

Análise estatística e de correlação dos ensaios SPT e CPT no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília

Danilo Vítor dos Santos Mützenberg

Pesquisador, Universidade de Brasília, Brasília, Brazil, danilo.mutz@gmail.com

RESUMO: O SPT (*Standard Penetration Test*) é o ensaio de campo mais comumente utilizado no Brasil por sua facilidade de realização e baixo custo. Por outro lado, o *Cone Penetration Test* (CPT) está se tornando mais popular no País e é um ensaio utilizada amplamente em diversos países por trazer maior quantidade de dados sobre o solo estudado. A transição da utilização do SPT para o CPT vem acontecendo ao longo dos anos e correlações entre essas medidas foram criadas. Questionou-se, portanto, a utilização das correlações existentes para o solo de Brasília. Para esse fim, foi analisada uma correlação com base em ensaios SPT e CPT realizado no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília. Esses dados foram tratados estatisticamente, verificando semelhanças na variação dos dois tipos de ensaio com a profundidade e para o mesmo tipo de solo. Com isso, criou-se uma correlação entre os dados, obtendo-se uma linear e uma exponencial, sendo essas testadas estatisticamente. A partir desta análise, foi feita a comparação com correlações de outros autores, verificando que elas se mostraram ligeiramente diferentes, revelando a importância de fazer correlações próprias para o solo da região.

PALAVRAS-CHAVE: SPT, CPT, Correlações, Solo Colapsível.

ABSTRACT: The Standard Penetration Test is the most used in-situ test in Brazil because of its low price and simplicity. However, the Cone Penetration Test is becoming more popular in Brazil and it is widely used internationally for the larger amount of data obtained about the studied soil. The transition from SPT to CPT is occurring along the years and correlations between these tests were created. This article questions the use of the existing correlations for Brasilia's soil. Therefore, correlations based on SPT and CPT tests at the University of Brasilia's Geotechnical Experiment Field were created. The data was treated and statistically studied, being observed that both tests had similar behavior along the soil depth. With that, it was obtained one linear correlation and one exponential correlation. Then, further analyses were done, comparing the obtained correlations to other's authors correlations for similar soils, and it was verified that they were slightly different, revealing the importance of creating proper correlations specifically to the regional soil.

KEYWORDS: SPT, CPT, Correlations, Collapsible Soil.

1 Introdução

O SPT (*Standard Penetration Test*) é o ensaio de campo mais comumente utilizado no Brasil por sua facilidade de realização e baixo custo e a maioria dos projetos de fundação utilizam o número de golpes do SPT (N_{spt}) para o seu cálculo. Porém, esse ensaio é alvo de diversas críticas por seu grande potencial de variabilidade dos resultados, uma vez que esses possuem uma grande dependência do operador e do estado do equipamento utilizado.

Por outro lado, o *Cone Penetration Test* (CPT) está se tornando mais popular no Brasil, tendo em vista que ele é um ensaio com menor variabilidade causada pelo operador (Kara et al., 2010, apud Suzuki et al. 1998) e é um ensaio utilizado amplamente em diversos países por trazer maior quantidade de dados sobre o solo estudado com a realização de um ensaio.

A transição da utilização do SPT para o CPT vem acontecendo ao longo dos anos e correlações entre essas duas medidas foram criadas. Na literatura, diversos autores criaram correlações entre esses ensaios para

diversos tipos de solos, como Kara et al. (2010) e Salehzadeh et al. (2011) na Turquia, e Santos (2017) no Brasil.

Contudo, essas correlações foram criadas a partir de análises estatísticas dos solos regionais, podendo não ser válidas para solos de outras localidades. Questiona-se então a utilização dessas correlações para o solo de Brasília.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma correlação entre o SPT e o CPT para o solo de Brasília a partir de uma análise estatística de dados obtidos em ensaios realizados na região. Será utilizado, portanto, a metodologia de correlação estatística de duas variáveis, com o intuito de estudar cada etapa do procedimento, verificando possíveis diferenças metodológicas entre autores.

O banco de dados para a análise foi criado a partir de ensaios retirados de publicações de autores que realizaram esses ensaios em Brasília. Limitou-se uma região na qual os ensaios foram realizados tendo em vista a retirada da variabilidade espacial do solo ao se comparar os ensaios, decidindo-se analisar uma área em específico: o Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília (CEGUnB).

2 Ensaios SPT e CPT

Na integridade, foram obtidos dados de 16 ensaio SPT realizados por Sales (2000), Guimarães (2002), Mascarenha (2003), e Mota (2003), e 17 ensaios CPT realizados por Mota (2003), todos realizados no CEGUnB.

A partir desses ensaios, Mota (2003) fez uma classificação do solo da região de acordo com a profundidade, mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do solo do CEGUnB com o valor médio de N_{spt} e o valor médio de q_c por profundidade (Mota, 2003, modificado)

Profundidade	Classificação	N_{spt} médio	q_c médio
1	Areia argilosa com silte vermelha	8,7	1,25
2		7,8	0,67
3		4,9	0,73
4	Argila arenosa com silte vermelha	5,8	0,82
5		6,6	1,10
6		9,7	1,60
7		10,4	2,32
8	Silte variegado a roxo	11,5	3,11
9		13,1	3,74
10		16,8	4,09
11		20,0	4,04
12		17,6	4,64

Podemos ver que o solo foi dividido em três horizontes diferentes, todos contendo argila ou silte. Portanto o solo da região pode ser considerado um solo argiloso. Esse fato será utilizado para comparar as correlações criadas para este tipo de solo com a correlação obtida por este estudo. É importante ressaltar que não foi encontrado o nível d'água até a profundidade de 12m

Do ensaio CPT, foi escolhido estudar apenas a resistência de ponta, q_c , uma vez que esse parâmetro é o que mais se assemelha ao ensaio SPT, sendo também o parâmetro mais comumente correlacionado. Por sua vez, o N_{spt} obtido foi corrigido para a energia de 60% e foi também realizada uma correção quanto às tensões geostáticas. Além disso, foi considerado que todos os ensaios foram realizados no terreno de mesma cota altimétrica.

Realizou-se um estudo estatístico dos dados corrigidos, obtendo uma descrição estatística deles para um melhor entendimento do comportamento e das variações dos resultados de acordo com a profundidade no terreno. A descrição está resumida na Figura 1 e Figura 2.

Nota-se uma semelhança na variação de q_c e do N_{spt} com a profundidade, havendo uma tendência de seus valores médios crescerem com a profundidade. O coeficiente de variação de ambas as variáveis pode ser considerado bastante elevado, oscilando de 20 a 70%. Porém também é possível verificar que a variação desse coeficiente é semelhante para os dois casos.

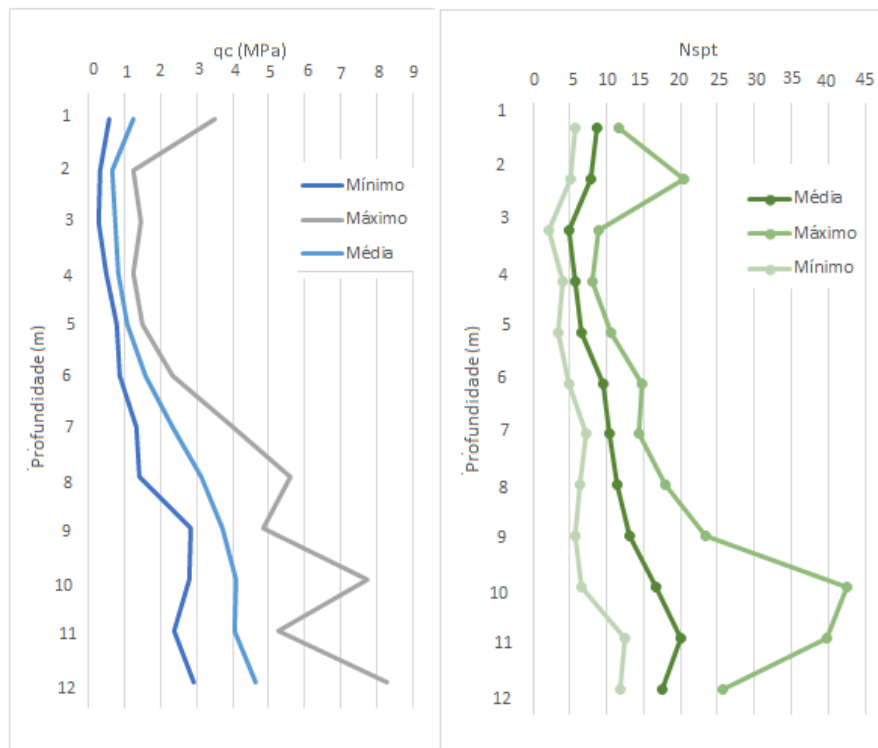


Figura 1. Variação dos parâmetros do SPT e CPT com a profundidade.

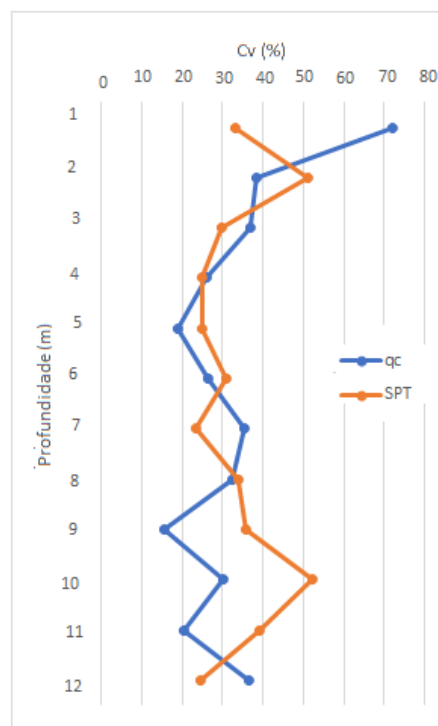


Figura 2. Coeficiente de variação por profundidade do SPT e q_c .

Foi feito também um estudo de aderência dos dados do ensaio de SPT e CPT à distribuição estatística Normal, para verificar se as duas variáveis se comportam da mesma forma. Com isso, foi utilizado o método de Kolmogorov-Smirnov para a realização do teste de normalidade. Os histogramas de cada variável são mostrados na Figura 3 e Figura 4.

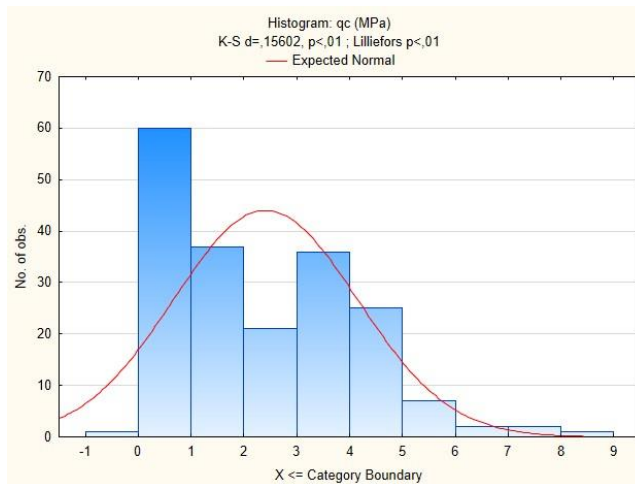


Figura 3. Histograma dos dados de qc.

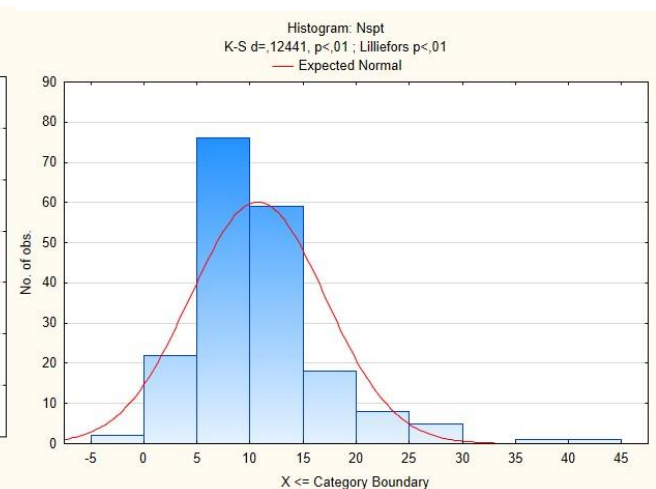


Figura 4. Histograma dos dados de Nspt

Nota-se que o Nspt se encaixou melhor na distribuição Normal em comparação ao qc, porém ambas as variáveis foram aceitas pelo teste realizado.

Com isso, pode-se verificar que tanto o Nspt quanto o qc possuem comportamentos semelhantes ao longo da profundidade e que a variação dos seus dados pode ser considerada como a distribuição normal. Este fato leva a uma forte indicação que é possível realizar uma correlação entre as duas variáveis.

3 Correlação

O processo de correlação se inicia com a realização de um gráfico de dispersão dos pares ordenados formados pelo Nspt e o qc. Desses pontos, calculou-se a equação que correlaciona essas variáveis, escolhendo uma correlação linear. O resultado é mostrado na Figura 5.

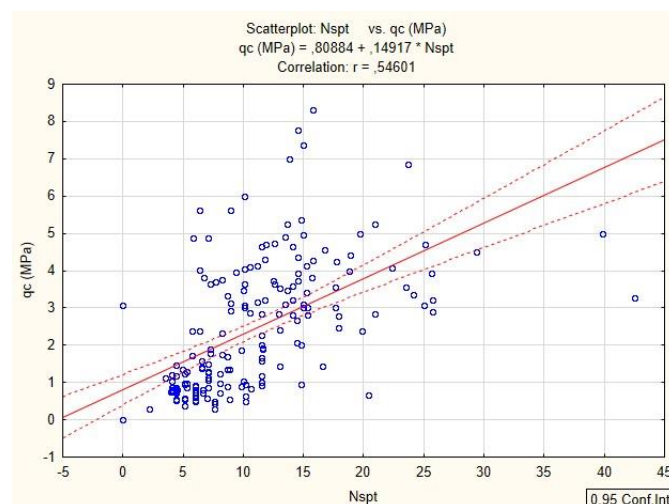


Figura 5. Gráfico de dispersão dos pares Nspt e qc e a correlação linear.

Nota-se pelo gráfico de dispersão que existe uma dispersão muito grande dos dados, principalmente para valores de N_{spt} maiores do que 20 golpes. Porém é possível visualizar uma tendência de crescimento do valor de q_c com o aumento de N_{spt} . A equação obtida pela regressão foi:

$$q_c = 0,80884 + 0,14917 * N_{spt} \quad (1)$$

A regressão foi realizada para um intervalo de confiança de 95%, o qual é mostrado pelas curvas tracejadas da Figura 5, evidenciando como a equação de correlação pode variar nesse intervalo. O valor de r^2 de 0,54, apesar de não ser muito elevado, pode ser considerado satisfatório. Valores semelhantes desse parâmetro foram encontrados por Kara et al. (2010).

O intercepto da equação obtido em função da correlação matemática, apesar de não ter um significado físico, uma vez que N_{spt} nulo teria que dar um q_c nulo, também foi encontrado por Santos (2017) e por Shahri et al. (2014). Uma hipótese é que ele seja decorrente do processo de correção do N_{spt} pela ação do confinamento.

Conclui-se então, que a correlação obtida é satisfatória. Contudo o fato de r^2 não ser tão elevado e do intercepto ter um valor considerável, é possível realizar melhorias na correlação. Dado isto, e com base em correlações de outros autores, decidiu-se realizar uma correlação exponencial com o intuito de verificar possíveis melhorias. Tal correlação é mostrada na Figura 6.

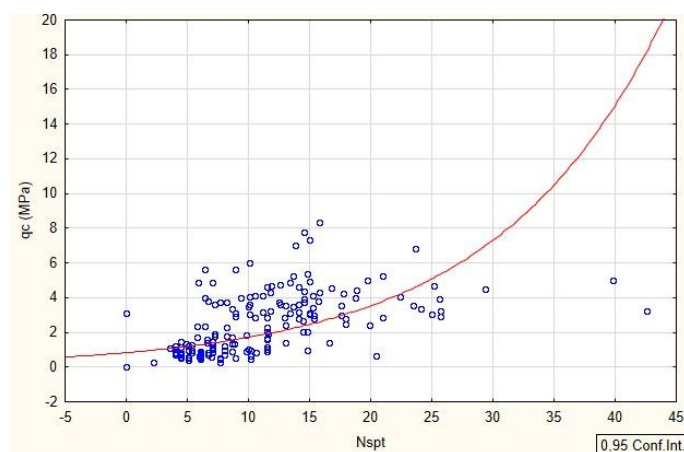


Figura 6. Gráfico de dispersão dos parâmetros N_{spt} e q_c e a correlação exponencial.

A equação obtida para esta correlação foi:

$$q_c = 0,8296 * e^{0,0725 * N_{spt}} \quad (2)$$

A regressão foi realizada novamente para um intervalo de confiança de 95% e foi obtido um r^2 de 0,65. Isto demonstra que esta correlação pode ser considerada mais adequada em comparação com a correlação linear.

4 Comparação com outras correlações

Apesar de não ser completamente correto realizar comparações entre correlações de solos de diferentes regiões, mesmo que elas tenham características semelhantes, é importante averiguar se os coeficientes das equações obtidas são ao menos semelhantes a fim de validar a correlação obtida. Portanto, juntaram-se correlações criadas por diversos autores, mostradas na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. Correlações lineares de N_{spt} e q_c para diferentes tipos de solos obtidas por diferentes autores (Santos, 2017, modificado).

Autor	Tipo de solo	Correlação
Acka (2002)	Areia siltosa	$q_c = 0,44 \times N_{60} + 5,09$
	Silte arenoso	$q_c = 0,28 \times N_{60} + 1,75$
Shahri et al. (2014)	Areia siltosa	$q_c = 0,534 \times N_{60} - 0,476$
	Silte arenoso	$q_c = 0,563 \times N_{60} - 0,366$
	Argila	$q_c = 0,253 \times N_{60} + 0,183$
Lingwanda et al. (2014)	NSPT entre 20 e 90 golpes	$q_c = 0,15 \times N_{60} + 7,49$
Jarushi et al. (2015)	Areia siltosa	$q_c = 0,12 \times NSPT + 5,0$
	Areia argilosa	$q_c = 0,06 \times NSPT + 5,7$
	Areia siltosa a argilosa	$q_c = 0,22 \times NSPT + 2,6$

Percebe-se pelas diferentes correlações que, apesar da mesma classificação do solo, as equações podem ser significativamente diferentes, evidenciando que para solos de diferentes regiões deve-se utilizar diferentes correlações. Tal fato pode ter decorrido também pelos diferentes métodos de cálculo e diferentes quantidades de dados utilizados para construí-las. Faz-se necessário então verificar a origem de uma correlação ao se utilizar uma.

Das equações mostradas, o intercepto da correlação para o solo de Brasília não foi o maior encontrado, enquanto o coeficiente angular também está dentro da faixa de valores das outras equações. Isso confirma a validade da correlação aqui construída.

A equação que mais se aproxima, foi a de Shahri et al. (2014) para solo argiloso, coincidindo com o tipo de solo da região onde foram realizados os ensaios utilizados para construir a correlação desta pesquisa. Além disso, percebe-se que, quanto mais arenoso for o solo, maior o intercepto da equação da correlação.

Tabela 3. Correlações exponenciais de N_{spt} e q_c para diferentes tipos de solos obtidas por diferentes autores (Santos, 2017, modificado).

Autor	Tipo de solo	Correlação
ASCI (2014)	Silte arenoso	$q_c = 1,938 \exp(0,00989 \times N_{60})$
	Silte argiloso	$q_c = 0,3193 \exp(0,05133 \times N_{60})$
	Argila siltosa	$q_c = 0,4513 \exp(0,02096 \times N_{60})$

Considerando a correlação exponencial, a equação obtida se aproxima das equações mostradas por ASCI (2014). Os coeficientes obtidos estão dentro do intervalo dos coeficientes das equações apresentadas e a equação se aproxima da equação para solos do tipo silte argiloso, o qual é similar à classificação do solo do CEGUnB.

Novamente, observa-se a variação dos coeficientes das equações para os diferentes tipos de solos, notando-se que, para um solo arenoso, o intercepto é maior do que para o solo siltoso ou argiloso, comportamento similar à correlação linear. Isso evidencia que, independentemente do método utilizado, o fenômeno físico ainda se mantém.

5 Conclusões

Dada a necessidade da construção de correlações entre os ensaios SPT e CPT, o estudo destas é muito importante para a verificação da possibilidade de utilização de uma certa correlação para um solo de uma determinada região. Com isso tornou-se notável a utilidade da construção de uma correlação para o solo de Brasília.

Partindo de dados obtidos de ensaios realizados no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília, foi feita então uma correlação linear e uma correlação exponencial relacionando o N_{spt} e o q_c .

A correlação linear obtida, apesar de ter um coeficiente de correlação apenas razoável, mostrou-se similar a equações obtidas por outros autores para um solo com características parecidas. Por outro lado, ainda se mostraram ligeiramente diferentes por apresentarem coeficientes distintos, revelando a importância de fazer correlações próprias para o solo da região e não utilizar correlações originadas de solos de outras localidades.

Por sua vez, a correlação exponencial obtida resultou em um coeficiente de correlação maior, podendo ser considerada mais coerente do que a correlação linear. Além disso, a equação aferida é também similar às equações exponenciais da literatura.

Dado isso, pode-se considerar que as correlações realizadas neste trabalho são válidas para a transformação do parâmetro N_{spt} para o parâmetro q_c nos solos de Brasília semelhantes ao solo do CEGUnB. Contudo, essas podem ser ainda melhoradas ao se realizar os procedimentos com um maior banco de dados ou ainda com a utilização de métodos mais complexos para correlacionar variáveis

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cunha, E. E. S. 2016. Correlações entre resultados de ensaios SPT e CPT para solo arenoso sedimentar. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 128p.
- Guimarães, R. C. 2002. Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-090A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.
- KARA, O., GÜNDÜZ, Z. 2010. Correlation between CPT and SPT in Adapazari, Turkey. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, At California, v. 2.
- Mascarenha, M. M. A. 2003. Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-098A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- Mota, N. M. B. 2003. Ensaios Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.
- Pérez, R.F. 2017. Inclusões rígidas para o controle de recalques nos solos colapsáveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-284/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160 p.
- Sales, M. M., 2000. Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD/002A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 229p.
- Santos, M. D. 2017. Correlações entre sondagem de simples reconhecimento e resultados de ensaios de campo (SPT, CPT, DP) para diferentes subsolos arenosos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 174p.
- Silva, M. T. M. G. 2009. Metodologia para Determinação de Parâmetros para Solos Não Saturados utilizando Ensaios com Umidade Conhecida. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.
- Sousa, L. C. M., 2003. Estudo experimental do comportamento de sapatas assente em solo poroso reforçado. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-106A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 133p.