

# A Variação do Teor de Umidade de Moldagem e a Influência na Resistência de uma Areia Artificialmente Cimentada

Fernanda Stracke

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, festracke@hotmail.com

Jonatan Garrido Jung

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, jonatan.jung@gmail.com

Eduardo Pavan Korf

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, eduardokorf@gmail.com

Nilo Cesar Consoli

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

**RESUMO:** A utilização de solo cimentado é muito vantajosa quando se torna necessário melhorar a capacidade de suporte de um solo, por exemplo, na aplicação de fundações superficiais ou para estabilizar a base de um pavimento. Nestes casos, a mistura solo cimento pode substituir a necessidade de empréstimo de material e ser economicamente vantajosa. O conhecimento dos fatores que influenciam o desempenho de um solo melhorado é de fundamental importância para ser possível a aplicação da técnica. Pesquisas desenvolvidas por Consoli et al. (2007;2009;2010) trouxeram uma metodologia racional de dosagem para solo-cimento baseada na relação índice de vazios/teor de cimento, a qual pode ser aplicada à resistência à compressão simples e à resistência à tração. Neste contexto, este estudo visa avaliar especificamente a influência do teor de umidade na resistência mecânica de uma areia artificialmente cimentada sob diferentes razões vazios-cimento. O programa experimental realizado foi baseado em ensaios de resistência à compressão simples. Foram avaliados quatro teores de umidade (6%, 8%, 12% e 14%), além de três índices de vazios (0.65; 0.73; 0.81) e quatro teores de cimento (3%; 5%; 7%; 9%). O cimento utilizado por o cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial (CPV) e o tempo de cura foi de 7 dias. Com os resultados obtidos neste trabalho, constatou-se que o teor de umidade de moldagem da mistura solo-cimento tem grande influência sobre a resistência, na medida em que o aumento do teor de umidade reduz a resistência à compressão simples do solo melhorado. Este comportamento foi observado para todos os teores de cimento e índices de vazios testados nesta pesquisa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo-cimento, Resistência à compressão simples, Solo compactado, Razão vazios-cimento.

## 1 INTRODUÇÃO

O reforço de solos utilizando cimento *Portland* é uma prática mundialmente difundida, especialmente como misturas de solo-cimento em camadas compactadas sobre solos de baixa capacidade de suporte. Apesar do habitual uso do cimento *Portland* no melhoramento de solo, não existem metodologias de dosagem baseadas em um critério racional como no caso da

tecnologia do concreto, onde o fator água/cimento desempenha um papel fundamental na avaliação da resistência desejada.

Em trabalhos recentes, a razão solo/cimento foi estudada por numerosos ensaios de laboratório que buscam descobrir a mínima quantidade de cimento que atenda as propriedades desejadas em termos de resistência e durabilidade. Esta abordagem é

provavelmente devida ao fato de que o solo-cimento apresenta comportamento complexo que é afetado por diversos fatores, como por exemplo a quantidade de cimento, a porosidade e o teor de umidade no momento da compactação (CLOUGH et al., 1981; TATSUOKA; SHIBUYA, 1992; HUANG; AIREY, 1998; PORBAHA et al., 2000; HORPIBULSUK et al., 2003; CONSOLI et al., 2003, 2006, 2009, 2010; THOMÉ et al., 2005; DALLA ROSA et al., 2008).

A primeira metodologia de dosagem racional para solo-cimento foi desenvolvida por Consoli et al. (2007) considerando a razão vazios/cimento ( $\eta/C_v$ ), definida como a porosidade da mistura compactada dividido pelo teor volumétrico de cimento, como um parâmetro apropriado para estimar a resistência à compressão simples ( $qu$ ) da mistura de solo-cimento. Ensaio de resistência à compressão simples têm, portanto, sido usados como meio mais conveniente de investigar o efeito de diferentes variáveis na resistência do solo-cimento e para a determinação de metodologias de dosagem.

É de conhecimento geral que diversas variáveis que influenciam o comportamento do solo-cimento. Este trabalho visa avaliar dentre essas variáveis, a umidade de moldagem da mistura. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi quantificar a influência da umidade de moldagem na resistência à compressão simples de um solo arenoso cimentado, para diferentes razões vazios-cimento.

A umidade de moldagem da mistura solo-cimento nunca foi objeto de avaliação em pesquisas anteriores, e este trabalho mostra a importância da consideração deste parâmetro, e a significativa influência do mesmo nos resultados em termos de resistência da mistura solo-cimento.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental realizado neste trabalho foi baseado em ensaios de resistência à compressão simples. Tendo em vista que os materiais utilizados já foram amplamente

caracterizados em outras pesquisas desta universidade, não foram realizados ensaios de caracterização dos materiais. A seguir são descritos os parâmetros dos materiais utilizados neste estudo, conforme ensaios de caracterização realizados por Consoli et al. (2010).

### 2.1 Materiais

A areia utilizada nos ensaios foi obtida da região de Osório, próxima a Porto Alegre no sul do Brasil, sendo classificada (ASTM, 1993) como uma areia fina limpa de granulometria uniforme com partículas arredondadas e densidade real dos grãos 2,65. Análises mineralógicas mostraram que as partículas de areia são predominantemente compostas por quartzo. O tamanho dos grãos corresponde à areia fina com diâmetro médio das partículas (D50) igual a 0,16mm, coeficiente de uniformidade e curvatura 1,9 e 1,2 respectivamente (CONSOLI et al., 2010).

Como agente cimentante, foi utilizado cimento *Portland* de alta resistência inicial (CPV). O rápido ganho de resistência permitiu a adoção de um período de cura de sete dias. A densidade real dos grãos do cimento é 3,15 (CONSOLI et al., 2010).

Foi usada água destilada nos ensaios de caracterização realizados por Consoli et al. (2010) e na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples.

### 2.2 Métodos

#### 2.2.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para os ensaios de compressão simples, foram usados corpos de prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Uma vez estabelecido um dado índice de vazios ( $e$ ), o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) foi calculado conforme a Eq. (1).

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (1)$$

Onde  $\gamma_s$  é o peso específico real dos grãos. Um peso específico aparente seco para um determinado corpo de prova foi então

estabelecido através da massa seca de solo-cimento dividido pelo volume total do corpo de prova. Para manter um valor constante do peso específico aparente seco do corpo de prova, uma pequena quantidade de solo foi substituída por cimento. Como a densidade real dos grãos de cimento (3,15) é maior que a densidade real dos grãos de solo (2,65), para o cálculo do índice de vazios e porosidade, um valor composto para a densidade real dos grãos foi usado, baseado nas porcentagens de solo e cimento usadas nos corpos de prova. A quantidade de cimento para cada mistura era calculada baseada na massa de solo seco e no teor de umidade.

Após medir a quantidade necessária de solo, cimento e água, o solo e o cimento eram misturados até adquirir consistência uniforme. A água era então adicionada, continuando-se o processo de mistura até que uma pasta homogênea fosse criada. Após a mistura do material suficiente para um corpo de prova, a mistura era dividida em três recipientes cobertos para evitar perdas de umidade até a compactação subsequente.

O corpo de prova era então compactado estaticamente em três camadas dentro de um molde cilíndrico tripartido, de modo que cada camada atingisse o peso específico aparente seco desejado. O topo de cada camada era levemente escarificado.

Após o processo de moldagem, o corpo de prova era imediatamente extraído do molde, e seu peso, diâmetro e altura medidos com precisão da ordem de 0,01g e 0,1mm, respectivamente. O tempo utilizado na preparação – mistura e compactação – foi sempre menos de 1h, o que é bastante inferior ao tempo de 3,25h para o início da pega do cimento *Portland* usado. Os corpos de prova eram então colocados dentro de sacos plásticos para evitar variações significativas de umidade. A cura era realizada por seis dias em local com temperatura de  $23^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Os corpos de prova eram considerados apropriados para serem testados se estivessem dentro da seguinte faixa de tolerância para os valores desejados:

- Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ):  $\pm 1\%$ .
- Teor de umidade ( $w$ ):  $\pm 0,5\%$ .
- Dimensões: diâmetro entre  $\pm 0,5\text{mm}$  e altura  $\pm 1\text{mm}$ .

### 2.1.2 Ensaios de resistência à compressão simples

Ensaios de resistência à compressão simples têm sido sistematicamente usados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura com o intuito de verificar a efetividade da estabilização com cimento ou avaliar a importância dos fatores que influenciam na resistência dos solos cimentados. Uma das razões para isso é a experiência acumulada com este tipo de ensaio para concreto. Os ensaios geralmente seguem a NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo simples e rápido, e ainda assim confiável e barato.

Uma prensa automática com capacidade máxima de 50kN e anéis de carga com capacidade de 10kN e 50kN e resoluções de 0,005kN e 0,023kN respectivamente, foram usados para os ensaios de compressão simples.

Após a cura, os corpos de prova eram submersos em um tanque com água por 24 horas para promover a saturação e minimizar a sucção. A temperatura da água era mantida em  $23^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Imediatamente antes do ensaio, os corpos de prova eram removidos do tanque e secos superficialmente com um pano absorvente. Então, o ensaio de compressão simples era realizado e a carga máxima registrada.

### 2.1.2 Programa de ensaios

O programa experimental realizado neste trabalho foi baseado em ensaios de resistência à compressão simples. O programa foi concebido de tal modo a avaliar, separadamente, a influência do teor de umidade, do teor de cimento, da porosidade e da conseqüente razão vazios/cimento na resistência mecânica de um solo artificialmente cimentado.

Foram moldados corpos de prova de solo-cimento com diferentes teores de umidade (6%, 8%, 12% e 14%), diferentes teores de cimento (3%, 5%, 7% e 9%) e diferentes índices de

vazios das amostras (0,65; 0,73 e 0,81). Dois corpos de prova foram moldados para cada combinação de teor de umidade, teor de cimento e índice de vazios. Estas porcentagens foram escolhidas seguindo a experiência brasileira e internacional com solo-cimento (por exemplo, MITCHELL, 1981; CONSOLI et al. 2003, 2006, 2007 e 2009; THOMÉ et al., 2005).

### 3 RESULTADOS

As Figuras (1) a (4) apresentam a resistência à compressão simples como função da razão vazios/cimento ( $\eta/C_v$ ) para os quatro teores de umidade usados nas misturas, os diferentes teores de cimento e porosidades aplicados. A razão vazios/cimento, porosidade ( $\eta$ ) dividido pelo teor volumétrico de cimento ( $C_v$ ), este último expresso como o volume percentual de cimento em relação ao volume total, é definida pela Eq. (2).

$$\frac{\eta}{C_v} = \frac{\left(\frac{V_v}{V_{total}}\right)}{\left(\frac{V_c}{V_{total}}\right)} = \frac{V_v}{V_c} \quad (2)$$

Em que  $V_v$  é o volume de vazios (água + ar) no corpo de prova,  $V_c$  é o volume de cimento do corpo de prova e  $V_{total}$  é o volume total do corpo de prova.

A Figura (1) apresenta o efeito da razão vazios/cimento na resistência à compressão das misturas com umidade  $\omega=6\%$  e pode-se observar uma razoável correlação ( $r^2 = 0,83$ ) para os resultados (Eq. (3)).

$$qu(kPa) = 86160 \left(\frac{\eta}{C_v}\right)^{-1,58} \quad (3)$$

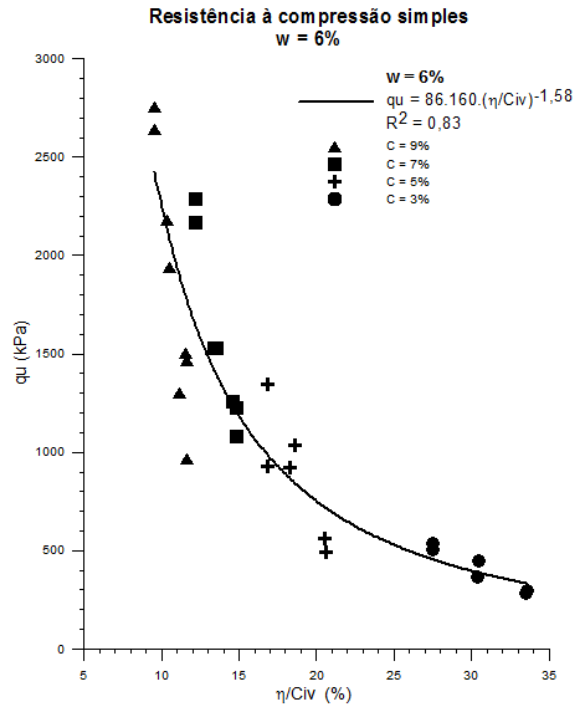


Figura 1. Variação da resistência à compressão simples com a razão vazios/cimento para umidade  $\omega=6\%$

A Figura (2) apresenta o efeito da razão vazios/cimento na resistência à compressão das misturas com umidade  $\omega=8\%$  e pode-se observar uma boa correlação ( $r^2=0,97$ ) para os resultados (Eq. (4)).

$$qu(kPa) = 95513 \left(\frac{\eta}{C_v}\right)^{-1,65} \quad (4)$$

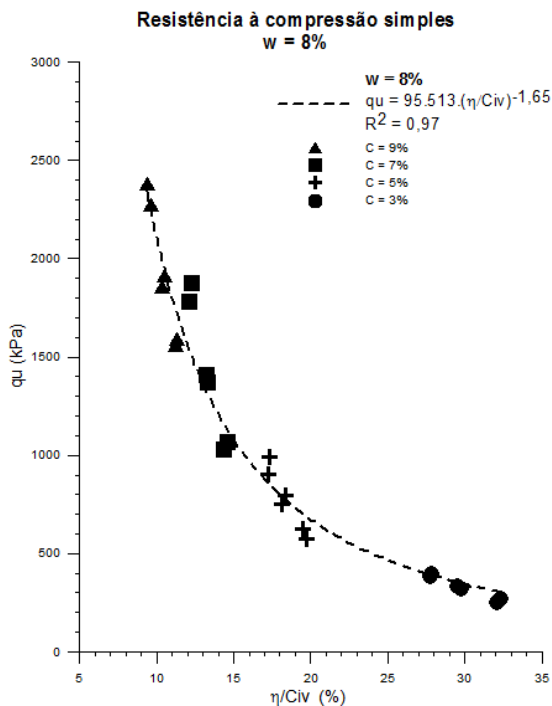


Figura 2. Variação da resistência à compressão simples com a razão vazios/cimento para umidade  $\omega=8\%$ .

A Figura (3) apresenta o efeito da razão vazios/cimento na resistência à compressão das misturas com umidade  $\omega=12\%$  ( $r^2=0,96$ ), e também foi observada boa correlação para os resultados (Eq. (5)).

$$qu(kPa) = 57727 \cdot \left(\frac{\eta}{C_v}\right)^{-1,61} \quad (5)$$

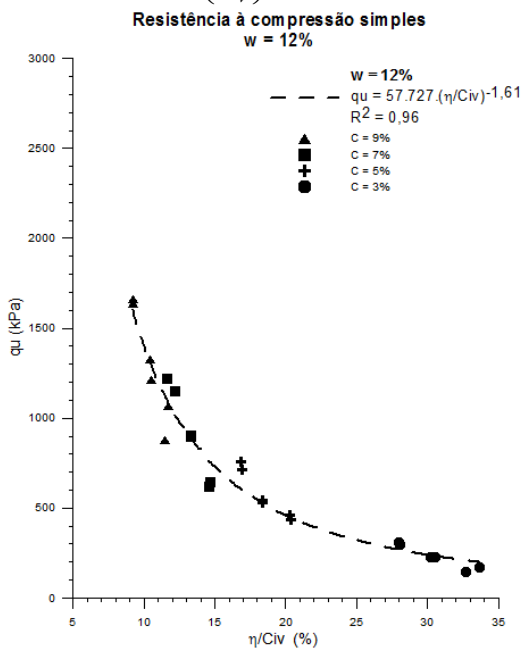


Figura 3. Variação da resistência à compressão simples com a razão vazios/cimento para umidade  $\omega=12\%$

A Figura (4) apresenta o efeito da razão vazios/cimento na resistência à compressão das misturas com umidade  $\omega=14\%$  ( $r^2=0,96$ ), e novamente foi observada uma boa correlação para os resultados (Eq (6)).

$$qu(kPa) = 92694 \cdot \left(\frac{\eta}{C_v}\right)^{-1,70} \quad (6)$$

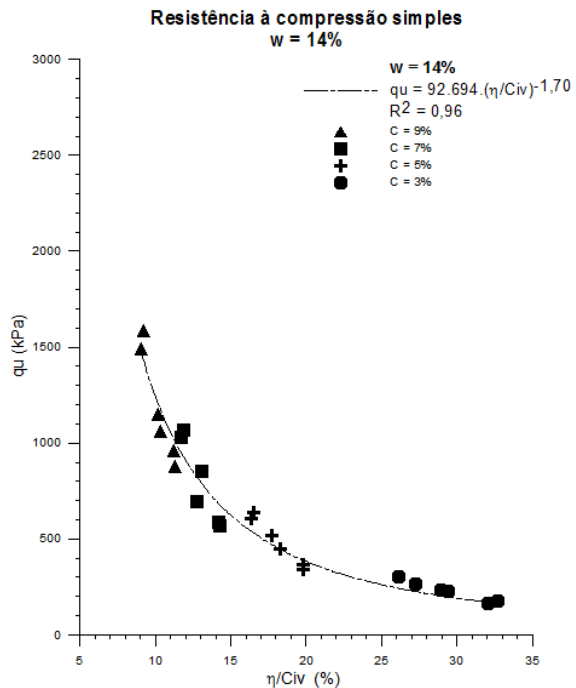


Figura 4. Variação da resistência à compressão simples com a razão vazios/cimento para umidade  $\omega=14\%$

A Figura (5) apresenta as curvas de tendência dos resultados apresentados nas Fig. (1) a (4), com os expoentes das curvas exponenciais ajustados para o expoente médio (1,6). Desta forma, é possível comparar as curvas de tendências dos diferentes teores de umidade de moldagem. A análise da Figura 6 permite verificar a importante influência do teor de umidade na resistência à compressão simples da areia artificialmente cimentada. Pode-se observar que, quanto menor o teor de umidade, maior é a resistência, considerando umidades de moldagem entre 6 e 14%, estudados neste trabalho.

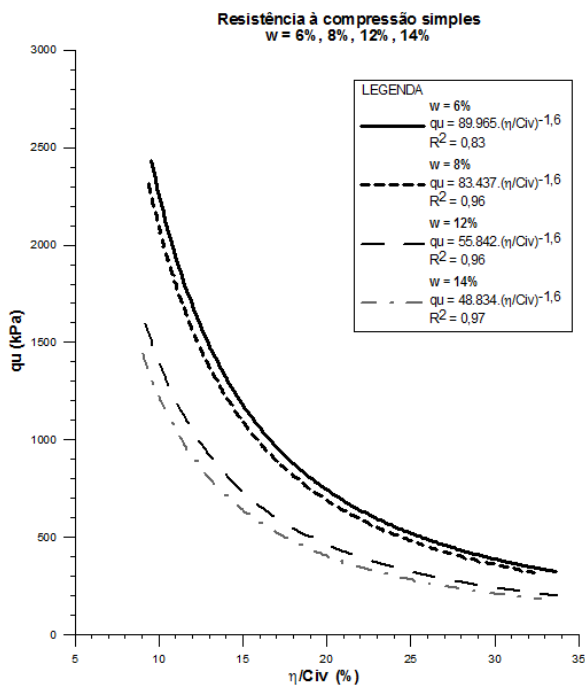


Figura 5. Variação da resistência à compressão simples com a umidade de moldagem da mistura solo-cimento

Sabe-se que a razão vazios/cimento pode ser um índice extremamente útil para os profissionais a partir do qual um engenheiro pode escolher a quantidade de cimento apropriada para obter uma mistura que possua a resistência exigida pelo projeto com custo ótimo. Este trabalho demonstra que, além da razão vazios/cimento, a umidade de execução da mistura solo-cimento desempenha papel fundamental na resistência que será obtida.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que o teor de umidade de moldagem da mistura solo-cimento apresenta grande influência sobre a resistência final do solo melhorado. O aumento do teor de umidade provocou uma queda na resistência à compressão simples da mistura. Em média, uma queda de 2% no teor de umidade provocou um aumento de 10% na resistência à compressão. Este comportamento foi observado para os diferentes teores de cimento (3%, 5%, 7% e 9%), e os diferentes índices de vazios utilizados (0,65; 0,73 e 0,81).

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq-MCT e a CAPES-MEC pelo apoio ao grupo de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. Standard classification of soils for engineering purposes: D 2487. Philadelphia, 1993.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: concreto – ensaios de compressão corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., Rad, N. S. Cemented sands under static loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 107(6), 799-817, 1981.
- Consoli, N. C., Cruz, R. C., Floss, M. F., Festugato, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 136(5), 759-763, 2010.
- Consoli, N. C., Viana da Fonseca, A., Cruz, R. C., Heineck, K. S. Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 135(9), 1347-1353, 2009.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., Heineck, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 133(2), 197-205, 2007.
- Consoli, N. C., Rotta, G. V., Prietto, P. D. M. Yielding-compressibility-strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress. *Geotechnique*, 56(1), 69-72, 2006.
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Prietto, P. D. M. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 129(1), 96-101, 2003.
- Dalla Rosa, F., Consoli, N. C., Baudet, B. A. An experimental investigation of the behaviour of artificially cemented soil cured under stress. *Geotechnique*, 58(8), 675-679, 2008.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T. S. Assessment of strength development in cemente-admixed high water content clays with Abram's Law as a basis. *Geotechnique*, 53(4), 439-444, 2003.
- Huang, J. T., Airey, D. W. Properties of an artificially cemented carbonate sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124(6), 492-499, 1998.
- Mitchell, J. K. Soil improvement – State of the art report. In: *Internacional Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering*, 10., 1981, Estocolmo. Anais... Estocolmo: International Society of Soil

- Mechanics and Foundation Engineering, 1981.
- Porbaha, A., Shibuya, S., Kishida, T. State-of-the-art in deep mixing technology: part III – geomaterial characterization. Ground improvement, Journal of International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 4(3), 91-110, 2000.
- Tatsuoka, F., Shibuya, S. Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. Asian Regional Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering, 9., 1992, Bangkok. Anais... Rotterdam: Balkema, 1992.
- Thomé, A., Donato, M., Consoli, N. C., GRAHAM, J. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. Canadian Geotechnical journal, 42(6), 1569-1584, 2005.