

Análise do comportamento de estruturas de contenção reforçadas por geogrelha e blocos articulados de concreto

Paulo Rogério Gomes Lima Júnior

Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia - AL, Brasil, paulorogeri0@hotmail.com

Rafaela Faciola Coelho de Souza

Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia - AL, Brasil, rafaela_faciola@yahoo.com.br

RESUMO: As estruturas de contenção estão presentes em boa parte das obras e projetos de engenharia, como rodovias, pontes e barragens. Nos últimos anos, soluções tradicionais foram aperfeiçoadas e ao mesmo tempo novas técnicas foram desenvolvidas. O melhoramento de solo com materiais geossintéticos, por exemplo, é uma solução recente e tem sido bastante empregada em obras civis. As estruturas de contenção com solo reforçado por materiais poliméricos tratam-se de muros de gravidade onde a estabilidade é alcançada através da compactação do solo e da inserção de camadas de geotêxteis ou geogrelhas. Esses elementos são dispostos horizontalmente e apresentam espaçamento vertical variável. A técnica apresenta vantagens diferenciadas, como, construção a seco e a possibilidade de utilização do próprio solo do local de implantação da obra. Este trabalho aborda o dimensionamento de Estruturas de Contenção em Solo Reforçado (ECSR), caracterizadas pela inserção de elementos de geogrelhas e faceamento elaborado por blocos segmentais de concreto. Para o dimensionamento do equilíbrio externo das estruturas, adotou-se o método do equilíbrio limite, para os cálculos referentes a estabilidade interna utilizou-se o método racional proposto por Ehrlich e Mitchell (1994). São apresentados resultados característicos do dimensionamento de dois muros. O diferencial das estruturas se dá pelo tipo de solo de fundação e de aterro. Uma das estruturas é composta por solo coesivo, classificado como argilo arenoso e a outra é constituída por um solo arenoso, insento de coesão. Após a realização dos cálculos, foi possível perceber que o solo arenoso apresentou maior facilidade para distribuir as tensões do maciço às geogrelhas. Já o solo parcialmente argiloso, mostrou-se mais resistente, pode-se dizer que tal fato é consequência da presença da coesão.

PALAVRAS-CHAVE: Estrutura de contenção, Solo reforçado, Geossintético, Dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

A técnica de reforço do solo é caracterizada pela inserção de elementos resistentes à tração, que promovem o aumento da resistência e diminuem a intensidade das deformações do maciço (VERTEMATTI, 2004). Tecnicamente, o comportamento global do maciço é melhorado mediante à transferência de esforços para os elementos resistentes.

O sistema que emprega blocos segmentais de concreto e reforço com geogrelha é uma solução atual e tem sido constantemente adotada em

obras geotécnicas.

A técnica apresenta processos de execução simples e oferece maior rapidez construtiva. Em geral, emprega o solo local como material de aterro, tornando desnecessário a importação de solo na obra.

O presente trabalho possui um caráter teórico e "prático" cujo o intuito é expor ao leitor as características e o dimensionamento de estruturas de contenção em solo reforçado.

O trabalho trata do dimensionamento de duas estruturas hipotéticas, elaboradas com o emprego da técnica de contenção caracterizada

pelo uso conjunto de elementos de geogrelha e de blocos segmentais.

2 METODOLOGIA

As estruturas de contenção dimensionadas tratam-se de projetos fictícios com embasamento em parâmetros aplicados na prática.

A seleção das características do solo de enchimento e de fundação foi baseada nos parâmetros hiperbólicos conservativos de diversos solos propostos por Duncan et al (1980) apud Ehrlich (2009).

Na etapa de dimensionamento dos muros, para os cálculos da estabilidade externa aplicou-se o método do equilíbrio limite elaborado por Rankine (1857). No processo de análise da estabilidade interna utilizou-se a metodologia proposta por Ehrlich e Mitchell (1994).

A partir dos resultados obtidos no dimensionamento das ECSR, efetuou-se uma análise comparativa do comportamento mecânico das geogrelhas inseridas entre as camadas de solo de cada estrutura.

Através dos softwares TERRAE e AutoCAD foi elaborado o arranjo gráfico com as especificações dos muros dimensionados.

3 DIMENSIONAMENTO

Os muros apresentam geometria semelhante, contendo um comprimento de 14 metros e altura variando de 0 à 7 metros. A inclinação do paramento é de $84,29^\circ$ (1H:10V), sendo praticamente vertical.

A Figura 1 apresenta o diagrama que representa a configuração das etapas de cálculos efetuados no processo de dimensionamento das estruturas de contenção.

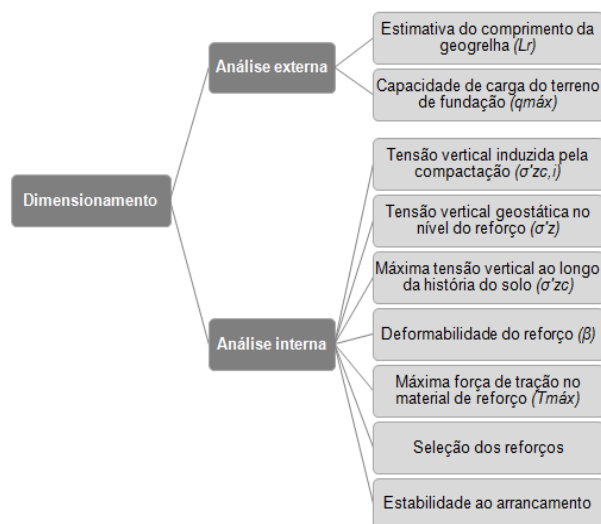


Figura 1. Diagrama das etapas de cálculos para o dimensionamento das ECSR.

3.1 Dimensionamento da estrutura com solo coesivo

A Tabela 1 apresenta as características dos elementos internos e externos que constituem a estrutura composta por solo contendo índices de coesão.

Tabela 1. Parâmetros do muro com solo coesivo

Características do solo de enchimento	
Descrição do solo	areia argilosa
Coesão	$C' = 14\text{kpa}$
Angulo de atrito	$\phi' = 33^\circ$
Peso específico	$\gamma = 19\text{kN/m}^3$
Módulo tangente inicial	$K = 150$
Módulo expoente	$n = 0,60$
*O solo de fundação apresenta os mesmo parâmetros do solo de enchimento.	
Parâmetros do material de reforço	
Tipo de geossintético	geogrelha de PVA
Parâmetros dos blocos articulados	
Eficiência do acoplamento	85 %
Dimensões	0,40m x 0,40m e altura de 0,20m

Para as condições geométricas da estrutura e do tipo de solo, a análise externa apresentou um empuxo total de 135,00 kN/m. A capacidade de carga do terreno de fundação corresponde à 1476,16 kPa, o que estabelece um fator de segurança de 9,42 contra à rupina desse solo. Com o intuito de evitar o arrancamento dos materiais de reforço na zona resistente, adotou-se o comprimento (L_r) igual a 5,60m (0,8.H) para todas as camadas de reforço.

No dimensionamento interno foram estabelecidos a quantidade, o tipo e o espaçamento das geogrelhas de modo a garantir o confinamento da massa de solo reforçado.

Pelo fato do muro apresentar 7 metros de altura, foram necessários a inserção de 12

camadas de reforço, com espaçamento constante de 60 cm, sendo que a primeira camada de geogrelha em relação ao topo da estrutura apresenta um espaçamento de 40 cm.

No geral, foram realizadas 3 iterações. Para as camadas 10, 11 e 12, foram selecionadas geogrelhas de PVA com resistência de 35 Mpa. Já para as camadas complementares foram empregadas geogrelhas com resistência de 55 Mpa.

Na tabela 2 são apresentados os resultados do dimensionamento interno. Em relação aos fatores de segurança que garantem o não arrancamento dos elementos de reforço na estrutura. Todos os níveis de reforço atendem ao fator de segurança mínimo de 1,5.

Tabela 2. Planilha de cálculo para a terceira iteração da estrutura com solo coesivo.

Camadas de reforço	S_v (m)	Cota (m)	J_r (kN/m)	S_i (kPa)	σ'_z (kPa)	σ'_{zc} (kPa)	β	X	$T_{máx}$ (kN)	F.S
12	0,40	6,60	1100	0,12	7,60	95,86	8.06	0,16	6,14	3,92
11	0,60	6,00	1100	0,12	19,06	95,86	8.06	0,16	9,20	7,15
10	0,60	5,40	1100	0,12	30,64	95,86	8.06	0,16	9,20	12,42
9	0,60	4,80	1100	0,12	42,44	95,86	8.06	0,18	10,35	16,44
8	0,60	4,20	1100	0,12	54,53	95,86	8.06	0,18	10,35	22,66
7	0,60	3,60	1100	0,12	67,00	95,86	8.06	0,19	10,93	28,08
6	0,60	3,00	1100	0,12	79,97	95,86	8.06	0,21	12,08	32,18
5	0,60	2,40	1100	0,12	93,54	95,86	8.06	0,21	12,08	39,81
4	0,60	1,80	1100	0,12	107,84	107,84	8,65	0,21	13,59	43,02
3	0,60	1,20	1100	0,12	123,03	123,03	9,36	0,21	15,50	45,34
2	0,60	0,60	1100	0,12	139,29	139,29	10,09	0,21	17,55	47,56
1	0,60	0,00	1100	0,12	156,82	156,82	10,83	0,20	18,82	52,26

3.2 Dimensionamento da estrutura com solo granular

A análise externa dessa estrutura apresentou um empuxo total de 129,61 kN/m.

Para a capacidade de carga do terreno de fundação correspondente à 3614,40 kPa, o fator

de segurança contra à rupina desse solo vale 19,76.

O comprimento estabelecido para as geogrelhas também foi de 5,60 m, representando 80% da altura do muro. A Tabela 3 apresenta os parâmetros característicos do solo granular.

Tabela 3. Parâmetros do muro com arenoso.

Características do solo de enchimento	
Descrição do solo	areia
Coesão	$C' = 0$
Angulo de atrito	$\Phi' = 39^\circ$
Peso específico	$\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$
Módulo tangente inicial	$K = 450$
Módulo expoente	$n = 0,40$
*O solo de fundação apresenta os mesmo parâmetros do solo de enchimento.	

Na verificação da estabilidade interna, foram realizadas 2 iterações. Para todas as camadas de reforço foram selecionadas geogrelhas de PVA com resistência de 55 Mpa.

A tabela 4 apresenta os resultados do dimensionamento interno, incluindo os índices de segurança que atenderam ao mínimo fator de segurança de 1,5.

Tabela 4. Planilha de cálculo para a segunda iteração da estrutura com solo arenoso.

Camadas de reforço	S_v (m)	Cota (m)	J_r (kN/m)	S_i (kPa)	σ'_z (kPa)	σ'_{zc} (kPa)	β	X	$T_{máx}$ (kN)	F.S
12	0,40	6,60	1100	0,04	9,20	152,10	29,41	0,18	10,95	3,38
11	0,60	6,00	1100	0,04	23,06	152,10	29,41	0,18	16,43	6,06
10	0,60	5,40	1100	0,04	37,03	152,10	29,41	0,18	16,43	10,40
9	0,60	4,80	1100	0,04	51,19	152,10	29,41	0,19	17,34	14,51
8	0,60	4,20	1100	0,04	65,63	152,10	29,41	0,19	17,34	19,68
7	0,60	3,60	1100	0,04	80,43	152,10	29,41	0,19	17,34	25,51
6	0,60	3,00	1100	0,04	95,67	152,10	29,41	0,19	17,34	31,99
5	0,60	2,40	1100	0,04	111,46	152,10	29,41	0,19	17,34	39,19
4	0,60	1,80	1100	0,04	127,90	152,10	29,41	0,19	17,34	47,18
3	0,60	1,20	1100	0,04	145,12	152,10	29,41	0,19	17,34	55,92
2	0,60	0,60	1100	0,04	163,25	163,25	30,26	0,19	18,61	61,24
1	0,60	0,00	1100	0,04	182,46	182,46	31,63	0,18	19,71	67,39

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados foram organizados em três etapas. Na primeira, realizou-se um comparativo do comportamento das tensões atuantes em cada camada de geogrelha inseridas nos maciços com solos arenoso e argiloso.

Na segunda etapa procedeu-se a análise e o

comparativo entre os fatores de segurança estimados em cada camada de material resistente presentes nas duas estruturas calculadas.

Na terceira etapa, a partir dos parâmetros dimensionais adotados e estabelecidos no capítulo 3, elaborou-se graficamente o arranjo final das ECSR dimensionadas.

4.1 Análise das forças máximas de tração

A partir dos valores de $T_{\text{máx}}$ provenientes das camadas de geogrelha que constituem as duas estruturas calculadas, apresentados nas Tabelas 2 e 4, elaborou-se um gráfico comparativo (Figura 2). A análise gráfica possibilitou a elaboração de algumas premissas que relacionam o desempenho do material de reforço quando inseridos em tipos de solo distintos:

- Na estrutura constituída por solo arenoso contendo teores de argila observou-se menores coeficientes de interação solo-geogrelha em relação a ECSR contendo solo granular. Nota-se que pelo fato do solo arenoso apresentar partículas com diâmetros maiores, a interação com a geogrelha é aumentada de maneira tal que o deslocamento necessário para atingir a resistência máxima à tração é diminuído.
- As tensões incidentes nas geogrelhas mostraram-se mais intensas no maciço com solo arenoso, desprovido de argila. Observa-se que a coesão dificulta o processo de dissipação das tensões do solo até as camadas de geogrelha.

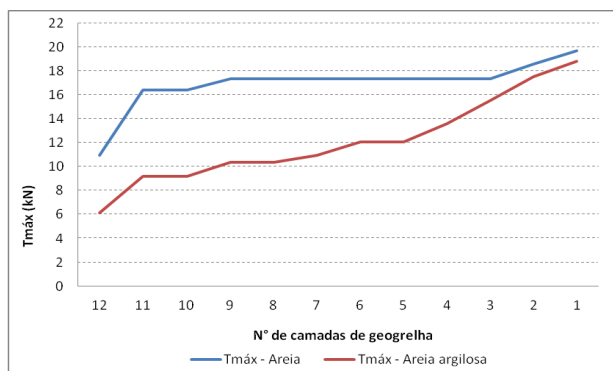


Figura 2. Comparativo das $T_{\text{máx}}$ entre solo granular e solo coesivo.

4.2 Análise dos fatores de segurança

Com base nos níveis de segurança referentes aos dois muros calculados, apresentados nas Tabelas 02 e 04, elaborou-se um gráfico comparativo (Figura 3). A análise do gráfico

permitiu a elaboração de algumas proposições relacionadas a estabilidade estrutural ao arrancamento dos reforços:

- Os fatores de segurança resultantes da interação solo-geogrelha mostraram-se mais eficientes na estrutura composta por solo granular. Observou-se que o nível de segurança ao arrancamento revelou um crescimento constante e em maior parte linear à partir da inserção das camadas de geogrelhas no maciço. Acredita-se que este comportamento pode ser advindo da facilidade do entrelaçamento das partículas de areia com as nervuras presentes nas geogrelhas.
- No muro composto por solo coesivo, os fatores de segurança apresentaram crescimento constante, porém, não linear. Observou-se que as camadas de reforço mais próximas da superfície revelaram maiores índices de estabilidade quando comparadas com o maciço de solo granular. Em contrapartida, nas camadas mais próximas a base, o solo arenoso apresentou melhor desempenho. Pode-se afirmar que este desalinhamento gráfico expresso pelo solo coesivo é consequência da dificuldade de distribuição de tensões do maciço aos reforços. O topo da estrutura apresenta menor concentração de cargas, desta forma o solo fino tenta suportar as cargas dificultando a transferência de tensões para a geogrelha. Já na região próxima a base há uma maior concentração de cargas, onde o solo por si só não consegue resistir as tensões transferindo-as para os reforços.

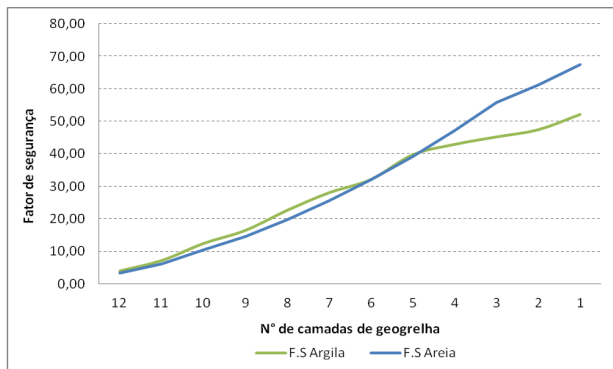


Figura 3. Fatores de segurança referente ao arrancamento dos reforços.

A partir de resultados de ensaios de arrancamento em geogrelhas inseridas em tipos de solo distintos, o trabalho realizado por Chang et. al., (1995) apud Teixeira (2003), revela que as discrepâncias encontradas entre solos granulares em comparação aos solos finos, estão relacionadas, principalmente, ao tamanho dos grãos que preenchem os vazios das geogrelhas.

4.3 Arranjo final das ECSR

Com base nos resultados apresentados no capítulo 3, elaborou-se graficamente a configuração final dos muros dimensionados. As ferramentas utilizadas foram os softwares ForTerra 2 e AutoCAD 2016.

A Figura 4 ilustra a seção transversal que representa as características das ECSR dimensionadas, onde, são apresentadas a distribuição das camadas de reforços, dos blocos articulados e do sistema de drenagem.

As doze camadas de geogrelhas foram instaladas com espaçamento vertical constante de 60 cm. Para possibilitar a correta ancoragem foram dimensionadas e aplicadas geogrelhas com resistência a tração de 35 kN/m e 55 kN/m, apresentando comprimento constante de 5,60m.

As geogrelhas foram posicionadas de modo a obter dupla camada na região da face com 1,0 metro de comprimento. Segundo Brugger et. al. (2005, p.4) "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".

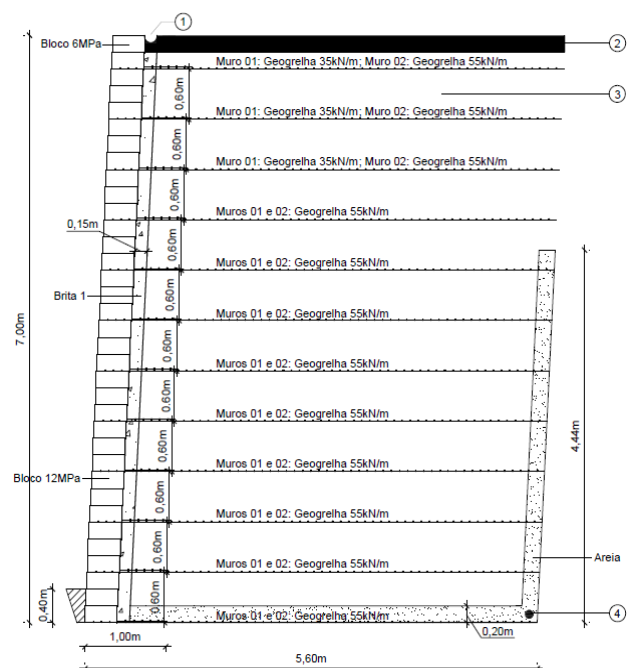
Em decorrência da altura das estruturas e das

cargas incidentes nos blocos de concreto, optou-se por utilizar blocos segmentais com resistências variadas. Na parte superior dos muros foram empregados blocos com resistência à compressão de 6 MPa. Na parte inferior utilizou-se blocos com resistência de 12 MPa.

As estruturas foram posicionadas sobre o solo de fundação devidamente compactado e embutidas a uma profundidade de 40 cm que corresponde a altura de dois blocos, proporcionando o aumento da capacidade de carga do solo de embasamento.

Para compor o sistema de drenagem dos muros foram aplicados uma camada de brita do tipo 1 junto ao paramento com espessura de 15 cm e dois colchões drenantes de solo arenoso situados na base e no tardo, com espessura de 20 cm. Estas camadas impedem a inserção de águas freáticas.

Para evitar a entrada de águas externas no interior da estrutura, aplicou-se uma camada de solo argiloso compactado apresentando 20 cm de altura.



- ① Canaleta de concreto simples, d = 30 cm (direcionar águas pluviais)
 - ② Camada de argila compactada
 - ③ Aterro compactado em camadas de 0,20m, 100% do proctor normal
 - ④ Tubo dreno Pead flexível diam. 100mm (prever saída nos pontos mais baixos)
- * Muro 01 (Estrutura com solo coesivo) e Muro 02 (Estrutura com solo arenoso).

Figura 4. Seção transversal típica dos muros dimensionados.

5 CONCLUSÕES

O dimensionamento das estruturas possibilitou a avaliação do comportamento das geogrelhas inseridas em solos com propriedades intrínsecas.

Os resultados obtidos nas análises dos fatores de segurança e das tensões máximas resistentes características da interação solo-reforço mostraram que o solo granular promoveu um melhor entrosamento com o material de reforço quando comparado com o solo coesivo. Observa-se que o tamanho dos grãos e a coesão são características altamente influentes no tocante a distribuição de forças do solo para as geogrelhas e nos índices de segurança das ECSR.

Apesar de se tratar de uma técnica recente no mercado, as estruturas de contenção reforçadas por geogrelhas e blocos segmentais apresentam grandes vantagens em relação a estruturas convencionais. Pode-se considerar que esta é uma solução simplificada, rápida, econômica, segura, sustentável e esteticamente agradável.

REFERÊNCIAS

- BRUGGER, P. J.; SILVA, A. E.; RODRIGUES, V. J.; SARAMAGO, R. P. *Muro em Solo Reforçado com Geogrelhas e Blocos Segmentais – Um Caso de Obra com Altura de 13,50 metros*. Salvador BA, 2005.
- EHRlich, Maurício. *Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução*/ Maurício Ehrlich, Leonardo Becker - São Paulo: Oficina de Textos, 2009. - (Coleção Huesker: Engenharia com geossintéticos).
- TEIXEIRA, S. H. C. (2003). Estudo da Interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados. São Carlos, 2003.
- VERTEMATTI, J. C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*/ José Carlos Vertematti. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 2004.