

Determinação do Limite de Liquidez Através do Cone Sueco

Camila Woldam Clemente

UFPR/Fugro In Situ Geotecnia Ltda, Curitiba, Brasil, camila.clemente@insitu.com.br

Monica Priscilla Hernandez Moncada

UFF/Fugro In Situ Geotecnia Ltda, Curitiba, Brasil, monica.moncada@insitu.com.br

Alessander Christopher Morales Kormann

UFPR/Fugro In Situ Geotecnia Ltda, Curitiba, Brasil, alessander@ufpr.br

RESUMO: Dentre as propriedades dos solos, o conhecimento dos parâmetros de caracterização é de grande importância porque além de permitir a identificação e classificação dos materiais, permite estimar o comportamento dos materiais do ponto de vista da resistência e deformação. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os métodos disponíveis para a determinação do limite de liquidez, foram comparados os limites determinados utilizando o método clássico de Casagrande, desenvolvido por Arthur Casagrande em 1932, e o método do Cone Sueco, desenvolvido pela Geotechnical Commission of the Swedish State Railways em 1915. Para garantir a representatividade da avaliação foram testadas 31 amostras de solo brasileiras de diferentes origens (amostragens on-shore, offshore, rejeito e near-shore). Os resultados mostraram que existe uma boa correspondência entre os métodos para valores de limite de liquidez menores que 80%, acima deste conteúdo de umidade o método empregado aparentemente influencia no valor do parâmetro. Para entender o comportamento e avaliar a aplicabilidade do método do Cone Sueco foram determinadas também outras propriedades geotécnicas tais como percentual de finos, teor de matéria orgânica, argilomineral presente, entre outros.

PALAVRAS-CHAVE: Limites de Atterberg, Aparelho de Casagrande, Cone Sueco, Consistência.

1 INTRODUÇÃO

Durante muito tempo, a engenharia geotécnica foi baseada em experiências passadas por meio de uma sucessão de experimentos, sem qualquer definição científica real (Das, 2012). A preocupação com o estudo dos solos e suas propriedades começou em meados do século XVIII quando ocorreram problemas com as fundações de construções passadas, como é o caso da famosa Torre de Pisa na Itália.

O conhecimento da consistência dos solos é de grande relevância, pois demonstra o comportamento do solo a tensões e deformações, influenciando na resistência do solo à penetração e a compactação e afetando a condutividade hidráulica.

Em 1908, Albert Atterberg publicou uma

pesquisa com seus primeiros resultados sobre a plasticidade do solo e seus diferentes teores de umidade e em 1911, explicou a consistência de solos coesivos definindo os limites de liquidez, de plasticidade e de contração (Das, 2012). Já em 1932, Arthur Casagrande aprofundou-se na pesquisa de Atterberg e desenvolveu o equipamento de determinação de limite de liquidez, usado até hoje em laboratórios.

O método do Cone Sueco surgiu em 1915 como um método rápido, simples e preciso para determinação de resistência não drenada, da sensibilidade de argilas e do limite de liquidez. O equipamento de Cone Sueco existe há 100 anos, porém ainda é pouco utilizado no Brasil. O objetivo do presente trabalho é demonstrar que o Cone Sueco pode ser um método alternativo para a determinação do limite de

liquidez, sendo um meio mais prático, rápido e com menos interferências do operador no procedimento quando comparado com a determinação via aparelho de Casagrande.

Para avaliar a validade de determinação do limite de liquidez usando o método do Cone neste artigo foi executada a determinação do limite de liquidez de amostras utilizando o método do Cone Sueco e executou-se à comparação dos valores absolutos e da dispersão associada a cada determinação para o método de Casagrande. Pretendeu-se indicar quais as diferenças entre um método e outro, a fim de correlacionar os métodos e avaliou-se se os resultados obtidos com o Cone Sueco são consistentes quando comparados com o método de Casagrande.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Métodos

Os ensaios de caracterização são em geral ensaios simples e relativamente rápidos com validade internacional e poucas variações entre os métodos usados nos diferentes países. Estes ensaios têm grande importância no estudo dos solos, já que são o início na identificação do material e sua posterior classificação, fornecendo dados importantes na determinação das características de engenharia da amostra. A caracterização física abrange os seguintes ensaios: análise granulométrica, limites de consistência, teor de umidade, peso específico natural e massa específica real dos grãos.

O tema principal do presente trabalho é a determinação do limite de liquidez utilizando-se do método clássico proposto por Arthur Casagrande em 1932 e o método alternativo do Cone Sueco proposto pela Geotechnical Swedish State Railways em 1915. Os procedimentos de ensaios de limite de liquidez serão descritos brevemente nos itens a seguir. Outros ensaios de caracterização foram realizados como dados complementares, mas não terão seus procedimentos descritos já que os métodos são amplamente conhecidos e podem ser consultados nas normas NBR7180 – Determinação do Limite de Plasticidade,

NBR7181 – Análise Granulométrica, DNER-ME093 – Massa Específica Real dos Grãos.
2.1.1 Método do Aparelho de Casagrande

O aparelho de Casagrande é composto por uma concha de latão e uma base de borracha rígida (ebonite), esta concha de latão é golpeada na base através de uma manivela. O procedimento e a aparelhagem encontram-se especificados na norma NBR6459 – Determinação do Limite de Liquidez (1984) e pode ser resumido como a execução do ensaio se inicia com a preparação da amostra, de forma a se obter uma pasta homogênea. Transfere-se parte da mistura para a concha do equipamento, moldando para que a região central tenha uma espessura da ordem de 10 milímetros. Com o cinzel abre-se uma ranhura em sua parte central, dividindo a massa de solo em duas partes. A consistência desta primeira pasta deve fechar a ranhura com cerca de 35 golpes. O fechamento se dá em uma distância de aproximadamente 12,7 milímetros ao longo da base da ranhura.

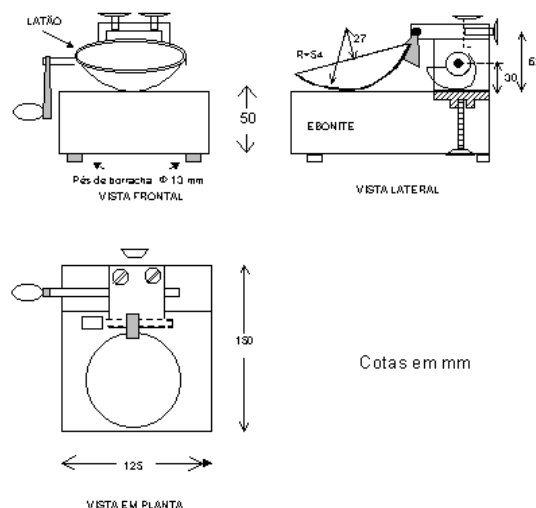


Figura 1. Aparelho de Casagrande, NBR6459.

Na representação gráfica do ensaio plota-se os valores de teor de umidade no eixo das ordenadas em escala aritmética e o número de golpes no eixo das abcissas em escala logarítmica. O limite de liquidez corresponde ao teor de umidade equivalente a 25 golpes.

2.1.2 Método do Cone Sueco

O equipamento do Cone Sueco consiste em um cone de metal de determinada massa com um

certo ângulo suspenso verticalmente apenas com a ponta do cone tocando a superfície da amostra. Quando liberado, o cone cai livremente pelo seu próprio peso sobre a amostra de solo, então a profundidade final de penetração é medida. O equipamento é representado na figura a seguir:



Figura 2. Cone Sueco, 2015.

Na presente pesquisa trabalhou-se com a definição de norma sueca SS 02 71 20 considerando que o limite de liquidez é definido como o teor de umidade em que um cone de 60° de abertura com 60 gramas penetra 10 milímetros no solo. Diferentemente do aparelho de Casagrande, não existe um único procedimento e equipamento de Cone disponível, existem variações no peso e dimensões dependendo da norma consultada. Por exemplo, o Cone Britânico padronizado pela norma BS1377 tem peso de 80 gramas e ângulo de abertura de 30°. Ainda não há disponível uma norma brasileira que regularize o ensaio de limite de liquidez utilizando o Cone.

Para a representação gráfica, constrói-se um gráfico com os valores de teor de umidade no eixo das ordenadas e os valores da penetração em milímetros no eixo das abscissas, ambos em escala aritmética, como apresentado na figura 3.

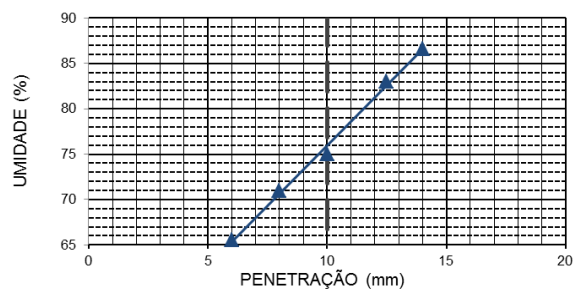


Figura 3. Representação gráfica do limite de liquidez pelo Cone Sueco, 2015.

2.2 Materiais

Para alcançar uma maior abrangência nos resultados do presente artigo, buscou-se selecionar amostras com diferentes origens e com diversas características geotécnicas, foram utilizadas amostragens on-shore, near-shore e offshore, totalizando 31 amostras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados

Na tabela a seguir estão apresentados os dados de origem, percentual de finos e massa específica dos grãos para cada uma das amostras ensaiadas. Devido à quantidade de material disponível, nem todas as amostras conseguiram ter todos os ensaios realizados.

Tabela 1. Relação de amostras, 2015.

Amostra	Origem	% Finos	ρ_s
1	Offshore	93,7	2,737
2	Offshore	99,0	2,759
3	Offshore	81,2	2,708
4	Offshore	88,4	2,712
5	Offshore	91,5	2,722
6	On-shore	97,0	2,631
7	Rejeito	31,5	2,698
8	Rejeito	88,8	2,750
9	Near-shore	91,5	2,645
10	Near-shore	77,0	2,635
11	Near-shore	71,5	2,533
12	Near-shore	77,7	2,651
13	Near-shore	-	-
14	Near-shore	-	-
15	Near-shore	-	-

Tabela 1. Relação de amostras, 2015 (continuação).

Amostra	Origem	% Finos	ρ_s
16	On-shore	62,9	2,836
17	Offshore	100,0	-
18	On-shore	63,0	2,837
19	Offshore	100,0	2,523
20	On-shore	51,0	2,697
21	On-shore	70,0	-
22	On-shore	61,0	-
23	On-shore	68,0	2,695
24	On-shore	40,0	2,621
25	On-shore	63,0	2,776
26	On-shore	65,0	2,609
27	On-shore	61,0	2,707
28	On-shore	74,0	2,644
29	On-shore	80,0	2,642
30	On-shore	56,0	2,631
31	On-shore	61,0	2,830

Legenda: % Finos = percentual de finos; ρ_s = massa específica real dos grãos.

Na tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos com aparelho de Casagrande e Cone Sueco, assim como os valores de R^2 alcançados em cada ensaio.

Tabela 2. Resultados dos ensaios, 2015.

Amostra	LL Casag.	R^2 Casag.	LL Cone Sueco	R^2 Cone Sueco
1	75	0,998	80	0,969
2	100	0,985	95	0,995
3	64	0,990	61	0,978
4	86	0,996	76	0,996
5	54	0,997	57	0,955
6	110	0,995	107	0,998
7	18	0,987	23	0,959
8	49	0,989	58	0,976
9	54	0,957	57	0,986
10	63	0,991	63	0,988
11	51	0,952	50	0,947
12	89	0,936	97	0,999
13	33	0,965	34	0,955
14	83	0,966	98	0,970
15	54	0,988	59	0,990
16	49	0,942	58	0,989
17	94	0,986	82	0,989
18	34	0,985	38	0,970

Tabela 2. Resultados dos ensaios, 2015 (continuação).

Amostra	LL Casag.	R^2 Casag.	LL Cone Sueco	R^2 Cone Sueco
19	56	0,994	63	0,926
20	30	0,944	33	0,954
21	41	0,998	44	0,962
22	52	0,994	57	0,978
23	47	0,964	54	0,979
24	40	0,994	41	0,973
25	51	0,985	60	0,988
26	40	0,990	53	0,993
27	48	0,993	57	0,979
28	43	0,997	52	0,965
29	48	0,973	52	0,994
30	24	0,978	31	0,967
31	32	0,994	36	0,969
	Média	0,981	Média	0,975
	Desvio Padrão	0,018	Desvio Padrão	0,017

3.2 Discussão

Pode se observar dos valores de R^2 médio e dispersão para o método de Cone apresenta 0,975. Para uma melhor comparação dos dados de limite de liquidez e sua posterior análise, construiu-se um gráfico em que no eixo das abcissas encontram-se os valores de limite de liquidez usando o Aparelho de Casagrande e no eixo das ordenadas os valores utilizando o Cone Sueco.

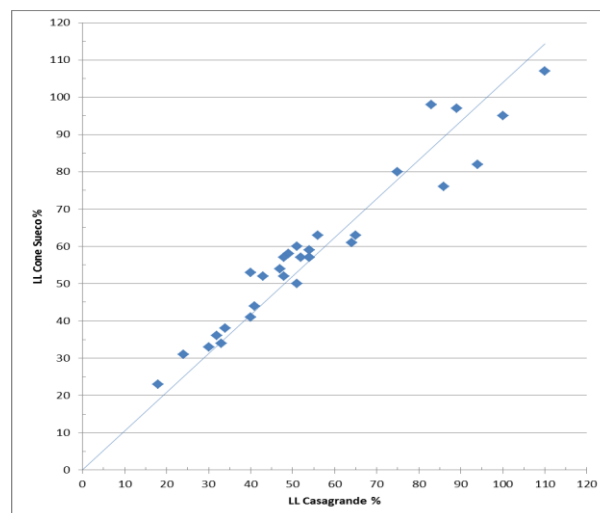


Figura 4. Comparação entre Casagrande e Cone Sueco, 2015.

Neste gráfico, a linha de tendência foi considerada passando pela origem (45 graus), o que implicaria numa correlação perfeita entre os métodos, porém notou-se uma dispersão dos pontos conforme as umidades foram aumentando avaliando os dados até um valor de limite de liquidez por Casagrande de 80% o valor de R^2 é de 0,9453, considerando os valores com $LL > 80\%$ o R^2 é 0,1485, o que mostra um aumento na dispersão dos valores. De análise dos valores individuais, observa-se que os métodos do Cone Sueco e Casagrande dão, geralmente, valores diferentes para os limites de liquidez, sendo que os maiores valores foram obtidos com o Cone Sueco.

De acordo com estudos anteriores disponíveis na literatura geotécnica, há certa tendência dos valores de Casagrande serem mais baixos que os de Cone Sueco para menores limites de liquidez e mais altos que os valores de Cone para limites de liquidez maiores. Segundo Sridharan e Prakash (1998), essa diferenciação dos valores entre o aparelho de Casagrande e Cone Sueco está relacionado com o argilomineral dominante e sua proporção contida na fração argila. Outros autores, como Leroueil e Le Bihan (1996), concordam que os argilomineral sejam um fator importante, mas que não deve ser o único a ser considerado. Já para Bicalho *et al.* (2014), a diferença de valores entre os métodos está relacionada ao estudo da resistência não drenada de cada método e o teor de argila das amostras.

No intuito de identificar outros parâmetros que permitam explicar essa diferença de comportamento foram determinados os conteúdos de matéria orgânica e o tipo de argilomineral. Com relação à matéria orgânica os valores estão representados na tabela 3. O ensaio de teor de matéria orgânica foi executado para determinar se a matéria orgânica influenciava os resultados de limite de liquidez, porém as amostras não apresentaram grandes quantidades de conteúdo orgânico que pudessem ter influenciado.

Tabela 3. Resultados do teor de matéria orgânica, 2015.

Amostra	% M.O.
1	5,8
2	4,1

Tabela 3. Resultados do teor de matéria orgânica, 2015 (continuação).

Amostra	% M.O.
3	3,6
4	2,5
5	3,2
6	9,8
7	-
8	-
9	1,5
10	-
11	-
12	-
13	0,1
14	2,9
15	1,5
16	4,0
17	5,6
18	-
19	-
20	-
21	-
22	-
23	-
24	-
25	-
26	-
27	-
28	-
29	-
30	-
31	-

Na tentativa de se avaliar os argilominerais presentes, executou-se o ensaio de massa específica real dos grãos e espectrometria de fluorescência de raios-X (em apenas três amostras de número 4, 5 e 6) e o cálculo da atividade, resultados do cálculo da atividade e índice de plasticidade estão apresentados na tabela 4. Entretanto, os resultados encontrados não indicaram dados conclusivos sobre alguma influência nos ensaios de limite de liquidez.

Tabela 4 – Resultados do cálculo da atividade e índice de plasticidade, 2015.

Amostra	IP	Ac (%)
1	36	38,42
2	64	64,65
3	38	46,80
4	50	56,56
5	30	32,79
6	57	58,76
7	8	25,40
8	24	27,03
9	38	41,53
10	51	66,23
11	42	58,74
12	77	99,10
13	19	-
14	-	-
15	39	-
16	26	41,34
17	67	67,00
18	13	20,63
19	28	28,00
20	14	27,45
21	21	30,00
22	25	40,98
23	27	39,71
24	16	40,00
25	22	34,92
26	18	27,69
27	20	32,79
28	21	28,38
29	24	30,00
30	12	21,43
31	15	24,59

Legenda: IP = índice de plasticidade; Ac = atividade.

Em outra tentativa de se identificar os argilominerais presentes, alocaram-se os pontos em um gráfico índice de plasticidade x porcentagem da fração argila proposto por Lambe e Whitman (1969). Como valores máximos e mínimos de porcentagem de fração argila têm-se, respectivamente, 100% e 31,5% e no caso dos índices de plasticidade, 77 e 12. De acordo com esses valores e aproximando uma área correspondente, nota-se que os argilominerais presentes nas amostras são illita e

caulinita.

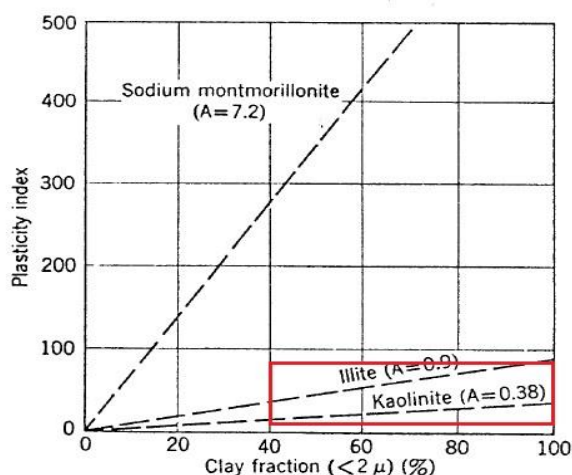


Figura 5. Gráfico índice de plasticidade x porcentagem dos finos, Lambe e Whitman (1969).

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método do Cone Sueco para determinação do limite de liquidez é mais simples e fatores como a influência do operador, tempo de execução do ensaio e o cálculo são menores que o de Casagrande. Além de evitar alguns inconvenientes gerados pelo Aparelho de Casagrande, como dispersão nos resultados, pequenas diferenças nas aparelhagens, distribuição da amostra na concha, observação do fechamento da ranhura e tempo de homogeneização incorreto.

Embora tenham sido encontrados diferentes parâmetros relacionados à caracterização dos materiais, não foi possível encontrar uma correlação simples entre a mineralogia, avaliada de forma direta ou indireta e as diferenças de valores de limite de liquidez obtidos pelos dois métodos. Para que essa correlação fosse possível, seria necessário um estudo mais detalhado de cada tipo de solo utilizado nos ensaios. O mesmo pode ser concluído com relação ao conteúdo de matéria orgânica.

Para se estimar quais seriam as interferências dos argilominerais sobre os resultados dos limites de liquidez de Casagrande e Cone Sueco, seriam necessários estudos mais aprofundados sobre cada tipo de solo usado nos ensaios.

De comparação dos valores observa-se que os métodos apresentam uma boa correlação em

limites de liquidez de até 80%, o que confirma o encontrado em outras pesquisas, mas acima deste valor as diferenças crescem.

Uma das explicações prováveis para a variação dos valores entre um método e outro pode ser explicada pelas diferenças entre comportamento para obtenção dos resultados. Para a execução de um ponto de ensaio no aparelho Casagrande a ranhura deve se fechar com 12,7 milímetros, ou seja, o solo se comporta como se estivesse em um teste de “estabilidade de taludes dinâmico” em que cada golpe gera uma aceleração e faz com que o “talude” se mova até o fechamento da ranhura. No Cone Sueco, a execução de um ponto de ensaio é feita encostando-se a ponta do cone na superfície da amostra de solo e quando o cone é liberado e mede-se uma penetração quasi-estática em milímetros, ou seja, há a medição mais direta da penetração do cone no solo. Este comportamento pode ser uma explicação mais consistente na justificativa das diferenças que a avaliação individual dos materiais.

Oliveira, M. L. e Gedanken, A. e Ruiz, H. A. (2001) Utilização do Penetrômetro de Cone na Determinação do Limite de Liquidez em Latossolos, *Revista Ceres*, nº 48, p. 95 – 99.

Sridharan, A. e Prakash, K. (1998) Liquid limits and fall cones: Discussion, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, p. 407 – 408.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fugro In Situ Geotecnia pela receptividade, apoio técnico e administrativo, pelo incentivo do desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bicalho, K. V. e Gramelich, J. C. e dos Santos Cunha, C. L. (2014) Comparação entre os valores de limite de liquidez obtidos pelo método de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros, *Comunicações Geológicas*, Vol. 101 Especial III, p. 1097 – 1099.
- Das, B.M. (2012) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 7.ed. Cengage Learning.
- Haigh, S. K. (2012) Mechanics of the Casagrande liquid limit test, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 49, p. 1015 – 1023.
- Lambe, T. W. e Whitman, R. V. (1969) *Soil Mechanics*, New York: J. Wile.
- Leroueil, S. e Le Bihan, J. P. (1996) Liquid Limits and fall cones, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, p. 793 – 798.
- NBR6459 – Determinação do Limite de Liquidez, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 1984.