

DETERMINAÇÃO DE LIMITES DE LIQUIDEZ DO SOLO ATRAVÉS DE PENETRÔMETRO EXPERIMENTAL DE LABORATÓRIO

EDUARDO BARBOSA¹; MAYCON ANDRÉ DE ALMEIDA²

¹Discente, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel-PR, eduardo.b.dudu@gmail.com;

²Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento, Prof. Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel-PR, mayconalmeida@creapr.org.br.

RESUMO: Visando ter uma maior precisão sobre algumas características específicas do solo, em 1932, Arthur Casagrande desenvolveu o equipamento para a determinação do Limite de Liquidez (LL) do solo, aplicado até hoje no Brasil seguindo a ABNT NBR 6459 (2016). Com o mesmo propósito, outros países vêm utilizando outros métodos, como é o caso do Cone Sueco, também denominado de cone de queda livre ou *fall cone test*, este teste já existe há 100 anos e segue a norma britânica BS-1377/90. Este artigo buscou estudar a viabilidade da aplicação do método de penetrômetro experimental de laboratório (denominado cone Suíço e/ou *fall cone test*), para a determinação do limite de liquidez do subsolo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, típico de Cascavel-PR. Foram realizados ensaios com amostras de solos metro a metro até uma profundidade de 15 metros no laboratório de solos II da própria instituição, onde os valores obtidos através do método do cone Suíço foram analisados e comparados com os resultados dos ensaios realizados por Zen e Almeida (2018) na determinação do limite de liquidez através do método da concha de Casagrande a fim de checar sua viabilidade de utilização em solo do tipo laterítico que é predominante na região. Quando analisados os valores na penetração de 10 mm, os resultados foram satisfatórios pois o maior intervalo entre os dois métodos foi de 24,93%, podendo ser melhorado com estudos futuros para a sua exatidão. Já quando analisados os valores na penetração de 5 mm, os resultados foram mais satisfatórios, pois o maior intervalo entre os dois métodos foi de 16,93%, podendo ser utilizado com mais confiança no tipo de solo da região do que a penetração de 10 mm como indica a norma britânica BS 1377: Parte 2 (1990).

PALAVRAS-CHAVE: Cone Sueco, Limite de liquidez, Ensaio em laboratório para solo.

INTRODUÇÃO

De acordo com Pinto (2006), o recalque que os solos sofrem quando submetidos às tensões está diretamente relacionado com a compressibilidade do solo, as condições de estado em que o solo se encontra, bem como o tipo de solo, também influenciam na deformabilidade do solo.

Conforme Quaresma *et al.* (1998), para que seja elaborado um projeto de fundação, é imprescindível conhecer o solo de forma adequada, identificando e classificando as camadas que o compõem, assim, é possível prever qual será seu comportamento perante a ação das cargas às quais serão expostas.

Visando ter uma maior precisão sobre algumas características específicas do solo, em 1932, Arthur Casagrande desenvolveu o equipamento para a determinação do Limite de Liquidez (LL) do solo, aplicado até hoje no Brasil seguindo a ABNT NBR 6459 (2016). Com o mesmo propósito, outros países vêm utilizando outros métodos, como é o caso do Cone Sueco, também denominado de cone de queda livre ou *fall cone test*, este teste já existe há 100 anos e segue a norma britânica BS-1377/90.

Segundo Mbagwu e Abeh (1998), em estudos geotécnicos a relação entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade apresenta grande aplicação em avaliações de solo para uso de fundações, construções de estradas e estruturas para armazenamento e retenção de água.

Conforme informa Viegas *et al.* (2014), o cone de queda livre de laboratório, ou *fall cone test*, teve como idealizador John Olsson, que em 1915 desenvolveu um dispositivo para obtenção do limite de liquidez denominado inicialmente como “Cone Sueco”. Este equipamento passou por adequações em cada país que era experimentado, adquirindo assim, um peso específico e um ângulo de ponta diferentes. Conforme era alterado, este método foi ganhando normas específicas para cada região, o que o tornou um experimento com várias normas diferentes para o mesmo equipamento.

Este método foi desenvolvido com o objetivo de corrigir e melhorar alguns dos fatores que influenciavam os resultados obtidos pelo método da concha de Casagrande, como por exemplo, a influência do operador do ensaio, que pode se equivocar em alguns momentos de contagem de golpes por exemplo. Este método foi criado para se obter uma metodologia mais rápida, simples e de maior precisão.

Com essas informações, a justificativa para a realização desta pesquisa, se baseou na análise da aplicação do Cone Sueco para a determinação do LL do solo laterítico e sua variabilidade comparada ao método tradicional da concha de Casagrande.

O principal objetivo deste trabalho foi determinar os LL do solo ao longo de uma profundidade de 15 metros através do método do Cone Sueco e comparar com os resultados obtidos através do método da Concha de Casagrande realizados por Zen e Almeida (2018) e assim, checar a viabilidade do uso do método do Cone Sueco.

Salienta-se que para este trabalho científico os seguintes objetivos específicos foram propostos:

a) Coletar amostras ao longo da profundidade do CEEF, através de sondagem a trado e realizar ensaios utilizando o Cone Sueco.

b) Verificar se o método do Cone Sueco é confiável para aplicação no solo laterítico de Cascavel - PR.

c) Analisar resultados de diferentes níveis de penetrações do cone para checar qual o nível de umidade é o mais próximo ao resultado do método Casagrande.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ORIGEM E FORMAÇÃO DO SOLO

Segundo Das (2007), os solos são formados pela erosão das rochas, e as propriedades físicas do solo são determinadas primeiro pelos minerais que constituem suas partículas e, portanto, pela rocha a partir da qual esse solo é derivado. Gusmão Filho (2008) relata que para Terzaghi a identidade de um solo é feita a partir das partículas que o constituem, pois existe uma imensidade dos tamanhos de grãos, como existem areias com um milímetro e argilas que têm espessura cem vezes menor.

Devido ao intemperismo, as rochas são deterioradas formando partículas que podem ser classificadas em quatro tamanhos básicos: argilas, siltes, areias e pedregulhos. Gusmão Filho (2008) relata também que o solo é estudado como uma Ciência moderna que avalia as características morfológicas dos solos, tanto nas suas características internas como externas. Em relação às externas, destacam-se relevo, drenagem, erosão, vegetação e material rochoso, já as características internas referem-se à espessura e transição entre eles, como: cor, textura e consistência.

Os solos são classificados segundo as dimensões das partículas compreendidas entre determinados limites convencionais, nas seguintes categorias - matacão, pedra, pedregulho, areia, silte e argila, com a opção de dividir a areia em grossa, média e fina. No Brasil a ABNT NBR 6502 (1995), estipula o uso das seguintes medidas granulométricas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Medidas granulométricas para uso no Brasil.

Solos	Dimensão
Argila	0 a 0,002
Silte	0,002 a 0,06

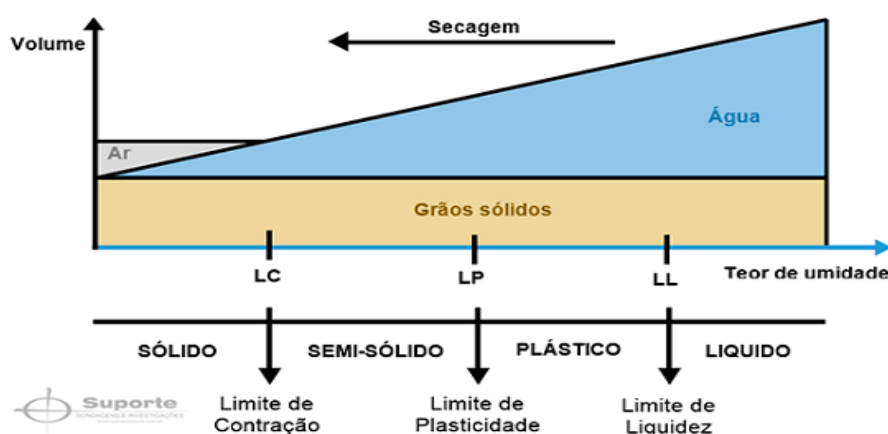
Tabela 1: Medidas granulométricas para uso no Brasil (continuação).

Areia	Fina	0,06 a 0,2
	Médio	0,2 a 0,6
	Grosso	0,6 a 2,0
Pedregulho	Fina	2,0 a 6
	Médio	6 a 20
	Grosso	20 a 60

Fonte: ABNT NBR 6502 (1995).

2.2 ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA

Das (2011) explica que, no início do século XX, um cientista sueco chamado Atterberg desenvolveu um método para descrever as consistências de solos finos com teores de umidades variados. Ele concluiu que, se os teores de umidade forem muito baixos, o solo se comportará como sólido; já quando o teor de umidade é muito alto, o solo e a água podem fluir como um líquido. Assim, o solo pode ser dividido em quatro estados básicos: sólido, semissólido, plástico e líquido, como apresentado na Figura 1.

Figura 1: Estados característicos de consistência dos solos finos e os Limites de Atterberg.

Fonte: Suporte sondagens e investigações (2017).

Tietz (2018), explica que quando ocorre a transição do estado sólido para o semissólido, é definido como limite de contração. Este limite é o teor de umidade em termos percentuais no qual o volume da massa de solo se mantém constante.

Quando passa do estado semissólido para o estado plástico, é o limite de plasticidade (LP), o qual é definido como o percentual de teor de umidade no qual o solo colapsa, quando moldados fios com 3,2 mm de diâmetro, ele é o limite inferior do intervalo plástico do solo. Por

último, quando passa do estado plástico para o líquido é chamado de limite de liquidez (LL). Esse limite é definido pela norma ABNT NBR 6459 (2016).

O índice de plasticidade (IP), é a diferença entre LL e LP (Equação 1), é expresso em porcentagem e pode ser interpretado em função da massa de uma amostra, como a quantidade máxima de água que pode lhe ser adicionada, a partir do seu limite de plasticidade, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Gusmão Filho (2008), conclui que o índice de consistência é muito importante, pois prevê o comportamento do solo argiloso, o índice de consistência (IC) é determinado através da diferença entre o LL e a umidade (w) do solo dividido pelo IP, como apresentado na Equação 2.

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} \quad (2)$$

2.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DE LIMITE DE LIQUIDEZ (LL)

A determinação do limite de liquidez é feita através de dois métodos: o método da concha de Casagrande, proposto por Arthur Casagrande em 1932, e o método alternativo do *fall cone test* ou cone de queda livre de laboratório, que teve como idealizador John Olsson em 1915.

2.3.1. Método de Casagrande

O ensaio do método de Casagrande inicia-se na fase de preparação da amostra de solo. Primeiramente, se passa uma quantidade de solo por uma peneira (nº40 da série ASTM) e em seguida, coloca-se uma quantidade desta amostra em uma cápsula de porcelana e adiciona-se água destilada até que se forme uma pasta homogênea, tal que sejam necessários 35 golpes para fechar a ranhura, o tempo de homogeneização deve ser entre 15 a 30 minutos.

Após a amostra descansar, a pasta que é formada é transferida para a concha, moldando-a para que a espessura na parte central seja de 10 milímetros, divide-se então a massa em duas

partes com um cinzel para se abrir uma ranhura em sua parte central. Com a amostra no lugar, recoloca-se a concha no aparelho (Figura 2) para golpeá-la contra a base, deixando-a cair em queda livre, girando a manivela à razão de duas voltas por segundo.

Figura 2: Aparelho de Casagrande.



Fonte: ABNT NBR 6459 (2016).

Ao bater com a concha, deve-se anotar o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de aproximadamente 13 milímetros de comprimento aproximadamente. As operações são repetidas para obter pelo menos mais três pontos de ensaio, dentro de um intervalo de 15 a 35 golpes.

Com os resultados obtidos, constrói-se um gráfico no qual as ordenadas são os números de golpes, e as abscissas são os teores de umidade correspondentes. Ajusta-se uma reta pelos pontos assim obtidos. O limite de liquidez do solo será a reta em que o teor de umidade corresponda a 25 golpes. No caso de impossibilidade da abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes, é considerada a amostra como não apresentando LL.

2.3.2. Método do Cone Sueco

Segundo Couto (2016), Cone Sueco é um método alternativo ainda pouco utilizado no Brasil. Foi desenvolvido em 1914 e 1922 por John Olsson. Este cone consiste em um formato de cone padrão, com ângulo do vértice igual a 30° e peso de 80 g. O cone com abertura de 30° de ângulo é baseado na norma britânica BS1377.

De acordo com essa norma o procedimento de execução é simples, prepara-se a amostra passando o solo por uma peneira (nº40 da série ASTM) e adiciona-se água até que a amostra vire uma pasta homogênea.

Com a amostra devidamente preparada, coloca-se posicionada no aparelho (Figura 3) em uma posição abaixo do cone de metal, que ficará suspenso verticalmente apenas com a ponta do cone tocando a superfície da amostra de solo e que quando liberado cairá livremente pelo seu próprio peso sobre a amostra do solo.

Figura 3: Aparelho cone sueco.



Fonte: Geonor, inc. - Instrumentação de Precisão (2018).

A profundidade final de penetração é medida e então é confeccionado um gráfico com os valores de umidade no eixo das ordenadas, e os valores de penetração em milímetros no eixo das abscissas, ambas em escala aritmética. Para encontrar o valor de teor de limite de liquidez é feito um ajuste linear utilizando o valor correspondente a penetração de 10 mm da ponta na amostra.

Segundo Wasti (1987, apud Souza (2011)) com a introdução de pequenas alterações no aparelho original, novas variantes surgiram em diferentes países. Essas alterações correspondem basicamente no ângulo do cone, peso do conjunto de queda e na definição da profundidade de leitura do LL (Tabela 2).

Tabela 2: Tipos de cone para cada país.

País	Ângulo do cone (°)	Peso do conjunto (g)	Penetração no LL (mm)
Suécia	60	60	10,0
União Soviética (URSS), Bulgária, Iugoslávia, Alemanha de Leste	30	76	10,0
Índia	31	148	25,4
USA	30	75	10,0
França	30	80	17,0
Inglaterra (BS 1377: Parte 2, 1990)	30	80	10,0
Canada (BNQ 2501-092)	60	60	10,0

Fonte: Souza (2011).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 TIPO DE ESTUDO E LOCAL DA PESQUISA

Esta pesquisa tratou-se de um estudo comparativo entre o método tradicional da Concha de Casagrande e o método experimental de penetrômetro, nomeado de Cone Sueco, que utiliza um cone com ângulo do vértice igual a 60° e peso de 60 gramas, porem para este estudo foi utilizado o cone com ângulo do vértice igual a 30° e peso de 80 gramas que é utilizado na Inglaterra com a norma vigente BS 1377: Parte 2.

Esta pesquisa foi realizada através do método qualitativo, que segundo Vergara (2007), visa extrair os pensamentos ditos sobre algum tema, objeto ou conceito e, assim, buscar percepções e entendimento sobre a questão em geral.

Já os ensaios com os corpos de prova foram realizados através do método experimental, que para Miguel (2003), é onde um produto é testado em laboratório para obter todas as informações sobre seus resultados, em geral, mostra o seu desenvolvimento antes mesmo de ser lançado.

Visando a obtenção dos resultados dos diferentes métodos de ensaio para o mesmo resultado, as amostras coletadas foram levadas até os laboratórios do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEf) onde foram submetidas ao ensaio do método do cone sueco seguindo a norma britânica BS 1377: Parte 2 (1990) que consiste na

queda de um cone de massa igual a 80 ± 5 gramas, abertura de ângulo de ponta de $30 \pm 0,1^\circ$ e tempo de penetração igual a 5 ± 1 segundo sobre uma amostra de solo.

3.1.2 Caracterização do subsolo do CEEF

Ambos os métodos foram utilizados para a determinação dos valores de LL do solo onde em seu estudo, Almeida *et al.* (2019) explica que o solo do município é classificado quanto a sua origem como um solo residual proveniente da decomposição de rochas eruptivas (basalto), e possui comportamento laterítico (EMBRAPA, 1984) e que Melfi (1997, apud Almeida (2019)), informa em seu trabalho que os solos lateríticos são os solos típicos da evolução em climas quentes e úmidos e invernos secos, encontrados principalmente em regiões tropicais.

As amostras foram extraídas através de sondagem a trado mecânico, utilizando equipamento do tipo perfuratriz hidráulica sob uma plataforma de caminhão, realizando perfuração de metro em metro até a profundidade de 15 metros do CEEF, localizado atrás do bloco de fisioterapia (Figura 4), no interior do complexo estudantil do Centro Universitário FAG em Cascavel – PR.

Figura 4: Localização do CEEF.

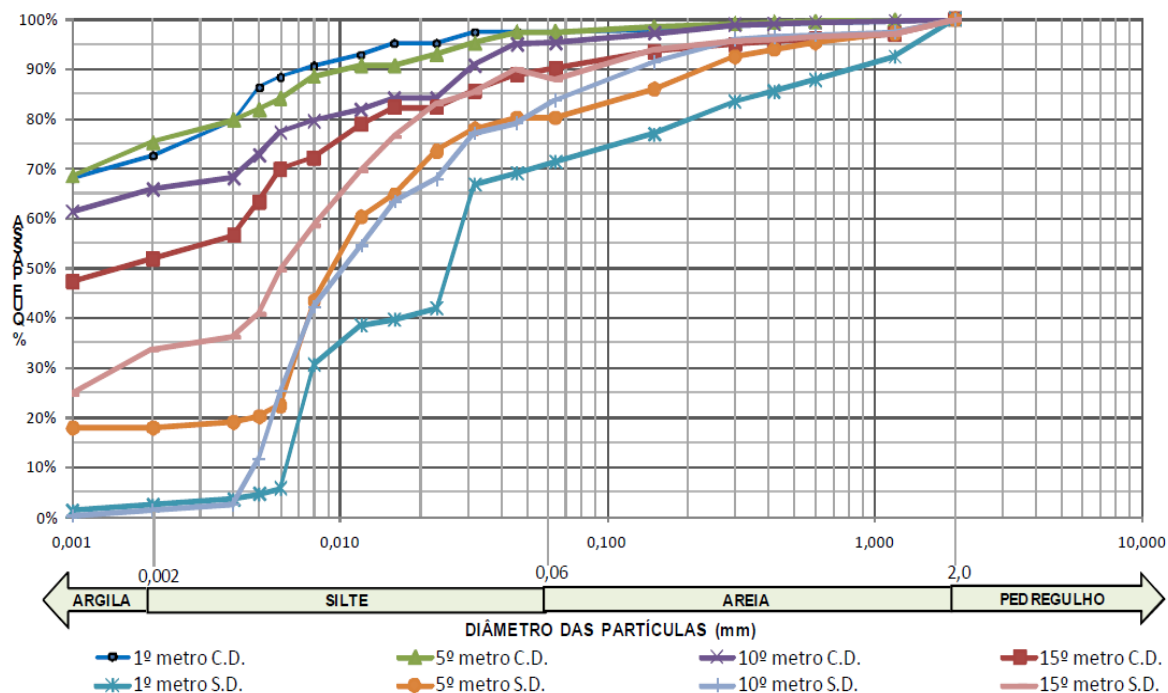


Fonte: Google Maps (2019).

Zen e Almeida (2018) realizaram ensaios de granulometria conjunta metro a metro com o solo do CEEF, onde foi possível verificar que o solo local se trata de uma argila siltosa, laterítica e colapsível, oriunda da decomposição do basalto.

Na Figura 5, as curvas granulométricas de ensaios nas profundidades de 1, 5, 10 e 15 metros são apresentadas em dois ensaios, um com influência de defloculante (CD) e um sem defloculante (SD).

Figura 5: Curvas granulométricas.

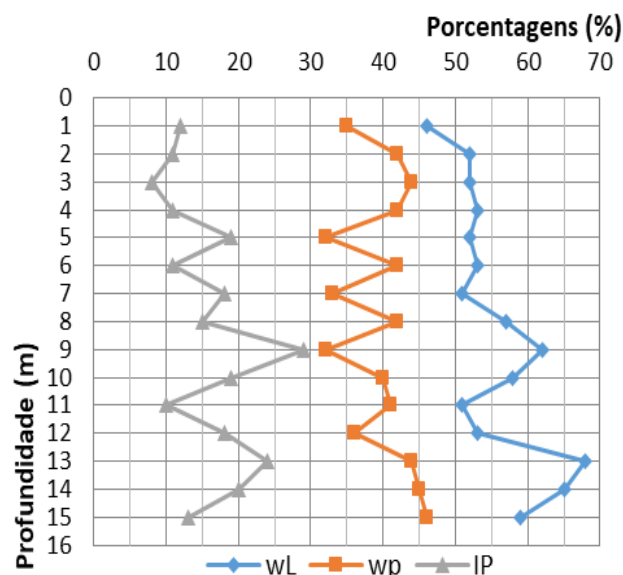


Fonte: Zen e Almeida (2018).

Ao se analisar as curvas granulométricas, foi observado que ocorre uma dispersão das partículas, revelando que o solo analisado contém floculação, comum em grande parte dos solos do tipo laterítico do Brasil.

Zen e Almeida (2018), também realizaram ensaios para a determinação dos índices de limite de liquidez (w_l), limite de plasticidade (w_p) e índice de plasticidade (IP), como mostra a Figura 6.

Figura 6: Índices de consistência do solo do CEEF ao longo da profundidade.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Além disto, também foram determinados os principais índices físicos ao longo da profundidade, sendo identificadas 2 camadas principais ao longo dos 15 metros amostrados, como mostra na Tabela 3.

Tabela 3: Principais índices físicos.

VALORES MÉDIOS	CAMADA 1 1 a 9 metros	CAMADA 2 10 a 15 metros
W (%)	34	53
LL (%)	53	59
LP (%)	38	42
LP (%)	15	17
γ_d	12	12
γ_s	27	27
γ_{sat}	17	16
Sr (%)	55	60
Argila (%)	70	56
Silte (%)	25	35
Areia (%)	5	9
Consistência	Muito mole a média	Rija a dura
Índice de vazios (e)	1,22	1,55

Fonte: Zen e Almeida (2018).

3.2 EQUIPAMENTO PARA TESTE DO CONE

O equipamento utilizado foi desenvolvido em uma tornearia local utilizando como base figuras/imagens relatadas em outros trabalhos e normas. O equipamento consiste em um maciço

de ferro com regulagem de altura e conta com uma chave para ativar/desativar seu magnetismo (ímã interno que sustenta as pontas de teste), que prende as pontas intercambiáveis que permite que outros cones de peso e ângulo de ponta diferentes (especificado por norma) possam ser utilizados no mesmo aparelho para mais testes.

Sua base em aço garante sustentabilidade ao aparelho e serve como base para a colocação da amostra de solo a ser analisada. Na parte inferior a chave, junto ao ímã (interno) que prende as pontas, existe uma régua fixa para medir o quanto o cone penetrou no solo quando desativada seu magnetismo e a ponta for solta. O aparelho pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Equipamento de teste de penetrometro.



Fonte: Autor (2019).

3.2.1 Ensaaios com o cone sueco

Para a realização deste estudo, foram utilizadas as amostras de solo coletadas por Zen e Almeida (2018), que foram coletadas de metro a metro com uma perfuratriz hidráulica sob caminhão até a profundidade de 15 metros. Ao chegar aos 15 metros, o solo apresentou condições saturadas. As amostras retiradas foram armazenadas em sacos plásticos no laboratório de Construção Civil do Centro Universitário Assis Gurgacz.

Os ensaios apresentados foram realizados no campus do Centro Universitário Assis Gurgacz no laboratório de Mecânica dos Solos II. Foi utilizada como referência a norma britânica BS 1377: Parte 2 (1990) que consiste na queda de um cone de massa igual a 80 ± 5 gramas, abertura de ângulo de ponta de $30 \pm 0,1^\circ$ e tempo de penetração igual a 5 ± 1 segundo sobre uma amostra de solo.

Primeiramente, foi realizada a preparação do solo, seguindo a ABNT NBR 6457 (2016), colocando uma porção de solo em estufa com aproximadamente 900g de cada metro ensaiado a 110°C por 16 horas. Após este período na estufa para a secagem, as amostras foram destorroadas com auxílio de um pilão de borracha, mão de gral, um tapete de borracha e cilindro de madeira, pressionando a amostra até conseguir a desagregação dos torrões graúdos.

Na sequência, passou-se cada amostra pela peneira nº40 da série ASTM, do qual foi retirado aproximadamente 400g e misturado com água destilada durante dez minutos com o auxílio de uma espátula para se obter uma pasta homogênea e consistente, conforme Figura 8.

Figura 8: Peneiramento e Pasta homogênea.



Fonte: Autor (2019).

Com a mistura (pasta) homogênea pronta, foi colocada metade da mistura em uma cápsula circular com dimensões de 70 mm de diâmetro x 60 mm de profundidade com auxílio de espátula, (cuidando para não deixar vazios no interior da cápsula) e então alisado a superfície e retirado o excesso do solo. Com o cone fixo na posição inicial, ajustou-se o aparelho para que apenas a ponta do cone tocasse a superfície do solo, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9: Capsula de ensaio e aparelho configurado.



Fonte: Autor (2019).

Depois de configurado, se inicia o teste liberando o cone da posição inicial por aproximadamente cinco segundos, então o cone é travado manualmente para não adentrar mais ao solo e é efetuada a leitura referente à posição final. Assim, a penetração efetiva do solo será a diferença entre a leitura inicial e a leitura final, conforme Figura 10.

Figura 10: leitura inicial e final do teste.



Fonte: Ator (2019).

Após a leitura do resultado, foi retirada uma porção com aproximadamente 20g da área onde o cone penetrou no solo (Figura 11). Este mesmo processo foi repetido por seis vezes com

cada amostra de solo, acrescentando mais água destilada a cada ensaio obtendo valores de penetração diferentes para variados teores de umidade.

Figura 11: Amostra de solo analisada



Fonte: Autor (2019).

Após cada ensaio, foi coletada uma pequena porção de solo do ponto onde ocorreu a penetração, para verificar a umidade do material em estufa. Com as amostras devidamente coletadas (Figura 12), foram colocadas em estufa por 24 horas a 110°C onde cada capsula foi pesada antes e depois da estufa para determinar o teor de umidade para cada ponto.

Figura 12: Amostras de solo coletadas.



Fonte: Autor (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da coleta de amostras deformadas, as quais atingiram 15 metros ao longo da profundidade na região do CEEF, foram realizados ensaios pelo método Cone Sueco utilizando como método de ensaio a norma britânica BS 1377: Parte 2 (1990) que consiste na

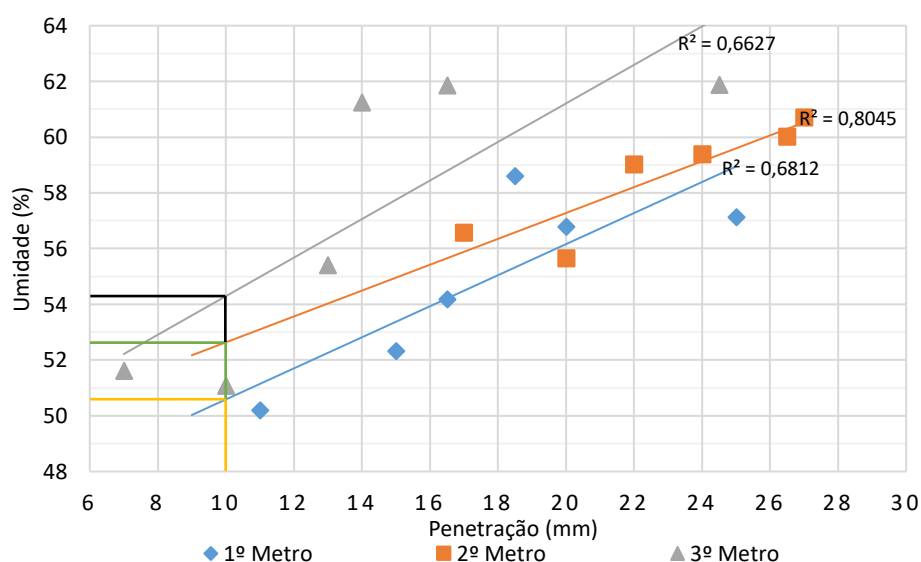
queda de um cone de massa igual a 80 ± 5 gramas, abertura de ângulo de ponta de $30 \pm 0,1^\circ$ e tempo de penetração igual a 5 ± 1 segundo sobre uma amostra de solo a fim de comparar com os resultados já realizados por Zen e Almeida (2018) e verificar sua aplicabilidade no solo do tipo laterítico da região de Cascavel-PR.

4.1 RESULTADOS COM O MÉTODO DO CONE SUECO

Com o equipamento do Cone Sueco, foi possível estabelecer valores de umidade e penetração, podendo consequentemente definir o LL do solo. A primeira tentativa foi traçar uma reta na penetração de 10mm, em que o encontro com a umidade é o valor de LL, apresentados nos gráficos, ambas em escala aritmética.

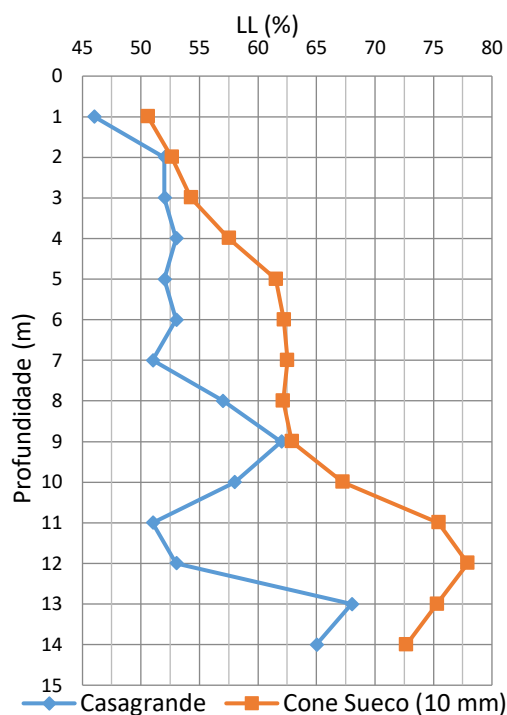
A Figura 13, apresenta os valores do 1º ao 3º metro, onde foram realizados 6 ensaios em cada metro com variações de umidades entre elas, sempre aumentando de um ensaio para o outro. Os valores encontrados para LL pelo método Cone Sueco para 10 mm de penetração foram de 50,59% para o 1º metro; 52,63% para o 2º metro e 54,29% para o 3º metro.

Figura 13: LL do 1º ao 3º metro.



Fonte: Autor (2019).

Os demais valores do 4º ao 14º metro de profundidade para a penetração de 10 mm foram coletados da mesma forma, os resultados de todas as profundidades coletadas foram comparados com os valores de LL obtidos por Zen e Almeida (2018) e podem ser vistos na Figura 14.

Figura 14: Valores correlacionados de LL.

Fonte: Autor (2019).

É possível observar a proximidade dos valores obtidos com a penetração de 10 mm no 2º e 9º metro, a diferença entre os métodos variou 0,64% e 0,91% respectivamente, já entre o 11º metro e o 12º metro, ela oscilou mais, ficando entre o menor 24,43% e o maior 24,93%, o qual pode ser considerado dispersão natural de resultados. Por fim, entre o 13º e o 14º, a diferença voltou a se manter baixa, variação de 7,31% a 7,68%.

Foram coletadas também os resultados em penetração de 5 mm e 15 mm para realização de mais análises, os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de penetração.

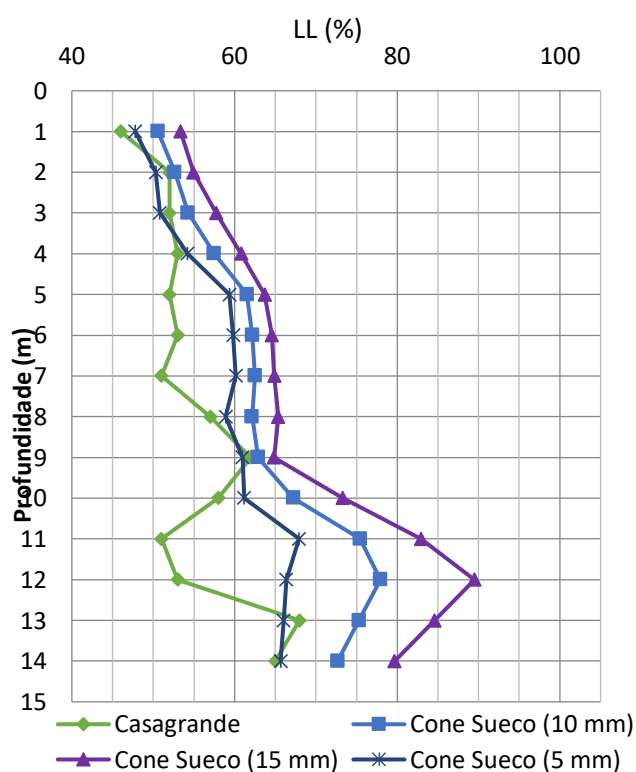
Profundidade (m)	LL (%)		
	5 mm	10 mm	15 mm
1	47,80	50,59	53,37
2	50,31	52,64	54,96
3	50,83	54,29	57,75
4	54,22	57,51	60,81
5	59,37	61,54	63,70
6	59,84	62,21	64,58
7	60,16	62,52	64,89
8	58,93	62,15	65,37

Tabela 4: Resultados de penetração (continuação).

9	60,98	62,91	64,85
10	61,17	67,25	73,32
11	67,93	75,43	82,92
12	66,36	77,93	89,50
13	66,02	75,31	84,59
14	65,68	72,68	79,67

Fonte: Autor (2019)

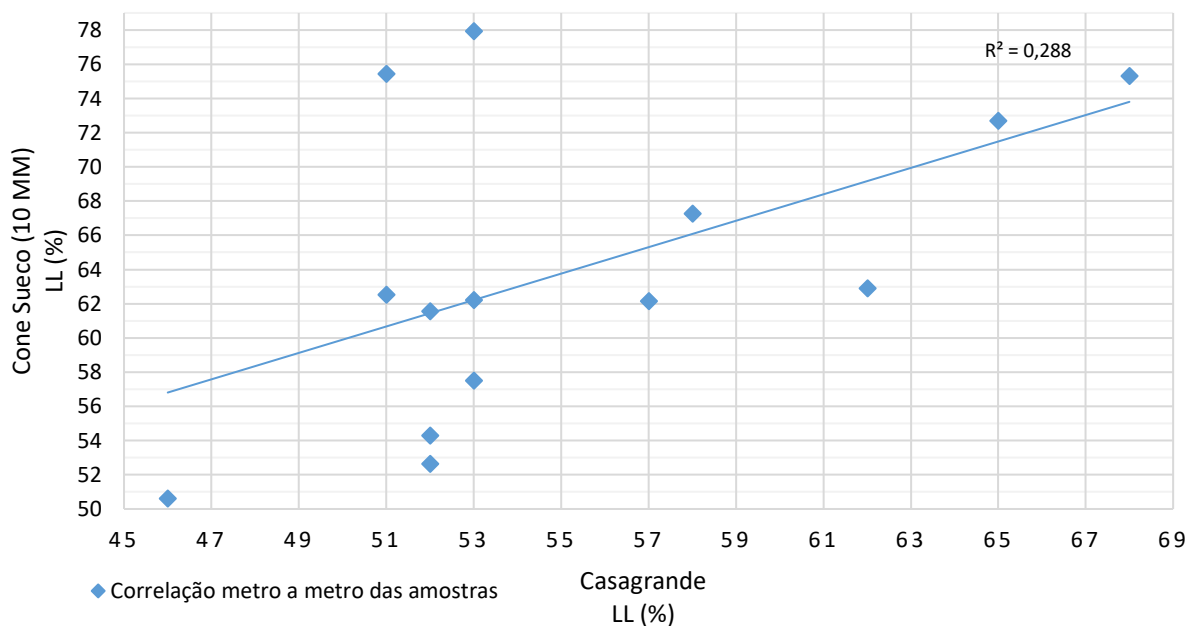
Na Figura 15 apresenta-se os valores correlacionados entre método Casagrande e do Cone Sueco nas penetrações de 5 mm, 10 mm e 15 mm de penetração.

Figura 15: Valores de correlacionados com demais penetrações.

Fonte: Autor (2019).

Para melhor comparação dos dados, foi construído um gráfico em que, no eixo da ordenada, estão os valores de LL por Cone Sueco e, no eixo da abscissa, os valores de Casagrande. Equação que relaciona as duas variáveis e, portanto, indica se a relação entre elas é forte ou não. Essa relação é expressa pelo coeficiente de determinação (R^2), que varia de 0 a 1 e que tendo valores superiores a 0,5 em geral, apresentam boa correlação. Na Figura 16, a correlação entre método Casagrande e Cone Sueco com uma penetração de 10 mm como indica a norma britânica BS 1377: Parte 2 (1990).

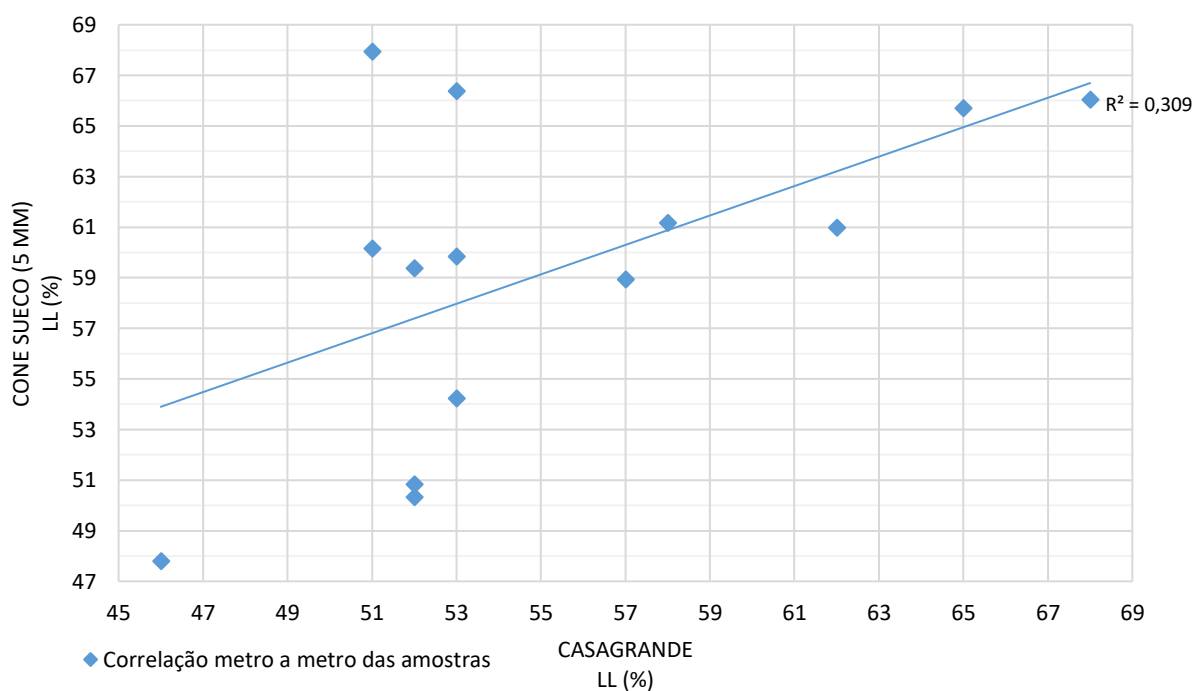
Figura 16: Correlação entre os métodos (10 mm de penetração).



Fonte: Autor (2019).

Em seguida (Figura 17), verificou-se a correlação entre método Casagrande e Cone Sueco com uma penetração de 5 mm, onde a curva de LL foi a mais próxima dos resultados obtidos por Zen e Almeida (2019).

Figura 17: Correlação entre os métodos (5 mm de penetração).



Fonte: Autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo comparar dois métodos de determinação de limite de liquidez, por meio de ensaios realizados em laboratório, a fim de definir os valores de limites de consistência do solo do CEEF e assim, também contribuir com o banco de dados.

O método do cone sueco é mais simples, e a influência do operador e tempo de execução são menores além de evitar alguns inconvenientes gerados pelo aparelho utilizado atualmente denominado como método tradicional da Concha de Casagrande, como a dispersão nos resultados, pequenas diferenças nas aparelhagens, velocidade na rotação, distribuição da amostra na concha, observação do fechamento da ranhura e tempo de homogeneização incorreto.

O ensaio realizado com o método do cone sueco foi realizado seguindo a norma britânica BS 1377: Parte 2 (1990) que consiste na queda de um cone de massa igual a 80 ± 5 gramas, abertura de ângulo de ponta de $30 \pm 0,1^\circ$ e tempo de penetração igual a 5 ± 1 segundo sobre uma amostra de solo. Foram realizados 6 ensaios em cada metro analisado até uma profundidade de 15 metros do CEEF sempre com variações de umidades entre elas, aumentando de um ensaio para o outro.

Quando analisados os valores na penetração de 10 mm, os resultados foram satisfatórios pois o maior intervalo entre os dois métodos foi de 24,93%, podendo ser melhorado com estudos futuros para a sua exatidão.

Já sobre a correlação dos dois métodos, analisando as penetrações de 15 mm os valores ficaram dispersos não sendo segura a sua utilização. Porém quando analisados os valores na penetração de 5 mm, os resultados foram mais satisfatórios, pois o maior intervalo entre os dois métodos foi de 16,93%, podendo ser utilizado com mais confiança do que a penetração de 10 mm como indica a norma britânica BS 1377: Parte 2 (1990).

Uma provável explicação para distorção de resultados entre um método e outro pode ser em relação ao tipo de solo utilizado na confecção das normas e na amostragem utilizada para ensaios. As variações encontradas são pequenas perto da gama de valores obtidos, a diferença de aproximadamente 20% pode ser atribuída a variabilidade natural do solo ou também devido as incertezas na realização dos ensaios do método da concha de Casagrande, que dependem muito do operador e podem apresentar erros de determinação.

Por fim, , para validar as análises e conclusões a respeito do método para o solo da região, são necessários um maior número de ensaios e ser feita a análise da influência da argila

presente no solo, a qual pode interferir nos resultados, cabe a pesquisas como essa, ajudar a comunidade científica a melhorar os processos, de modo a obter resultados mais confiáveis e melhores.

REFERÊNCIAS

Almeida, M. A.; Freitas, R. B.; Wiebbelling V. - **Determinação dos parâmetros do solo laterítico de Cascavel/PR por meio do cone de penetração dinâmica (CPD)**. V. 11, Nº 3, Revista de engenharia e tecnologia, 2019.

Clemente, C. W.; Moncada, M. P. H.; Kormann, A. C. M. - **Determinação do limite de liquidez através do cone sueco**. Minas Gerais, 2016.

Das, B. M. - **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

Gusmão Filho, J. A. - **Solos - Da Formação Geológica Ao Uso Na Engenharia**. 2º ed. Recife – PE: Editora universitária UFPE, 2008.

Pinto, C. S. - **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Pinto, S.; Castro, P.F. - **Determinação do limite de liquidez pelo método do cone de penetração**. DNER, 1971.

Quaresma, A.R.; Décourt, L.; Quaresma Filho, A.R.; Almeida, M.S.S.; Danziger, F. - **Investigações geotécnicas**. In: Hachich, W.; Falconi, F.F.; Saes, J.L.; Frota, R.G.Q.; Carvalho, C.S.; Niyama, S. (Org.). **Fundações: teoria e prática**. 2º ed. São Paulo - SP: PINI, 1998.

Souza, C. M. A.; Leyva, L. Z.; Vieira, R.; Vieira L. B. - **Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias**. Campina Grande - PB: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2000.

Tietz, A. G. - **Determinação de limites de consistência através de cone sueco**. Cascavel – PR, 2018.

Viegas, M. R.; Guedes, S. H. J.; Bastos, C. A. B.; Alves, A. M. L. - **Ensaio de cone de queda livre (fall cone test) na avaliação da resistência não drenada de solos artificiais adensados.** Alegrete - RS: CRICTE, 2014.

Zen, B. A. B.; Almeida, M. A. - **Utilização Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR.** Cascavel-PR, 2018.