

ESTUDO DOS VALORES DO LIMITE DE LIQUIDEZ OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE CASAGRANDE E CONE PARA DIFERENTES ARGILAS

Study of liquid limit values determined by Casagrande cup and Cone penetrometer test for different clays.

Kátia Vanessa Bicalho*

Josiane C. Gramelich**

Camila L. dos Santos Cunha**

Rogério G. Sarmiento Junior***

RESUMO – Neste estudo compararam-se os valores do limite de liquidez, LL, obtidos pelo método do Cone de Penetração, LL_p , com os valores de LL obtidos pelos métodos de Casagrande, LL_c , medidos, por diferentes operadores, em amostras de solos argilosos de alta e baixa plasticidade. O método do Cone de Penetração considerado segue a norma britânica (penetração de 20 mm). Os resultados experimentais mostram que as variações entre os dois métodos dependem da plasticidade e mineralogia do solo coesivo ensaiado. Os resultados obtidos para argilas naturais, essencialmente constituídas de caulinitas, com valores de LL_c entre 14% e 98%, indicam que LL_p é geralmente maior 2,7 % que LL_c . Entretanto, existe maior dispersão entre os valores de LL_c e LL_p medidos para as misturas de bentonita e areia fina, com valores de $LL_c > 100\%$, que apresentam LL_c igual a aproximadamente 1,2 LL_p .

SYNOPSIS – This study presents and discusses the comparisons between the liquid limit, LL_p , determined by the cone penetrometer technique and the liquid limit determined by Casagrande method, LL_c , measured by different operators for different clayey soils at low and high plasticity ranges. The used cone penetrometer technique is the British standard (20 mm fall cone penetration). The results show that the variation between LL_c and LL_p depends on the plasticity and mineralogy of the tested cohesive soil. For the Brazilian kaolinitic clays with LL_c between 14% and 98%, LL_p is often 2.7 % higher than LL_c . The mixtures of bentonitic and fine sand with $LL_c > 100\%$, have LL_c equal to about 1.2 LL_p .

Palavras Chave – Correlações empíricas, limite de liquidez, método do cone de penetração, método de Casagrande, plasticidade, argilas.

Keywords – Empirical correlations, liquid limit, cone penetrometer technique, Casagrande method, plasticity, clays.

* Professora titular, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, E-mail: kvbicalho@gmail.com

** Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil

** Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil

*** Mestrando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil

1 – INTRODUÇÃO

Plasticidade é a propriedade que faz com que o sistema argila-água se deforme continuamente devido a ação de uma força finita, e quando a força é removida ou reduzida a forma é mantida. O conceito de plasticidade é empregado em muitas áreas da engenharia e ciência. Os fatores que influenciam a plasticidade podem ser relacionados ao tipo de argila, tais como, umidade, composição mineralógica, distribuição do tamanho da partícula, tipo de cátion trocável, presença de sais ou matéria orgânica, e ao processo de moldagem da argila (Andrade et al. 2011).

O valor máximo de umidade de uma argila no estado de consistência plástica é definido como o limite de liquidez, LL, dessa argila. Os valores de LL de argilas são frequentemente usados nas avaliações preliminares dessas argilas para uso em fundações, aterros compactados na construção de estradas e obras de armazenamento e retenção de água ou contaminantes. E a determinação errada de LL pode resultar na rejeição de materiais satisfatórios, ou mesmo, na aceitação de materiais inadequados. Os valores de LL são também usados para avaliar características como compressibilidade e permeabilidade a nível regional de solos argilosos (Mitchell & Sitar 1982).

Tradicionalmente, o procedimento mais utilizado para a determinação do LL_c é o método de percussão padronizado por Casagrande (1932) que utiliza o aparelho desenvolvido pelo mesmo. O método de Casagrande apresenta limitações, tais como a dispersão dos resultados devido a influência do operador e das condições do aparelho. E solos de baixa plasticidade tendem a se liquefazer antes de fluir por plasticidade (Sowers et al. 1959). Casagrande (1958) reconhece que o método de percussão para determinar LL_c não fornece resultados uniformes de comparação para os solos de granulação fina que apresentam reações diferentes quando submetidos a um ensaio dinâmico.

O método do Cone de Penetração para determinar LL_p , que consiste em se medir a penetração vertical estática de um cone, padronizado sob condições especificadas de peso, ângulo e tempo de queda, em uma amostra de solo previamente preparada, é uma alternativa atrativa ao método dinâmico de Casagrande (1932). O extenso banco de dados disponível com correlações entre os valores de LL_c e diferentes propriedades de engenharia motivam o estudo de comparações entre os valores do LL_c e LL_p . Além disto, os clássicos sistemas de classificações de solos finos usam valores de LL_c .

O método dinâmico proposto por Casagrande (1932) para determinação do LL_c assume que a resistência ao cisalhamento não drenada, s_u , de todos os solos no limite de liquidez tem um valor constante (aproximadamente 2,5 kPa, ou seja, cada golpe para fechar a ranhura corresponde a uma resistência de 1gf/cm²). Entretanto, o valor de s_u no LL determinado pelo método dinâmico (LL_c) pode variar entre 0,5 e 5,6 kPa (Whyte, 1982; Wasti & Bezirci, 1986). Sridharan & Prakash (2000) mostram que o LL de uma argila montmorilonita é principalmente controlado pela presença da camada de água adesiva presente no mineral argílico, enquanto que o valor de LL das argilas caulinitas é principalmente controlado pelas forças entre as partículas do mineral argílico (ou seja, microestrutura). Assim, as argilas caulinitas e as argilas montmorilonitas possuem diferentes mecanismos que controlam o valor do limite de liquidez dessas argilas.

Estudos têm mostrado que s_u no LL pelo método proposto por Casagrande, LL_c , diminui com o aumento do LL, que cresce com o teor de argila e plasticidade (Leflaive, 1971; Youssef et al., 1995; Leroueil & Le Bihan, 1996). Assim, verifica-se que (Leroueil & Le Bihan, 1996):

$$\begin{aligned} LL_c &< LL_p, \text{ para } LL < LL^* \\ LL_c &> LL_p, \text{ para } LL > LL^* \end{aligned}$$

O valor de LL^* que define a transição entre os valores chamados de baixo LL e alto LL não é bem quantificado na literatura (Bicalho et al. 2014). Assim, nesta nota técnica apresentam-se e

discutem-se comparações entre LL_c e LL_p para argilas de diferentes mineralogias e plasticidades e investiga-se o valor de LL^* para essas argilas.

2 – CORRELAÇÕES EMPÍRICAS ENTRE LL_c E LL_p

Várias correlações empíricas entre os métodos do Cone e de Casagrande para determinar LL foram publicados na literatura. Estas funções podem ser escritas como (Bicalho et al. 2014):

$$LL_p = A LL_c + B \quad (1a)$$

$$LL_c = A^* LL_p - B^* \quad (1b)$$

onde A , B , A^* e B^* são constantes de ajuste obtidas através da correlação linear.

No Brasil ainda não existe uma norma padronizada para determinação do LL_p . Neste estudo foi avaliado o método do penetrômetro do cone sugerido pela norma britânica (BS 1377, 1990) que consiste na queda de um cone de massa de $80 \pm 0,05$ g, ângulo do cone de $30 \pm 0,1^\circ$ e tempo de queda de 5 ± 1 s sobre uma amostra moldada de solo, anotando-se o valor da penetração do cone. O valor de LL_p corresponde ao valor de umidade para uma penetração de 20mm.

O Quadro 1 apresenta algumas correlações lineares publicadas na literatura entre LL_p e LL_c . As correlações estão na forma da equação 1b para melhor comparação entre as correlações discutidas neste estudo, e utilizaram o método do penetrômetro do cone sugerido pela norma britânica.

Os valores de LL^* que indicam a transição entre valores de baixo LL ($LL_c < LL_p$) e alto LL ($LL_c > LL_p$) para as equações propostas por Budhu (1985) e Sridharan & Prakash (1998) são aproximadamente 61% e 52 %, respectivamente. Sridharan & Prakash (2000) usaram os dados experimentais obtidos por Wasti & Bezirci (1986) e observaram que a diferença entre LL_p e LL_c aumenta com o aumento da plasticidade do solo. As correlações propostas por Queiroz de Carvalho (1986), Fojtová et al. (2009), Souza (2011) e Di Matteo (2012) apresentadas no Quadro 1 possuem sempre $LL_c < LL_p$ para o intervalo de LL ensaiado (< 50 %), ou seja, são correlações para solos de baixa plasticidade de diferentes locais. A correlação proposta por Di Matteo (2012) para solos argilosos siltosos de baixa plasticidade, com LL entre 20 e 50 %, de diferentes origens geológicas, inclui os resultados experimentais publicados por: Wasti & Bezirci (1986), Dragoni et al. (2008), Ozer (2009), e Fojtová et al. (2009). Os dois solos investigados por Souza (2011) possuem uma fração fina elevada e na sua maioria constituída por siltes (> 75 %), e o Solo 1 apresenta percentagem de fração argila igual a 21%, e o Solo 2 igual a 22,3%.

Quadro 1 - Correlações publicadas entre valores medidos de LL_p e LL_c

Referências	A^*	B^*	Variação de LL
Budhu (1985)	1,070	4,300	20-100
Wasti & Bezirci (1986)	0,990	4,870	27-110
Queiroz de Carvalho (1986)	0,934	2,180	13-48
Sridharan & Prakash (1998)	1,209	10,800	29-92
Souza (2011) – Solo 1	0,707	7,124	38-40
Souza (2011) – Solo 2	0,906	1,119	42-45
Di Matteo (2012)	1,000	2,200	20-50
Fojtová et al. (2009)	1,000	2,440	20-50

3 – INFLUÊNCIA DA PLASTICIDADE NAS CORRELAÇÕES LL_c - LL_p

Para avaliar a influência da plasticidade nas correlações empíricas entre LL_c e LL_p foram utilizados resultados de ensaios laboratoriais realizados pelos autores em amostras das argilas naturais da Grande Vitória, localizada no Estado do Espírito Santo (GV-ES) região sudeste do Brasil e de ensaios publicados para solos coesivos de baixa plasticidade de diferentes regiões do Brasil (Pinto & Castro, 1971; Silveira, 2001). As argilas naturais analisadas são constituídas essencialmente de caulinitas. As argilas GV-ES raramente apresentam mais de 30% retido na peneira número 200 (abertura de malha 0,075 mm), ou seja, tamanho de grãos maiores que silte ou argila. As argilas ensaiadas foram obtidas a profundidade entre 5m e 25m e apresentam valores de umidade natural entre 19 e 85%; LL_c entre 65 e 85; LL_p entre 19 e 53; e IP entre 32 e 46.

Foram também utilizados resultados de ensaios realizados pelos autores em uma bentonita (Montmorilonita sódica) e misturas homogeneizadas da bentonita e areia quartzosa fina nas porcentagens de 90 %, 80 % e 60 % de bentonita (fração argila, C) em relação ao peso total da mistura final. As amostras ensaiadas foram previamente bem homogeneizadas. A homogeneização da mistura de Bentonita, areia fina e água é um fator importante na determinação do LL pelos dois métodos. E o tempo mínimo necessário para a hidratação com adição de água destilada da bentonita foi investigado. Os resultados indicaram o tempo mínimo de 7 dias para a hidratação da amostra para realização dos ensaios de determinação de LL_p para a bentonita ensaiada. Assim nos ensaios realizados com as misturas de bentonita e areia fina adicionou-se água a cada mistura deixando em descanso por mais de uma semana para que houvesse a hidratação com o tempo. O método de Casagrande para determinação de LL_c é descrito pela norma NBR 6459 (ABNT, 1984).

A Figura 1 mostra a localização dos solos estudados no ábaco de Casagrande com a classificação proposta pelo Sistema Unificado de Classificação (SUC) para solos finos. O SUC utiliza os valores de LL determinados pelo método dinâmico, assim sendo, os resultados de LL apresentados na Figura 1 são os valores de LL_c . A relação entre LL e IP das argilas naturais da GV- ES tende a convergir para a reta A considerada como a divisão arbitrada entre siltes e argilas no ábaco de Casagrande. Os valores de LL_p são geralmente maiores que os valores de LL_c para essas argilas naturais. Os resultados experimentais em misturas homogeneizadas de bentonita e areia fina com C > 50% mostram que a relação entre LL e IP tende a convergir para a reta U,

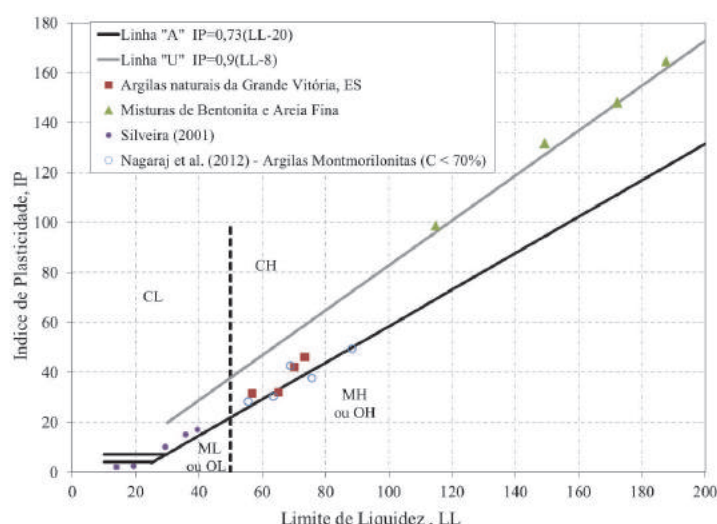


Fig. 1 - Localização dos solos estudados no ábaco de Casagrande.

definida como $IP = 0.9 (LL-8)$, no ábaco de Casagrande. Os resultados experimentais publicados por Nagaraj et al. (2012), realizados em cinco argilas naturais montmorilonitas obtidas de diferentes origens geológicas com $C < 70\%$ e $LL_c < 90\%$ ($LL_p < 85\%$), são também analisados neste estudo para avaliar a influência do tipo de mineral argílico e cátion trocável. Os resultados publicados por Nagaraj et al. (2012) tendem a convergir para a reta A no ábaco de Casagrande.

A Figura 2 apresenta a variação dos valores medidos de LL_c com LL_p para as argilas naturais da Grande Vitória (ES) e as misturas de bentonita e areia fina. Foram também incluídos os resultados experimentais publicados por Pinto & Castro (1971) com LL_c entre 25 % e 100 % e Silveira (2001) para solos tropicais brasileiros de diferentes locais com $LL_c < 50$ %. A Figura 2 sugere que a transição entre valores de baixo LL e alto LL é de aproximadamente 100 % e que existe maior dispersão entre os valores medidos de LL_c e LL_p para valores de $LL > 100$ %. Assim, foram definidas duas correlações empíricas neste estudo: uma para $LL < 100$ % e outra para $LL > 100$ %.

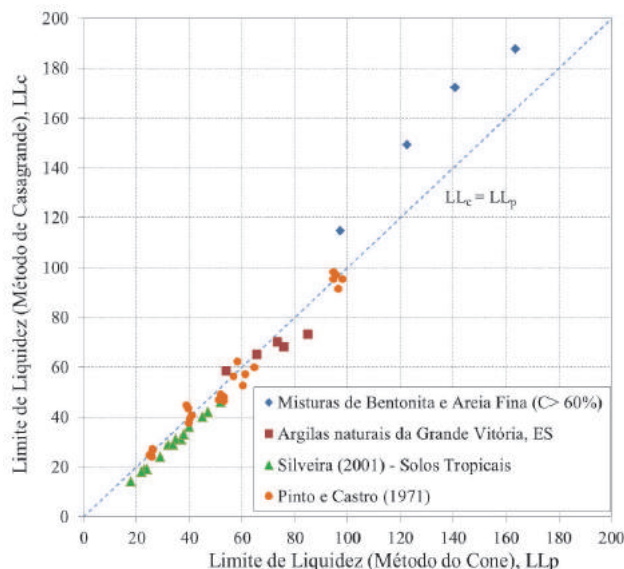


Fig. 2 – Variação dos valores de LL_c com LL_p para os solos argilosos brasileiros e misturas de bentonita e areia fina com $C > 60\%$ estudados.

A correlação empírica, definida através da regressão linear, obtida com coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 0,98, para LL entre 14 e 100% foi (Figura 3):

$$LL_c = 1,00.LL_p - 2,7 \quad (2)$$

Os resultados obtidos e apresentados na Figura 3 mostram que LL_p é geralmente maior 2,7 % que o LL_c e está de acordo com publicações prévias para argilas com a composição mineralógica de essencialmente Caulinitas e Ilitas de diferentes origens geológicas e valores de LL entre 20 e 50% (Fojtová et al., 2009; ou seja, 2,44 %; Di Matteo, 2012; ou seja, 2,2 %).

As variações observadas entre a equação 2 e as equações sugeridas por Fojtová et al. (2009) e Di Matteo (2012) estão entre 0,25% e 0,5%. Esta variação é próxima do valor de 0,4 % obtido pela diferença entre os valores máximo e mínimo dos valores de LL_c determinados por ensaios repetidos com mesmo solo, procedimento, operador, condições de laboratório e curto espaço de

tempo. No caso de ensaios repetidos usando o método do Cone esta diferença é de aproximadamente 0,2 % (Di Matteo, 2012). A Figura 3 mostra que a maior parte dos resultados experimentais que definiram a equação 2 apresentam $LL_c \leq LL_p$, com LL_c entre 1,0 LL_p e 0,8 LL_p .

A correlação empírica definida pela regressão linear conforme a equação 1b, com R^2 igual a aproximadamente 0,98, aplicada aos valores medidos de LL_c e LL_p para as misturas de bentonita e areia fina ($LL > 100\%$), é:

$$LL_c = 1,11.LL_p + 10,0 \quad (3)$$

A Figura 3 ilustra a variação dos valores de limite de liquidez determinados para argilas de baixa e alta plasticidade pelos dois métodos, LL_c e LL_p . Os resultados experimentais obtidos para as misturas de bentonita e areia fina apresentam $LL_c > LL_p$, com valores de LL_c aproximadamente igual a 1,2 LL_p . O teor de argila, C , não influencia a variação entre LL_c e LL_p nas misturas de bentonita e areia fina quando a matriz argilosa domina o comportamento da mistura, ou seja não existe contato entre os grãos de areia ($C \geq 60\%$). E neste caso predomina a influência da mineralogia da argila na relação entre LL_c e LL_p .

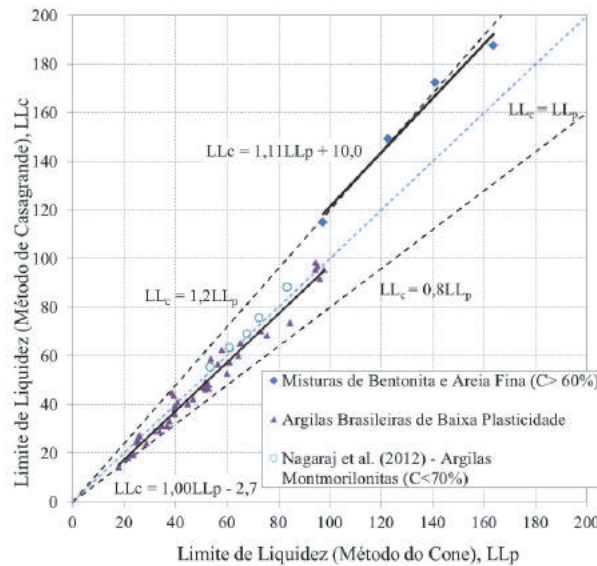


Fig. 3 - Correlações empíricas definidas por LL_c e LL_p medidos para os solos estudados e limites de variação dos valores LL_c obtidos ($LL_p \pm 0,2 LL_p$).

Os resultados publicados por Nagaraj et al. (2012) para cinco argilas naturais montmorilonitas com diferentes origens geológicas e valores de C entre 38% e 69% são também apresentados na Figura 3 embora não tenham sido considerados para a determinação das equações 2 e 3. Os resultados publicados por Nagaraj et al. (2012), localizados próximos à linha A no ábaco de Casagrande (Figura 1) para solos argilosos naturais, argilo mineral montmorilonita Ca, apresentam valores de LL_c entre 1 LL_p e 1,2 LL_p (Figura 3). Os dados publicados por Nagaraj et al. (2012) não permitem investigar a influência de C nas correlações entre LL_c e LL_p uma vez as argilas naturais possuem diferentes origens geológicas. Verifica-se que as argilas naturais com valores de $LL_c < 90\%$ e $LL_p < 85\%$ e de $IP < 50\%$ apresentam valores de $LL_c > LL_p$. Neste caso a relação entre LL_c / LL_p que varia entre 1 e 1,2. Estes resultados mostram que o valor do limite de liquidez, LL^* , não é o único fator que define se $LL_c < LL_p$ ou $LL_c > LL_p$. O tipo e a quantidade do

argilo mineral e o tipo de cátion trocável também influenciam as diferenças entre os valores de limite de liquidez determinados pelos dois métodos e devem ser considerados nas correlações LL_c e LL_p .

A Figura 4 apresenta os resultados da variação de LL_c e LL_p com a Fração Argila, C (%), para as misturas de bentonita e areia fina ($LL > 100$ %). Bicalho et al. (2002) verificaram através de ensaios de limites de Atterberg em misturas de bentonita e areia fina que para aproximadamente $C > 30$ % a matriz argilosa domina o comportamento do solo sem que haja contato entre os grãos de areia, e neste caso verifica-se a linearidade entre os valores de LL_c e C . Os resultados apresentados na Figura 4 confirmam a linearidade da relação entre LL_c e LL_p e C , com $R^2 > 0,98$, para as misturas de bentonita e areia ($C \geq 60$ %). Foi considerado neste estudo valores de $C \geq 60$ % para definir uma correlação entre LL_c e LL_p para argilas de alta plasticidade, ou seja com $LL_c > LL_p$, uma vez que Budhu (1985) observou para solos com $C < 50$ % valores de $LL_c < LL_p$.

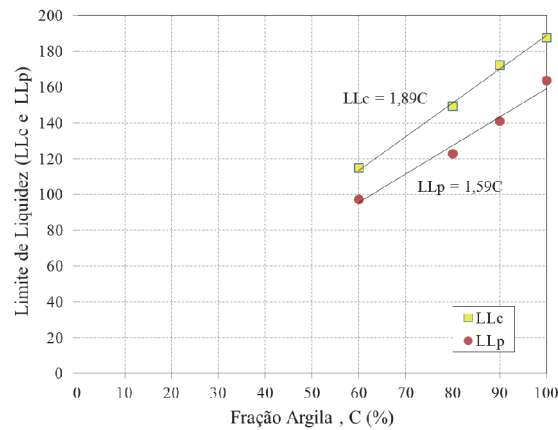


Fig. 4 - Variação dos valores medidos de LL_c e LL_p com a Fração Argila, C (%), para as misturas de bentonita e areia fina.

As equações que definem a variação linear LL_c e LL_p com C apresentam $R^2 > 0,98$ (Figura 4), e são expressas como (Seed et al. 1964):

$$LL_c = 1,89 C \quad (4a)$$

$$LL_p = 1,59 C \quad (4b)$$

A combinação das equações 3a e 3b definem a seguinte relação linear:

$$LL_c = 1,19.LL_p \quad (5)$$

A correlação obtida neste trabalho, para argilas brasileiras que se localizam próximas da linha A no ábaco de Casagrande, com valores de LL entre 14 e 100 %, sugere que LL_p é maior 2,7 % que LL_c . A correlação obtida para misturas de bentonita e areia fina que se localizam próximas da linha U do ábaco de Casagrande indica que LL_c é geralmente maior que o LL_p (aproximadamente $LL_c = 1,2.LL_p$).

O Quadro 2 apresenta os erros residuais entre os valores medidos e os valores previstos de LL_c (ou seja, a diferença entre os valores de LL_c medidos e previstos pelas equações 2, 3 e 5 para as argilas brasileiras ($LL < 100\%$) e as misturas de Bentonita e Areia Fina ($LL > 100\%$). Os valores LL_c previstos pela equação 2 fornecem menores erros residuais para as argilas de baixa plasticidade ($LL < 100\%$). Os valores de LL_c previstos pela equação 5, com o intercepto que passa pela origem, são muito próximos dos valores de LL_c previstos pela equação 3 e fornecem menores erros residuais para as misturas de Bentonita e Areia Fina ($LL > 100\%$) que a equação 2. E neste caso, o teor de argila não influencia a variação entre LL determinados pelos métodos do cone e de Casagrande para as misturas de bentonita e areia fina. A variação entre LL_c e LL_p depende do tipo de argilomineral e cátion trocável.

Quadro 2 - Variações residuais entre valores previstos e medidos de LL_c para as argilas naturais da Grande Vitória, ES, e as misturas de bentonita e areia fina

Solo ⁽¹⁾	LL_c	Eq. 2	Eq. 3	Eq. 5
A	65,2	-0,68	-12,73	-17,87
A	70,1	+2,26	-17,09	-21,65
A	73,4	-8,86	-27,37	-31,08
B	114,8	+19,99	-0,79	-3,56
B	149,3	+29,07	+3,65	+2,77
B	172,3	+33,68	+4,91	+5,39
B	187,7	+26,16	-6,77	-4,59

⁽¹⁾ Solo A (argilas naturais da Grande Vitória, ES) e Solo B (misturas de bentonita e areia fina)

4 – CONCLUSÕES

Os valores de limite de liquidez (LL) de um solo argiloso variam com o método utilizado para determinação do LL deste solo. Os resultados mostram que as variações entre LL_c e LL_p dependem da plasticidade e mineralogia do solo ensaiado. A relação linear entre LL_c e LL_p para os dados experimentais investigados neste artigo situam entre as linhas limites $LL_c = 0,8 LL_p$ e $LL_c = 1,2 LL_p$.

Os resultados experimentais realizados por diferentes operadores indicam uma pequena diferença (aproximadamente 3%) entre os valores de LL_c e LL_p medidos para diferentes solos brasileiros com LL_c entre 14 e 100%. Os resultados estão de acordo com as publicações prévias, Fojtová et al. (2009) e Di Matteo (2012), para argilas de diferentes locais (Itália, Turquia e República Checa), e $LL < 50\%$ com a composição mineralógica de essencialmente Caulinitas e Illitas. A maior parte desses estudos apresentam $LL_c < LL_p$ com LL_c entre 1,0 e 0,8 de LL_p e estão localizados próximos a linha A no ábaco de Casagrande

Observa-se uma maior dispersão entre os valores de LL_c e LL_p medidos para as misturas de uma argila bentonita (montmorilonita Na) com uma areia fina quartzosa, com $C > 60\%$, tal que LL_c é aproximadamente igual a $1,2 LL_p$. O valor de C não influencia a relação linear entre LL_c e LL_p nas misturas de bentonita e areia fina quando a matriz argilosa domina o comportamento da mistura, ou seja não existe contato entre os grãos de areia ($C \geq 60\%$). E, neste caso predomina a influência da mineralogia da argila na relação entre LL_c e LL_p . Esses solos estão localizados próximos a linha U do ábaco de Casagrande. Verifica-se que argilas naturais montmorilonitas de diferentes origens geológicas com valores de $LL_c < 90\%$ e $LL_p < 85\%$ e $IP < 50\%$, e localizadas próximas a linha A no ábaco de Casagrande, apresentam menores diferenças entre LL_c e LL_p . Neste caso a relação entre LL_c / LL_p que varia entre 1 e 1,2. As correlações apresentadas neste estudo são para o Cone com valores de massa e ângulo de aproximadamente igual a 80 g e 30°.

As diferenças observadas entre os valores de limite de liquidez determinados pelos dois

métodos são justificadas não somente pelo valor do LL do solo argiloso ensaiado. O tipo e teor do argilo mineral dominante e o tipo de cátion trocável também influenciam as diferenças entre os valores de limite de liquidez determinados pelos dois métodos e devem ser considerados nas correlações LL_c e LL_p .

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade para a primeira autora e à CAPES pela bolsa de estudos concedida à segunda e terceira autoras.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, F.A.; Alqureshi, A., B. & Hotza, D. (2011). *Measuring the plasticity of clays: A review*. Applied Clay Science 51, pp. 1-7.
- ABNT NBR 6459 (1985). *Determinação do limite de liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1984.
- BS 1377 (1990). *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes - Part 2: Classification tests*. British Standard Institution, Londres, 1990.
- Bicalho, K. V.; Cavassani, M. R. P.; Castello, R. R. & Polido, U. F. (2002), *Características de Compressibilidade de Argilas Arenosas Moles*. In: 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Anais... Lisboa, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp.303-312.
- Bicalho, K. V., Gramelich, J. C. & Cunha, C. L. (2014). *Comparação entre os valores do Limite de Liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros*. Comunicações Geológicas, 101, pp. 1097 - 1099.
- Budhu, M. (1985). *The effect of clay content on liquid limit from a fall cone and the British cup device*. Geotech. Test. J., 8, pp. 91-95.
- Casagrande, A. (1932). *Research on the Atterberg Limits of Soils*. Public Roads, 13, pp. 121-136.
- Casagrande, A. (1958). *Notes on the design of the liquid limit device*. Geotechnique, 8, pp. 84-91.
- Di Matteo, L. (2012). *Liquid limit of low- to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test*. Bull. Eng. Geol. Environ., 71, pp. 79-85.
- Dragoni W.; Prosperini N. & Vinti G. (2008). *Some observations on the procedures for the determination of the liquid limit: an application on Plio-Pleistocenic clayey soils from Umbria region (Italy)*. Ital. J. Eng. Geol. Environ. Spec. Issue, 1, pp. 185-197.
- Fojtová, L.; Marschalko M.; Franeková R. & Kovár, L. (2009). *Study of compatibility of methods for liquid limit measurement according to Czech State Standard and newly adopted European Standard*. GeoSci. Eng. LV, 1, pp. 55-68.
- Leflaive, E. (1971). *Les Limites D'atterberg et Le Pénétromètre à Cone*. Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées, 50, pp. 123-131.
- Leroueil, S. & Le Bihan, J. P. (1996). *Liquid Limits and Fall Cones*. Can. Geotech. J., 33: pp. 793-798.
- Mitchell, J.K. & Sitar, N. (1982). *Engineering Properties of Tropical Residual Soils*, Invited Paper, In: ASCE Geotechnical Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils, Proceedings... Honolulu, Hawaii, pp.30-57.

- Nagaraj, H. B., Sridharan, A. & Madhu, B. V. (2012). *Comparative study of determination of liquid limit by percussion cup, cone and K_0 -stress methods*, 8 International Symposium on Lowland Technology, Indonesia, pp. 66-74.
- Ozer, M. (2009). *Comparison of liquid limit values determined using the hard and soft base Casagrande apparatus and the cone penetrometer*. Bull. Eng. Geol. Environ., 68, pp. 289–296.
- Pinto, S. & Castro, P.F. (1971). *Determinação do limite de liquidez pelo método do cone de penetração*, IPR/DNER., 24p.
- Queiroz de Carvalho, J. B. (1986). *The applicability of the cone penetrometer to determine the Liquid Limit of Lateritic soils*. Geotechnique, 36, pp. 1-8.
- Seed, H.B.; Woodward, R.J. & Lundgren, R. (1964). *Fundamental aspects of the Atterberg limits*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 90, SM6, pp. 75-105.
- Silveira, L. C. S. (2001). *O cone de penetração como ensaio alternativo na determinação da plasticidade de solos*. In. XXIX COBENGE. Anais..., Porto Alegre, pp.16-19.
- Souza, P.M.L.P. (2011). *Limite de Liquidez - Correlações e Comparações entre os métodos de Fall Cone e da Concha de Casagrande*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 111p. (Dissertação de Mestrado)
- Sowers, G.F.; Vesic, A. & Grandolfi, M. (1959). *Penetration tests for liquid limit*, In: Symposium on Atterberg Limits, ASTM, STP, Proceedings... pp. 216-224.
- Sridharan, A. & Prakash, K. (1998). *Liquid limit and fall cone: discussion*. Can. Geotech. J., 35, pp. 407-408.
- Sridharan, A. & Prakash, K. (2000). *Percussion and cone methods of determining the liquid limit of soils: Controlling mechanisms*. Geotech. Test. J., 23 (2), pp. 236-244,.
- Youssef, M. S.; El Ramli, A. H. & El Demery, M. (1995). *Relationships between shear strength, consolidation, liquid limit and plastic limit for remolded clays*. In: 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceedings..., Montreal, pp. 126-129.
- Wasti, Y. & Bezirci, M.H. (1986). *Determination of the consistency limits of soils by the fall-cone test*. Can. Geotech. J., 23, pp. 241-246.
- Whyte, I. L. (1982). *Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion*. Ground Engng. 15, 1, pp. 16–24.