

Análise da aplicação da relação vazios/cal na estimativa da resistência à tração de um solo siltoso estabilizado com cal

Amanda Dalla Rosa Johann

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, amandajohann@utfpr.edu.br

Otávio Augusto Passaia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, ota-augusto@hotmail.com

Guilherme Borges Masuero

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

Nilo Cesar Consoli

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

RESUMO: As características melhoradas de solos compactados com a utilização de cal, podem ser muito importantes para algumas aplicações da engenharia geotécnica, destacando-se os reforços de solo para pavimentos e para fundações. As últimas pesquisas em solos tratados com cal mostram o desenvolvimento de metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais (como a relação água/cimento para o concreto), onde a relação volume de vazios/volume de cal desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada. Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência da quantidade de cal (C_a), da umidade (ω) e da porosidade (η) sobre a resistência à tração (q_t) de um solo siltoso estabilizado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da sua resistência à tração. Para atingir os objetivos desta pesquisa ensaios de resistência à tração indireta e medidas de sucção matricial foram realizados. Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias de cura. Os resultados dos ensaios de resistência à tração indireta demonstram que o aumento da quantidade de cal e a diminuição da porosidade provoca o aumento de q_t . Sendo que, q_t cresce linearmente com o aumento da quantidade de cal e exponencialmente com a redução da sua porosidade. Assim, verifica-se que, a relação vazios/cal (η/C_{av}), definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, demonstra ser um parâmetro adequado na estimativa de q_t . A partir desses mesmos resultados, observa-se que a umidade também desempenha um papel importante na previsão da resistência à tração do solo-cal estudado. Além disso, os resultados dos ensaios de sucção demonstram que os corpos-de-prova não apresentam grandes variações nas medidas de sucção matricial para as misturas estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: Relação vazios/cal, Resistência à tração, Sucção matricial.

1 INTRODUÇÃO

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida, utilizada nas mais variadas aplicações. Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura compactada de

solo, cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (USBR, 1998).

Utiliza-se solo-cal quando não se dispõem de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade adequadas ao projeto. A estabilização com cal é comumente empregada

na construção de estradas, sendo geralmente utilizada como base ou sub-base de pavimentos (INGLES & METCALF, 1972; NÚÑEZ, 1991; LOVATO, 2004). Além disso, misturas solo-cal também são utilizadas no melhoramento de solos para fundações superficiais (THOMÈ, 1994; CONSOLI, 2008).

Consoli et al. (2008, 2009) mostram que em fundações apoiadas em sistemas de dupla, sendo a superior constituída de um solo artificialmente cimentado, ocorre uma distribuição de tensões mais ampla, aumentando substancialmente a capacidade de suporte da fundação superficial apoiada nesta camada. Além disso, tais sistemas começam sua ruptura na base da camada cimentada, quando a tensão aplicada é superior a sua resistência à tração.

Contudo, mesmo a resistência à tração sendo de grande importância em misturas solo-cal, ainda não existem metodologias de dosagem com base em critérios racionais (como a relação água/cimento para o concreto), considerando o efeito das diferentes variáveis envolvidas (por exemplo, quantidade de cal, porosidade, teor de umidade) na resistência à tração dessas misturas.

Neste contexto, esta pesquisa busca fornecer subsídios para que, através de relações de dosagem, desenvolvidas a partir da identificação e quantificação das variáveis mais importantes no controle da resistência à tração de um solo estabilizado com cal, se possa atingir de forma mais objetiva e com maior confiabilidade a resistência à tração dessas misturas.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

O material denominado “caulim” utilizado nesta pesquisa é comercialmente conhecido como caulim rosa, originário do município de Pântano Grande-RS.

A partir da análise da curva granulométrica percebe-se que 100% do material passa na peneira 200 (0,075 mm), e que essa percentagem passante se distribui entre as frações silte e argila: 22% de argila (< 0,002 mm) e 78% de silte (0,002 a 0,075 mm). O

limite de liquidez (38,2%) é baixo, considerando a média apresentada pelas argilas. O índice de plasticidade (3,7%) indica um solo fracamente plástico ($1 < IP < 5$). Portanto, o caulim rosa, de acordo com o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) (ASTM D 2487, 1993), é classificado como um silte de baixa plasticidade.

A cal utilizada no trabalho é uma cal hidratada dolomítica, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida em Caçapava do Sul – RS, com massa específica real dos grãos igual a 2,49 g/cm³.

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova é a água potável proveniente da rede de abastecimento pública. Já para os ensaios de caracterização utilizou-se água destilada quando especificada pela respectiva norma.

2.2 Métodos

2.2.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para os ensaios de resistência à tração indireta, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 70mm de diâmetro e 140mm de altura. Após a pesagem dos materiais, o solo e a cal foram misturados até a mistura adquirir uma consistência uniforme. Após esse processo, a água então era adicionada, continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida.

Após o processo de mistura do material suficiente para um corpo de prova, a mistura foi armazenada em um recipiente fechado para evitar perdas de umidade antes da compactação. Duas pequenas porções da mistura eram retiradas, para determinação da umidade (ω).

O corpo de prova era compactado estaticamente, em cinco camadas, em um molde de ferro fundido, de modo que cada corpo de prova atingisse o seu peso específico aparente seco (γ_d) desejado. Após o processo de moldagem, o corpo de prova foi imediatamente extraído do molde, e seu peso, diâmetro e altura medidos com precisão de cerca de 0,01 g e 0,1 mm. Os corpos de prova foram então, colocados dentro de sacos plásticos, para evitar variações significativas do teor de umidade. Além disso,

eles foram curados por 28 dias em uma câmara úmida com $23 \pm 2^\circ \text{C}$ e umidade relativa do ar acima de 95%.

Os corpos de prova que foram considerados aptos para os ensaios respeitaram as seguintes tolerâncias:

- γ_d : dentro de $\pm 1\%$ do valor alvo;
- ω : dentro de $\pm 0,5\%$ do valor alvo;
- Dimensões: diâmetro de $\pm 0,5 \text{ mm}$ e altura de $\pm 1 \text{ mm}$ em relação ao valor alvo.

2.2.2 Ensaios de Resistência à Tração Indireta

A determinação das propriedades dos solos está associada a diferentes graus de dificuldades experimentais, dependendo da característica que está sendo determinada. Em ensaios de determinação direta da tração há problemas relacionados à forma de prender os corpos de prova nas extremidades para que possam ser tracionados. Isto provoca a concentração de tensões no corpo-de-prova. Portanto, a resistência à tração de solos tem sido determinada através de métodos que utilizam a aplicação de outros esforços que não os de tração e interpretam os resultados obtendo indiretamente o valor desejado. Nesta pesquisa foi utilizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, que consiste no carregamento de corpos de prova cilíndricos no sentido de seu diâmetro (Figura 1). A resistência à tração é determinada através da equação 1. Além de ser um ensaio de fácil execução, é um ensaio amplamente utilizado no meio científico.

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (1)$$

Onde:

P = carga suportada pelo corpo-de-prova;

D = diâmetro do corpo-de-prova;

H = altura do corpo-de-prova.

Para a realização destes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, além de anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN e 50 kN e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) e 0,023 kN (2,3 kgf) respectivamente. A velocidade de

deformação era de 1,14 mm por minuto.

Além disso, os ensaios de tração indireta foram realizados segundo a norma NBR 7222/83. É importante enfatizar que, antes da realização do ensaio os corpos de prova foram submersos em um tanque com água por 24 horas para saturação, e assim minimizar a sucção, antes da realização dos ensaios de q_t . A temperatura da água foi mantida a $23 \pm 2^\circ \text{C}$.



Figura 1. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.

2.2.3 Ensaios de sucção matricial

Em sua umidade de moldagem todos os corpos de prova estão em um estado insaturado, e um certo nível de sucção pode estar presente. As medições de sucção foram realizadas com o objetivo de verificar a sua magnitude e verificar se houve variação significativa entre os corpos de prova de diferentes porosidades e diferentes quantidades de cal.

A sucção medida foi a matricial, ou seja, a que decorre das forças de capilaridade no interior do corpo de prova. Ela foi medida usando a técnica do papel filtro. O papel filtro utilizado foi o Whatman No 42. O seu teor de umidade inicial, no ar em estado seco, é de aproximadamente 6%, o que permite medições de sucção de zero a 29 MPa. As equações de calibração utilizadas para este papel filtro foram as apresentadas por Chandler et al. (1992).

2.2.4 Programa de Ensaios de resistência à tração indireta

As percentagens de cal ($Ca = 3, 5, 7$ e 9% , sendo Ca a massa de cal em relação a massa seca de solo) foram definidas a partir de outras pesquisas para posteriores comparações, e estão de acordo com a experiência brasileira e internacional com solo-cal. O programa de ensaios de qt teve como objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal (Ca), umidade (ω) e porosidade (η) sobre a qt .

Para que seja possível a mensuração da influência de uma variável isoladamente é necessário que as outras variáveis sejam mantidas constantes. Para isto foi elaborado o programa de ensaios conforme apresenta a Figura 2. Observa-se que os pontos de moldagem foram posicionados em três linhas verticais (pontos: A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 e A9), denominadas linhas “A”, com três diferentes teores de umidade (17, 20 e 23%) e diferentes pesos específicos aparentes secos.

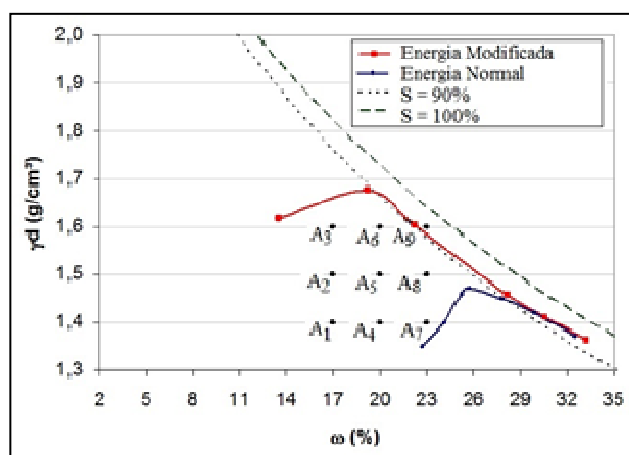


Figura 2. Programa de ensaios de resistência à compressão simples e de medidas de rigidez inicial.

Cada ponto da linha “A” foi moldado com 4 diferentes percentagens de cal (3, 5, 7 e 9%) e foram curadas durante 28 dias.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Ensaios de Resistência à tração indireta

3.1.1 Efeito da quantidade de cal

Os resultados dos ensaios de resistência à tração para as misturas com 17% e 28 dias de cura são apresentados na Figura 3, que apresenta

resultados considerando os pesos específicos aparentes secos de $1,4 \text{ g/cm}^3$, $1,5 \text{ g/cm}^3$ e $1,6 \text{ g/cm}^3$, e percentagens de cal de 3%, 5%, 7% e 9%. Os corpos de prova com 20% e 23% de ω apresentam as mesmas tendências (Figuras 4 e 5, respectivamente).

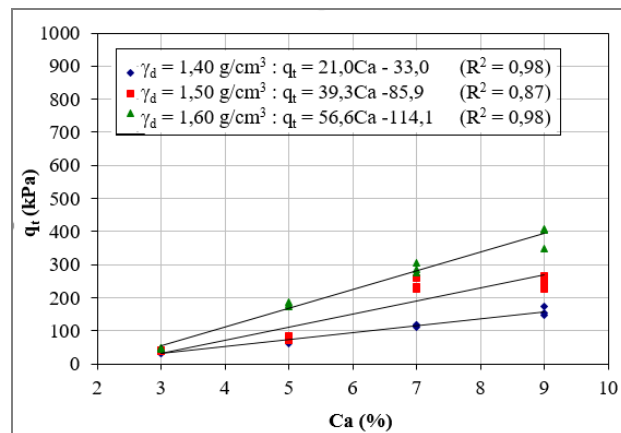


Figura 3. Variação da resistência à tração (qt) com a quantidade de cal para 17% de umidade, considerando todos os pesos específicos aparentes secos estudados

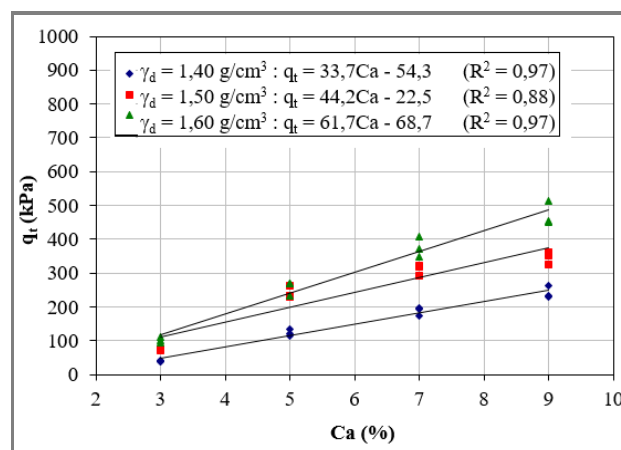


Figura 4. Variação da resistência à tração (qt) com a quantidade de cal para 20% de umidade, considerando todos os pesos específicos aparentes secos estudados

Pode-se observar que a quantidade de cal tem efeito significativo sobre a resistência à tração do material para os corpos-de-prova ensaiados. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a resistência à compressão simples, em média, acresceu 547% em todas as curvas com 17% de ω , 419% com 20% de ω e 578% com 23% de ω .

Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à tração aumenta linearmente com o aumento da quantidade de

cal. Além disso, a taxa de aumento de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, aumenta com o aumento do peso específico aparente seco.

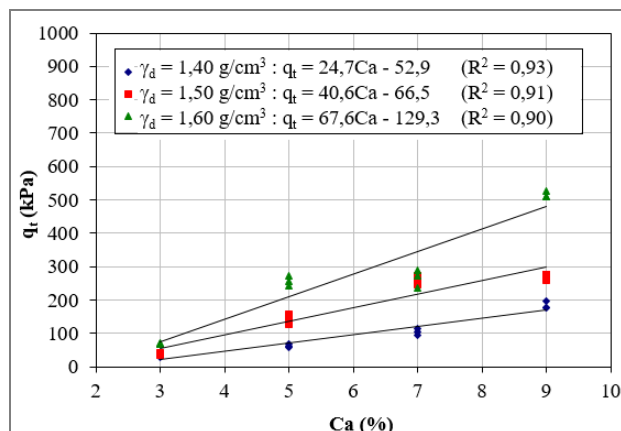


Figura 5. Variação da resistência à tração (q_t) com a quantidade de cal para 23% de umidade, considerando todos os pesos específicos aparentes secos estudados.

3.1.2 Efeito da porosidade

A Figura 6 apresenta como a porosidade influencia na resistência à tração das misturas com 17% e 28 dias de cura. Observa-se que, a resistência à tração aumenta exponencialmente com a redução da porosidade (η) de todas as misturas compactadas. Os corpos de prova com 20% e 23% de umidade (ω) apresentam as mesmas tendências (Figuras 7 e 8, respectivamente).

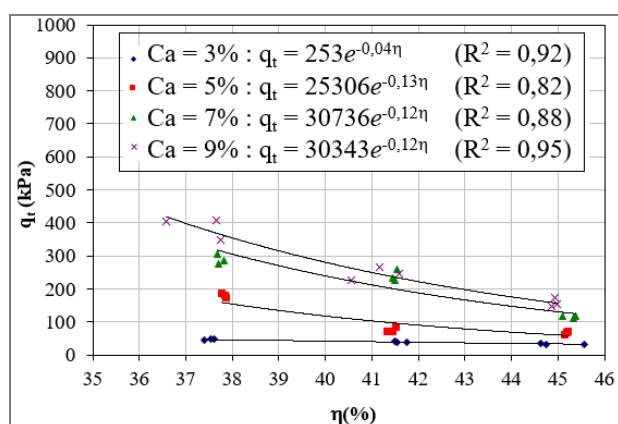


Figura 6: Variação da resistência à tração (q_t) com a porosidade (η) para 17% de umidade, considerando todos os teores de cal estudados

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura

compactada exerce influência sobre a resistência à tração do solo-cal em estudo. Em média a redução de 10 pontos percentuais na η do material aumentou, em média, 2,3 vezes a resistência à compressão simples do solo-cal testado com 17% de ω , 2,2 vezes com 20% de ω e 2,9 com 23% de ω , em todas as curvas.

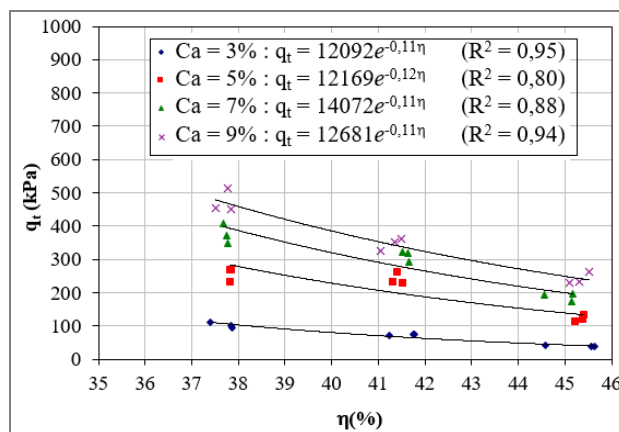


Figura 7: Variação da resistência à tração (q_t) com a porosidade (η) para 20% de umidade, considerando todos os teores de cal estudados

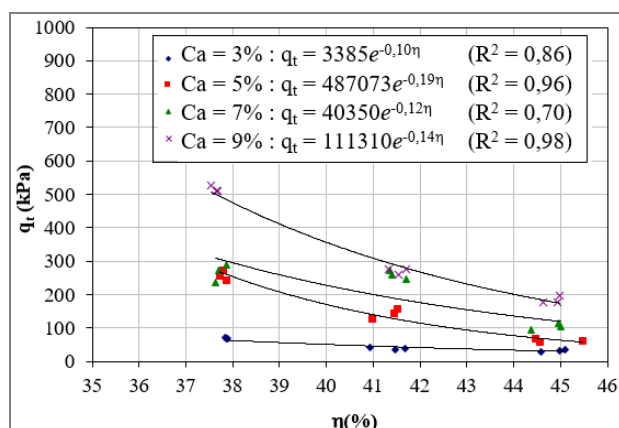


Figura 8: Variação da resistência à tração (q_t) com a porosidade (η) para 23% de umidade, considerando todos os teores de cal estudados.

3.1.3 Aplicação da relação vazios/cal (η/Cav)

A Figura 9 apresenta a variação da resistência à tração (q_t) com a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/Cav) para os corpos de prova com 17% de umidade, definida pela Equação (2).

$$\frac{\eta}{Ca_v} = \frac{\text{Porosidade}}{\text{Teor Volumétrico de Cal}} \quad (2)$$

Onde, na equação 2, C_{av} refere-se à relação entre o volume da cal utilizada no corpo de prova e o volume total do corpo de prova (V_{cal}/V).

Observa-se, na Figura 9, a existência de uma relação com forte tendência exponencial entre q_t e η/C_{av} . Os corpos de prova com 20% e 23% de umidade apresentam as mesmas tendências.

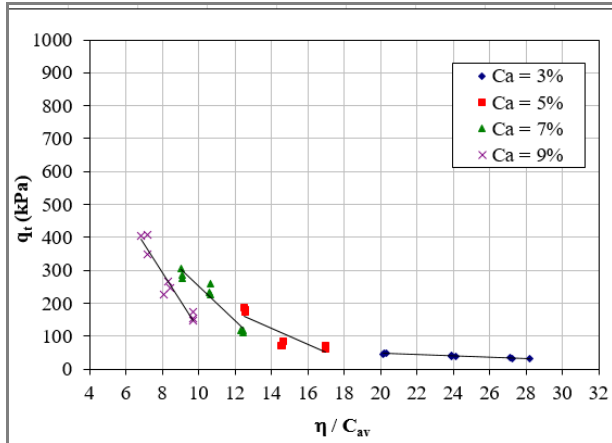


Figura 9. Variação da resistência à tração (q_t) com a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/C_{av}) para os corpos de prova com 17% de umidade

Na continuidade da pesquisa, verificou-se que a aplicação de uma potência igual a 0,45 sobre C_{av} para todas as misturas solo-cal estudadas, proporciona um bom ajuste dos dados na obtenção da q_t a ser atingida, conforme apresentado na Figura 10. Assim, a Figura 10 apresenta a aplicação de uma curva tipo potência sobre os resultados adquiridos. As mesmas tendências são observadas para os corpos de prova com 20% e 23% de umidade (Figuras 11 e 12, respectivamente).

As Equações (3), (4) e (5) representam as relações encontradas para as misturas com 17% de umidade ($R^2=0,93$), 20% de umidade ($R^2=0,92$) e 23% de umidade ($R^2=0,89$), respectivamente. Observa-se também, que quanto maior o teor de cal, maior a resistência à tração (q_t) para qualquer dado de $\eta/(C_{av})^{0,45}$.

$$q_t = 2,81 \cdot 10^6 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (3)$$

$$q_t = 3,96 \cdot 10^6 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (4)$$

$$q_t = 3,37 \cdot 10^6 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad (5)$$

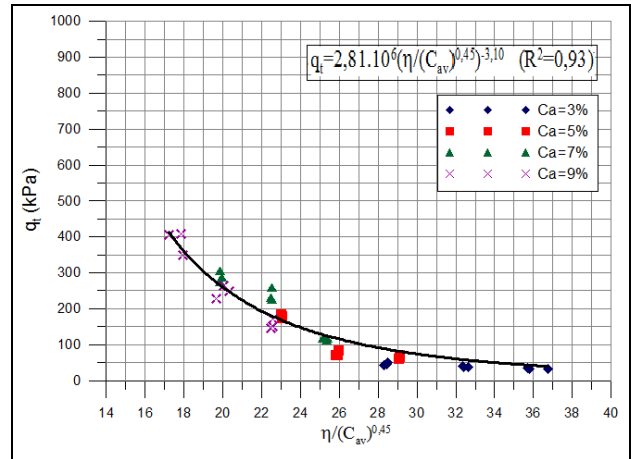


Figura 10. Variação da q_t com a relação $\eta/(C_{av})^{0,45}$ ajustada por uma curva tipo potência para os corpos de prova com 17% de umidade

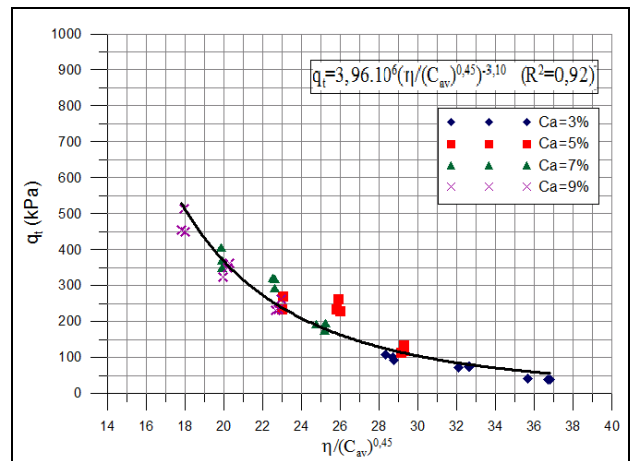


Figura 11. Variação da q_t com a relação $\eta/(C_{av})^{0,45}$ ajustada por uma curva tipo potência para os corpos de prova com 20% de umidade

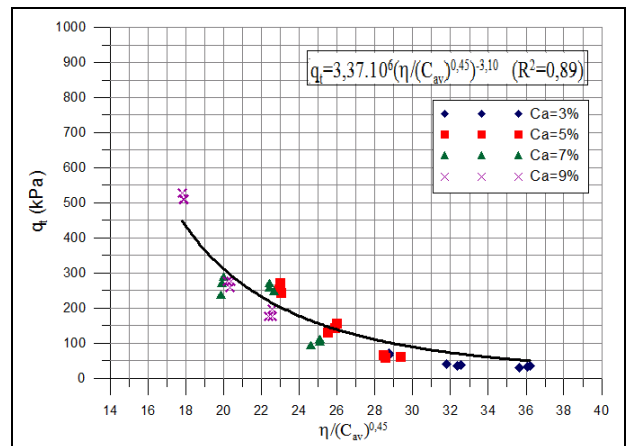


Figura 12. Variação da q_t com a relação $\eta/(C_{av})^{0,45}$ ajustada por uma curva tipo potência para os corpos de prova com 23% de umidade.

3.1.4 Aplicação da relação vazios/cal (η/Cav)

Na Figura 13 são apresentados os resultados das relações $\eta/(Cav)^{0,45}$ pela qt dos corpos de prova de caulim-cal com 17, 20 e 23% de umidade.

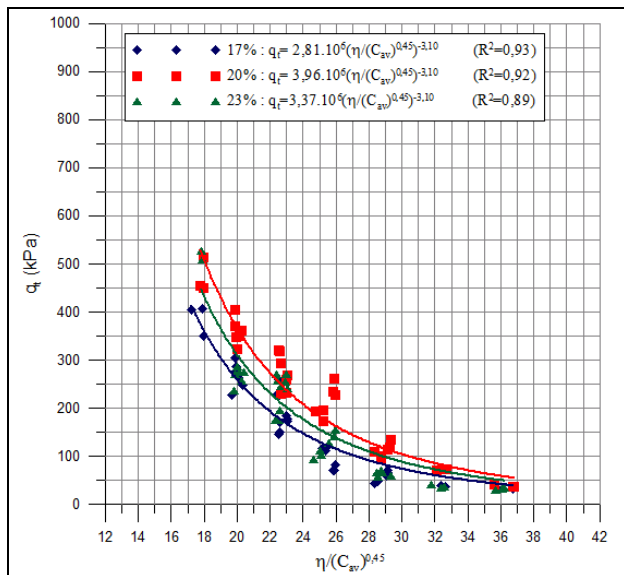


Figura 13. Variação da qt com a relação η/Cav para os corpos de prova com 17, 20 e 23% de umidade.

A partir das análises realizadas observa-se um aumento da qt com o aumento do teor de ω até um valor ótimo (20%), a partir do qual a resistência passa a diminuir. A mesma tendência foi relatada por Carraro (1997) em corpos de prova de uma areia siltosa estabilizada com cal e cinza volante e por Foppa (2005) em corpos de prova de uma areia siltosa estabilizada com cimento, ambas submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples.

3.2 Ensaios de Sucção Matricial

A partir dos dados dos ensaios de sucção matricial, verificou-se que após a imersão por 24 horas, os corpos-de-prova de menor índice de vazios absorveram menor quantidade de água, como era de se esperar. Entretanto, o grau de saturação obtido após a imersão não apresentou variação significativa em relação ao índice de vazios, girando em torno de 79% para todos os corpos-de-prova. O valor médio obtido para a sucção matricial de todos os corpos-de-prova ficou em 45 kPa.

A Figura 14 apresenta a tendência e a relação

existente entre a medida de sucção matricial e o índice de vazios (e). Apesar da dispersão dos pontos pode-se verificar que a sucção matricial tende a aumentar à medida que diminui o índice de vazios, para todas as misturas estudadas.

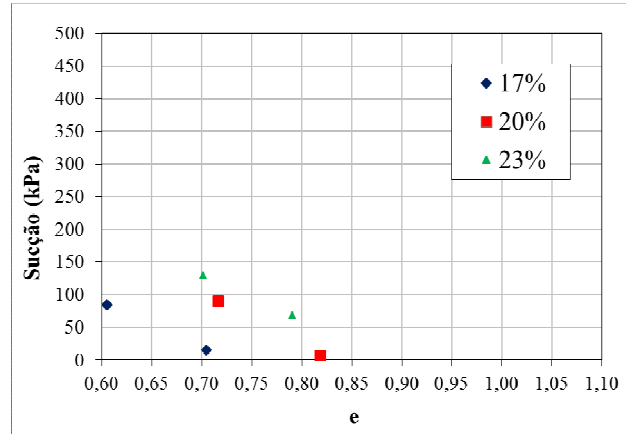


Figura 14. Relação entre medidas de sucção matricial e índice de vazios nos corpos de prova com 28 dias de cura.

Na Figura 15 é apresentada a variação da resistência à tração (qt) pela relação entre a sucção e a resistência à tração (em porcentagem). Verifica-se que a influência da sucção varia de 0 a 5% da resistência à tração nos corpos-de-prova ensaiados.

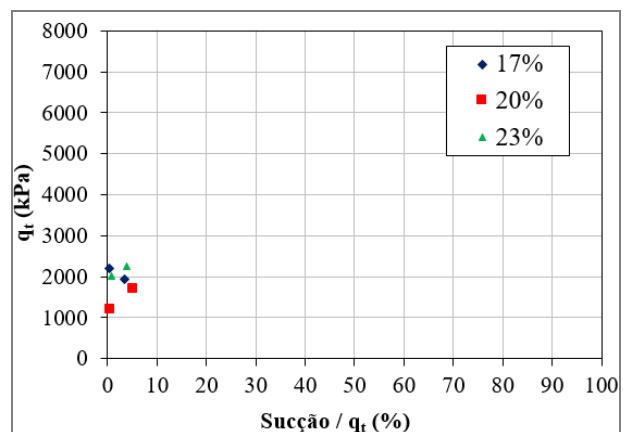


Figura 15. Influência da sucção nos valores de resistência à tração nos corpos de prova com 28 dias de cura.

4 CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser evidenciadas:

- Quanto maior a quantidade de cal (Ca), maior a resistência à tração (qt) para um

determinado peso específico aparente seco. Além disso, relações lineares podem ser observadas nos resultados de qt versus Ca para o tempo de cura estudado.

- Em todas as porcentagens de cal (Ca) estudadas a redução da porosidade (η) proporciona o aumento da sua ressitência à tração (qt). Sendo que, a resistência à tração aumenta exponencialmente com a redução da porosidade.

- A relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/Cav) mostra ser um bom parâmetro na avaliação da ressitência à tração (qt). Além disso, a função de potência ajustada por um expoente se adapta muito bem à relação qt versus $\eta/(Cav)^{0,45}$.

- Analisando-se os corpos de prova ensaiados à resistência à tração indireta, observa-se um aumento da ressitência à tração (qt) com o aumento do teor de umidade até um valor ótimo (20%), a partir do qual a resistência passa a diminuir.

- Analisando-se os resultados de sucção matricial pode-se perceber que a imersão dos corpos-de-prova por 24 horas, antes da realização dos ensaios de tração indireta, uniformizou o grau de saturação dos mesmos, que apresentou pouca variabilidade em relação ao índice de vazios. Além disso, observou-se que os corpos-de-prova não apresentam grandes variações nas medidas de sucção matricial para as misturas estudadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores demonstram agradecimento ao suporte financeiro da CAPES e do CNPq.

REFERÊNCIAS

- ASTM D 2487 (1993). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- Carraro, J. A. H. (1997). *Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de um Solo Residual de Arenito*. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 150 p.
- Chandler, R.J., Crilly, M.S., Montgomery-Smith, G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings, *Institute of Civil Engineers*, Civil Engineering, Vol. 92, p. 82-89.
- Consoli, N. C., Thomé, A., Donato, M., Graham, J. (2008). Loading tests on compacted soil, bottom ash and lime layers, *Geotechnical Engineering, Proc. ICE*, Vol. 161, No. 1, 29–38.
- Consoli, N. C., Dalla Rosa, F., Fonini, A. (2009). Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 12, p. 1846–1856.
- Foppa, D. (2005). *Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 143p.
- Ingles, O. G., Metcalf, J. B. (1972). *Soil Stabilization – Principles and Practice*. Butterworths, Sidney, 374p.
- Lovato, R. S. (2004). *Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 144p.
- NBR 7222 (1983). *Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo.
- Núñez, W. P. (1991). *Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 150p.
- Thomé, A. (1994). *Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 149p.
- USBR (1998). U.S. Earth Manual. *Department of the Interior – Bureau of Reclamation*. 3rd Edition, Denver, Colorado.