

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA RIGIDEZ INICIAL EM UM SOLO SILTOSO ESTABILIZADO COM CAL SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPOS DE CURA

ANALYSIS THE EVOLUTION OF THE INITIAL STIFFNESS IN A SILTY SOIL STABILIZED WITH LIME SUBMITTED TO DIFFERENT CURING TIMES

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

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

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

RESUMO

Os solos, na engenharia civil, podem ser considerados como materiais de construção ou de suporte para obras. Quando o solo não corresponde ao que é solicitado, uma das alternativas é a estabilização do mesmo através da estabilização química com cal. O comportamento de solos estabilizados com cal é complexo e um dos pontos em aberto é encontrar um modelo teórico que consiga relacionar a resistência e a deformabilidade de cada elemento do perfil do solo com a mudança contínua dos valores das variáveis (por exemplo, índice de vazios e teor de cal) com a profundidade, representando o comportamento do solo como um todo. Assim, esta pesquisa tem como objetivo verificar o comportamento da rigidez inicial a pequeníssimas deformações (G_0) em comparação com a quantidade de cal (Ca) e o tempo de cura (t) de um solo estabilizado, através de ensaios ultrassônicos. Os resultados desta pesquisa demonstram que o aumento de tempo de cura e o aumento de quantidade de cal provocam o aumento de G_0 das amostras estudadas.

ABSTRACT

The soils, in civil engineering, can be considered as building materials or support for constructions. When the soil is not what is required, one of the alternatives is to stabilize it through soil stabilization with lime. The performance of soil-lime mixtures is complex and one of the open points is to find a theoretical model that can relate the strength and deformability of each soil profile element with the continuous change with depth of the variables (for example, index of voids and lime content), representing the behavior of the soil as a whole. Thus, this research aims to determine the behavior of the initial stiffness at very small deformations (G_0) compared to the amount of lime (Ca) and curing time (t) of a stabilized soil, using ultrasonic testing. The results of this study showed that the increase of curing time and the increase of the amount of lime causes an increase in the samples G_0 .

1 - INTRODUÇÃO

A técnica de melhoramento do solo com cal possui grande aplicação em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica. Tais condições são problemáticas na medida em que podem causar severas patologias na edificação (Ingles & Metcalf, 1972).

A primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e a melhoria da trabalhabilidade, e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (Ingles & Metcalf, 1972; Attoh-Okine, 1995; TRB, 1987).

Neste contexto, muitas pesquisas desenvolvidas em solos artificialmente cimentados (Núñez, 1991; Thomé, 1994; Carraro, 1997; Lovato, 2004; Viana da Fonseca et al., 2009a; Dalla Rosa, 2009; Lopes Junior, 2011; Consoli et al., 2009, 2011, 2012, 2015) mostram melhoras significativas nos parâmetros geotécnicos citados anteriormente (principalmente o aumento da resistência, o aumento da rigidez inicial e a diminuição da deformação).

O aumento da rigidez inicial é o efeito mais evidente em solos cimentados; por esta razão, diversos autores se dedicaram ao estudo do comportamento de pequeníssimas deformações de materiais geotécnicos. Entre eles, estão Clough et al. (1981), Chang & Woods (1992), Hight & Jardine (1993), Tatsuoka et al. (1999), Viana da Fonseca et al. (2009b); Consoli et al. (2000), Lopes Junior (2011), Galaa et al. (2011) e Fonini (2012).

Consoli et al. (2000) investigaram experimentalmente o procedimento usual de obtenção da rigidez de solos cimentados em ensaios triaxiais convencionais, fixando-se na influência da aplicação de tensões confinantes antes e após a cimentação do solo. Os autores verificaram que a degradação da cimentação

causou, nas amostras curadas sem confinamento, a queda da rigidez inicial com a tensão de confinamento, ao passo que nas amostras curadas sob tensão verificou-se o aumento com a tensão de confinamento.

Lopes Junior (2011), que estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal, verificou que a adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, promoveu o aumento substancial da rigidez inicial. O módulo distorcional tende a aumentar não-linearmente com o aumento da quantidade de cal. Além disso, a redução na porosidade do material compactado promoveu aumentos substanciais da rigidez inicial dessas misturas.

Galaa et al. (2011) analisaram dois conjuntos de amostras de solo-cimento (um submerso em água e outro não submerso em água) e observaram que a rigidez inicial aumentou para ambos os conjuntos de amostras, porém, as amostras que não foram submersas em água apresentaram valores de rigidez inicial maiores em comparação com as amostras submersas em água.

Fonini (2012), ao estudar misturas de solo-cimento, observou que o aumento do tempo de cura proporcionou o aumento das medidas de rigidez inicial das amostras estudadas.

Sendo assim, esta pesquisa tem como objetivo analisar a influência da quantidade de cal e do tempo de cura na rigidez inicial de um solo siltoso estabilizado com cal, para que se possa atingir de forma mais objetiva e com maior confiabilidade as propriedades requeridas nessas misturas.

2 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 - Materiais

O solo denominado "caulim" utilizado nesta pesquisa é comercialmente conhecido como caulim rosa, originário do município de Pântano Grande no sul do Brasil.

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 das amostras

Para os ensaios de medidas de rigidez inicial, foram moldadas amostras cilíndricas de 7 mm de diâmetro e 14 mm 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 uma amostra, 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 (w).

A amostra era compactada estaticamente, em cinco camadas, em um molde de ferro fundido, de modo que cada amostra atingisse o seu peso específico aparente seco (γ_d) desejado. Após o processo de moldagem, a amostra foi imediatamente extraída do molde, e seu peso, diâmetro e altura medidos com precisão de cerca de 0,01 g e 0,1 mm. As amostras foram então, colocadas dentro de sacos plásticos, para evitar variações significativas do teor de umidade, e curadas por 3, 7, 14, 28, 45, 60, 75 e 90 dias em uma câmara úmida com 23^o±2^o C e umidade relativa do ar acima de 95%.

As amostras que foram consideradas aptas para os ensaios respeitaram as seguintes tolerâncias:

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

2.2.2 - Moldagem e cura das amostras

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 distorcional elástico através da Equação (1):

$$G_0 = \rho V_s^2 = \rho \frac{L^2}{T^2} \quad [1]$$

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

2.2.3 - Programa de ensaios de medidas de rigidez inicial

As porcentagens de cal (3, 5, 7 e 9%) e os tempos de cura (3, 7, 14, 28, 45, 60, 75 e 90 dias) foram definidos a partir de outras pesquisas para posteriores comparações, e estão de acordo com a experiência brasileira e internacional com solo-cal. Sendo assim, o programa de ensaios de G_0 teve como objetivo principal avaliar a influência das variáveis: tempo de cura (t) e quantidade de cal (Ca).

Para que seja possível a avaliação 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 1. Observa-se que os pontos de moldagem foram posicionados em três linhas verticais (pontos: A1 a A3, A4 a A6 e A7 a A9), denominadas linhas "A", correspondentes a três diferentes teores de umidade (17, 20 e 23%) e diferentes pesos específicos aparentes secos.

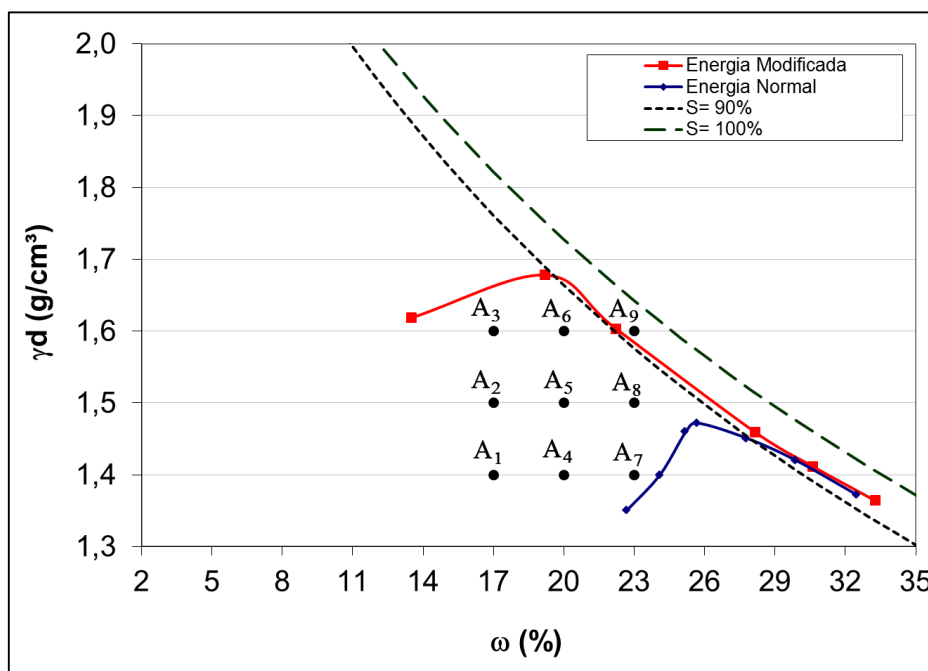


Figura 1 - Programa de ensaios de medidas de rigidez inicial

Sendo assim, cada ponto da linha "A" foi moldado com as 4 diferentes porcentagens de cal e curado com os 8 tempos diferentes de cura.

3 - RESULTADOS E ANÁLISES DA RIGIDEZ INICIAL

3.1 - Amostras com 17% de umidade

Os resultados dos ensaios de medidas de rigidez inicial para as misturas com 17% de umidade, percentagens de cal de 3%, 5%, 7% e 9% e com 1,4 g/cm³, 1,5 g/cm³ e 1,6 g/cm³ são apresentados na Figura 2.

Observa-se na Figura 2 que o aumento do tempo de cura provoca o aumento da rigidez inicial das amostras estudadas. Ao se aumentar a o tempo de cura de 3 para 90 dias, a rigidez inicial, em média, cresceu 94% para as amostras com 17% de umidade.

O mesmo fato ocorre com a quantidade de cal, que demonstra ter efeito significativo sobre a rigidez inicial do material para os corpos-de-prova ensaiados. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a rigidez inicial, em média, cresceu 90% para as amostras com 17% de umidade.

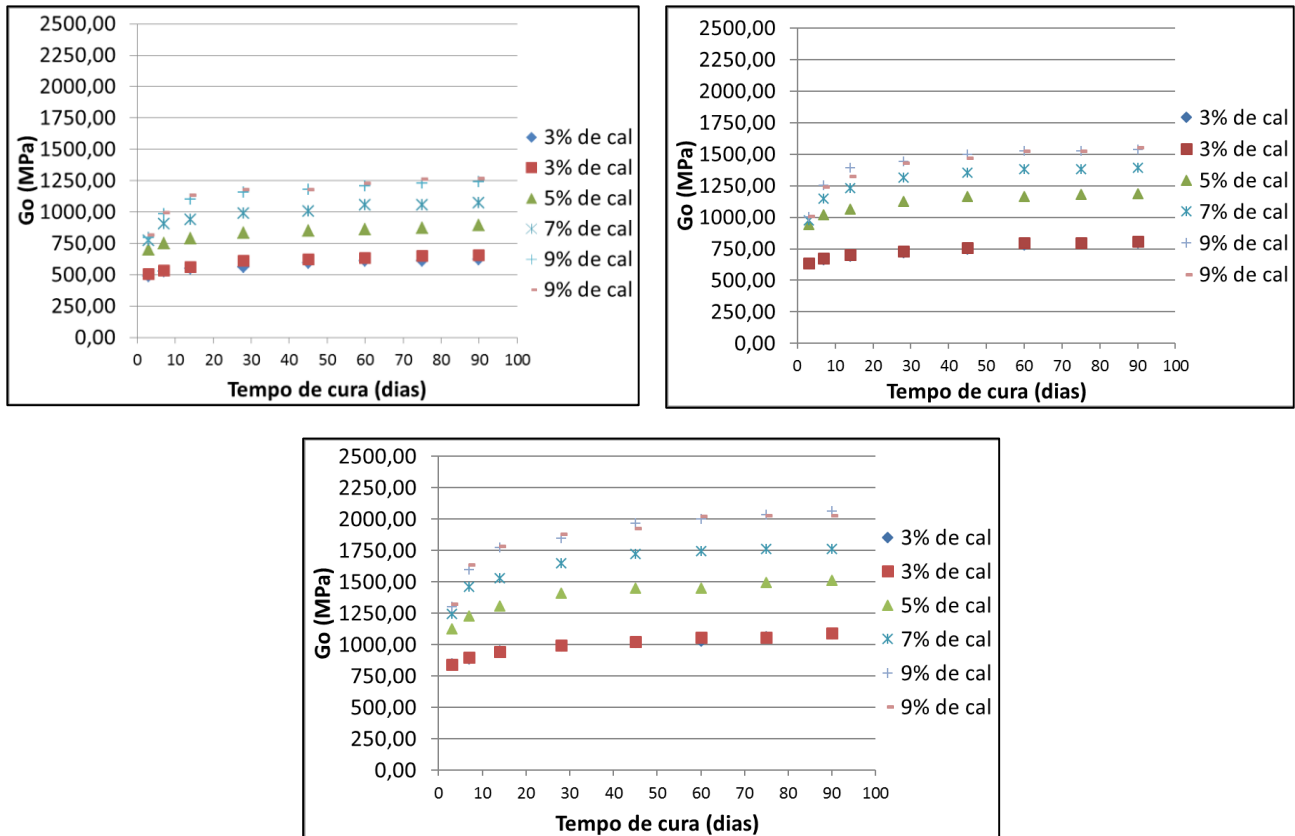


Figura 2 - Rigidez inicial versus tempo de cura para as amostras com 17% de umidade e a) peso específico aparente seco de 1,4 g/cm³, b) peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³ e c) peso específico aparente seco de 1,6 g/cm³

Verifica-se também, comparando-se as Figuras 2-a) a 2-c), que a taxa de aumento de rigidez inicial aumenta com o aumento do peso específico aparente seco. Ao se aumentar o peso específico aparente seco de 1,4 g/cm³ para 1,6 g/cm³ a rigidez inicial, em média, cresceu 160% para as amostras com 17% de umidade.

3.2 - Amostras com 20% de umidade

Os resultados dos ensaios de medidas de rigidez inicial para as misturas com 20% de umidade, percentagens de cal de 3%, 5%, 7% e 9% e com 1,4 g/cm³, 1,5 g/cm³ e 1,6 g/cm³ são apresentados na Figura 3.

Observa-se na Figura 3, de maneira similar às amostras com 17% de umidade, que o aumento do tempo de cura provoca o aumento da rigidez inicial das amostras estudadas. Ao se aumentar a o tempo de cura de 3 para 90 dias, a rigidez inicial, em média, cresceu 140% para as amostras com 20% de umidade.

Além disso, pode-se observar que a quantidade de cal tem efeito significativo sobre a rigidez inicial do material para os corpos-de-prova ensaiados. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a rigidez inicial, em média, cresceu 106% para as amostras com 20% de umidade.

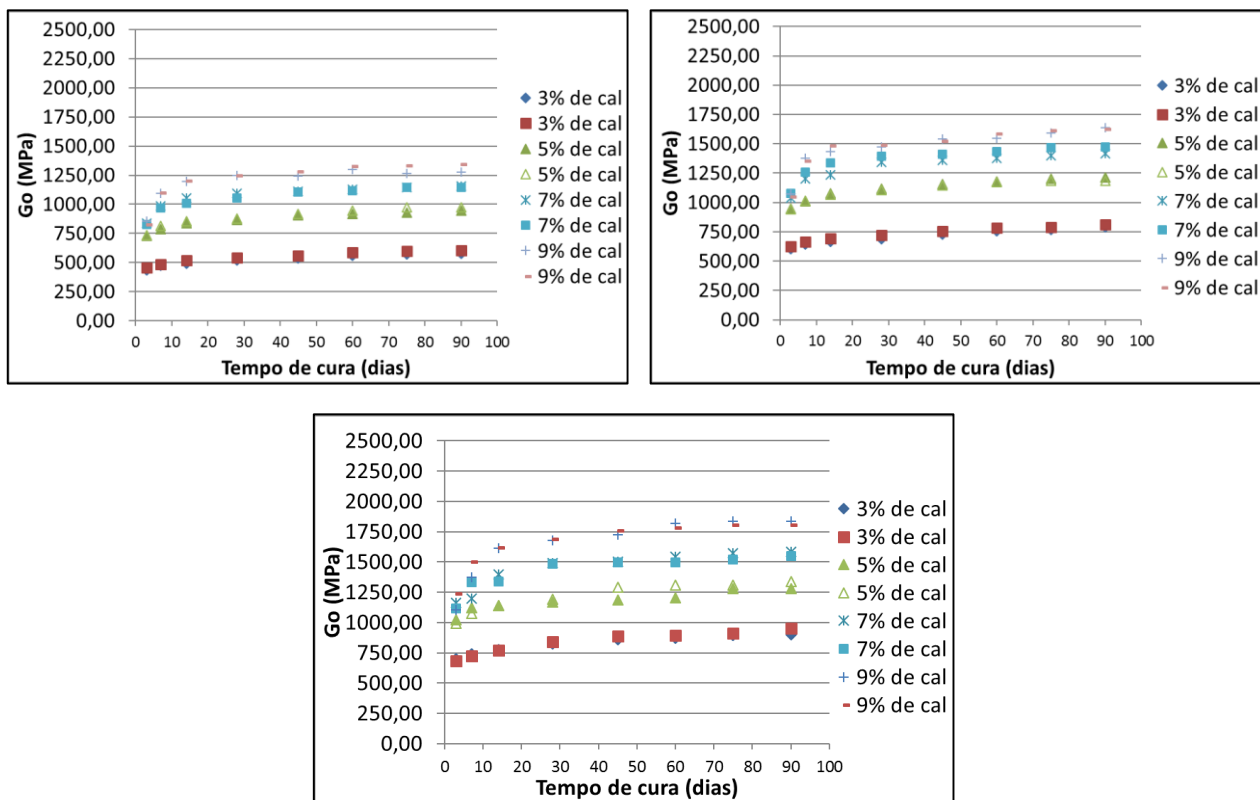


Figura 3 - Rigidez inicial versus tempo de cura para as amostras com 20% de umidade e a) peso específico aparente seco de $1,4 \text{ g/cm}^3$, b) peso específico aparente seco de $1,5 \text{ g/cm}^3$ e c) peso específico aparente seco de $1,6 \text{ g/cm}^3$

Verifica-se também, comparando-se Figuras 3-a) a 3-c), que a taxa de aumento de rigidez inicial aumenta com o aumento do peso específico aparente seco. Ao se aumentar o peso específico aparente seco de $1,4 \text{ g/cm}^3$ para $1,6 \text{ g/cm}^3$ a rigidez inicial, em média, cresceu 140% para as amostras com 20% de umidade.

3.3 - Amostras com 23% de umidade

Os resultados dos ensaios de medidas de rigidez inicial para as misturas com 23% de umidade, percentagens de cal de 3%, 5%, 7% e 9% e com $1,4 \text{ g/cm}^3$, $1,5 \text{ g/cm}^3$ e $1,6 \text{ g/cm}^3$ são apresentados na Figura 4, respectivamente.

Observa-se na Figura 4, de maneira similar às amostras com 17% e 20% de umidade, que o aumento do tempo de cura provoca o aumento da rigidez inicial das amostras estudadas. Ao se aumentar a o tempo de cura de 3 para 90 dias, a rigidez inicial, em média, cresceu 145% para as amostras com 23% de umidade.

O mesmo fato ocorre com a quantidade de cal, que demonstra ter efeito significativo sobre a rigidez inicial do material para os corpos-de-prova ensaiados. Ao se aumentar a quantidade de cal de 3% para 9%, a rigidez inicial, em média, cresceu 144% para as amostras com 20% de umidade.

Verifica-se também, comparando-se as Figuras 4-a) a 4-c), que a taxa de aumento de rigidez inicial aumenta com o aumento do peso específico aparente seco. Ao se aumentar o peso específico aparente seco de $1,4 \text{ g/cm}^3$ para $1,6 \text{ g/cm}^3$ a rigidez inicial, em média, cresceu 140% para as amostras com 23% de umidade.

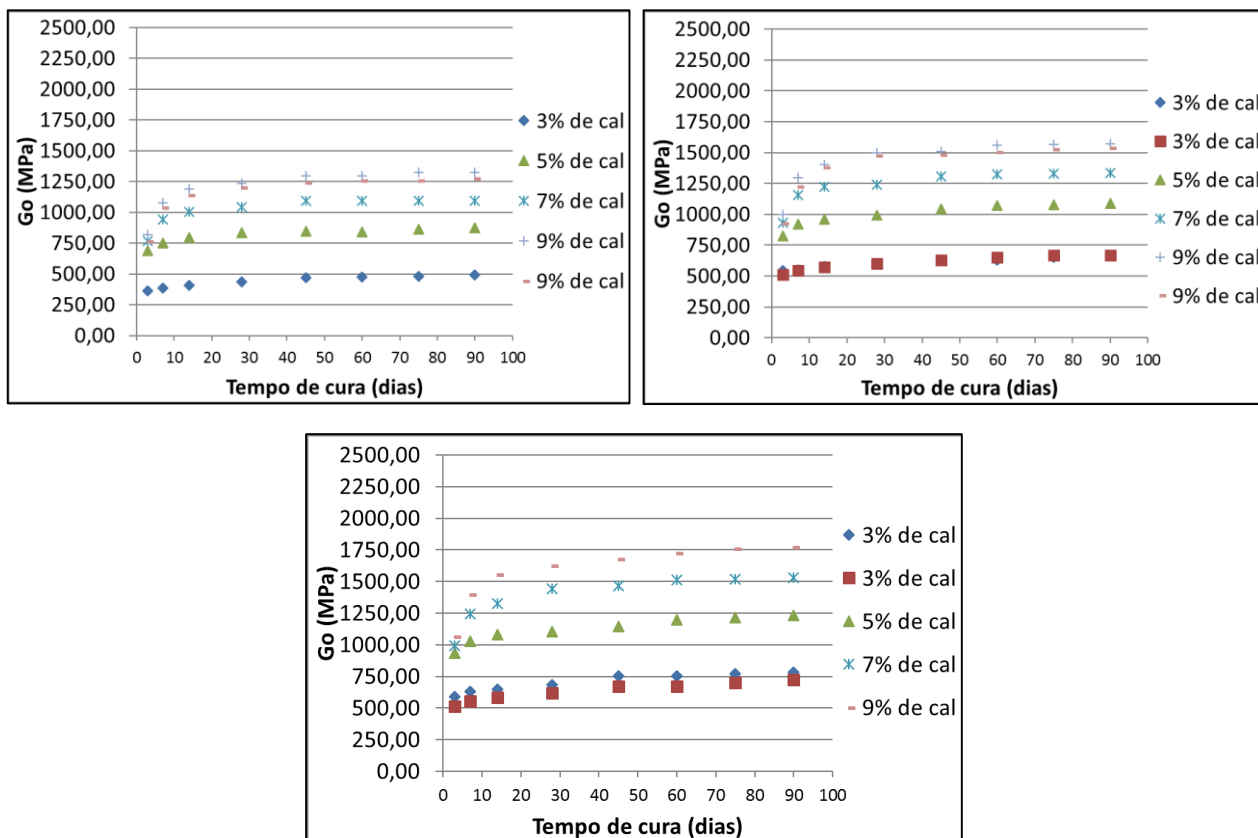


Figura 4 - Rigidez inicial versus tempo de cura para as amostras com 23% de umidade e a) peso específico aparente seco de 1,4 g/cm³, b) peso específico aparente seco de 1,5 g/cm³ e c) peso específico aparente seco de 1,6 g/cm³

Outro fato que pode ser observado, comparando-se as Figuras 2 a 4, é uma leve redução da rigidez inicial com o aumento do teor de umidade para um mesmo peso específico aparente seco. Esta mesma tendência foi observada por Consoli et al. (2001), em amostras de solo-cinza-cal moldadas com diferentes teores de umidade, e por Galaa et al. (2011), ao estudar dois grupos de amostras de solo-cimento, um submerso em água e outro não submerso em água. Segundo Galaa et al. (2011), o fato de amostras com umidades menores obterem valores de rigidez inicial maiores, reflete o efeito da sucção nas medidas de rigidez inicial.

4 - CONCLUSÕES

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

- Quanto maior o tempo de cura, maior a rigidez inicial (G_0) das amostras estudadas. Isto se deve ao fato de que a onda "S" está relacionada com a rigidez do material, por isso a sua velocidade (e consequentemente o G_0 do material estudado) cresce continuamente com o tempo, juntamente com o aumento da resistência do material, proporcionada pela cal. A mesma tendência foi verificada por Lopes Junior (2011) em amostras de solo-cal e Fonini (2012) em amostras de solo-cimento.
- Além disso, nota-se que dos 3 dias de cura para os 14 dias de cura ocorre um aumento brusco da rigidez inicial, sendo que aos 3 dias de cura os valores de G_0 das amostras com 7% e 9% de cal não são coerentes com a tendência apresentada a partir dos 7 dias de cura. Isto se deve ao fato de que nos primeiros dias de cura, a hidratação da cal ainda está ocorrendo.
- Observa-se também, que quanto maior a quantidade de cal e maior o peso específico aparente seco, maior a G_0 de uma determinada mistura. A existência potencial de um número maior de contatos e, consequentemente, a maior possibilidade da cal promover a união das partículas nesses contatos parece ser a causa desse fenômeno. Além disso, a maior capacidade de distribuição de tensões e mobilização de atrito no interior da amostra, nas porosidades mais baixas, pode também contribuir para o ganho de resistência e rigidez do material.
- É possível observar ainda, comparando-se as Figuras 2 a 4, que há uma leve redução da rigidez inicial com o aumento do teor de umidade para um mesmo peso específico aparente seco. Este fato pode ser atribuído ao efeito da sucção matricial nas medidas de rigidez inicial, já que as amostras não eram saturadas antes da realização dos ensaios.

AGRADECIMENTOS

Os autores demonstram agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC-UFRGS) e ao Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LABGEO-FEUP), pelas condições criadas. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES pelo seu apoio financeiro através da bolsa PDSE 5719-11-9.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. (1993). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)* - ASTM D 2487. Philadelphia.
- Attoh-Okine, N.O. (1995). *Lime Treatment of laterite soils and gravels – revisited*. Construction and Building Material, Vol.9, pp. 283-287.
- 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, 150 p.
- Chang, T., Woods, R.D. (1992). *Effect of particle contact bond on shear modulus*. Journal of Geotechnical Engineering, New York, Vol.118, pp.1216-1233.
- Clough, G.W., Sitar, N., Bachus, R.C., Rad, N.S. (1981). *Cemented Sands under Static Loading*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, New York, Vol.107, pp. 799-817,
- Consoli, N.C., Rotta, G.V., Prietto, P.D.M. (2000). *The influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils*. Technical Note. Géotechnique, London, Vol.50, pp. 99-105.
- Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., Carraro, J.A.H., Heineck, K.S. (2001). *Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, New York, Vol.127, pp.774-782.
- Consoli, N.C., Viana da Fonseca, A., Cruz, R.C., Heineck, K.S. (2009). *Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, pp. 1347-1353.
- Consoli, N.C., Dalla Rosa, A., Saldanha, R.B. (2011). *Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, New York, Vol. 23, pp.432-440.
- Consoli, N.C., Viana da Fonseca, A., Cruz, R.C., Silva, S.R., Fonini, A. (2012). *Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils*. Géotechnique, Vol. 62, pp. 177-183.
- Consoli, N.C., Festugato, L., Consoli, B.S., Lopes Junior, L.S. (2015). *Assessing failure envelopes of soil-fly ash-lime blends*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 26, pp. 04014174-1-04014174-8.
- 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.
- Fonini, A. (2012). *Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada: Análise Experimental e Micromecânica*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 210 p.
- Galaa, A.M., Thompson, B.D., Grabinsky, M.W., Bawden, W.F. (2011). *Characterizing stiffness development in hydrating mine backfill using ultrasonic wave measurements*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.48, pp. 1174-1187.
- Hight, D.W., Jardine, R.J. (1993). *Small-strain stiffness and strength characteristics of hard London tertiary clays*. Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 533-552.
- Ingles, O.G., Metcalf, J.B. (1972). *Soil Stabilization – Principles and Practice*. Butterworths, Sidney, 374p.
- Lopes Junior, L. da S. (2011). *Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 227 p.
- 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, 144 p.
- 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, 150 p.

- Tatsuoka, F., Jardine, R.J., Lo Presti, D., Di Benedetto, H., Kodaka, T. (1999). *Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials – theme lecture*. In: International conference on soil mechanics and foundation engineering, 14., Hamburg, Proceedings... A. A. Balkema, Rotterdam, p. 2129-2164.
- 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, 149 p.
- Transportation Research Board. (1987). *Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction*. TRB, Washington, State of the art report, 5, 58p.
- United States Bureau of Reclamation. (1998). *Earth Manual*. Department of the Interior, Denver, Colorado, 3rd ed.
- Viana da Fonseca, A., Cruz, R.C., Consoli, N.C. (2009a). *Strength Properties of Sandy Soil–Cement Admixtures*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 27, pp. 681-686.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Fahey, M. (2009b). *A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods*. Geotechnical Testing Journal, Vol.32, p. 100974-100974.