

APLICAÇÃO DA RELAÇÃO VAZIOS/CAL NA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DA RIGIDEZ INICIAL DE MISTURAS SOLO-CAL

APPLICATION OF RELATION VOIDS/LIME IN THE ESTIMATION OF UNCONFINED COMPRESSION RESISTANCE AND INITIAL STIFFNESS OF SOIL-LIME MIXTURES

Dalla Rosa Johann, Amanda; DACOC-CT, *Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brasil, amandajohann@utfpr.edu.br*

Viana da Fonseca, António; CONSTRUCT-GEO, *Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal, viana@fe.up.pt*

Consoli, Nilo Cesar; DECIV-PPGEC, *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, consoli@ufrgs.br*

RESUMO

A estabilização de solos é utilizada desde a antiguidade, quando o mesmo não atinge as características requeridas em projeto. Nestes casos, a remoção e substituição do solo gera um alto custo de transporte de materiais, além de causar degradação ambiental pela exploração da jazida e pelo próprio transporte do material. Contudo, é difícil compreender o comportamento de solos estabilizados com cal pela sua variabilidade, e assim, um dos pontos em aberto no estudo dessas misturas é encontrar um modelo de dosagem baseado 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. Assim, esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência da quantidade de cal (Ca), da umidade (w) e da porosidade (η) sobre a resistência à compressão simples (q_u) e sobre a rigidez inicial (G_o) de um solo silteoso estabilizado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa de q_u e G_o . Para atingir os objetivos da pesquisa foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e ensaios para a medida de G_o . Os provetes foram ensaiados aos 28 dias de cura. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e de rigidez inicial demonstram que o aumento da quantidade de Ca e a diminuição da η provoca o aumento de q_u e G_o . Sendo que, q_u e G_o crescem 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/Cav), definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, demonstra ser um parâmetro adequado na estimativa de q_u e G_o . Além disso, observa-se que a w também desempenha um papel fundamental na previsão de q_u e G_o .

ABSTRACT

Soil stabilization has been used since antiquity, when it does not reach the required design characteristics. In these cases, the removal and replacement of the soil generates to high cost of transportation of materials, besides causing environmental degradation by the exploitation of the deposit and the transport of the material itself. However, it is difficult to understand the behavior of soils stabilized with lime because of their variability, and thus, one of the open points in the study of these mixtures is to find a model based on rational criteria for concrete) where the ratio of voids volume/lime volume makes a fundamental role in obtaining the desired resistance. The objective of this research was to verify the influence of the amount of lime (Ca), moisture (w) and porosity (η) on the unconfined compression strength (q_u) and initial stiffness (G_o) of a silty soil. The tests were performed at 28 days of cure. The results of the tests of unconfined compressive strength and initial stiffness demonstrate that the amount of Ca and decreasing the Ca causes the increase of q_u and G_o . Being that, q_u and G_o increases linearly with increasing amount of lime and exponentially with the reduction of its porosity. Thus, it can be seen that the ratio voids/lime (η/Cav), defined by the ratio between the porosity of the compact mixture and the volumetric content of lime, is an adequate parameter in the estimation of q_u and G_o . In addition, it is observed that w also make a key role in predicting G_o .

1 - INTRODUÇÃO

A melhoria do solo localmente disponível é uma técnica amplamente utilizada devido às suas grandes vantagens técnicas, econômicas, ambientais e sociais, além da sua facilidade de aplicação. Na pavimentação, por exemplo, alguns solos necessitam de bases granulares para o pavimento ser realizado, o que gera um alto custo quando a jazida está localizada distante da obra, além de causar degradação ambiental pela exploração da jazida e pelo próprio transporte do material.

A estabilização do solo com cal ou cimento, e até mesmo com resíduos e subprodutos, tem sido estudada por diversos autores (Núñez, 1991; Thomé, 1994; Carraro, 1997; Consoli et al., 2001; Lovato,

2004; Dalla Rosa, 2009; Consoli et al., 2011; Rios et. al., 2013; Viana da Fonseca et al., 2013; Saldanha et al., 2017; Consoli et al., 2017a; Consoli et al. 2017b, Consoli et al., 2017c), visando seu emprego como base para rodovias e como camada de suporte para fundações superficiais, sendo que os resultados demonstraram melhoras significativas nos parâmetros geotécnicos estudados (aumento da capacidade de suporte e redução dos recalques).

Os solos tratados com cal ou cimento exibem um comportamento mecânico complexo, influenciado por diversos fatores (quantidade de cal adicionada, a porosidade da mistura e o teor de umidade), e assim, geralmente o procedimento de dosagem do solo-cal restringe-se à escolha do teor de cal necessário a partir de uma estimativa inicial fornecida pela literatura ou norma, seguida pela execução de uma série de ensaios laboratoriais, até a obtenção das propriedades requeridas. Portanto, ainda não existem metodologias de dosagem para solo-cal com critérios mais racionais como existe para o concreto convencional, como a relação água/cimento que desempenha papel importante na obtenção da resistência desejada.

Além disso, segundo Huang e Airey, (1993), é difícil compreender o comportamento de solos artificialmente cimentados por causa de sua variabilidade, e sua grande variação de resistência e densidade dos provetes. Esta variabilidade pode ocorrer em distâncias muito pequenas e assim, um dos pontos em aberto no estudo de solos estruturados é encontrar um modelo teórico que consiga relacionar a resistência e a deformabilidade de cada elemento do perfil com a mudança contínua dos valores das variáveis (por exemplo, índice de vazios e nível de cimentação) com a profundidade. Um modelo que não apenas descreva o comportamento de um elemento de solo isolado, mas sim o comportamento de todo um perfil de solo (Rotta et al, 2001).

O módulo de deformabilidade é um parâmetro a ser utilizado para a comparação da rigidez dos provetes. Seu valor depende das propriedades do material as quais são ditadas pela quantidade de agente cimentante presente, a umidade envolvida no processo de cimentação e o nível de hidratação da cal. Neste contexto, importantes pesquisas têm sido desenvolvidas (Viana da Fonseca et al., 2009a; Consoli et al., 2009; Viana da Fonseca et al., 2009b; Consoli et al., 2015; Rios et al., 2017a; Rios et al., 2017b) com o objetivo de utilizar estes métodos para entender melhor o comportamento de solos cimentados.

Assim, esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência da quantidade de cal (Ca), da umidade (w) e da porosidade (η) sobre a resistência à compressão simples (q_u) e sobre a rigidez inicial (G_0) de um solo siltoso estabilizado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa de sua resistência à compressão simples e da sua rigidez inicial.

2 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 - Materiais

2.1.1 - Solo

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%) é baixo, considerando a média apresentada pelas argilas. O índice de plasticidade (4%) 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.

2.1.2 - Cal

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.

2.1.3 - Água

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 provetes

Para os ensaios de resistência à compressão simples e de medidas de rigidez inicial, foram moldados provetes cilíndricos de 7mm de diâmetro e 14mm 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 provete, a mistura foi armazenada em um recipiente fechado para evitar perdas de umidade antes da compactação. É importante enfatizar, que a referida mistura ficou armazenado durante o tempo (em média, 5 minutos) de moldagem para um provete. Além disso, duas pequenas porções da mistura eram retiradas, para determinação da umidade (w).

O provete era compactado estaticamente, em cinco camadas, em um molde de ferro fundido, de modo que cada provete atingisse o seu peso específico aparente seco (ρ) desejado. Após o processo de moldagem, o provete foi imediatamente extraída do molde, e seu peso, diâmetro e altura medidos com precisão de cerca de 0,01 g e 0,1 mm. Os provetes foram então, colocados dentro de sacos plásticos, para evitar variações significativas do teor de umidade. Além disso, eles foram curadas por 28 dias em uma câmara úmida com $23^{\circ}\pm 2^{\circ}$ C e umidade relativa do ar acima de 95%. Os provetes que foram considerados aptos para os ensaios respeitaram as seguintes tolerâncias:

- ρ : dentro de $\pm 1\%$ do valor alvo;
- w : dentro de $\pm 0,5\%$ do valor alvo;
- Dimensões: diâmetro de $\pm 0,5$ mm e altura de ± 1 mm em relação ao valor alvo.

2.2.2 - Ensaios de Resistência à Compressão Simples

Ao final das leituras para as medidas de G_0 e após a cura em câmara úmida os provetes foram submersos em um tanque com água por 24 horas para saturação, e assim minimizar a sucção, antes da realização dos ensaios de q_u . A temperatura da água foi mantida a $23\pm 2^{\circ}$ C.

Os provetes foram rompidos à compressão simples em uma prensa automática. A prensa utilizada foi a do LABGEO da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/Portugal, que consiste em uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN equipada com células de carga de 5, 10, 20, 25 e 100 kN. A taxa de deslocamento adotado foi de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de resistência à compressão simples seguiram a norma americana ASTM D 5102/96.

2.2.3 - Ensaios de Medidas de rigidez inicial

Para os ensaios de medida de rigidez inicial foi utilizado um equipamento ultrassônico denominado Pundit Lab, da marca Proceq, disponível no LABGEO da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/Portugal. O ensaio consiste em posicionar o corpo-de-prova sobre o transdutor receptor de ondas. O transdutor emissor, por sua vez, é posicionado sobre o corpo-de-prova. Foi utilizado o gel condutor de ultrassom, da marca Mercur, para facilitar o envio das ondas ultrassônicas. Os transdutores utilizados eram de 82 kHz e 100 kHz para as ondas "P" (compressão) e para as ondas "S" (cisalhamento), respectivamente.

O corpo-de-prova devidamente posicionado era submetido a passagem de ondas sísmicas. O tempo entre a transmissão e a recepção da onda é o tempo de viagem da mesma, com o qual pode-se calcular a velocidade da onda cisalhante V_s , e por sua vez, o módulo cisalhante elástico através da Equação (1):

$$G_0 = \rho V_s^2 = \rho \left(\frac{L^2}{t^2} \right) \quad [1]$$

Onde ρ é o peso específico do solo, L é a distância entre os transdutores e t é o tempo de viagem da onda.

2.2.4 - Programa de Ensaios de resistência à compressão simples e de Medidas de rigidez inicial

As percentagens de cal (3, 5, 7 e 9%) foram definidas a partir de outras pesquisas (Carraro, 1997; Dalla Rosa, 2009; Consoli, 2011; Consoli 2017a) para posteriores comparações, e estão de acordo com a experiência brasileira e internacional com solo-cal. O programa de ensaios de q_u e de medidas de G_0 teve como objetivo avaliar a influência das variáveis: quantidade de cal (C_a), umidade (w) e porosidade (η) sobre a q_u e sobre a G_0 das misturas solo-cal. 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 Fig. 1. 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 (ρ).

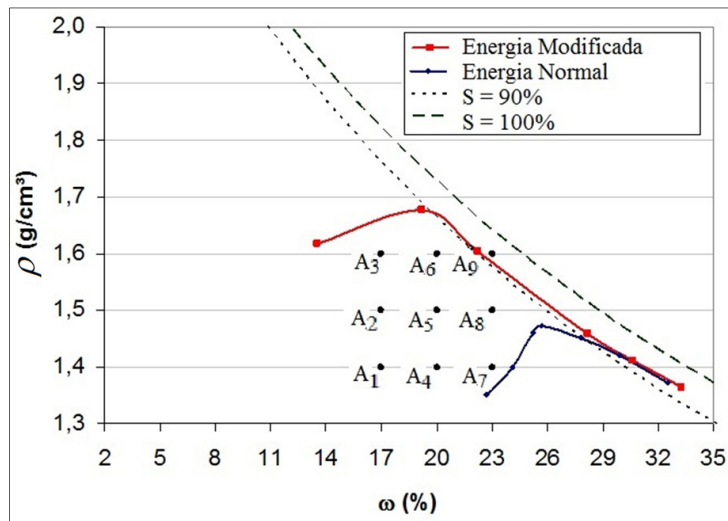


Figura 1 – Programa de ensaios de resistência à compressão simples e de medidas de rigidez inicial

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 compressão simples

3.1.1 - Efeito da quantidade de cal

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para as misturas com 20% e 90 dias de cura são apresentados na Fig. 2, que apresenta resultados considerando os pesos específicos aparentes secos (ρ) de 1,4 g/cm³, 1,5 g/cm³ e 1,6 g/cm³, e percentagens de cal de 3%, 5%, 7% e 9%. Os provetes com 17% e 23% de w apresentam as mesmas tendências.

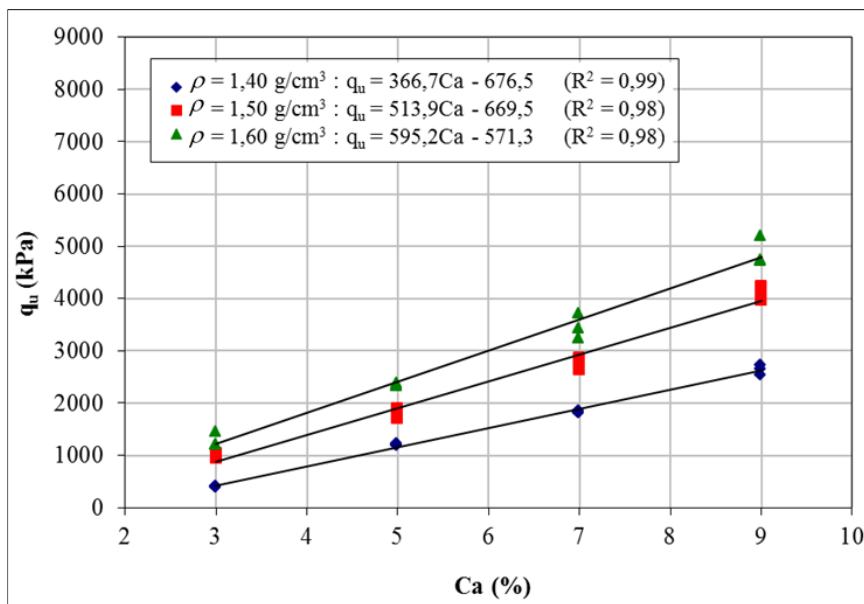


Figura 2 – Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a quantidade de cal para 20% de umidade, considerando todos os pesos específicos aparentes secos estudados

Pode-se observar que a quantidade de cal tem efeito significativo sobre a resistência à compressão simples 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 291% em todas as curvas com 17% de w , 380% com 20% de w e 318% com 23% de w .

Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples 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. Este mesmo fenômeno foi observado por Hoch (2017) em provetes de *chalk*-cimento.

3.1.2 - Efeito da porosidade

A Fig. 3 apresenta como a porosidade influencia na resistência à compressão simples das misturas com 20% e 90 dias de cura. Observa-se que, a resistência à compressão simples aumenta exponencialmente com a redução da porosidade de todas as misturas compactadas. Os provetes com 17% e 23% de umidade apresentam as mesmas tendências.

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce influência sobre a resistência à compressão simples do solo-cal em estudo. Em média a redução de 10 pontos percentuais na porosidade do material aumentou, em média, 2,2 vezes a resistência à compressão simples do solo-cal testado com 17% de umidade, 2,2 vezes com 20% de umidade e 2,4 com 23% de umidade, em todas as curvas.

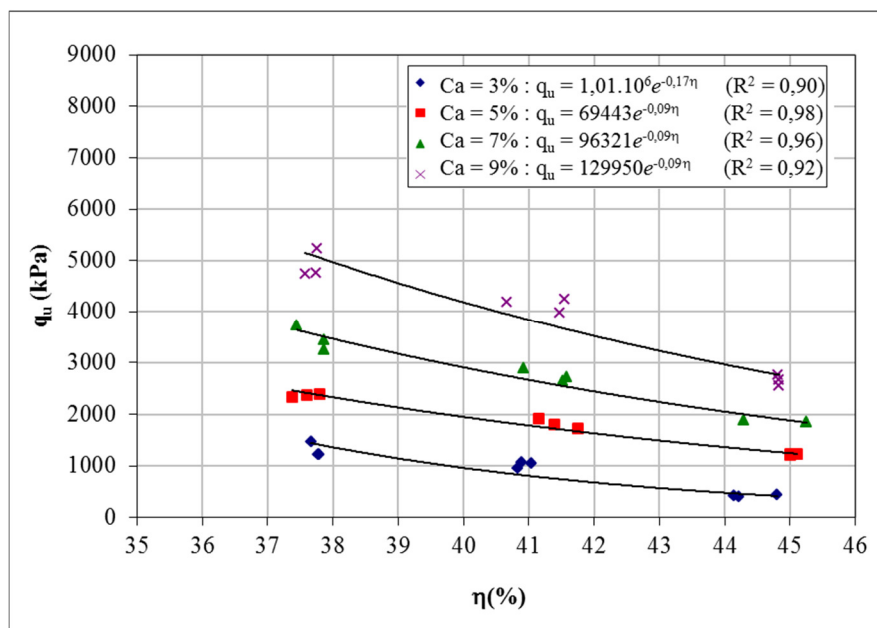


Figura 3 – Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a porosidade (η) para 20% de umidade, considerando todos os teores de cal estudados

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

A Fig. 4 apresenta a variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/Cav) para os provetes com 20% de umidade, definida pela Equação (2):

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

Onde η é a porosidade do solo e Cav é o teor volumétrico de cal.

Observa-se, na Fig. 4, a existência de uma relação com forte tendência exponencial entre q_u e η/Cav . Os provetes com 17% e 23% de umidade apresentam as mesmas tendências.

Na continuidade da pesquisa, verificou-se que a aplicação de uma potência igual a 0,45 sobre Cav para todas as misturas solo-cal estudadas, proporciona um bom ajuste dos dados na obtenção da q_u a ser atingida, conforme apresentado na Fig. 5. Assim, a Fig. 5 apresenta a aplicação de uma curva tipo potência sobre os resultados adquiridos. As mesmas tendências são observadas para os provetes com 17% e 23% de umidade.

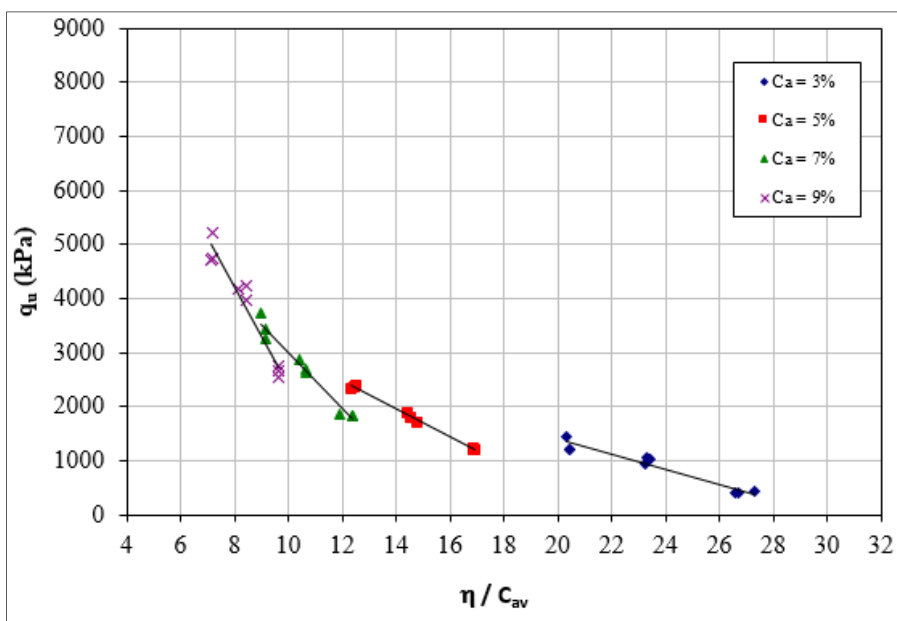


Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/C_{av}) para os provetes com 20% de umidade

As Equações (3), (4) e (5) representam as relações encontradas para as misturas com 17% de umidade ($R^2=0,83$), 20% de umidade ($R^2=0,96$) e 23% de umidade ($R^2=0,94$). Observa-se também, que quanto maior o teor de cal, maior a resistência à compressão simples (q_u) para qualquer dado de $(\eta/C_{av})^{0,45}$.

$$q_u = 3,21 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad [3]$$

$$q_u = 3,96 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad [4]$$

$$q_u = 3,55 \cdot 10^7 (\eta / (C_{av})^{0,45})^{-3,10} \quad [5]$$

Onde q_u é a resistência à compressão simples do solo, η é a porosidade do solo e C_{av} é o teor volumétrico de cal.

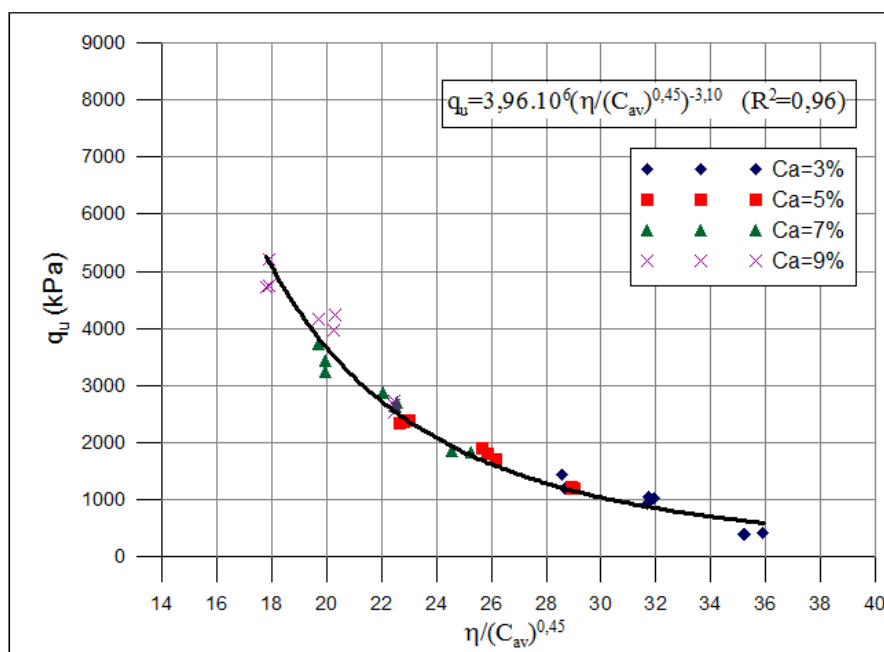


Figura 5 – Variação da q_u com a relação $(\eta/C_{av})^{0,45}$ ajustada por uma curva tipo potência para os provetes com 20% de umidade

3.1.4 - Análise do efeito do teor de umidade

Na Fig. 6 são apresentados os resultados das relações $(\eta / C_{av})^{0,45}$ pela qu dos provetes de caulim-cal com 17, 20 e 23% de umidade.

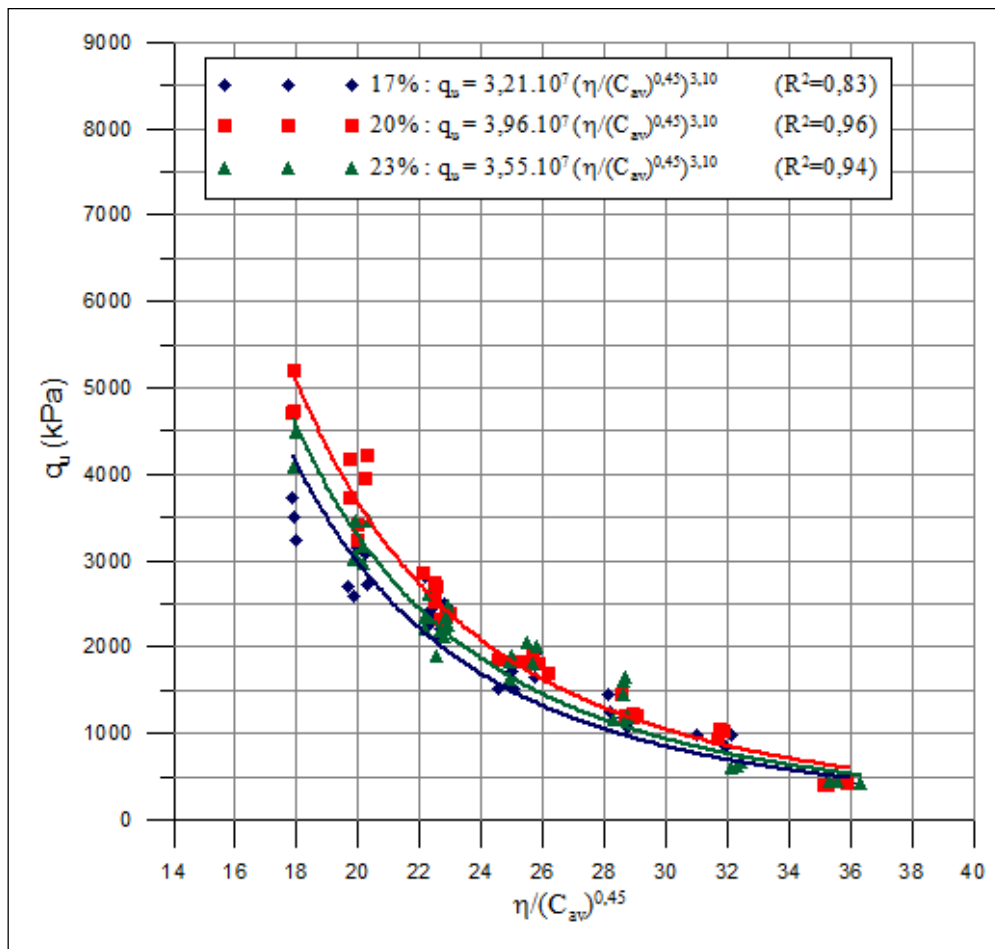


Figura 6 – Variação da q_u com a relação (η / C_{av}) para os provetes com 17, 20 e 23% de umidade

A partir das análises realizadas observa-se um aumento da q_u com o aumento do teor de w até um valor ótimo (20%), a partir do qual a resistência passa a diminuir. A mesma tendência foi relatada por Foppa (2005) em provetes de solo-cimento.

3.2 - Ensaios de Medidas de rigidez inicial

3.2.1 - Efeito da quantidade de cal

Os resultados dos ensaios de medidas de rigidez inicial para as misturas com 20% de umidade e 90 dias de cura são apresentados na Fig. 7, que apresenta resultados considerando os pesos específicos aparentes secos (ρ) de 1,4, 1,5 e 1,6 g/cm³, e percentagens de cal de 3, 5, 7 e 9%. As mesmas tendências são observadas nos resultados dos provetes com 17% e 23% de w .

Pode-se observar que a quantidade de cal tem efeito significativo sobre a G_0 do material estudado. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a G_0 , em média, acresceu 92% em todas as curvas com 17% de w , 116% com 20% de w e 158% com 23% de w .

Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a G_0 aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal. Além disso, a taxa de aumento de G_0 , representada pela inclinação das retas de ajuste, aumenta com o aumento do peso específico aparente seco. Este mesmo fenômeno foi observado por Hoch (2017) em provetes de *chalk*-cimento.

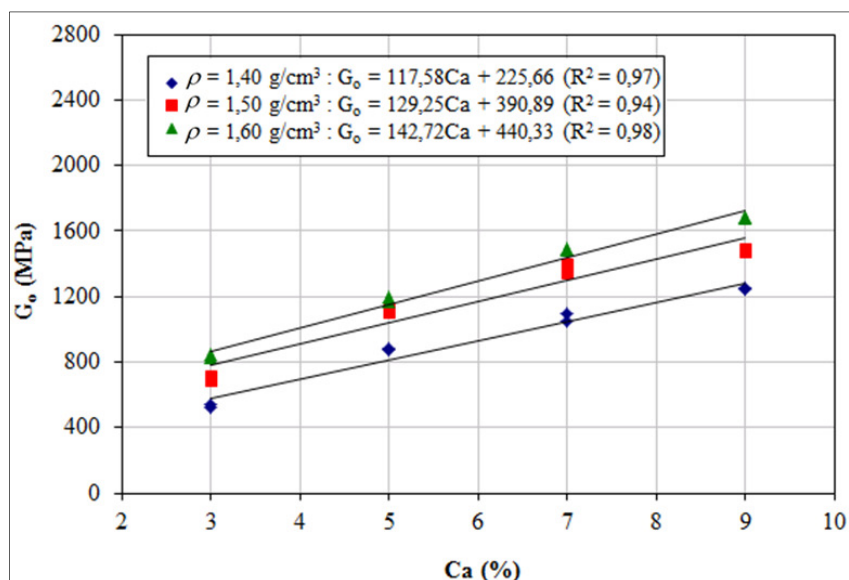


Figura 7 – Variação da resistência à compressão simples (G_o) com a quantidade de cal (Ca) para 20% de umidade, considerando todos os pesos específicos aparentes secos estudados

3.2.2 - Efeito da porosidade

A Fig. 8 apresenta como a porosidade influencia na rigidez inicial das misturas com 20% de umidade e 90 dias de cura, respectivamente. Observa-se que, a rigidez inicial aumenta exponencialmente com a redução da porosidade de todas as misturas compactadas. As mesmas tendências são observadas nos resultados dos provetes com 17% e 23% de umidade.

Verifica-se que, de maneira similar à quantidade de cal, a η da mistura compactada exerce influência sobre a G_o do solo-cal em estudo. Em média a redução de 10 pontos percentuais na η do material aumentou, em média, 1,6 vezes a G_o do solo-cal testado com 17% de w , 1,4 vezes com 20% de w e 1,4 com 23% de w , em todas as curvas.

Pode-se observar também, que a rigidez inicial aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

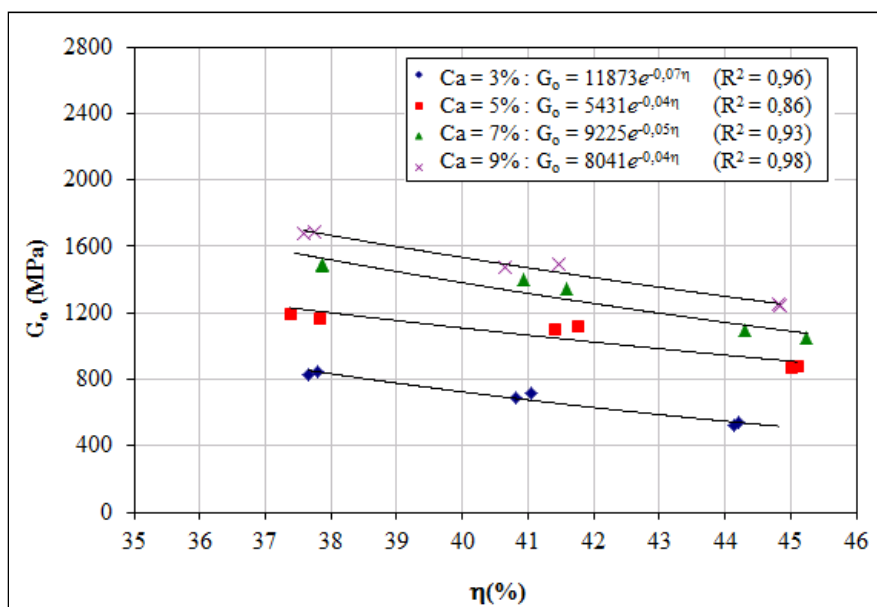


Figura 8 – Variação da resistência à compressão simples (G_o) com a porosidade (η) para 20% de umidade, considerando todos os teores de cal estudados

3.2.3 - Aplicação da relação vazios/cal (η/Cav)

A Fig. 9 apresenta a variação da rigidez inicial (G_o) com a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/Cav), definida anteriormente pela Equação (2).

A Fig. 9 apresenta como η/C_{av} afeta G_o para o solo estabilizado com cal com 20% de umidade. Para os dois tempos de cura, os provetes têm diferentes quantidades de cal e porosidades. Pode-se observar que nos dois casos existe uma relação com forte tendência exponencial entre G_o e η/C_{av} . As mesmas tendências são observadas nos resultados dos provetes com 17% e 23% de umidade.

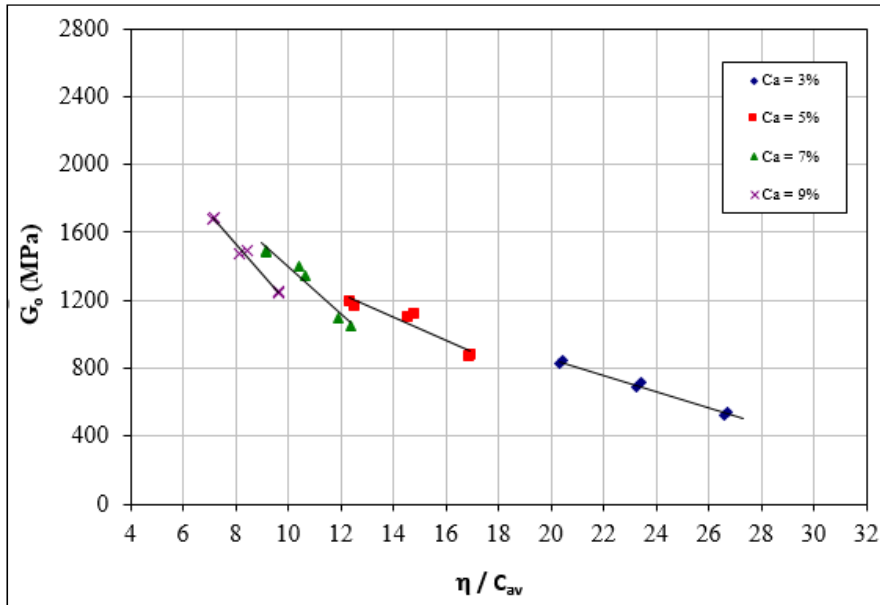


Figura 9 – Variação da resistência à compressão simples (G_o) com a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/C_{av}) para 20% de umidade

A aplicação de uma potência igual a 0,45 sobre C_{av} para todas as misturas solo-cal estudadas, também proporcionou um bom ajuste dos dados na obtenção da rigidez inicial a ser atingida, conforme apresentado na Fig. 10, o que também foi observado nas respostas de resistência à compressão simples apresentadas no item 3.1.3. Assim, a Fig. 10 apresenta a aplicação de uma curva tipo potência sobre os resultados adquiridos para 20% de umidade. Os provetes com 17% e 23% de umidade apresentam as mesmas tendências.

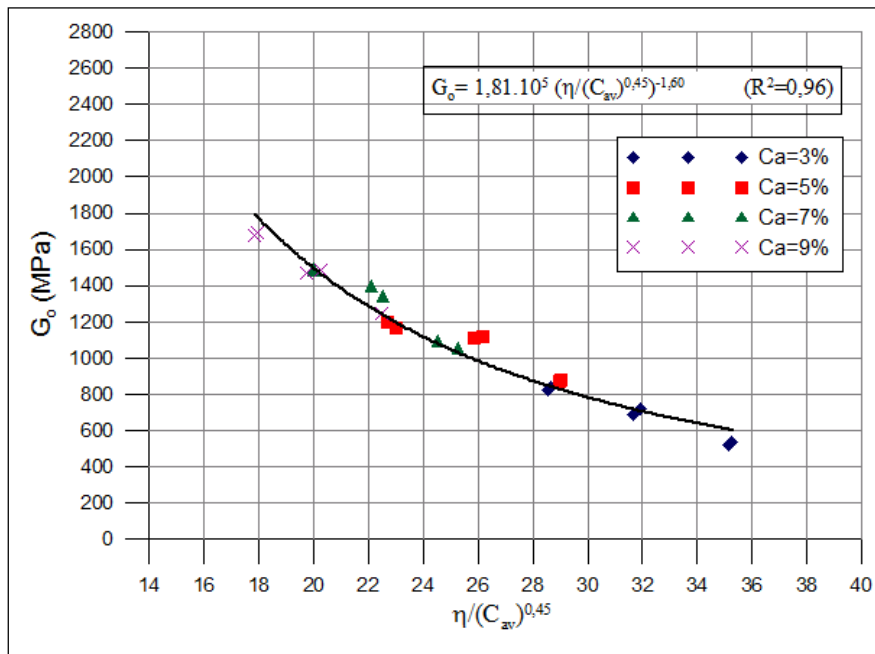


Figura 10 – Variação da G_o com a relação $(\eta/C_{av})^{0,45}$ ajustada por uma curva tipo potência para os provetes com 20% de umidade

Observa-se que a aplicação da relação vazios/cal $(\eta/C_{av})^{0,45}$, ajustada por uma curva tipo potência, proporciona um bom ajuste dos dados na obtenção da rigidez inicial a ser atingida, respectivamente com 17%, 20% e 23% de umidade. As Equações (6), (7) e (8) representam as relações encontradas para as misturas com 17% de umidade ($R^2=0,95$), 20% de umidade ($R^2=0,96$) e 23% de umidade ($R^2=0,95$).

Observa-se também, que quanto maior o teor de cal, maior a rigidez inicial (G_0) para qualquer dado de $(\eta/Cav)^{0,45}$.

$$G_0 = 1,72 \cdot 10^5 (\eta / (Cav)^{0,45})^{-1,60} \quad [6]$$

$$G_0 = 1,81 \cdot 10^5 (\eta / (Cav)^{0,45})^{-1,60} \quad [7]$$

$$G_0 = 1,86 \cdot 10^5 (\eta / (Cav)^{0,45})^{-1,60} \quad [8]$$

Onde G_0 é a rigidez inicial do solo, η é a porosidade do solo e Cav é o teor volumétrico de cal.

3.2.4 - Análise do efeito do teor de umidade

Na Fig. 11 são apresentados os resultados das relações $(\eta/Cav)^{0,45}$ pela q_u dos provetes de caulim-cal com 17, 20 e 23% de umidade.

A partir das análises realizadas observa-se um aumento da rigidez inicial com a diminuição do teor de umidade. Esta mesma tendência foi observada por Consoli et al (2001), em provetes de solo-cinza-cal e por Galaa et al (2011), ao estudar dois grupos de provetes de solo-cimento, um submerso em água e outro não submerso em água. Segundo Galaa et al (2011), o fato de provetes com umidades menores obterem valores de rigidez inicial maiores, reflete o efeito da sucção nas medidas de rigidez inicial.

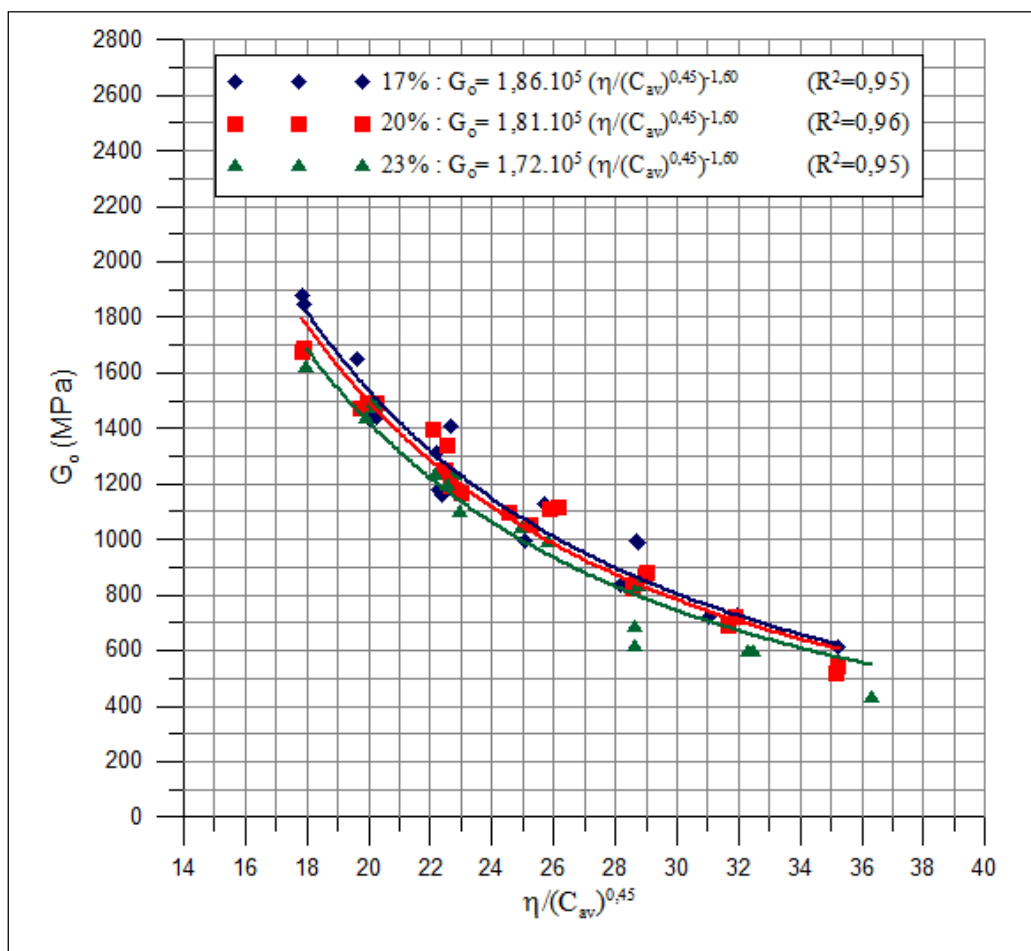


Figura 11 – Variação da resistência à compressão simples (G_0) com a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/Cav) com 17, 20 e 23% de umidade.

4 - CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser evidenciadas para os provetes de caulim-cal com 28 dias de cura:

- Quanto maior a quantidade de cal, maior a q_u e maior a G_0 para um determinado peso específico aparente seco e para uma determinada quantidade de cal. Além disso, relações lineares podem ser observadas nos resultados de q_u versus C_a e G_0 versus C_a para o tempo de cura estudado.

- Em todas as misturas estudadas a redução da porosidade proporciona o aumento da sua q_u e G_o . Sendo que, a resistência à compressão simples e a rigidez inicial aumentam exponencialmente com a redução da porosidade.
- A relação porosidade/teor volumétrico de cal mostra ser um bom parâmetro na avaliação da q_u e da G_o dessas misturas solo-cal. Além disso, a função de potência ajustada por um expoente se adapta muito bem à relação q_u versus $\eta/(Cav)^{0,45}$ e à relação G_o versus $\eta/(Cav)^{0,45}$.
- Analisando-se os provetes ensaiados à resistência à compressão simples, observa-se um aumento da q_u 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 rigidez inicial, observa-se um aumento da G_o com a diminuição do teor de umidade.
- Enfatiza-se, que o tempo de cura de 28 dias analisado nesta pesquisa representa os efeitos iniciais provenientes das reações solo-cal. Para solos estabilizados com cal é importante também analisar tempos de cura maiores, como 60 e 90 dias, devido ao efeito das reações lentas solo-cal.

AGRADECIMENTOS

Os autores demonstram agradecimento ao suporte financeiro da CAPES e do CNPq, aos colegas do LABGEO/FEUP e LEGG/ENVIRONGEO/UFRGS e à UTFPR.

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.
- ASTM D 5102 (1996) - Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures. *American Society for Testing and Materials*. Philadelphia.
- Carraro, J.A.H. (1997) - *Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de um Solo Residual de Arenito*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 150p.
- Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., Carraro, J.A.H. e Heineck, K. S. (2001) - Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. New York: ASCE, v.127, n.9, p.774-782.
- Consoli, N.C., Viana da Fonseca, A., Cruz, R.C. e Heineck, K.S. (2009) - Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. New York: ASCE, v.135, p.1347-1353.
- Consoli, N.C., Dalla Rosa, A. e Saldanha, R.B. (2011) - Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. New York: ASCE, v.23, p.432-440.
- Consoli, N.C., Viana da Fonseca, A., Silva, S.R., Cruz, R.C. e Fonini, A. (2015) - Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. *Géotechnique*. London: ICE, v.62, p.177-183.
- Consoli, N.C., Ibraim, E., Diambra, A., Festugato, L. e Marques, S.F.V. (2017a) - A Sole Empirical Correlation Expressing Strength of Fine-Grained Soils - Lime Mixtures. *Soils and Rocks*. São Paulo, v.40, p. 147-153
- Consoli, N.C., Saldanha, R. B., Mallmann, J.E.C., Paula, T.M. e Hoch, B.Z. (2017b) - Enhancement of strength of coal fly ash-carbide lime blends through chemical and mechanical activation. *Construction and Building Materials*. Amsterdã: Elsevier. V.157, p. 65-74.
- Consoli, N.C., Quiñónez, R.A., González, L.E. e López, R.A. (2017c) - Influence of Molding Moisture Content and Porosity/Cement Index on Stiffness, Strength, and Failure Envelopes of Artificially Cemented Fine-Grained Soils. *Journal of Material and Civil Engineering*, v.29, 04016277.
- Dalla Rosa, A. (2009) - *Estudo dos Parâmetros-chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 198p.
- 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.
- Galaa, A.M., Thompson, B.D, Grabinsky, M.W. e Bawden, W.F. (2011) - Characterizing stiffness development in hydrating mine backfill using ultrasonic wave measurements. *Canadian Geotechnical Journal*. v.48, n.8, p. 1174-1187.

- Hoch, B.Z. (2017) - *Misturas de chalk com cimento: estudo da rigidez, resistência e durabilidade*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 149 p.
- Huang, J.Y. e Airey, D.W. (1993) - Effects of cement and density on na artificially cemented sand. (1993) *In: International Simposium on Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks*. Athens. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. 3v. v.1, p 553-560.
- 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.
- 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.
- Rios, S., Viana da Fonseca, A. e Baudet; B.A. (2013) - On the shearing behaviour of an artificially cemented soil. *Acta Geotechnica*. v.9, p. 215–226.
- Rios, S., Ramos, C., Viana da Fonseca, A., Cruz, N. e Rodrigues, C. (2017a) - Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. London: Taylor and Francis. P. 1-23
- Rios, S., Cristelo, N., Viana da Fonseca, A. e Ferreira, C. (2017b) - Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. *International Journal of Geomechanics*. New York: ASCE. v.17, 04016087.
- Rotta, G.V., Prietto, P.D.M., Consoli, N.C. e Gehling, W.Y.Y. (2001) - Influência do índice de vazios na formação da matriz cimentante no comportamento mecânico de solos cimentados. *Revista Solos e Rochas*. v.24, n.1, p. 23-41.
- Saldanha, R.B., Scheuermann Filho, H.C., Ribeiro, J.L.D. e Consoli, N.C. (2017) - Modelling the influence of density, curing time, amounts of lime and sodium chloride on the durability of compacted geopolymers monolithic walls. *Construction and Building Materials*. Amsterdã: Elsevier. V.136, p. 65-72.
- 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.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. e Fahey, M. (2009a) - A framework interpreting bender element tests, combining time-domain and frequency domain methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineerin*. New York: ASCE, v.32, n.2, p. 91-107.
- Viana da Fonseca, A., Cruz, R.C. e Consoli, N.C. (2009b) - Strength properties of sandy soil-cement admixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*. v. 27, p. 681-686.
- Viana da Fonseca, A., Rios, S., Amaral, M.F. e Panico, F. (2013) - Fatigue Cyclic Tests on Artificially Cemented Soil. *Geotechnical Testing Journal*. New York: Springer. v. 36, p. 227-235.