

ESTUDO PARAMÉTRICO SOBRE O DIMENSIONAMENTO DE CORTINAS AUTOPORTANTES UTILIZANDO MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

DESIGN OF FLEXIBLE CANTILEVER RETAINING WALLS. A PARAMETRIC STUDY USING LIMIT EQUILIBRIUM METHODS

VIEIRA, CASTORINA SILVA*
MATOS FERNANDES, MANUEL**

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo paramétrico sobre o dimensionamento de cortinas autoportantes envolvendo os métodos clássicos de equilíbrio limite, nomeadamente os chamados métodos britânico e americano, onde se compara as diferentes formas de introduzir a segurança (as clássicas e os chamados casos B e C do Eurocódigo 7). São apresentados resultados para uma larga gama de parâmetros de resistência do maciço, diversas resistências da interface solo-estrutura e distintas posições do nível freático. Compara-se e discute-se os resultados obtidos em termos de altura enterrada da cortina e momento flector máximo. É ainda avaliada a redução de segurança da estrutura associada a uma sobreescavação equivalente a 10% da profundidade de projecto.

ABSTRACT

The paper presents a parametric study on the design of flexible cantilever retaining walls using classical limit equilibrium methods, namely the UK method and USA method. The conventional approaches of introducing safety in the calculations are referred to as well as the Cases B+C approach established in Eurocode 7. The results of the design, in particular the wall embedded height and the maximum bending moment, provided by the distinct approaches are presented for a large range of shearing resistance parameters, two conditions of the soil-to-wall interface and distinct positions of the water table. The reduction of safety due to an overexcavation equal to 10% of the excavation depth is evaluated.

1. INTRODUÇÃO

* Assistente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, cvieira@fe.up.pt

** Prof. Catedrático, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, mfern@fe.up.pt

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.

Neste trabalho aborda-se os métodos de equilíbrio limite usualmente empregues para o dimensionamento das cortinas autoportantes e a sua combinação com diversas metodologias de introdução da segurança, as convencionais e os chamados casos B e C do Eurocódigo 7 (ENV 1997-1, 1994) [1]. Os resultados do dimensionamento em termos de altura enterrada da parede e do momento flector máximo, fornecidos pelas referidas metodologias, são comparados por meio de um estudo paramétrico.

2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE CORTINAS AUTOPORTANTES

2.1 Generalidades

A Figura 1a ilustra a distribuição de pressões nas cortinas autoportantes. A parede roda em torno de um ponto próximo do seu pé, mobilizando-se pressões activas no solo suportado e pressões passivas no solo subjacente à escavação. Na zona mais próxima do pé as pressões em frente da cortina baixam consideravelmente em relação às passivas, enquanto do lado oposto as pressões tendem a exceder largamente as activas. Em consequência, a partir de certa profundidade as pressões no tardo passam a ser mais elevadas do que as mobilizadas do lado oposto. A soma vectorial das pressões de ambos os lados da cortina assume por isso o aspecto representado na Figura 1b.

Os métodos de equilíbrio limite usualmente utilizados têm por base a distribuição de pressões apresentada, encontrando-se na bibliografia os designados *método britânico* e *método americano* [2], [3].

A Figura 2a mostra a distribuição de pressões admitida para as cortinas autoportantes no *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, pelo que se efectuam algumas simplificações [4]. A Figura 2b mostra que a soma algébrica das pressões activas em frente à cortina e das pressões passivas atrás desta abaixo do centro de rotação pode ser substituída por uma força R_d , designada por “*contra-impulso passivo*”.

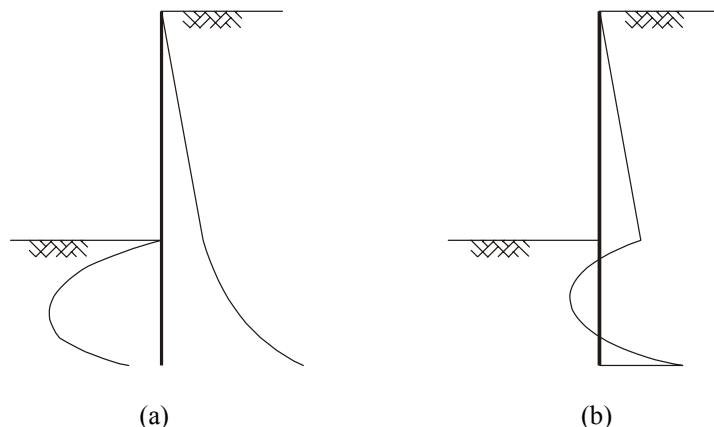


Figura 1 - Pressões de terras em situação de equilíbrio limite: (a) – distribuição das pressões; (b) – soma algébrica das pressões (“net pressures”)

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' . Deve ainda ser verificado se é possível que R_d se mobilize entre d' e $1,2d'$, confirmando se R_d é menor ou igual que as pressões que aí se podem estabelecer.

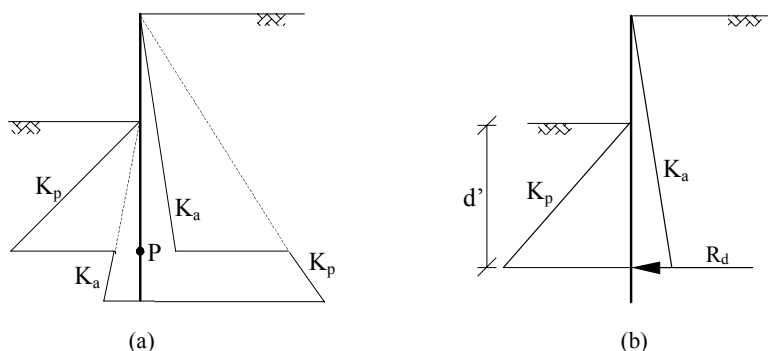


Figura 2 - Método britânico de equilíbrio limite no dimensionamento de cortinas autoportantes: (a) - distribuição de pressões idealizada; (b) - sistema considerado nas equações de equilíbrio

No *método americano* a distribuição de pressões assume a forma apresentada na Figura 3. Essa distribuição é caracterizada pelos parâmetros p_a , p_1 , p_2 e y e assenta nos seguintes pressupostos [2], [3], [5]:

- 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.

Tendo em consideração os pressupostos anteriores a altura enterrada da cortina e a distribuição de pressões é determinada 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 [5]. Conhecida a geometria da estrutura calcula-se a distribuição dos momentos flectores e o seu valor máximo.

Note-se que a distribuição de pressões nos dois métodos apresentados difere apenas para valores de profundidades superiores a $(h+y)$ (ver Figura 3), logo o momento flector máximo obtido pelos dois métodos de equilíbrio limite é coincidente.

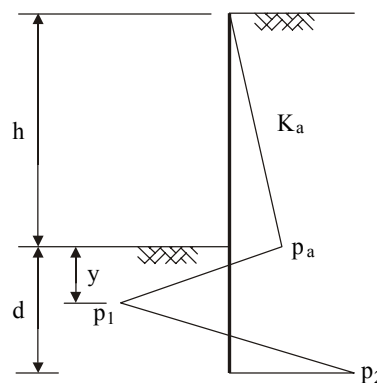


Figura 3 - Método americano de equilíbrio limite no dimensionamento de cortinas autoportantes

2.2 Introdução da segurança

Tendo como base o método *britânico* de equilíbrio limite, existem diversas metodologias de introdução da segurança:

metodologia 1 - afectar (dividir) o impulso passivo do solo que se estabelece em frente à cortina por um coeficiente de segurança, F_p , que em geral toma valores compreendidos entre 1,5 e 2,0 (Figura 4a);

metodologia 2 - afectar (dividir) a soma algébrica das pressões passivas e activas respeitantes ao solo abaixo da escavação por um coeficiente de segurança, F_r (Figura 4b); este processo, proposto por Burland et al. [6], não é mais do que um ajuste do anterior, tendo os autores sugerido o valor 2,0 para o coeficiente F_r ;

metodologia 3 - multiplicar a altura enterrada obtida pelo método descrito na Figura 2 por um factor de segurança F_d ; este factor assume normalmente o valor de 1,3;

metodologia 4 - introduzir coeficientes parciais de segurança de acordo com o EC 7 (ver Quadro 1); para o Caso C, em que o factor de segurança relativo às acções permanentes é unitário, aplicam-se coeficientes de segurança (γ_M) superiores à unidade aos valores característicos dos parâmetros de resistência do solo, (Figura 4c); para o Caso B trabalha-se com os valores característicos dos parâmetros de resistência, sendo as acções permanentes

(peso próprio do terreno) ou o seu efeito afectadas de (multiplicadas por) um factor igual a 1,35 (Figura 4c).

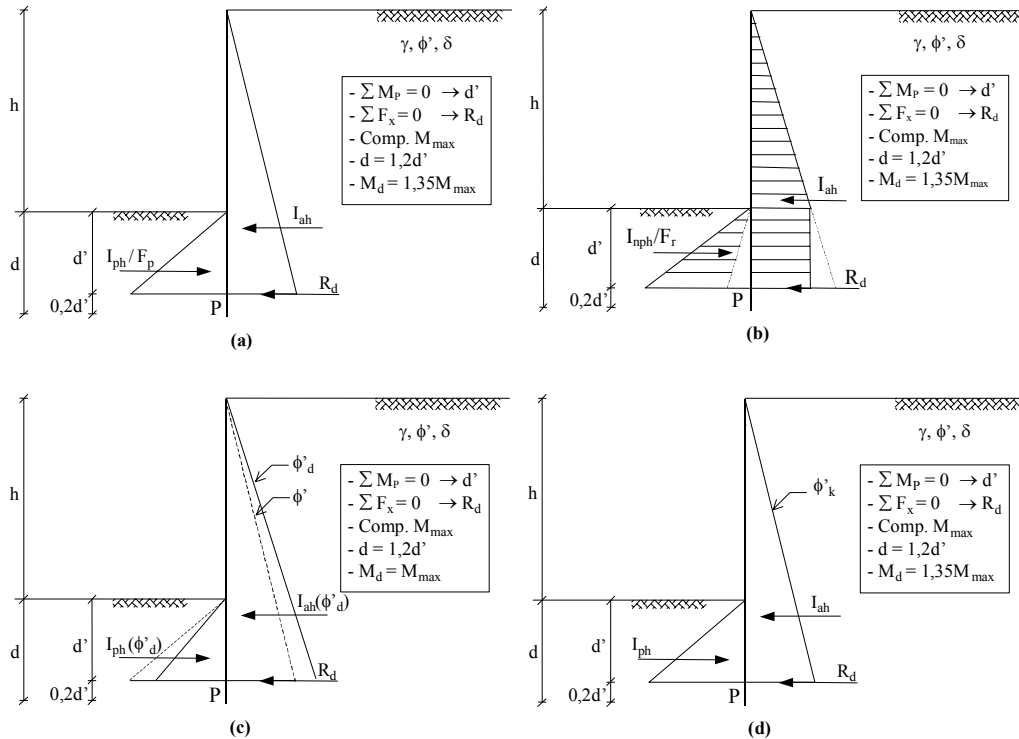


Figura 4 - Método que admite o apoio simples do pé da cortina e as suas variantes de acordo com a forma de introduzir a segurança: (a) - metodologia 1; (b) - metodologia 2; (c) - metodologia 4 - Caso C; (d) - metodologia 4 - Caso B

Quadro 1 (ENV 1997-1:1994) [1] - Coeficientes parciais de segurança. Estados limites últimos em situações persistentes ou transitórias

Caso	Acções (γ_F)		Propriedades do terreno (γ_M)			
	Permanente(γ_G)	Variável (γ_Q)	tg ϕ'	c'	c _u	
			Desfavorável	Favorável	Desfavorável	
A	1.00	0.95	1.50	1.10	1.20	1.20
B	1.35	1.00	1.50	1.00	1.00	1.00
C	1.00	1.00	1.30	1.25	1.60	1.40

Em relação ao *método americano* a introdução da segurança é usualmente efectuada através da redução do coeficiente de impulso passivo (*metodologia 1*) ou incrementando a altura enterrada (*metodologia 3*). A aplicação de coeficientes parciais de segurança (*metodologia 4*) é também aplicável a este método de equilíbrio limite. Quanto à proposta de Burland et al. (*metodologia*

2) embora tenha sido apresentada para o *método britânico*, julga-se que é adaptável ao *método americano* afectando a soma algébrica dos coeficientes de impulso passivo e activo respeitante ao solo abaixo da escavação pelo factor F_r .

No presente trabalho, para comparação dos resultados das diferentes metodologias apresentadas, os valores do momento flector máximo na cortina obtidos pelas metodologias 1 a 3, que podem considerar-se como valores característicos, foram multiplicados por 1,35.

3. ESTUDO PARAMÉTRICO

3.1 Generalidades

Apresenta-se nesta secção um resumo de um estudo comparativo envolvendo os métodos de equilíbrio limite e as diferentes formas de introdução da segurança anteriormente descritas.

Como ilustra a Figura 5, 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 para cada caso 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.

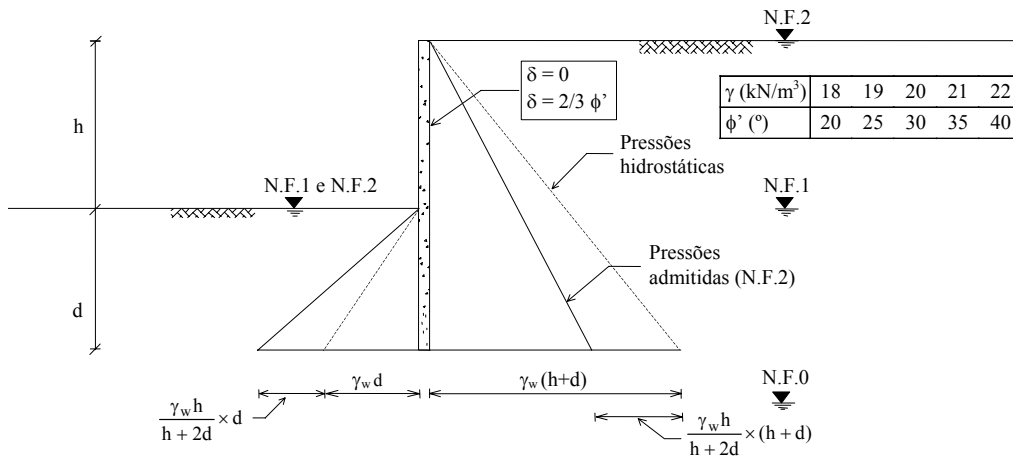


Figura 5 - Condições de base para o estudo paramétrico

A figura indica ainda as três condições admitidas para a posição do nível freático: nível a grande profundidade (N.F.0), coincidente com a base da escavação (N.F.1) ou, ainda, à superfície, no exterior da escavação, e coincidente com a base desta, no interior da mesma por bombagem permanente (N.F.2). Nesta situação admitiu-se que a perda de carga é proporcional à distância percorrida pelas partículas de água, isto é, considera-se que o gradiente hidráulico médio é igual nas cunhas activa e passiva. Assim, surgem alterações nas pressões da água (ver

Figura 5), bem como nas pressões activas e passivas, que são afectadas pela força de percolação.

Considerando um maciço homogéneo e o nível freático em qualquer das posições referidas na Figura 5, a altura enterrada da cortina é directamente proporcional à profundidade da escavação, h , enquanto o momento flector máximo é proporcional ao cubo dessa mesma profundidade, dependendo ainda do peso volúmico do solo. Essas constantes de proporcionalidade dependem logicamente das condições específicas de cada situação.

Neste estudo paramétrico não se considerou explicitamente o equilíbrio vertical de forças dado que se verifica ser possível conseguir este equilíbrio, com a resistência efectivamente mobilizada nas interfaces, contabilizando o peso próprio da cortina.

3.2 Influência do método de dimensionamento

A Figura 6 ilustra os resultados em termos de altura enterrada da cortina obtidos pelos métodos *britânico* e *americano* conjugados com as diferentes metodologias de introdução da segurança, e para as demais condições indicadas.

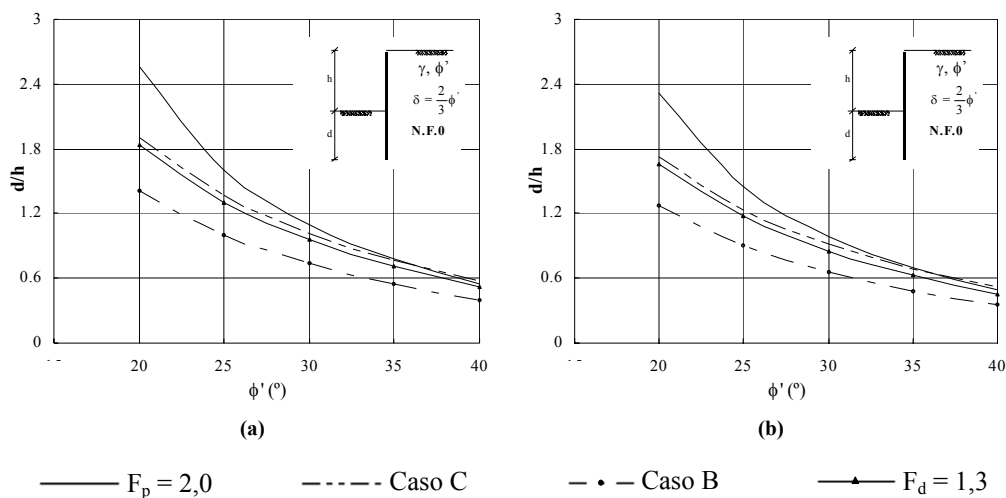


Figura 6 - Altura enterrada da cortina ($\delta = (2/3)\phi'$; N.F.0): (a) - *método britânico*; (b) - *método americano*;

O *método britânico* apresentado na Figura 2b, tal como foi referido, resulta de uma simplificação do lado da segurança da distribuição das pressões abaixo do ponto de rotação da cortina. Assim, para todas as metodologias de introdução da segurança, é mais conservativo (em média cerca de 11%) do que o *método americano*. Constata-se, por outro lado, que a posição relativa dos resultados das diferentes metodologias de introdução da segurança é semelhante para os dois métodos de cálculo.

Conforme já foi atrás mencionado, ambos os métodos fornecem valores coincidentes dos momentos flectores máximos.

Nos pontos que se seguem foi considerado apenas o *método britânico*.

3.3 Influência das condições do nível freático

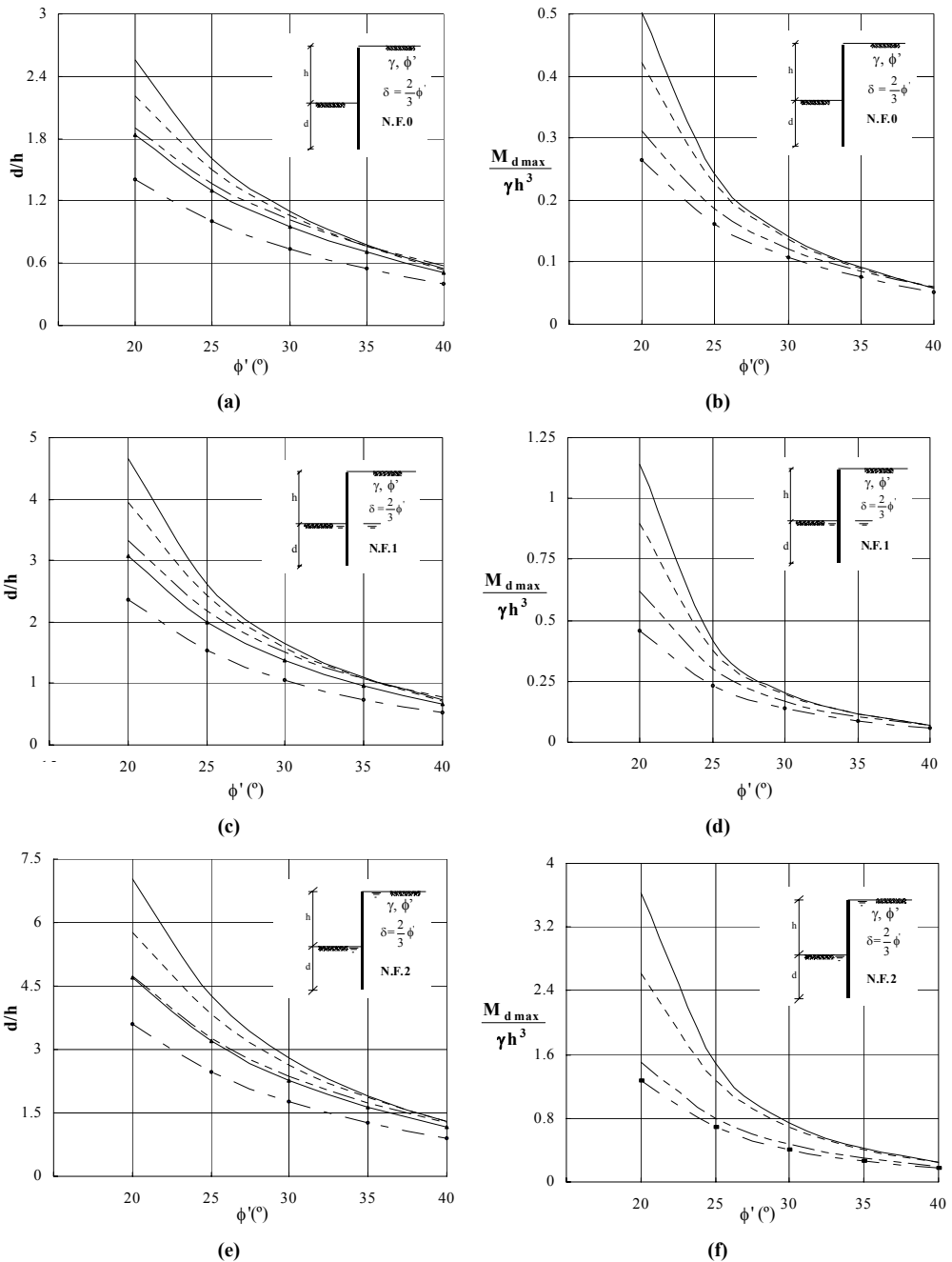
A Figura 7 resume os resultados obtidos para as três condições de nível freático já referidas e considerando $\delta = (2/3)\phi'$. As Figuras 7a, 7c e 7e referem-se à altura enterrada da cortina enquanto as restantes dizem respeito ao valor de cálculo do momento flector. Note-se os resultados da *metodologia 3* não se apresentam nos gráficos da direita, dado que os valores de cálculo do momento flector coincidem com os valores obtidos para o Caso B.

A análise dos resultados permite constatar que: i) as diferenças de resultados em termos quantitativos tendem a diminuir com o incremento do ângulo de atrito do solo; ii) a aplicação do coeficiente $F_p = 2,0$ revela-se o método mais conservativo para valores de ϕ' inferiores a 35° ; iii) o uso do coeficiente $F_r = 2,0$ fornece apenas resultados significativamente distintos do método anterior para os valores de ϕ' mais próximos do limite inferior do intervalo considerado; iv) a *metodologia 3* ($F_d = 1,3$) é a mais económica; v) de um modo geral, o Caso C do EC 7 fornece resultados intermédios em relação às *metodologias 2 e 3*; vi) quando se aplica o EC 7 a este tipo de estruturas de suporte, o Caso C é condicionante não apenas da geometria da estrutura (note-se que a altura da cortina obtida pelo Caso B corresponde a uma situação de equilíbrio limite), mas também no que se refere à resistência estrutural. Estas tendências parecem ser independentes das condições de nível freático e da resistência na interface solo-cortina.

Comparando agora os três pares de gráficos da Figura 7 pode facilmente avaliar-se a influência da posição do nível freático. Por exemplo, tomando como referência os resultados relativos à situação de maciço emerso (Figuras 7a e 7b), pode observar-se que quando o nível freático coincide com a base da escavação e o ângulo de atrito toma valores da ordem de 30° , a altura enterrada da cortina e o momento flector sofrem um acréscimo de cerca de 50 % e 40 %, respectivamente.

3.4 Influência do ângulo de atrito solo-cortina, δ

A Figura 8 ilustra os resultados obtidos considerando nula a resistência na interface solo-cortina ($\delta = 0$) e o nível freático coincidente com a base da escavação (N.F.1).



— $F_p = 2,0$ - - - $F_r = 2,0$ - · - Caso C - • - Caso B —▲— $F_d = 1,3$

Figura 7 - Altura enterrada da cortina e valor de cálculo do momento flector ($\delta = (2/3)\phi'$):
 (a), (b) - nível freático a grande profundidade (N.F.0); (c), (d) - nível freático coincidente
 com a profundidade da escavação (N.F.1); (e), (f) - nível freático à superfície (N.F.2)

A análise comparativa das Figuras 8a e 8b e das Figuras 7c e 7d, relativas à mesma posição do nível freático, permite avaliar a influência de δ . Pode observar-se que: i) a resistência nula da interface solo-estrutura implica um aumento muito considerável da altura enterrada da cortina e do valor de cálculo do momento flector; ii) a aplicação de $F_p = 2,0$ sobre as pressões passivas quando se considera nula a resistência na interface torna-se muito conservativa, particularmente para valores do ângulo de atrito inferiores a 30° .

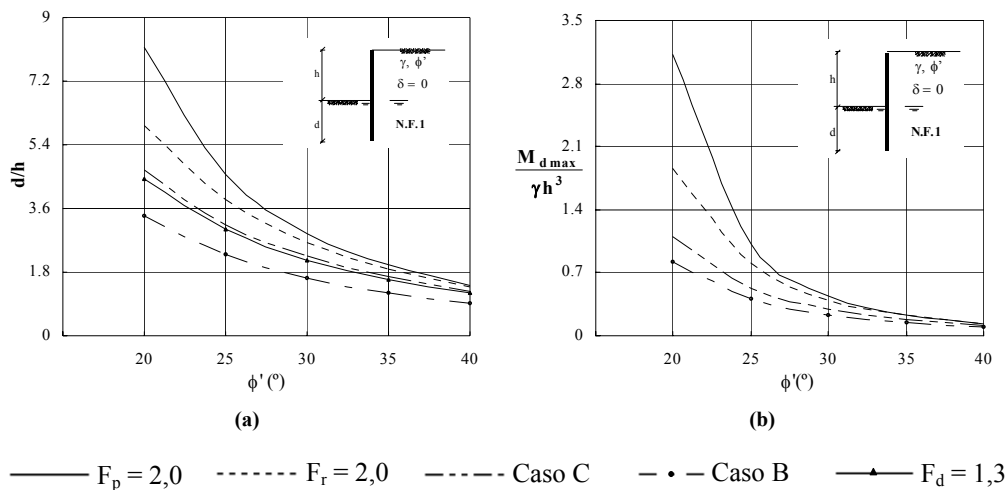


Figura 8 - Altura enterrada da cortina e valor de cálculo do momento flector ($\delta = 0$) para a situação de nível freático coincidente com a base da escavação (N.F.1)

3.5 Efeito da sobrecavação

Nas escavações a fixação do valor da profundidade a considerar no dimensionamento assume naturalmente grande importância. Este aspecto é particularmente crítico nas escavações suportadas por cortinas autoportantes, dada a inexistência de apoios estruturais. Deve pois ser considerada uma dada altura de sobrecavação que acautele variações da profundidade de projecto, h . Segundo o Eurocódigo 7, aquela sobrecavação, Δ_a , deve tomar-se igual a $0,1h$ com um máximo de $0,5$ m.

Tendo em consideração que, para as condições admitidas neste estudo, a altura da cortina e momento flector máximo são proporcionais, respectivamente, a h e h^3 (ver 3.1), as relações seguintes podem facilmente ser obtidas:

$$H = H_0 \left(1 + \frac{\Delta_a}{h} \right) \quad (1)$$

$$M = M_0 \left(1 + \frac{\Delta_a}{h} \right)^3 \quad (2)$$

onde H_0 e H representam a altura da cortina quando não se considera a sobrecavação ($\Delta_a = 0$) e quando se admite $\Delta_a \neq 0$, respectivamente.

Tomando a sobrecavação Δ_a igual a 10 % da profundidade da escavação e tendo em consideração que o tipo de cortinas em estudo pode constituir uma solução atractiva até profundidades da ordem de 5 metros, as equações 1 e 2 permitem facilmente concluir que a consideração da sobrecavação poderá, quando muito, aumentar a altura da cortina em 10 % e o momento flector máximo em 33 %.

Para situações transitórias o EC 7 estabelece a possibilidade de serem adoptados coeficientes de segurança inferiores aos incluídos no Quadro 1. Desta forma, tendo em conta que a sobrecavação tende tipicamente a ocorrer em situações transitórias (construção ou reparação da estrutura), considerou-se que seria interessante estimar, para cortinas tomando $\gamma_M = 1,25$ (correspondente ao Caso C do EC 7) sem consideração da sobrecavação, para que valor baixaria γ_M caso a sobrecavação prevista no código efectivamente se concretizasse.

A Figura 9 ilustra os resultados obtidos para uma escavação com 5 m de profundidade admitindo o maciço emerso (N.F.0) ou parcialmente submerso (N.F.1).

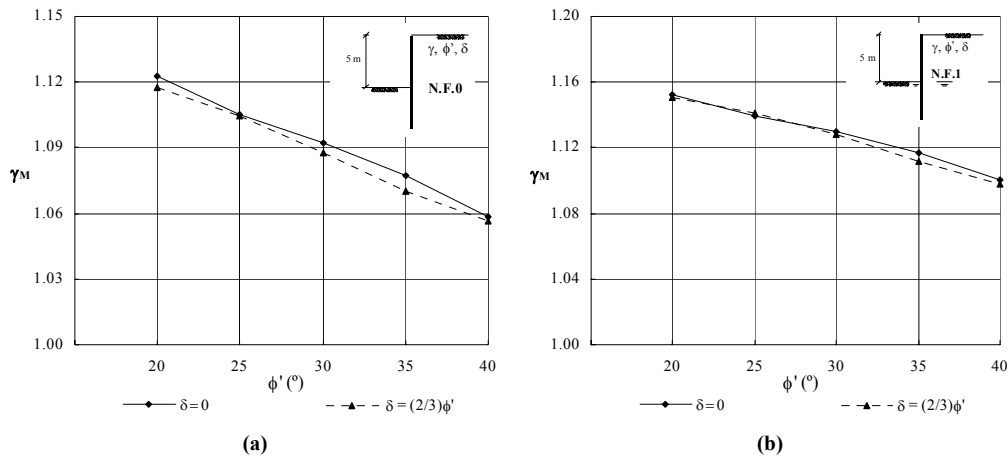


Figura 9 - Coeficiente de segurança γ_M para uma sobrecavação de 0,1h: (a) - maciço emerso (N.F.0); (b) - nível freático coincidente com a base da escavação (N.F.1)

A análise da figura permite concluir que quando uma sobrecavação de 0,1h se concretiza e não foi considerada no dimensionamento o coeficiente parcial de segurança toma valores muito baixos, claramente inaceitáveis, para maciços emersos de média a alta compactidade. Isto deve-se obviamente ao facto de nestas circunstâncias a altura enterrada da cortina ser relativamente pequena, logo a sobrecavação representar uma redução significativa da resistência passiva.

4. CONCLUSÕES

Com este trabalho pretendeu-se apresentar um estudo comparativo sobre o dimensionamento de cortinas autoportantes. Efectuaram-se cálculos com recurso a métodos de equilíbrio limite, introduzindo a segurança de quatro formas distintas, incluindo os casos B e C do Eurocódigo 7. O estudo paramétrico efectuado permite concluir que:

- o *método britânico* (método simplificado) é mais conservativo do que o *método americano*;
- a *metodologia 1*, que envolve a aplicação de um factor de segurança de 2,0 sobre as pressões passivas, parece muito conservativa, em particular para solos com ângulo de atrito inferior a 30°;
- a *metodologia 2*, que envolve a aplicação de um factor de segurança de 2,0 sobre a soma algébrica das pressões passivas e activas abaixo da base da escavação, parece mais adequada (menos conservativa) quando comparada com a *metodologia 1*;
- a *metodologia 3*, que envolve o aumento da altura enterrada em 30%, é a mais económica;
- quando se utilizam os coeficientes parciais de segurança dos casos B e C, o Caso C é condicionante quer no que respeita à geometria da estrutura, quer aos esforços estruturais; em geral, este caso fornece resultados intermédios em relação às metodologias 2 e 3;
- uma sobrecavação de 10 % da profundidade da escavação pode conduzir neste tipo de estruturas a níveis de segurança muito baixos, muito em especial para solos com elevado ângulo de atrito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ENV 1997-1:1994 - Eurocode 7 - Geotechnical Design - Part 1: General Rules. CEN.
- [2] Day, R.A. (1999). Net pressure analysis of cantilever sheet pile walls. *Géotechnique*, 49, no.2, pp. 231-245.
- [3] King, G.J.W. (1995). Analysis of cantilever sheet pile walls in cohesionless soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 9, pp. 629-635.
- [4] 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.
- [5] Bowles, J.E. (1988). *Foundation analysis and design*, 4th edition, McGraw-Hill.
- [6] Burland et al. (1981). The overall stability of free and propped embedded cantilever retaining walls. *Ground Engineering* 14, No.5, pp. 28-38.

Artigo publicado no:

VIII Congresso Nacional de Geotecnia, LNEC, 15 –18 Abril 2002, Vol. 2, pp. 979-990.