

# Métodos de Análise de Esforços de Estruturas de CONTENÇÃO de Solos Reforçados.

Rogério Gonçalves Sarmento Junior  
UFES, Vitória, Brasil, rogeriosarmentojunior@gmail.com

Isis Cler Depolli  
UFES, Vitória, Brasil, isiscler@gmail.com

Bruno Teixeira Dantas  
UFES, Vitória, Brasil, dantas.bd@gmail.com

Carla Baraqui da Costa  
UFES, Vitória, Brasil, carlabdc@hotmail.com

**RESUMO:** Neste projeto, desenvolveu-se comparações entre quatro métodos de dimensionamento de Estruturas de CONTENÇÃO de Solos Reforçados (ECSR) publicados a partir do ano 2000. Estes são apresentados em forma de tabela e então discutidos. Também foi dimensionado para cada um dos métodos um mesmo caso base, que consiste em um muro de contenção de face vertical, o que possibilitou uma discussão a respeito do quanto os resultados se diferem de acordo com a metodologia empregada no dimensionamento. No trabalho existe ainda uma análise da influência das características do solo, coesão e ângulo de atrito, para cada metodologia.

**PALAVRAS-CHAVE:** ECSR; Métodos de cálculo; Comparações entre métodos.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Peralta (2007) a ideia de associar elementos de reforço a obras civis sempre acompanhou a história da humanidade. No início havia a constante utilização de materiais vegetais fibrosos para reforçar desde estradas persas e romanas até em grandes obras como a Muralha da China.

No contexto moderno, as estruturas de contenção de solo reforçado começaram a ser desenvolvidas durante a década de 1960. O sistema “terra armada”, inventado pelo arquiteto francês Henry Vidal em 1966, é um exemplo deste tipo de estrutura, conforme Schlosser e Thanh (1974). Segundo Jewell (1991), a “terra armada” consistia no conjunto formado por tiras metálicas, solo granular e uma face composta de painéis de concreto de pequena espessura. A técnica demonstrou ser econômica e de fácil

dimensionamento e execução, o que atraiu o interesse tanto comercial como acadêmico.

Além da agilidade com redução dos prazos e da facilidade de execução do projeto, o solo armado apresenta-se como uma boa alternativa para solucionar o problema de aterros com grandes alturas.

A técnica de solo reforçado tem um custo menor se comparado com outras formas de contenção de talude. Segundo Elias, Christopher e Berg (2001) a diferença de preço a favor da utilização desta técnica tende a aumentar proporcionalmente ao aumento da altura da estrutura.

## 2 ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO REFORÇADO - ECSR

### 2.1 Estabilidade de ECSR

A técnica de solo reforçado consiste na divisão do talude, ou muro, em camadas de solo sobrepostas intercaladas por reforços. Devido à forma como ocorre a distribuição de esforços na estrutura, a massa de solo reforçada tende a dividir-se em duas regiões chamadas de zona ativa e zona resistente. Estas zonas estão separadas por uma superfície de ruptura.

A chamada zona ativa compreende aquela parte do maciço que recebe diretamente os esforços e os transfere através dos reforços para a zona resistente que sustenta toda a estrutura.

Como a superfície de ruptura é a interface de divisão dessas massas de solo é nela que estão as maiores tensões de tração, pois enquanto a zona ativa tende a se deslocar afastando-se do terreno, a zona resistente trabalha mantendo-a fixa e indissociável, garantindo a estabilidade. O comprimento dos reforços utilizados na estrutura deve ser suficiente para promover a ancoragem da zona ativa na zona resistente. A transmissão dos esforços para os reforços se dá por meio do atrito que surge na interface de contato solo-reforço. O somatório desse atrito ao longo do reforço da zona ativa até a superfície de ruptura é utilizado para o dimensionamento da ECSR.

A maior parte dos métodos de dimensionamento baseia-se nos conceitos de equilíbrio da força na iminência de ruptura da estrutura para dimensioná-la. Estes são os chamados métodos de estado de equilíbrio limite. Existem ainda aqueles que dimensionam a estrutura para a condição de trabalho usual durante sua vida útil, baseando-se nas deformações da estrutura para estimar suas solicitações. Esses são os chamados métodos de dimensionamento sob condição de trabalho.

Nestas duas hipóteses, a força de atrito gerada na zona resistente tem sentido oposto daquela gerada na zona ativa, como ilustrado na Figura 1. Estas solicitações trabalhando em sentidos opostos sobre a mesma folha/tira de reforço o coloca sob tração.

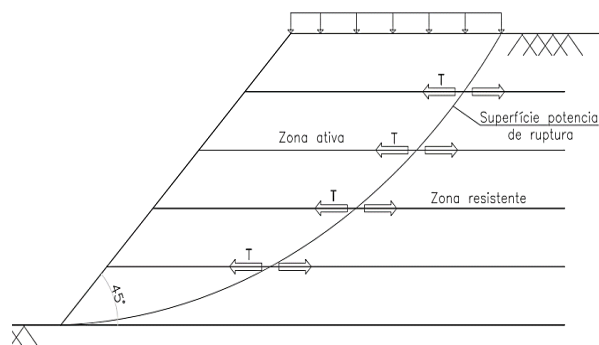


Figura 1. Zona resistente e zona ativa da ECSR

### 3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

As Tabelas 1 e 2 apresentam um resumo das características principais dos métodos de dimensionamentos de ECSR que são apresentados nesse artigo.

Tabela 1. Resumo dos métodos de dimensionamento.

| Pesquisadores                                                | Local de origem do método | Superfície de ruptura                          | Base dos métodos                            |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>FHWA (2010)</b>                                           | USA                       | Linear (extensível)<br>Bilinear (inextensível) | Equilíbrio limite, com fatores de segurança |
| <b>Bathurst, Y. Miyata, A. Nernheim, A. M. Allen, (2008)</b> | Canadá                    | Trapezoidal                                    | Condição de serviço                         |
| <b>Huabei et al. (2014)</b>                                  | China                     | Hiperbólico                                    | Método analítico. Condição de serviço       |
| <b>Dantas e Ehrlich (2000)</b>                               | Brasil                    | Bilinear                                       | Condição de Serviço                         |

Tabela 2. Resumo dos métodos de dimensionamento.

| Método                  | Efeito da compactação | Interface solo-reforço              | Tipo de solo       | Inclinação do talude |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------|
| FHWA (2010)             | Sim                   | Sim (atrito ou resistência passiva) | Solo Granular      | w=90                 |
| K-stffness (2008)       | Sim (implícito)       | Não especificado                    | Coesivo e granular | Qualquer inclinação  |
| Huabei et al. (2014)    | Sim                   | Não especificado                    | Coesivo e granular | w=90                 |
| Dantas e Ehrlich (2000) | Sim                   | Sim                                 | Coesivo e granular | Qualquer inclinação  |

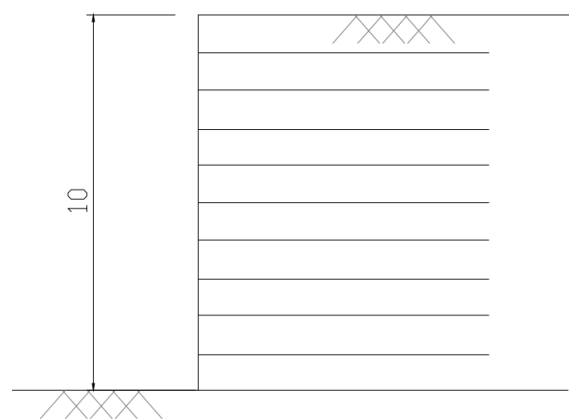


Figura 1. Caso base.

Tabela 3. Dados do caso base. Solo/Reforço

| Solo            |     |                   | Reforço tipo Geogrelhas |      |      | Geometria      |    |   |
|-----------------|-----|-------------------|-------------------------|------|------|----------------|----|---|
| $\gamma$        | 20  | kN/m <sup>3</sup> | J                       | 800  | kN/m | W              | 90 | ° |
| $\phi$          | 30  | °                 | R <sub>t</sub>          | 46   | kN/m | H              | 10 | m |
| C               | 0   | Kpa               | L                       | 8    | m    | S <sub>v</sub> | 1  | m |
| K               | 45  | -                 | T <sub>ult</sub>        | 46   | kN/m | S <sub>h</sub> | 1  | m |
| k <sub>ur</sub> | 67  | -                 | T <sub>al</sub>         | 16,8 | kN/m | B              | 8  | m |
| n               | 0,5 | -                 |                         |      |      |                |    |   |

| Compactação – Rolo Dynapac – CA25 |     |    |
|-----------------------------------|-----|----|
| Q                                 | 160 | kN |
| Lr                                | 2,1 | m  |

## 4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS APRESENTADOS

### 4.1 Apresentação do caso base

A figura 1 ilustra a configuração de um muro de solo reforçado que será utilizado como exemplo para a análise comparativa entre os métodos apresentados nas tabelas 1 e 2. Trata-se de um muro com terrapleno vertical que será calculado para o caso de reforços geossintéticos, do tipo geogrelha.

Considerou-se que o material utilizado têm peso específico de 20 kN/m<sup>3</sup> e ângulo de atrito de 30°. As características da estrutura e da geogrelhas são apresentados na Tabela 3.

### 4.2 Resultados

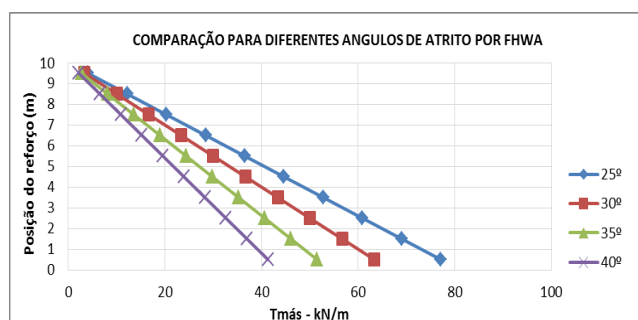


Figura 3. FHWA (2010) com diferentes Ângulos de atrito.

A figura 3, apresenta os resultados da aplicação do método proposto pela FHWA (2010), para diferentes ângulos de atrito, como esperado, o aumento do ângulo de atrito do solo reduz a solicitação no reforço, pois a estrutura torna-se mais resistente e tende a solicitar menos o reforço que o compõe. Este método não leva em consideração diretamente em seus cálculos os efeitos da coesão no solo e aqueles provenientes

do processo de compactação na estrutura.

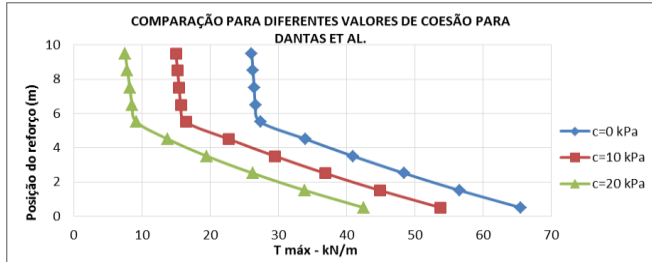


Figura 4. Dantas et. al. (2000) com diferentes Coesões.

Na figura 4 são apresentadas as curvas de tração máxima nos reforços para diferentes coesões usando o método proposto por Dantas et. al. (2000), é perceptível que a mudança dos valores da coesão não influencia a cota de profundidade a qual a compactação exerce influência nos valores de resistência. Isto se deve ao fato de que a coesão não exerce influência nem sobre o esforço de compactação nem sobre a tensão vertical. Ainda com relação à coesão, sabe-se que solos mais coesivos apresentam resistência ao cisalhamento superior à aqueles menos coesivos, ou seja, quanto maior a coesão no solo menor a solicitação no reforço, pois trata-se de um solo mais resistente.

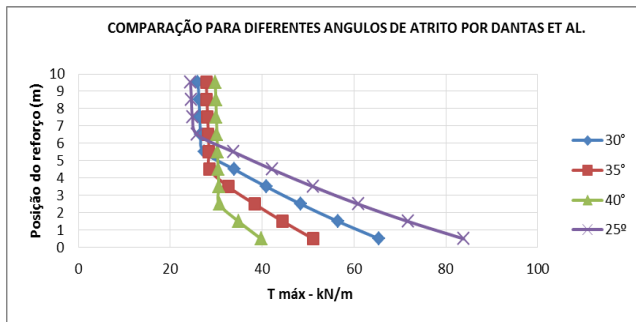


Figura 5. Dantas et. al. (2000) com diferentes Ângulos de atrito.

Com relação ao ângulo de atrito, a variação desse valor no método proposto por Dantas e Ehrlich (2000), permite concluir que a cota de influência da compactação muda de acordo com o ângulo de atrito. Quanto maior o valor do ângulo de atrito do solo, maior a profundidade na qual o efeito da compactação se sobressai sobre o peso próprio da estrutura. Isto se deve ao fato de o esforço de compactação conforme proposto por Dantas e Ehrlich (2000) depender da experiência de carga do solo.

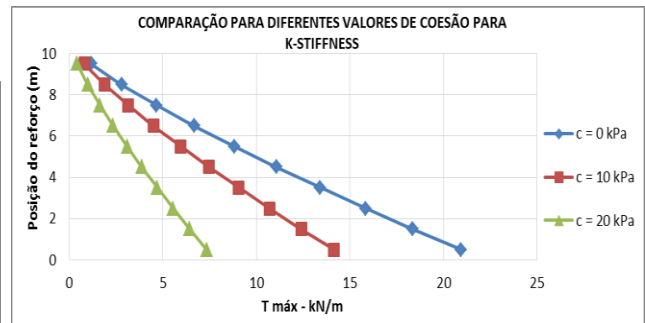


Figura 6. K-stffness (2008) com diferentes coesões.

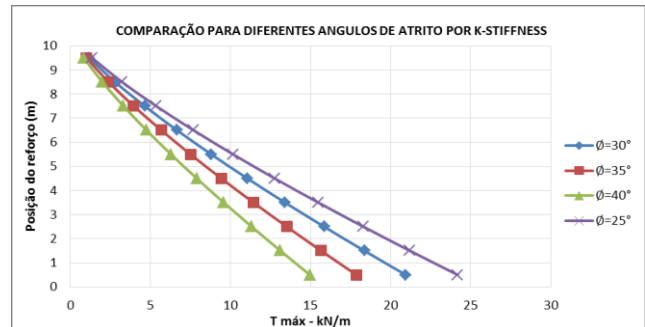


Figura 7. K-stffness (2008) com diferentes ângulos de atrito.

As figuras 6 e 7 apresentam os resultados de tração máxima por nível para a variação da coesão e do ângulo de atrito para o método K-stffness. O resultado obtido, assim como nos métodos anteriores está dentro do esperado. Com uma avaliação rápida dos gráficos, é possível concluir que a variação na coesão do solo gera uma influência maior que a variação no ângulo de atrito do mesmo segundo o método. Assim como na metodologia proposta pela FHWA (2010) e por Dantas et. al. (2000), o aumento do ângulo de atrito é diretamente proporcional a uma redução da tração no reforço, o mesmo acontece com o aumento da coesão.

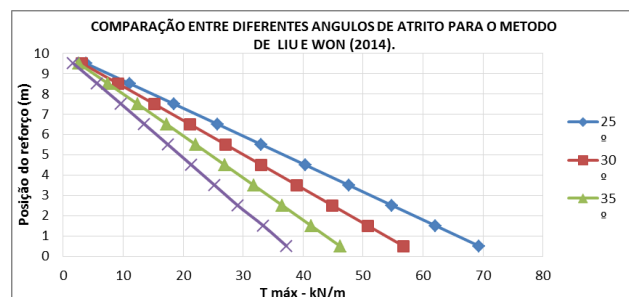


Figura 8. Liu e Won (2014) com diferentes ângulos de atrito.

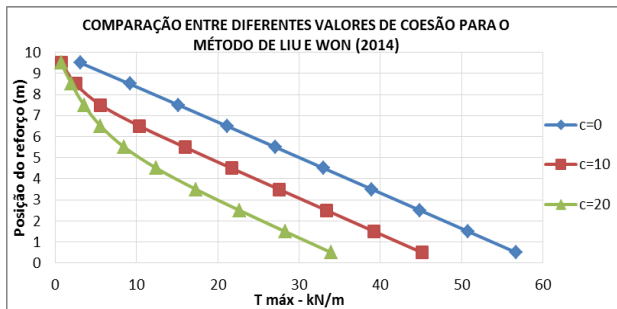


Figura 9. Liu e Won (2014) com diferentes coesões.

Assim como nos resultados obtidos para os três métodos anteriores, a utilização do método elaborado por Liu e Won (2014), resultou em um comportamento semelhante, à medida que se aumenta a coesão também se obtém uma redução da solicitação sob o reforço, como é apresentado na figura 8. O mesmo ocorre com a variação do ângulo de atrito do solo.

#### 4.2 Comparações entre os métodos

Os gráficos que seguem apresentam os resultados de tração no reforço por nível para utilizando diferentes métodos, servindo de base à comparação dos mesmos.

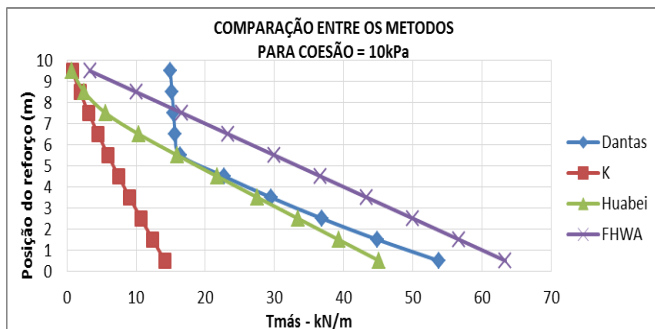


Figura 3. Gráfico comparativo, C=10kPa.

Os métodos de Dantas e Ehrlich (2000) e Liu e Won (2014) a tensão de compactação sofre influência do ângulo de atrito, mas não da coesão. Vemos que o método da FHWA (2010) é o mais conservador, o método proposto por Miyata e Bathurst (2008) é o menos conservador indicando que deve-se ter domínio das propriedades do solo e da estrutura para sua utilização para que a ECSR não seja subdimensionada. O método de Dantas e Ehrlich (2000) e de Liu e Won possuem valores intermediários.

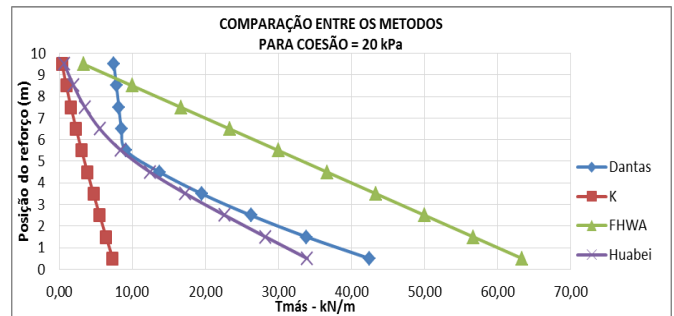


Figura 5. Gráfico comparativo, C=20kPa.

Como era esperado o aumento da coesão provoca uma redução da tensão de solicitação dos reforços, as relações entre um método e outro a comparação é semelhante à realizada anteriormente.

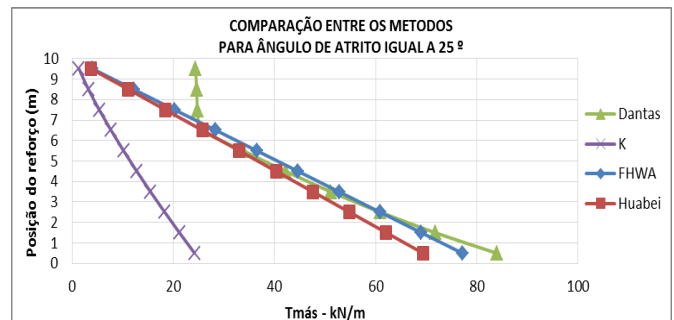


Figura 6. Gráfico comparativo, ângulo de atrito 25°.

Com relação aos métodos de Miyata e Bathurst (2008) e FHWA (2010) as observações referentes ao aumento do ângulo de atrito foram explicadas quando mostrado os gráficos para cada método. A respeito dos métodos de Dantas e Ehrlich (2000) e Liu e Won (2014) a tensão de Quando se altera a coesão não se altera o ponto de predominância da compactação, mas quando se altera o ângulo de atrito a cota de influência muda de forma diretamente proporcional a modificação deste. Em relação à comparação entre os métodos, as relações seguem a mesma ideia de quando se trabalha com variação da coesão, ou seja, o método de Miyata e Bathurst (2008) sendo o menos conservador, o da FHWA (2010) o mais conservador, e Dantas e Ehrlich (2000) e Liu e Won (2014) tendo valores intermediários.

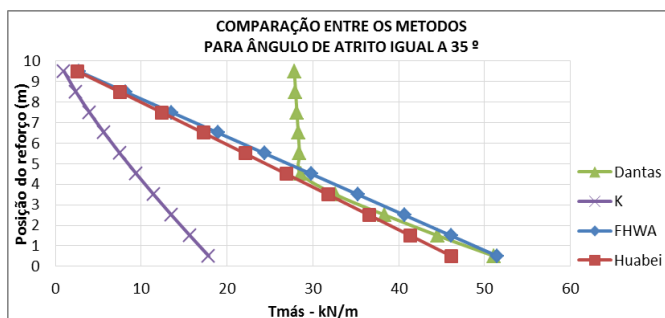


Figura 7. Gráfico comparativo, ângulo de atrito 25°.

Como já foi explicado o aumento do ângulo de atrito provoca uma redução na solicitação dos reforços devido ao aumento da resistência do solo. As relações de comparações entre os métodos foi abordada acima durante a apresentação dos métodos.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados quatro diferentes métodos de dimensionamento de estrutura de solos reforçados. Entre os resultados obtidos e apresentados, três deles apresentam resultados próximos para zonas mais profundas da estrutura, ou seja, para a zona a partir da qual o efeito resultante da compactação passa a ser desprezível quando comparado à carga aplicada ao reforço pelo peso de solo acima do nível.

No caso do método desenvolvido pela FHWA (2010), para efeito de comparação foram desconsiderados os coeficientes de majoração das ações. Quando se trata de um solo puramente granular, ou seja, coesão de 0 kPa, os resultados obtidos por essa metodologia convergem para valores próximos daqueles que foram encontrados a partir dos outros métodos apresentados nesse trabalho. Porém, quando se utiliza o método para o cálculo da tração máxima no reforço em solos que apresentam coesão diferente de 0 kPa, os resultados desse método sempre são superiores a aqueles que consideram diretamente a coesão em seus cálculos, pois com a consideração da coesão há um aumento da resistência do solo. Além disso, o método não considera o efeito da compactação sob a estrutura, logo, nas camadas onde o efeito da compactação é superior as cargas permanentes, o método subestima a tração no reforço. Além da compactação, a

inclinação do talude não é levada em consideração, restringindo a utilização do método apenas para estruturas de face vertical.

Já no método proposto por Dantas e Ehrlich (2000), o efeito da compactação foi levado em consideração na determinação da tração máxima. Os resultados obtidos para a região superior da ECSR destacam-se por sempre apresentar tração superior aos outros métodos, evidenciando o efeito da compactação. Além disso, o método leva em consideração diretamente a coesão do solo e a inclinação da face, permitindo a utilização de forma mais ampla que o método anterior.

No método K-Stiffness modificado (2008), onde o efeito da compactação do solo não é considerado diretamente na formulação, os resultados apresentam sempre valores muito inferiores a todos os outros métodos avaliados. Analisando o método é possível detectar que esses resultados tão baixos são devidos à limitação imposta ao fator de distribuição para estimar tração máxima, que é limitado a 1. Caso essa limitação não fosse determinada pelos autores os resultados obtidos se aproximariam muito daqueles obtidos pelos outros três métodos.

A proposta de Liu e Won (2014), por se basear na aplicação de pequenos incrementos de carga e tratar-se de uma análise não linear, elava a complexidade de aplicação do método se comparado aos outros três. As publicações do método apontam a consideração do efeito da compactação na determinação da tração máxima do reforço, porém a aplicação das equações propostas levaram a resultados que claramente não condizem com a consideração de tal efeito, indicando ou um erro de formulação na publicação, ou uma interpretação errônea feita pelos autores deste trabalho com relação a forma de utilização do método.

O objetivo desse trabalho não é definir qual o método deve ser utilizado pelo projetista, mas sim apresentar a diversidade de resultados para uma mesma situação. O dimensionamento das ECSR vai além da aplicação do método. Deve haver um estudo a respeito das propriedades do solo, das propriedades do material utilizado como reforço e das características e peculiaridades de cada projeto como um todo,

para assim escolher o método que mais se adequa aquela situação e acima de tudo que viabilize a utilização da técnica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo pela incrível experiência a qual tiveram a oportunidade de vivenciar pelos últimos 5 anos, e que teve como resultado o presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- DANTAS, B. T.; EHRLICH, M. *Método de análise de taludes reforçados sob condições de trabalho*. Solos e Rochas, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, 2000.
- ELIAS, V.; CHRISTOPHER, B. R.; BERG, R. R. *Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes - design and construction guidelines*. Geotechnical Engineering, Washington, DC, USA, 2001. 394p.
- FHWA, Federal Highway Administration. *Reinforced Soil Structures – Volume I: Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*. USA, 2010.
- HUABEI LIU, M.ASCE; AND MYOUNG-SOO WON, 2014, *Stress Dilatancy and Reinforcement Load of Vertical-Reinforced Soil Composite: Analytical Method*, Journal of Engineering Mechanics ASCE, Vol. 140, No. 3.
- JEWELL, R. A. *Application of revised design charts for steep reinforced slopes*. Geotextiles and Geomembranes Journal, v 10, p. 203-233, 1991.
- MIYATA, Y. AND BATHURST, R.J. 2007. *Development of K-stiffness method for geosynthetic reinforced soil walls constructed with c-f soils*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, No. 12, pp. 1391-1416.
- PERALTA, F. N. G. *Comparação de Métodos de Projeto para Muros de Solo Reforçado com Geossintéticos*. 2007. 162 f. Dissertação de (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SCHLOSSER, F. e THANH, N. (1974). *Recent results in french research on reinforced earth*. Journal of the construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 100, No C03. Pp. 223 – 237.