

Um estudo geotécnico sobre colunas de pedra como elementos de fundação

Caique Roberto de Almeida

Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, Brasil, crdealme@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho tem por objetivo analisar os principais aspectos relacionados ao projeto e execução de colunas de pedra em obras de engenharia, bem como as ocasiões e limites de projeto que fazem do seu uso uma prática segura e economicamente viável. Diversos subsídios intelectuais e elementos técnicos aqui levantados foram minuciosamente estudados ao longo das aulas e trabalhos desenvolvidos durante o curso “Melhoramento de Solos”, ministrado pelo Prof. Dr. Roy H. Borden para alunos de mestrado em Engenharia Geotécnica da Universidade Estadual da Carolina do Norte (EUA). A metodologia aplicada consiste no levantamento de itens relacionados à capacidade de carga, recalque, comportamento estrutural, viabilidade econômica, impactos e benefícios em obras de engenharia de colunas de pedra com base em ensaios de laboratório e trabalhos estudados e desenvolvidos pela bibliografia americana. Os resultados obtidos consistem num estudo e síntese das principais experiências acadêmicas e profissionais acerca do projeto e execução de colunas de pedra, além de uma ampla análise teórica e experimental dos itens que devem ser observados durante o projeto de colunas de pedra. Também é parte dos resultados deste trabalho a determinação das ocasiões e limites, a partir da comparação de colunas de pedra com fundações convencionalmente utilizadas, onde o uso deste tipo de coluna de agregados se faz interessante sob os pontos de vista econômico e de conhecimento técnico.

PALAVRAS-CHAVE: Colunas de pedra, capacidade de carga, recalque, viabilidade econômica, técnicas construtivas de colunas de pedra.

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, engenheiros têm encontrado no projeto de execução de colunas de pedra e materiais granulares uma sólida solução para o melhoramento de materiais coesivos e areias siltosas, em contextos onde o amplo uso de tecnologia em processos construtivos não integrava ainda a realidade da Engenharia Civil.

Atualmente, colunas de pedra constituem uma solução para a estabilização de fundações que sustentarão aterros e estruturas de retenção, bem como atuam no sentido de reduzir o potencial de liquefação de areias. Outro importante aspecto desse recurso geotécnico é a redução do chamado recalque primário em obras de engenharia.

Além disso, é fundamental mencionar-se o

fato de que colunas de pedra possuem um diferencial estreitamente relacionado à viabilidade econômica: quando respeitados os devidos limites impostos pelas características de projeto é possível optar-se por colunas de pedra, haja vista seu reduzido custo quando comparadas às estacas e a outras obras de caráter construtivo mais refinado.

A utilização de colunas de pedra pode ser dividida em duas áreas distintas, isto é, como elementos de fundação ou estruturas que interagem com o solo para a estabilização e reforço de determinada obra.

Como elemento de fundação (ou estacas de pedra – stone piles, de acordo com a literatura americana) podem ser usados para uma ampla diversidade de obras, incluindo edificações e tanques de óleo (BORDEN, 2010). Por outro

lado, quando utilizadas na condição de técnica para reforço do solo, colunas de pedra possuem o potencial de prevenir liquefação, bem como a estabilização de aterros e taludes, além de outras aplicações no sentido de melhorar o solo por técnicas de drenagem.

Todavia, o projeto deste tipo de fundação ou técnica de melhoramento de solos encontra ainda resistência sob o ponto de vista científico, visto que é grande o número de engenheiros que conduzem as diferentes etapas de dimensionamento e implantação de colunas de pedra com base em resultados empíricos, sem aplicar o enfoque físico e geotécnico que fundamenta a segurança e viabilidade econômica de obras de engenharia civil. Nesse sentido, constitui um dos intuitos deste artigo o fornecimento de um estudo que forneça embasamento teórico para condução de projetos no âmbito aqui estudado.

2 TÉCNICAS CONSTRUTIVAS

2.1 Preenchimento de colunas de pedra a partir do topo

Conforme ilustrado pelas figuras 1 e 2, o preenchimento da coluna de pedra por meio do topo (método conhecido na Língua Inglesa como Top Feed Method) ocorre através do uso de equipamentos responsáveis por ocasionar vibração do elemento estrutura-solo, ao passo que materiais granulares são despejados no furo executado pelo vibrador. Este tipo de técnica construtiva é conveniente de ser aplicada em terrenos onde o sistema de drenagem natural permita que a água escorra na direção de implantação das colunas de pedra. Nesse sentido, é fundamental destacar-se que a oferta de água para uso executivo é fator preponderante à escolha da opção de preenchimento por meio do topo.

A presença de outros fatores fomenta também o uso desta técnica, a exemplo de locais onde o tipo de solo tratado não leve a consideráveis problemas em termos do manuseio do solo de alta sensibilidade em interação com a água, com área de no mínimo 500 m² ao redor da região de recalque para o

manuseio de equipamentos e materiais, além da contratação de uma equipe de suficiente experiência para operar tecnologias de elevada especificidade tecnológica, como vibradores.



Figura 1. O uso de vibrador para execução de colunas de pedra a partir do topo (DE ALMEIDA, 2014)

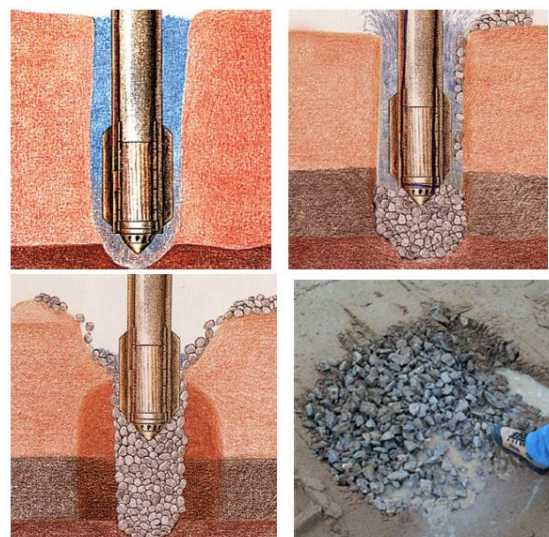


Figura 2. Representação do preenchimento de furos para a implantação de colunas de pedra (BORDEN, 2010)

2.2 Preenchimento de colunas de pedra a partir da base

Tradicionalmente preferido no meio geotécnico, o preenchimento de colunas de pedra a partir da base (Bottom Feed Stone Column Method) utiliza equipamentos e procedimentos de maior rigor técnico que permitem elevado controle de

qualidade na obra.

Conforme ilustram as figuras 3 e 4, o fluxo de pedras distribuídos ao longo do furo é mecanicamente controlado, de forma que o volume de material instalado pode ser distribuído de forma precisa em diferentes profundidades (BORDEN, 2010). Vantagens como mínima quantidade de solo transportada para a superfície (o que resulta num menor consumo de brita por conta da obtenção da tensão de confinamento a partir do uso de reduzida quantidade de material grosso), a ausência da necessidade de manusear-se materiais de alta sensibilidade e a redução na perda de pedra na superfície para 5% (em comparação com perdas de 10% observadas para o método de preenchimento a partir do topo) tornam esta técnica construtiva uma opção que conduz o projeto a elevados níveis de qualidade técnica.

O preenchimento de colunas de pedra a partir da base encontra condições convenientes de emprego em locais onde o uso da água na superfície do terreno deve ser evitado por conta da possibilidade de contaminação do solo, escassez de água para uso em construção, em áreas de reduzida extensão e em solos que não permitam interação com água sem o desenvolvimento de problemas geotécnicos (a exemplo de solos colapsíveis).



Figura 3. O uso de equipamentos e tecnologias para execução de colunas de pedra a partir da base (DE ALMEIDA, 2014)

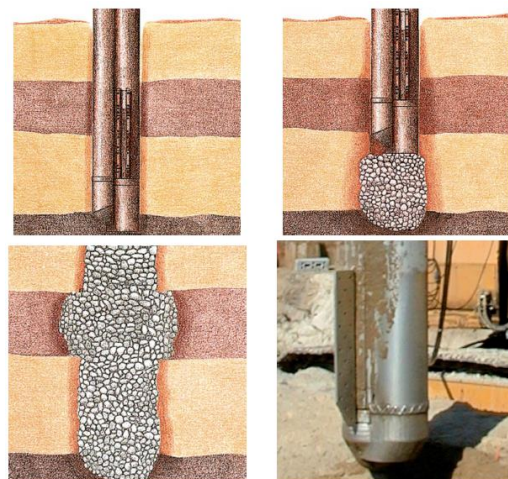


Figura 4. Representação do preenchimento de furos para a implantação de colunas de pedra (BORDEN, 2010)

3 ANÁLISE DE CAPACIDADE DE CARGA

Estudos acerca da ruptura de colunas de pedra quando aplicadas à estabilização de taludes e aterros (BARKSDALE, 1983) foram desenvolvidos, inicialmente, a partir do comportamento de uma coluna de pedra isolada e circulada por material coesivo. Fundamentalmente, assume-se que, caso a solicitação de cisalhamento na coluna de pedra é comparavelmente superior à resistência ao cisalhamento do solo coesivo, uma superfície de ruptura secundária se desenvolve em contato com a coluna de pedra extendendo-se para maiores valores de profundidade numa superfície circular.

Nesse sentido, a solicitação que causa ruptura à interação solo-estrutura pode ser obtida para o caso ilustrado pelas figuras 5 e 6 (Barksdale, 1983), em que o equilíbrio da cunha permite a inferência da equação 1 (em que os elementos componentes do modelo matemático são graficamente explanados na figura 5):

$$N = \frac{Ws + Wn \cos \alpha + F \sin \beta}{\cos \alpha + \tan \phi \sin \alpha} \quad (1)$$

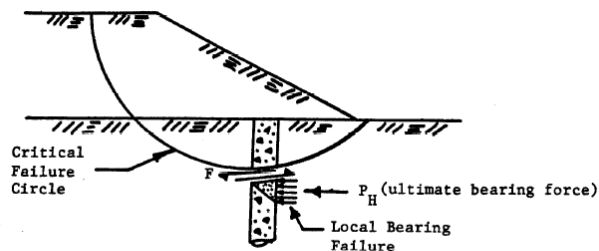


Figura 5. Representação da superfície de ruptura a ser equilibrada (BARKSDALE, 1983)

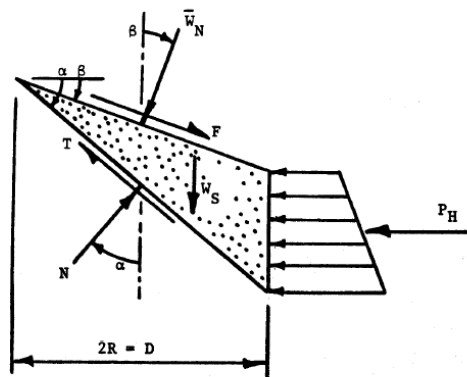


Figura 6. Representação do equilíbrio da cunha obtida a partir da superfície de ruptura representada na figura 5 (BARKSDALE, 1983)

Os desdobramentos do equilíbrio verificado na equação 1 permitem que o cálculo da tensão limite de cisalhamento seja obtida por meio de solução gráfica respaldada pela realização de provas de carga em elementos rígidos e representativos do comportamento de colunas de pedra em solos coesivos. Dois dos dez diagramas que permitem a solução do problema de capacidade de carga (BARKSDALE, 1983) são exibidos nas figuras 7 e 8:

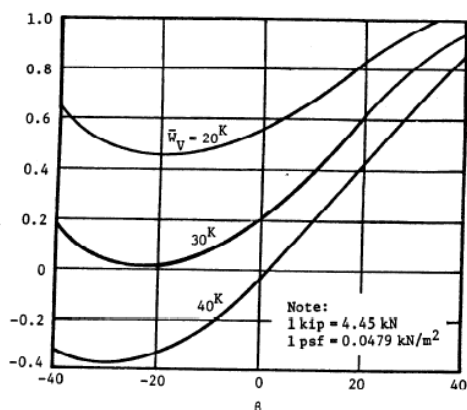


Figura 7. Fatores de redução para ruptura profunda (BARKSDALE, 1983)

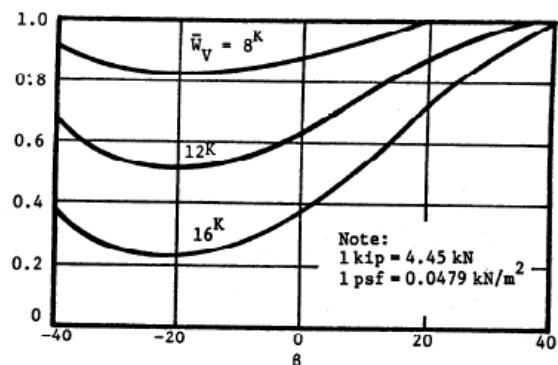


Figura 8. Fatores de redução para ruptura rasa (BARKSDALE, 1983)

A partir da obtenção dos parâmetros do solo e do material que constitui o projeto de coluna de pedra, bem como a estimativa de prováveis posições para a ocorrência da superfície de ruptura circular entre solo e estrutura, é obtido, a partir dos diagramas representativos exibidos nas figuras 7 e 8 (mas integralmente abordados no estudo de Barksdale e Bachus) o índice η :

$$\eta = \frac{F}{W n \tan \phi} \quad (2)$$

Em termos físicos, o índice η representa a força resistente desenvolvida por uma coluna de pedra isolada no caso em que a ruptura local não ocorre. Portanto, este fator de redução atua no sentido de indicar quando rupturas localizadas podem se tornar um dano irreversível à estrutura e ao solo considerando-se dada geometria ou propriedades de materiais utilizados em determinado projeto.

É também fundamental ressaltar que o comportamento entre carga e recalque é amplamente estudado por pesquisadores no meio geotécnico tendo em vista a análise do efeito de grupo. A figura 9 (GONZALEZ, 2013) mostra resultados obtidos em termos de carga e recalque para diferentes valores de carregamento.

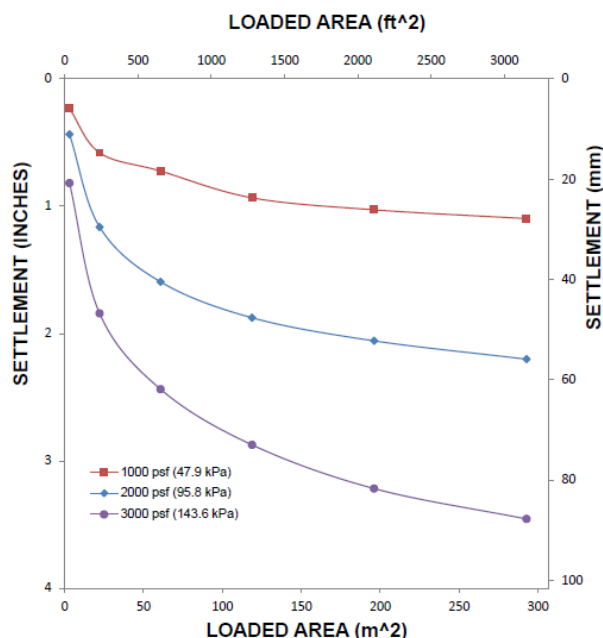


Figura 9. Comportamento carga x recalque evidenciado para diferentes áreas carregadas (GONZALEZ, 2013)

4 ANÁLISE DE RECALQUES DE GRUPOS DE COLUNAS DE PEDRA

Tendo em vista a redução do recalque em perfis de solo onde colunas de pedra são implantadas, pesquisadores americanos (MITCHEL e HUBER, 1985) observaram que deformações em solo em interação com estruturas de pedra são ocasionadas, basicamente, pela compressão da zona reforçada pela presença das colunas de materiais agregados e pela compressão da zona abaixo da região de compressão.

A previsão de recalques para a colunas de pedra em camada compressível que se comportam como estacas de ponta, isto é, transmitindo a maior parte de seu carregamento por meio de sua resistência de ponta à camadas de material rochoso (conforme ilustra a figura 9), pode ser realizada através de da aplicação de métodos baseados em ensaios de natureza empírica, na aplicação da teoria da elasticidade e no emprego de métodos de tensões reduzidas. Nesse sentido, evidencia-se que (MITCHELL e HUBER, 1985) o recalque de uma área de solo melhorado tende a ser dez vezes maior do que o previsto para valores medidos em carregamentos realizados em ensaios numa única coluna de pedra em solo similar ao

inicialmente testado.

Valores medidos de deformação no solo variam entre 3,0 e 6,0 cm para sedimentos moles de 11 m de profundidade, em comparação com recalques de 6,3 cm previstos pela aplicação do método dos elementos finitos.

A aplicação da Teoria da Elasticidade (POULOS, 1972) conduziu o meio geotécnico à conclusão de que o recalque de uma área carregada de grandes dimensões tende a ser de 5 a 10 vezes superior àquela carregada por uma única coluna pertencente a um grupo de colunas. Por outro lado, o método de tensões reduzidas (PRIEBE, 1976) afirma que deformações em solos melhorados por colunas de materiais agregados tendem a ser 40% do recalque verificado em solos naturais.

Com base no método de tensões reduzidas (PRIEBE, 1976), verificou-se que a eficiência de colunas de pedra transmitindo tensões para camadas rochosas é influenciada por fatores como: espaçamento entre colunas, propriedades do solo circundante, propriedades do material da coluna, tensões insitu, comprimento das colunas até a camada incompressível e a magnitude da carga uniformemente distribuída na superfície do terreno.

Sob tais aspectos, é importante a inferência, de que colunas curtas instaladas numa camada profunda de solo fofo não serão efetivas no sentido de reduzir o recalque de um sistema de fundações. Para o exame preciso do comportamento físico de tais estruturas em interação com o solo propõe-se (BORDEN, 2010) a realização de provas de carga em colunas de pedra e a análise, por meio do método dos elementos finitos, de grupos de colunas, conforme ilustram as figuras 9 e 10.

A partir do mapeamento do comportamento em termos de deformações em solos em interação com colunas de pedra, conclui-se que o recalque na zona superior (reforçada) em compressão é uma função de fatores como o comprimento da coluna, a área melhorada carregada e as propriedades dos materiais que compõe tanto o maciço de solo quanto a coluna de pedra. Evidencia-se, por outro lado, que a compressão na zona inferior pode ser aproximada por meio do método dos elementos finitos (com embasamento teórico da teoria de

Boussinesq para a distribuição de tensões no solo), ao considerar-se uma sapata imaginária que distribui carga a uma profundidade equivalente a dois terços do comprimento das colunas, conforme retrata a figura 11.

Outra inferência é a aproximação utilizada para a obtenção do acréscimo de tensões laterais na zona situada diretamente abaixo da área carregada, em que se propõe a utilização de módulos de elasticidade maiores para profundidades equivalentes a metade da área carregada abaixo da cota em que se localiza a sapata imaginária, e módulos de deformabilidade inferiores para camadas situadas abaixo desta zona. As figuras 12 e 13 (BORDEN, 2010) demonstram como o acréscimo de tensões no solo obtidas pela aplicação do método dos elementos finitos fomenta esta proposta sob o ponto de vista teórico.

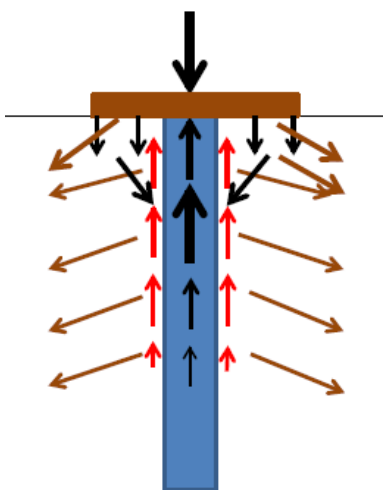


Figura 10. Prova de carga em coluna de pedra (BORDEN, 2010)

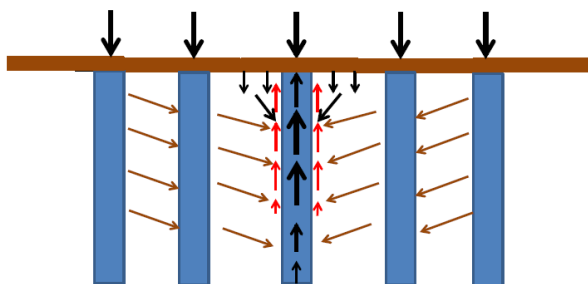


Figura 11. Análise de distribuição de tensões em colunas de pedra por meio do método dos elementos finitos, com destaque para carregamentos secundários na coluna central (BORDEN, 2010)

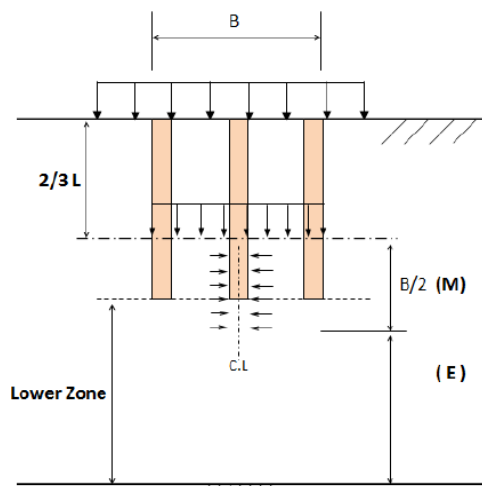


Figura 12. Distribuição de tensões na zona inferior às colunas de pedra – modelo para cálculo por meio da aplicação de método de elementos finitos (BORDEN, 2010)

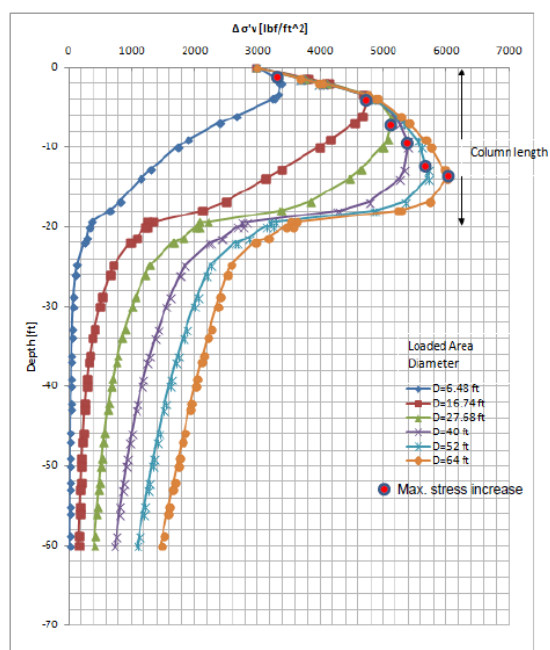


Figura 13. Comportamento de distribuição de tensões de acordo com a profundidade obtido para o carregamento uniformemente distribuído de 3000psf (GONZALEZ, 2013)

Conclusões importantes com relação à deformabilidade dos solos são atingidas por meio da observação da evolução de recalques numa prova de carga realizada numa única coluna de pedra isolada, haja vista que os resultados obtidos para esta situação não são os mesmos identificados ao realizar-se o levantamento de recalques quando múltiplas colunas de pedra estão envolvidas, a não ser que elas sejam suficientemente curtas e atuem de

forma similar a estacas de ponta.

Por fim, conforme pode-se observar pela influência do comportamento geotécnico e estrutural retratado pelas figuras 10 e 11, a magnitude do efeito de interação entre colunas aumenta com a elevação do número de colunas de pedra utilizadas em projeto.

5 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Inicialmente, o fator responsável por viabilizar e atrair o interesse de engenheiros geotécnicos e estruturais por colunas de pedra está situado no quesito de redução de custos, uma vez que a utilização de pedras e agregados diminui sensivelmente o nível de investimentos quando comparado aos montantes mobilizados para a execução de fundações profundas convencionais, como estacas de concreto armado.

Entretanto, constitui um limite em termos de execução de projeto o fato de que é preponderante a contratação de uma equipe com amplo know-how para a realização de processos construtivos relacionados à implantação de colunas de pedra. Nesse sentido, evidencia-se que o método de construção de colunas de pedra a partir da base constitui uma solução que, apesar de requerer o uso de melhores recursos, materiais, equipamentos e procedimentos em termos de tecnologia e rigor de aplicação, oferece resultados de elevada qualidade construtiva.

A disponibilização de métodos teóricos e empíricos para o projeto e execução de colunas de pedra, aliado ao custo reduzido para sua implantação, possibilita que este tipo de elemento de fundação seja utilizado em edificações ou construções que ofereçam elevado nível de carregamento à interação solo-estrutura, bem como artifício geotécnico para a estabilização de taludes e aterros, o aumento do coeficiente de permeabilidade de solos finos (quando as colunas são construídas com materiais granulares) e como recurso para prevenir o potencial de liquefação de areias.

6 CONCLUSÕES

A ampla disponibilização de recursos

relacionados ao projeto de colunas de pedra, a partir do desenvolvimento de métodos construtivos, empíricos, semi-empíricos e teóricos, permite que profissionais de Engenharia Geotécnica se sirvam de uma série de recursos capazes de fomentar o desenvolvimento de projetos de alta qualidade técnica e elevada viabilidade econômica.

Nesse sentido, é fundamental que um exame equilibrado dos recursos disponibilizados para um projeto de fundações ou estrutura de estabilização, aliado à análise de informações sobre o solo e cargas provenientes de determinada estrutura, sejam fatores preponderantes para que um projetista possa escolher, com respaldo técnico, a solução de engenharia que melhor atende às suas necessidades.

Sob tal aspecto, é importante afirmar que a análise e projeto de colunas de pedra como elementos de fundação ou recursos para estabilização de taludes e aterros deve constituir uma das opções a ser verificada pelo projetista, haja vista que, conforme demonstrado neste artigo, existe literatura técnica que subsidia, por meio do desenvolvimento e aplicação da teoria da elasticidade, de método de elementos finitos e até mesmo pela execução de provas de carga, a implantação segura de um sistema de estrutura de fundações ou estabilização de aterros baseados em colunas de pedra.

Por outro lado, deve-se considerar que a redução em termos de custos, ocasionada pelo uso de materiais de reduzido valor (como agregados e britas) em comparação com aqueles empregados na construção de fundações convencionais, atua no sentido de aumentar consideravelmente a utilização de colunas de pedra como recurso geotécnico.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Roy H. Borden, da Universidade Estadual da Carolina do Norte, pela condução da discussão de temas relacionados à melhoria de solos no âmbito da Engenharia Geotécnica

Ao Prof. Dr. Kurt Pereira Amann, por seus valiosos conselhos e orientações técnicas.

Ao Prof. Dr. Ciro Humes, pelo apoio e incentivo no desenvolvimento de estudos em

REFERÊNCIAS

- Barksdale, R.D e Bachus, R.C. (1983) *Design and construction of stone columns*. Georgia Institute of Technology, Vol. 2
- Borden, Roy H. (2010). *Settlement of aggregate pier groups*. Artigo publicado pela ASCE.
- Gonzalez, M.J. (2013). Artigo group size effect of stone columns. North Carolina State University
- Mitchell, J.K. e Hubber T.R (1985). *Performance of a stone column foundation*. Journal of Geotechnical Eng., 111, N 2, 2015-223.
- Poulos, H.G. (1972). *Elastic Analysis of axial load-displacement behavior of stone columns*. Artigo publicado pela ASCE.
- Priebe, H.J. e Moseley, M.P. (1976) *Ground Improvement*, 2nd ed., Blackie Academic and Professional