

# Metodologia de Dosagem para Solos Areno-Pedregulhosos Cimentados

Márcio Felipe Floss, M.Sc.

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

Karla Salvagni Heineck, D.Sc.

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

Nilo Cesar Consoli, Ph.D.

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

**RESUMO:** A técnica de solo cimento se apresenta como uma ferramenta eficaz no melhoramento de distintos solos, adequando-os às necessidades da engenharia geotécnica. O tratamento do solo se aplica, por exemplo, na construção de bases para plataformas rodo-ferroviárias. Dessa forma, o presente estudo visa quantificar a influência da quantidade do cimento e porosidade em relação a resistência mecânica da mistura. Assim, ensaios de resistência à compressão simples foram realizados com o objetivo de obter uma metodologia de dosagem de uma mistura de areia-pedregulho com cimento. Para a formação da mistura artificial, foram utilizados 25% de pedregulho, 10% de areia grossa e 32,5% de areia média e fina, cimento Portland de alta resistência inicial e água destilada. Corpos de prova cilíndricos foram moldados com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, com teores de 1, 2, 3, 5, 7 e 9% de cimento em relação a massa de solo seco. Ensaios de resistência à compressão simples foram realizados após 7 dias de cura em ambiente com temperatura e umidade controlada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mistura Solo/Cimento, Mistura Areia/Pedregulho, Resistência à Compressão Simples.

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de solos com adição de cimento Portland é mundialmente empregado na melhoria dos solos locais. Tal metodologia é amplamente investigada e aplicada como camada de suporte para fundações superficiais, bases para plataformas rodo e ferroviárias, no encapsulamento de solos contaminados e como barreiras de contenção de contaminantes (Ingles e Metcalf, 1972; Dupas e Pecker, 1979; Thomé *et al.*, 2005; Consoli *et al.*, 2007).

No entanto, não são aplicadas metodologias de dosagem com base em critérios racionais, considerando o efeito de diferentes variáveis (por exemplo, quantidade de cimento, porosidade) sobre o solo-cimento, como existe, por exemplo, no caso do concreto.

Consoli *et al.* (2007), desenvolveu pela primeira vez uma metodologia de dosagem para

solo-cimento, com base em critérios racionais, considerando os vazios/cimento ( $\eta/C_{iv}$ ), definido pela porosidade da mistura compactada dividido pelo teor de cimento volumétrico como um parâmetro adequado para avaliar  $q_u$  da mistura de solo e cimento. Porém, essa investigação ocorreu com o uso de um solo residual de arenito da Formação Botucatu. Na sequência, Caberlon (2008), conduziu semelhante análise em amostras com areia de Osório, de granulometria fina.

Assim, não é de conhecimento que ocorram aplicações de metodologias com critérios racionais para materiais granulares. Este estudo visa, portanto, quantificar a influência da quantidade de cimento e da porosidade na resistência de um solo areno-pedregulhoso, bem como avaliar a utilização do índice vazios/cimento para avaliar a sua resistência à compressão simples ( $q_u$ ).

## 2 MATERIAIS DE ESTUDO

### 2.1 Solo Areno-Pedregulhoso

O material utilizado é uma mistura de um solo pedregulhoso e outro arenoso. O solo pedregulhoso foi peneirado e extraído apenas o material retido entre as peneiras com diâmetro da abertura da malha entre 6,30 e 9,50mm, sendo este identificado como pedregulho. O solo arenoso também foi peneirado e dividido em três partes, areia grossa, areia média e areia fina, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Método de confecção da mistura de solo Areno-Pedregulhoso.

Material	Peneira Passante (mm)	Peneira Retida (mm)
Pedregulho	9,50	6,30
Areia Grossa	4,75	2,00
Areia Média	1,18	0,43
Areia Fina	0,30	0,075

As quantidades de cada material granulométrico utilizado para a confecção do solo areno-pedregulhoso, em relação a massa de solo, foi 25% de pedregulho, 10% de areia grossa, 32,5% de areia média e 32,5% de areia fina. O material pode ser visualizado através da figura 1.



Figura 1. Solo areno-pedregulhoso.

O peso específico real dos grãos de 25,1kN/m<sup>3</sup>. O diâmetro efetivo dos grãos é igual a 0,30mm. Os coeficientes de uniformidade e de curvatura calculados são respectivamente 3,33 e 13,33. Os índices de vazios máximo e mínimo são, respectivamente, 0,51 e 0,31. A distribuição granulométrica

resultante da mistura pode ser conferida na figura 2.

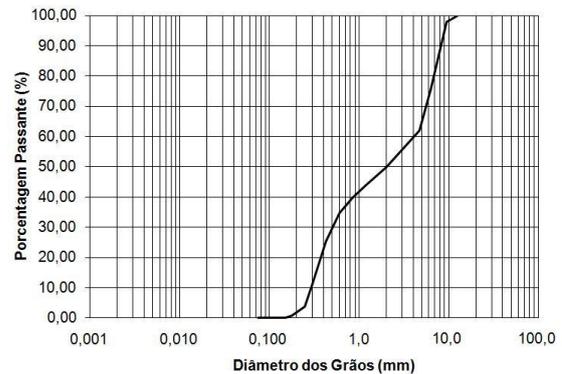


Figura 2. Distribuição granulométrica do solo.

### 2.2 Agente Cimentante

O agente cimentante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). O peso específico real dos grãos do cimento é 31,5kN/m<sup>3</sup>.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Corpos de prova cilíndricos de 20cm de altura e 10cm de diâmetro foram utilizados para os ensaios de compressão simples. Após a pesagem dos materiais (solos, cimento e água), o solo e o cimento eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse uma coloração uniforme. Em seguida, era adicionada a água, continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida. A quantidade de cimento necessária para cada mistura era calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das massas de solo seco e de cimento. A quantidade total de mistura permitia a moldagem de um corpo-de-prova e uma quantidade adicional para determinação do teor de umidade.

Após a mistura dos materiais, a quantidade de material necessária para confecção de um corpo-de-prova era dividida em três partes iguais, armazenadas em recipientes com tampa para evitar a perda de umidade, para posterior compactação. Ao final deste processo, duas

pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade. A média de ambas as cápsulas de umidade medidas era adotada como sendo o teor de umidade de corpo-de-prova. A amostra era, então, compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde metálico tripartido de maneira que cada camada atingisse as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco.

Concluído o processo de moldagem, o corpo de prova era extraído do molde e sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com resolução de 0,01g e 0,1mm respectivamente, e em seguida acondicionado em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos de prova assim obtidos eram, então, armazenados e curados por um período de seis dias em um ambiente com temperatura e umidade controladas (temperatura de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$  e umidade relativa do ar maior que 95%). O corpo de prova pode ser conferido na Figura 3.



Figura 3. Corpo de prova de solo areno-pedregulhoso.

### 3.2 Ensaio de compressão simples

Ensaio de resistência à compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da adição de cimento e verificar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de misturas solo-cimento. Uma das razões para tanto é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio de simples e rápida

execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico.

Para estes ensaios, foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 50 kN, em conjunto com um anel dinamométrico calibrado com capacidade de 50kN e resolução de 0,023kN (2,3kgf). A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14mm por minuto. Os corpos-de-prova, após serem curados por 6 dias na câmara úmida, eram submersos em um tanque com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação e minimizar a sucção. A temperatura da água do tanque era controlada e mantida em  $23 \pm 3^{\circ} \text{C}$ . Imediatamente antes do ensaio de compressão simples, os corpos de prova eram retirados do tanque e superficialmente secos como o auxílio de um tecido absorvente. Procedia-se então a execução do ensaio e anotava-se a carga máxima atingida pelo corpo de prova.

### 3.3 Programa de Ensaio de Compressão Simples

A principal etapa desta pesquisa é o ensaio de compressão simples, cuja elaboração permitiu avaliar a influência do teor de cimento, da porosidade e da relação vazio-cimento sobre a resistência mecânica das misturas de solo-cimento.

O programa de ensaios de compressão simples é apresentado no Quadro 1.

Os pontos de moldagem foram posicionados em uma linha, denominada linha “D”. A característica da linha “D” é apresentar o teor de umidade constante (8%) e variar o índice de vazios inicial.

Quadro 1. Programa de ensaios de compressão simples.

Ponto	$e_0$	W (%)
D1	0,41	8,00
D2	0,47	8,00

Partindo da experiência (internacional e brasileira) com o solo cimento em nível experimental, foram escolhidas as porcentagens de cimento. Cada ponto da linha “D” foi moldado com 6 diferentes porcentagens de cimento (C): 1, 2, 3, 5, 7 e 9%.

Com o objetivo de diminuir a dispersão características dos ensaios de compressão simples e, dessa forma, aumentar a confiabilidade dos resultados, três corpos de prova foram moldados para cada ponto de moldagem e teor de cimento, totalizando assim, 36 amostras.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Efeito do teor de cimento

Na figura 3 são apresentados as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento da mistura. Cada curva representa um índice de vazios, sendo todos os pontos moldados com teor de umidade de 8%.

Observa-se, através da figura 4, o acréscimo da resistência à compressão simples em função do aumento do teor de cimento da mistura. Verifica-se também que o aumento da resistência é inversamente proporcional ao aumento do índice de vazios, devido ao fato das amostras com menor volume de vazios haver um contato maior entre as partículas do solo e o cimento e devido a compactação.

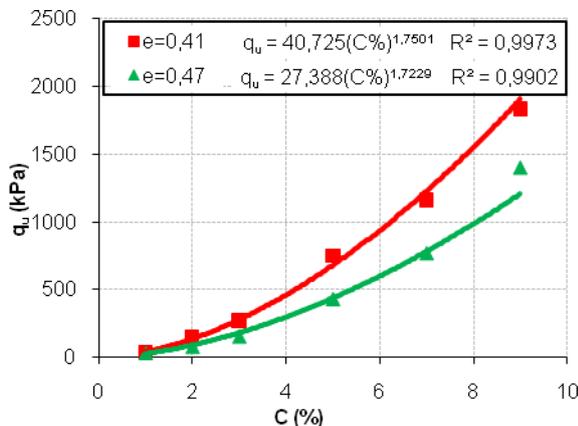


Figura 4. Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento C.

### 4.2 Efeito da porosidade

As curvas de ajuste da variação de resistência em relação a variação da porosidade ( $\eta$ ) são apresentadas na figura 5. Verifica-se como do tipo potência o melhor ajuste das curvas.

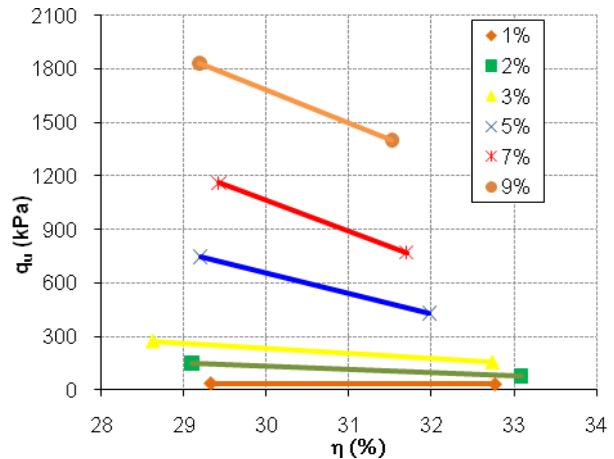


Figura 5. Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade  $\eta$ .

Observa-se que, de maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à compressão simples do solo cimentado. Independentemente da quantidade de cimento utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos expressivos de resistência.

### 4.3 Efeito da relação da porosidade/teor volumétrico de cimento

O efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cimento na resistência do material pode ser conferido através da figura 6. O teor volumétrico de cimento representa a razão entre o volume de cimento e o volume total das amostras, expressa em porcentagem.

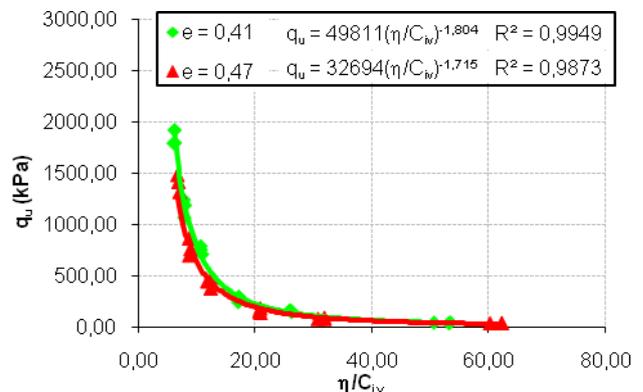


Figura 6. Variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade e o teor volumétrico de cimento.

Na Figura 6 verifica-se que a diminuição da relação  $\eta/C_{vi}$  provoca o aumento da resistência a compressão simples devido ao aumento do teor de cimento e diminuição da porosidade. Percebe-se que, com o aumento da relação de porosidade/teor volumétrico de cimento, porosidade alta e teor de cimento baixos, a resistência diminui.

## 5 CONCLUSÕES

A partir das análises dos resultados, assim como as variáveis estudadas, teor de cimento, porosidade e relação vazios/cimento, sobre a resistência à compressão simples das amostras cimentadas, foram admitidas as seguintes conclusões:

- A adição de cimento implica no aumento potencial da resistência, mesmo com adição de baixa quantidade de cimento. Para as amostras mais densas, o aumento da resistência ocorre mais acentuado, como pode ser verificado pelos coeficientes das curvas de ajuste.

- Em relação a porosidade, quanto maior for a quantidade de cimento, maior será o efeito da porosidade em relação a resistência à compressão simples. Assim como na análise do teor de cimento, também é verificado o aumento da resistência conforme diminui a porosidade da amostra.

- A relação porosidade/teor volumétrico de cimento, mostrou-se adequada para verificar a resistência à compressão simples das amostras. Como nas demais análises, pode-se comprovar a influência tanto da porosidade como do teor de cimento na resistência. Quanto menor a relação  $\eta/C_{iv}$ , ou seja, menor porosidade e maior teor de cimento, maior a resistência à compressão simples.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A. and Prietto, P. D. M. (2003). "Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129 (1), 96-101
- Consoli, N. C.; Foppa, D. (2007). *Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, N.2 p. 197-205.
- Ingles, O. G. e Metcalf, J. B. (1972). *Soil Stabilization – Principles and Practice*. Australia: Butterworths Pty. Limited, 366p.
- Dupas, J. M. E Pecker, A. (1979). *Static and dynamic Properties of Sand-cement*. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v. 105, n. 3, p. 419-436.
- Thomé, A., Donato, M., Consoli, N. C. and Graham, J. (2005). "Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil". *Canadian Geotechnical Journal*, 42(6), 1569-1584
- Caberlon, R. C. (2008). *Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.