

Muro em Solo Reforçado com Geogrelhas e Blocos Segmentais – Um Caso de Obra com Altura de 13,50 metros

Brugger, P. J.

Terrae Engenharia Ltda., Palmas, TO, Brasil, brugger@terrae.com.br

Silva, A. E. F.

Huesker Ltda. São José dos Campos, SP, andre@huesker.com.br

Rodrigues, V. J.

Ativo Engenharia e Comércio Ltda., Salvador, BA, vitor@ativoeng.com.br

Saramago, R. P.

Terrae Engenharia Ltda., Rio de Janeiro, RJ, robson@terrae.com.br

Resumo: O trabalho apresenta um caso de obra de contenção realizado em Salvador, Bahia, utilizando-se a técnica de solo reforçado com geogrelhas e blocos segmentais. O Muro possui aproximadamente 120 metros de extensão a altura variável com máximo de 13,50 metros. São apresentados detalhes de projeto e aspectos construtivos da obra. Observa-se que para muros com grandes alturas, as deformações durante a execução são importantes e os reforços devem ser bastante rígidos para evitar deslocamentos visíveis da face ou abertura de frestas e surgimento de trincas na face. São discutidos alguns critérios e normas de projeto normalmente utilizados em obras deste tipo e a sua aplicabilidade para obras de grande altura, bem como algumas características específicas desta obra.

Abstract: This paper presents a case of a retaining wall built in Salvador, Bahia, using geogrids and segmental blocks as a soil reinforcement solution. The wall is about 120 m long with heights varying up to 13,5m. Project details and construction aspects are presented. It must be highlighted that for very high walls, deformations during construction are always relevant and the reinforcement materials must be stiff enough to avoid visible displacements of the face, which could result in openings between blocks or even cracks on the face elements. Some design criteria and norms for such projects are discussed, as well as their applicability for very high walls, focusing on specific characteristics of this job.

1 INTRODUÇÃO

O emprego da técnica de contenção de taludes em solo reforçado com geogrelhas e face em blocos segmentais vem crescendo no Brasil na última década em decorrência do surgimento de produtos e processos que permitiram melhoria considerável na qualidade das obras e no tempo de execução sem a necessidade de mão-de-obra especializada e equipamentos sofisticados. Na literatura já são encontradas muitas referências a obras realizadas com esta técnica (Azambuja et. al., 2000; Reccius, 1999; Mendonça et. al., 2000; Brugger et. al., 2001; Brugger e Montez, 2003 e Gomes et. al., 2004).

A utilização de geogrelhas mais rígidas em substituição aos geotêxteis tecidos e não tecidos, a utilização de blocos segmentais na face dos muros em substituição às técnicas de solo envelopado, e a

utilização de aterros compactados com grande energia, permitem a execução de obras em solo reforçado com qualidade, acabamento estético e baixa deformabilidade, similares a muros de contenção em concreto armado, muros ancorados e sistemas do tipo Terra Armada.

Este artigo aborda a aplicação da técnica de solo reforçado com geogrelhas de poliéster flexíveis e face em blocos segmentais em um muro de grande altura onde, além da garantia da segurança em relação à ruptura, as características relacionadas à estética e à utilização são importantes. Adotou-se na fase de projeto e controle da obra os conceitos de “servicibilidade” da obra em relação às deformações previstas nas fases de compactação, final da obra e vida útil, conceito este ainda pouco difundido no meio técnico nacional.

2 DESCRIÇÃO DA OBRA

A obra foi projetada para a execução do acesso a uma área onde seria executado um loteamento. O muro possui comprimento de aproximadamente 120 metros e altura variando desde zero até 13,50 metros. No topo do muro foi projetada uma estrada com largura de aproximadamente 12 metros e sobrecarga equivalente de 15 kN/m^2 . O muro possui dois trechos retos e uma curva de 90 graus com raio de aproximadamente 30 metros.

O solo utilizado para o muro e para o aterro de toda a área foi o solo local, composto por silte arenoso com aproximadamente 50% do peso passando na peneira #200. Para o cálculo do empuxo no tardo do muro foram considerados os seguintes parâmetros de resistência: coesão (c) = 5 kPa, ângulo de atrito interno (f) = 25° e peso específico natural (γ_{nat}) = 19 kN/m^3 . Para o aterro reforçado o solo é praticamente o mesmo, mas a compactação é maior e mais controlada. Para este solo foram considerados $c = 5 \text{ kPa}$, $f = 30^\circ$ e $\gamma_{\text{nat}} = 19 \text{ kN/m}^3$. Não foi observada presença de água nas sondagens, mas para efeitos de dimensionamento nível d'água foi considerado na metade da altura total do muro para todas as alturas.

3 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento é feito em três etapas:

1. Verificação do equilíbrio externo.
2. Dimensionamento dos reforços na ruptura
3. Previsão de deformações da obra nas condições de trabalho.

A terceira etapa utiliza conceitos de “servicibilidade”, e é baseada na norma inglesa BS 8006. No Brasil estes conceitos ainda são pouco difundidos, mas para obras com grandes alturas são imprescindíveis, uma vez que as deformações podem prejudicar o aspecto estético e funcional das obras, independente da segurança ao colapso.

Todas as etapas do dimensionamento foram realizadas com o auxílio do Programa ForTerra (Brugger et. al., 2005)

3.1 Dimensionamento Externo

O dimensionamento externo consiste basicamente em determinar o comprimento dos reforços para que a estrutura de solo reforçado como um todo resista ao empuxo da massa de solo no seu tardo sem tombar, deslizar e com tensões verticais na base inferiores às tensões admissíveis que o solo de fundação suporta. O Programa ForTerra analisa diretamente o diagrama de esforços para diferentes ângulos do plano de ruptura que parte do pé interno do muro. Para a altura crítica de 13,50 metros o comprimento mínimo dos reforços deve ser de 9,0 metros. O empuxo total é de $592,65 \text{ kN/m}$, Fator de segurança ao tombamento igual a 4,47, ao

deslizamento igual a 1,83 e tensões verticais máximas no bordo externo do muro iguais a $365,00 \text{ kN/m}^2$. O comprimento de reforços de 9,0 metros adotado corresponde a 67 % da altura total do muro ($B=0,67H$), valor ligeiramente inferior ao recomendado para estruturas de solo reforçado, que é de 70 % (BS, 8006).

3.2 Dimensionamento Interno

O dimensionamento interno consiste no cálculo da quantidade, tipo e espaçamento dos reforços de modo a garantir o confinamento da massa de solo reforçado. O método de cálculo utilizado é o de Ehrlich e Mitchel (1994), que leva em conta, além das tensões e dos parâmetros de resistência do solo e do reforço, a rigidez relativa entre os materiais e os esforços induzidos pela compactação. De modo geral para muros de grande altura o que se procura é induzir, durante a compactação das camadas, esforços verticais de modo a provocar um “pré-carregamento” no solo e no reforço. Deste modo as deformações decorrentes da construção das demais camadas serão menores.

O sistema assim dimensionado e adotado neste projeto foi o Muro Terrae, concebido para utilizar exclusivamente Geogrelhas Fortrac de poliéster ou PVA. Para esta obra foram utilizadas geogrelhas de poliéster, com fatores de redução certificados em ensaios realizados por órgãos certificadores independentes (BBA 01/R125, 2001). Para os solos utilizados e vida útil de 60 anos os fatores de redução certificados são:

- Fluência: $FR_{fl} = 1,56$
- Instalação: $FR_{di} = 1,05$
- Degradação: $FR_{am} = 1,03$
- Extrapolação: $FR_{ex} = 1,05$
- $FR_{global} = 1,771$

Na tabela 1 são apresentados os resultados do dimensionamento interno para a obra. O espaçamento foi mantido constante e igual a 0,60 m, modulado para três blocos. Na tabela a coluna “altura” indica a cota do reforço em relação à base do muro, sendo o primeiro reforço da tabela o reforço inferior do muro. Para cada camada é apresentada na segunda coluna a geogrelha adotada, na terceira coluna a tensão máxima na geogrelha no final da construção e na quarta coluna o fator de segurança à ruptura individual de cada reforço. Este fator de segurança é calculado em relação à resistência útil da geogrelha, já minorada pelos respectivos fatores de redução. As colunas 5 e 6 apresentam as tensões verticais induzidas pela compactação e no final da construção respectivamente, e a coluna 10 apresenta o coeficiente de empuxo para cálculo da tensão no reforço calculado pelo método de Ehrlich e Mitchel (1994).

Observa-se que todos os reforços possuem fator de segurança a ruptura superior a 1,0 e que o fator

de segurança médio é de aproximadamente 1,5. Cabe observar que as tensões verticais induzidas na compactação são maiores que as tensões finais para os reforços posicionados na altura de 7,60 metros até o topo, sendo a energia de compactação o fator crítico no dimensionamento destes reforços.

3.3 Análise de Deformações

Qualquer obra de engenharia deve atender a critérios de funcionalidade e estética, além da garantia de uma segurança adequada ao colapso. Em muitas áreas da engenharia civil este conceito já é bem desenvolvido, como no concreto armado e nas estruturas metálicas, onde são verificadas as deformações e aberturas de trincas após o dimensionamento no estado limite último. Na geotecnia, e particularmente no dimensionamento de muros de contenção, o conceito definido como “servicibilidade” (do inglês *serviceability*) tem sido pouco utilizado, levando muitas vezes a execução de obras que atendem apenas parcialmente os requisitos do projeto. No Brasil ainda é comum a execução de muros de solo reforçado com a técnica de solo envelopado, utilizando-se como reforço geotêxteis não tecidos e tecidos de polipropileno. Estes materiais são sabidamente pouco rígidos e sujeitos a fenômenos de fluência importantes. Quando utilizados em muros altos ou com estruturas rígidas no topo apresentam grandes deformações e aberturas de trincas nas estruturas.

Para garantir a estática e a funcionalidade de muros com face em blocos segmentais é necessária a utilização de geogrelhas de alta resistência, alto módulo e baixa fluência. Em geral as análises são realizadas em termos de deformações específicas ou alongamentos máximos nas fases de compactação, final de construção e longo prazo. Para tanto é necessário que se conheçam as curvas tensão-deformação das geogrelhas para curto e longo prazo. A figura 1 apresenta as curvas tensão-deformação normalizadas pela resistência última para geogrelhas Fortrac de poliéster para diferentes tempos.

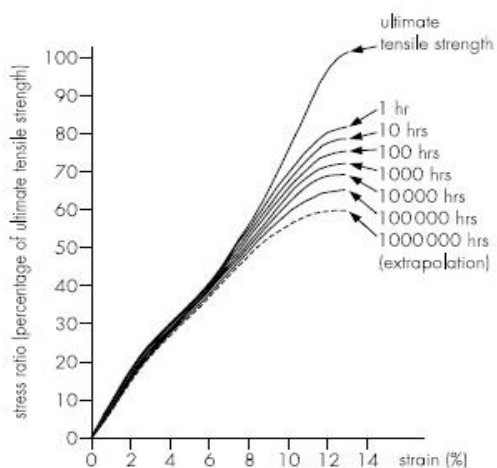


Figura 1 – Curvas tensão-deformação de geogrelhas Fortrac de poliéster.

Na tabela 1 as colunas 7, 8 e 9 apresentam os alongamentos específicos máximos em todas as camadas de reforços para o muro obtidos a partir das curvas tensão-deformação das geogrelhas. De modo geral são recomendados os seguintes critérios:

- A energia de compactação deve ser grande, de modo a mobilizar a maior parcela das tensões (e das deformações) durante a compactação.
- O acréscimo no alongamento específico máximo entre o final da compactação e o final da construção deve ser menor do que 5%.
- O acréscimo no alongamento específico máximo entre o final da construção e a longo prazo deve ser menor do que 1% (a norma inglesa BS 8006 recomenda 1% para muros em geral e 0,5% para muros portantes de pontes e viadutos).

Na tabela observa-se que o maior alongamento entre o término da compactação e o final da construção é na geogrelha da altura 1,6 m e é igual a 3,34 %, enquanto que o maior alongamento entre o final da construção e em longo prazo é na geogrelha da altura 10,6 m e é igual a 0,96 %. Todos os valores encontram-se dentro dos limites recomendados. Caso fosse desejável a construção de um muro com deformações ainda menores, para uma situação de um muro portante, por exemplo, o projetista poderia trabalhar com geogrelhas de poliéster, mas com níveis de tensão mobilizada mais baixos, utilizando reforços mais resistentes do que os calculados para a ruptura. Outra opção seria a utilização de geogrelhas de PVA, que apresentam módulos de rigidez maiores do que as geogrelhas de poliéster. Para níveis de tensão de tipicamente 40 % da resistência última, geogrelhas de poliéster alongam aproximadamente 6 %, enquanto geogrelhas de PVA alongariam algo entre 2 e 3 %.

Admitindo-se uma distribuição de tensões triangular ao longo dos reforços, o deslocamento horizontal máximo da face entre o final da compactação e o final da execução ocorreria na altura de 1,6 m, e seria de 15,0 cm, mais 3,3 cm para 60 anos, totalizando 18,8 cm. Esse deslocamento é de 1,4 % em relação à altura do muro. Conclui-se que muros reforçados com geogrelhas de poliéster são bastante rígidos e atendem às especificações de normas internacionais no que se refere a “servicibilidade”.

Tabela 1 – Resultados do dimensionamento interno

Altura (m)	Geogrelha	T (kN/m)	FS	s_c (kN/m ²)	s_f (kN/m ²)	e_c (%)	e_f (%)	e_∞ (%)	K_r
0,4	Fortrac 150/30-30	56,69	1,49	131,66	341,07	1,99	5,15	5,81	0,28
1,0	Fortrac 150/30-30	52,59	1,61	131,66	317,58	1,98	4,78	5,39	0,28
1,6	Fortrac 110/30-20	48,25	1,29	131,66	295,67	2,69	6,03	6,75	0,27
2,2	Fortrac 110/30-20	44,74	1,39	131,66	275,14	2,68	5,59	6,26	0,27
2,8	Fortrac 110/30-20	41,44	1,50	131,66	255,83	2,67	5,18	5,80	0,27
3,4	Fortrac 110/30-20	38,75	1,62	131,66	237,59	2,66	4,79	5,36	0,27
4,0	Fortrac 110/30-20	35,29	1,76	131,66	220,30	2,64	4,41	4,94	0,27
4,6	Fortrac 80/30-20	32,17	1,40	131,66	103,86	3,46	5,36	6,19	0,26
5,2	Fortrac 80/30-20	29,47	1,53	131,66	188,15	3,44	4,91	5,67	0,26
5,8	Fortrac 80/30-20	26,90	1,68	131,66	173,12	3,41	4,48	5,17	0,26
6,4	Fortrac 80/30-20	24,37	1,85	131,66	158,66	3,37	4,06	4,69	0,26
7,0	Fortrac 80/30-20	21,97	2,05	131,66	144,73	3,33	3,66	4,23	0,25
7,6	Fortrac 55/30-20	19,45	1,59	131,66	131,26	4,88	4,86	5,40	0,25
8,2	Fortrac 55/30-20	19,43	1,60	131,66	118,18	4,88	4,86	5,40	0,27
8,8	Fortrac 55/30-20	19,43	1,60	131,66	105,46	4,88	4,86	5,40	0,31
9,4	Fortrac 55/30-20	19,43	1,60	131,66	93,04	4,88	4,86	5,40	0,35
10,0	Fortrac 55/30-20	19,36	1,60	131,66	80,88	4,88	4,84	5,38	0,40
10,6	Fortrac 35/30-20	19,15	1,03	131,66	68,94	7,41	7,37	8,33	0,46
11,2	Fortrac 35/30-20	19,14	1,03	131,66	57,18	7,41	7,36	8,32	0,56
11,8	Fortrac 35/30-20	19,11	1,03	131,66	45,56	7,41	7,35	8,31	0,70
12,4	Fortrac 35/30-20	19,10	1,03	131,66	34,05	7,41	7,35	8,30	0,94
13,0	Fortrac 35/30-20	12,75	1,55	131,66	22,60	4,98	4,90	5,54	1,41

Altura: Cota em relação à base do muro - Geogrelha: Especificação da geogrelha

T: Tensão final do reforço

FS: Fator de Segurança à ruptura do reforço

s_c : Tensão vertical equivalente induzida pela compactação

s_f : Tensão vertical final após a construção

e_c : Alongamento específico máximo após compactação

e_f : Alongamento específico máximo no final da construção

e_∞ : Alongamento específico máximo a longo prazo

K_r : Coeficiente de empuxo para cálculo da tensão no reforço

4 SEÇÃO TRANSVERSAL

A partir dos resultados apresentados na tabela 1 é detalhada na figura 2 a seção transversal do muro com a distribuição dos reforços, camadas drenantes na base, no tardo dos reforços e junto à face em blocos segmentais.

Devido à grande altura do muro e à sobrecarga existente nos blocos segmentais, foram fabricados blocos com resistências à compressão de 18 MPa para a parte inferior, 12 MPa para a parte central e 6 MPa para a parte superior do muro.

Observa-se nesta seção ainda que os reforços são colocados de modo a ter uma dupla camada na região da face com 1,0 metro de comprimento. Este detalhe construtivo é padrão em Muros Terrae com alturas superiores a 5,0 metros e visa garantir que a resistência na conexão entre o reforço e a face não seja menor do que a do reforço propriamente dita. Ensaio de conexão com blocos Terrae e geogrelhas

Fortrac de poliéster realizados em equipamentos desenvolvidos especialmente para este fim demonstram que a resistência na conexão deste sistema com camada simples de reforço é, em função da sobrecarga na conexão, no máximo 80 % da resistência da geogrelha ensaiada, enquanto que com dupla camada a resistência da conexão nunca é inferior a 120 % da resistência da geogrelha, o que garante que a conexão não é um ponto de menor resistência no sistema construtivo com camada dupla na conexão. Não é do conhecimento dos autores deste trabalho a existência de outros sistemas construtivos de solo reforçado com face em blocos segmentais que tenham esta garantia no Brasil.

Nas figuras 3 e 4 são apresentadas fotografias da obra após a conclusão. Pode-se observar o perfeito alinhamento dos blocos e a ausência de deformações visíveis na estrutura.

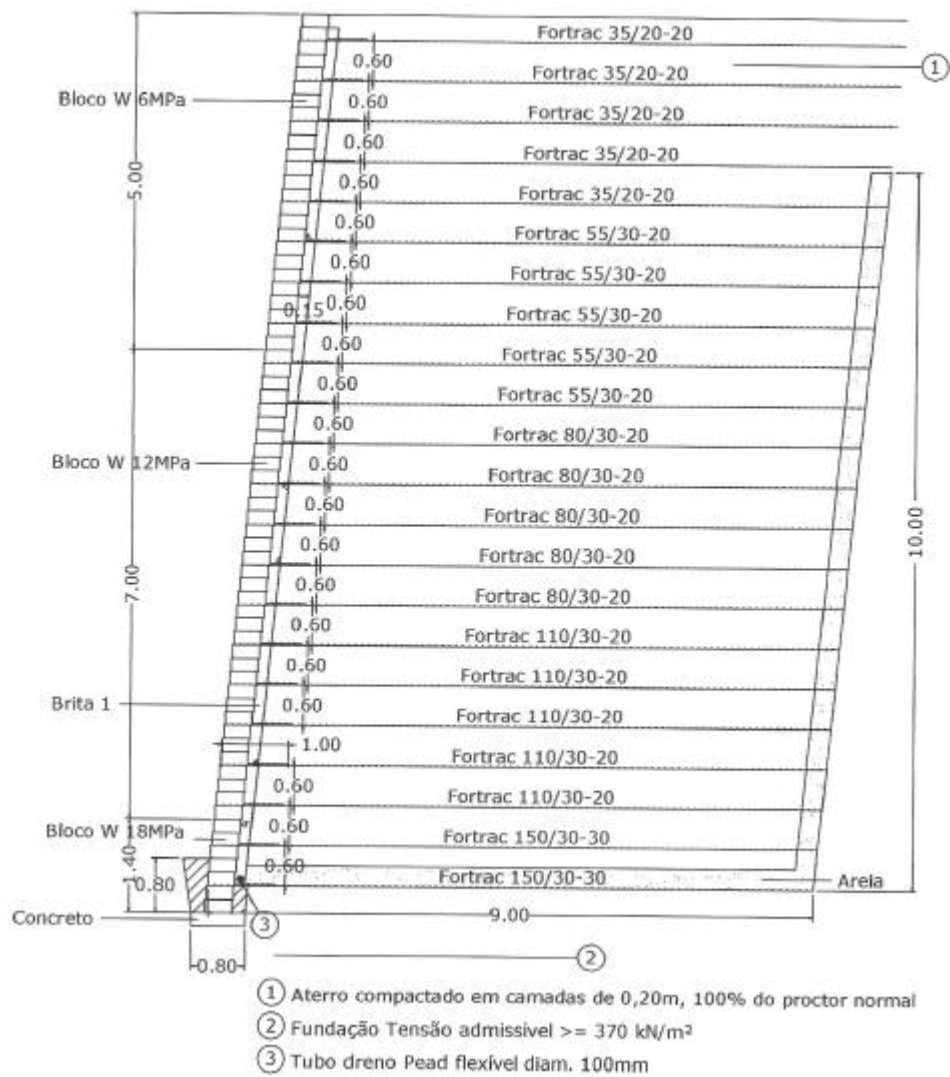
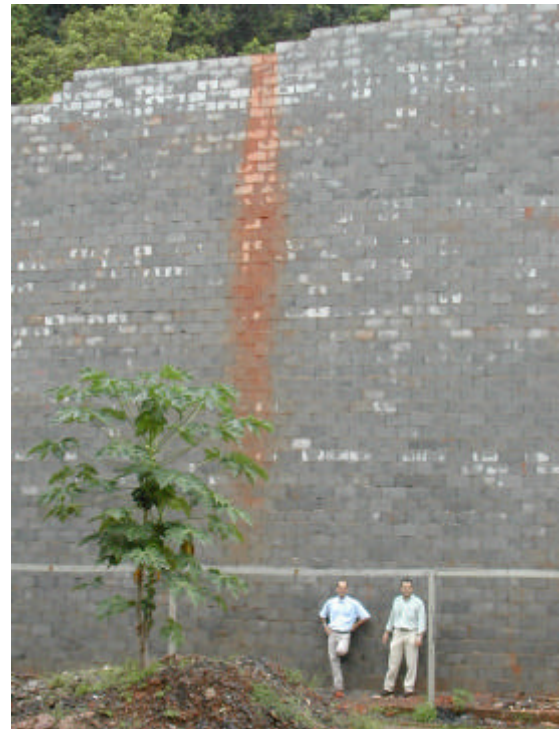


Figura 2 – Seção transversal do muro com distribuição dos reforços.



Figuras 3 e 4 – Detalhe da face do muro após o término da execução.

5 CONCLUSÕES

O trabalho apresenta a aplicação da técnica de solo reforçado com geogrelhas de poliéster flexíveis e face em blocos segmentais de concreto em um muro com comprimento de 120 metros e altura máxima de 13,50 metros onde, além da garantia da segurança em relação à ruptura, as características relacionadas à estética e à utilização são importantes. Adotou-se na fase de projeto e controle da obra os conceitos de “servicibilidade” da obra em relação às deformações previstas nas fases de compactação, final da obra e vida útil, conceito este ainda pouco difundido no meio técnico nacional.

São apresentados os procedimentos adotados para o dimensionamento externo, o dimensionamento interno e a previsão de deformações durante as fases de execução e longo prazo do muro. Para que estas análises sejam possíveis é necessário que os materiais utilizados como reforço, face e solo sejam previamente especificados, bem como a energia de compactação a ser utilizada na execução do muro. Nesta obra foi utilizado o Sistema Terrae, com geogrelhas de poliéster Fortrac, solo areno-siltoso e compactador pesado tipo rolo pé-de-carneiro.

Os resultados das análises e da obra em si demonstram que a utilização de geogrelhas de alta resistência, alto módulo e baixa fluência, aliadas a uma compactação enérgica resultam em muros muito pouco deformáveis, que atendem aos requisitos de aspecto estético e funcionalidade, além da segurança ao colapso. É apresentada ainda uma seção transversal do muro com detalhes de drenagem e conexão dos reforços com a face em blocos segmentais, além de detalhes de drenagem na base, tardoz e na face do muro.

Sobre o conceito de servicibilidade apresentado neste trabalho, a que se destacar a relevância de sua consideração em projetos de estruturas de contenção (bem como de outras estruturas geotécnicas), em particular para muros de grande altura. O dimensionamento efetuado levando-se em conta critérios de servicibilidade garante que a obra atenda os níveis de estética e de comportamento de longo prazo, evitando inclusive necessidade de manutenções futuras. Neste sentido, as geogrelhas de PVA, mais rígidas que as de poliéster, apresentam-se como uma excelente alternativa de materiais de reforço de estruturas de contenção em

solo reforçado. Os Muros Terrae prevêm a utilização das geogrelhas Fortrac de PVA especialmente em muros altos e em obras de contenção de grande responsabilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azambuja, E., Strauss, M. e Bernardes, J. (2000) Alguns Casos Históricos de Contensões em Solo Reforçado com Geossintéticos no Rio Grande do Sul. Geosul 2000. Porto Alegre, Brasil.
- BBA - British Board of Agrément Technical Approvals for Construction, Roads and Bridges Agrément Certificate No. 01/R125, UK, October 2001.
- Brugger, P.J., Borma, L.S. e Mendonça, M.B. (2001) Contenção e Proteção de Talude em Margem de Rio com Muros de Solo Reforçado e Blocos Intertravados. Cobrae 2001, Rio de Janeiro, Brasil.
- Brugger, P.J., e Montez, F.T. (2003) Muros de Contenção em Solo Reforçado com Geogrelhas e Blocos Segmentais. Geossintéticos 2003, Porto Alegre, Brasil.
- Brugger, P.J., Silva, A.E.F. Furtado, D.C. e Saramago, R.P. (2005) ForTerrae – Programa para o Dimensionamento e o Detalhamento de Muros de Contenção e Blocos Segmentais. Infogeo 2005, Belo Horizonte, Brasil.
- BS 8006. Code of Practice for Strengthened and Reinforced Soils and Other Fills. British Standard, London, Inglaterra.
- Ehrlich, M. and Mitchel, J. K. (1994) Working Stress Design Method For Reinforced Soil Walls. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, Vol 120, No. 4, pp. 625-647.
- Gomes, R. C., Azambuja, E., Erlich, M. e Sayão, A. S. F. J. (2004) Manual Brasileiro de Geossintéticos – Capítulo 4.5, Aplicações em Reforço de solos – Muros e Taludes Reforçados. Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- Mendonça, M.B., Brugger, P.J., Pereira, G.I.M. e Montez, F.T. (2000) Recuperação de Aterro Rodoviário Através de Solo Reforçado e Blocos Intertravados. Geosul 2000. Porto Alegre, Brasil.
- Reccius, G. (1999) Muros de Contenção de Solo Reforçado com Geogrelhas e Paramento de Blocos Pré-fabricados. Geossintéticos'99. Rio de Janeiro, Brasil.