

# DESENVOLVIMENTO DE NOVOS MATERIAIS GEOTÉCNICOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS E SUA APLICAÇÃO NA CONTENÇÃO DE CONTAMINANTES E NA ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

Amanda W. Fadel<sup>1</sup>

Nilo C. Consoli<sup>2</sup>

Rodrigo Caberlon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudante de Engenharia Ambiental e Bolsista; <sup>2</sup>Professor Departamento Eng. Civil e Orientador; <sup>3</sup>Estudante de Pós Doutorado e Coorientador

## INTRODUÇÃO

A presente pesquisa teve por objetivo determinar a influência de parâmetros, tais como: porosidade, teor de agente cimentante e teor de umidade na resistência à compressão simples do caulim artificialmente cimentado e determinar a influência destes mesmos parâmetros para misturas de *arenito-cinza de casca de arroz-cal (solo-cinza-cal)* submetidas à compressão simples. O programa experimental e os resultados encontrados encontram-se descritos abaixo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização do Material

#### ***Caulim***

Um dos solos utilizados nesta pesquisa é o caulim rosa. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação o caulim é considerado um silte de baixa plasticidade. Para a caracterização complementar do material foram executados ensaios de compactação utilizando energia Proctor modificada, seguindo a Norma NBR 7182/86. O ensaio consiste em compactar determinada quantidade de solo em um cilindro com volume conhecido. A compactação é realizada de forma estática, em três camadas, com o número de golpes aplicada em cada, definido pela NBR 7182/86. Faz-se variar o teor de umidade a fim de obter-se a umidade ótima de compactação. O resultado do ensaio de compactação para o caulim e para uma mistura caulim + cimento é apresentado na figura 1.

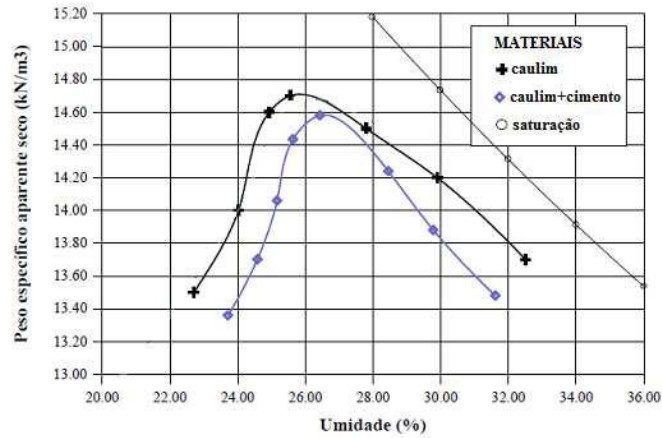


Figura 1: curva de compactação energia Proctor modificado para o caulim, mistura caulim e cimento, e curva de saturação do caulim.

### Arenito Botucatu

O solo residual de arenito Botucatu (SRAB) é segundo a classificação unificada uma areia fina siltosa (SM) fracamente plástica, proveniente da formação Botucatu da Bacia do Paraná. Sua composição granulométrica é composta de aprox. 8,8% de areia média, 47,3% de areia fina, 29,9% de silte e 14% de argila (Figura 2).

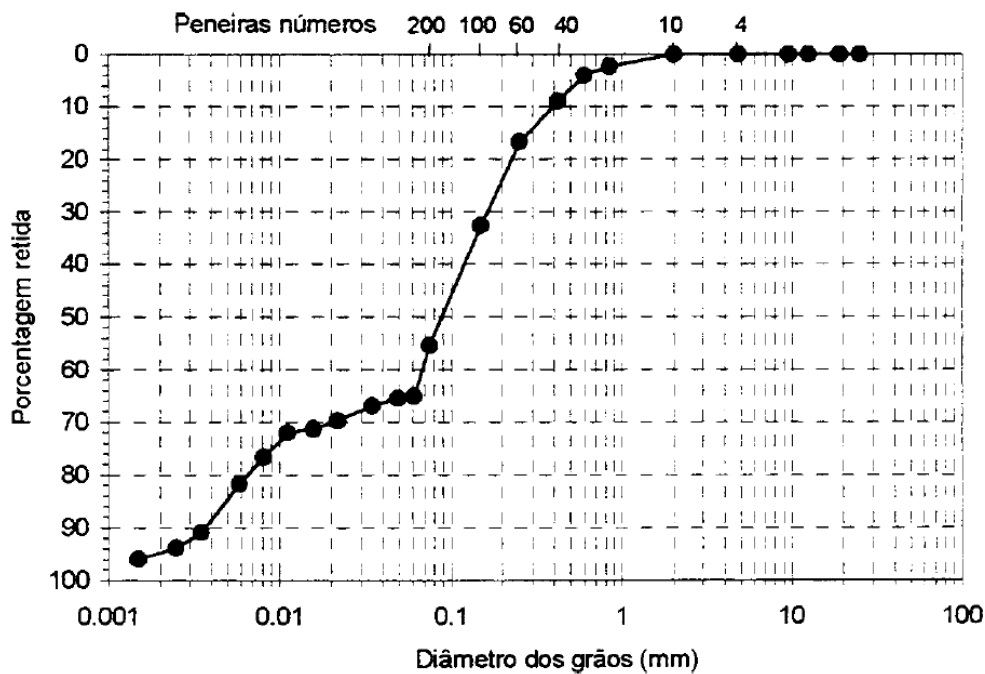


Figura 2 – Curva granulométrica do solo residual de arenito Botucatu.

### ***Cinza de casca arroz***

A cinza utilizada é proveniente da calcinação da casca de arroz. O processo de calcinação da casca de arroz passou por queima da mesma em uma temperatura de 650 graus celsius por três horas em forno mufla. Posteriormente a mesma foi moída em um moinho de bolas por três horas para atingir o diâmetro de grão desejado, com bolas numa proporção de 6:1.

## **DESENVOLVIMENTO**

### **Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova**

Foram moldadas amostras para ensaios de resistência à compressão simples nas amostras de caulim-cimento e solo-cinza -cal. Para tal foram moldados cilindros de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os corpos-de-prova foram moldados com um peso específico, porosidade e umidade pré-estabelecidos. Para a moldagem o solo, cimento e água foram pesados, e então misturados até completa homogeneização. Duas cápsulas de solo foram retiradas da mistura para determinação do teor de umidade. O corpo-de-prova foi compactado estaticamente em três camadas dentro de um molde tripartido. Após a moldagem, o espécime foi imediatamente retirado do molde e então foi pesado e teve seu diâmetro e altura medidos. O tempo para preparar a mistura e compactar os espécimes foi inferior a uma hora, que é inferior ao tempo de pega do cimento de alta resistência inicial (CP V – ARI). Já para as amostras de solo-cinza-cal o mesmo não acontece. Os CP foram então acondicionados em sacos plásticos para evitar perda de umidade e então curados durante seis dias.

### ***Ensaio de Resistência à Compressão Simples***

Os testes de resistência à compressão simples seguiram a Norma Brasileira NBR 12025/90. Uma prensa automática com capacidade de 50 kN, e anéis dinamométricos de 10 e 50 kN foram utilizados nos testes.

Para o caulim artificialmente cimentado, após o período de cura de seis dias, os CP foram submersos em água por vinte e quatro horas para atingir a saturação, elevando assim o tempo total de cura para sete dias. Somente após esse período de sete dias, foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples.

Já para as misturas solo-cinza-cal as amostras estão em fase de moldagem e cura, onde as mesmas serão submetidas a ensaios de resistência a compressão simples após 90 dias de cura.

O programa de ensaios de resistência à compressão simples foi concebido de forma a avaliar, separadamente, a influência do teor de cimento, teor de umidade e porosidade na mistura solo-cimento estudada. Os pontos de moldagem são mostrados na figura 3, juntamente com a curva de compactação Proctor modificado e as curvas de saturação de 90% e 100%.

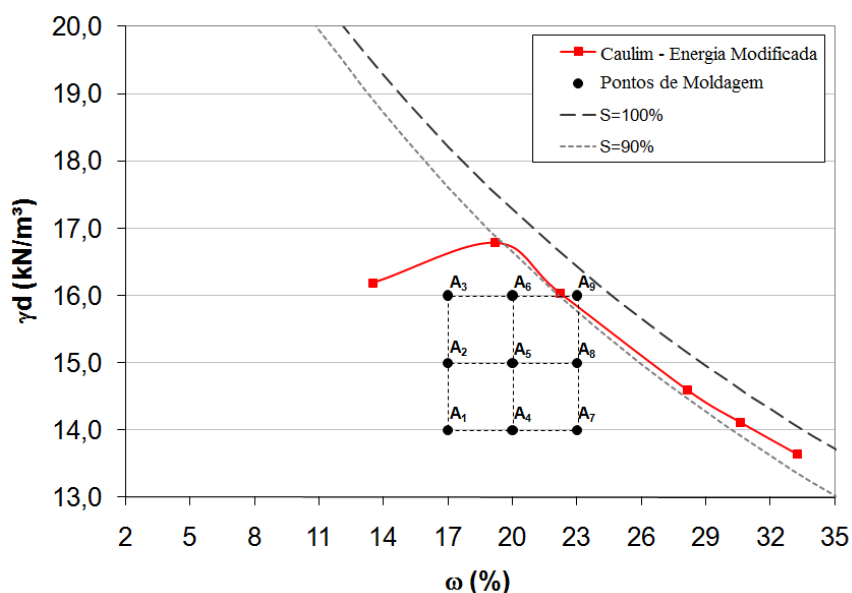


Figura 3: Pontos de moldagem

### Ensaio de Resistência à Compressão Diametral

Os ensaios de resistência à compressão diametral seguirão a Norma Brasileira NBR 7222/94. Uma prensa automática com capacidade de 50 kN, e anéis dinamométricos de 10 e 50 kN serão utilizados nos testes.

As misturas solo-cinza-cal as amostras serão moldadas e curadas por 90 dias, onde posteriormente as mesmas serão submetidas a ensaios de resistência a compressão diametral.

O programa de ensaios de resistência à compressão diametral foi concebido de forma a avaliar, separadamente, a influência do teor de cimento, teor de umidade e porosidade na mistura solo-cimento estudada. As porcentagens de cinza utilizadas são de 12,5 e 25%, e de cal, serão utilizadas porcentagens de cal de 5, 7 e 9%, tendo-se uma variação no peso específico seco do material, que será de 1,4; 1,5 e 1,6  $\text{g/cm}^3$ . Todas amostras serão moldadas na umidade de 14%.

## RESULTADOS

### Efeito do Teor de Cimento, Teor de Umidade e Porosidade na Resistência à Compressão Simples

A variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) com o teor de cimento (C) é mostrada na figura 4. Uma função linear se aproxima bem dos resultados encontrados para  $q_u$  versus C. Percebe-se o aumento da resistência à compressão simples com o aumento do teor de cimento. Contudo, a taxa de crescimento da resistência é mais pronunciada para pesos específicos aparentes secos mais altos.

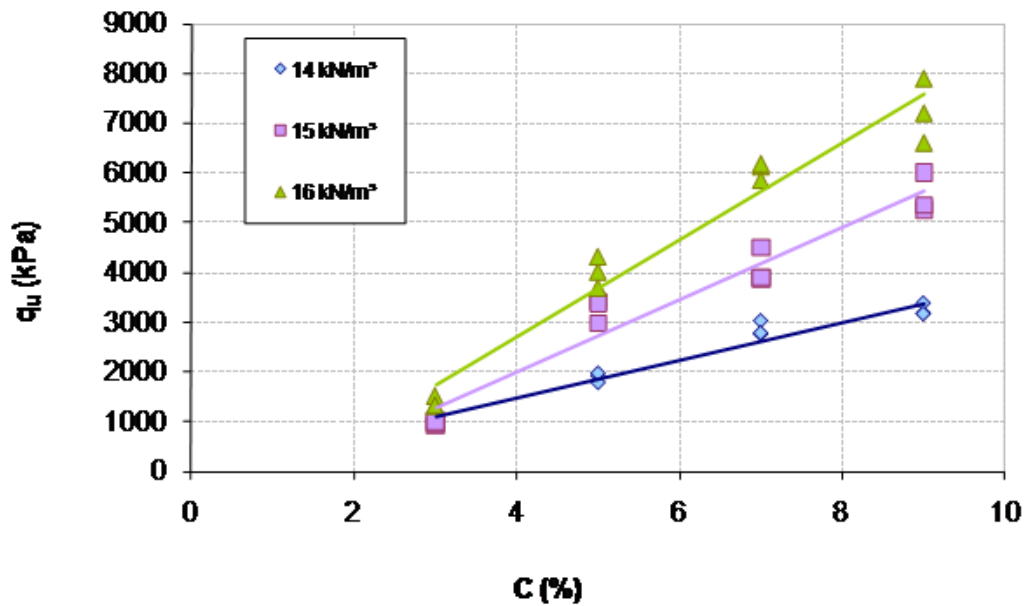


Figura 4: variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) com o teor de cimento (C) para um teor de umidade de 23%

A figura 5 mostra a variação da  $q_u$  com a porosidade ( $\eta$ ) para diferentes teores de cimento. Percebe-se um aumento exponencial da resistência à compressão simples com a redução da porosidade.

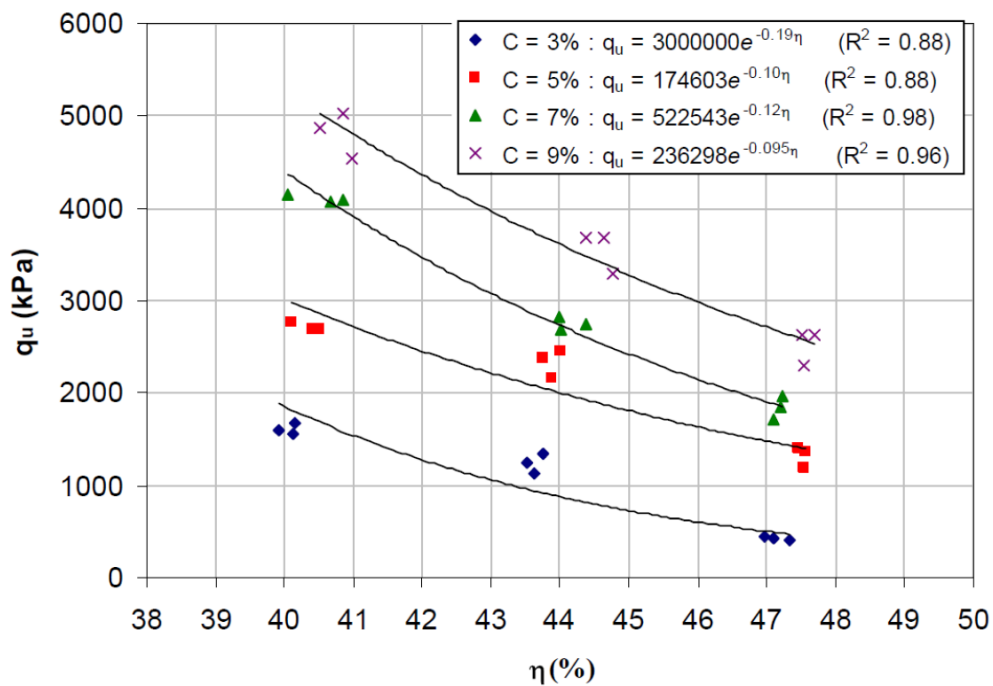


Figura 5: resistência à compressão simples ( $q_u$ ) versus a porosidade ( $\eta$ ) para a mistura solo-cimento com C = 3, 5, 7 e 9% e teor de umidade de 20%.

Em relação ao teor de umidade, a presente pesquisa, demonstrou que a resistência à compressão simples aumenta de maneira linear (figura 6) com o teor de umidade ( $\omega$ ), para os teores de umidade estudados.

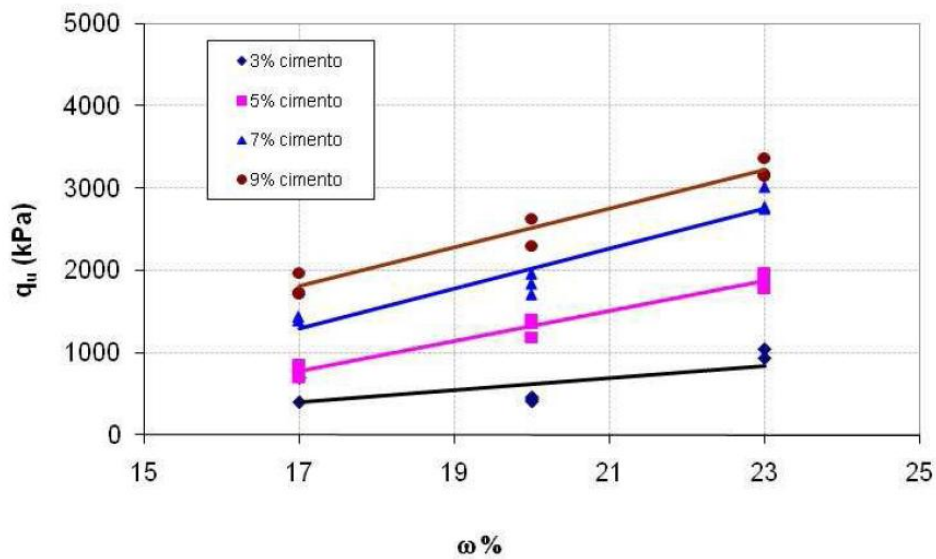


Figura 6: resistência à compressão simples ( $q_u$ ) versus teor de umidade ( $\omega$ ) com um  $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$

#### Efeito da Relação Vazios/Cimento na Resistência à Compressão Simples

As figuras 4 e 5 mostram que para um dado teor de umidade a resistência à compressão simples é dependente da porosidade e do teor de cimento. Portanto, propõe-se o uso da razão vazios/cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) para a estimativa da  $q_u$  do caulim artificialmente cimentado.

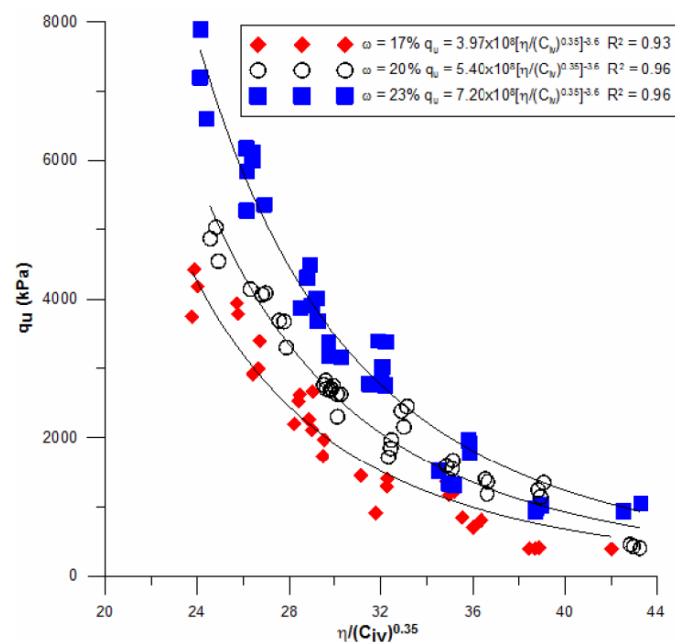


Figura 7: variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) com expoente da relação vazios/cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) ajustado, considerando todas as massas específicas aparentes secas e diferentes teores de cimento e teores de umidade de 17, 20 e 23%.

Percebe-se pelas figuras 4 e 5 que a taxa de crescimento da  $q_u$  com a porosidade e com o teor de cimento são diferentes. Uma maneira de tornar essas taxas de variação compatíveis é através da utilização de um expoente. Neste trabalho, optou-se por aplicar o expoente ao fator  $C_{iv}$ . O melhor ajuste foi encontrado com um expoente de 0,35, como apresentado na figura 7.

Verifica-se na figura 7, que quanto maior o teor de umidade maior a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento estudada, dado um CP com mesmo teor de cimento e mesma porosidade.

Com base nas equações expressas na figura 7, observa-se que é possível atingir a  $q_u$  desejada com a variação do parâmetro desejado ( $\eta$  ou  $C_{iv}$ ). As equações também permitem a verificação de campo, por exemplo, caso seja verificada uma condição de compactação aquém da necessária, é possível, através das equações, verificar a  $q_u$  que será obtida e então tomar a decisão adequada.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.182**: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.025**: solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strenght control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 133, n. 2, p. 197-205, Feb. 2007.

CONSOLI, N. C., CRUZ, R. C., FLOSS, M. F., FESTTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 136, n. 5, p. 759-764, 2010.