

# Estudo da Resistência à Compressão Simples de um Solo Argiloso Cimentado e Contaminado

José W. Jiménez Rojas

Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, Brasil, jose.rojas@unipampa.edu.br

Karla Salvagni Heineck

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 00016525@ufrgs.br

Kelly A. Liesenfeld

Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, Brasil, kellyliesenfeld1@gmail.com

Leonardo R. Silva

Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, Brasil, leonardorosa.esa@gmail.com

Mayara B. Leão

Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, Brasil, mayara\_leao@live.com

Milene Priebe e Silva

Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, Brasil, milene.priebe@gmail.com

**RESUMO:** Este trabalho tem por objetivo analisar a influência da quantidade de cimento, da porosidade, da umidade de moldagem e do contaminante sobre o comportamento físico de um solo argiloso artificialmente cimentado. O programa experimental consistiu em caracterizar os materiais utilizados, analisar fisicamente a mistura solo-cimento-contaminante, através de ensaios de resistência à compressão simples. O contaminante utilizado nesta pesquisa foi o resíduo borra oleosa ácida, oriundo de uma refinaria que realiza o re-processamento de óleos lubrificantes. Para a obtenção dos parâmetros de moldagem (peso específico máximo seco -  $\gamma_{d_{máx}}$  e umidade ótima -  $w_{ótima}$ ) do solo natural e das misturas solo/cimento e solo/cimento/contaminante, foram realizados ensaios de compactação com energia Proctor normal, intermediária e modificada. Os resultados, quanto à caracterização, apresentaram um material argiloso, oriundo de rochas riodacitos; quanto à resistência à compressão simples observou-se que a quantidade de cimento exerceu um efeito de acréscimo de resistência do material. Verificou-se que o aumento da massa específica aparente seca influenciou no ganho de resistência para um mesmo teor de cimento adotado, sendo que o acréscimo de resistência foi maior para teores de 20% de cimento, quando comparado com teores de 5%. Concluiu-se que a quantidade de cimento e a diminuição da porosidade ocorrida pela maior densificação influenciam em ganho de resistência e menor consumo de cimento. A variação de umidade de moldagem, mantendo-se constante o peso específico aparente seco, afetou a resistência à compressão simples do solo cimentado contaminado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo-Cimento, Solo-contaminado, Argila, Resistência.

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de solidificação/estabilização ou encapsulamento vem se tornando uma importante alternativa de tratamento para a

disposição de resíduos perigosos em aterros e controle de áreas contaminadas, pois provê o melhoramento das características físicas e toxicológicas do resíduo e/ou solo, facilitando o seu gerenciamento de forma segura e eficaz.

Além disso, o custo do processo de solidificação/estabilização tem sido considerado baixo em relação a outras técnicas de tratamento, fator este que tem impulsionado o desenvolvimento desta tecnologia.

Diversos autores relatam que solos cimentados exibem um comportamento mecânico complexo, influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destacam a quantidade de cimento adicionada, a porosidade da mistura e o teor de umidade. Foppa (2005) e Lopes Junior (2011) estudaram e outros autores seguem estudando metodologias de dosagem para projeto das misturas de solo-cimento baseadas em critérios mais racionais, como existe, por exemplo, para o concreto, onde a relação água/cimento desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada.

Atualmente investiga-se a influência do teor de cimento, da porosidade e do teor de umidade de moldagem, sobre a resistência de diversos solos artificialmente cimentados e verificaram a adequação do uso das relações água/cimento, vazios/cimento, água/cal e vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples. Porém, ressalta-se que nesta pesquisa e tem como diferencial o estudo de um solo contaminado, enfatizando questões ambientais.

O objetivo desta pesquisa consiste em quantificar e verificar a influência da quantidade de cimento, da porosidade e do teor de umidade de moldagem sobre a resistência à compressão simples em um solo argiloso artificialmente cimentado e contaminado.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O Programa experimental foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consistiu na realização de ensaios de caracterização geotécnica do solo e caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. A segunda etapa consistiu em quantificar a influência da quantidade de cimento, da porosidade e do teor de umidade de moldagem sobre a resistência a compressão simples de um solo argiloso contaminado.

Outros fatores importantes para esta pesquisa foram as definições de dosagem e as etapas de preparação dos corpos de prova. Na sequência

deste trabalho está apresentada a metodologia utilizada.

### 2.1 Materiais Utilizados

O solo utilizado nesta pesquisa, denominado PF (Passo Fundo) é proveniente do município de Passo Fundo, estado do Rio Grande do Sul. Neste local realiza-se a extração de rochas para utilização em construção civil e pavimentação. A coleta da rocha possibilitou a caracterização da origem geológica da mesma. O solo foi coletado em um talude próximo à jazida.

Com o objetivo de obter um controle granulométrico sobre as misturas realizadas para a moldagem dos corpos-de-prova, foi adotado um material inerte que tivesse a granulometria muito próxima à do cimento Portland adotado nesta pesquisa. O material escolhido foi a Areia de Osório, que se constitui em um material padrão nos estudos geotécnicos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS).

Como agente cimentante adotou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP\_V ARI), assim como nas pesquisas realizadas por Cruz (2004), Foppa (2005), Lopes Junior (2007) e Rojas (2008). Embora contemplado pela ABNT com uma norma separada do cimento Portland comum, este é na verdade um tipo particular de cimento, o qual apresenta a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação.

O contaminante utilizado nesta pesquisa é o resíduo borra oleosa ácida, oriundo de uma refinaria que realiza o re-processamento de óleos lubrificantes usados, utilizados em veículos automotores. O resíduo apresenta variabilidade quanto a sua composição devido às características da matéria prima utilizada e outros fatores inerentes ao processo de refino.

### 2.2 Definição das Dosagens

Para um controle da distribuição granulométrica, as amostras de solos tratadas com 5%, 10% e 15% de cimento foram completadas com 15%, 10% e 5% de um material inerte, respectivamente, com

granulometria muito próxima à do cimento. Este artifício foi realizado para que todas as amostras de solo/cimento tivessem a mesma relação de finos, ou seja, que todas tenham o mesmo aspecto que as amostras de solo tratadas com o máximo de cimento utilizado neste trabalho, que seria 20% de cimento sobre o peso total dos sólidos. Estas técnicas vêm sendo utilizada por diversos autores, tais como PISSATO e SOARES (2006).

A Figura 1 apresenta um fluxograma esquemático para entender as dosagens utilizadas em relação ao peso dos sólidos, onde o solo sempre foi mantido com valor fixo.

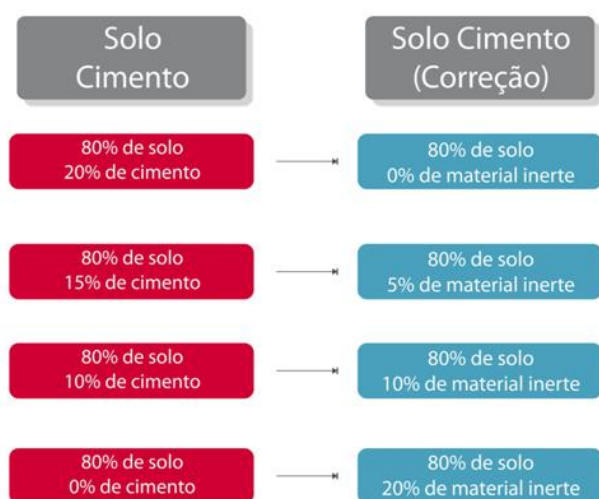


Figura 1. Esquema de correção granulométrica.

Para cada teor de cimento, umidade e densidade avaliada foi adotado um teor de 6% do contaminante (borra oleosa ácida) em relação ao peso do solo. O contaminante era inserido em relação ao peso dos sólidos (solo, cimento e inerte). Este valor foi usado devido às constatações de Rojas (2007), que verificou que esta quantidade de borra oleosa ácida traz prejuízos físicos e químicos às amostras de solos contaminados e encapsulados com cimento Portland.

### 2.3 Preparação dos Corpos-de-Prova

Para os ensaios de resistência à compressão simples foram compreendidas as seguintes etapas: mistura dos componentes, moldagem, acondicionamento e cura. Estas etapas estão apresentadas na Figura 2.



Figura 2. Etapas de preparação de corpos-de-prova.

A mistura foi realizada pela seguinte ordem: [(solo + cimento + areia moída) + borra oleosa ácida] + água (composto contaminado).

No momento da adição do contaminante, cuidados foram tomados para que este não ficasse retido nas luvas ou recipiente de mistura, precauções também foram tomadas no sentido de se evitar, ao máximo, a perda de umidade por evaporação. A mistura foi realizada manualmente em recipientes de aço inox e com auxílio de espátulas. Todos os materiais foram pesados com resolução de 0,01 gf.

### 2.4 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram os procedimentos das normas NBR 12770 e NBR 12025. As amostras foram moldadas em triplicata para cada dosagem. Antes do rompimento, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 4 horas. A prensa utilizada para a ruptura dos corpos de prova é da marca Wykeham Farrance, adaptada com anel dinamométrico de 50 KN, previamente calibrado. A velocidade de deformação utilizada é de 1,14mm/min.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Caracterização do Solo

A caracterização do solo envolveu os seguintes parâmetros geotécnicos: granulometria por sedimentação e peneiramento, limites de Atterberg e densidade real dos grãos. Foram realizados também ensaios de compactação.

Os resultados da análise granulométrica evidenciam a predominância da fração argilosa (62%). O silte apresenta 22% da composição total, seguido de 16% de areia.

Para a determinação da massa específica real dos grãos foi utilizada 60g de solo (passante na peneira #4). Seguindo os passos descritos pela NBR 6508 (ABNT, 1984) a densidade real dos grãos calculada foi de 2,81g/cm³.

A Figura 3 apresenta a curva granulométrica obtida para o solo PF com o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio). Para o solo contaminado e solo cimento não foi realizado ensaio granulométrico.

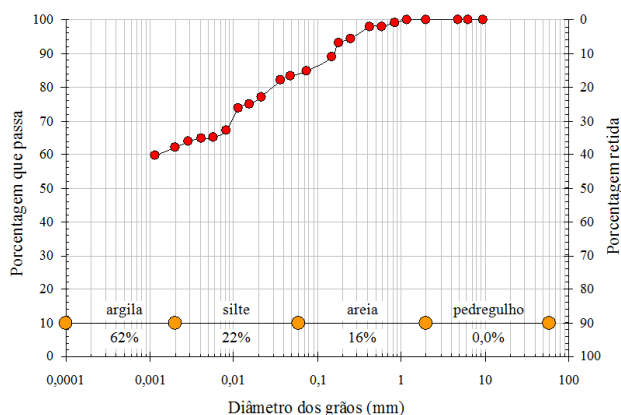


Figura 3. Distribuição granulométrica do solo PF.

A Tabela 1 apresenta os valores de limites de Atterberg obtidos para a amostra de solo natural.

Tabela 1. Limites de Atterberg e atividade coloidal.

| Parâmetros                  | Valores médios |
|-----------------------------|----------------|
| Limite de Liquidez (LL)     | 40 %           |
| Limite de Plasticidade (LP) | 21 %           |
| Índice de Plasticidade (IP) | 19 %           |
| Índice de Atividade (IA)    | 0,36           |

### 3.2 Ensaios de Compactação

Foram realizados ensaios de compactação para energias Proctor normal, intermediário e modificado. A Figura 4 apresenta as curvas de compactação para o solo de Passo Fundo, as curvas de saturação e os pontos de moldagem.

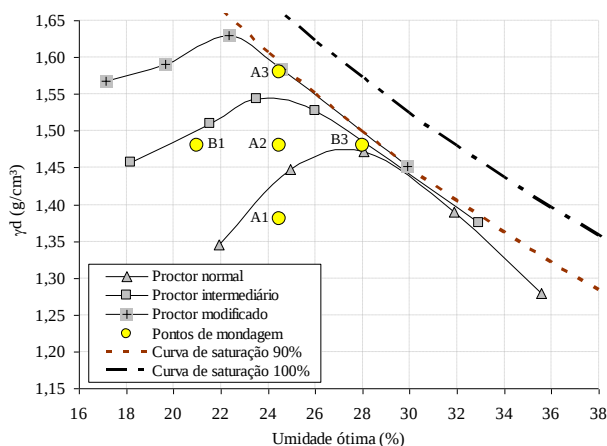


Figura 4. Curvas de compactação e pontos de moldagem.

É possível verificar na figura 4 que os pontos de moldagens foram divididos em linha A, pontos (A1, A2 e A3) e a linha B, pontos (B1, A2 e B3). A Tabela 2 apresenta os pares massa específica aparente seca e teor de umidade para os pontos de moldagem adotados.

Tabela 2. Pontos de moldagem utilizados para o solo PF.

| Pontos de Moldagem |                                              |                        |
|--------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| Ponto              | $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | w <sub>ótima</sub> (%) |
| A1                 | 1,38                                         | 24,50                  |
| A2                 | 1,48                                         | 24,50                  |
| A3                 | 1,58                                         | 24,50                  |
| B1                 | 1,48                                         | 21,00                  |
| B3                 | 1,48                                         | 28,00                  |

### 3.3 Resistência a Compressão Simples

Na Figura 5 são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples do em função do teor de cimento. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $w=24,5\%$ ).

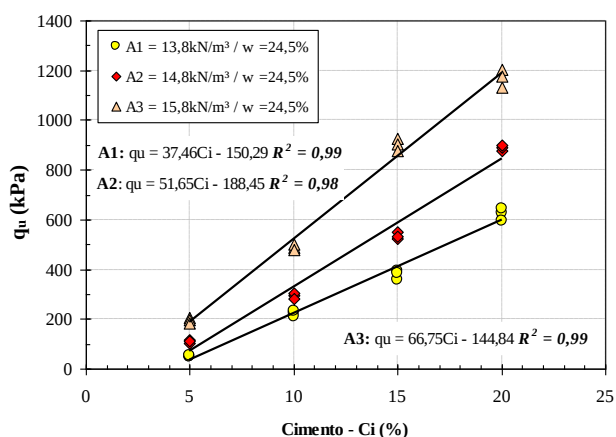


Figura 5. Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cimento (umidade fixa).

Pode-se observar que a quantidade de cimento exerce um efeito de acréscimo de resistência à compressão simples do material. Verifica-se que o aumento da massa específica aparente seca influencia no ganho de resistência para um mesmo teor de cimento adotado, sendo que o acréscimo de resistência é maior para teores de 20% de cimento, quando comparado com teores de 5%, além disso, constata-se que a resistência à compressão simples aumenta com o aumento da quantidade de cimento.

Na Figura 6 são apresentadas as curvas de variação da resistência à compressão simples em função do teor de cimento. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca, porém diferentes teores de umidade, conforme pode ser visualizado graficamente ( $\omega=21\%$ ,  $24,5\%$  e  $28\%$ ).

Verifica-se que o teor de umidade influencia na resistência a compressão simples, sendo que para amostras com teores de aproximadamente  $21\%$  a resistência aumenta com o teor de cimento, porém é menor que as amostras com teores de umidades maiores.

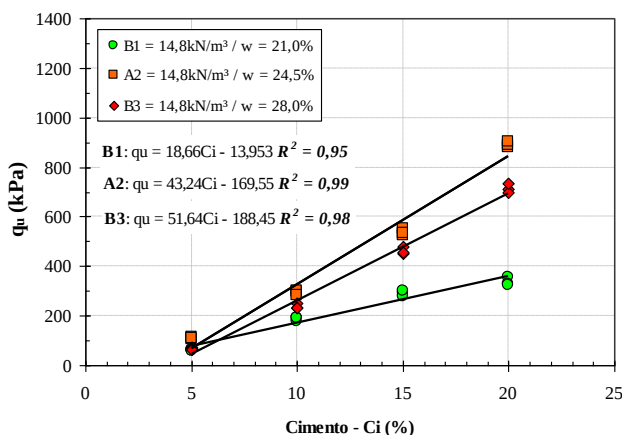


Figura 6. Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cimento (umidade variável).

Verifica-se que a eficiência da cimentação é maior nas misturas mais próximas à umidade ótima, devido à existência de um número maior de contatos e, conseqüentemente, a maior possibilidade do cimento promover a união das partículas nesses contatos.

Na Figura 7 estão apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade do solo-cimento-contaminante compactado. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cimento e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=24,5\%$ ).

Independentemente da quantidade de cimento utilizado, a redução na porosidade do material promove ganho de resistência. A redução de menos de dez pontos percentuais na porosidade do material aumentou aproximadamente 6 vezes a resistência à compressão simples do solo-cimento.

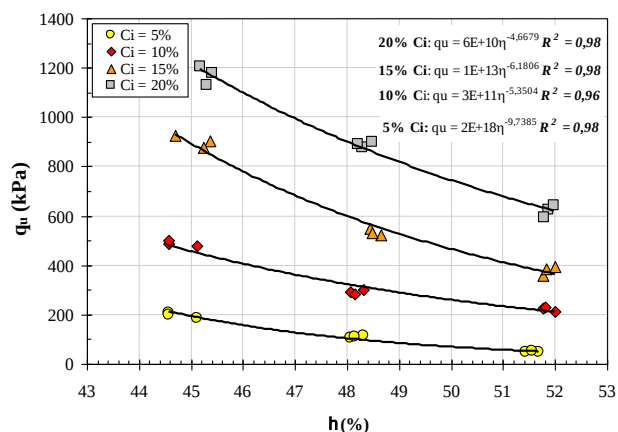


Figura 7. Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cimento (linha A).

A Figura 8 apresenta a relação de umidade versus a resistência à compressão simples. Todos os corpos de prova apresentados possuem o mesmo peso específico, teores diferentes de umidade ( $\omega=21\%$ ;  $24,5\%$  e  $28\%$ ) e quantidades de cimento variadas.

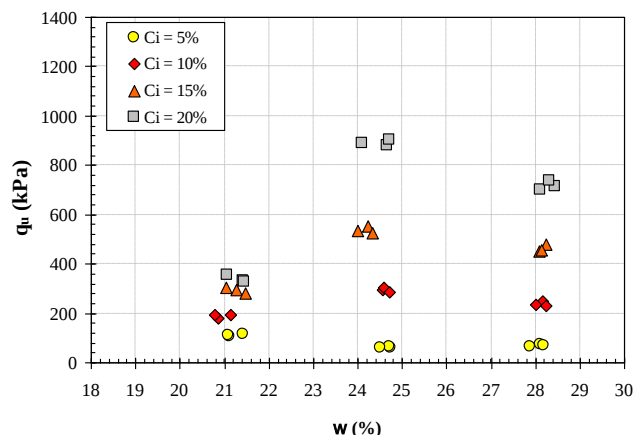


Figura 8. Variação da resistência à compressão simples versus à umidade de compactação (linha B).

É possível observar que o aumento de umidade para o teor de  $5\%$  não apresentaram resultados que influenciam a resistência à compressão simples, porém, para resultados de  $10\%$ ,  $15\%$  e  $20\%$ , houve um acréscimo de resistência, sendo que o aumento é maior para o teor intermediário de umidade ( $24,5\%$ ). Observando-se a curva de compactação é possível estabelecer uma relação, pois o teor de umidade que apresenta maior resistência a compressão simples está muito próximo ao teor de umidade ótima, ou seja, os menores índices de vazios, para uma dada energia de compactação.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados apresentados, bem como da avaliação da influência das variáveis investigadas sobre a resistência a compressão simples em um solo argiloso artificialmente cimentado e contaminado, foram estabelecidas as seguintes considerações finais:

Quanto a quantidade de cimento, verificou-se que a adição de cimento promoveu ganhos substanciais de resistência no material. A taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas, indicou que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas.

Quanto a porosidade, verificou-se que independente da quantidade de cimento adicionada ao solo, a redução na porosidade do material compactado promoveu ganhos substanciais de resistência. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

Quanto a umidade, verificou-se que a variação de umidade de moldagem, mantendo-se constante o peso específico aparente seco, afetou significativamente a resistência à compressão simples do solo cimentado contaminado. Em geral, ocorreu um aumento de resistência com o teor de umidade até aproximadamente um valor ótimo, a partir do qual a resistência passa a diminuir. Destaca-se que a variação da umidade afetou significativamente a resistência para os teores de 10%, 15% e 20% de cimento.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor gostaria de registrar os agradecimentos ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Solo - Determinação da massa específica aparente*. NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *Solo-cimento – Ensaios de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos*. NBR 12025. Rio de Janeiro, 1986.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Solo coesivo -*

*Determinação da resistência à compressão não confinada*. NBR 12770. Rio de Janeiro, 1992.

- Cruz, R. C., Knop, A., Heineck, K. S., Consoli, N. C., Encapsulation of a Soil Contaminated by Hydrocarbons – *Symposium International Sur L'amélioration des Sols en Place International/ Symposium on Ground Improvement*. ASEP-GI. Paris, França, 2004.
- Foppa, D. *Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados*. 2005. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Lopes Junior, Luizmar da Silva. *Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Pissato, E.; Soares, L. Utilização de finos pedreira em misturas de solo-cimento: correção granulométrica de um solo argiloso. *Exacta*, São Paulo, v. 4, n.1, p. 143-148, jan./jun. 2006.
- Lopes Junior, Luizmar da Silva. *Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Rojas, J. W. J. *Estudo de Remediação de Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida Utilizando a Técnica de Encapsulamento*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Rojas, J. W. J.; Heineck, K. S.; Flores, J. A. A.; Consoli, N. C. Eficácia da técnica de encapsulamento no tratamento de solo contaminado por resíduo oleoso. In: *IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia e no XI Congresso Nacional de Geotecnia*, 2008, Coimbra Portugal. FCTUC, Polo II, 2008.