

# **DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA EM SOLO FINO REFORÇADO COM GEOSINTÉTICOS – ESTUDO PARAMÉTRICO**

## **DESIGN OF A STRUCTURE OF FINE SOIL REINFORCED WITH GEOSYNTHETICS – PARAMETRIC STUDY**

Carlos, David; *Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, dmc@ua.pt*

Pinho-Lopes, Margarida; *University of Brighton, Brighton, Reino Unido, M.PinhoLopes@brighton.ac.uk e Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, mlopes@ua.pt (em licença sem vencimento)*

Lopes, Maria; *Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, lcosta@fe.up.pt*

### **RESUMO**

Neste artigo é apresentado um estudo paramétrico sobre o efeito de vários parâmetros usados no método de dimensionamento descrito na norma BS8006-1: 2009 na distribuição dos reforços em estruturas de solo reforçado com geossintéticos. O dimensionamento da estrutura foi realizado considerando soluções compostas por um tipo de solo e cinco tipos de geossintéticos. Os parâmetros considerados foram: (1) o coeficiente de interação e o coeficiente de adesão entre o solo e o reforço; (2) a resistência à tração na rotura do geossintético; (3) o fator parcial de segurança para a redução das propriedades do reforço; e (4) a largura total das faces superior e inferior do reforço (por metro). A estabilidade externa da estrutura foi verificada com a mesma norma. Algumas das conclusões observadas no estudo permitem referir que, para a estrutura e as condições analisadas, o uso de diferentes propriedades de interação entre o solo e o reforço é importante apenas quando o mecanismo de rotura interna que condiciona a distribuição dos reforços na estrutura é o arranque; o mecanismo de rotura interna por arranque é mais importante para o dimensionamento quando os reforços considerados têm uma resistência à tração elevada; e a largura total das faces superior e inferior do reforço é muito importante para evitar o desenvolvimento do mecanismo de rotura interna por arranque.

### **ABSTRACT**

This paper presents a parametric study regarding the effect of several parameters used in the design method of British Standard BS8006-1: 2009 for the design of reinforced soil structures. The design of a structure is performed using solutions which include one type of soil and five different geosynthetics. The parameters considered were: (1) the coefficient of friction and the adhesion coefficient between the soil and the geosynthetic; (2) the ultimate tensile strength of the geosynthetic; (3) the partial material factor for the reinforcement; and (4) the total horizontal width of the top and bottom faces of the reinforcing element at the layer (per meter). The external stability is verified with the same standard. Among other things, the results of this study allowed concluding the use of different properties of interaction between the soil and the reinforcement is important only for the internal mechanism of failure by pullout; the pullout mechanism is more important for the design of solutions where reinforcements that have a higher tensile strength were considered; and the total horizontal width of the top and bottom faces of the reinforcing element at the layer is important for the occurrence or not of the pullout.

### **1 - INTRODUÇÃO**

A construção de estruturas geotécnicas novas ou a reconstrução ou reabilitação das já existentes é, cada vez mais (por todo o mundo), realizada utilizando solo reforçado com geossintéticos. Esta é uma técnica construtiva que permite construir estruturas geotécnicas mais resistentes e duradouras, de forma rápida e mais barata e com uma grande diversidade de materiais (solos e geossintéticos). Muitas destas estruturas são parte integrante de vias de transporte. Alguns exemplos são: os aterros, as camadas dos pavimentos e os taludes contíguos de rodovias, ferrovias e aeroportos; os cais de embarque em portos fluviais e marítimos; diques e barragens de terra, encontros de pontes, etc.

Neste artigo é apresentado um estudo paramétrico sobre o dimensionamento de uma estrutura de solo fino reforçado com geossintéticos. A estrutura em estudo é um muro de proteção das marinhas de sal da Ria de Aveiro. As suas funções são evitar a entrada de água na marinha, controlar o regime hidrodinâmico da Ria e permitir o acesso de trabalhadores e equipamentos durante a produção de sal.

Para que os geossintéticos desempenhem corretamente a função de reforço, quando usados nesta estrutura, estes devem ter uma resistência à tração e rigidez de curto e de longo prazo adequadas às necessidades da estrutura, não devem sofrer alterações significativas devido ao contacto com agentes físicos, químicos e biológicos e durante o transporte e instalação em obra e apresentar uma resistência ao corte na interface solo-reforço adequada. Estes parâmetros, mecanismos de degradação e mecanismos

de rotura, são tomados em consideração quando é realizado o dimensionamento das estruturas de solo reforçado em estudo.

Neste trabalho verificou-se a influência de vários parâmetros usados na norma britânica BS8006-1:2009 para o dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Foi realizado um estudo paramétrico em que se consideraram intervalos de valores para os vários parâmetros analisados. Os parâmetros considerados foram: os coeficientes de interação e de adesão entre o solo e o geossintético; a resistência à tração do geossintético; o fator parcial de segurança para a redução das propriedades do reforço e a largura total por metro das faces superior e inferior do reforço. A estabilidade externa foi verificada usando as recomendações da mesma norma.

## 2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ESTUDO

O estudo descrito neste artigo consiste no dimensionamento do perfil genérico da estrutura geotécnica mostrada na Figura 1 usando a metodologia de dimensionamento descrita pela norma Britânica BS8006-1: 2009. Foi realizado um estudo paramétrico considerando intervalos de valores razoáveis para cada propriedade do geossintético considerada pelo método de dimensionamento. A intenção foi estudar o efeito de cada propriedade na distribuição dos reforços. Os parâmetros do solo e dos geossintéticos usados no dimensionamento foram obtidos através de ensaios de identificação e caracterização de várias amostras realizadas em vários estudos.

### 2.1 - Estrutura

A estrutura considerada foi um muro de proteção das marinhas de sal da Ria de Aveiro. Estes muros são diques rudimentares, construídos pelos proprietários, com cotas de coroamento reduzidas e constituídos por materiais disponíveis no local de implantação (solos finos). As suas funções são evitar a entrada de água nas marinhas, controlar o regime hidrodinâmico da Ria e permitir o acesso de trabalhadores e equipamentos durante a produção de sal. A solução construtiva tradicional usada pelos proprietários é descrita em Carlos et al. (2011).

Na Figura 1 é apresentada a geometria do perfil genérico da estrutura. A geometria considerada corresponde ao cenário mais conservativo detetado, ou seja, à geometria da estrutura com maiores dimensões e onde os problemas de instabilidade podem ser maiores. Além disto, são representadas as ações a que a estrutura pode ser sujeita consideradas no processo de dimensionamento. Estas ações correspondem ao impulso da água (considerou-se um impulso hidrostático) e às sobrecargas associadas ao processo de construção da estrutura e à sua utilização. Detalhes sobre o procedimento realizado para quantificar estas ações podem ser encontrados em Carlos e Pinho-Lopes (2011a, b).

Note-se que o impulso hidrostático da água aplicado na face exterior do muro foi considerado apenas para a verificação da estabilidade externa da estrutura. Isto porque o método de dimensionamento usado (da norma BS8006-1: 2009) para o dimensionamento interno da estrutura não considera este tipo de ações distribuídas na face da estrutura.

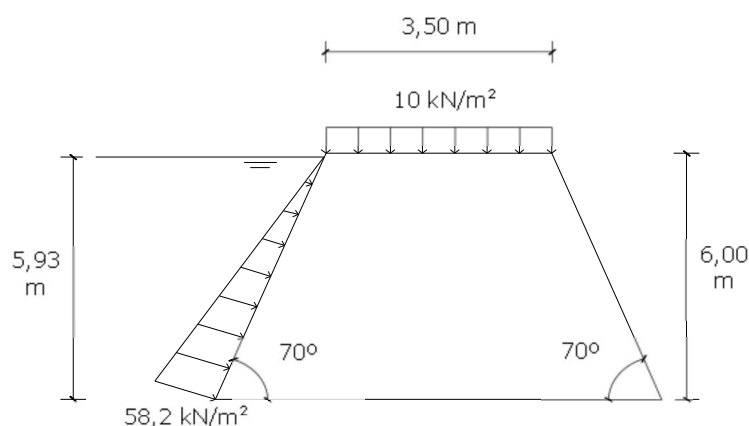


Figura 1 - Perfil transversal do muro considerado no dimensionamento

## 2.2 - Propriedades dos materiais

Neste estudo foram considerados um solo fino e cinco geossintéticos. As propriedades do solo foram retiradas de vários programas de ensaios laboratoriais realizados para a caracterização dos solos oriundos da região das marinhas da Ria de Aveiro (Bonito, 2008; Carlos, 2009 e Carlos et al. 2012). O Quadro 1 apresenta as propriedades retiradas destes estudos: peso volúmico,  $\gamma$ ; peso volúmico seco,  $\gamma_d$ ; teor em água,  $w$ ; limite de liquidez,  $w_L$ ; limite de plasticidade,  $w_p$ ; índice de plasticidade,  $I_p$ ; índice de compressibilidade,  $C_c$ ; índice de recompressibilidade,  $C_r$ ; ângulo de atrito e coesão do solo em termos de tensões efetivas,  $\phi$  e  $c'$ ; resistência não drenada,  $c_u$ ; coeficiente de compressibilidade,  $a_v$ ; coeficiente de compressibilidade volumétrica,  $m_v$ ; e coeficiente de consolidação vertical,  $c_v$ . No Quadro 1 é ainda incluída a classificação das amostras de solo ensaiadas, de acordo com as classificações de solos das normas ASTM D2487-11 e AASHTO M145. Note-se que as propriedades relevantes para o dimensionamento da estrutura e os seus valores correspondentes são:  $\gamma = 17,6 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi = 34^\circ$ ,  $c' = 7 \text{ kPa}$  e  $c_u = 25 \text{ kPa}$ .

Quadro 1 - Propriedades do solo fino obtidas nos diferentes programas de ensaios laboratoriais

Parâmetro	Bonito (2008)	Carlos (2009)	Novo programa de ensaios	
			Amostra 1	Amostra 2
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	17	18,3	17,7
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	13,8	15	13,8
$w$ (%)	-	23	22	28
$w_L$ (%)	-	35	35	36
$w_p$ (%)	-	22	25	27
$I_p$ (%)	-	13	10,4	9,4
$C_c$	-	0,17	0,34	0,33
$C_r$	-	0,02	0,06	0,06
$a_v \times 10^{-4}$ (kPa <sup>-1</sup> )	-	0,06 – 14	0,05 – 23	0,07 – 48
$m_v \times 10^{-4}$ (kPa <sup>-1</sup> )	4,13	0,5 – 8	0,03 – 13	0,05 – 28
$c_v \times 10^{-8}$ (m <sup>2</sup> /s)	5,2	2,6 – 13,2	4,74 – 10,5	5,8 – 17,8
$\phi$ (°)	34	-	-	-
$c'$ (kPa)	7 - 27	-	-	-
$c_u$ (kPa)	15 - 25	-	-	-
Classificação Unificada ASTM D2487-11	-	CL – ML – Argila siltosa	ML – Silte arenoso	ML – Silte arenoso
Classificação AASHTO M 145	-	A-6	A-4	A-4

Os geossintéticos considerados no dimensionamento são apresentados na Figura 2. Estes são: uma geogrelha biaxial extrudada (GG1); uma geogrelha uniaxial extrudada (GG2); uma geogrelha tecida fabricada com fios de alta tenacidade de poliéster cobertos com uma camada de polímero preto (GG3); um geotêxtil não tecido fabricado com polipropileno estabilizado (GT1); e um geocompósito de reforço composto por um geotêxtil não tecido agulhado em polipropileno reforçado com cordões em poliéster na direção de fabrico (GC1).

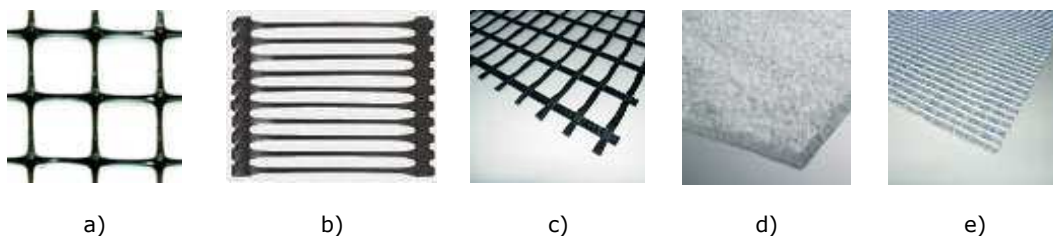


Figura 2 - Geossintéticos considerados: a) GG1; b) GG2; c) GG3; d) GT1; e) GC1

No Quadro 2 são apresentadas algumas propriedades dos geossintéticos incluindo: a resistência à tração na rotura do geossintético,  $F_{ult}$ ; a extensão na rotura,  $\epsilon_{max}$ ; a largura total das faces superior e inferior do reforço (por metro de desenvolvimento),  $P$ ; e o fator parcial de segurança para a redução das propriedades do geossintético devido à danificação durante a sua instalação,  $f_{m21}$ . A resistência à tração e a extensão na rotura dos materiais foram obtidas através de ensaios laboratoriais. O parâmetro  $f_{m21}$  foi obtido por Mendonça-Lopes (2011) e Rosete (2010). No mesmo quadro é ainda apresentado o fator

parcial de segurança para a redução das propriedades do reforço,  $f_{m,r}$ , obtido de acordo com o procedimento descrito pela norma BS8006-1: 2009. Este fator é afetado pelas propriedades intrínsecas dos materiais (uniformidade do processo de fabrico e extrapolação dos resultados dos ensaios), pelo processo construtivo (danificação durante a instalação) e pelos agentes atmosféricos e ambientais.

Quadro 2 - Algumas propriedades dos geossintéticos considerados

Geossintético	$F_{ult}$	$\sigma_{max}$	$f_{m21}$	$f_m$	P
	kN/m	%			
GG1	46,62	12,22	1,00 <sup>+</sup>	1,13	0,13
GG2	52,18	12,37	1,07 <sup>*</sup>	1,28	0,40
GG3	43,91	7,86	1,76 <sup>*</sup>	2,00	0,32
GT1	69,53	100,91	1,10 <sup>*</sup>	1,28	1,00
GC1	54,63	10,57	1,70 <sup>*</sup>	1,96	1,00

<sup>+</sup> Rosete (2010); <sup>\*</sup> Mendonça-Lopes (2011); <sup>x</sup> Fichas técnicas do fabricante

### 2.3 - Dimensionamento segundo a norma BS8006-1: 2009

A norma Britânica BS8006-1: 2009 baseia o dimensionamento de muros e taludes de solo reforçado na filosofia dos estados limites. Nesta metodologia as ações atuantes na estrutura são majoradas e a capacidade resistente dos solos e dos reforços é reduzida através da aplicação de fatores parciais de segurança. No que concerne à análise da estabilidade interna, a norma refere que deve ser estudada a segurança dos reforços relativamente à sua resistência à tração, a segurança relativamente ao mecanismo de arranque do reforço do maciço reforçado, e a estabilidade relativamente ao aparecimento de cunhas potenciais de rotura. Para a análise da estabilidade externa, a norma sugere o estudo da segurança da estrutura relativamente ao aparecimento dos seguintes mecanismos de rotura: capacidade de carga do solo de fundação e derrubamento; deslizamento pela base; e deslizamento global (Figura 3). A segurança relativamente a estes mecanismos deve ser verificada para um estado de tensões efetivas (comportamento drenado do solo) e para um estado de tensões totais (comportamento não drenado do solo).

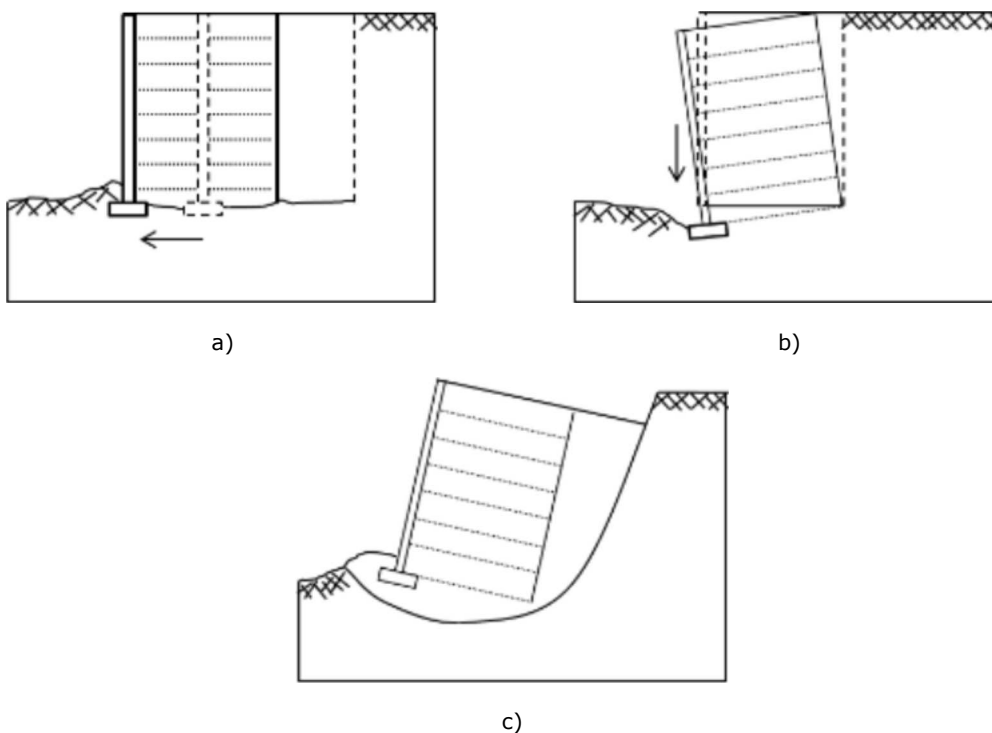


Figura 3 - Mecanismos de rotura externa: a) deslizamento pela base; b) falta de capacidade de carga do terreno de fundação e derrubamento; c) deslizamento global (adaptado de BS8006: 2009)

## 2.4 - Estudo paramétrico

Como referido, o estudo paramétrico apresentado pretende analisar o efeito do coeficiente de interação e o coeficiente de adesão entre o solo e o reforço,  $c_i$  e  $\alpha$ , respetivamente; a resistência à tração na rotura do geossintético,  $F_{ult}$ ; o fator parcial de segurança para a redução das propriedades do reforço,  $f_m$ ; e a largura total das faces superior e inferior do reforço (por metro de desenvolvimento),  $P$ , na distribuição dos reforços em estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Para atingir este objetivo foi realizado o dimensionamento interno da estrutura referida considerando as propriedades do solo e dos geossintéticos apresentados. Além dos parâmetros apresentados foi necessário estabelecer intervalos de valores apropriados para o coeficiente de interação e de adesão entre o solo e o geossintético. Os valores escolhidos foram  $c_i = 0,5; 0,7$  e  $0,9$  e  $\alpha = 0,5$  e  $1,0$ . Note-se que a escolha dos valores a usar foi difícil porque existem poucos estudos que apontem valores para estes parâmetros, principalmente quando se trata da interação entre solos finos e geossintéticos.

A estabilidade externa da estrutura foi verificada recorrendo à metodologia apresentada pela norma BS8006-1: 2009. A segurança da estrutura relativamente ao mecanismo de rotura por escorregamento global foi verificada com o programa informático comercial Slope/W da GeoSlope (versão 2007). Com esta ferramenta foi possível calcular o fator de segurança que a estrutura apresenta quando esta está sujeita a um estado de tensões totais ou tensões efetivas. Para reduzir o número de casos sujeitos a verificação, considerou-se que a segurança da estrutura é garantida para um fator de segurança global maior ou igual a 1,5. Assim, nesta análise não se considerou a utilização dos fatores parciais de segurança referidos. Para esta verificação não se considerou o efeito da percolação da água e o efeito do geossintético colocado na face da estrutura (a estabilidade da face é assegurada apenas pela resistência do solo). Contudo, considerou-se o impulso hidrostático da água aplicado na superfície do talude exterior da estrutura.

## 3 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos no dimensionamento interno da estrutura são o comprimento dos reforços,  $L_R$ , e o espaçamento vertical entre camadas de reforço,  $e_v$ . Quanto ao comprimento dos reforços este foi calculado com a Equação 1. Como se pode verificar este parâmetro depende apenas da altura da estrutura,  $H$ . Por este motivo  $L_R$  é sempre igual a 4,2 m para todas as soluções dimensionadas.

$$L_R = 0.7 \times H \quad [1]$$

Deste modo, as propriedades do solo e dos geossintéticos apenas influenciam  $e_v$ . No Quadro 3 são apresentados os valores de  $e_v$  obtidos no processo de dimensionamento realizado para as diferentes combinações de materiais. Os mecanismos de rotura interna mais condicionantes para cada combinação de materiais também são incluídos. A análise dos resultados obtidos permite fazer algumas observações. Como esperado, verificou-se que quando maior é a resistência à tração na rotura de cálculo,  $F_{ult,d}$  (Equação 2), maior é o espaçamento vertical entre camadas de reforço obtido no dimensionamento.

$$F_{ult,d} = F_{ult} / f_m \quad [2]$$

A exceção a esta regra ocorreu quando o geossintético considerado no dimensionamento foi a geogrelha GG1. Neste caso, embora  $F_{ult,d}$  seja relativamente elevada, o  $e_v$  calculado foi o menor. Isto aconteceu porque, neste caso, o mecanismo de rotura interna que condiciona o dimensionamento é o arranque, ou seja, mesmo considerando uma  $F_{ult,d}$  elevada, esta resistência não é totalmente mobilizada porque, antes de isto acontecer, ocorre a rotura por arranque. Assim, verifica-se que quando a GG1 é considerada, o parâmetro mais condicionante para o dimensionamento é  $P$  (GG1 tem  $P = 0,13$ , valor muito baixo relativamente aos outros reforços considerados).

Relativamente à influência das características de interação entre o solo e o geossintético, mais uma vez, à exceção da GG1, o  $e_v$  não varia quando são considerados diferentes valores de coeficiente de interação e adesão entre o solo e o geossintético. Isto acontece porque o mecanismo de rotura interna condicionante para o dimensionamento é, quase sempre, o mecanismo de rotura por tração do geossintético. Contudo, quando o mecanismo de rotura condicionante é o arranque, o uso de  $c_i$  maiores resulta em  $e_v$  maiores.

Outro parâmetro importante para o dimensionamento dos reforços é o fator parcial de segurança para a redução das propriedades do reforço,  $f_m$ . O facto de um reforço ter uma elevada resistência à tração não quer dizer que esta possa ser totalmente mobilizada. Fatores como a danificação durante a instalação, a fluência do material e as ações de degradação provocadas pelos agentes atmosféricos influenciam a resistência à tração dos geossintéticos. Além disto, também as condições usadas para a caracterização desta propriedade do geossintético influenciam o valor obtido. Por estas razões, é necessário considerar o  $f_m$  no dimensionamento interno das estruturas de solo reforçado. Deste modo garante-se que a resistência à tração dos reforços usada no dimensionamento pode ser totalmente mobilizada. Como  $f_m$  é

um fator de redução, quanto maior for este valor menor será  $F_{ult}$  e mais camadas de reforço serão necessárias para assegurar a estabilidade da estrutura, ou seja, menor será o  $e_v$  resultante do dimensionamento.

Ainda relativamente aos mecanismos de rotura interna relevantes para o dimensionamento, verificou-se que a estabilidade relativamente ao aparecimento de cunhas potenciais de rotura está garantida para todas as combinações de materiais consideradas, ou seja, este mecanismo de rotura não teve impacto nos resultados dos dimensionamentos realizados porque nunca foi o mais condicionante.

Relativamente à verificação da estabilidade externa foi realizada da forma relatada. Os resultados obtidos na verificação da segurança para os diferentes mecanismos de rotura (falta de capacidade de carga do solo de fundação, derrubamento e deslizamento pela base) foram iguais para as diferentes combinações de materiais consideradas. No caso dos mecanismos de rotura por falta de capacidade de carga do solo de fundação e derrubamento verificou-se que a estrutura é sempre estável. Contudo para o mecanismo de rotura por deslizamento pela base verificou-se que a estrutura nunca é estável. Por este motivo, são necessárias medidas adicionais para garantir que este mecanismo de rotura não acontece.

O outro mecanismo que pode ocorrer é o escorregamento global de partes da estrutura. Como mencionado, a ocorrência deste mecanismo foi verificada usando a ferramenta informática referida. Os resultados da análise realizada são apresentados no Quadro 3 e mostram que o fator de segurança global obtido em ambas as análises (para tensões efetivas, TE e tensões totais, TT) é sempre menor que o valor admissível considerado, 1,5. Deste modo, a estrutura não é estável para este mecanismo de rotura.

Quadro 3 - Resultados do estudo paramétrico

Geossintético	$F_{ult}$	$f_m$	$F_{ult,d}$	$c_i$	$\square\square$	P	$e_v$	Mecanismo de rotura interna condicionante	Escorregamento global (fator de segurança)	
	kN/m		kN/m						m	m
GG1	46,6	1,13	41,2	0,5	0,5	0,13	0,3	Rotura por arranque	1,341	1,182
				0,5	1,0		0,3			
				0,7	0,5		0,3			
				0,7	1,0		0,3			
				0,9	0,5		0,6			
0,9	1,0	0,6								
GG2	52,2	1,28	40,8	0,5	0,5	0,32	0,9	Rotura por tração do reforço	1,150	1,082
				0,5	1,0		0,9			
				0,7	0,5		0,9			
				0,7	1,0		0,9			
				0,9	0,5		0,9			
0,9	1,0	0,9								
GG3	43,9	2,00	22,0	0,5	0,5	0,4	0,45	Rotura por tração do reforço	1,333	1,180
				0,5	1,0		0,45			
				0,7	0,5		0,45			
				0,7	1,0		0,45			
				0,9	0,5		0,45			
0,9	1,0	0,45								
GT1	69,5	1,28	54,3	0,5	0,5	1,0	1,20	Rotura por tração do reforço	1,034	0,934
				0,5	1,0		1,20			
				0,7	0,5		1,20			
				0,7	1,0		1,20			
				0,9	0,5		1,20			
0,9	1,0	1,20								
GC1	54,6	1,96	27,9	0,5	0,5	1,0	0,6	Rotura por tração do reforço	1,288	1,179
				0,5	1,0		0,6			
				0,7	0,5		0,6			
				0,7	1,0		0,6			
				0,9	0,5		0,6			
0,9	1,0	0,6								

Assim, verificou-se que a estabilidade externa da estrutura não está garantida para nenhuma das soluções dimensionadas. Mais uma vez, é importante referir que é necessário estudar medidas adicionais para melhorar o comportamento global da estrutura. Uma forma de tentar resolver estes problemas de estabilidade é, por exemplo, incluir camadas de reforço adicionais na zona reforçada da estrutura, ou seja, diminuir  $e_v$  (para diminuir a ocorrência de superfícies de rotura na zona reforçada da estrutura) e/ou incluir camadas de reforço na fundação da estrutura (para diminuir a ocorrência de superfícies de rotura

nesta região). A inclusão de camadas adicionais de reforço na zona reforçada provoca a migração das superfícies de rotura mais críticas para outras zonas da estrutura, ou seja, por exemplo neste caso para a fundação (Figura 4b). Além disto, se forem incluídas camadas adicionais de reforço na fundação a sua estabilidade e os fatores de segurança globais aumentam.

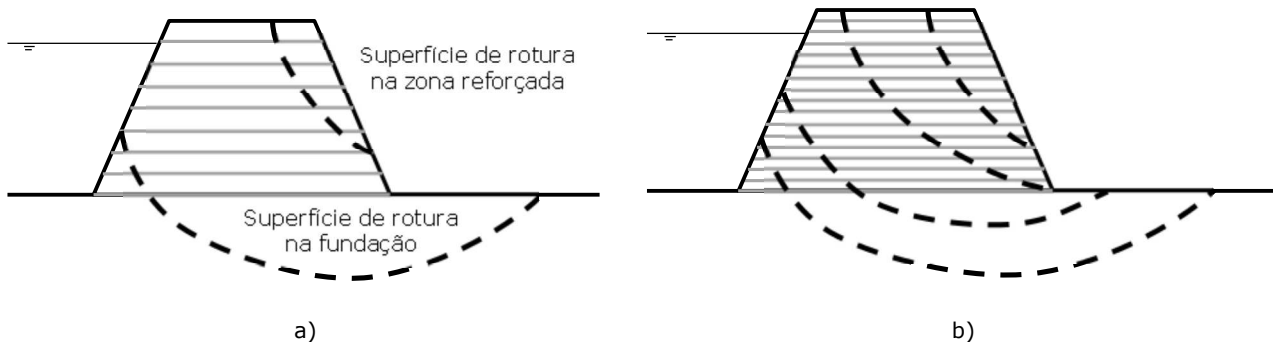


Figura 4 – Esquema ilustrativo do comportamento das superfícies de rotura com a inclusão de camadas adicionais de reforço: a) tipos de superfícies de rotura observadas; b) migração das superfícies de rotura da zona reforçada para a fundação

A estabilização de duas das soluções dimensionadas foi estudada. Para tal, foram realizadas modelações numéricas considerando a inclusão de camadas adicionais de geossintéticos para a estabilização dessas soluções.

No primeiro caso existia um problema de estabilidade na fundação da estrutura (superfície de rotura por escorregamento global localizada na fundação da estrutura). Esta corresponde à solução dimensionada considerando a geogrelha GG1 e  $c_i = 0,5$ . A introdução de três camadas de reforço na fundação da estrutura permitiu aumentar o fator de segurança global de 1,341 para 1,616 (para condições drenadas) e de 1,182 para 1,323 (para condições não drenadas). Mesmo com as camadas adicionais de reforço verificou-se que, para condições não drenadas, o fator de segurança global admissível considerado não foi alcançado. No entanto, nesta análise considerou-se que a estrutura teria de suportar o impulso hidrostático da água no talude exterior. Contudo, para condições não drenadas (de curto prazo), ou seja, durante o período de construção da estrutura, não é necessário considerar a aplicação desta ação. Para permitir a construção da estrutura será necessário usar ensecadeiras. Para considerar este fator foi realizada uma nova análise sem considerar o impulso hidrostático da água. Neste caso, verificou-se que o fator de segurança global aumentou para 1,789 permitindo garantir a estabilidade da estrutura para condições de curto prazo.

O segundo caso estudado corresponde à solução dimensionada considerando o geotêxtil GT1 e  $c_i = 0,5$ . Neste caso os problemas de estabilidade ocorreram na zona interior da estrutura (rotura por escorregamento global na zona reforçada da estrutura). Para resolver este problema optou-se por reduzir o espaçamento vertical entre as camadas de reforço ( $e_v = 0,3$  m para a zona compreendida entre a base da estrutura até 3 m de altura;  $e_v = 0,6$  m para a restante estrutura) e incluir três camadas adicionais de reforço na fundação da estrutura. Deste modo foi possível aumentar o fator de segurança global de 1,034 para 1,669 (para condições drenadas) e de 0,934 para 1,896 (para condições não drenadas).

#### 4 - CONCLUSÕES

Como referido o objetivo principal deste trabalho foi verificar a influência de vários parâmetros usados pelo método de dimensionamento descrito pela norma BS8006-1: 2009 na distribuição dos reforços em estruturas de solo fino reforçado com geossintéticos. Para tal realizou-se um estudo paramétrico. Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que:

- o comprimento dos reforços obtido através do método de dimensionamento da norma BS8006-1: 2009 é igual em todas as soluções dimensionadas porque este parâmetro é influenciado apenas pela altura da estrutura que, neste estudo, é sempre igual;
- excluindo as soluções em que o mecanismo de rotura interna condicionante para o dimensionamento é o arranque, quando maior é a resistência à tração dos reforços, maior é o espaçamento vertical entre camadas de reforço obtido no dimensionamento;

- o mecanismo de rotura interna por arranque é maior condicionante para o dimensionamento das soluções em que são considerados reforços com resistência à tração maior;
- o uso de coeficientes de interação entre o solo e o reforço diferentes é importante apenas quando o mecanismo de rotura interna condicionante para o dimensionamento é o arranque;
- a largura total das faces superior e inferior do reforço (por metro de desenvolvimento),  $P$ , é muito importante para a ocorrência ou não do mecanismo de rotura interna por arranque. Nos casos estudados verificou-se que, com a diminuição de  $P$ , o arranque torna-se no mecanismo de rotura interna mais condicionante;
- como  $f_m$  é um fator parcial de redução das propriedades do geossintético, quanto maior for este valor menor será a sua resistência à tração e mais camadas de reforço serão necessárias para assegurar a estabilidade da estrutura;
- o mecanismo de rotura interna por aparecimento de cunhas potenciais de rotura não tem impacto no dimensionamento da estrutura considerada;
- a estabilidade externa da estrutura não pode ser garantida porque podem ocorrer os mecanismos de rotura externa, escorregamento pela base ou escorregamento global. Contudo, é possível melhorar a estabilidade da estrutura e torná-la estável através da adição de camadas de geossintéticos suplementares na fundação ou na zona reforçada.

Finalmente importa referir que a estrutura considerada neste estudo corresponde a um caso muito particular que tem sido estudado pelos autores (Carlos et al. (2012), Carlos et al. (2011), Carlos e Pinho-Lopes (2011a, b) e Carlos (2009)). Contudo, as conclusões observadas neste estudo podem ser tomadas em consideração para outros tipos de estrutura, desde que se considere o mesmo método de dimensionamento e propriedades dos materiais da mesma ordem de grandeza.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) e do programa COMPETE através dos 2 projetos de investigação: (FCT) PTDC/ECM/099087/2008 e (COMPETE) FCOMP-01-0124-FEDER-009724; e (FCT) PTDC/ECM/100975/2008 e (COMPETE) FCOMP-01-0124-FEDER-009750.

## REFERÊNCIAS

- ASTM D2487-11. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes. (Unified Soil Classification System).
- AASHTO M 145. Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.
- Bonito, F. A. B (2008). Reologia dos lodos e de outros sedimentos recentes da Ria de Aveiro. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 422p.
- BS8006-1 (2009). Code of Practice for Strengthened/reinforced soils and other fills. BSI London, 2009.
- Carlos, D. M. (2009). Reforço com geossintéticos de muros das marinhas da Ria de Aveiro. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 171p.
- Carlos, D. M. e Pinho-Lopes, M. (2011a). Reinforcement with geosynthetics of walls of the saltpans of the Aveiro Lagoon. Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 29, Number 4, 519-536, DOI: 10.1007/s10706-011-9400-6.
- Carlos, D. M. e Pinho-Lopes, M. (2011b). Reinforcement of non-traditional soil with geosynthetics – application to the walls of the saltpans of the Aveiro lagoon. Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. A. Anagnostopoulos et al. (eds.). IOS Press, Athens, Greece, DOI: 10.3233/978-1-60750-801-4-1441, pp. 1441-1446.
- Carlos, D. M., Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. (2012). Parametric study of the design of a solution of fine soil reinforcement with geosynthetics. Proceedings of 5th European Geosynthetics Congress, Vol. 5 – soil improvement and reinforcement. Valência, Espanha, pp. 77 – 84.
- Carlos, D., Pereira, M., Costa, S., Pinho-Lopes, M. e Coelho, C. (2011). Walls of the Saltpans of the Aveiro Lagoon, Portugal – Current Status and Proposed New Solutions Using Geosynthetics, ICS2011 - 11th International Coastal Symposium, Szczecin, Poland, Journal of Coastal Research, SI 64, pp. 1467-1471, ISSN 0749-0208.
- Mendonça-Lopes, P. (2011). Efeito do balastro nas propriedades de geossintéticos em vias-férreas. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 146p.
- Rosete, A. (2010). Durabilidade de geossintéticos em obras ferroviárias – Abrasão e DDI. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 136p.