

Avaliação dos Custos Construtivos de Estruturas de Contenção no Município De Natal/RN

Rafael Gaspar Pessoa
UFRN, Natal, Brasil, rafaelpessoaeng@yahoo.com

Vanessa Milena Mendes dos Santos
UnP, Natal, Brasil, vanessamilena3@hotmail.com

Wesley Eunathan Fernandes Lima
UnP, Natal, Brasil, eunathanlima@hotmail.com

Aretuza de Oliveira Almeida
UnP, Natal, Brasil, aretuza-almeida@hotmail.com

Halysson Henrique de Araújo
UnP, Natal, Brasil, halyaraujohenri@gmail.com

Daniela Maria Arruda Rocha
UnP, Natal, Brasil, danielaarruda.rocha@gmail.com

Jemima Tabita Ferreira de Sousa
UnP, Natal, Brasil, jemima_tenorio@hotmail.com

Fagner Alexandre Nunes de França
UFRN, Natal, Brasil, fagneranfranca@gmail.com

RESUMO: Devido ao crescimento imobiliário e ao relevo acidentado, comumente necessita-se de estruturas de contenções em obras de edificações em regiões metropolitana, como Natal/RN. Portanto, este artigo apresenta um estudo para avaliação dos sistemas de contenção em situação de aterro para estabilização do solo em comparação a três técnicas amplamente empregadas: muro de gravidade, terra armada e solo reforçado por geossintético. O artigo apresenta o custo de construção das referidas estruturas, em alturas de 5 m e 10 m, com a consideração de todas as etapas construtivas corriqueiras à prática atual. Foram determinadas as propriedades geotécnicas de um solo típico da região, que seria empregado como material de preenchimento nas referidas estruturas de contenção. As informações foram coletadas por meio de busca na literatura e da consulta a sondagens realizadas em Natal/RN. Elaborou-se um orçamento detalhado para cada técnica construtiva, com levantamento de quantitativos e preço de insumos e encargos para a execução dessas estruturas. Assim, apresenta-se a variação do custo por área unitária de face, para cada técnica, em função da altura do paramento. Os resultados permitem concluir que terra armada é a solução menos onerosa para região metropolitana de Natal/RN e também para outras regiões com parâmetros geotécnicos similares.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas de contenção em aterro, Muro de gravidade, Solo reforçado com geossintéticos, Terra armada.

1 INTRODUÇÃO

Para a escolha da estrutura de contenção mais adequada a ser executada em uma determinada situação é fundamental avaliar as características do meio físico local e vencer situações em processo de instabilização percebidos em encosta, em corte ou em aterro. Ehrlich e Becker (2009) afirmam que estruturas de contenção são elementos indispensáveis de uma grande variedade de obras e projetos de engenharia, como pontes, rodovias, e prédios em geral, entre outros. Sua função é, basicamente, suportar um empuxo de terra, conferindo segurança a um talude e permitindo o uso do espaço à sua frente ou do seu terrapleno superior.

A execução de uma estrutura de contenção envolve a avaliação de vários fatores, entre eles, o ônus financeiro, significativo para a realização de um empreendimento em área de encostas. Diante disso, ressalta-se a importância de se desenvolver um projeto considerando diferentes opções de estruturas de contenção de forma a atender a segurança necessária ao empreendimento com os menores custos envolvidos.

Em virtude disto e da escassez de trabalhos desenvolvidos na literatura especializada, o presente artigo tem por objetivo comparar, sob a perspectiva técnica e econômica, três alternativas construtivas adotadas em solo arenoso típico do município de Natal/RN: muro de gravidade, solo reforçado por geossintético e terra armada. Os parâmetros do solo, as dimensões da obra hipotética, as especificações de projeto e os cálculos efetuados são expostos ao longo dos itens no progredir do artigo.

2 EXECUÇÃO DE PROJETO

Para que fosse possível o comparativo econômico entre as técnicas de contenção, alguns detalhes precisaram ser padronizados. Os projetos foram dimensionados para as mesmas condições de solo de empréstimo, de fundação e de pós compactação. Foi admitido um comprimento de compactação (distância da face do muro até o final da faixa compactada) igual a

10 m para todos os muros, bem como foi adotado para todos os projetos uma ficha de altura igual a 10% da altura total dos muros e considerou-se não existir carregamento externo sobre os maciços de solo.

2.1 Caracterização do Solo

O primeiro passo para elaboração dos projetos de contenção foi a definição de um padrão de solo que se assemelhasse com o que tipicamente se observa nas sondagens feitas na cidade. Por se tratarem de contenções em aterro, foi preciso definir as características do solo de empréstimo, do solo de fundação e do solo pós compactação. Como o trabalho é de cunho comparativo, foram estabelecidas exatamente as mesmas especificações de solo para todas as técnicas de contenção estudadas.

Tendo em vista a pouca variabilidade das características granulométricas do solo de Natal/RN, foi definido como padrão para o solo de empréstimo, o solo coletado no campus da UFRN e estudado por Fontoura (2015). A Tabela 1 apresenta os índices físicos adotados para o solo de empréstimo. Para o solo de fundação buscou-se adotar valores de resistência conservadores, uma vez que existe uma certa variabilidade, nas sondagens analisadas, para os valores de N_{spt} das primeiras camadas de solo. Os valores adotados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 1. Dados do solo de empréstimo Fontoura (2015).

Massa específica dos sólidos (ρ_s)	2,62 g/cm ³
Coeficiente de uniformidade (C_u)	1,861
Coeficiente de curvatura (C_c)	0,971
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,153 mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,25 mm
Índice de vazios mínimo	0,59
Índice de vazios máximo	0,8

Tabela 2. Propriedades geotécnicas consideradas para o solo de fundação (Fontoura, 2015).

N_{spt}	2
Ângulo de atrito (ϕ)	28
γ (kN/m ³)	16

As características do solo compactado foram

definidas a partir da determinação da densidade relativa (D_r) de 95% e seu correspondente ângulo de atrito (ϕ) extraído do ensaio de compressão triaxial (Fontoura, 2015). Então, foram calculados os outros parâmetros através da correlação dos índices físicos. A Tabela 3 apresenta as características adotadas para o solo compactado.

Tabela 3. Propriedades geotécnicas consideradas para o solo compactado (Fontoura, 2015).

Densidade relativa (D_r)	0,95
Índice de vazios (e)	0,60
Ângulo de atrito (ϕ)	34°
Peso específico dos sólidos (γ_s)	26,2 kN/m ³
Peso específico seco (γ_d)	16,4 kN/m ³
Coeficiente de empuxo ativo (K_a)	0,28

2.2 Métodos de Dimensionamento Utilizados

Para execução de um projeto de contenção com inclusões, o engenheiro deve avaliar a estabilidade interna e externa da estrutura. A avaliação de estabilidade externa é feita por meio das verificações clássicas: ao deslizamento, ao tombamento, resistência do solo de fundação e estabilidade global. No que diz respeito estabilidade interna, cada técnica de contenção possui um método próprio de verificação que será identificado mais adiante neste artigo. A Tabela 4 apresenta os fatores de segurança mínimos obtidos para cada tipo de estrutura em relação à estabilidade externa da obra.

Tabela 4. Fatores de segurança mínimos para estabilidade externa de cada tipo de estrutura analisada.

FS	Desl.	Tomb.	Fund.	E.G.
Muro de gravidade (5m)	1,67	3,65	2,51	1,74
Muro de gravidade (10m)	2,05	3,68	2,51	1,68
Terra armada (5m)	2,33	4,06	3,92	1,73
Terra armada (10m)	2,05	3,16	3,02	1,73
Solo reforçado (5m)	3,00	6,80	4,86	1,86
Solo reforçado (10m)	2,63	5,20	2,67	1,72
Fator de Segurança mínimo	$\geq 1,5$	$\geq 2,0$	$\geq 2,5$	$\geq 1,5$

FS: Fator de segurança; Desl.: Deslizamento; Tomb.: Tombamento; Fund.: Capacidade de carga do solo de

fundação; E.G.: Estabilidade Global.

2.2.1 Muro de Gravidade

O muro de gravidade tem como princípio básico a estabilização de um aterro através do seu peso próprio que impede o tombamento e deslizamento do muro. Exatamente por isso, ele precisa de uma estrutura robusta e bastante pesada, o que dispensa o projetista de fazer qualquer tipo de verificação de estabilidade interna da estrutura do muro.

O dimensionamento do muro foi feito segundo Marchetti (2007), quanto ao formato de pré-dimensionamento, para depois fazer as verificações de estabilidade externa e adequar as medidas. O muro é de concreto ciclópico, com concreto simples ($f_{ck}=20\text{Mpa}$). As Figuras 1 e 2 apresentam a seção em corte de cada projeto de muro de gravidade, com alturas de 5 m e 10 m, respectivamente.



Figura 1. Corte transversal do muro de gravidade, 5 m.

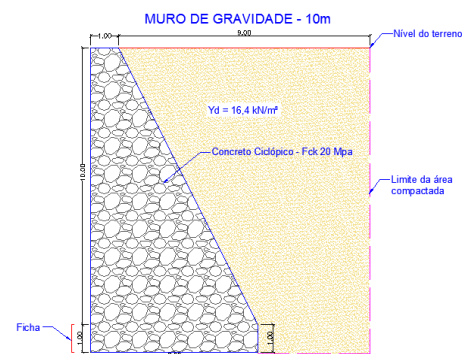


Figura 2. Corte transversal do muro de gravidade, 10 m.

2.2.2 Terra Armada

O muro de contenção em terra armada é uma estrutura de aterro compactado, reforçado com armaduras metálicas que interagem com o solo através do atrito solo-armadura. Essa interação, juntamente a um paramento flexível executado

em concreto armado, promovem a estabilização do talude vertical.

O projeto da terra armada foi executado seguindo-se todas as recomendações da norma NBR9286/86. A vida útil adotada foi a partir de 30 anos e a obra se enquadra na característica de não inundável. As armaduras utilizadas são fitas metálicas nervuradas com tensão de escoamento (f_y) igual a 250.000 kN/m², zincadas de acordo com o que determina a norma NBR 6323. A vida útil mínima adotada foi de 70 anos. O paramento é composto por “escamas” de concreto armado que são montadas a medida que o aterro é executado e as fitas vão sendo colocadas.

Para garantir a estabilidade interna precisou-se verificar a ruptura das fitas na seção de tração máxima e na seção de fixação da armadura ao paramento, tendo em vista a redução de seção devido ao furo do parafuso. Além disso, também foi verificado a aderência das armaduras ao solo. A força de tração máxima ($T_{máx}$) na armadura para cada nível de reforço é dada por:

$$T_{máx} = (S_v \times \sigma_h) / (1/S_h) \quad (1)$$

S_v = espaçamento vertical entre reforços.

S_h = espaçamento horizontal entre reforços.

σ_h = tensão geostática horizontal.

O coeficiente de atrito aparente (f^*) para aterros compactados cuja a granulometria atenda aos critérios definidos para os tipos A e B (Tabela 1 – NBR9286) é dado por:

$$f^* = f_0 * (10 z/6) + \text{tg}\Phi, \text{ para } z < 6\text{m} \quad (2)$$

$$f^* = \text{tg}\Phi, \text{ para } z \geq 6\text{m} \quad (3)$$

Φ = ângulo de atrito.

$$f_0^* = 1,2 + \log_{10} C_u \quad (4)$$

Z = profundidade

C_u = Coeficiente de uniformidade

Força limite de tração, resistida na seção plena da armadura (T_{r1}):

$$T_{r1} = 1/\gamma_r \times T_r \times (e_c/e_n) \geq T_{máx} \quad (5)$$

Força limite de tração, resistida na seção do furo onde a fita será parafusada na escama de concreto (T_{r2}):

$$T_{r2} = 1/\gamma_r \times T_r \times b'/b \times e_c/e_n \geq \alpha \cdot T_{máx} \quad (6)$$

γ_r = coeficiente de segurança ($\gamma_r = 1,5$).

T_r = carga de escoamento da armadura.

$$T_r = f_y \times e_o \times b \quad (7)$$

e_c = espessura de cálculo.

e_n = espessura nominal.

b = largura nominal da armadura.

b' = largura reduzida pelo furo.

$\alpha = 0,85$ (para paramento em escamas típicas de concreto).

Força limite de tração na zona de aderência, que confere resistência ao arrancamento da fita (T_f):

$$T_f = (2 \times b \times f^*) / \gamma_f \times \sigma_v(z) \times L_a(z) > T_{máx} \quad (8)$$

γ_f = coeficiente de segurança ($\gamma_f = 1,5$).

f^* = coeficiente de atrito aparente de cálculo.

$\sigma_v(z)$ = tensão vertical na profundidade z .

$L_a(z)$ = comprimento de aderência na profundidade z .

b = largura nominal da armadura.

As Figuras 3 e 4 apresentam os perfis de cada projeto de terra armada dimensionado para o solo da cidade de Natal/RN.



Figura 3. Corte transversal da estrutura de contenção em terra armada, 5 m.

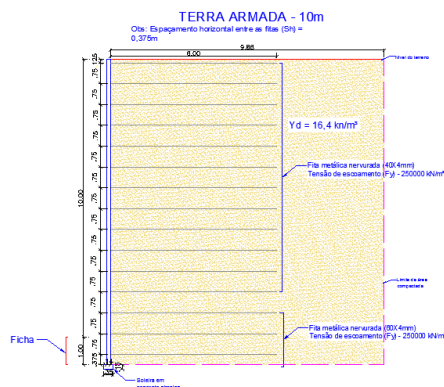


Figura 4. Corte transversal da estrutura de contenção em terra armada, 10 m.

2.2.3 Solo Reforçado com Geossintético

Essa técnica segue o mesmo princípio da terra armada, tendo em vista que também adiciona resistência a um talude íngreme através da inclusão de reforços em camadas, a medida que se executa o aterro compactado. A diferença está nos materiais utilizados e nos métodos de dimensionamento. Para o solo reforçado com geossintético, pode-se utilizar materiais como geotêxtil tecido, geotêxtil não tecido ou geogrelhas. A utilização de geogrelhas é mais comum, principalmente para contenção de grandes alturas.

Neste projeto foi feito a escolha por uma geogrelha de poliéster como reforço e blocos pré-moldados intertravados para a proteção da face do talude. Existem diversas combinações de materiais e soluções possíveis, mas esta é bastante comum na prática atual e, por isso, foi escolhida.

O método de dimensionamento utilizado estabelecido por Ehrlich e Mitchell (1994). Trata-se de uma metodologia que considera fatores como o equipamento de compactação, superfície de ruptura, fatores de segurança para danos de instalação (F_d), degradação do meio (F_a), fluência (F_f), coeficiente de aderência (F_a) e fator de escala (α).

Para a análise da estabilidade interna os reforços devem ser definidos de forma a evitar a ruptura por tração ou arrancamento da zona resistente. No caso em questão foi definido que a compactação das duas camadas mais altas de cada muro serão executadas manualmente, pois o uso de um equipamento de compactação iria

implicar num aumento exagerado no comprimento das geogrelhas nessas camadas para que pudessem resistir aos esforços de arrancamento. Apresenta-se, a seguir, os passos tomados para o dimensionamento das estruturas em solo reforçado com geogrelhas.

(a) Determinar a tensão vertical induzida pela compactação.

$$\sigma'_{zc,i} = (1 - \nu_0) \times (1 + k_a) \times \sqrt{\frac{\gamma' \times Q \times N_\gamma}{2 \times L}} \quad (9)$$

$$\nu_0 = \frac{k_0}{1 + k_0} \quad (10)$$

$$k_0 = 1 - \sin \phi \quad (11)$$

$$N_\gamma = \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \times \left[\tan^4 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

$$k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (13)$$

(b) Determinar a tensão vertical geostática no nível do reforço (σ'_z).

$$\sigma'_z = \frac{\gamma' \times z}{1 - \left(\frac{k_a}{3} \right) \times \left(\frac{z}{L_r} \right)^2} \quad (14)$$

(c) Determinar β .

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sigma'_{zc}}{P_a} \right)^n}{S_i} \quad (15)$$

$$S_i = \frac{J_r}{k \times P_a \times S_v} \quad (16)$$

P_a = pressão atmosférica (101,3).

n = módulo expoente (tab 2.1 – Ehrlich Becker).

k = módulo tangente inicial.

S_v = espaçamento vertical entre reforços.

σ'_{zc} = maior valor entre σ'_z e $\sigma'_{zc,i}$.

J_r = módulo de rigidez.

(d) Determinar o $T_{\text{máx}}$.

A força de tração máxima ($T_{\text{máx}}$) é determinada para cada nível de reforço, considerando os valores de β e, a partir dos ábacos das figuras A5, A6 e A7 do anexo (Dantas; Ehrlich, 1999). O processo é iterativo, pois $T_{\text{máx}}$ também é função de J_r (módulo de rigidez), que por sua vez depende do reforço que será adotado.

(e) Resistência de cálculo do reforço (T_d).

$$v_0 = \frac{T_{\text{máx}}/F_f}{F_d \times F_a} \geq FS \times T_{\text{máx}} \quad (17)$$

(f) Estabilidade ao arrancamento.

(f.1) Comprimento de embutimento (L_e).

$$L_e = L_r - (H - Z) \times \left[\tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) - \frac{1}{\tan\omega} \right] \quad (18)$$

L_r = comprimento do reforço.

H = altura do muro.

Z = profundidade do reforço.

Φ = ângulo de atrito.

ω = inclinação da face do muro.

(f.2) Resistência ao arrancamento (P_r).

$$Pr = 2 \times F^* \times \alpha \times \sigma'_v \times L_e \geq FS \times T_{\text{máx}} \quad (19)$$

$$F^* = f_a \times \tan\phi \quad (20)$$

α = fator de escala.

f_a = coeficiente de aderência.

σ'_v = tensão geostática vertical.

L_e = comprimento de embutimento.

$FS \geq 1,5$.

Os cortes transversais das estruturas de solo reforçado com geossintéticos com 5 m e 10 m de altura são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente, para o solo da cidade de Natal/RN.



Figura 5. Corte transversal do solo reforçado com geossintético, 5 m.

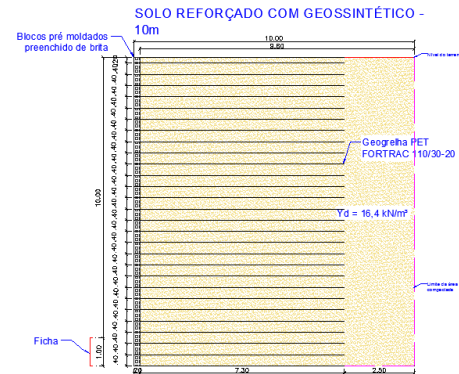


Figura 6. Corte transversal do solo reforçado com geossintético, 10 m.

3 CÁLCULO DE CUSTOS PARA CONSTRUÇÃO DOS MUROS

A estimativa dos custos de execução dos muros projetados em duas alturas diferentes foi feita com base nas composições de custos extraídas do Sistema de Custos Rodoviários (Sicro 2), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO). O preço dos insumos foram também pesquisados no mercado local.

Para a composição dos custos do muro de gravidade, os seguintes aspectos foram considerados:

- Fôrma de chapa compensada para estruturas em geral, resinada, com espessura de 12 mm;
- Concreto estrutural fck 20 Mpa para execução do muro;
- Transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto;
- Escavação e reaterro;
- Compactação de aterros;
- Mão de obra.

Para a composição de custos para a construção do muro em terra armada, os seguintes aspectos foram considerados:

- Execução da face do muro com escamas de concreto pré-moldado com dimensões de 1,50 x 1,50 m;
- Inclusão de fitas metálicas;
- Concreto estrutural fck 15 Mpa para execução da soleira e aremates; Transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto;
- Escavação e reaterro;
- Compactação de aterros;
- Montagem do maciço.

Para a composição dos custos dos muros de solo reforçado com geogrelha os seguintes aspectos foram contemplados:

- Inclusões de geogrelha e instalação do material;
- Execução do muro de bloco com enchimento de brita;
- Escavação e reaterro;
- Compactação de aterros;
- Mão de obra.

Ressalta-se que na elaboração dos custos não foi contemplado o serviço de acompanhamento topográfico por se tratar de um serviço de igual valor para os três tipos de estruturas de contenção avaliado e pela dificuldade em se estimar o custo deste serviço por metro quadrado de face executada.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A comparação entre custos de muros de gravidade, terra armada e solo reforçado com geogrelha é apresentada na Figura 7.

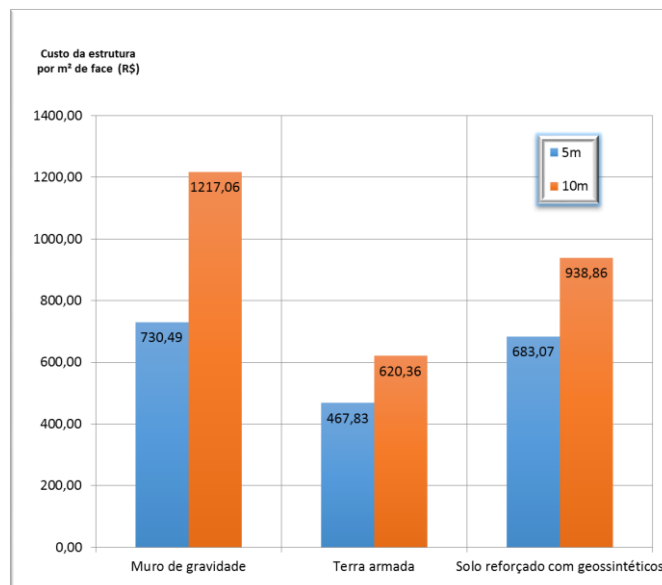


Figura 7. Gráfico comparativo de custos entre técnicas de contenção avaliadas.

Mostra-se, claramente, que a solução em terra armada apresentou o menor custo para as alturas consideradas. A solução em solo reforçado com geogrelha também se mostrou muito competitiva em termos econômicos, sendo a segunda solução de menor custo, também para as duas alturas estudadas. Em terceiro lugar na classificação de custos, a técnica mais onerosa foi o muro de gravidade.

A Tabela 5 mostra também que as soluções em solo reforçado e terra armada apresentaram um menor aumento nos custos com o aumento das alturas, se comparado a solução em muro de gravidade.

De forma geral, pode-se afirmar que, para as alturas de contenção estudadas, o custo do muro de gravidade em concreto ciclópico se torna maior em comparação com as técnicas de solo reforçado. Tendo em vista que para estas alturas a estrutura do muro precisa ser muito robusta e consequentemente onerosa.

É pertinente salientar que o método utilizado para o dimensionamento das estruturas em solo reforçado com geossintéticos levou a valores ligeiramente conservadores. Isso é percebido pelo comprimento do reforço da ordem de 73% a 82% da altura da contenção. A literatura indica que valores entre 65% e 70% seriam suficientes para uma contenção desse porte, com terraplenos horizontais e sem a consideração de sobrecargas. Contudo, optou-se

por empregar esse método por se tratar de uma referência amplamente conhecida no meio técnico e por sua disponibilidade em referências de fácil acesso.

Etapas seguintes deste estudo incluem a elaboração de projetos de estruturas de contenção com alturas diferentes, entre 2 e 10 m, a inclusão da técnica de muro de flexão, e a elaboração de projetos de solo reforçado com geossintéticos dimensionados por outros métodos clássicos.

5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um comparativo de custos construtivos para a execução de três tipos de estruturas de contenção (muro de gravidade, terra armada e solo reforçado com geossintéticos) para uma obra fictícia no município de Natal/RN. Diante do exposto nos itens anteriores, as conclusões a seguir podem ser estabelecidas.

- Para as condições de solo consideradas e os desníveis testados, a solução em terra armada apresentou o menor custo perante as outras soluções para as duas alturas de contenção avaliadas (5 e 10 m);
- A solução em solo reforçado com geogrelha, apesar não ser a mais econômica, se mostrou bastante competitiva em relação a terra armada;
- A tendência de crescimento dos gráficos sugerem que as estruturas de solo reforçado (terra armada e solo reforçado com geossintéticos) são economicamente mais competitivas a medida em que se aumenta os desníveis de contenção;
- O comportamento dos gráficos também sugere que entre as alturas de 5 e 10 m a ordem de classificação das técnicas quanto ao custo continue a mesma.
- Os custos envolvidos na construção de muros de gravidade possuem um aumento mais expressivo quando maiores alturas de contenção são necessárias.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos as empresas colaboradoras no fornecimento de preços: A. Gaspar S/A, Queiroz Oliveira LTDA, JPMAQ Locações LTDA e HUESKER, ao PET de Engenharia Civil e Arquitetura da UnP, ao DNIT/RN (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte), por fornecer dados para o orçamento, a construtora Mendonça Júnior LTDA, por fornecer diversas sondagens e a todos os profissionais que deram suas sugestões e contribuições.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1983). *NBR 9286/86: Terra Armada – Especificação*. Rio de Janeiro.
- Becker, L. B., Ehrlich, M. (2009). *Muros e Taludes de Solo Reforçado – Projeto e Execução*, 1st ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Catalini, G.; Ricardo, H. S. (2007). *Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de Rocha*, 3rd ed. São Paulo: Pini.
- DNIT. (2015). *Sistema de Custos Rodoviários – Atividades Auxiliares – SICRO2 – Custos Unitário de Referência*. Rio Grande do Norte.
- Fontoura, T. B. (2015). *Comportamento tensão – deformação e resistência ao cisalhamento de uma areia de duna cimentada artificialmente, trabalho de conclusão de curso*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/ Rio Grande do Norte.
- Marchetti, O. (2008). *Muros de Arrimo*, 1st ed. São Paulo: Blucher.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*, 3rd ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- TCPO 13 (2010). *Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos*. São Paulo: Pini.