

VALORES LIMITE DA RESISTÊNCIA AO CORTE NÃO DRENADA PARA A EXECUÇÃO DE COLUNAS DE BRITA EM SOLOS MOLES

LIMIT VALUES OF THE UNDRAINED SHEAR RESISTANCE FOR THE PERFORMANCE OF STONE COLUMNS IN SOFT SOILS

Carvajal Díaz, Enmanuel; *Keller Cimentaciones S.L.U., Alcalá de Henares, Espanha,* enmanuel.carvajal@keller.com

Vukotič, Goran, *Keller Cimentaciones S.L.U., Alcalá de Henares, Espanha,* goran.vukotic@keller.com

Barros, Pedro Jorge M. A.; *Keller Cimentaciones S.L.U., Cacém, Portugal,* pedro.barros@keller.com

RESUMO

Apresenta-se uma análise da resistência ao corte não drenada do solo e a sua influência no comportamento de colunas de brita executadas com equipamentos de vibração profunda. É descrita a relação entre a capacidade de carga das colunas de brita e o nível de confinamento e suporte lateral proporcionado pelo solo circundante às colunas. Estes últimos podem exprimir-se em função da resistência ao corte não drenada de solos argilosos moles tratados com colunas de brita. Na análise são referidas várias metodologias para o cálculo teórico da capacidade de carga de colunas isoladas e em grupo, essencialmente em função da resistência ao corte não drenada, descrevendo-se em especial a capacidade real das colunas sendo considerados os efeitos que o procedimento de execução por vibração profunda produz no solo circundante das colunas. Apresentam-se vários casos práticos que comprovam esse efeito. Confirma-se a aplicabilidade das colunas de brita em solos com resistências mínimas ao corte não drenada de 5 kPa, de acordo quer com a análise efectuada quer com os casos de obra apresentados.

ABSTRACT

It is presented an analysis of the undrained shear strength of the soil and it's influence on the behaviour of stone columns performed with deep vibrators. It's described the relation between the load capacity of stone columns and the level of confinement and lateral support given by the surrounding soil. These last ones can be expressed in relation to the undrained shear resistance of the soft soils improved with stone columns. In the analysis, several methodologies are mentioned for the theoretical calculation of the load capacity of isolated and grouped stone columns, essentially depending on the undrained shear strength. Specifically it is described the real load capacity of the columns considering the effects that the use of the execution procedures affect the soil surrounding the columns, being referred several practical cases. It is confirmed the proper use of stone columns in soils with minimum undrained shear resistance of 5 kPa, following the presented analysis and several performed sites.

1 - INTRODUÇÃO

O tratamento de solos mediante colunas de brita executadas por vibradores em profundidade tem vindo a ser aplicado durante décadas em muitos tipos de obras, situadas em zonas com solos moles. Inicialmente a aplicação de tratamentos por colunas de brita considerava-se limitada aos casos de solos caracterizados por resistências ao corte em condições não drenadas, c_u , com valores mínimos da ordem dos 15 kPa.

No entanto, após um acumular de extensa experiência de tratamento, por colunas de brita, de solos extremamente brandos e a partir de um melhor estudo desta situação, hoje em dia foi possível estabelecer valores limite inferiores para utilização de colunas de brita, de resistência ao corte não drenada, de aproximadamente 5 kPa.

Nos capítulos seguintes descrevem-se esta situação e a metodologia para análise da aplicabilidade de colunas de brita em solos muito moles, basicamente considerando a capacidade de suporte das colunas neste tipo de solos. Igualmente apresentam-se algumas experiências práticas deste tipo de aplicações.

2 - PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO E EFEITOS NO SOLO

O tratamento por colunas de brita, ou vibrosubstituição, é uma técnica de vibração profunda realizada mediante perfuração e compactação por deslocamento, sem extracção de solo, introduzindo uma

ferramenta – vibrador – no solo e em profundidade, deslocando lateralmente o solo e mobilizando o seu impulso passivo, colocando no seu lugar brita compactada (Figura 1).

Em solos arenosos este procedimento produz uma densificação do material circundante. Particularmente, em areias limpas, não é necessário introduzir brita, denominando-se o método por vibrocompactação.

Em solos finos é necessário introduzir brita e como consequência do método de execução produz-se um forte incremento das tensões horizontais e das pressões intersticiais, as quais se dissipam rapidamente devido ao forte efeito drenante das colunas.

Este aumento de tensões introduzido durante a execução das colunas em solos finos (siltes e argilas), pode considerar-se como um tipo de pré-carga. Existem várias referências de medições de aumentos de pressões intersticiais induzidas pela execução de colunas de brita, com valores entre 0.5 e 2.5 kg/cm², os quais equivalem ao peso de aterros de pré-carga entre 3 e 12 m de altura. A Figura 2 apresenta um exemplo de medição de pressões intersticiais durante a execução de colunas de brita, onde se pode observar que, durante a instalação de uma coluna isolada, as sobrepressões intersticiais podem alcançar os 1 a 1.3 kg/cm², enquanto para um grupo de colunas foi registado um incremento de pressões entre 1 e 2 kg/cm².

Em definitivo, a combinação de ambos os aspectos (procedimento de execução e capacidade de drenagem das colunas) produz uma melhoria do solo por pré-carga e consolidação lateral, o que origina melhores condições de confinamento e ajuda ao suporte e capacidade de carga lateral das próprias colunas de brita.

Estes aspectos mostram a importância do método de execução na melhoria final obtida.

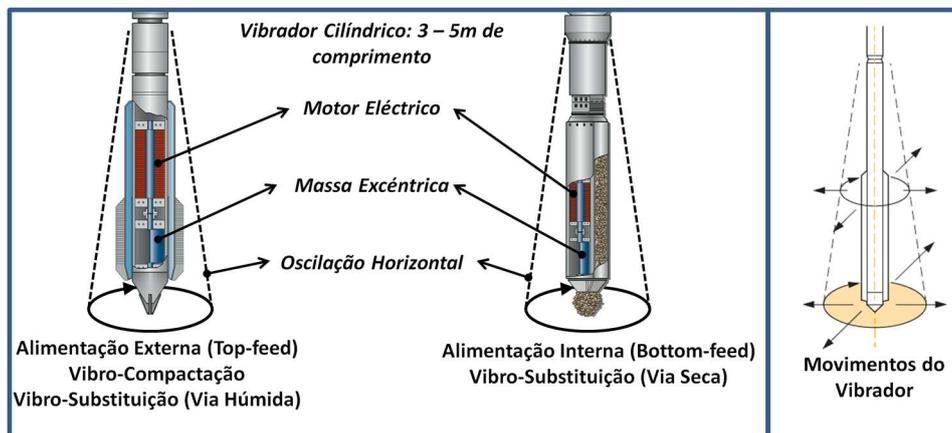


Figura 1 – Técnicas de vibração em profundidade

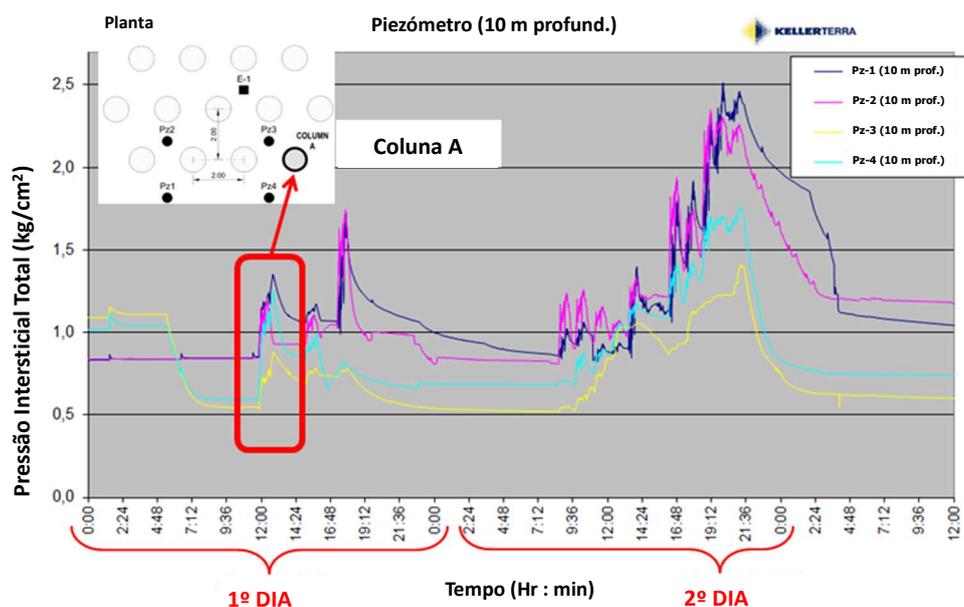


Figura 2 – Pressões intersticiais durante a execução de colunas de brita (Carvajal et al. 2013)

3 - MECANISMOS DE SUPORTE DAS COLUNAS DE BRITA

3.1 - Princípios Gerais

A análise teórica baseia-se no conceito de célula unitária, a partir do qual se representa a situação de uma malha de colunas de extensão infinita sob efeito de uma carga distribuída também de dimensões infinitas (Figura 4).

Devido à simetria da carga, o contorno da célula unitária considera-se sem deformações laterais nem esforços cortantes, ficando no seu interior em condições edométricas, e com uma concentração de carga na coluna.

A coluna de brita no interior da célula fica em condições triaxiais, sujeita a deformações laterais e verticais. Seguindo estas hipóteses, pode considerar-se que em toda a profundidade se cumpre o equilíbrio de esforços segundo a Equação [1], e que existe compatibilidade de assentamentos na coluna e no solo ($S_{col} = S_s$).

$$P = P_s \cdot a_s + P_{col} \cdot (1 - a_s) \quad [1]$$

onde: P = carga fundação; P_s = carga no solo; P_{col} = carga na coluna; a_s = relação de substituição; A_{col}/A ; A = área total da célula unitária; A_s e A_{col} = área do solo e da coluna.

A melhoria introduzida pela concentração de esforços nas colunas supõe uma redução de assentamentos e um aumento da capacidade de carga, comparando com a situação sem melhoramento.

As colunas de brita transmitem a carga concentrada mediante a expansão do seu diâmetro, provocando impulsos laterais sobre o solo.

Sob este estado de carga, as colunas tendem a falhar pelo seu alargamento e falta de suporte lateral do solo circundante. Assim, a capacidade das colunas para suportar cargas verticais depende fundamentalmente do suporte lateral proporcionado pelo solo (Figura 3). A transferência de cargas na interface solo - coluna supõe um impulso lateral activo nas colunas enquanto o solo responde com o seu impulso lateral passivo. (Figura 4).

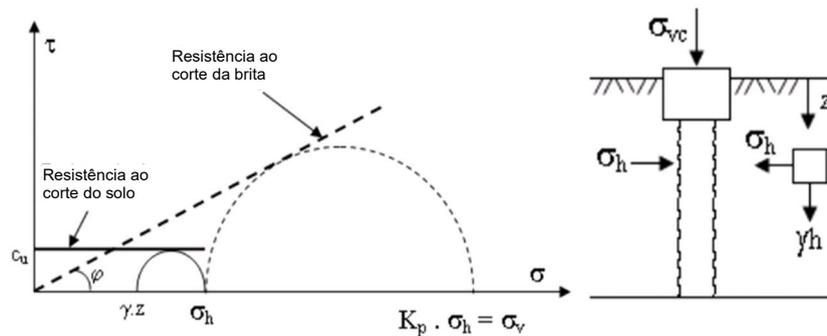


Figura 3. Capacidade de carga das colunas.

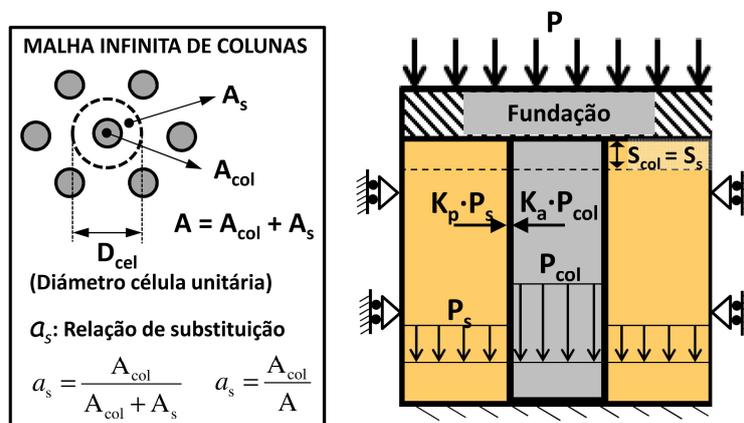


Figura 4. Hipótese "célula unitária"

Considerando as condições triaxiais das colunas de brita no interior da célula unitária, a carga vertical que estas podem suportar vem expressa segundo a formulação da equação (2a), proposta por vários autores (Greenwood 1970, Hughes e Withers 1974).

$$\sigma_{vc} = K_p \cdot \sigma_{hs} \quad (2a)$$

Sendo:

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}\phi_c}{1 - \text{sen}\phi_c} \quad [2b]$$

$$\sigma_{hs} = N_k \cdot c_u + \sigma_{vs} \quad [2c]$$

$$N_k = 1 + \ln\left(\frac{E_{oed,s}}{3 \cdot c_u}\right) \quad [2d]$$

onde: σ_{hs} = resistência lateral passiva do solo; K_p = coeficiente de impulso passivo; ϕ_c = ângulo de atrito interno das colunas de brita; N_k = factor de influência; c_u = resistência ao corte não drenada; $E_{oed,s}$ = módulo edométrico do solo.

3.2 - Colunas isoladas e grupos de colunas

O comportamento e mecanismo de rotura das colunas de brita depende em grande medida das condições de carga a que estão submetidas. No caso de colunas isoladas, onde a carga se aplica unicamente na área ocupada pela própria coluna, obtém-se uma capacidade de carga vertical reduzida, devido ao escasso confinamento lateral proporcionado pelo solo circundante. Nestas condições o alargamento máximo das colunas tende a produzir-se junto à superfície, onde o confinamento é menor. Por outro lado, se a carga se aplica numa área superior à ocupada pela coluna, ter-se-á um maior confinamento lateral, e o alargamento das colunas seria produzido a uma maior profundidade, alcançando-se maiores níveis de capacidade de carga vertical das colunas. Na Figura 5 apresentam-se dois esquemas ilustrativos deste comportamento. De notar, ainda, que a extremidade inferior das colunas de brita se deverá encontrar sobre uma camada com melhores características mecânicas (superior a 10-15 NSPT) fazendo com que o possível punçoamento nessa camada seja reduzido e permitindo assim verificar-se o alargamento na parte superior devida à carga aplicada.

Nos grupos de colunas, por um lado, tem-se o comportamento das colunas situadas no centro da fundação, cujo confinamento e capacidade de carga é maior e, por outro lado, pode considerar-se que as colunas situadas próximas às extremidades da fundação possuem um confinamento e capacidade de carga mais reduzida. Adicionalmente, o mecanismo de carga de grupos de colunas rege-se pela interacção entre a carga da fundação e o conjunto solo-colunas, assim como a interacção entre o solo e as colunas, e as colunas entre si. Na Figura 6, apresenta-se um esquema ilustrativo das diferentes interacções descritas (Kirsch 2010).

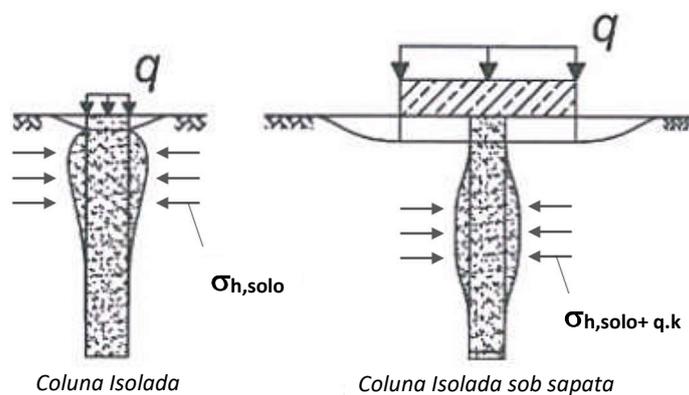


Figura 5. Comportamento de colunas isoladas.

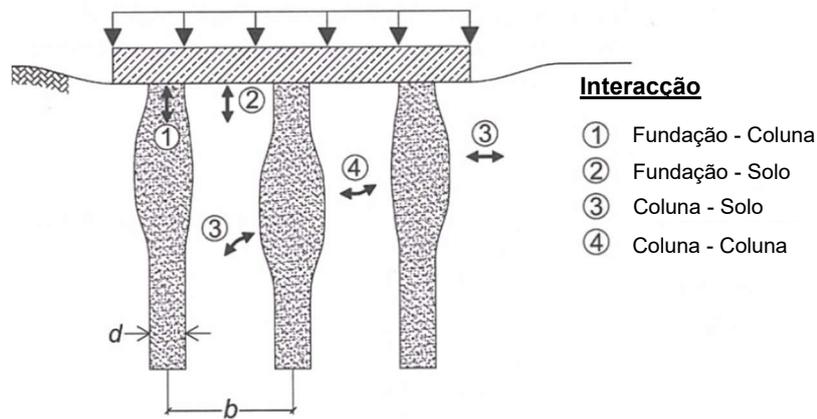


Figura 6. Comportamento de grupos de colunas.

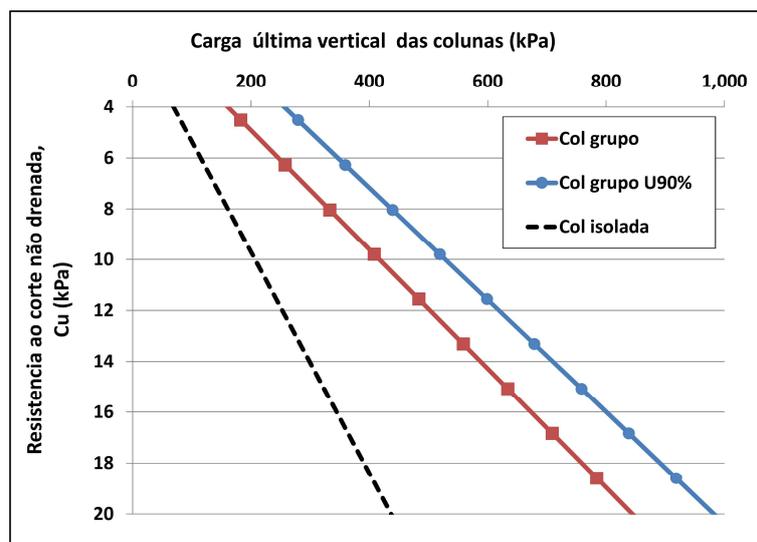


Figura 7. Comportamento de colunas isoladas.

A título exemplificativo, a Figura 7 apresenta uma comparação entre a capacidade de carga de uma coluna isolada, com a carga aplicada só na área ocupada pela coluna, e uma coluna situada no centro de um grupo de colunas, onde o confinamento é proporcionado tanto pelas tensões pré-existentes como pelas transmitidas pela fundação.

Mediante o emprego das equações [2a] e [2d] pode observar-se que para um solo com resistência ao corte sem drenagem de $c_u = 4$ kPa a capacidade de carga da coluna isolada é de 75 kPa, o qual coincide com as relações empíricas propostas por vários autores que sugerem estimar a capacidade de carga das colunas com um valor de 15 a 25 vezes o valor de c_u (Barksdale e Bachus 1983, Mitchell 1981, Bergado e Lam 1987, Guía de Cimentaciones MFOM 2002).

No caso de colunas no centro de um grupo, instaladas no mesmo solo com $c_u = 4$ kPa, e uma carga de fundação ou induzida ao solo durante o processo de execução de 150 kPa, a capacidade das colunas seria de 170 kPa.

Para este último caso, se for considerado um grau de consolidação $U=90\%$ a capacidade seria incrementada até alcançar os 270 kPa.

Adicionalmente, neste exemplo simplificado, pode verificar-se que a capacidade de carga das colunas aumenta linearmente em função de c_u do solo antes do tratamento. Para um nível de c_u entre 8 e 10 kPa, correspondente a um solo muito brando, obtêm-se capacidades de carga de 150 a 200 kPa no caso de uma coluna isolada, e de 300 a 500 kPa para o caso de colunas situadas no centro de um grupo e após o processo de consolidação.

Nos casos em que o valor inicial de c_u é superior a 20 kPa, correspondente a solos de consistência branda a medianamente compacta, as colunas de brita situadas a meio de um grupo poderiam alcançar capacidades de carga superiores a 1000 kPa. No entanto, na prática habitual, limita-se o nível de carga vertical máxima nas colunas a um valor admissível de 800 kPa, considerando um factor de segurança igual a 2.

É importante notar que a pendente (K_p) com que cresce a capacidade de carga das colunas em função de c_u depende fundamentalmente do ângulo de atrito interno da brita. No exemplo foi considerado um $\phi_c = 42^\circ$, sendo que este valor é superior a 45° na maioria dos casos. Na Tabela 1 apresenta-se um resumo dos valores do ângulo de atrito interno da brita compactada nas colunas, realizada por Herle et al. (2007). Esta tabela oferece valores orientativos do ângulo de atrito interno da brita, por forma a serem considerados de forma apropriada para dimensionamento do tratamento.

Tabela 1. Ângulos de atrito interno de colunas de brita (traduzido de Herle et al. 2007).

Tipo de brita	$\Phi_{c,max}$	$\sigma_{c,min}$	$\Phi_{c,min}$	$\sigma_{c,max}$	Notas
Calcário britado	63.1	50	53.8	200	DS
Seixo de rio	58.8	50	51.9	200	DS
Seixo de rio, rolado	57.1	50	50.9	200	DS, $d_{60}/d_{10}=2.6$
Seixo de rio, rolado	59.2	50	53.2	200	DS, $d_{60}/d_{10}=2.1$
Seixo de rio, britado	60.4	50	55.2	200	DS
Basalto	71.8	8	45.6	240	TX, $D_{50}=30$ mm
Basalto	70.0	8	51.1	120	TX, $D_{50}=39$ mm
Basalto	64.2	27	45.6	695	DS
Arenito	60.1	27	37.4	695	DS
Dolomite	64.0	15	43	500	TX, $\gamma = 1.7$ g/cm ²
Dolomite	54.0	15	40	500	TX, $\gamma = 1.5$ g/cm ²

$\Phi_{c,max}, \Phi_{c,min}$ – Ângulo de atrito interno máximo e mínimo

$\sigma_{c,max}, \sigma_{c,min}$ – Tensão de confinamento máxima e mínima

DS – Ensaio de corte directo; TX – Ensaio Triaxial; d_{60}/d_{10} – coeficiente de uniformidade

4 - EXECUÇÃO DAS COLUNAS DE BRITA

Nos pontos anteriores foi vista a forte influência do procedimento de execução no nível de confinamento lateral das colunas, assim como a importância desse confinamento para alcançar uma determinada capacidade de carga vertical das colunas de brita.

As tensões induzidas durante a execução das colunas, após um certo grau de consolidação, incrementam as tensões efectivas do solo circundante e por conseguinte o confinamento necessário para que as colunas possam suportar as cargas verticais. Portanto, a correcta instalação e formação das colunas em toda a profundidade tratada tem uma importância essencial, devido a que com tal se garante o seu funcionamento como um potente dreno vertical e como consequência promove-se o incremento contínuo do confinamento e capacidade de carga à medida que se consolida o solo circundante.

Assim, o aspecto chave para a formação das colunas de brita compactada consiste em garantir um nível mínimo de resistência ao corte não drenada do solo a tratar. Num meio sem nenhuma resistência ao corte, como a água, com $c_u \approx 0$ kPa, em lugar de um elemento tipo coluna depositar-se-ia toda a brita em profundidade adoptando a forma cónica típica de armazenamento de material a granel. Pelo contrário, num solo com $c_u \geq 5$ kPa, é possível a formação das colunas. A Figura 8 apresenta um esquema ilustrativo desta situação.

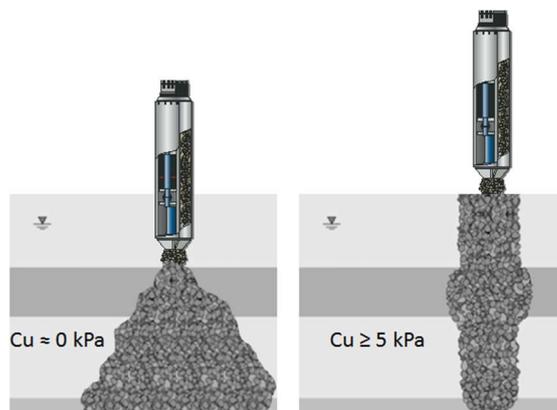


Figura 8. Formação de colunas de brita.

Perlea (2000) e Wehr (2006) realizaram uma investigação mediante um modelo de laboratório à escala reduzida (1:10) com o objectivo de determinar os valores limites de c_u que permitem a formação das colunas.

Para esta investigação, reproduziu-se um vibrador coberto por um tubo de PVC e ensaiaram-se várias amostras reconstituídas de siltes muito brandos com c_u entre 2 e 5,5 kPa, contidas num depósito de PVC de 29 cm de diâmetro e 60 cm de altura. Na Figura 9 apresenta-se o modelo com o vibrador utilizado, e nas Tabelas 2 e 3 apresentam-se as propriedades dos materiais utilizados na investigação.

Após uma análise prévia, estabeleceu-se como critério de rotura a obtenção de diâmetros de colunas superiores a 2 vezes o diâmetro exterior do tubo PVC que recobre o vibrador. Para comprovar estes diâmetros injectou-se uma calda de água-cimento nas colunas, a fim de preservar a sua configuração aquando da escavação das mesmas (Figura 10). Adicionalmente, a investigação incluiu o estudo de possíveis roturas por liquefacção dos siltes brandos e sensíveis, devido à forte energia vibratória induzida pelos equipamentos (vibradores).

Os resultados da experiência mostram que nas amostras com c_u de 2 e 3,5 kPa alcançou-se a situação de rotura. Por outro lado nas amostras com c_u de 4 e 5,5 kPa as colunas formaram-se satisfatoriamente sem alcançar a rotura do solo.

Como conclusão deste estudo, e considerando a ampla experiência citada no mesmo, foi possível comprovar um valor limite inferior de c_u de 4 a 5 kPa para permitir a formação das colunas. Este valor limite coincide com o observado na prática habitual dos últimos 20 anos, onde foram empregues diferentes tipos de equipamentos para a execução de vibrosubstituição.

Em muitos casos de tratamento em solos extremamente brandos, a solução mais eficaz consiste na execução das colunas considerando uma ordem de execução de pelo menos 2 malhas de colunas sobrepostas. Este procedimento supõe a execução de uma primeira malha de colunas com aproximadamente o dobro da separação entre eixos de colunas comparado com a separação da malha final, de modo que o solo adquira um incremento de confinamento antes da execução da segunda malha intercalada na primeira.

Tabela 2. Propriedades das amostras de solo

Amostras	1	2	3	4
Teor em água, W%	29,0	30,5	32,0	35,5
c_u (kPa)	5,5	4,0	3,5	2,0

Tabela 3. Propriedades das colunas

Material	d_{50} mm	e_{max}	e_{min}
Arena grossa, de sílica, uniforme	0,77	0,875	0,434



Figura 9. Formação de colunas de brita.



Figura 10. Formação de colunas de brita.

5 - EXPERIÊNCIA EM SOLOS MUITO BRANDOS

Na Tabela 4 apresentam-se algumas das referências mais relevantes sobre a aplicação de colunas de brita em solos muito brandos, compilada de acordo com a experiência do grupo Keller na execução de projectos em vários países e mediante a utilização de diferentes tipos de vibradores profundos na execução de colunas de brita pela via seca e com alimentação interna (bottom feed).

Tabela 4. Referências de aplicação de colunas de brita em solos muito brandos, citados em Wehr (2006).

Referência	C_u (kPa)	Tipo de obra	Localidade, País
Marte et al. (2005)	5-10	Edificação Comercial	Klagenfurt, Austria
Völzke (2001)	11-26	Edificação Industrial	Lübeck-Herrenwyk, Alemanha
Borchert et al. (2004)	5-20	Aterro ferroviário	Mering, Alemanha
Wehr (2006)	12-18	Edificação Industrial	Rethen, Alemanha
Zimmermann, (2003)	4-8	Barragem	Zossen, Alemanha
	4-20		Shah Alam, Malasia
Raju e Hoffmann (1996), Raju (1997)	6-40	Infra-estruturas para estradas	Shah Alam, Malasia
	8-50		Sri Petaling, Malasia
	5-15		Shah Alam, Malasia
Raju (2012)	5-20	Aterro ferroviário	Putrajaya, Malasia
Marte et al. (2005)	5-10	Estrada	Polónia
Martinez (2014)	4-20	Vários projectos infra-estrutura viária e industrial	Huelva e Cádiz, Espanha

Merecem uma especial referência as experiências de aplicação de colunas de brita nas argilas extremadamente brandas e com matéria orgânica (arcilla gyttja) na Suécia, com resistências ao corte não drenada entre 5 e 20 kPa, e sensibilidade entre 10 e 30, segundo referido em Wehr (2008). Figuras 11 e 12.

A partir da experiência nos projectos realizados na Suécia, onde existe o risco de liquefacção de solos muito brandos e sensíveis, assim como através da investigação realizada por Wehr (2006) e Perlea (2000) sobre os limites de c_u para aplicação de tratamentos por colunas de colunas de brita, foi possível identificar os ajustes necessários que devem ser adoptados nos parâmetros de execução a fim de possibilitar a formação das colunas e cumprir com os objectivos de melhoramento considerados; fundamentalmente, é de especial importância o ajuste da frequência de vibração dos equipamentos - vibradores, os tempos de compactação da brita e a activação estática vertical aplicada.

Nos casos mais extremos é necessário instrumentar e auscultar as zonas tratadas a fim de conhecer a evolução dos estados de tensões, pressões intersticiais e resistência do solo tratado durante a execução dos trabalhos.



Figura 11. Colunas de brita na fundação de aterro em argilas muito moles, em Frövifors, Suécia.



Figura 12. Execução de colunas de brita em Frövifors, Suécia.

6 - CONCLUSÕES

Entre as conclusões mais relevantes podem relevar-se as seguintes:

- (a) As colunas de brita realizadas mediante equipamentos de vibração profunda (vibro-substituição) podem aplicar-se em solos extremadamente brandos com resistências mínimas ao corte não drenadas de 5 kPa, de acordo quer com a experiência em obras executadas quer decorrente da análise apresentada.
- (b) O factor limitativo mais importante associado à aplicação de colunas de brita em solos de muito baixa resistência ao corte sem drenagem, consiste na adopção de um método de execução que permita a formação das colunas de brita, para que actuem como drenos verticais e facilitem as condições requeridas de confinamento.
- (c) O comportamento e capacidade de carga final do solo brando tratado com colunas de brita depende em grande medida do processo de consolidação que tenha ocorrido após a execução das colunas, e/ou da velocidade de aplicação das cargas, o qual supõe a consideração de condições drenadas ou não drenadas.

- (d) No caso de solos extremadamente brandos ($c_u \approx 5$ kPa) e com o nível freático próximo à superfície, deve considerar-se a execução das colunas mediante 2 malhas de colunas sobrepostas; a qual supõe a execução de uma primeira malha de colunas com aproximadamente o dobro da separação entre eixos de colunas comparado com a separação da malha final, de modo a que o solo adquira um incremento de confinamento antes da execução da segunda malha.
- (e) Nos casos mais extremos, com presença de solos sensíveis com certo potencial de liquefacção, é necessária a instrumentação e auscultação das zonas tratadas a fim de conhecer a evolução dos estados de tensão, pressões intersticiais e resistências do solo tratado durante a execução dos trabalhos.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se encarecidamente ao Dr.-Ing. Jimmy Wehr, dos serviços centrais do Keller Group, pela sua contribuição na resenha de informação reunida para a apresentação deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Barksdale, R.D. e Bachus, R. C. (1983). Design and Construction of Stone Columns Vol. I and II, Report No. FHWA/RD-83/026, Washington, D.C.
- Bergado, D.T. e Lam, F.L. (1987). Full scale load test of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand in the soft bankok clay. *Soils and Foundations* 27, 87-93.
- Carvajal E., Vukotić G., Castro J. e Wehr W. (2013). Comparison between theoretical procedures and field test results for the evaluation of installation effects of vibro-stone columns. Proc. International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering. Rotterdam. GEO-INSTALL.
- Greenwood, D.A. (1970). Mechanical Improvement of soils below ground surface. Conference on Ground Engineering, Institution of Civil Engineers, London. Pp 11-22.
- Guía de Cimentaciones (2002). Guía de cimentaciones de obras de carretera. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, España.
- Hughes, J.M.O. e Withers, N.J. (1974). Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns. *Ground Engineering*, 7(3), 42-49.
- Herle I., Wehr J. e Arnold M. (2007). "Influence of pressure level and relative density on friction angle of gravel in vibrated stone columns". Pfahl Symposium 2007. TU Braunschweig, 84.
- Kirsch K. e Kirsch F. (2010). "Ground Improvement by Deep Vibratory Methods." Spon Press.
- Perlea V., Liquefaction of cohesive soils, soil dynamics and liquefaction 2000, ASCE geotechnical special publication no. 107, 58-76, 2000
- Mitchell, J.K. (1981). Soil improvement state of the art Report. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Estocolmo, Vol. 4, pp. 509-565.
- Wehr, W. (2006). The undrained cohesion of the soil as criterion for the column installation with a depth vibrator. International Symposium TransVib, Paris. 157-162.
- Wehr, W. (2008). Stone columns in very soft clays in Sweden. 11th Baltic sea geotechnical conference, "Geotechnic in Maritime Engineering". Gdansk, Poland. 119-122.