

Estudo da compressibilidade unidimensional de diferentes argilas moles brasileiras

Kátia Vanessa Bicalho

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, kvbicalho@gmail.com

Ester Souza Santana

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, cordinhaester@gmail.com

Rogério Gonçalves Sarmiento Junior

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, rogeriosarmientojunior@gmail.com

Lucas Camargo Pellanda

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, lucasamargo@hotmail.com

RESUMO: Várias equações empíricas têm sido publicadas na literatura para estimar o índice de compressão, C_c , para solos argilosos moles em função de diferentes propriedades índices desses solos. A multiplicidade das equações publicadas indica a necessidade de avaliação dessas correlações. Neste artigo são avaliados resultados de ensaios realizados em amostras de argilas naturais da Grande Vitória, ES, Brasil, e a partir destes resultados foram definidas correlações simples e múltipla para estimar C_c . Essas correlações foram comparadas com correlações empíricas previamente publicadas na literatura para os depósitos de argilas marinhas da Baixada Fluminense, RJ, da Grande Vitória, ES, e de toda a costa Brasileira. As correlações lineares simples empíricas obtidas para argilas da Grande Vitória, ES, subestimam em até 100% os valores medidos de C_c para solos mais compressíveis ($C_c > 1$). Conclui-se que a correlação linear múltipla definida neste trabalho para estimativa de C_c a partir de e_0 (microestrutura do solo) e LL (mineralogia do solo) para as argilas da Grande Vitória (ES) pode ser utilizada em estudos preliminares, e os resultados previstos estão de acordo com os valores medidos de C_c . Mas recomenda-se avaliação da precisão de correlações empíricas publicadas na literatura antes do uso dessas correlações para diferentes argilas.

PALAVRAS-CHAVE: Compressibilidade, argilas, limites de Atterberg, umidade natural.

1 INTRODUÇÃO

O cálculo do recalque de adensamento de fundações apoiadas em subsolos argilosos moles requer a determinação do índice de compressão, C_c , obtido através do ensaio compressão unidimensional edométrico. Várias equações empíricas têm sido publicadas na literatura para estimar o valor de C_c para solos argilosos moles em função de diferentes propriedades índices, tais como: limite de liquidez, LL , determinado pelo método da concha de Casagrande (Skempton 1944,

Terzaghi e Peck 1987, Azzouz *et al.* 1976, Castello e Polido 1986, Bicalho *et al.* 2015), índice de vazios inicial, e_0 (Sowers 1970, Azzouz *et al.* 1976, Castello e Polido 1986, Bicalho *et al.* 2015), e umidade natural inicial, w_{nat} (Azzouz *et al.* 1976, Castello e Polido 1986, Almeida *et al.* 2008, Martins *et al.* 2009, Bicalho *et al.* 2015). A variedade das equações publicadas indica que nem sempre é fácil selecionar a correlação mais adequada para o subsolo argiloso investigado, devendo-se ter critérios de avaliação para as correlações disponíveis.

Neste artigo são avaliados resultados de ensaios realizados em amostras das argilas naturais da Grande Vitória, ES, Brasil, e a partir destes resultados foram definidas correlações empíricas obtidas por regressão linear simples (com uma variável independente) e múltipla (com várias variáveis independentes) para estimativa de C_c dessas argilas. As correlações obtidas neste trabalho foram comparadas com correlações empíricas previamente publicadas na literatura para os depósitos de argilas marinhas da Baixada Fluminense, RJ, da Grande Vitória, ES, e de toda a costa Brasileira.

2 SOLOS E ENSAIOS INVESTIGADOS

A formação dos solos sedimentares da região costeira do Brasil é atribuída principalmente aos episódios de variações do nível relativo do mar (transgressão e regressão) ocorridos durante o Período Quaternário e tais ciclos transgressivos (elevações do nível relativo do mar) e regressivos (reduções do nível relativo do mar), deram origem aos sedimentos pleistocênicos e holocênicos (Martin 1988, Suguio 1999, Souza *et al.* 2005).

Os processos de deposição das argilas moles brasileiras em regiões costeiras se apresentam de forma semelhante. Como exemplos tem-se os depósitos de Sarapuí, na Baixada Fluminense, estado do Rio de Janeiro (Costa Filho *et al.* 1985), e da Baixada Santista, estado de São Paulo (Massad 1985). As argilas moles brasileiras não apresentam grandes disparidades na composição mineralógica e o mineral argílico mais frequente é a caulinita (sendo também possível a presença de illita, haloisita, montmorilonita e clorita). Essas argilas apresentam baixos teores de matéria orgânica (geralmente inferiores a 5%), e os valores dos limites de consistência e compressibilidade não são significativamente diferentes (Bicalho *et al.* 2015).

Embora a região metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo, GV-ES, localize em uma região constituída, predominantemente, de solos sedimentares de origem marinha, os afloramentos de rochas graníticas ou gnáissicas e morros são frequentes tornando a topografia da região bastante

acidentada e escarpada. A sua formação geológica recente é pouco estudada e sem dúvida bastante complexa. Os afloramentos rochosos funcionam como escudo à ação homogênea dos agentes marinhos e/ou dos agentes aluviais e isto permite o desenvolvimento, quase lado a lado ou até se confundindo, de perfis de solo sob as mais variadas condições, provavelmente constituindo-se em unidades geológicas distintas. Castello e Polido (1986) mencionam a presença de modelos geológicos semelhantes propostos para as planícies quaternárias do estado de São Paulo (Massad 1985) e para a baixada de Jacarepaguá no estado do Rio de Janeiro (Cabral 1983).

As argilas naturais da GV-ES raramente apresentam mais de 30% retido na peneira número 200 (abertura de 0,075 mm), e a relação entre os valores medidos de LL e IP (ou seja, índice de plasticidade) estão localizadas entre as retas A, definida como $IP = 0.73 (LL - 20)$, e U, definida como $IP = 0.9 (LL - 8)$, no ábaco de Casagrande (Figura 1).

Os dados experimentais das argilas da GV-ES apresentados e analisados a seguir foram obtidos de ensaios realizados no Laboratório de Geotecnia do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo nos últimos anos. O banco de dados em análise possui 80 resultados de ensaios de compressão unidimensional edométrico e correspondentes ensaios de caracterização (várias determinações).

Os ensaios de compressão unidimensional edométrico realizados nas argilas da GV-ES foram executados em amostras retiradas de tubo Shelby de onde era selecionada, na parte central, a porção de solo que estivesse menos amolgada para a realização dos ensaios.

O índice de compressão, C_c , ou seja, a inclinação do trecho de compressão virgem do gráfico de tensão efetiva vertical em escala logarítmica versus índice de vazios obtido através do ensaio de edométrico é investigado neste artigo. Vale ressaltar que para a obtenção de C_c não foi feita nenhuma correção devido ao amolgamento das amostras de argila marinha. As profundidades de amostragem variaram entre 5,00m a 25,00m (Bicalho *et al.* 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma grande dispersão foi observada nos valores de w_{nat} , LL, IP, IL (ou seja, índice de liquidez) e G_s (ou seja, densidade específica dos grãos) para as argilas marinhas da GV-ES. Os valores de LL para as argilas investigadas da Grande Vitória (ES) e de Santos (SP) estão entre 36% a 128% e 32% a 128% respectivamente. Os valores de IP para a região da Grande Vitória (ES) variou entre 12,6% a 99,7% e para Santos (SP) entre 20,0% a 82,0%. Resultados de LL e correspondentes valores de IP para argilas marinhas do Rio de Janeiro (RJ) são também apresentados no mesmo Ábaco de Casagrande, Figura 1, para efeito comparativo.

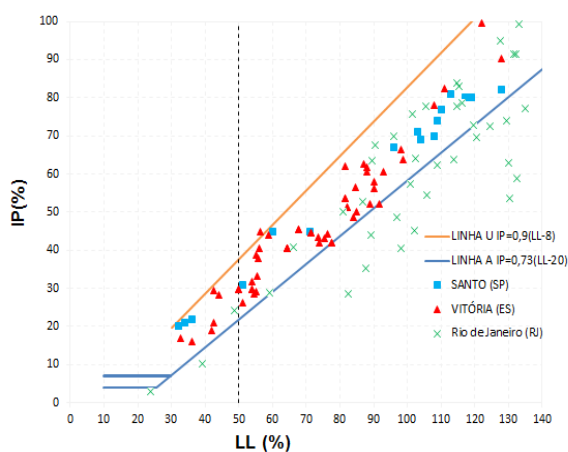


Figura 1. Localização das argilas investigadas no ábaco de Casagrande.

Os valores medidos de C_c para as argilas estudadas da Grande Vitória (ES) e Santos (SP), variaram de 0,1 a 1,53, com valor médio igual a 0,71 e desvio padrão de 0,36. As argilas do Rio de Janeiro (RJ) apresentam uma maior variação para os valores de C_c : com valores entre 0,29 e 3,75 (Almeida *et al.* 2008).

3.1 Correlações empíricas

As correlações lineares simples (com uma variável independente) obtidas pelos métodos dos mínimos quadrados para diferentes argilas podem ser escritas como (Bicalho *et al.* 2015):

$$C_c = AX + B \quad (1)$$

onde X é a variável independente considerada (ou seja, LL, w_{nat} ou e_0) e A , B são constantes de ajuste obtidas através da correlação linear, ou seja, o coeficiente angular A e o coeficiente linear B da Eq. (1). Uma variável aleatória residual deve ser incluída na Eq. (1) uma vez que as correlações lineares simples entre C_c e w_{nat} (%) e entre C_c e e_0 que refletem a condição e microestrutura do solo e a correlação entre C_c e LL que reflete a mineralogia do solo variam muito.

As correlações lineares simples obtidas por Castello e Polido (1986) e Bicalho *et al.* (2014, 2015) para as argilas naturais da GV-ES apresentam baixos valores de coeficientes de determinação ($R^2 < 0,51$) que indicam correlações com grau de relacionamento linear fraco entre as duas variáveis (ou seja, C_c - w_{nat} , C_c - LL, e C_c - e_0). No solo saturado a w_{nat} varia linearmente com e_0 , tal que $e_0 = G_s w_{nat}$, entretanto não foram observadas variações consistentes que permitam correlacionar os resultados obtidos.

A Figura 2 apresenta comparação entre as correlações lineares simples entre C_c e w_{nat} (%) obtidas por Almeida *et al.* (2008) para as argilas do Rio de Janeiro (RJ), Martins *et al.* (2009) para as argilas de toda a costa Brasileira, Bicalho *et al.* (2014) para as argilas da GV-ES, e a equação definida por Azzouz *et al.* (1976) para todas as argilas. E, apresenta-se os valores estimados de C_c pelas equações propostas por Martins *et al.* (2009), limite superior, e Azzouz *et al.* (1976), limite inferior, apresentam uma grande variação (até mais que 100%).

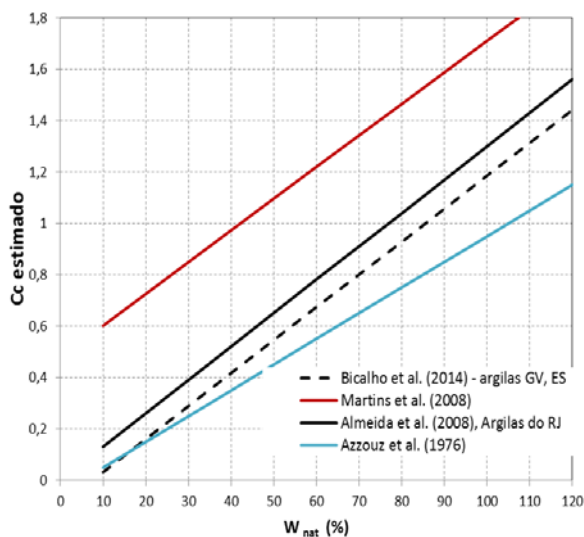


Figura 2. Correlações lineares simples empíricas entre C_c e w_{nat} (%) para diferentes argilas.

A correlação linear com múltiplas variáveis independentes (IP, e_0 e LL) para estimativa de C_c proposta por Oh e Chai (2006) para as argilas marinhas da Costa da Malasia, também foi utilizada neste trabalho para avaliar os resultados experimentais. Oh e Chai (2006) mencionam que as argilas marinhas da Costa da Malasia (depósito de solos sedimentares do quaternário) apresentam w_{nat} como sendo extremamente variável, entre 39% a 129%, além disto, G_s varia de 2,55 a 2,65 para o intervalo de amostras estudadas. Os limites de Atterberg mostram que as argilas marinhas colhidas nas áreas de estudo foram classificadas como argilas siltosas de alta a elevada plasticidade. A maioria das amostras de solo encontra-se acima da Linha A no ábaco de plasticidade de Casagrande que indica um comportamento argiloso dominante. O intervalo típico do LP varia entre 18% e 51%, LL varia entre 50% e 127%, tal que IP varia entre 19% e 77%. As porcentagens de argila medidas a partir das amostras de solo variam entre 22% e 66%, com a maioria das amostras contendo mais que 40% de argila. A correlação múltipla proposta por Oh e Chai (2006) é definida como:

$$C_c = 0,5393e_0 - 0,0074IP + 0,0049LL - 0,1248 \quad (2)$$

Os resultados apresentados na Figura 3 mostram que correlação múltipla proposta por Oh e Chai (2006), Eq. (2), comporta-se de forma semelhante às correlações lineares

simples (ou seja, $C_c - w_{nat}$, $C_c - LL$, e $C_c - e_0$) obtidas por Bicalho *et al.* (2014) para as argilas naturais da GV-ES. Verifica-se que os valores de estimados C_c superestimam os valores medidos para as argilas da GV-ES de baixa compressibilidade, ou seja, $C_c < 0,8$. A Figura 3 mostra que os valores de estimados C_c podem subestimar os valores medidos de C_c em mais de 100% para as argilas da GV-ES mais compressíveis ($C_c > 1$).

A Figura 4 apresenta a variação dos valores medidos de $C_c / (1+e_0)$ e C_c para as argilas da GV-ES. Verifica-se uma variação linear entre os resultados obtidos para $0,1 < C_c < 1,53$. A equação obtida por Bicalho *et al.* (2015) para as argilas da GV-ES, é ($R^2 = 0,8998$):

$$C_c \left(\frac{1}{1+e_0} \right) = 0,2768C_c + 0,0603 \quad (3)$$

A correlação linear simples $C_c - LL$ obtida por Bicalho *et al.* (2014) para as argilas da GV-ES é definida como ($R^2=0,453$):

$$C_c = 0,011(LL - 8,3) \quad (4)$$

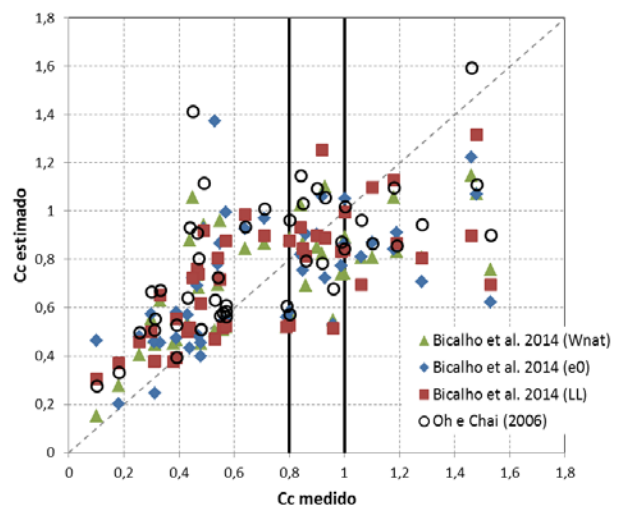


Figura 3. Comparações entre os valores estimados de C_c por Bicalho *et al.* (2014), e por Oh e Chai (2006) e os valores medidos de C_c para as argilas da GV-ES.

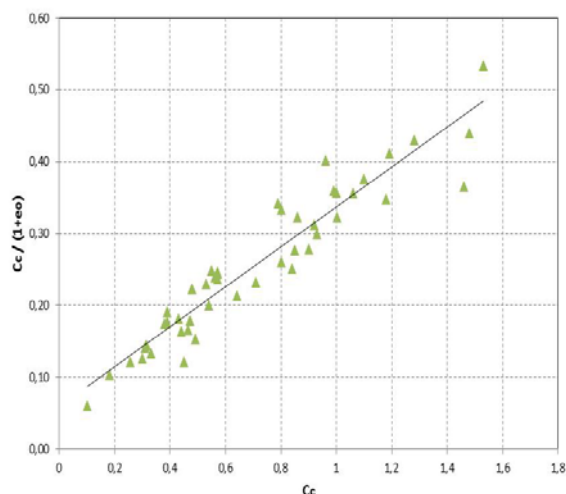


Figura 4. Variação dos valores medidos de $C_c/(1+e_0)$ e C_c para as argilas da GV- ES.

A combinação da Eq.(3) e da Eq. (4) permite definir uma correlação linear múltipla para estimativa de C_c a partir de e_0 (microestrutura do solo) e LL (mineralogia do solo) para estimativa de C_c para as argilas da GV-ES, tal que:

$$C_c \left(\frac{1}{1+e_0} \right) = 0,003045LL + 0,035028 \quad (5)$$

Os resultados apresentados na Figura 5 para as argilas da GV-ES mostram uma grande variação (até $\pm 100\%$) entre os valores medidos e estimados C_c através das correlações lineares simples empíricas obtidas por Bicalho *et al.* (2014) para essas argilas. Observa-se uma menor variação entre os valores medidos e estimados C_c pela correlação linear múltipla definida neste trabalho para estimar C_c a partir de LL e e_0 , tal que a maioria dos dados investigados para essas argilas estão dentro da faixa de variação $\pm 20\%$. Recomendam-se estudos semelhantes para avaliar a precisão de correlações empíricas publicadas na literatura para estimativa de C_c de diferentes argilas.

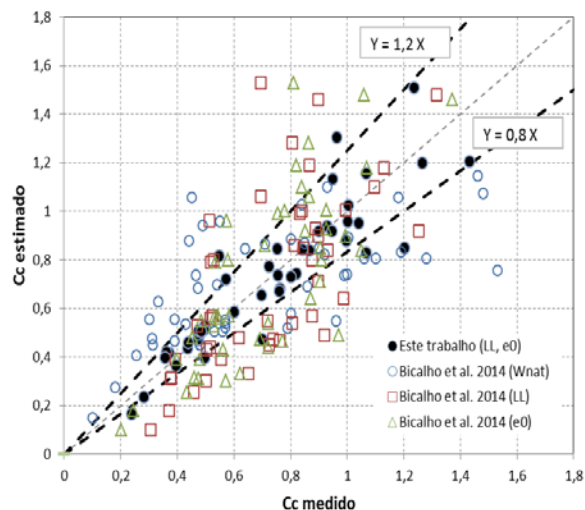


Figura 5. Variação dos valores medidos e estimados de C_c (correlações lineares simples e múltiplas) para as argilas da GV- ES.

4 CONCLUSÕES

Investigam-se correlações obtidas por regressão linear simples e múltipla para estimativa de C_c de argilas moles. As conclusões preliminares são:

Os resultados indicam que as correlações empíricas lineares simples do tipo $C_c - w_{nat}$ publicadas na literatura para argilas da costa brasileira apresentam variações significativas.

Os resultados também sugerem que a correlação múltipla proposta por Oh e Chai (2006) comporta-se de forma semelhante às correlações lineares simples (ou seja, $C_c - w_{nat}$, $C_c - LL$, e $C_c - e_0$) obtidas por Bicalho *et al.* (2014) para as argilas naturais da Grande Vitória, ES (GV-ES). Entretanto os valores estimados podem subestimar os valores medidos de C_c em mais de 100% para as argilas da GV-ES mais compressíveis ($C_c > 1$).

A correlação linear múltipla definida neste trabalho para estimar C_c a partir de LL e e_0 apresenta uma menor variação entre os valores medidos e estimados de C_c , e a maioria dos dados investigados para essas argilas estão dentro da faixa de variação de $\pm 20\%$.

Recomenda-se sempre avaliação da precisão de correlações empíricas publicadas na literatura antes do uso dessas correlações para diferentes argilas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (bolsas de produtividade de pesquisa e de iniciação científica) e a FAPES (taxa de pesquisa) pelo apoio financeiro para a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. S. S., Futai M. M., Lacerda, W. A., Marques, M. E. S. (2008). Laboratory Behaviour of Rio de Janeiro Solf Clays – Part 1. *Soils & Rocks*, Vol. 31, p. 69-75.
- Azzouz, A.S.; Krizek, R.J.; Corotis, R.B. (1976). Regression analysis of soil compressibility. *Soils Found*, Vol. 16, nº 2, Tokyo, p. 19-29.
- Bicalho, K. V., Bastiti, V. G., Ximenes, R. B. (2014). Compressibilidade das argilas marinhas da Grande Vitória, ES, Brasil. *Comunicações Geológicas*, Vol. 101, p.1093 – 1095.
- Bicalho, K. V., Bastiti, V. G., Santana, E. S., Depolli, I. C. (2015). Compressibilidade das Argilas da Grande Vitória, ES, Brasil. XV Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XV PCSMGE), Buenos Aires. From Fundamentals to Applications in Geotechnics. IOS Press E-books, p.1520 – 1527.
- Cabral, S. (1983). Mapeamento Geológico Geotécnico da Baixada de Jacarepaguá e Maciços Circunvizinhos Rio de Janeiro. *Soils & Rocks*, Vol. 6, p. 21-40.
- Castello R. R. e U. F. Polido, U. F. (1988). Sistematização geotécnica dos solos quaternários de Vitória, ES. Anais do Simpósio sobre: Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras, ABMS, Rio de Janeiro. Tema 3.
- Castello R. R. e Polido, U. F. (1986). Algumas características de adensamento das argilas marinhas de Vitória – ES. *VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Porto Alegre, RS, p. 149- 159.
- Costa Filho, L. M., Aragão, C.J. G., Costa Veloso, P. P. (1985). Características Geotécnicas de alguns depósitos de argila mole na área do Grande Rio de Janeiro. *Soils & Rocks*, Vol. 18, p. 3-11.
- Massad F. (1985). As Argilas Quaternárias da Baixada Santista: características e Propriedades Geotécnicas. *Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo.
- Martin, L. (1988). Mapeamento geológico ao longo da costa brasileira. *Simpósio sobre Depósitos Quaternários das baixadas litorâneas brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras*. Rio de Janeiro: ABMS, Vol.1, p. 2.1-2.29.
- Martins I.S.M., Santa Maria, P.E., Santa Maria, F.C, M. (2009) Discussion on Laboratory behaviour of Rio de Janeiro soft clays, Part1: index and compression properties, by Almeida, M.S.S., Futai, M.M., Lacerda, W.A.. *Soils & Rocks*.
- Oh E. Y. N. e Chai, G. W. K.. (2006). Characterization of Marine Clay for Road Embankment Design in Coastal Area. Queensland, Australia.
- Skempton, A.W. (1944). Notes on the compressibility of clays. *Quart. J. Geol. Soc.*, London, p. 119-135.
- Sowers, G.B. (1970). *Introductory Soil Mechanics in Engeneering and Foundations*. 3rd ed., The Macmillan Limited, London.
- Souza C. R. G., Suguio, K., Oliveira, A. M. S., Oliveira, P. E. (2005). Quaternário do Brasil. Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, ed. Holos, São Paulo, Brasil, p. 102-104.
- Suguio, K. (1999). *Geologia do quaternário e mudanças ambientais*. São Paulo.
- Terzaghi, K. e Peck, R.B. (1987) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.