

Correlação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone de queda livre para diferentes materiais.

Bruno de Oliveira Costa Couto

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, bruno.couto.amb@gmail.com.

Eleonardo Lucas Pereira

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, eleonardopereira@gmail.com.

Romero César Gomes

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, romero@em.ufop.br.

Lucas Deleon Ferreira

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, lucas@em.ufop.br.

RESUMO: No estudo da Mecânica dos Solos, o teor de água é parâmetro fundamental na previsão de seu comportamento, pois a sua variação pode conduzir a diferentes estados físicos, principalmente quando as frações silte e argila são significativas. Uma das fronteiras utilizadas para delimitação dos estados físicos de um determinado solo é o chamado limite de liquidez, que se caracteriza como a fronteira entre um solo em estado líquido e seu estado plástico. A determinação do limite de liquidez (LL) é uma prática comum nos laboratórios de mecânica dos solos, sendo que no Brasil, os procedimentos laboratoriais para determinação do LL são normatizados pelo ensaio com aparelho de Casagrande (ABNT, 1984a). Existe outro procedimento para determinação do LL muito utilizado no exterior, o método do cone de queda livre ou “*fall cone test*”, inclusive regulamentado por uma norma britânica BS (1990). O objetivo do presente trabalho é comparar os resultados obtidos pelo aparelho de Casagrande e cone penetrométrico para solos do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais e um rejeito de bauxita. Para tal, foram utilizados sete materiais de diferentes composições granulométricas, salientando que uma das amostras trata-se de um rejeito de bauxita com elevados percentuais de silte e argila. Os resultados obtidos pelo cone penetrométrico foram superiores aos determinados pelo aparelho de Casagrande, aproximadamente 30 % superior, a exceção do rejeito de bauxita que apresentou valores praticamente idênticos para os dois métodos. Nota-se que quando o teor de argila aumenta os limites de liquidez obtidos pelos dois métodos tendem a se aproximar. Outra característica observada foi uma possível associação dos valores obtidos com o índice de atividade de argilas definido por Skempton em 1953. É importante ressaltar que os resultados destes trabalhos são de caráter absolutamente preliminar, necessitando de um maior número de ensaios de laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: Limite de Liquidez, Aparelho de Casagrande, Cone Penetrométrico, Teor de Argila.

1 INTRODUÇÃO

Em solos constituídos, essencialmente, por silte e argila, o teor de água é parâmetro fundamental na previsão do comportamento, pois sua variação pode conduzir a diferentes estados

físicos (Souza, 2011).

Devido ao fato do solo apresentar diferentes comportamentos em diferentes teores de umidades, são definidas faixas de comportamento, delimitadas pelos limites de consistência. Assim, quando um determinado

solo apresenta teor de umidade elevado, é considerado um fluido denso e apresenta-se no estado líquido. À medida que este solo perde água, irá se enrijecer até o ponto em que perde a capacidade de fluir. Este ponto é chamado de limite de liquidez. Apesar de perder a característica de fluido, o solo ainda possui a capacidade de ser moldado com facilidade, encontrando-se no chamado estado plástico. Com a contínua perda de umidade, o solo perde as características plásticas, atingindo um estágio semissólido, ponto no qual o material começa a se desmanchar quando trabalhado. Esta fronteira é chamada de limite de plasticidade.

A consistência do solo apresenta-se como uma característica importante nas obras de engenharia por determinar o comportamento do solo ante determinadas tensões e deformações. A importância desses parâmetros pode ser destacada por sua utilização nos sistemas de classificação de solos tradicionalmente utilizados em projetos geotécnicos. Portanto, são considerados ensaios indispensáveis para a caracterização do material.

O limite de liquidez é obtido, atualmente, em laboratório por meio de duas metodologias distintas. A primeira é feita pelo aparelho de Casagrande (Casagrande, 1932), que consiste em uma concha de latão sobre um suporte ebonite; nesta concha é colocada uma pasta de solo, onde é aberta uma ranhura, feita por um cinzel que divide a pasta em duas partes; por meio de um excêntrico acionado por uma manivela imprime-se a concha, repetidamente, quedas de altura de 1 cm com intensidade constante (Caputo, 1988). O teor de umidade necessário para fechar uma distância de 12,7 mm após 25 golpes corresponde ao limite de liquidez (Das, 2011). O método de Casagrande apresenta uma série de limitações, como: a sensibilidade dos solos (principalmente aqueles que apresentam percentuais elevados de areia em sua composição); sensibilidade do equipamento de Casagrande (relacionado ao desgaste do aparelho ao longo do tempo); técnica do operador (alinhamento do sulco, velocidade da execução dos golpes, quantidade de solo disposta sobre a concha). Segundo Kestler (1982), durante a execução do ensaio em solos com baixa plasticidade, existe a tendência desses materiais liquefazerem antes

de fluírem por plasticidade. Outra questão, fonte de crítica, é o fato de ocorrer durante o ensaio o cisalhamento dinâmico da amostra.

O segundo método, pouco utilizado no Brasil, foi desenvolvido por John Olsson, entre 1914 e 1922, por meio de um novo dispositivo chamado de “Cone Sueco”, também denominado atualmente de *fall cone* ou cone penetrométrico (Souza, 2011). Este ensaio consiste em um cone padrão, com ângulo do vértice igual a 30° e peso de 80 g, sendo penetrado no solo por um período de 5 segundos quando liberado em queda livre a partir da posição de contato com a superfície do solo (Das, 2011). São realizadas, no mínimo, quatro determinações em diferentes teores de umidade que são utilizados no traçado de um gráfico semilogarítmico, de maneira que o limite de liquidez corresponda ao teor de umidade no qual o cone penetra 20 mm. Desta forma, o ensaio penetrométrico ainda apresenta uma limitação quanto à sensibilidade do equipamento e do solo, porém diminui consideravelmente a influência do operador no ensaio, fato que motiva o uso deste método em detrimento ao aparelho de Casagrande.

Segundo Kestler (1982), existem outras variáveis que limitam a aplicação do cone, dentre elas: o tempo de penetração; a rigidez do solo (em argilas de elevada rigidez a penetração do cone é relativamente baixa); textura da superfície do cone (função da coesão do atrito entre a superfície do cone e o solo); técnica do operador.

A partir destes dois métodos, uma série de trabalhos vem sendo desenvolvidos (Wasti, 1986; Souza, 2011; Spagnoli, 2012; Bicalho, 2014), buscando uma associação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelo aparelho de Casagrande e do cone penetrométrico. Muitos destes trabalhos afirmam que os valores seriam similares quando se estudam argilas puras ou solos com grandes percentuais de argila em sua composição (Christaras, 1991; Spagnoli, 2012).

Desta forma, o presente trabalho busca fazer uma comparação entre os dois métodos de determinação do limite de liquidez, para diferentes materiais, considerando solos de diferentes granulometrias e um rejeito de mineração de elevado percentual de finos.

Contribuindo assim, para o desenvolvimento de correlações e estudos na comparação dos dois métodos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizadas amostras de diferentes tipos de solos da região do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais (QF). Os materiais apresentados neste estudo foram selecionados com base em sua composição granulométrica, visto que um dos objetivos da pesquisa seria estudar a interferência do tamanho das partículas nas similaridades dos resultados obtidos pelo método de Casagrande e do cone de penetração.

Objetivando estudar a interferência da fração fina nos resultados, foram inseridos dois materiais com percentuais expressivos da fração argila, sendo que um destes foi um de rejeito de mineração de bauxita.

Os materiais amostrados foram submetidos a ensaios de caracterização geotécnica, compreendendo a determinação da granulometria do solo (ABNT, 1984a), limite de plasticidade (ABNT, 1984c), massa específica dos grãos; neste propósito foram preparadas amostras conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT (1986). Todos os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA) do Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (NUGEO/UFOP). Para determinação do limite de liquidez pelo aparelho de Casagrande foram utilizados os procedimentos definidos na ABNT (1984b), conforme Figura 1.



Figura 1. Limite de liquidez determinado pelo aparelho de Casagrande.

Vários métodos para estimativa do limite de liquidez pelo cone penetrométrico foram desenvolvidos em diversos países. Porém, neste trabalho, optou-se pelo sugerido na norma britânica (BS 1377: parte 2, 1990), que consiste na queda de um cone de massa igual a $80 \pm 0,05$ gramas, ângulo de $30 \pm 0,1^\circ$ e tempo de penetração igual a 5 ± 1 segundo sobre uma amostra moldada de solo (Figura 2).



Figura 2. Limite de liquidez determinado pelo cone penetrométrico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 abaixo apresenta um resumo dos dados da caracterização geotécnica dos materiais estudados, contemplando resultados de granulometria; limites de liquidez, determinados pelo aparelho de Casagrande (LL_C) e pelo cone de penetração (LL_P); limite de plasticidade, índice de plasticidade, calculado com o limite de liquidez obtido pelo aparelho de Casagrande (IP_C) e cone penetrométrico (IP_P). Nos dados da Tabela 1, foram desconsiderados os valores da fração pedregulho.

Nota-se que a maioria dos solos estudados apresenta grandes percentuais de silte em sua composição, destacando-se a amostra OBR que apresenta mais de 80 % desta fração. As amostras PMA e REJ apresentam percentuais elevados de argila e areia em sua composição. A amostra REJ é um rejeito proveniente de uma mineração de bauxita.

O resultado do limite de liquidez obtido pelo cone penetrométrico foi superior ao determinado pelo aparelho de Casagrande, com

exceção da amostra REJ (rejeito de bauxita), que apresentou valores praticamente idênticos nos dois métodos. Confirmando o estabelecido por alguns autores, os resultados tendem a ser similares para materiais com altos teores de argila. Porém, quando a amostra PMA é analisada, esta afirmação não é verificada, uma vez que o mesmo apresenta um significativo percentual de argila. Porém, os resultados obtidos tanto pelo aparelho de Casagrande quanto pelo cone de penetração são distintos, o que pode ser explicado pelo elevado teor de areia deste solo.

Objetivando deixar de forma mais clara as relações entre os limites de liquidez encontrados, foi construído um gráfico e traçada uma linha de tendência entre os pontos (Figura 3). A equação 1 foi estabelecida por essa regressão linear.

A Figura 3 demonstra que os solos com características siltosas se encontram mais agrupados quando comparados aos outros materiais, evidenciando uma possível relação entre o valor da penetração do cone ao tamanho da partícula. Porém, para confirmação desta hipótese, são necessários mais ensaios com diferentes tipos de solos. Buscando validar a equação obtida, os resultados foram comparados com outros dois trabalhos, conforme apresentado na Figura 4.

A Figura 4 apresenta, de forma gráfica, Equação 1 e outras duas outras correlações obtidas por trabalhos desenvolvidas por Queiroz e Carvalho (1986) e Bicalho *et al.* (2014). No trabalho desenvolvido por Queiroz de Carvalho (1986), foram utilizadas 27 amostras de diferentes solos lateríticos do norte e nordeste brasileiro que apresentaram valores de LL_C compreendidos entre 13 e 48%, resultando na equação $LL_C = 0,934 LL_P - 2,18$.

$$LL_C = 0,9789. LL_P - 8,6867 \quad (1)$$

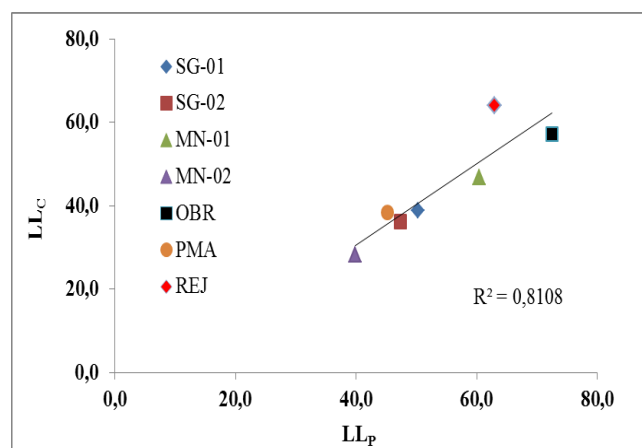


Figura 3. Limite de liquidez determinado pelo aparelho de Casagrande.

Tabela 1: Análise granulométrica e limites de consistência dos materiais estudados.

Amostra	Granulometria - ABNT 6502 (%)					Limites de Consistência				
	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	LL_C (%)	LL_P (%)	LP (%)	IP_C	IP_P
SG-01	6,9	51,1	19,8	17,4	3,8	38,8	50,3	30,3	8,5	20,0
SG -02	5,8	47,3	19,9	19,4	7,2	36,2	47,3	27,9	8,3	19,4
MN-01	6,0	62,8	17,7	2,0	2,9	46,9	60,4	36,9	10,0	23,5
MN-02	7,8	44,2	27,6	16,9	3,4	28,3	39,9	NP*	-	-
OBR	7,7	83,8	3,0	3,7	1,3	57,1	72,5	50,3	6,8	22,2
PMA	38,8	24,7	20,9	10,2	-	38,5	45,2	28,0	10,5	17,2
REJ**	49,1	48,8	2,1	-	-	64,0	63,5	30,9	33,1	32,1

* NP = Não plástico; ** Rejeito de mineração de bauxita.

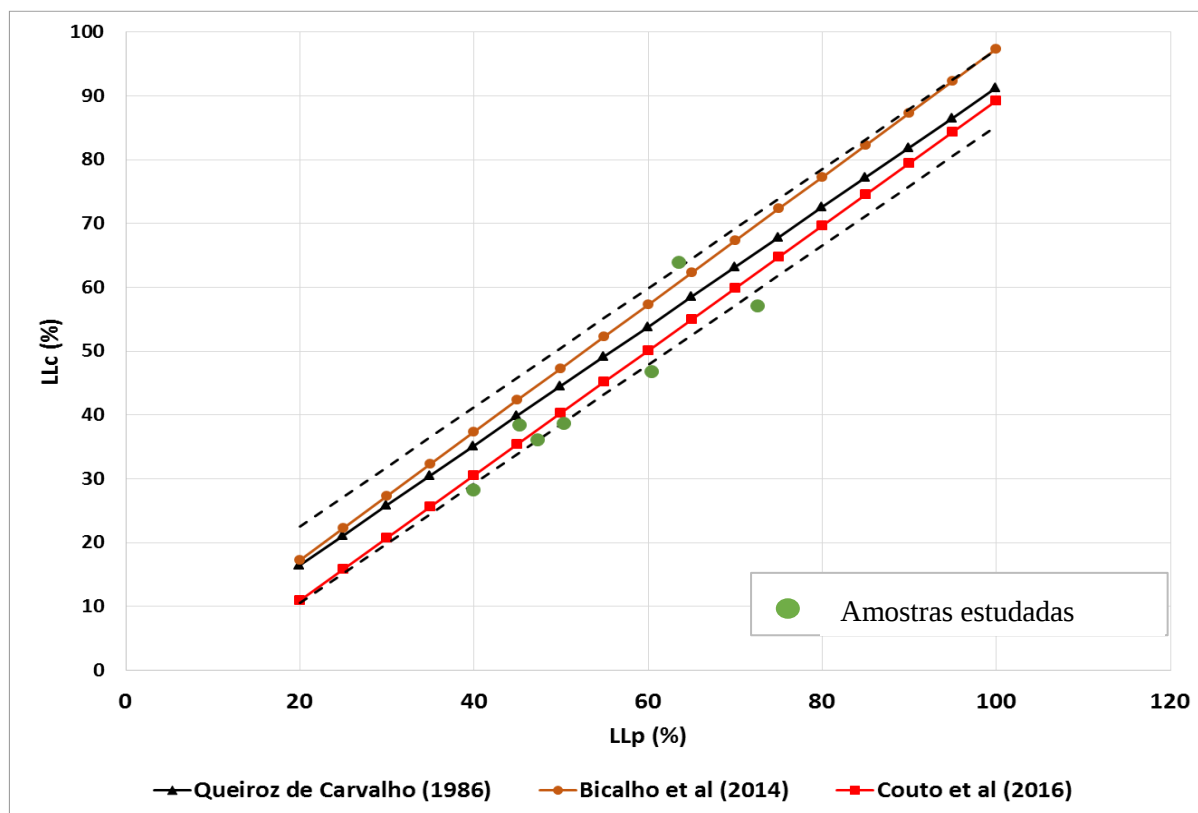


Figura 4. Comparação entre correlações de limites de liquidez obtidos por diferentes estudos.

Já o trabalho desenvolvido por Bicalho (2014), foi realizado com argilas naturais da cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo, sendo utilizadas amostras que apresentaram LL_C variando entre 65 e 73%, esses resultados foram associados aos publicados por Pinto e Castro (1971) e Silveira (2001), que realizaram os experimentos com solos tropicais brasileiros de diferentes localidades que apresentaram LL_C superiores a 50%. O trabalho de Bicalho (2014) totalizou 46 amostras de solos, com LL_C compreendidos entre 14 e 98% e LL_P entre 18 e 98% obtendo a equação $LL_C = LL_P - 2,7$.

Verifica-se, a partir da superposição das equações, que a proposta apresentada por Queiroz de Carvalho (1986) foi a intermediária, sendo a proposta por Bicalho (2014) o limite superior e a encontrada no presente trabalho o inferior. Dessa forma, estabeleceu-se duas linhas de tendência que em relação a equação proposta por Queiroz de Carvalho (1986) apresentam uma variação de $\pm 5\%$. Todas as amostras utilizadas ficaram dentro desse intervalo proposto ou no limiar dele, conforme ilustra a figura.

Buscando estabelecer uma relação entre os

limites de liquidez determinados pelos dois métodos, foi proposta a relação LL_P/LL_C (Tabela 2). Da mesma forma foi determinado o índice de atividade de argilas, conforme proposto por Skempton (1953). Os índices foram determinados para os dois índices de plasticidade calculados (IP_C e IP_P).

Tabela 2: Relação entre o limite de liquidez e o índice de atividade de argilas.

Amostra	LL_P/LL_C	Atividade (IP_C)	Atividade (IP_P)
SG-01	1,30	1,23	2,90
SG -02	1,31	1,43	3,34
MN-01	1,29	1,67	3,91
MN-02*	1,41	-	-
OBR	1,27	0,88	2,88
PMA	1,17	0,27	0,44
REJ	0,98	0,67	0,65

*Amostra não apresentou plasticidade

Os resultados mostram que os limites determinados pelo cone apresentam valores superiores à ordem de 30%. Porém, nota-se uma tendência: à medida que os percentuais de argila aumentam, esta superioridade tende a diminuir, fato que pode ser observado nas amostras PMA e REJ.

Nota-se ainda que as amostras que possuem as maiores relações LL_p/LL_c são as que apresentaram maiores valores de índice de atividade, ressaltando a importância do estudo do argilomineral presente nestes materiais.

Muitos trabalhos defendem a teoria que a penetração de 20 mm, esteja diretamente relacionada às argilas puras. Desta forma seria necessário determinar valores específicos de penetração para diferentes tipos de solos. Logo, solos mais finos permitiriam uma maior penetração do cone, enquanto solos mais grosseiros (siltes e areia finas) tenderiam apresentar resistência à penetração.

Outra observação está associada à forma de inserção do material na cápsula metálica do penetrômetro de cone. A norma recomenda que a amostra seja moldada de maneira que se tenha um menor volume de vazios. Logo, percebe-se que esta condição é de difícil controle, evidenciando uma possível fonte de erros de operação no decorrer dos ensaios.

CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho, apesar de preliminares e vinculados a um pequeno número amostras, indicam uma possível associação entre os valores obtidos pelo aparelho de Casagrande e cone penetrométrico. Foi observado que os resultados convergem à medida que o teor de argila aumenta, sendo necessários maiores estudos para constatação deste fato, onde também deverá ser estudada a influência da fração areia fina.

A equação proposta neste estudo manteve-se próxima a algumas propostas anteriores, visto que, quando comparado ao desenvolvido por Queiroz de Carvalho (1986), os resultados convergiram para valores altos de LL_c e LL_p , o que pode caracterizar solos de textura argilosa. Mesmo quando adotada a equação de Bicalho (2014), os resultados não se mostraram muitos

destoantes. Porém, se ajustaram melhor ao método de Queiroz de Carvalho (1986), principalmente no trecho inicial.

Para complementação deste estudo, torna-se necessário um maior número de ensaios, contemplando um universo de materiais com diferentes granulometrias, a fim de se avaliar dentre outras questões: a influência dos percentuais de argila com a convergência dos limites obtidos pelos dois métodos; o valor da penetração adotada de acordo com a fração dominante, visto que o valor de 20 mm utilizado se associa às argilas puras; afirmação ou ajuste da equação proposta neste trabalho. Ainda é importante estudar a composição mineralógica dos solos como uma possível convergência dos valores encontrados.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984a). *Solo – Análise granulométrica*: NBR – 7181. São Paulo. 13 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984b). *Solo – Determinação do limite de liquidez*: NBR – 6459. São Paulo. 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984c). *Solo – Determinação do limite de plasticidade*: NBR – 7180. São Paulo. 3p
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*: NBR – 6457. São Paulo. 9 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1995). *Rochas e Solos*: NBR – 6502. São Paulo. 18 p.
- Bicalho, K. V., Granelich, J. C., Cunha, C. L. S. (2014). Comparação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros. *Comunicações Geológicas*. v.101, Especial III, p.1097-1099.
- BS 1377: Parte 2, (1990). *“Methods of Test for Soil for Civil Engineering Purposes”*. British Standards, Londres.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações*. 6ª Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editoria S.A.
- Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg Limits of soils. *Public Roads*, 13(8), 121 – 136.
- Christaras, Basiles (1991). A comparison of the Casagrande and fall cone penetrometer methods for liquid limit determination in marls from Crete, Greece. *Engineering Geology*. Thessaloniki, Greece. v.31, p.131-142.
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de engenharia Geotécnica*. Tradução da 7ª edição norte-americana. Editora Cengage Learning. São Paulo.

- Kestler, M.A. (1982). *Correlations and comparisons between the Casagrande liquid limit device and the fall cone*. MSc Thesis, Massachusetts Institute of Technology (unpublished), 277 p.
- Pinto, S., Castro, P.F., 1971. Determinação do limite de liquidez pelo método do cone de penetração. DNER, 15 p.
- Queiroz de Carvalho, J. B. (1986). The applicability of the cone penetrometer to determine the liquid limit of lateritic soils. *Geotechnique*, 36, 1-8.
- Silveira, L.C.S., 2001. O cone de penetração como ensaio alternativo na determinação da plasticidade de solos. *XIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 16-19.
- Skempton, A. W. (1953). *The colloidal activity of clays*. In: Proc. Of the 3rd Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich.
- Souza, P. M. L. P. (2011) Limite de Liquidez – Correlações e comparações entre os métodos de Fall Cone e da Concha de Casagrande. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica – Geotecnia). Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 148 p.
- Spagnoli, G. (2012). Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay. *Canadian Journal of Soil Science*. v. 92: 859-864.
- Wasti, Y., Bezirci M.H. (1986). Determination of the consistency limits of soils by the fall-cone test. *Canadian Geotechnical Journal*, 23, 241–246.