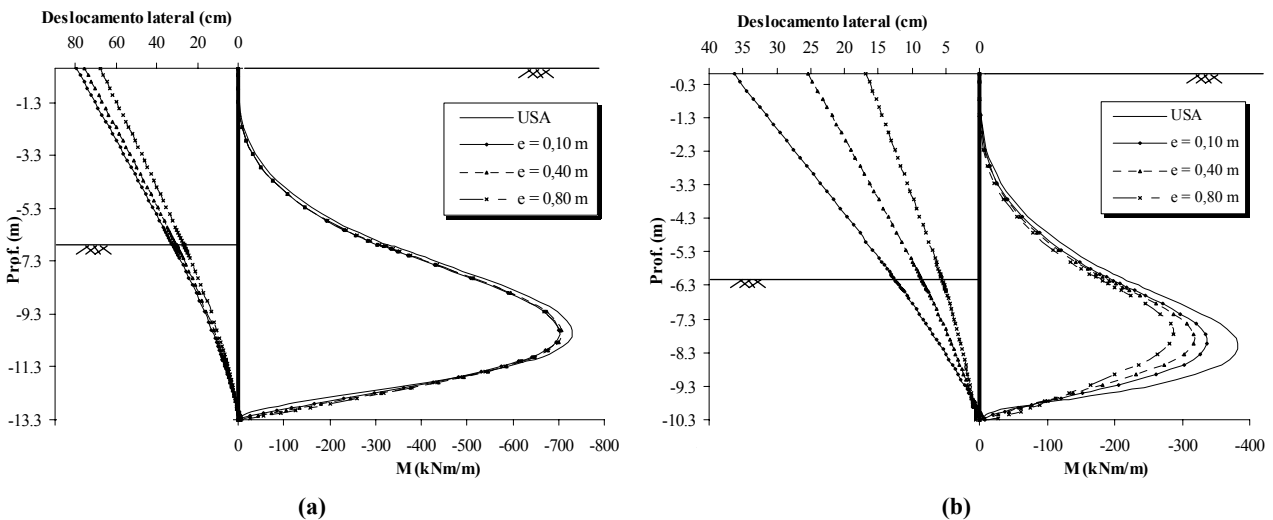


Figura 7. Deslocamentos laterais da cortina e diagramas de momentos flectores para: a) $h = 6,8$ m, altura da cortina 13,3 m, maciço emerso e $\delta = 0$; b) $h = 6,2$ m, altura da cortina 10,3 m, maciço emerso e $\delta = (2/3)\phi^7$

Na Figura 8 mostram-se as pressões de terras obtidas pelos cálculos de elementos finitos para $\delta = 0$ e $\delta = (2/3)\phi^7$, para a profundidade da escavação igual a 6,20 m e 6,80 m, respectivamente. As linhas a tracejado correspondem à componente horizontal das pressões activas teóricas (atrás da cortina) e passivas teóricas (em frente a esta). Na Figura 8b apresenta-se ainda os valores do ângulo de atrito na interface solo-parede efectivamente mobilizados.

Como primeiro comentário aos resultados numéricos, importa notar que a espessura da cortina tem efeito significativo e favorável nos resultados quando a interface tem resistência ao corte, passando a ter efeito praticamente

nulo quando a interface é lisa. Tal efeito favorável traduz-se em maiores valores de h_{lim} e, para uma dada profundidade próxima desta, em menores valores do momento flector máximo.

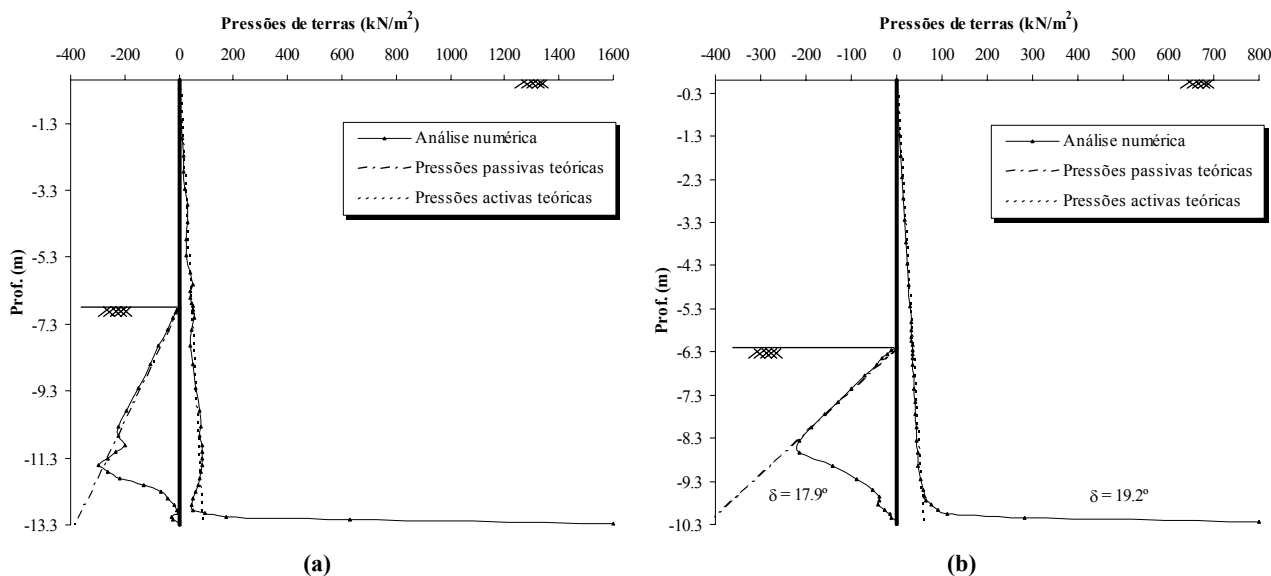


Figura 8. Pressões de terras sobre a cortina: a) $h = 6,8$ m, altura da cortina 13,3 m, espessura 0,4 m, maciço emerso e $\delta = 0$; b) $h = 6,2$ m, altura da cortina 10,3 m, espessura 0,4 m, maciço emerso e $\delta = (2/3)\phi'$

Este facto é devido ao momento estabilizador formado pelas resultantes das tensões tangenciais desenvolvidas nas duas interfaces. Com efeito, na interface posterior a cortina recebe do maciço uma força tangencial de sentido descendente, enquanto na interface oposta recebe uma força tangencial dirigida para cima, o que equivale a dizer que o momento do binário formado por estas forças contraria o comunicado à cortina pelas pressões do solo suportado. Como na situação de equilíbrio limite a resistência da interface se encontra praticamente mobilizada, a grandeza daquelas forças é igual nas três análises, mas o momento do binário correspondente cresce naturalmente com a espessura da cortina.

De modo a confirmar estas considerações, para cada um dos três cálculos com interface resistente, e para a profundidade de 6,20 m, procedeu-se do seguinte modo: i) foram calculadas as resultantes das tensões tangenciais nas duas interfaces (a partir da integração das tensões de corte nos elementos de junta respectivos) acima da secção onde ocorre o momento máximo; ii) calculou-se o momento formado pelas duas forças tangenciais indicadas acima; iii) este momento foi adicionado ao momento máximo fornecido pelo cálculo, em cada caso. Com este processo, procurou-se assim estimar o momento máximo que existiria sem a contribuição favorável do momento decorrente das tensões tangenciais na interface. O Quadro 2 resume os valores em jogo, permitindo observar que, de facto, o momento estimado sem a contribuição das tensões tangenciais, é praticamente coincidente para os três cálculos — o que corrobora em grande medida a análise qualitativa apresentada — e é bastante próximo (cerca de 11% menor) do que o valor fornecido pelo método americano de equilíbrio limite.

Quadro 2. Análise dos momentos máximos das análises de elementos finitos, para $h = 6,2$ m, com separação da contribuição dos momentos associados às tensões tangenciais nas interfaces ($\delta = (2/3)\phi'$)

Espessura da parede (m)	0,10	0,40	0,80
$M_{mef}^{(1)}$ (kNm/m)	337	317	288
$M_{ttang}^{(2)}$ (kNm/m)	7	26	49
$M_{e^{o} corrigido}^{(3)}$ (kNm/m)	344	343	337
$M_{eqlim}^{(4)}$ (kNm/m)	383		

(1) valores decorrentes das análises; (2) momento formado pelas resultantes das tensões tangenciais;

(3) valores de (1) somados aos valores de (2); (4) valor fornecido pelo método americano de equilíbrio limite

O Quadro 3 resume os valores de h_{lim} e de M_{lim} para as seis análises. Para o caso da interface lisa os resultados numéricos apresentam uma excelente concordância com os dos métodos de equilíbrio limite. As diferenças entre os resultados dos três cálculos com espessuras distintas são negligenciáveis e explicáveis por se tratar de análises numéricas, para mais em condições muito próximas do colapso.

Quadro 3. Análises das profundidades máximas de escavação e momentos flectores máximos correspondentes

	$\delta = 0$			$\delta = (2/3)\phi'$		
	0,10	0,40	0,80	0,10	0,40	0,80
Espessura (m)	0,10	0,40	0,80	0,10	0,40	0,80
h_{lim} (m)	6,8	6,8	6,9	6,2	6,3	6,5
M_{lim} (kNm/m)	-702	-708	-705	-337	-336	-331

Para os cálculos com interface resistente, constata-se uma sensível, e até significativa, influência, pelas razões já apontadas, da espessura da parede, com h_{lim} crescendo com esta. É curioso observar que os valores de M_{lim} são praticamente coincidentes para as três espessuras, embora, é de notar, aqueles correspondam a profundidades da escavação distintas. Tal similitude é provavelmente uma coincidência, sem especial significado. Poderá não ocorrer para outras condições e valores das grandezas em jogo, nomeadamente da resistência do solo e da interface, da profundidade da escavação e da espessura da parede.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados podem ser formuladas algumas conclusões.

Começando pelos métodos de equilíbrio limite, para as condições analisadas pôde constatar-se que os valores da altura enterrada fornecidos pelo chamado *método britânico* são superiores ao chamado *método americano*; o método britânico “exacto” fornece resultados praticamente coincidentes com o método americano. Quanto aos momentos flectores máximos não há distinção entre os resultados daqueles métodos.

Foram realizadas diversas análises usando um modelo por elementos finitos, introduzindo neste uma cortina dimensionada pelo método britânico considerando um coeficiente de segurança de 2,0 aplicado à soma vectorial das pressões passivas e activas sob a base da escavação. Por meio de algumas análises de sensibilidade, verificou-se que a hipótese referente à lei de fluxo plástico não tem influência, para efeitos práticos, nos momentos flectores fornecidos pelos cálculos.

Partiu-se então para uma série de seis análises em que, com a cortina dimensionada como atrás foi indicado, a escavação foi prolongada até deixar de haver convergência no algoritmo não linear. O conjunto de resultados obtidos permitiu concluir que:

- os valores da profundidade, h_{lim} , e do momento máximo, M_{lim} , correspondentes ao equilíbrio limite nas análises por elementos finitos com interface solo-parede sem resistência ao corte são muito próximos dos fornecidos pelos métodos de equilíbrio limite americano e britânico “exacto”, embora estes forneçam estimativas conservativas daquelas grandezas;
- quando a interface solo-parede exhibe resistência, a espessura da cortina constitui um factor favorável, devido ao momento estabilizador formado pelas resultantes das tensões tangenciais mobilizadas nas duas faces da parede; desta forma, com a espessura, e mantendo-se as demais condições, cresce a profundidade limite e, para uma profundidade próxima desta, reduz-se o momento flector máximo; isso conduz a que os valores de h_{lim} e de M_{lim} se afastem, para baixo, em relação aos derivados dos métodos clássicos de equilíbrio limite.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Padfield, C.J. and Mair, R.J. (1984). The design of propped cantilever walls embedded in stiff clays. CIRIA Rep. 104, Construction Industry Research and Information Association, London, England.
- [2] Bowles, J.E. (1988). Foundation Analysis and Design, 4th edition, McGraw-Hill.
- [3] Day, R.A. (1999). Net pressure analysis of cantilever sheet pile walls. *Géotechnique*, **49**, N.2, pp. 231-245.
- [4] Vieira, C.S. e Matos Fernandes, M. (2002). Estudo paramétrico sobre o dimensionamento de cortinas autoportantes utilizando métodos de equilíbrio limite. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, LNEC, Vol. 2, pp. 979-990.
- [5] Cardoso, A.S. (1987). A Técnica das Pregagens em Solos Aplicada em Escavações : Métodos de Análise e Dimensionamento. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [6] 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.
- [7] Burland J.B., Potts, D.M. and Walsh, N.M.(1981). The overall stability of free and propped embedded cantilever retaining walls. *Ground Engineering*, **14**, N.5, pp. 28-38.
- [8] Matos Fernandes, M., Vieira, C.F.S.; Almeida e Sousa, J. (2002), “Flexible cantilever retaining walls: design according to Eurocode 7 and classical methods”, Proc. Int. Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in View of International Harmonization and Performance Based Design, IWS Kamakura 2002, A.A. Balkema, pp. 117-125.