



COMPARAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ UTILIZANDO O APARELHO DE CASAGRANDE E O FALL CONE PARA UM SOLO DE FORMAÇÃO BARREIRAS DO CAMPUS DA UFRJ - MACAÉ

Lívia Corrêa Cerbino

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora:

Profa. Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Macaé

Janeiro 2018

COMPARAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ UTILIZANDO O APARELHO DE
CASAGRANDE E DO FALL CONE PARA UM SOLO DE FORMAÇÃO
BARREIRAS DO CAMPUS DA UFRJ - MACAÉ

Livia Corrêa Cerbino

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO –
CAMPUS MACAÉ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof^a. Graziella Maria Faquim Jannuzzi, D.Sc.

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, D.Sc.

Prof^a. Raquel Jahara Lobosco, D.Sc.

MACAÉ – RIO DE JANEIRO, BRASIL

JANEIRO DE 2018

Cerbino, Livia Corrêa

Comparação do limite de liquidez utilizando o aparelho de Casagrande e o Fall Cone / Livia Corrêa Cerbino. – Macaé: UFRJ/ Campus Macaé, 2018.

Orientador: Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Projeto de Graduação – UFRJ/ Campus Macaé / Curso de Engenharia Civil, 2018. Referencias Bibliográficas: p. 82-85.

1. Limite de Liquidez 2. Fall cone. 3. Aparelho de Casagrande. 4. Materiais argilosos. 5. Correlações.

I. . II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho a meus pais, Anderson Luiz Souza Cerbino e Márcia Gomes Corrêa e meu marido Lucas Ferreira Broca, por sempre me apoiarem e serem meu porto seguro. Muito obrigada por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, foste Tu que me ensinaste que nada é impossível e que perante qualquer dificuldade quem acredita no teu amor encontrará o caminho da superação.

A meus pais e minha irmã, pelo amor incondicional, pelo incentivo e estímulo constante, obrigada por serem a minha referência de tantas maneiras e estarem sempre presentes na minha vida de uma forma indispensável.

A meus familiares, especialmente a minhas avós Eny Júlia Gomes Corrêa e Arésia Souza Cerbino (in memoriam), a elas dedico todo meu carinho.

Ao meu marido Lucas, que representa minha segurança em todos os aspectos, meu companheiro incondicional, que me dá total apoio e suporte nos momentos mais difíceis. Obrigada por tudo.

A professora Graziella Maria Faquim Jannuzzi pelo total apoio, confiança, incentivo e orientação. Você foi mais que uma professora, jamais me esquecerei da sua bondade e dedicação. Muito obrigada de coração.

Aos engenheiros e técnicos de Laboratório da UFRJ Macaé, Carlos (Macambira), Luiz e Newton Amorim, muito obrigada por toda ajuda e atenção.

À professora Elisa Rocha pela atenção e ajuda na determinação do teor de matéria orgânica pelo método da mufla.

Ao Laboratório de Ciências Térmicas e Fluidos da UFRJ Macaé pelo empréstimo de equipamentos (mufla) e apoio científico.

Ao doutorando Gustavo Santos Domingos pela ajuda na determinação do G_s .

Ao Luiz Carlos (Carlinhos) pela realização dos ensaios de granulometria com sedimentação.

Ao Professor Fernando Danziger pelo envio de material, atenção e suporte dado à pesquisa.

Ao Laboratório de Ensaio de Campo e Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares da COPPE/UFRJ pelo suporte e apoio científico.

Ao Geólogo Márcio Leão pelo envio de material da Formação Barreiras.

Ao pesquisador Tom Lunne do Instituto Norueguês de Geotecnia pelo material fornecido para a presente pesquisa.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à UFRJ Campus Macaé como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Comparação do Limite de Liquidez utilizando o aparelho de Casagrande e do Fall Cone para um solo de Formação Barreiras do Campus da UFRJ - Macaé

Lívia Corrêa Cerbino

Janeiro, 2018.

Orientadora: Prof^a Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Curso: Engenharia Civil

Os parâmetros índices dos solos, limites de liquidez (w_L) e plasticidade (w_P), são importantes para identificar e classificar os solos argilosos. Os valores de w_L e w_P são conhecidos como Limites de Atterberg. Os ensaios correspondentes representam referência para a engenharia geotécnica e a geologia. A norma brasileira NBR 6459 padroniza o ensaio de limite de liquidez com a utilização do aparelho de Casagrande, no qual o w_L é o teor de umidade, em termos percentuais, correspondente a 25 golpes necessários para fechar uma ranhura de 13mm de comprimento. A desvantagem deste método consiste na forte dependência do operador. Na Europa e na Ásia, o método mais popular empregado para a determinação do limite de liquidez é o Fall Cone (cone de penetração). Existem diferentes variações do equipamento e métodos de ensaio de Fall Cone, que são apresentados no trabalho. Diferentes equipamentos e procedimentos de ensaio conduzem a diferentes determinações de w_L , as diferenças sendo maiores, particularmente, quando comparados os métodos de Casagrande e o método do Fall Cone. O equipamento de Fall Cone utilizado na presente pesquisa é da marca Geonor (cone sueco). Utilizaram-se os procedimentos empregados no NGI (Instituto Norueguês de Geotecnia) para determinação do w_L através do Fall Cone, no qual o cone de massa 60 g com ângulo de 60° cai em queda livre da superfície do solo. O w_L , nesse caso, é o teor de umidade em termos percentuais correspondente à

penetração de 10 mm. Utilizou-se na presente pesquisa um solo da Formação Barreiras do Campus UFRJ-Macaé, tendo sido comparados os valores de w_L através dos métodos de Casagrande e do Fall Cone. Outros ensaios, como por exemplo, granulometria com sedimentação, densidade média dos grãos (G) e teor de matéria orgânica também foram realizados e são apresentados e interpretados no trabalho. Além da comparação mencionada, pretende-se contribuir para aumentar o banco de dados utilizando solos brasileiros no que diz respeito à comparação com os dois métodos de ensaio para determinação do w_L . Pretende-se ainda contribuir para a atualização da norma brasileira NBR 6459, sugerindo-se também o emprego do Fall Cone para a determinação do w_L . Os resultados experimentais obtidos mostram que em média w_L Casagrande = 0,86 w_L Fall Cone, ou seja, o limite de liquidez obtido através do aparelho de Casagrande foi 14% menor do que o obtido através do fall cone para o solo estudado.

Palavras chaves: Limite de Liquidez, Fall Cone, Aparelho de Casagrande, Solo de Formação Barreiras.

Abstract of Undergraduate Project presented to UFRJ Macaé as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Comparison of the Liquidity Limit using the Casagrande apparatus and the Fall Cone for a Barreiras Group's soil located in UFRJ Macaé.

Lívia Corrêa Cerbino

January, 2018.

Advisor: Prof Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Course: Civil Engineering

Soil index parameters, liquidity limits (wL) and plasticity (wP) are important for identifying and classifying clay soils. The values of wL and wP are known as Atterberg Limits. The corresponding tests represent reference for geotechnical engineering and geology. The Brazilian standard NBR 6459 regulates the liquidity limit test with the use of the Casagrande apparatus, in which the wL is the moisture content, in percentage terms, corresponding to 25 strokes required to close a slot 13mm in length. The disadvantage of this method is the strong dependence of the operator. In Europe and Asia, the most popular method used to determine the liquidity limit is the Fall Cone (cone of penetration). There are different variations of the equipment and test methods of Fall Cone, which are presented at work. Different equipment and test procedures lead to different determinations of wL, the differences being greater, particularly when compared to the Casagrande methods and the Fall Cone method. The Fall Cone equipment used in this research is from the Geonor brand (Swedish cone). The procedures used in the NGI (Norwegian Institute of Geotechnics) were used to determine wL through the Fall Cone, in which the cone of mass 60 g with a 60 ° angle falls in free fall of the soil surface. The wL, in this case, is the percentage moisture content corresponding to the penetration of 10 mm. A soil of the Barreiras Group of the UFRJ-Macaé Campus was used in the present research, and the wL values were compared through the Casagrande and Fall Cone methods. Other tests, such as sedimentation granulometry, mean grain density (G) and organic matter content were also performed and presented and interpreted in

the work. In addition to the mentioned comparison, it is intended to contribute to increase the database using Brazilian soils with respect to the comparison with the two test methods for wL determination. It is also intended to contribute to the update of the Brazilian standard NBR 6459, also suggesting the use of Fall Cone for the determination of wL. The experimental results show that on average $wL_{\text{Casagrande}} = 0.86wL_{\text{Fall Cone}}$, that is, the liquidity limit obtained through the apparatus of Casagrande was 14% lower than that obtained through the fall cone for the studied soil.

Keywords: Liquidity Limit, Fall Cone, Casagrande Apparatus, Barreiras Group.

Índice

1. Introdução.....	13
1.1 Generalidades.....	13
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Motivação do trabalho.....	14
1.4 Metodologia.....	15
1.5 Organização do Trabalho.....	15
2. Revisão Bibliográfica.....	16
2.1 Classificação dos Solos.....	16
2.1.1 De acordo com a origem	16
2.1.2 Sistema Unificado de Classificação dos Solos.....	17
2.1.3 Solos orgânicos.....	22
2.2 Aparelho de Casagrande.....	23
2.3 Fall Cone.....	25
2.3.1 Fall cone utilizado na presente pesquisa.....	27
2.4 Propostas existentes de correlações com parâmetros geotécnicos.....	28
3. Campo experimental de Macaé.....	32
3.1 Introdução.....	32
3.2 Campus UFRJ-Macaé	34
4. Realização dos ensaios.....	39
4.1 Introdução.....	39
4.2 Preparação da amostra para o ensaio de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Granulometria com sedimentação.....	40
4.3 Realização dos ensaios de caracterização.....	41
4.3.1 Determinação do Limite de Liquidez através do Aparelho de Casagrande.....	41
4.3.2 Determinação do Limite de Liquidez através do Fall cone.....	45
4.3.3 Determinação do Limite de Plasticidade.....	48
4.3.4 Determinação da Massa Específica.....	49
4.3.5 Análise Granulométrica com sedimentação.....	52
4.3.6 Determinação do teor de Matéria Orgânica.....	54
5. Apresentação e análise dos resultados.....	57

5.1 Umidade Natural.....	57
5.2 Limite de Liquidez através do equipamento de Casagrande e do Fall Cone.....	57
5.3 Limite de Plasticidade.....	66
5.4 Análise Granulométrica.....	68
5.5 Matéria Orgânica.....	73
5.6 Análise conjunta dos resultados.....	73
5.7 Comparação do wL obtido através do Fall Cone e Aparelho de Casagrande no solo da Formação Barreiras da UFRJ Macaé com outros solos.....	78
6. Conclusões e sugestões para pesquisas futuras.....	79
6.1 Conclusões.....	79
6.2 Sugestões para futuras pesquisas.....	81
Referências bibliográficas.....	82
Anexo A – Resultados do Limite de Liquidez através do equipamento de Casagrande e do Fall Cone.....	86

1. Introdução

1.1 Generalidades

De acordo com Das e Sobhan (2014), por volta de 1908, Albert Mauritz Atterberg (1846-1916), químico e cientista de solo sueco, definiu frações de argila como a porcentagem de massa de partículas menores que dois microns. Ele percebeu o papel importante que as partículas de argila representam em um solo e sua plasticidade. Em 1911, Atterberg explicou a consistência de solos coesivos definindo os limites de liquidez, plasticidade e de contração.

Assim, Atterberg empregou os ensaios índices de consistência que foram posteriormente desenvolvidos e padronizados por Arthur Casagrande, auxiliar de Terzaghi. Esses ensaios atualmente são conhecidos como Limites de Atterberg e são ensaios de referências para a engenharia geotécnica e a geologia. Segundo Bicalho et al (2017) que cita Mitchell & Sitar (1982), a partir dos limites pode-se avaliar a melhor técnica construtiva e verificar o melhor tipo de fundação para um empreendimento, evitando prejuízos como percolação de água para alvenaria, recalque diferencial e má drenagem do solo.

Segundo Santos e Martinez (2015), estudos dessa magnitude são importantes para a construção civil, pois é a partir dos dados obtidos acerca dos solos de uma determinada localidade que o projeto estrutural de fundações é elaborado. A avaliação prévia dos solos acarreta em benefícios a curto e longo prazo, para as construções, uma vez que diminuem os riscos provocados pela má distribuição de carga ao longo do terreno.

O ensaio para determinação do Limite de Liquidez adaptado por Casagrande é realizado através de um aparelho que levou o seu nome, a Concha de Casagrande. A norma brasileira NBR 6459 padroniza este ensaio, no qual o w_L é o teor de umidade, em termos percentuais, correspondentes a 25 golpes, necessários para fechar uma ranhura de 13 mm de comprimento, aproximadamente.

John Olsson desenvolveu um novo aparelho para determinação do limite de liquidez com objetivo de aperfeiçoar a metodologia anterior. O Cone de Penetração ou Fall cone foi criado de forma a obter um ensaio mais simples, rápido, menos dependente do operador e com maior precisão.

Vários métodos do Cone de Penetração baseados nos mesmos princípios têm sido desenvolvidos e padronizados em diferentes países, entretanto, no Brasil ainda não existe uma norma para determinação do wL. Na presente pesquisa foi utilizado o Fall Cone sueco, padronizado pela Norma Norueguesa NS8002. Neste ensaio, o wL é definido como o teor de umidade no qual um cone com ângulo de 60° e peso de 60 gf penetra uma profundidade de 10 mm em 5 segundos quando liberado em queda livre a partir da posição de contato com a superfície do solo.

O método pode ser usado para determinar o limite de plasticidade de acordo com a relação conhecida entre o teor de umidade do solo e a profundidade de penetração do cone. Esta relação não é linear, mas torna-se linear em uma escala semi logarítmica procedendo em um método simples de determinação dos limites.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal comparar o limite de liquidez (wL) obtido com o aparelho de Casagrande com o método Fall Cone (Cone de Penetração) utilizando um solo do Campus da UFRJ-Macaé. Além disso, pretende-se contribuir para aumentar o banco de dados utilizando solos brasileiros no que diz respeito à comparação com os dois métodos de ensaio para determinação do wL. Pretende-se ainda contribuir para a atualização da norma brasileira NBR 6459, sugerindo também o emprego do Fall cone para a determinação do wL.

1.3 Motivação do trabalho

Segundo a literatura, uma melhor repetibilidade dos resultados é obtida pelo método do Fall cone, uma vez que o mesmo não é tão dependente do operador quanto o de Casagrande. A comparação entre os dois métodos no solo da UFRJ-Macaé, além da contribuição para o meio científico, motivou o presente trabalho.

1.4 Metodologia

Os ensaios foram realizados com os equipamentos existentes no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRJ-Macaé e no Laboratório de Ensaio de Campo de Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares da COPPE/ UFRJ.

No que concerne ao ensaio limite de liquidez dois equipamentos serão empregados o Fall Cone e o aparelho de Casagrande.

1.5 Organização do Trabalho

Segue-se a esta Introdução o Capítulo 2, que se refere à Revisão Bibliográfica e no qual é realizado um breve histórico do equipamento de Fall Cone, a sua aplicação e as correlações com parâmetros geotécnicos. O Capítulo 3 descreve o campo experimental Campus UFRJ Macaé utilizado na presente pesquisa. O Capítulo 4 diz respeito aos procedimentos empregados para a realização dos ensaios desde a coleta das amostras. A apresentação e a análise dos resultados são apresentadas no Capítulo 5. No Capítulo 6 são feitas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras. Em seguida encontram-se listadas as referências bibliográficas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Classificação dos Solos

O solo se constitui basicamente de um sistema trifásico, formado por mineral e ou matéria orgânica, água e ar.

Segundo Martins (2007), solo é uma porção de fragmentos de minerais (há solos orgânicos) não cimentados (o que os diferencia das rochas é o grau de cimentação) e mal ajustados de variados tamanhos, forma e composição com uma porcentagem apreciável de vazios que se interconectam.

Souza Pinto (2006) menciona que o objetivo da classificação dos solos, é o de estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigações geotécnicas para uma análise adequada de um problema.

Existem diversas formas de classificar os solos (Souza Pinto, 2006): origem, evolução, presença ou não de matéria orgânica, estrutura, preenchimento dos vazios, características dos grãos, que têm como objetivo a definição de grupos que apresentam comportamentos semelhantes sob os aspectos de interesse da engenharia civil. A seguir

2.1.1 Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Segundo Das e Sobhan (2014), a forma original desse sistema foi proposta pelo Prof. Arthur Casagrande em 1942, principalmente para obras de aeroportos e barragem. Segundo este método o solos são classificados de acordo com a curva granulométrica e os Limites de Atterberg.

A norma brasileira que padroniza a análise granulométrica é a NBR 7181/84. A partir do ensaio de granulometria, a curva granulométrica é construída. A Tabela 2.1 ilustra as divisões granulométricas de acordo com norma brasileira NBR 6502/95.

Tabela 2.1 - Frações Granulométricas do solo segundo a NBR 6502/95.

AREIA			SILTE	ARGILA
GROSSA	MÉDIA	FINA		
$2\text{mm} < d < 0,6\text{mm}$	$0,6\text{mm} < d < 0,2\text{mm}$	$0,2\text{ mm} < d < 0,06\text{ mm}$	$0,06\text{ mm} < d < 0,002\text{mm}$	$< 0,002\text{mm}$

Segundo Souza Pinto (2006) os solos são identificados por duas letras sendo a primeira o tipo de solo (pedregulho, areia, silte, argila e orgânico) e a segunda característica (bem ou mal graduado para solos granulares e alta ou baixa compressibilidade para solos finos). A tabela 2.2 a seguir detalha a terminologia utilizada e especifica as letras para o tipo de solo.

Tabela 2.2 - Terminologia do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

TERMINOLOGIA SUCS		
Pedregulho		G
Areia		S
Silte		M
Argila		C
Orgânico		O
Solos Granulares	Bem Graduado	W
	Mal Graduado	P
Solos Finos	Alta Compressibilidade	H
	Baixa Compressibilidade	L
Turfa		Pt

De acordo com a (%) de finos presentes no solo (passante na peneira 200) pode ser classificado como:

- i) solo de granulação grosseira (pedregulho e areia), cuja (%) passante < 50%
- ii) solo de granulação fina (argila, silte e matéria orgânica), cuja (%) passante > 50%

A) Solos de granulação grosseira

Os solos de granulação grosseiras podem ser bem ou mal graduados:

Coefficiente de não uniformidade (CNU) → amplitude do formato dos grãos

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Quanto maior o CNU mais bem graduado é um solo. Segundo Fernandes (2015), CNU maior do que 4 a 6 o solo é bem graduado; caso contrário, o solo é considerado mal graduado.

Coeficiente de Curvatura (CC) identifica o formato da curva e eventuais descontinuidades

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}}$$

Se $1 < CC < 3$ material bem graduado

$CC < 1$ curva é descontínua (faltam grãos de um certo diâmetro)

$CC > 3$ curva tende a ser muito uniforme na sua parte central

B) Granulação Fina

São os silte, argila ou solo orgânico.

Segundo a NBR 6502/95, argila pode ser definida como solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002mm, apresentando coesão e plasticidade. Os minerais constituintes da argila são um complexo grupo de 41 flossilicatos, principalmente de alumínio, magnésio ou ferro e possuem baixa dureza e densidade.

De acordo com o Sousa Pinto (2006), as argilas possuem propriedades físico-químicas bastantes características e se devem ao fato da morfologia dos cristais lamelares e o tamanho das partículas. A propriedade que tem grande influência na plasticidade das argilas é a capacidade de troca de cátions, as argilas interagem com o meio externo atraindo cátions de sais dissolvidos na água e também moléculas de água, isso ocorre devido ao arranjo dos átomos e da natureza da argila que fazem com que as cargas negativas presentes nas faces sejam maiores que as cargas positivas presentes nos bordos. Outras propriedades interessantes são: elevada área superficial se diferenciando dos siltes e areias, viscosidade pois devido a sua forma lamelar, o atrito

interno entre as partículas é quase nulo e a plasticidade, que segundo Bicalho et al. (2017), é a propriedade que faz com que o sistema argila-água se deforme continuamente devido à ação de uma força finita, e quando a força é removida ou reduzida a forma é mantida. Os fatores que influenciam a plasticidade podem ser relacionados ao tipo de argila, tais como, umidade, composição mineralógica, distribuição do tamanho das partículas, tipo de cátion trocável, presença de sais ou matéria orgânica, e ao processo de moldagem da argila.

A classificação não se dá em função das porcentagens as frações granulométricas silte ou argila, pois o que determina o comportamento argiloso do solo não é só o teor de argila, mas também a sua atividade. São os índices de consistência que melhor determinam o comportamento argiloso. Atterberg foi pioneiro nos estudos dos limites de consistência, resultando em parâmetros importantes na caracterização e classificação de solos argilosos.

Assim, de acordo com Das & Sobhan (2014), os limites de Atterberg são definidos como: Limite de Liquidez, que corresponde a umidade de transição entre o estado plástico e o líquido; o Limite de Plasticidade, correspondendo a umidade de transição entre o semi-sólido e o plástico e o Limite de contração, que é a umidade de transição entre o sólido e o semi-sólido. Define-se assim, o Índice de plasticidade, que é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

A partir do estudo de Atterberg, Casagrande (1947) definiu e padronizou o ensaio de determinação do limite de liquidez através de um aparelho desenvolvido por ele, o qual atualmente é bastante difundido. Para determinação do limite de liquidez, nos dias de atuais, há dois tipos de equipamentos, o Fall cone e o equipamento de Casagrande. As suas diferenças, vantagens e desvantagens serão abordadas nos próximos itens.

Segundo Das & Sobhan (2014), Casagrande estudou a relação entre o índice de plasticidade e o limite de liquidez em uma grande variedade de solos naturais, propondo assim o gráfico de plasticidade (Fig. 2.1).

A linha A empírica, característica importante do gráfico e proporcionada pela Equação:

$$IP = 0,73(LL - 20) , \quad (2.1)$$

que separa as argilas inorgânicas dos siltes inorgânicos.

Os valores das argilas inorgânicas permanecem acima da linha A, e os valores dos siltes inorgânicos ficam abaixo desta linha. Os siltes orgânicos são plotados na mesma região que os siltes inorgânicos de compressibilidade mediana. As argilas orgânicas se posicionaram na mesma região dos siltes inorgânicos de alta compressibilidade (abaixo da linha A e w_L maior que 50). O gráfico fornece uma gama de informações importantes que são a base para classificação de solos granulares finos no Sistema Unificado de Classificação do Solo.

Outra característica importante deste gráfico é a linha U, que se encontra acima da linha A. Sua Equação é dada por:

$$IP = 0,9 (LL - 8) \quad (2.2)$$

e corresponde a linha superior de relação do Índice de Plasticidade ao Limite de Liquidez para qualquer solo atualmente conhecido. Quando o Índice de Plasticidade e o Limite de Liquidez colocam o solo acima da linha U, é aconselhável a verificação dos resultados ensaiados. A linha A e U também podem ser correlacionadas para determinação do limite de contração.

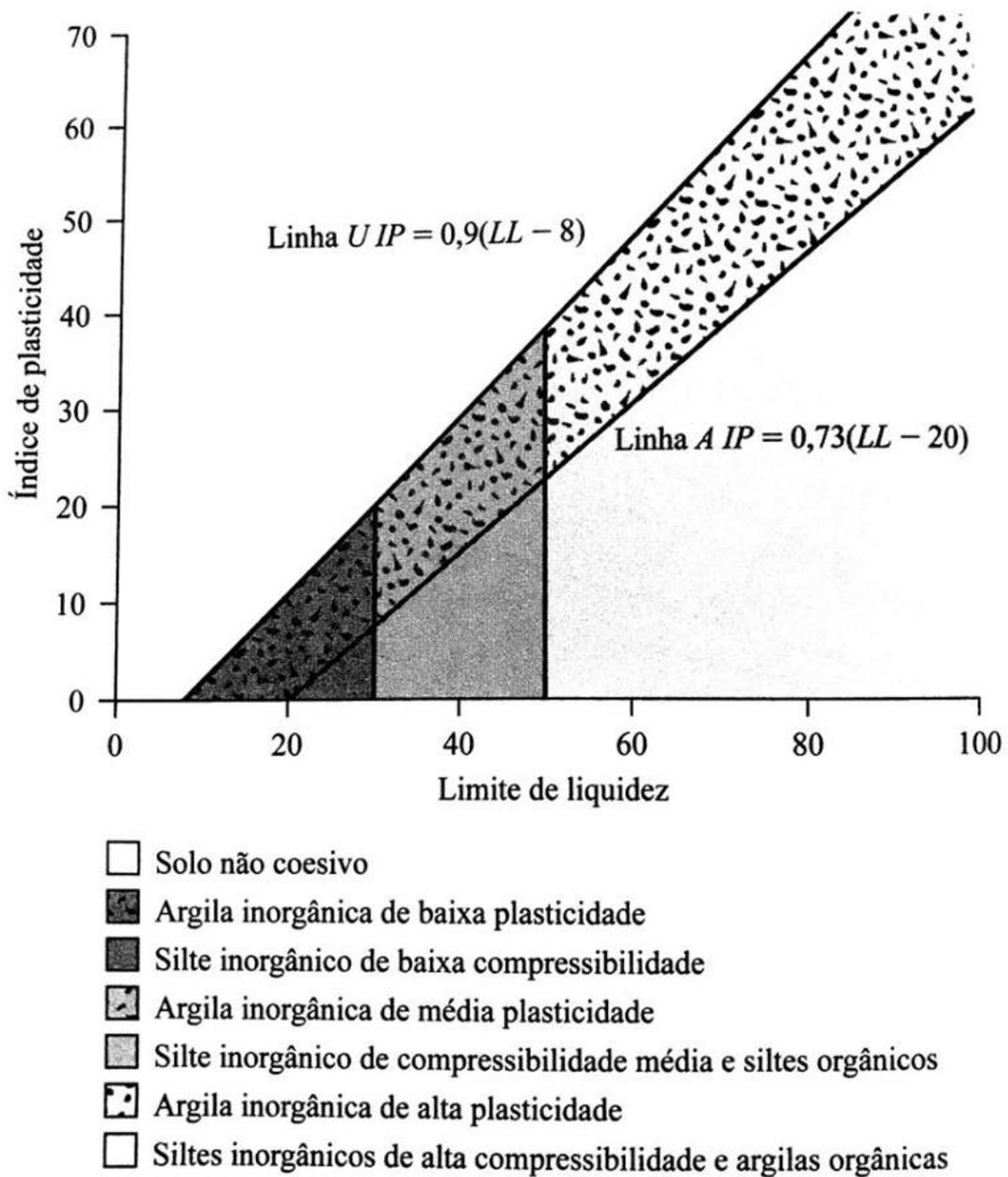


Fig. 2.1 - Gráfico IP x wL. Fonte: Das & Sobhan (2014)

2.1.2 Solos orgânicos

Segundo Souza Pinto (2006) São aqueles que contêm uma quantidade apreciável de matéria orgânica decorrente da decomposição de origem vegetal ou animal, fácil identificação pela cor escura e odor característico. Para depósitos brasileiros, os valores são da ordem de 4% a 20%.

A norma brasileira que regulamento este ensaio é a NBR 13600 (solo – determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C) e define que o teor de matéria orgânica é obtido pela seguinte Equação:

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) 100 \quad (2.3)$$

Onde:

MO=teor de matéria orgânica

A=massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 105°C, em gf.

B=massa da amostra queimada em mufla, à temperatura de (440±5)°C

2.2 Aparelho de Casagrande

A determinação do limite de liquidez pelo método de Casagrande é padronizado e descrito pela NBR 6459. O aparelho, utilizado na presente pesquisa (Fig. 2.2), contém uma concha semiesférica, um cinzel para realizar a ranhura no solo e contador de golpes. Existe também o equipamento manual no qual o operador roda a manivela com uma velocidade padrão de duas voltas por segundo e conta o número de golpes para fechar a ranhura.



Fig. 2.2 - Aparelho de Casagrande utilizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRJ Campus Macaé – marca Matest. Fonte: Autoria Própria.

Como qualquer método experimental, segundo Kestler (1982), o método desenvolvido por Casagrande (1932) possui grandes limitações que podem influenciar nos resultados além disso, depende de vários fatores, como: habilidade e sensibilidade do operador, condições da concha e do cinzel e ainda, solos com baixa plasticidade possuem a tendência de se liquefazer antes de fluir por plasticidade. Outra desvantagem reconhecida pelo próprio Casagrande é o fato de que o ensaio consiste essencialmente em um ensaio dinâmico de cisalhamento.

Segundo Sousa (2011), a limitação que possa causar maior discrepância na determinação do limite de liquidez pelo método de Casagrande é a habilidade do operador, pois a mesma pode variar devido a prática de cada pessoa e a metodologia realizada em laboratórios diferentes.

2.3 Fall cone

Segundo Garneau e LeBihan (1977), o Fall Cone Sueco tem sido amplamente utilizado para determinar a consistência e a resistência das argilas. O método do Fall cone foi desenvolvido por, John Olsson, entre 1914 e 1922, membro da Comissão Geotécnica das Ferrovias do Estado Sueco, com intuito de determinar a consistência das argilas. A consistência foi fornecida em termos de número de resistência, definido como um peso de cone padrão caindo de modo a obter uma penetração de 10mm em uma amostra de argila. A relação entre o número de resistência de uma argila indeformada e o número de resistência de uma argila amolgada foi determinada como a sensibilidade da argila. Mais tarde, os números de resistências foram calibrados para a resistência de cisalhamento não drenada das argilas conforme determinado no ensaio de cisalhamento direto. Um cone padrão, que pesava 60g com um ângulo de 60°, foi adotado e o número de força foi definido como uma função da penetração deste cone padrão. Este cone também foi utilizado na Suécia para determinar um limite de liquidez arbitrário que corresponde ao teor de umidade da argila amolgada que proporciona uma penetração de 10 mm no cone padrão de 60g e 60°.

Segundo Koumoto & Houlsby (2001), o método Fall cone é considerado mais confiável para determinar o limite de liquidez do que o método de Casagrande, e conseqüentemente, é o método mais preferido e padronizado em diversos países.

O ensaio consiste em medir a penetração estática de um cone com peso, tempo e ângulo de queda padronizados. A geometria do cone é descrita por duas variáveis: o ângulo do vértice do cone e a profundidade da penetração. As propriedades do solo são dadas pela resistência cisalhante não drenada e o peso específico.

Campbell (1975) demonstrou que o método do cone de penetração para determinação do limite de liquidez oferece melhorias valiosas em relação ao método de Casagrande, tanto em termos de reprodutibilidade quanto na facilidade de condução do teste. Após a difusão do ensaio para vários países, o aparelho foi sofrendo mudanças e cada país possui o cone de penetração padronizado com peso, tempo de queda e ângulo diferentes.

De acordo com o relatório do NGI (2005), existem vários métodos diferentes para determinar o Limite de Liquidez (wL). As normas são desenvolvidas com base na prática regional e muitas dessas normas permanecem em vigor. A Tabela 2.1 apresenta um

sumário de alguns métodos usados para determinar o limite de liquidez em alguns países. Devido às diferenças nos ensaios, equipamentos e procedimentos de ensaios, diferentes resultados de Limite de Liquidez são encontrados. A principal diferença nos resultados diz respeito ao aparelho de Casagrande e o Fall Cone.

Tabela 2.3 - Diferentes aparelhos Fall cone com propriedades do cone diferentes e sua respectiva norma

País / Norma	Método	Propriedades do Cone		Profundidade da penetração para wL (mm)
		Ângulo (°)	Massa (g)	
EUA ASTM D4318	Casagrande	n/a	n/a	n/a
UK BS1377 -2	Casagrande	n/a	n/a	n/a
UK BS1377 -2	Fall Cone	30	80	20
Noruega NS 8002	Fall Cone	60	60	10
India IS 2720 - Parte 5	Fall Cone	30	80	20
França LCPC	Fall Cone	30	80	17
Rússia GOST 5184	Vasilev Fall Cone	30	76	10
Japão JGS 0142-2000	Fall Cone	60	60	11,5
China SD128-007-84	"Balanced" Fall Cone	30	76	17

Leroueil e Le Bihan (1996) e Farrell et al. (1997) concluíram que o limite de liquidez determinado com o Fall Cone Norueguês/Sueco de 60°- 60gf para uma profundidade de penetração de 10mm é essencialmente igual ao limite de liquidez determinado pelo Fall Cone BS 30°- 80gf para profundidade de penetração de 20mm.

Para a determinação do limite de plasticidade, Scherrer (1961) propôs um método a partir do mesmo aparelho, que envolve a extrapolação de uma relação linear entre o teor de umidade e a penetração na região do limite de liquidez, porém admitiu que o uso de extrapolação pode ocorrer imprecisão no método. Anos mais tarde, Towner (1973) mostrou que embora a relação entre o teor de umidade e a penetração (log) é linear na região do limite de liquidez, torna-se não linear quando o teor de umidade diminui. Logo, o teor de umidade correspondente ao mínimo da curva obtida pelo ensaio do cone de penetração é numericamente menor do que, mas correlaciona-se estreitamente com o limite de plasticidade.

2.3.1 Fall cone utilizado na presente pesquisa

O Fall cone é essencialmente constituído por um suporte ajustável (de modo a colocar o vértice do cone na superfície do solo), medidor de deslocamento para medir a penetração, cones com diferentes ângulos e pesos (10gf-60°, 60gf-60°, 100gf-30°, 400gf-30°), recipiente para colocar o solo (bem como para faceá-lo na parte superior), dispositivo magnético que prende o cone e libera-o para cair em queda livre durante o ensaio. O procedimento do ensaio consiste na queda de um cone de massa m e ângulo α sobre uma amostra de solo. O ensaio deve ser executado mais quatro vezes com diferentes teores de umidade, de forma a traçar um gráfico linear de penetração (mm) versus teor de umidade (%).

O aparelho utilizado é o Fall Cone Sueco, da marca Geonor S/A, padronizado pela Norma Norueguesa NS8002, especifica que o limite de liquidez corresponde ao valor do teor de umidade para uma profundidade de penetração de 10 mm, com cone de 60gf e ângulo de 60°, conforme ilustra a Fig. 2.2.



Fig. 2.3 - Aparelho Fall Cone utilizado no Laboratório de Ensaios de Campo de Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares da COPPE/ UFRJ. Fonte: Autoria Própria.

2.4 Propostas existentes de correlações com parâmetros geotécnicos

Os valores medidos para os limites de liquidez e plasticidade dos solos são amplamente utilizados como parâmetros, que pode ser empiricamente correlacionado contra muitas propriedades do solo no campo geotécnico.

- **Índice de Compressão a partir do Limite de Liquidez**

No passado, várias estimativas empíricas foram feitas da força no limite de liquidez.

Segundo Pinto (2006), uma primeira correlação foi apresentada por Terzaghi, resultante da observação de que solos são tantos mais compressíveis quanto maior for seu wL e estabeleceu a seguinte correlação:

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \quad (2.4)$$

Em que:

wL corresponde ao limite de liquidez;

Cc corresponde ao índice de compressão

- **Resistência ao cisalhamento não drenada com a penetração do Fall Cone**

TERZAGHI (1927) também tentou comparar e relacionar a resistência ao cisalhamento com a penetração do cone. Seus estudos mostraram que para as amostras de mesma densidade e umidade, a profundidade de penetração em amostras indeformadas é menor que para amostras amolgadas.

De acordo com R. Garneau e J.P. LeBihan (1977), a comparação de dados com a penetração do cone de argilas indeformadas e amolgadas indicou claramente algumas relações entre a penetração do cone e o índice de liquidez, a resistência ao cisalhamento não drenada e a relação de compressão.

A partir dos estudos de Hansbo (1957) realizados no SGI (Swedish Geotechnical Institute), a resistência cisalhante não drenada da argila pode ser deduzida do valor de penetração do cone:

$$C = 9,8 K \frac{M}{P^2} \quad (2.5)$$

Em que:

C = corresponde a força de cisalhamento não drenada da argila (kPa)

K = é uma constante que está em função do ângulo do cone de penetração e o grau de amolgamento das argilas

P = é a profundidade de penetração do cone no solo (mm)

M = é a massa correspondente ao cone de penetração (g)

Segundo Koumoto & Houslby (2001), o K teórico padronizado para o Fall Cone Sueco, com 60g, 60° e penetração no wL de 10mm, possui valor de 0,305. Com isso, tem-se

uma força de cisalhamento não drenada no estado do limite de liquidez (teórica) de 1,83 kPa.

O método proposto por Casagrande (1932) adota que cada golpe realizado pela concha de Casagrande possui resistência ao cisalhamento não drenada constante de 0,1 kPa, ou seja, no Limite de Liquidez o valor de su é de 2,5 kPa. Pode-se observar uma diferença considerável entre ambos.

- **Resistência ao cisalhamento não drenada com o wL determinado pelo Fall Cone**

A partir dos estudos das propriedades características das argilas no leste do Canadá de LEROUÉIL et al (1983), que mostraram que a relação entre a Resistência ao cisalhamento não drenada com o Índice de Liquidez, em amostras amolgadas, para valores entre $0,4 \leq IL \leq 3,0$ é expressa na seguinte equação:

$$su = \frac{1}{(IL-0,21)^2} \quad (2.6)$$

- **Limite de Plasticidade determinado através da penetração do Fall Cone**

Atualmente, o wL e o wP são determinados por dois métodos completamente diferentes. Wood & Wroth (1978) tentaram determinar o limite de plasticidade indiretamente através do Fall Cone e segundo eles, a determinação do Limite de Plasticidade através do método Fall cone seria um grande avanço, fazendo com que os dois testes se tornassem mais fáceis, mais úteis e mais significativos mecanicamente.

Os experimentos realizados por Skempton e Northey (1953) mostraram que a resistência cisalhante no limite de liquidez é 100 vezes menor que a no limite de plasticidade.

Segundo Fujikawa & Koumoto (1982), um dos meios para determinação do limite de plasticidade através do aparelho Fall cone, é traçar pontos no diagrama de $(\log w - \log h)$ e realizar a extrapolação à penetração no limite de plasticidade. O valor médio encontrado por eles foi de 1-3 mm para o cone 60g, 60°. Se uma proporção de 100 for

assumida entre os pontos fortes nos limites (como sugerido por Skempton & Northey, (1953) e numerosos autores subsequentes), então uma penetração de cerca de 1 mm (um décimo de $hL=10$ mm) é esperado. Sugere-se, portanto, que o limite de plástico para argilas pode ser definido por extrapolação do $(\log w - \log h)$ ao ponto em que a penetração é um décimo daquele no limite de liquidez. Isso estabelece uma base mecânica firme para a relação entre os dois limites. A clara desvantagem desta abordagem é que envolve a extrapolação.

3. Campo Experimental de Macaé

3.1 Introdução

O campo experimental utilizado nesta pesquisa foi o próprio Campus da UFRJ-Macaé, uma vez que a autora do presente trabalho teve o interesse científico em pesquisar o solo da região em que estudou.

Segundo Porto Júnior (2017), Macaé está localizado na região sudeste do Brasil, no interior do estado do Rio de Janeiro, a uma Latitude S $-22^{\circ}22'33''$ e Longitude W $-41^{\circ}46'30''$ e faz divisa com as cidades de Carapebus, Conceição de Macabu, ao Norte; Rio das Ostras e Casimiro de Abreu, ao Sul; Trajano de Moraes e Nova Friburgo, a Oeste; e com o Oceano Atlântico, a Leste. Ela pertence à região Norte Fluminense, que abrange os municípios de Campos dos Goytacazes, Carapebus, Cardoso Moreira, Conceição de Macabu, Quissamã, São Fidélis, São Francisco de Itabapoana e São João da Barra. O município tem uma área total de 1.216,846 quilômetros quadrados, correspondentes a 12,5% da área da Região Norte Fluminense e está dividida em seis distritos - Sede, Cachoeiros de Macaé, Córrego do Ouro, Glicério, Frade e Sana.

Contando com 23 quilômetros de litoral, o clima é quente e úmido na maior parte do ano, com temperaturas que variam entre 18°C e 30°C , amplitude térmica considerável ocasionada pela troca de ventos entre o litoral e a serra, relativamente próximos. A Fig. 3.1 ilustra o município de Macaé

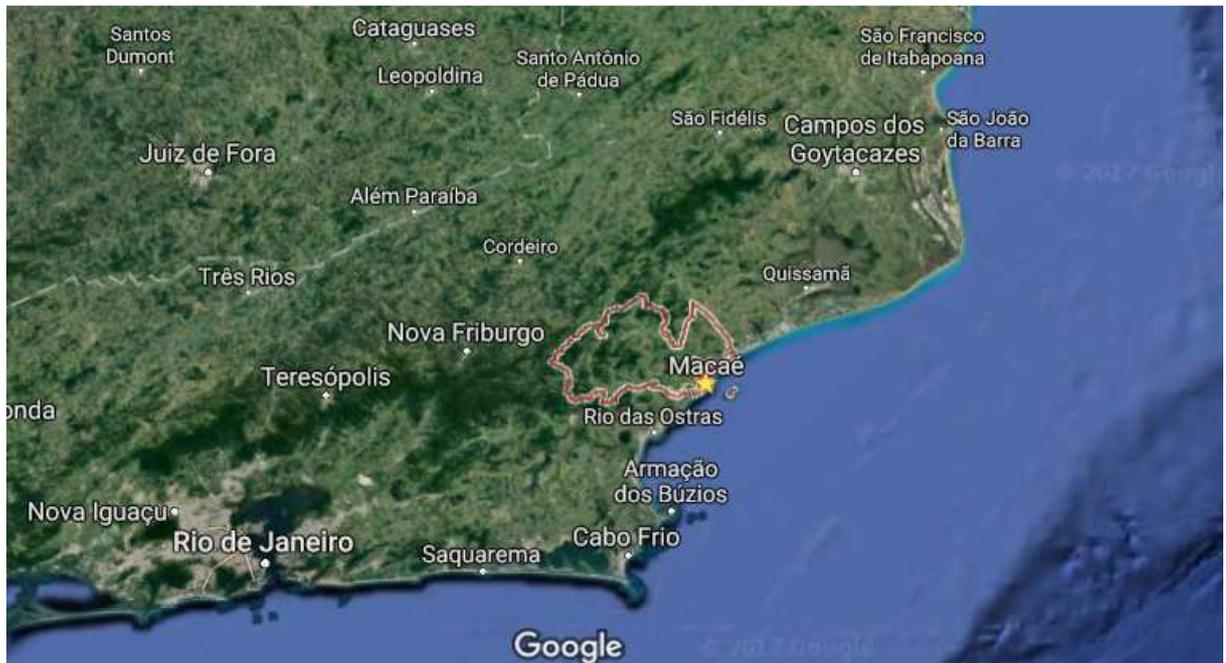


Fig 3.1 - Foto de satélite, localização espacial da cidade de Macaé / Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Google Earth, 2017.

No que diz respeito à formação geológica do local, segundo Moraes et al (2006), que cita Moraes Rêgo (1930 apud Baptista et al., 1984), a denominação “Barreiras” vem sendo utilizada, com significado estratigráfico, desde Moraes Rêgo (1930 apud Baptista et al., 1984), para descrever depósitos arenosos e argilosos, normalmente muito ferruginizados, identificados nos baixos platôs amazônicos e nos tabuleiros da costa do norte, nordeste e leste brasileiro. De acordo com a geologia ainda não se alcançou uma caracterização precisa e amplamente aceita a estes depósitos, embora seja objeto de estudo de vários autores. Existem discordâncias entre a nomenclatura estratigráfica (Grupo ou Formação Barreiras), embora a idade tem sido admitida desde o fim do Mesozóico até o começo do início do Quaternário, sendo reconhecida entre o Mioceno – Plioceno até o Pleistoceno (Brito et al., 1996).

Os estudos de Winter et al. (2007) mostram que na região norte do estado do Rio de Janeiro, a Formação Barreiras está inserida na porção emersa da bacia de Campos, sendo incluída no Grupo Campos e associada a sedimentos de origem fluvial.

Moraes et al. (2006), cita (Silva e Cunha, 2001) em um recente mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro, cujos maiores depósitos da Formação Barreiras no estado

está situado na região da planície costeira do rio Paraíba do Sul, constituindo o limite oeste desta planície, particularmente a norte da foz deste rio. Nesta região, os depósitos da Formação Barreiras abrangem o litoral, onde, por ação direta das ondas, são esculpidas falésias. Esta unidade também incide na região de Quissamã e próximo às cidades de Búzios e Macaé, como pode ser observado na Fig 3.2 que ilustra o mapa geológico desta região, a área em cinza caracteriza o solo em Formação Barreira e o campus da UFRJ Macaé está locado em vermelho.

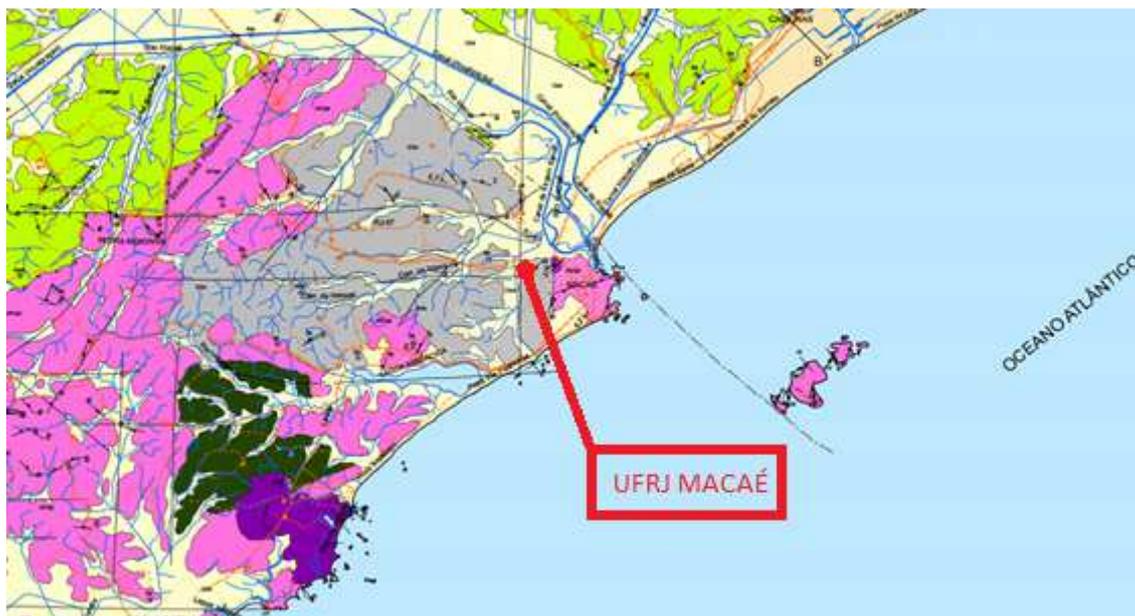


Fig. 3.1.1 – Mapa geológico de Macaé e regiões vizinhas. Fonte: Almeida et al (2012).

Segundo (Shimabukuro & Arai, 2000) a formação do Grupo Barreiras deve-se principalmente acumulação de uma grande quantidade de sedimentos nas áreas hoje emersas do continente, juntamente com o retrabalhamento de sedimentos marinhos, provenientes de variações Eustáticas, com destaque a que foi produzida por um evento erosivo ocorrido no Tortoniano (11,6 – 7,2 Ma).

De acordo com Arai (2006), que separa o Grupo Barreiras em unidades inferior e superior, a deposição do Barreiras ocorreram em diferentes variações Eustáticas.

Ainda segundo Arai (2006), essas deposições foram feitas em extensas áreas principalmente litorâneas que segue atualmente da foz do Amazonas (especificamente no estado do Amapá) ao estado do Rio de Janeiro, onde o baixo topográfico colaborou

para o avanço do Onlap (subida no nível do mar) para dentro do continente, sendo o mesmo erodido frequentemente de acordo com as variações eustáticas na costa.

Esses depósitos foram retrabalhados após o soerguimento pós-neogenico, onde aliado à queda eustática, foi responsável pela atual configuração do Grupo Barreiras (Arai, 2006). A erosão e o retrabalhamento, ocorridos nos períodos de mar baixo (Tortoniano e Pleistoceno), podem ter sido os fatores primordiais que moldaram a morfologia atual da plataforma continental. Arai (2006).

3.2 Campus UFRJ-Macaé

As amostras representativas de solo, utilizadas nos ensaios de determinação dos ensaios da presente pesquisa, foram coletadas de um talude íngreme e com vegetação situado dentro do Campus UFRJ Macaé. O ponto de amostragem está localizado nas coordenadas geográficas 22°23'18.4"S 41°48'24.4"W e possui 17 m de altitude em relação ao nível do mar. Antes da coleta do material, foi aberto o caminho e realizada uma limpeza de superfície para facilitar o acesso.

A Fig. 3.2 mostra a localização espacial da área de coleta das amostras / Estado do Rio de Janeiro e a Fig. 3.3 detalhe da localização da área de coleta das amostras no Campus da UFRJ-Macaé.

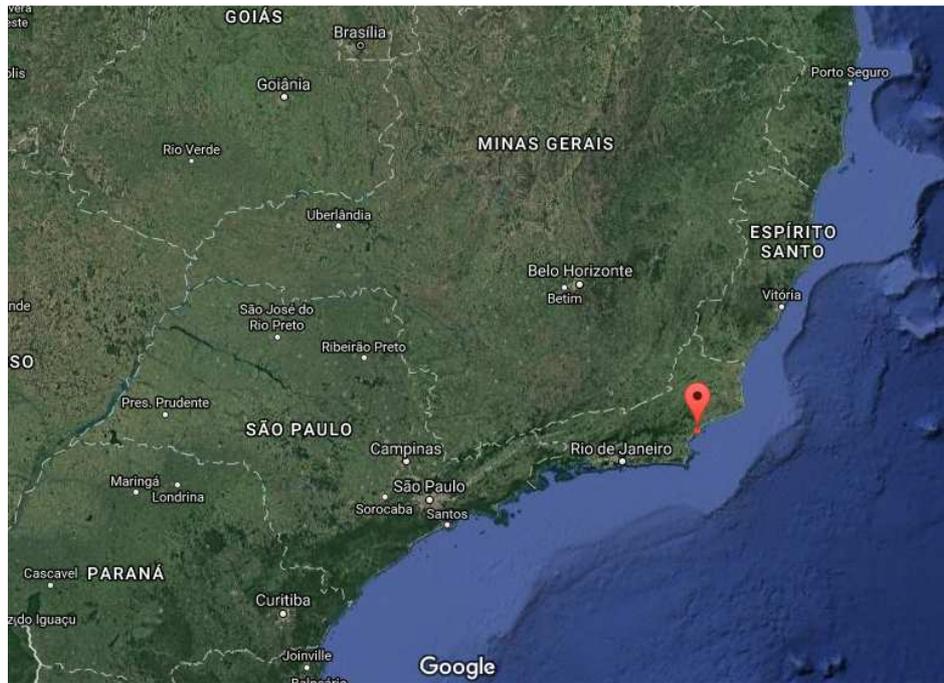


Fig. 3.2 - Foto de satélite, localização espacial da área de coleta das amostras / Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Google Earth, 2017.

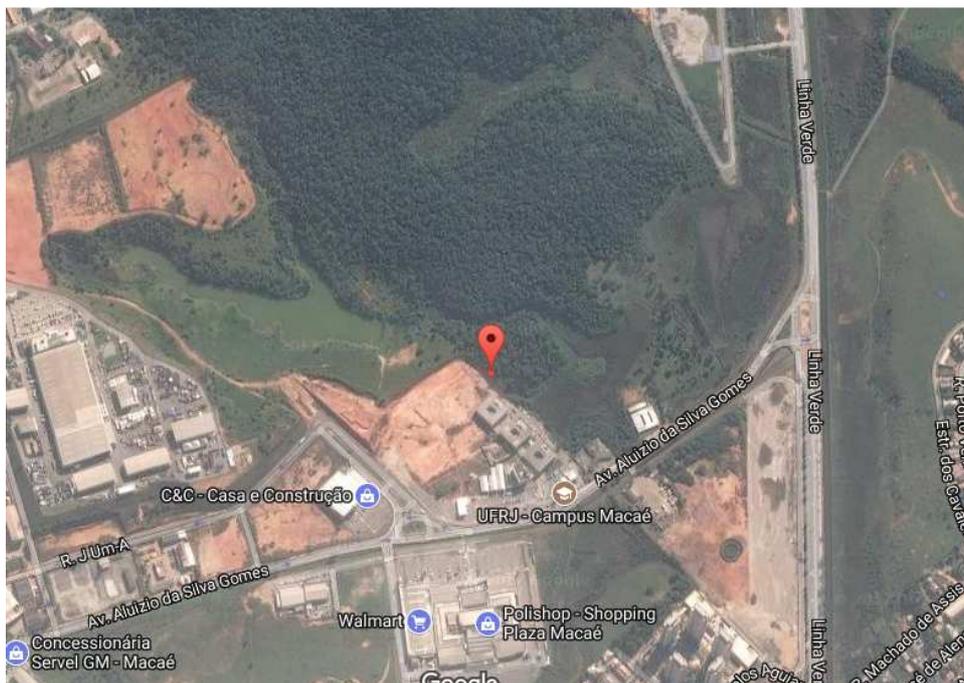


Fig. 3.3 - Foto de satélite, detalhe da localização da área de coleta das amostras / Cidade de Macaé. Fonte: Google Earth, 2017.

A Fig. 3.4 mostra a região onde as amostras foram coletadas.



Fig. 3.4 - Foto do talude situado no Campus UFRJ Macaé onde foi coletado a amostra – Fonte: Autoria Própria

Amostras representativas são amostras amolgadas que contém todos os seus constituintes minerais, porém, no processo de extração, a sua estrutura foi perdida. Para a coleta das amostras representativas, utilizou-se um trado helicoidal e hastas prolongadoras de 1,0 m de comprimento (ver Fig. 3.6). A coleta de solo foi realizada dia 29/06/2017, no primeiro furo obteve-se duas amostras com profundidades de 30 e 45 cm e no segundo furo, amostras com 45 e 70 cm. Foi verificado que cada amostra possui coloração diferente, conforme mostrado na Fig. 3.7.



Fig. 3.5 - Foto da coleta da amostra no Campus UFRJ Macaé – Fonte: Autoria Própria



Fig. 3.6 - Foto das amostras do solo coletado – Fonte: Autoria Própria

4. Realização dos Ensaios

4.1 Introdução

Os ensaios da presente pesquisa foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRJ-Macaé, Laboratório de Ciências Térmicas e Fluidos da UFRJ-Macaé, Laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação Professor Márcio Miranda Soares da COPPE-UFRJ e no Laboratório LC (Luiz Carlos).

A Tabela 4.1 ilustra de uma forma geral os ensaios realizados, a quantidade, a norma brasileira que os padroniza e o laboratório onde foram feitos

Tabela 4.1 - Tabela resumo dos ensaios realizados e sua respectiva norma.

Ensaio	Número de ensaios	Norma brasileira	Laboratório
Umidade natural	4	NBR 6457/1986	Mecânica dos Solos de Macaé
Limite de Liquidez Fall cone	9	NS 8002/1982	Ensaio de Campo e Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares da COPPE-UFRJ
Limite de Liquidez Casagrande	13	NBR 6459/1984	Mecânica dos Solos de Macaé
Limite de Plasticidade	8	NBR 7180/1984	Mecânica dos Solos de Macaé
Gs	4	NBR 6508/1984	Ensaio de Campo e Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares da COPPE-UFRJ
Granulometria com sedimentação	4	NBR 7181/1984	LC
Matéria orgânica	8	NBR 13600/1996	Ciências Térmicas e Fluidos da UFRJ Macaé

4.2 Preparação da amostra para o ensaio de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Granulometria com sedimentação.

As amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457/1986 – Amostras de solo / Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. As operações preliminares foram:

- i) secar a amostra ao ar por aproximadamente 24h, (Fig. 4.1)

- ii) desmanchar os torrões, de modo a não permitir a quebra de grão (Fig. 4.2),
- iii) homogeneizar a amostra.
- iv) Separar 1,5kgf aproximadamente de cada tipo de solo para o ensaio de granulometria com sedimentação e caracterização.



Fig. 4.1 - Preparo da amostra realizando o destorroamento do grão – Fonte: Autoria Própria

4.3 Realização dos ensaios de caracterização

4.3.1 Determinação do Limite de Liquidez através do Aparelho de Casagrande

Para determinação do Limite de Liquidez através do aparelho de Casagrande, foi utilizado o aparelho da marca Matest situada no Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé.

O ensaio foi realizado conforme a Norma Brasileira de Determinação do Limite de Liquidez NBR 6459/84.

De uma forma geral, as etapas para a realização do ensaio de acordo com a norma, foram as seguintes:

- a) Preparar a amostra de acordo com a NBR 6457/1986 – Amostras de solo / Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, com secagem prévia realizada ao ar.
- b) Pegar cerca de 300gf da amostra passante na peneira de 0,42mm e coloca-la na cápsula de porcelana, adicionar água destilada em pequenas porções e com o auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, amassar continuamente e vigorosamente. Essa pasta deve ter uma consistência tal que sejam necessários cerca de 35 golpes para fechar a ranhura. Esse processo de homogeneização não deve ser feito de forma muito rápida, deve-se levar em torno de 15 a 30 minutos, sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos.
- c) Moldar a mistura na concha do aparelho de Casagrande. A espessura na parte central deve ter a mesma altura do gabarito, em torno de 10mm. Realizar a ranhura com o gabarito (cinzel), passando o cinzel através da massa de solo, dividindo em duas. Deslocar o cinzel perpendicularmente à superfície da concha conforme Fig. 4.2.

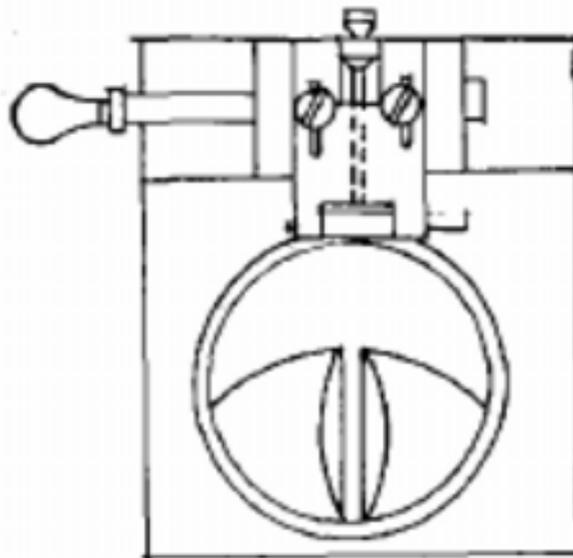


Fig. 4.2 - Aspecto da Ranhura - Fonte: Norma NBR 6459 Figura 4a

- d) Após, ligar o aparelho de Casagrande e a concha do aparelho vai começar a ser golpeada contra a base, caindo em queda livre. Quando observar que as bordas inferiores da ranhura se uniram ao longo de 13mm de comprimento, anotar o número de golpes (Fig 4.3).



Fig 4.3 - Seções – Fonte: NBR 6459 Figura 4b

- e) Retirar uma porção de amostra de junto das bordas que se uniram para determinação da umidade. Pesá-la e o conjunto cápsula mais solo úmido.
- f) Determinar o teor de umidade de acordo com a norma NBR 6457. Levar a amostra para estufa à temperatura de $100^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até a constância de peso.
- g) Limpar a concha e repetir o processo mais quatro vezes, obtendo assim cinco pontos de ensaio, cobrindo o intervalo de 15 a 35 golpes. Importante lembrar que a cada processo feito deverá adicionar um pouco de água destilada à amostra e homogeneizá-la durante 3 minutos amassando e revolvendo vigorosamente e continuamente com auxílio de uma espátula (Fig 4.4)



Fig. 4.4 - Processo de Homogeneização da amostra – Fonte: Autoria Própria.

O resultado é apresentado em escala semi-logarítmica, no qual a ordenada (em escala aritmética) são os teores de umidade e a abcissa (em escala logarítmica) são os números de golpes correspondentes. Traça-se uma reta pelos pontos obtidos e determina-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes que por definição corresponde ao Limite de Liquidez.

4.3.2 Determinação do Limite de Liquidez através do Fall cone

Para determinação do Limite de Liquidez através do Fall cone, foi utilizada o aparelho da marca Geotest S/A. O ensaio foi realizado no Laboratório de ensaios de campo e instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares da COPPE-UFRJ.

Para a realização deste ensaio, uma vez que ainda não existe uma norma brasileira que o padronize, adotou-se a Norma Norueguesa NS 8002 - Ensaios geotécnicos / Métodos de Laboratório que define o Limite de Liquidez como o teor de umidade do solo correspondente a uma penetração de 10mm na amostra. O ensaio deve ser repetido 4 vezes, adicionando a cada repetição, água destilada e homogeneizando a amostra.

Cada repetição será um ponto na curva linear penetração x teor de umidade, após um ajuste da reta linear obtém-se o teor de umidade correspondente à penetração de 10mm que corresponde ao limite de liquidez.

De uma forma geral, as etapas dos ensaios são as seguintes:

- a) Preparar a amostra de acordo com a NBR 6457/1986 – Amostras de solo / Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, com secagem prévia realizada ao ar.
- b) Pegar cerca de 300gf da amostra passante na peneira de 0,42mm e coloca-la na cápsula de porcelana, adicionar água destilada em pequenas porções e com o auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, amassar continuamente e vigorosamente. Esse processo de homogeneização não deve ser feito de forma muito rápida, deve-se levar em torno de 15 a 30 minutos, sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos, conforme mostra a Fig. 4.5.



Fig 4.5: Processo de homogeneização da mistura solo e água – Fonte: Autoria Própria

- c) Moldar uma porção da mistura solo e água na cápsula do aparelho, com auxílio de uma espátula e rasar a superfície do solo para retirar o excesso. Essa etapa

necessita de bastante atenção para não deixar bolhas de ar no interior da mistura pois poderá causar alterações nos resultados.

- d) Posicionar o cone, através do supor móvel, de forma que o mesmo tangencie a superfície do solo sem deixar marcado e efetuar a leitura da posição inicial, conforme ilustra a Fig. 4.6.

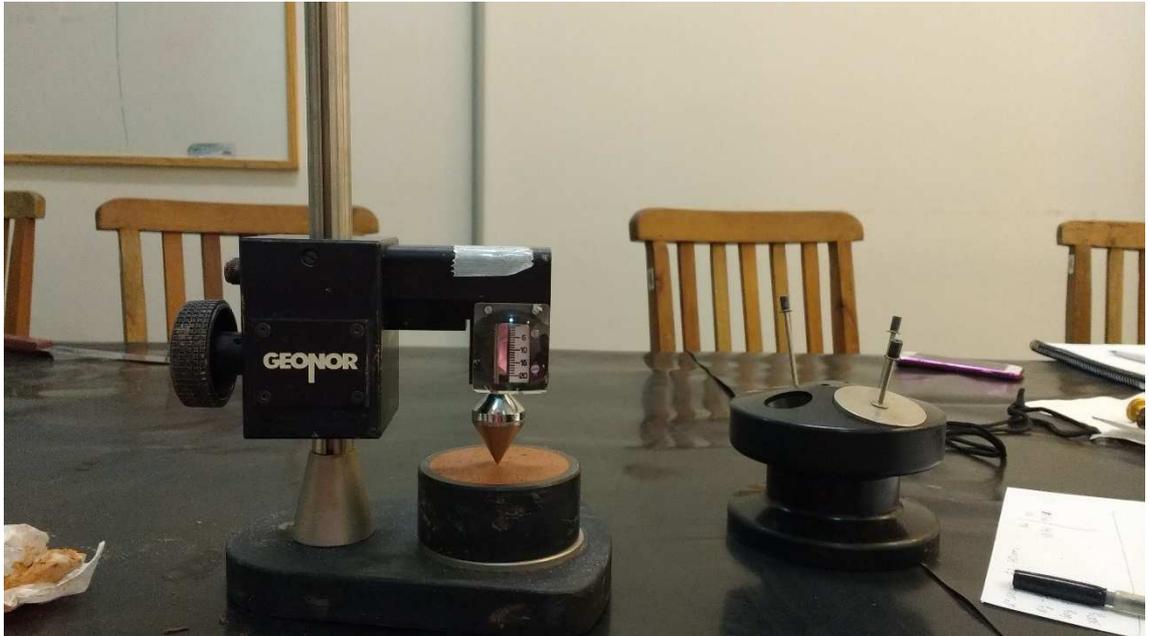


Fig. 4.6 - Cone posicionado tangenciando a superfície da mistura. Fonte: Autoria Própria

- e) Acionar o dispositivo magnético do equipamento para que o cone caia em queda livre penetrando a amostra. A leitura final deve ser realizada em $5 \pm 1s$. Importante não deixar que a ponta do cone choque contra a base da cápsula para não danificar o equipamento. A penetração corresponderá a diferença entre a posição final e inicial.

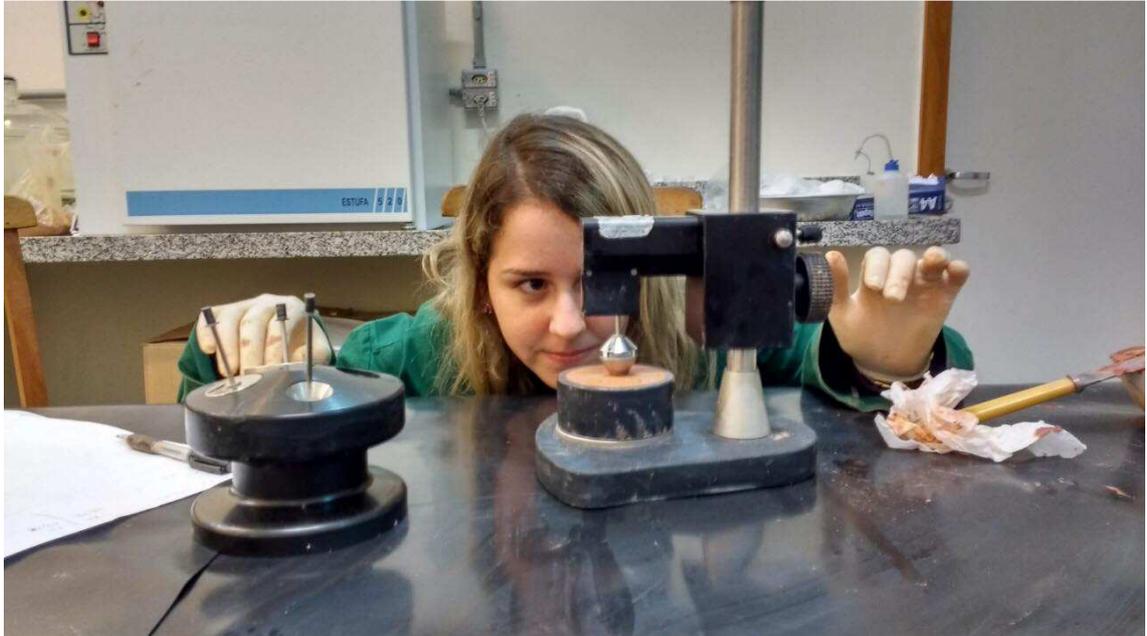


Fig. 4.7 - Leitura final sendo efetuada pelo operador. Fonte: Autoria Própria.

- f) Retirar uma amostra de 10g de onde ocorreu a penetração para determinação do teor de umidade. Pesquisar cada cápsula e o conjunto cápsula mais solo úmido. Levar a amostra para estufa à temperatura de $100^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até a constância de peso.
- g) Limpar o cone e repetir o processo mais três vezes, obtendo assim quatro pontos de ensaio. Importante lembrar que a cada processo refeito deverá adicionar um pouco de água destilada à amostra e homogeneizar.

O resultado é apresentado em escala semi-logarítmica, no qual a ordenada são os teores de umidade (em escala aritmética) e a abcissa (em escala logarítmica) são os valores de penetração correspondentes. Traça-se uma reta pelos pontos obtidos e determina-se o teor de umidade correspondente à penetração de 10mm que corresponde ao Limite de Liquidez.

4.3.3 Determinação do Limite de Plasticidade

- a) Preparar a amostra de acordo com a NBR 6457/1986 – Amostras de solo / Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, com secagem prévia realizada ao ar.

- b) Pegar cerca de 200gf da amostra passante na peneira de 0,42mm e colocá-la na cápsula de porcelana, adicionar água destilada em pequenas porções e com o auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, amassar continuamente e vigorosamente. Esse processo de homogeneização não deve ser feito de forma muito rápida, deve-se levar em torno de 15 a 30 minutos, sendo o maior intervalo de tempo para solos mais argilosos.
- c) Retirar cerca de 10g da amostra e formar uma pequena bolinha, que deverá ser rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar a forma de cilindro padrão de 3mm de diâmetro e 10mm de comprimento.
- d) Se a amostra se fragmentar antes de ficar do tamanho do gabarito, deve-se adicionar mais água, homogeneizar e repetir o processo. Se atingir o diâmetro de 3mm sem se fragmentar, deve amassar o material e repetir o processo na placa de vidro. Após o procedimento acima, as amostras deverão ser pesadas e levadas para estufa para determinação da umidade.
- e) Repetir o processo de modo a se determinar pelo menos 4 valores de teores de umidade no limite de plasticidade.
- f) Considerar satisfatório os valores de teores de umidade quando, pelo menos três deles, não diferirem da respectiva média de mais ou menos 5% da média.



Fig. 4.8 - Amostra fragmentada no tamanho do gabarito. Fonte: Autoria Própria.

4.3.4 Determinação da Massa Específica

A norma brasileira que padroniza este ensaio é a NBR 6508/1984 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Ela prescreve o método por meio de picnômetro, através de pelo menos dois ensaios.

- a) Tomar cerca de 250gf da amostra preparada de acordo com a NBR 6457/1986 – Amostras de solo / Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, com secagem prévia realizada ao ar.
- b) Homogeneizar e pesar a amostra, de modo que a massa seca esteja em torno de 50gf para solos argilosos e siltosos e 60gf para solos arenosos (se o picnômetro utilizado for de 500 cm³, se for de 1000 cm³ deverá dobrar as quantidades), anotar o peso.
- c) Levar a amostra para um bécker com água destilada em quantidade suficiente para completa imersão do material, por no mínimo 12h. Com o restante da amostra efetuar a determinação da umidade.



Fig. 4.9 - Amostra no Beckér. Fonte: Autoria Própria.

- d) Transferir a amostra para o copo de dispersão, lavando-se com água destilada e retirando completamente a amostra do bécker. Acrescentar água destilada até metade do volume do copo e dispersar por 15 minutos.
- e) Transferir a amostra para o picnômetro com auxílio do funil de vidro, evitando a perda do material. Adicionar água destilada até cerca de metade do volume do picnômetro, efetuar vácuo de, no mínimo, 88 kPa, durante 15 minutos, agitando o picnômetro em intervalos regulares de tempo. Acrescentar água destilada até

cerca de 1 cm abaixo da base do gargalo e repetir o vácuo durante o mesmo tempo. Caso não obtenha remoção total do ar aderente as partículas de determinados tipos de solo, deve-se realizar o banho maria durante 30 minutos, no mínimo, adicionando-se água destilada.



Fig. 4.10 – Amostra no banho maria. Fonte: Autoria Própria.

- f) Adicionar água destilada até 1cm abaixo da marca de calibração do picnômetro e deixa-lo em repouso até chegar na temperatura ambiente. Utilizar o conta-gotas para adicionar água destilada até que a base do menisco coincida com a marca da referência.
- g) Enxugar a parte externa e a parte acima do menisco interna. Pesar o picnômetro com solo e água e anotar como M2. Determinar, com resolução de 0,1°C, a temperatura T do picnômetro. Feito isso, obter na curva de calibração correspondente, a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência e anotar como M3.
- h) Calcular a massa específica dos grãos do solo utilizando a Equação abaixo:

$$\delta = \frac{M1 \frac{100}{(100+h)}}{\left[M1 \frac{100}{(100+h)} \right] + M3 - M2} \delta T \quad (4.1)$$

Em que:

$\bar{\delta}$ = massa específica dos grãos do solo, em g/cm³

M1 = massa do solo úmido

M2 = massa do conjunto picnomêtro + solo + água, na temperatura T do ensaio

M3 = massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, na temperatura T do ensaio.

h = umidade inicial da amostra

$\bar{\delta}$ = massa específica da água, na temperatura T de ensaio, obtida na tabela em anexo da NBR 6508/1984 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica.

O peso específico relativo, G_s , segundo Das e Sobhan (2014) é definido como a razão entre o peso específico do solo sobre o peso específico da água. Assim, a fórmula para o G_s corresponde a:

$$G_s = \frac{M1 \frac{100}{(100+h)}}{\left[M1 \frac{100}{(100+h)} \right] + M3 - M2} \quad (4.2)$$

4.3.5 Análise Granulométrica com Sedimentação

A norma brasileira que padroniza este ensaio é a NBR 7181/1984 - Análise Granulométrica – Método de Ensaio. De acordo com a norma, este ensaio é realizado em três etapas: peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino.

1) PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

- i) Preparar a amostra de acordo com a NBR 6457/1986 – Amostras de solo / Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, com secagem prévia realizada ao ar.
- j) Quartear a amostra recolhendo 1,5kgf de material. Pesar a amostra e anotar como peso da amostra seca ao ar.
- k) Passar a amostra na peneira de 2 mm, se houver torrões retidos, destorroa-los e passar novamente na peneira.
- l) Coletar cerca de 50gf da amostra e determinar a umidade higroscópica.

2) PENEIRAMENTO GROSSO:

- a) Lavar o material retido na peneira de 2,0 mm e levar a estufa a 105°C +- 5°C.
- b) Secar o material até a constância de peso.
- c) Pesar o material seco.
- c) Realizar o peneiramento grosso passando o material seco nas seguintes peneiras: 50-38-25-19-9,5-4,8-2,0.
- d) Anotar os pesos acumulados em cada peneira.

3) SEDIMENTAÇÃO

- a) Coletar cerca de 70gf do material passante na peneira de 2,0 mm (no caso de materiais siltosos e argilosos),
- b) Transferir o material para um béquer com 250 ml e colocar 125 ml de defloculante (hexametáfosfato de sódio – 45,7g/L), agitar para homogeneizar a solução e deixar em repouso por no mínimo 12h.
- c) Transferir a mistura para o copo de dispersão e adicionar água até que a mistura fique a 5cm da borda do copo. Ligar o dispersor e deixar por 15 minutos.
- d) Transferir a mistura para a proveta e adicionar água até atingir 1000ml.
- e) Levar a proveta no banho com temperatura constante.
- f) Quando a suspensão chegar na temperatura de equilíbrio, retirar a proveta, tampar a boca com uma das mãos e realizar movimentos enérgicos de rotação. Feito isso, colocar a proveta na bancada, ligar o cronometro e mergulhar o densímetro na proveta. Realizar as leituras do densímetro correspondentes aos intervalos de tempo de 30s, 1 e 2 minutos. Retirar o densímetro e repetir quantas vezes forem necessárias de modo a conseguir leituras bem próximas.
- g) Retirar o densímetro, anotar a hora exata do inicio da sedimentação e a partir desta hora repetir o ensaio e fazer leituras para 5, 10, 20, 40, 80, 240 e 1440 minutos. Para cada leitura, anotar a temperatura.

4) PENEIRAMENTO FINO

- a) Terminada a sedimentação, levar a suspensão para peneira de 0,074mm e lavar

cuidadosamente.

b) Após a lavagem em água limpa corrente, colocar o material retido na estufa a uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

c) Após a secagem e verificação da constância de peso, pesar o material seco.

d) Realizar o peneiramento fino passando a amostra seca nas seguintes peneiras: 0,84-0,59-0,42-0,25-0,15-0,074mm.

e) Anotar os pesos acumulados em cada peneira.

4.3.6 Determinação do teor de Matéria Orgânica

a) Realizar o quarteamento da amostra e retirar cerca de 100g de material.

b) Pesar cada cadinho de porcelana vedado com papel-alumínio.

c) Colocar cerca de 50g da amostra no cadinho de porcelana, de modo que a espessura não exceda 3 centímetros do bordo.

d) Levar o cadinho para a estufa, sem papel alumínio, a uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até a constância de peso, permanecendo no mínimo 24h.

e) Após a verificação da constância de peso, vedar com o papel alumínio e levar o cadinho para o dessecador até atingir a temperatura ambiente.

f) Pesar e anotar o peso do material seco.

g) Remover o papel alumínio e colocar o cadinho na mufla. Aumentar a temperatura gradativamente até 440°C com tolerância de 5°C . Deixar o cadinho na mufla até, queima total, obter constância de peso. O tempo necessário para a constância de peso é da ordem de 12 horas. (Fig 4.9 e Fig. 4.10)



Fig 4.11 - Execução do ensaio de determinação do teor de orgânica – cadinhos organizados na mufla. Fonte: Autoria Própria.



Fig. 4.12 - Execução do ensaio de determinação do teor de orgânica – retirada dos cadinhos da mufla após o tempo estabelecido na norma. Fonte: Autoria Própria.

- h) Retirar os cadinhos da mufla, vedá-los com o papel alumínio, coloca-los no dessecador até atingirem a temperatura ambiente.
- i) Pesá-los na balança de precisão

5. Apresentação e Análise dos resultados

5.1 Umidade Natural

Após a coleta das amostras representativas, efetuou-se a determinação do teor de umidade natural de acordo com a norma brasileira NBR 6457/1986 – Amostras de solo / Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Para cada profundidade foram realizadas três determinações de teor de umidade. Adotou-se como w_n (teor de umidade natural) a média entre as três determinações que não diferente de 5% da média. Na Tabela 5.1 ilustra o valor de w_n para cada profundidade.

Tabela 5.1: Umidade Natural das amostras coletadas no campus

UMIDADE NATURAL (%)	
SOLOS	Umidade Média (%)
Vertical 1 - 30 cm	11,9
Vertical 1 - 45 cm	14,2
Vertical 2 - 45 cm	17,1
Vertical 2 - 70 cm	16,1

5.2 Limite de Liquidez através do equipamento de Casagrande e do Fall Cone

O Limite de Liquidez, através do método Fall Cone e Casagrande, foram determinados através de acordo com a norma norueguesa (NS 8002/1982) e brasileira (NBR 6459/1984), respectivamente.

Para cada teor de umidade foram realizados dois ensaios, e, em geral, os dois deram o mesmo resultado, o que comprova ainda a excelente repetibilidade deste ensaio.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo do número de ensaios realizados para determinar Limite de Liquidez pelo equipamento de Casagrande e do Fall Cone.

Tabela 5.2 - Tabela resumo do número de ensaios para determinação do Limite de Liquidez pelo método de Casagrande e do Fall Cone.

Furo	Profundidade (m)	Números de Ensaios – wL	
		Fall Cone	Casagrande
1	30	2	3
	45	2	3
2	45	3	3
	70	2	4

Os resultados obtidos do Limite de Liquidez através do equipamento de Casagrande e do Fall Cone são apresentados de acordo com cada vertical e profundidade ensaiada. Optou-se por apresentar os resultados de wL (através do equipamento de Casagrande e do Fall Cone) junto com o intuito de facilitar a visualização dos resultados através dos dois métodos. Serão apresentados de cada método para cada vertical e profundidade ensaiada. Os demais resultados encontram-se no anexo A.

A Figura 5.1 ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez (wL) através do equipamento de Casagrande para a vertical 1, profundidade de 0,30m. Já a Figura 5.2 ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez (wL) através do Fall Cone para a vertical 1, profundidade de 0,30m

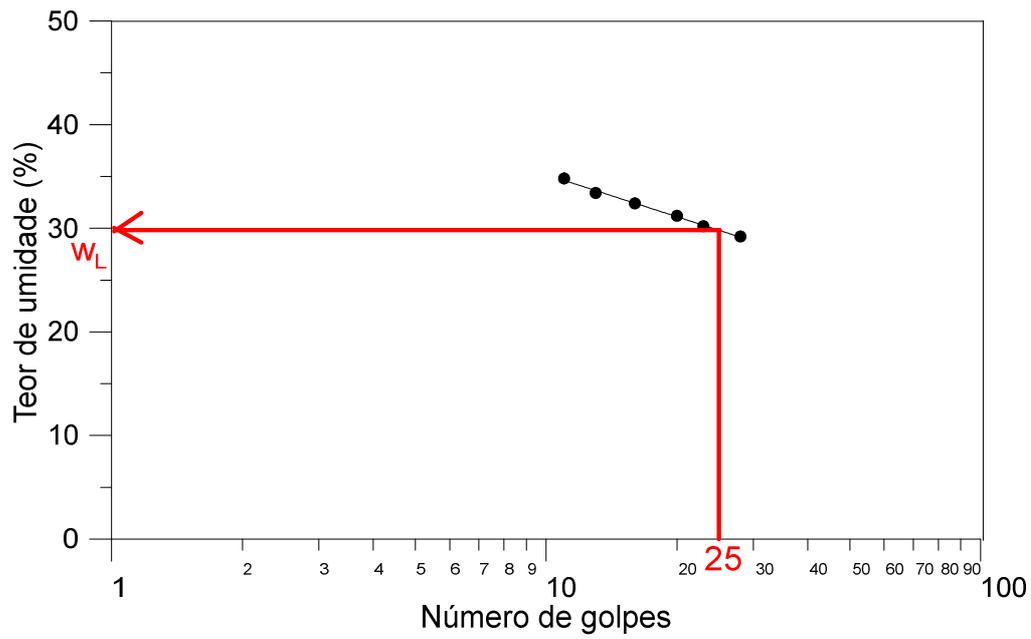


Fig. 5.1 - Resultado de ensaio de wL através do aparelho de Casagrande – Vertical 1 (0,30m)

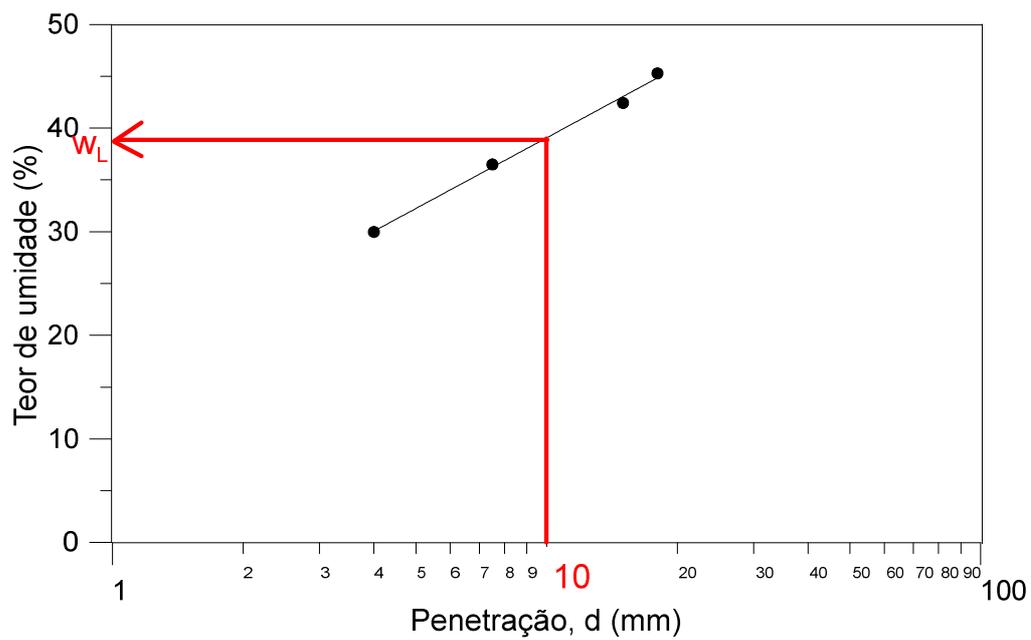


Fig. 5.2 - Resultado de ensaio de wL através do aparelho de Fall Cone – Vertical 1 (0,30m)

A Figura 5.3 ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez (wL) através do equipamento de Casagrande para a vertical 1, profundidade de 0,45m. Já a Figura 5.4

ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez (wL) através do Fall Cone para a vertical 1, profundidade de 0,45m

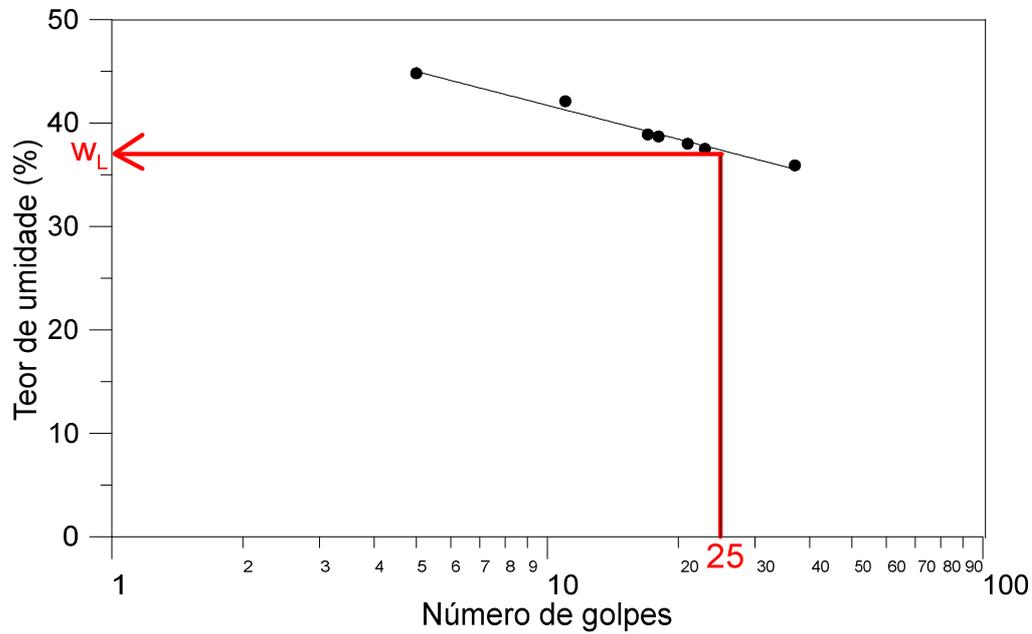


Fig. 5.3 - Resultado do ensaio de wL através do aparelho de Casagrande – Vertical 1 (0,45m)

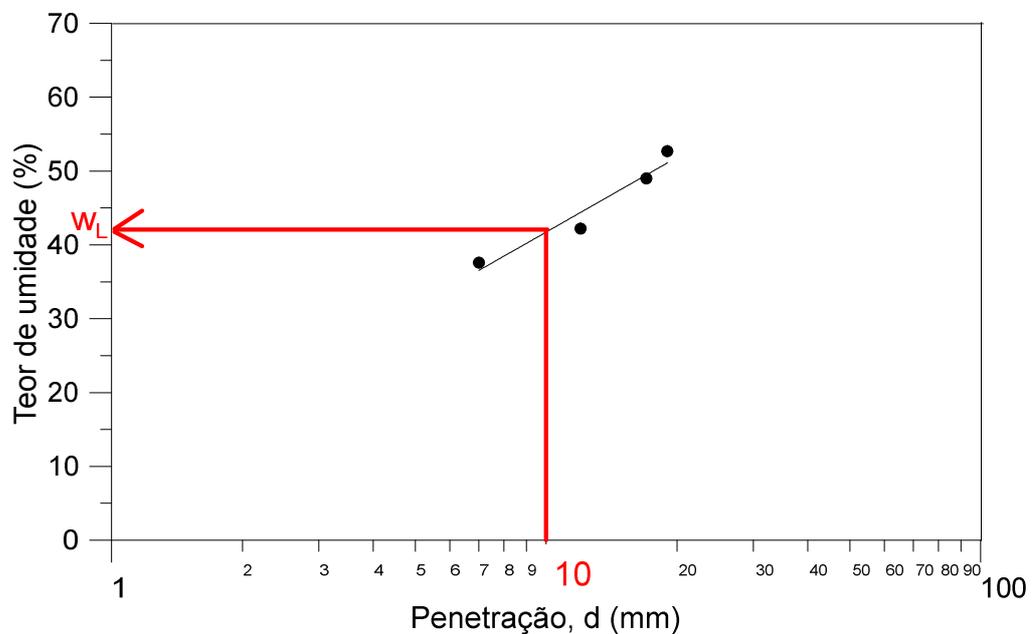


Fig. 5.4 - Resultado do ensaio de wL através do aparelho de Fall Cone – Vertical 1 (0,45m)

A Figura 5.5 ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez através do equipamento de Casagrande para a vertical 2, profundidade de 0,45m. Já a Figura 5.6 ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez (wL) através do Fall Cone para a vertical 2, profundidade de 0,45m.

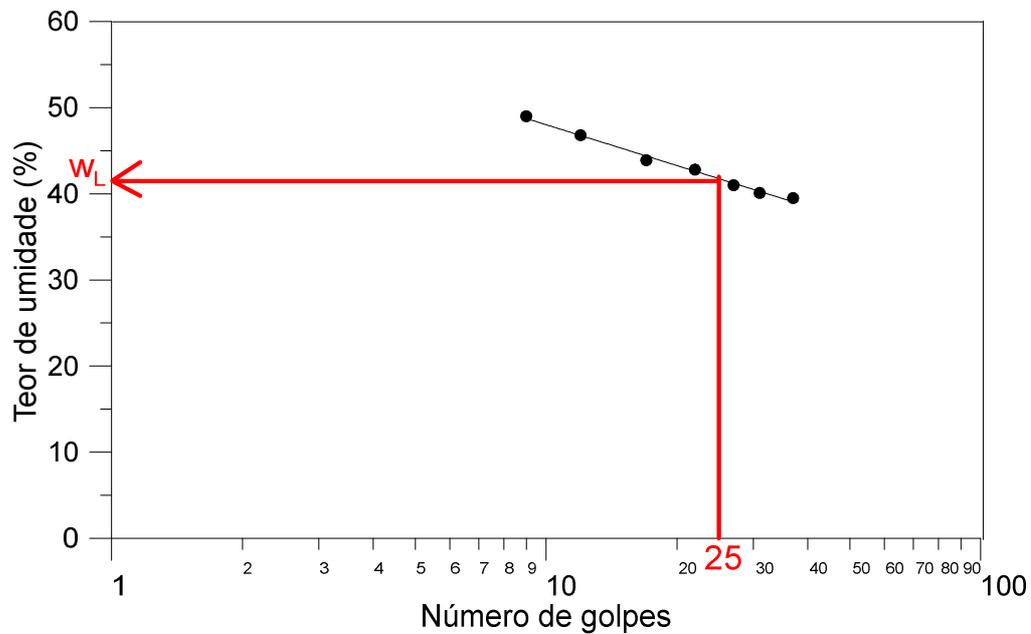


Fig. 5.5 - Resultado do ensaio de wL através do aparelho de Casagrande – Vertical 2 (0,45m)

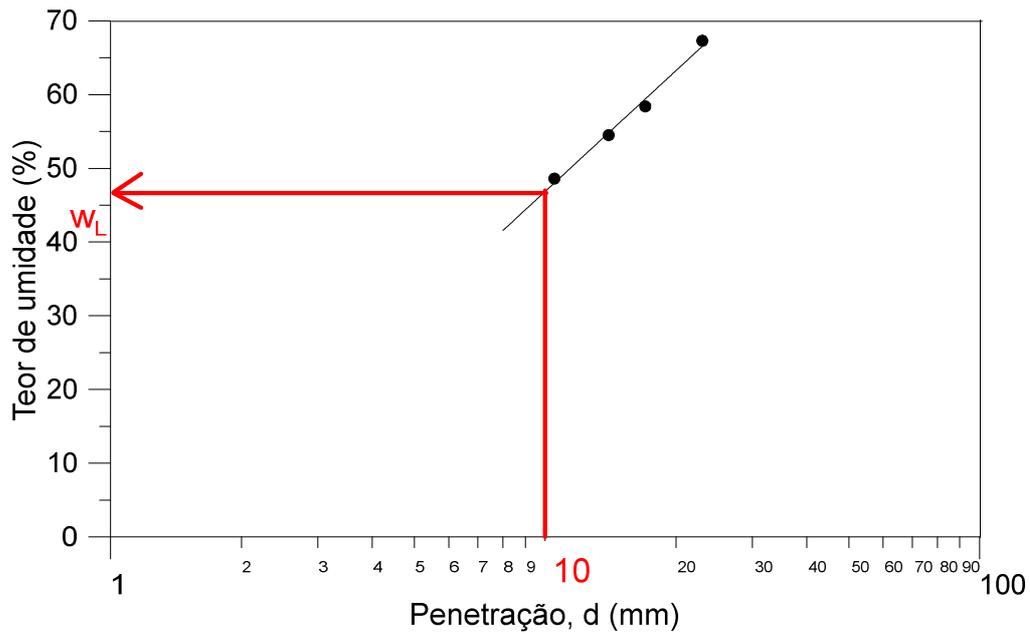


Fig 5.6. Resultado do ensaio de w_L através do aparelho de Fall Cone – Vertical 1 (0,45m)

A Figura 5.7 ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez (w_L) através do equipamento de Casagrande para a vertical 2, profundidade de 0,70m. Já a Figura 5.8 ilustra o resultado de um ensaio de Limite de Liquidez (w_L) através do Fall Cone para a vertical 2, profundidade de 0,70m

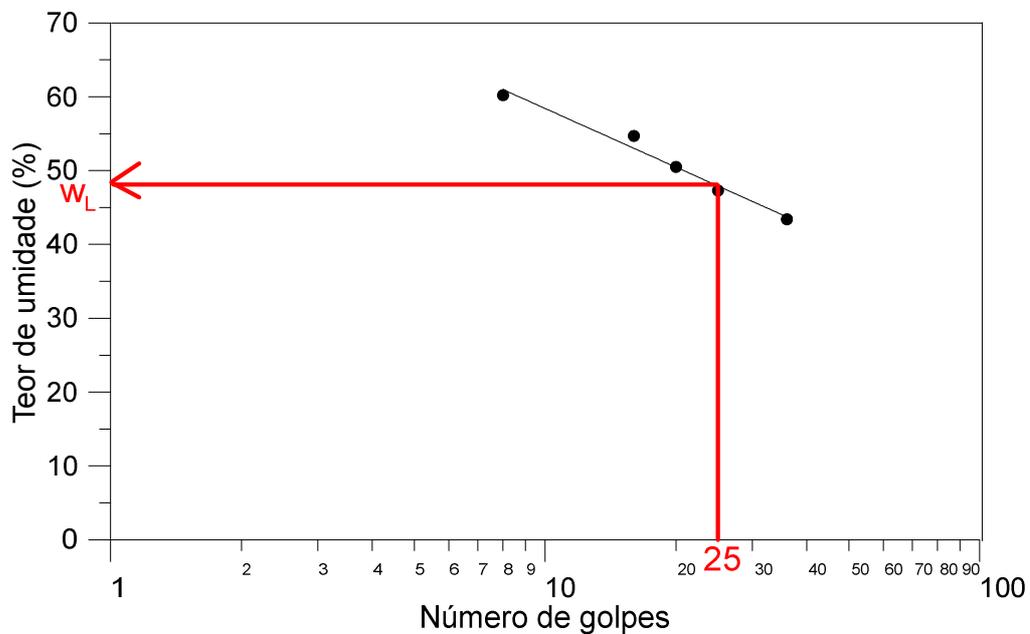


Fig 19:

Fig. 5.7 - Resultado do ensaio de w_L através do aparelho de Casagrande – Vertical 2 (0,70m)

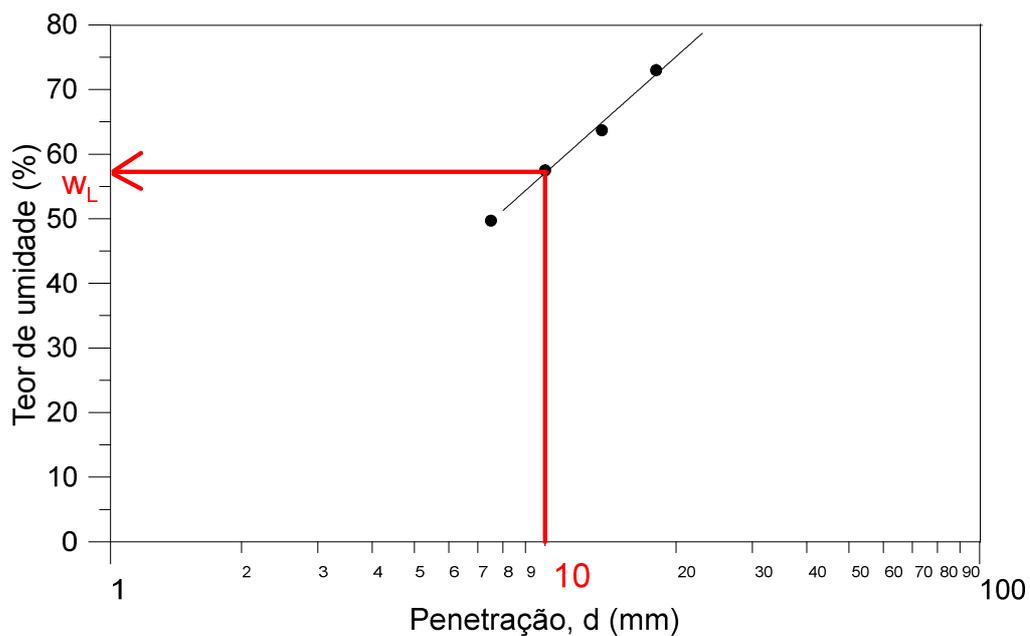


Fig. 5.8 - Resultado do ensaio de w_L através do aparelho de Fall Cone – Vertical 2 (0,70m)

A Tabela 5.3 apresenta os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez realizados com os dois equipamentos: Casagrande e Fall Cone. A média dos resultados e a relação entre o $w_{L\text{Fall Cone}}/w_{L\text{Casagrande}}$ também são apresentadas.

Tabela 5.3 - Resultados dos ensaios de Limite de Liquidez realizados com os dois equipamentos (Casagrande e Fall Cone), média dos resultados e relação entre $w_{L\text{Fall Cone}}/w_{L\text{Casagrande}}$.

Vertical	Profundidade (m)	Limite de Liquidez (w%)						Relação $w_{L\text{Casagrande}}/w_{L\text{Fall Cone}}$
		Casagrande		Média	Fall Cone		Média	
1	30	30	32	31	37	39	38	0,816
	45	37	38	37,5	42	42	42	0,888
2	45	42	42	42	47	48	47,5	0,884
	70	48	49	48,5	55	57	56	0,866

Pode-se concluir que na média o $wL_{\text{Casagrande}} = 0,86wL_{\text{Fall Cone}}$, ou seja, o wL obtido através do Fall Cone fornece um valor de resistência menor (maior teor de umidade) do que o obtido através do aparelho de Casagrande. Pode-se verificar na literatura que o wL obtido pelo equipamento de Casagrande (1932) possui resistência ao cisalhamento no Limite de Liquidez de 2,5 kPa, já o equipamento de Fall Cone da Geonor, de acordo com o manual do equipamento, possui resistência ao cisalhamento (utilizando um cone de 60gf com ângulo de vértice de 60° e uma penetração de 10mm) de 1,5 a 1,8kPa. Ou seja, o valor da resistência ao cisalhamento obtido através do Fall Cone no limite de liquidez é menor do que o obtido com o aparelho de Casagrande (que fornece valor no wL de 40% a 28% maior do que o do Fall Cone). Sabe-se que a água não tem resistência ao cisalhamento, logo espera-se que o valor da resistência ao cisalhamento do Limite de Liquidez seja nula, sendo assim, o método que mais se aproxima do esperado é o do Fall Cone, que fornece um valor de resistência menor no wL .

A partir dos valores dos Limites de Liquidez determinados através do aparelho de Casagrande e do Fall Cone foram estabelecidas correlações entre os dois métodos para as duas verticais estudadas.

A Figura 5.9 mostra os valores $wL_{\text{Fall Cone}}$ versus $wL_{\text{Casagrande}}$ para as duas profundidades estudadas da vertical 1. Já a Figura 5.10 mostra os valores $wL_{\text{Fall Cone}}$ versus $wL_{\text{Casagrande}}$ para as duas profundidades estudadas da vertical 2.

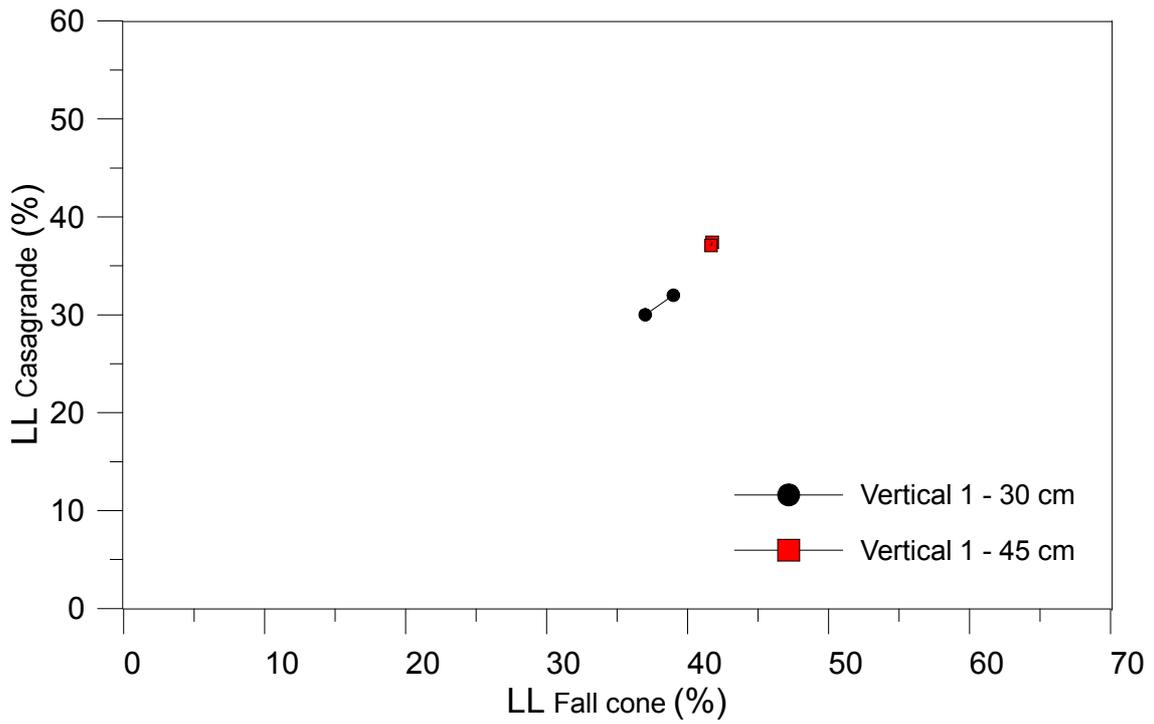


Fig. 5.9 - $wL_{\text{Fall Cone}}$ versus $wL_{\text{Casagrande}}$, vertical 1.

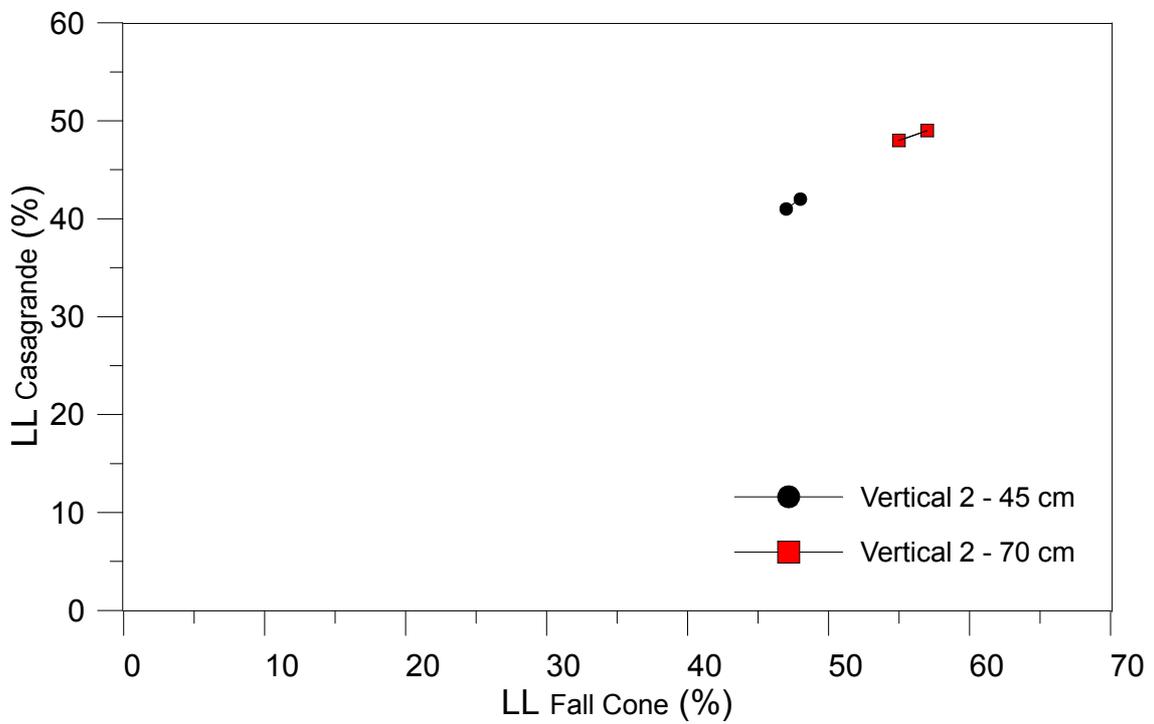


Fig. 5.10 - $wL_{\text{Fall Cone}}$ versus $wL_{\text{Casagrande}}$, vertical 2.

Com base nos gráficos acima, a autora da presente pesquisa propõem as seguintes correlações, apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Correlações entre os valores de wL obtidos através do equipamento de Casagrande e do Fall Cone.

Vertical 1				
Prof.(cm)	Nº de Pontos	Média LLCasagrande	Média LLFall Cone	Correlação
30	2	31	38	LL Casagrande = 1* LLFall Cone – 7
45	2	37	42	LL Casagrande = 0.88* LLFall Cone
Vertical 2				
Prof.(cm)	Nº de Pontos	Média LLCasagrande	Média LLFall Cone	Correlação
45	2	41,5	47,5	LL Casagrande = 1*LLFall Cone – 6
70	2	48,5	56	LL Casagrande = 0,5 * LLFall Cone + 20,5

5.3 Limite de Plasticidade

O Limite de Plasticidade da presente pesquisa foi determinado através do método tradicional do cilindro (3mm de diâmetro e 100mm de comprimento) de acordo com a norma brasileira NBR 7180 - Determinação do Limite de Plasticidade. Para cada profundidade ensaiada foram realizadas duas determinações, sendo que cada determinação forma realizados n ensaios. A tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos bem como a média deles.

Tabela 5.5 – Resultado do Limite de Plasticidade

Vertical	Prof. (cm)	LP		Média
1	30	17	18	17,5
	45	20	20	20
2	45	21	21	21
	70	28	29	28,5

De acordo com Fujikawa & Koumoto (1982), o Limite de Plasticidade através do método Fall Cone corresponde a uma penetração de 1 mm no aparelho Sueco (60g e 60°).

Todavia, Towner (1973) menciona que a equação não é linear para pequenos valores de teor de umidade. Através das equações das retas de regressão linear de cada vertical para cada profundidade, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resultado de wP através do aparelho de Fall Cone

Limite de Plasticidade determinado pelo Fall Cone				
Vertical	Profundidade	Ensaio	Equação da reta de regressão linear	LP
1	30	1	$LP = 9,8342 \cdot LN(1) + 16,415$	16
		2	$LP = 12,588 \cdot LN(1) + 8,0717$	8
	45	1	$LP = 14,548 \cdot LN(1) + 8,2498$	8
		2	$LP = 10,37 \cdot LN(1) + 17,794$	18
2	45	1	$LP = 23,666 \cdot LN(1) - 7,625$	-
		2	$LP = 31,125 \cdot LN(1) - 23,826$	-
	70	1	$LP = 26,134 \cdot LN(1) - 4,8172$	-
		2	$LP = 25,955 \cdot LN(1) - 2,654$	-

Pode-se observar uma discrepância entre os valores de Limite de Plasticidade, determinados através do método de Fujikawa & Koumoto (1982) que utilizou o Fall Cone, para as duas profundidade ensaiadas da vertical 1. Já para a vertical 2, não foi possível sua determinação pois o ln de 1 é zero e o resultado de LP forneceu valores negativos o que não tem sentido físico.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados do Limite de Plasticidade obtido através do método convencional e de Fujikawa & Koumoto (1982), que utiliza o Fall Cone.

Tabela 5.7 - Tabela resumo com os LP realizados através do método convencional e do método de Fujikawa & Koumoto (1982) que utiliza o Fall Cone.

Vertical	Profundidade (cm)	Limite de Plasticidade					
		Convencional		Média	Fall Cone		Média
1	30	17	18	17,5	16	8	X
	45	20	20	20	8	18	X
2	45	21	21	21	-	-	X
	70	28	29	28,5	-	-	X

Se os menores valores de LP forem desprezados pelo método de Fujikawa & Koumoto (1982), pode-se observar que o outro valor fica próximo do determinado pelo método convencional.

5.4 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada de acordo com a NBR 7181. A autora da presente pesquisa realizou o peneiramento grosso. A sedimentação com defloculante e o peneiramento fino foram realizados no Laboratório LC (Luiz Carlos), que é técnico da COPPE/UFRJ e tem longa experiência em ensaios de caracterização. No total foram realizados 4 ensaios, um para cada profundidade ensaiada e foi utilizado defloculante.

A Figura 5.11 ilustra a curva granulométrica da vertical 1, profundidade de 30 cm e a Tabela 5.8 mostra a porcentagem do material encontrada.

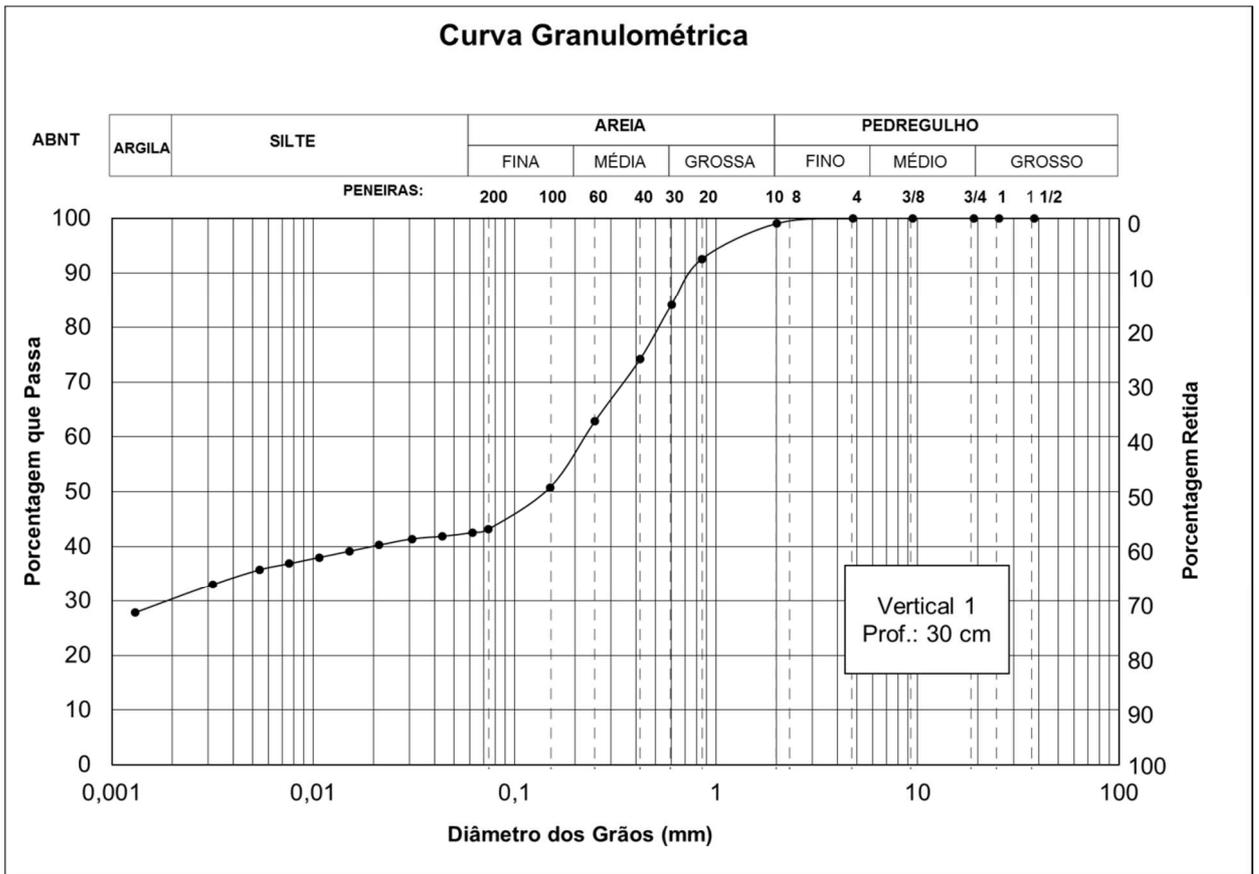


Fig 5.11 - Curva Granulométrica da amostra da vertical 1, profundidade de 30 cm

Tabela 5.8 - Composição Granulométrica da amostra da vertical 1 com profundidade de 30cm.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
30	12	15	27	15	1

De acordo com a nomenclatura dos solos na escala ABNT em função da granulometria este solo seria classificado uma areia argilosa com silte.

A Figura 5.12 ilustra a curva granulométrica da vertical 1, profundidade de 45 cm e a Tabela 5.9 mostra a porcentagem do material encontrada.

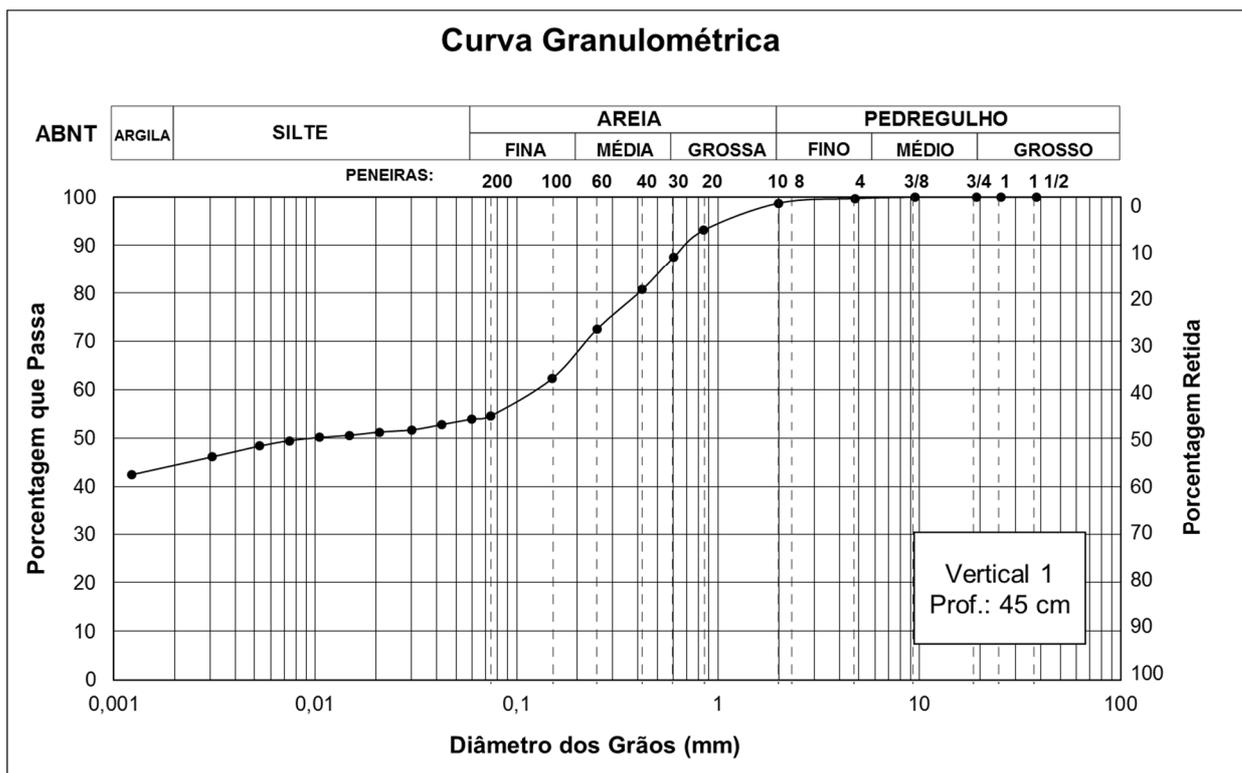


Fig 5.12: Curva Granulométrica da amostra da vertical 1, profundidade de 45 cm

Tabela 5.9: Composição Granulométrica da amostra da vertical 1 com profundidade de 45cm.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
44	10	14	20	11	1

De acordo com a nomenclatura dos solos na escala ABNT em função da granulometria este solo seria classificado como areia argilosa com silte.

A Figura 5.13 ilustra a curva granulométrica da vertical 2, profundidade de 45 cm e a Tabela 5.10 mostra a porcentagem do material encontrada.

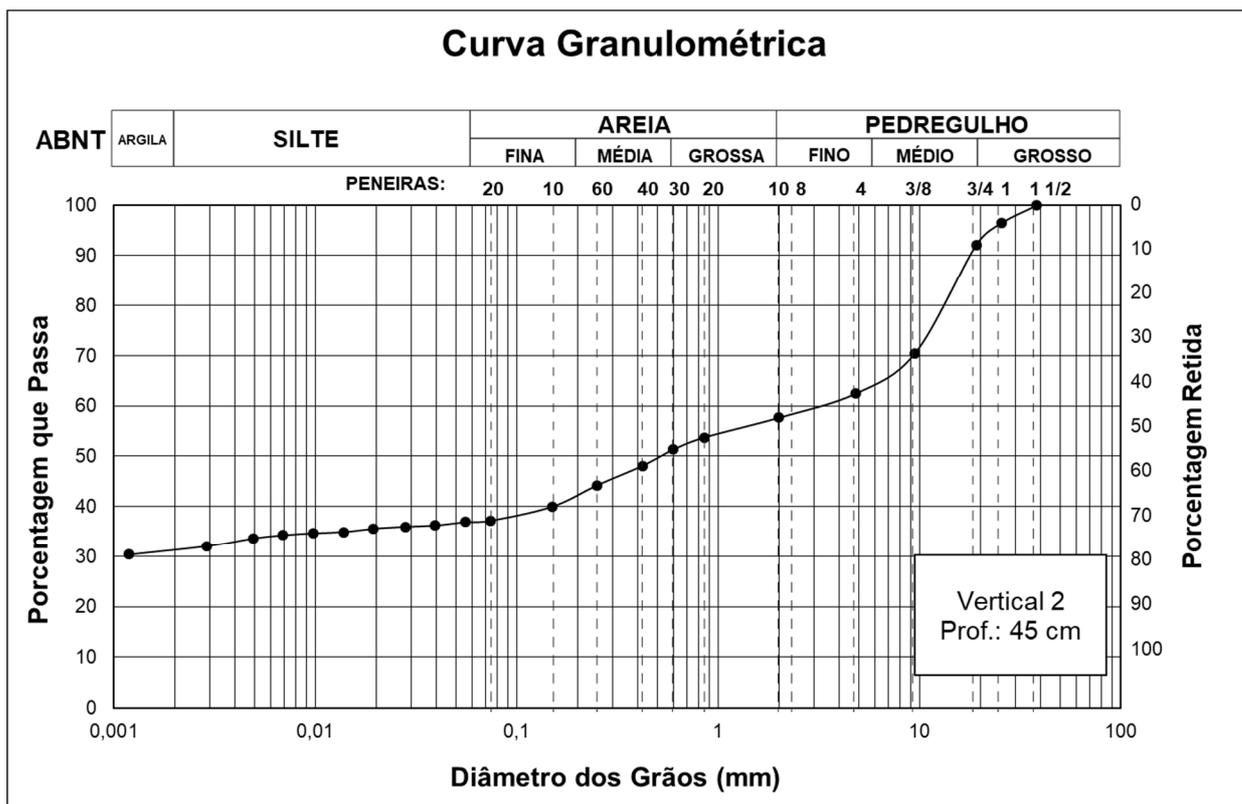


Fig 5.13: Curva Granulométrica da amostra da vertical 2, profundidade de 45 cm.

Tabela 5.10: Composição Granulométrica da amostra da vertical 2 com profundidade de 45cm.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
31	6	6	9	6	42

A curva granulométrica se apresenta descontínua e se trata de um solo mal graduado. De acordo com a nomenclatura dos solos na escala ABNT em função da granulometria este solo seria classificado como uma argila arenosa com alta concentração de pedregulho.

A Figura 5.14 ilustra a curva granulométrica da vertical 2, profundidade de 70 cm e a Tabela 5.11 mostra a porcentagem do material encontrada.

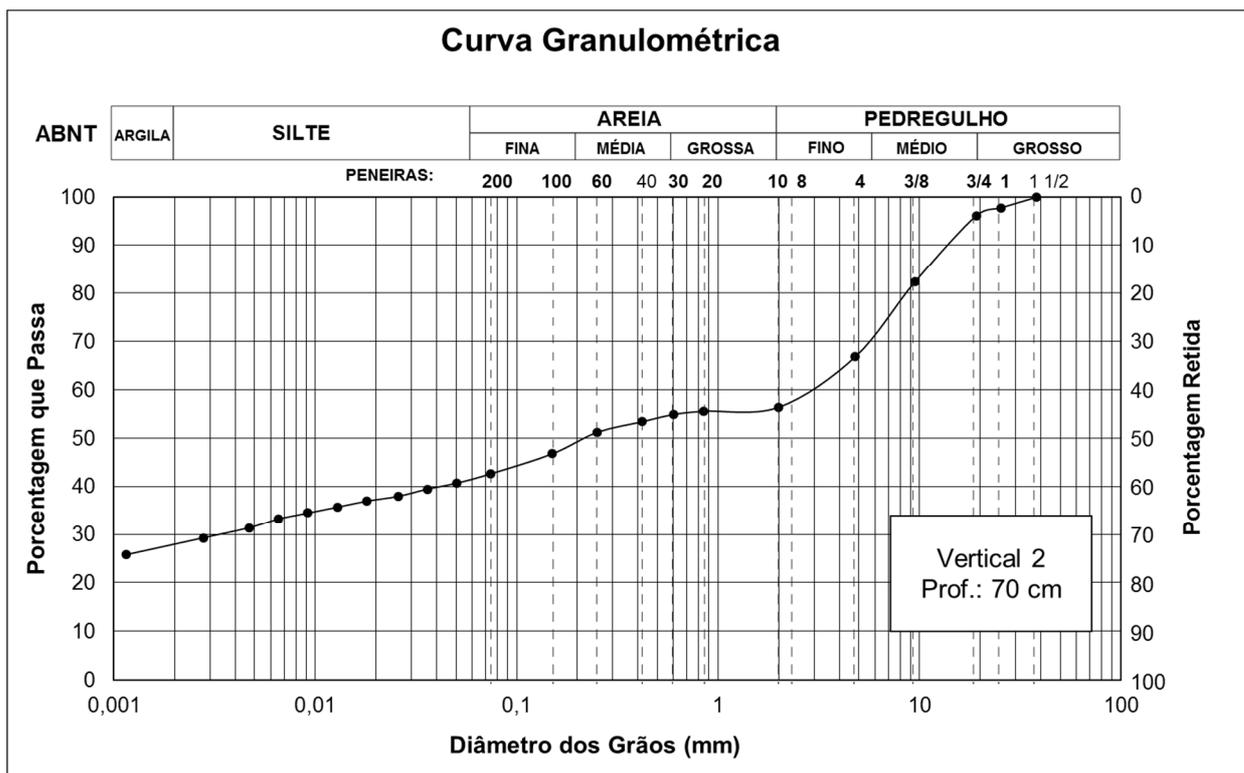


Fig 5.14: Curva Granulométrica da amostra da vertical 2, profundidade de 70 cm

Tabela 5.11: Composição Granulométrica da amostra da vertical 2 com profundidade de 70cm.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
28	14	8	6	1	44

De acordo com a nomenclatura dos solos na escala ABNT em função da granulometria este solo seria classificado como uma argila arenosa com alta concentração de pedregulho.

5.5 Matéria orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 13600. De acordo com a norma a amostra é seca na estufa de 105°C +- 5°C até constância de peso. A seguir é levada à queima total na mufla (que tem a temperatura aumentada gradualmente) até atingir o valor de 440°C +- 5°C. A amostra deve permanecer por no mínimo 12 horas na mufla à temperatura de 440°C +- 5°C (até a constância de peso). Para cada profundidade foram realizadas duas determinações de teor de matéria orgânica e adotou-se a média entre elas no presente trabalho, conforme pode ser visto na tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resultados dos ensaios de determinação da matéria orgânica por queima total na mufla à temperatura de 440°C +- 5°C das amostras ensaiadas.

MATÉRIA ORGÂNICA A 440° (%)				
SOLOS	Vertical 1 - 30 cm	Vertical 1 - 45 cm	Vertical 2 - 45 cm	Vertical 2 - 70 cm
MO %	5,4	5,3	5,5	5,2

Pode-se verificar que a porcentagem de matéria orgânica está na ordem de grandeza de 5% para todas as profundidades ensaiadas.

5.6 Análise conjunta dos resultados

Segundo Skempton (1953), em todas as argilas a razão entre o índice de plasticidade e a fração de argila (porcentagem em peso das partículas de argila menores do que 2 micra) é aproximadamente constante, e pode ser definida como “atividade”.

Skempton (1948) classificou uma argila como inativa, normal ou ativa, dependendo do valor da atividade, respectivamente menor do que 0,75, entre 0,75 e 1,25 e maior do que 1,25.

As Tabelas 5.13 e 5.14 apresentam respectivamente os valores de atividade encontrados para as profundidades ensaiadas, utilizando o wL de Casagrande e wL do Fall Cone, bem como a classificação segundo Skempton (1948).

Tabela 5.13 – Valores de atividade e classificação de acordo com Skempton (1948) – wL de Casagrande.

Vertical	Prof. (m)	IP (Casagrande)	Fração de argila (%)	Atividade	Classificação
1	0,30	13	30	0,43	Inativa
1	0,45	17	44	0,39	Inativa
2	0,45	22	31	0,71	Inativa
2	0,70	21	28	0,74	Inativa

Tabela 5.14 – Valores de atividade e classificação de acordo com Skempton (1948) – wL do Fall Cone

Vertical	Prof. (m)	IP (Fall Cone)	Fração de argila (%)	Atividade	Classificação
1	0,30	21	30	0,66	Inativa
1	0,45	22	44	0,50	Inativa
2	0,45	28	31	0,90	Normal
2	0,70	28	28	1,0	Normal

A Figura 5.15 apresenta os valores de: (a) w_n , w_p , w_L ; (b) G ; (c) Atividade; (d) IP; (e) $w_{L_{Casagrande}}/w_{L_{Fall\ Cone}}$; (f) Teor de matéria orgânica (%) para as profundidades ensaiadas da vertical 1.

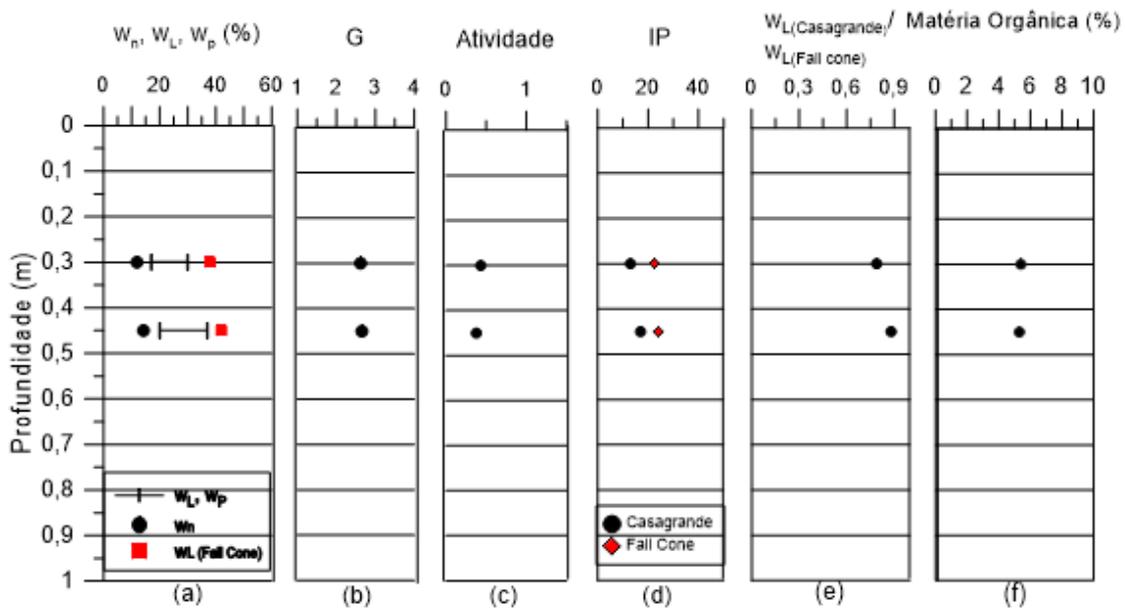


Fig. 5.15 - Resultados da vertical 1, profundidade de 30cm e 45cm; a) Teor de umidade natural, limite de liquidez através do aparelho de Casagrande e do Fall Cone; b) Densidade dos grãos; c) Atividade das Argilas; d) Índice de Plasticidade; e) Relação entre o limite de liquidez através do aparelho de Casagrande com o Fall Cone; f) Teor de Matéria Orgânica.

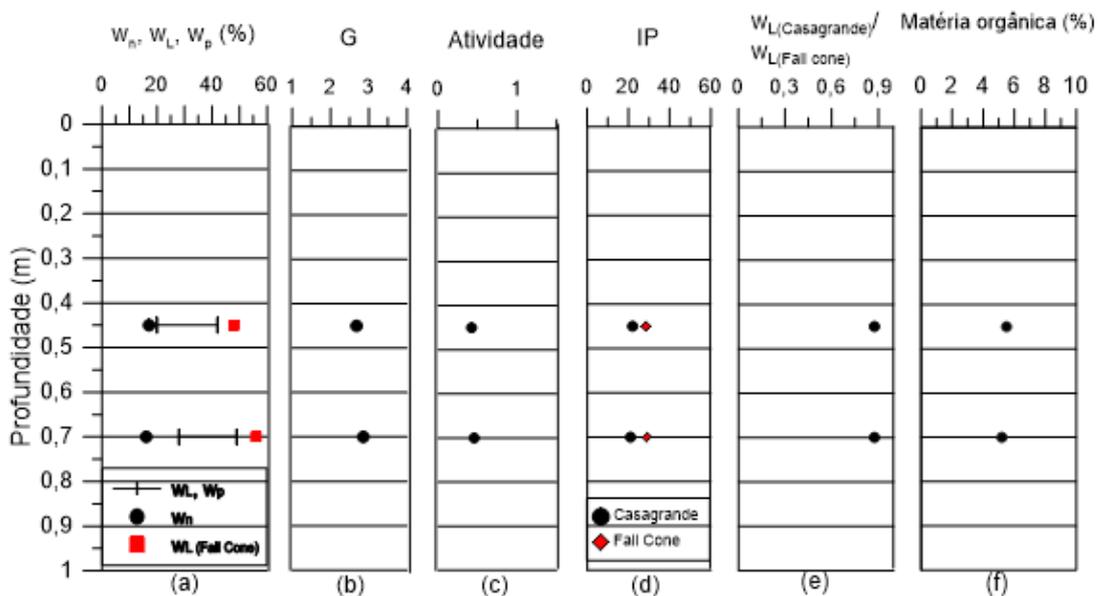


Fig. 5.16 - Resultados da vertical 2, profundidade de 45cm e 70cm; a) Teor de umidade natural, limite de liquidez através do aparelho de Casagrande e do Fall Cone; b) Densidade dos grãos; c) Atividade das Argilas; d) Índice de Plasticidade; e) Relação

entre o limite de liquidez através do aparelho de Casagrande com o Fall Cone; f) Teor de Matéria Orgânica.

Como já discutido anteriormente, pode-se verificar nas Figuras (5.15 e 5.16) que o w_L obtido como Fall Cone é maior do que o w_L obtido com o aparelho de Casagrande. As Figuras 5.9 e 5.10 ilustraram que na média o $w_{L_{Casagrande}} = 0,86w_{L_{FallCone}}$. Pode-se observar também nas Figuras (5.15 e 5.16) que o teor de umidade natural é menor do que o Limite de Plasticidade, o que é esperado de acordo com a literatura para este tipo de solo. Fernandes (2016) menciona que não faz sentido o cálculo de IC (índice de consistência) e IL (índice de liquidez) para solos não saturados, uma vez que a umidade natural varia de acordo com a estação.

O peso específico relativo, G_s , segundo Das e Sobhan (2014) é definido como a razão entre o peso específico do solo sobre o peso específico da água. A maioria dos minerais encontrados nos solos possui peso específico variando entre 2,6 a 2,9. Os principais constituintes minerais nos solos são quartzo, feldspatos e silicatos, eles apresentam um G médio de 2,65. Para a vertical 1, o G_s obtido foi de aproximadamente 2,65. Para a vertical 2 na primeira profundidade foi encontrado G_s de 2,7 e na segunda 2,9, provavelmente esta profundidade está composta por óxido de ferro por possuir um G_s maior. A presença de óxido de ferro é típica da formação Barreiras o que é mais um indício que este material é desta formação.

O Índice de Plasticidade plotado nas Figuras 5.15 e 5.16 foi determinado considerando os valores de w_L obtidos com o equipamento de Casagrande e com os valores de w_L obtidos com o Fall Cone. O resultado obtido com o aparelho de Casagrande foi de 13% para a vertical 1, profundidade de 30 cm e 17% para a profundidade de 45cm. Para a vertical 2, profundidade de 45 e 70 cm, o IP obtido foi de 22% e 21% respectivamente. Segundo a classificação de Burmister (1949), o solo da vertical 1 está classificado como plasticidade média (IP entre 10% a 20%) e a vertical 2 possui um solo com plasticidade alta (IP entre 20% e 40%).

Já o índice de plasticidade obtido com o resultado de w_L obtido com o Fall Cone foi de 21% para a vertical 1, profundidade de 30 cm e 22% para a profundidade de 45cm. Para a vertical 2, profundidade de 45 e 70 cm, o IP obtido foi de 28%. Em ambas verticais, o solo, segundo a classificação de Burmister (1949) possui plasticidade alta. De acordo com Das e Sobhan (2014), o Índice de Plasticidade é importante na classificação de solos granulares finos.

Uma comparação entre os IP obtido com os dois equipamentos é realizado na Tabela 5.15 .

Tabela 5.15 – Tabela comparativa entre os IP determinado com os dois equipamentos.

Vertical	Prof. (m)	wL _{Fall Cone}	wL _{Casagrande}	LP	IP (consid. wL _{Casagrande})	IP (consid. wL _{Fall Cone})
1	0,3	38	30	17	13	21
1	0,45	42	37	20	17	22
2	0,45	48	42	20	22	28
2	0,7	56	49	28	21	28

A partir do IP e da % de fração de argila em peso, pode-se obter a atividade das argilas. Skempton (1954) correlacionou o IP e a % de fração de argila e observou que o mesmo aumenta linearmente. Assim, ele definiu o índice atividade, que segundo Das e Sobhan (2014), é utilizada como índice para identificação do potencial de expansão dos argilominerais. Segundo Mitchell (1993), que determinou e classificou as argilas a partir da atividade, temos que o solo de ambas verticais possui argilas de atividade inativa para o IP considerando o aparelho de Casagrande, utilizando o IP considerando o Fall Cone temos diferença apenas na vertical 2 com profundidade de 0,45m, onde a argila possui atividade normal.

Pode-se verificar nas Figuras (5.15 e 5.16) que para as profundidades ensaiadas a porcentagem de matéria orgânica está na ordem de grandeza de 5%.

De acordo com os ábacos de plasticidade, Figuras (5.17 e 5.18), pode-se verificar que as profundidades ensaiadas, utilizando o wL realizado no aparelho de Casagrande, caíram na região de argila de baixa plasticidade e utilizando o Fall Cone, as profundidades ensaiadas caíram em duas regiões, sendo três pontos dentro de siltes inorgânico de compressibilidade média (vertical 1, profundidade 30 e 45cm, e vertical 2 profundidade 45 cm), e um em siltes inorgânicos de compressibilidade alta e argilas orgânicas (vertical 2, profundidade 70 cm).

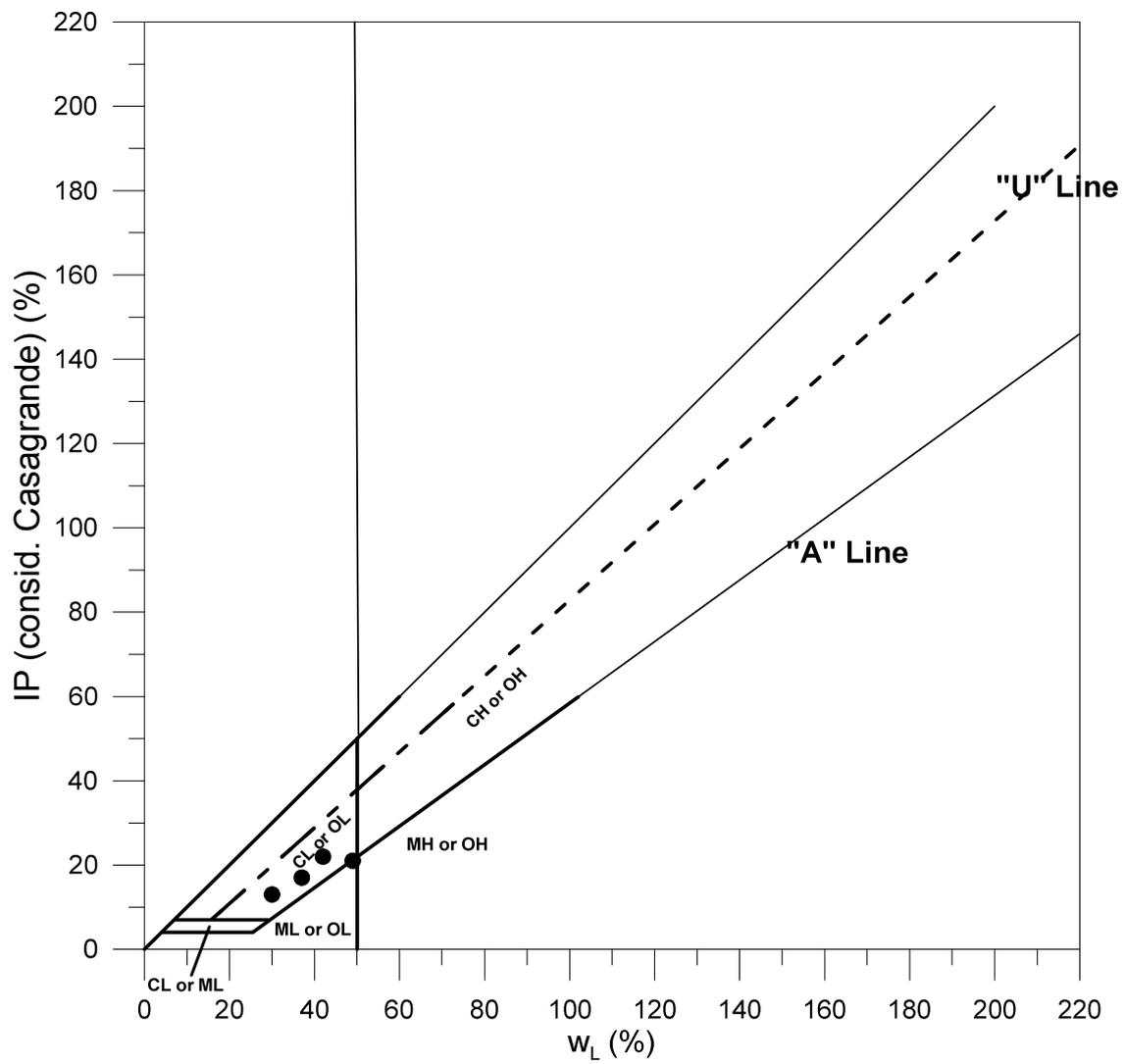


Fig. 5.17 – Ábaco de Plasticidade considerando o w_L determinado no aparelho de Casagrande.

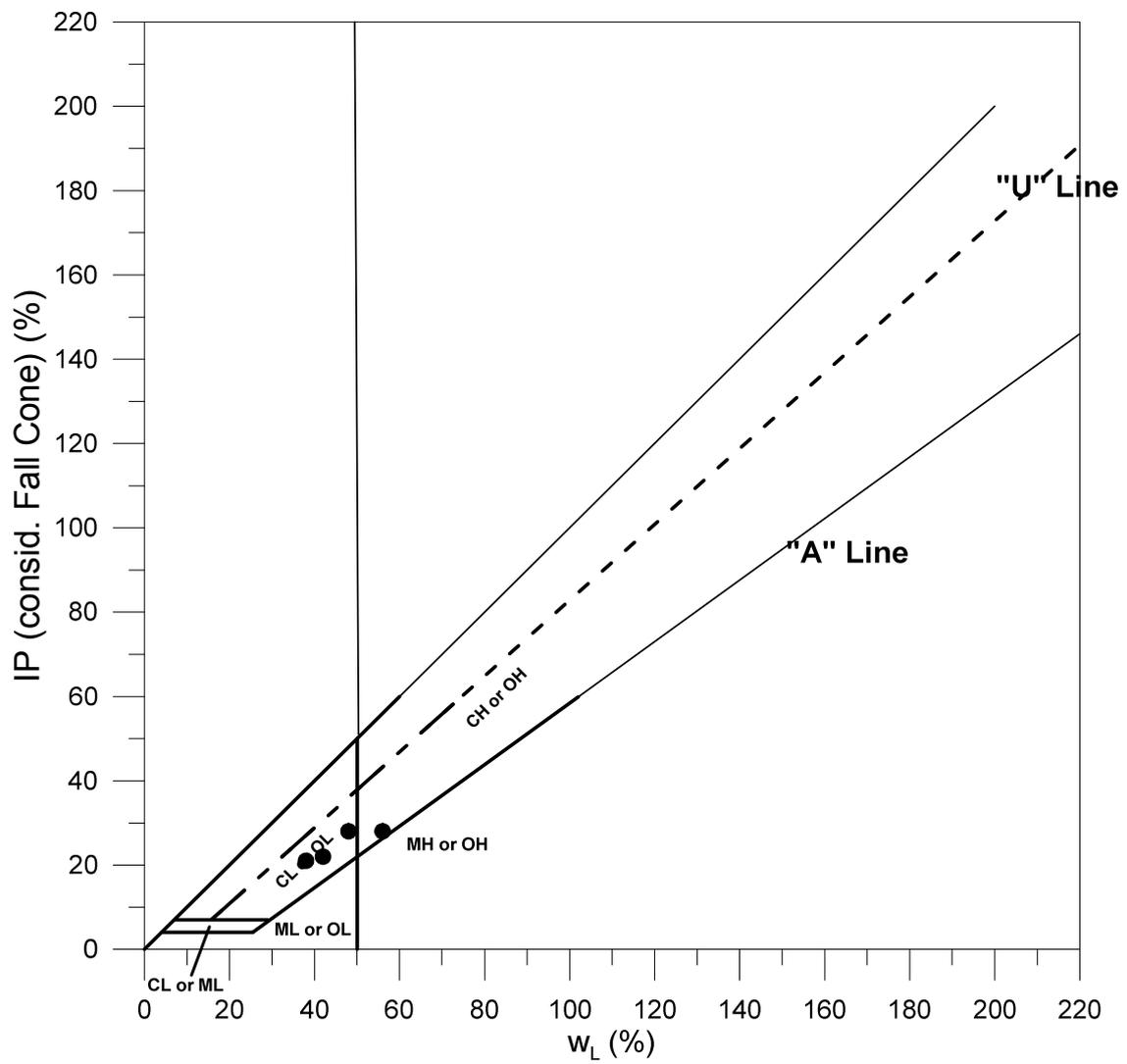


Fig. 5.18 – Ábaco de Plasticidade considerando o w_L determinado no aparelho Fall Cone

5.7 Comparação do wL obtido através do Fall Cone e Aparelho de Casagrande no solo da Formação Barreiras da UFRJ Macaé com outros solos

De acordo com Bicalho et al. (2017), estudos têm mostrado que a resistência não drenada (s_u) no limite de liquidez pelo método proposto por Casagrande diminui com o aumento de wL, que cresce com o teor de argila e a plasticidade (Leflaive, 1971; Youssef et al., 1995; Leroueil e LeBihan, 1996). Assim verifica-se que:

$wL_{\text{Casagrande}} < wL_{\text{Fall Cone}}$, para $wL < wL^*$

$wL_{\text{Casagrande}} > wL_{\text{Fall Cone}}$, para $wL > wL^*$

onde wL^* é o valor que define a transição entre os valores chamados de baixo wL e alto wL que não é bem definido na literatura (Bicalho et al., 2014). Bicalho et al. (2014) estabeleceram funções que correlacionam empiricamente os valores de wL obtidos com os equipamentos de Casagrande e Fall Cone:

$wL_{\text{Fall Cone}} = A \cdot wL_{\text{Casagrande}} + B$,

$wL_{\text{Casagrande}} = A^* \cdot wL_{\text{Fall Cone}} - B^*$

onde A, A^* , B e B^* são constantes de ajuste obtidas de correlações lineares.

A Tabela 5.16 apresenta uma compilação de dados para correlações lineares publicadas na literatura entre wL Casagrande e wL Fall Cone. O penetrômetro utilizado foi sugerido pela norma britânica (Bicalho et al., 2017).

Tabela 5.16. Correlações publicadas entre valores medidos de wL Casagrande e wL Fall Cone (modificado de Bicalho et al., 2017).

Referência	A	B	Variações de LL
Budhu (1985)	1,070	4,300	20-100
Wasti & Bezirei (1986)	0,990	4,870	27-110
Queiroz de Carvalho (1986) 1	0,934	2,180	13-48

Sridharan & Prakash (1998)	1,209	10,800	29-92
Souza (2011) – solo 12	0,707	7,124	38-40
Souza (2011) – solo 23	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
Cerbino (2018) 4	0,860	1,000	31-49

1 para solos lateríticos do nordeste e norte do Brasil

2 para as “argilas azuis de Xabregas”

3 para “argilitos carbonatados gipsíferos” localizados na Península de Setúbal em Lisboa

4 para o solo de Formação Barreira da UFRJ-Macaé. O penetrômetro utilizado foi o sueco.[LC1]

6. Conclusões e sugestões para pesquisas futuras

6.1 - Conclusões

De acordo com a Literatura, solo da UFRJ-Macaé é um solo sedimentar da Formação Barreira, entretanto, recomenda-se realizar a datação do material para confirmar esta informação.

Pode-se concluir que na média o $w_{L_{Casagrande}} = 0,86w_{L_{Fall Cone}}$, ou seja, o w_L obtido através do Fall Cone fornece um valor de resistência menor (maior teor de umidade) do que o obtido através do aparelho de Casagrande.

Através dos resultados e ensaios do Limite de Liquidez realizados pode-se concluir as vantagens do aparelho Fall Cone em relação ao aparelho de Casagrande. Além da elevada precisão, ele também possui um tempo de ensaio bem menor que o dispositivo a percussão. Outro fator importante e que pode ser comprovado é a sua alta repetibilidade e sensibilidade relacionada a metodologia do operador, que comparada com a Concha de Casagrande é mínima.

Para os valores do Limite de Plasticidade, com o aparelho Fall Cone utilizado é sueco, não foi possível a sua determinação visto a disparidade dos valores encontrados através

da reta de regressão linear conforme mostrado no item 5.3. Porém, é indiscutível que a execução do ensaio através da metodologia de Atterberg é muito mais difícil e dependente da técnica do operador do que a metodologia utilizada através do Fall Cone, que é muito mais simples, precisa e usual. Por este motivo, foi adotado na presente pesquisa o método convencional para determinar o LP.

Verifica-se que o teor de matéria orgânica está na ordem de grandeza de 5% para todas as profundidades ensaiadas no presente trabalho.

Segundo Skempton (1948) argila das profundidades ensaiadas, utilizando o IP considerando Casagrande, são classificadas como inativa, ou seja, a atividade é menor do que 0,75. Porém ao utilizar o IP considerando o aparelho Fall Cone, em uma profundidade (vertical 2, profundidade 0,45m) o resultado fica diferente, a argila possui uma atividade maior que 0,75, sendo classificada como atividade normal. Isso se deve ao fato, já explicado anteriormente, de que o Limite de Liquidez obtido pelo Fall Cone é maior que o Limite de Liquidez obtido pelo Casagrande.

6.2– Sugestões para pesquisas futuras

Realizar a datação do material estudado, se possível ao em maiores profundidades ao longo do perfil, para se confirmar se este material é da Formação Barreiras.

Realizar os ensaios de mineralogia para se verificar os minerais presentes, e confirmar a presença de óxido de ferro o que justificaria o valor elevado de (Gs) da vertical 2, prof 0,70m.

Realizar mais ensaios de caracterização ao longo de todo o perfil, com o intuito de obter ainda mais dados.

Sugere-se acrescenta na norma brasileira NBR 6459 Solo- Determinação do Limite de Liquidez a determinação do wL através do equipamento de Fall Cone, ou criar uma nova norma brasileira que padronize este ensaio.

Sugere-se a realização de ensaios de compressibilidade (adensamento) e resistência triaxial de compressão, triaxial de extensão e DSS (cisalhamento simples), ao longo de todo o perfil com a finalidade de se conhecer melhor as propriedades geotécnicas do solo local.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo - Determinação do Limite de Liquidez**. NBR 6459, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. NBR 7180, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Análise Granulométrico – Rochas e Solos**. NBR 6502, 1995.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm: Determinação da massa específica**. NBR 6508, 1984.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo - Análise granulométrica**. NBR 7181, 2017.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 graus Celsius**. NBR 13600, 1996.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio**. NBR 16097, 2012.

ALMEIDA, Julio et al. **Geologia e recursos minerais da folha Macaé SF.24-Y-A-I: escala 1:100.000: estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: CPRM, 2012

ARAI, M. **A Grande Elevação Eustática do Mioceno e Sua Influência na Origem do Grupo Barreiras**. Revista do Instituto de Geociências - USP Disponível on-line no endereço www.igc.usp.br/geologiausp - 1 - Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6, outubro 2006.

BICALHO, K. ; GRAMELICH, J. ; CUNHA, C. ; SARMENTO JUNIOR, R. **Estudo dos valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e Cone para diferentes argilas**. 0379-9522 – Geotecnia n.º 140 – julho 2017 – pp. 63-72 63

<http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2017.140.04> – 2017 Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

BRITISH STANDARD INSTITUTION – **British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, part 2: Classification tests** – London, England, BS 1377: Part 2, 1990.

BUDHU, M. **The effect of clay content on liquid limit from a fall cone and the British cup device.** Geotech. Test. J., 8, pp. 91-95, 1985.

BURMISTER, D. M. **Concepts in Soil Mechanics.** New York: Columbia University, 1949.

CAMPBELL, R. **Soil slips, debris flows and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity.** Southern California. USGS Professional Paper, 1975.

CASAGRANDE, A. **Classification and identification of soils.** In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 73, 1947.

CASAGRANDE, A. **Research on the Atterberg Limits of soils.** Public Roads, Vol 13, No 8, 1932.

DAS, B. ; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 8ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DI MATTEO, L. Liquid limit of low – to medium plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test. Bull. Eng. Geol. Environ., 71, pp. 79-85, 2012.

FERNANDES, M. DE M. **Mecânica dos solos conceitos e princípios fundamentais.** Vol.1. São Paulo: Oficina de Texto, 2016.

FERNANDES, M. DE M. **Mecânica dos solos introdução à Engenharia Geotécnica.** Vol.2. São Paulo: Oficina de Texto, 2016.

FOJTOVÁ, L.; FRANCKOVÁ R. ; KOVÁR, L. **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, 2009.

GARNEAU, R.; LEBIHAN, J.P. **Estimation of some properties Champlain clays with the Swedish Fall cone.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, 1977.

HANSBO, S. **A new approach to the determination of the shear strength of clay by the Fall-cone test.** Proc., Royal Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, Sweden, 1957.

HARISON, J. A. **Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils.** Géotechnique, 1988.

HOULSBY, G. T. **Theoretical analysis of the Fall cone test.** Geotechnique, Vol. 32, No. 2, 1982.

KARLSSON, R. "Suggested improvements in the liquid limit test with reference to flow properties of remoulded clays." Proc., 5th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Dunod, Paris, 1961.

KESTLER, M.A. **Correlations and comparisons between the Casagrande liquid limit device and the Fall cone.** MSc Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1982.

KOUMOTO, T. ; HOUSBY, G. T. **Theory and Practice of the Fall Cone Test,** Geotechnique, 2001.

LE ROUEIL, S.; LE BIHAN, J.P., **Liquid limits and Fall cones.** Canadian Geotechnical Journal, 1996.

MARTINS, I. S.M. **Notas de aula de adensamento,** 2007.

MITCHELL, J. K.; SITAR, N. **Engineering properties of tropical residual soils,** Proceedings of Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils, ASCE, *Honolulu*, 1982.

MORAIS, R. M. O. ; MELLO, C. L. ; COSTA, F. O. ; SANTOS, P. F. **Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos depósitos de Formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro.** Revista do Instituto de Geociências – USP. São Paulo, SP. v.6 n.2, 2006.

OLSSON, J. **Method for investigating the strength properties of clays, as used in geotechnical investigations by the [Swedish] State Railways.** Geologiska Förening, Stockholm, Förhandlingar, 1921.

PORTO JÚNIOR, H. P. S. **Dados de Macaé**. Prefeitura de Macaé. Disponível em: <<http://www.macaee.rj.gov.br/conteudo/leitura/titulo/dados>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

QUEIROZ DE CARVALHO, J.B. **The applicability of the cone penetrometer to determine the Liquid Limit of Lateritic soils**. Geotechnique, 36, pp. 1-8, 1986.

SANTOS, G.; MARTINEZ, S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2429/000369608.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 31 ago. 2017, 16:30.

SCHAETZL, R. ; ANDERSON, S.. **Soils: Genesis and Geomorphology**. Cambridge: Ed. Cambridge, 2005.

SCHERRER, H. U. **Determination of liquid limit by static cone penetration test**, Proc. 5th Intl. Conf. Soil Mechanics, Paris 1, 1961.

SCHOFIELD, A.N., ; WROTH,C.P. **Critical state soil mechanics**. Mc Graw-Hill, UK, 1968.

SHERWOOD, P.T.; RYLEY M.D., **An Investigation of a Cone Penetrometer Method for the Determination of the Liquid Limit**, Geotechnique, 1970.

SHIMABUKURO, S.; ARAI, M. The Tortonian unconformity: its relation to the stratigraphic framework of the Barreiras Group (Brazilian coastal Cenozoic deposits). In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. Abstracts... Rio de Janeiro: CPRM, 2000. (1 CD-ROM).

SILVA, L C.; CUNHA, H. C. S. **Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro**, escala 1:400.000. Brasília: CPRM, 2001. (1 CD-ROM).

SKEMPTON, A.W. **Discussion: Sensitivity of clays and the c/p ratio in normally consolidated clays**. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1954.

SOUZA, P.M.L.P., **Limite de Liquidez – Correlações e Comparações entre os métodos de Fall Cone e da Concha de Casagrande**. Tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa (não publicada), 2011.

SOWERS, G.G.; VESIC, A.; GRANDOLFI, M. **Penetration Test of Liquid Limit**, ASTM, Special Technical Publication. Philadelphia, 1960.

SRIDHARAN, A.; Prakash, K. **Liquid limit and fall cone: discussion**. Can. Geotech. J., 35, pp. 407-408, 1998.

STROUD, M.A. **The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks**. In Proceedings of the European seminar on penetration testing. Stockholm, 1974.

TOWNER G. D. **An examination of the Fall-cone Method for the determination of some strength properties of remoulded agricultural soils**, Journal of Soil Science, 1973.

WASTI, Y. ; Bezirci, M.H. **Determination of the consistency limits of soils by the fall-cone test**. Can. Geotech. J., 23, pp. 241-246, 1986.

WINTER, W. R.; JAHNERT, R. J.; FRANÇA, A. B. **Bacia de Campos. Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, 2007.

WOOD, D.M. ; WROTH, C.P. **The Use of the Cone Penetrometer to Determine the Plastic Limit of Soils**, Ground Engineering, 1978.

Anexo A

Resultados do Limite de Liquidez através do equipamento de Casagrande e do Fall Cone.

Os resultados de todos os ensaios de Limite de Liquidez realizados, na presente pesquisa, pelos equipamentos de Casagrande e Fall Cone, encontram-se nas figuras a seguir. Os resultados são apresentados de acordo com a vertical e profundidade ensaiada, sendo que para cada profundidade é apresentado primeiro o resultado obtido com o equipamento de Casagrande e depois com o Fall Cone.

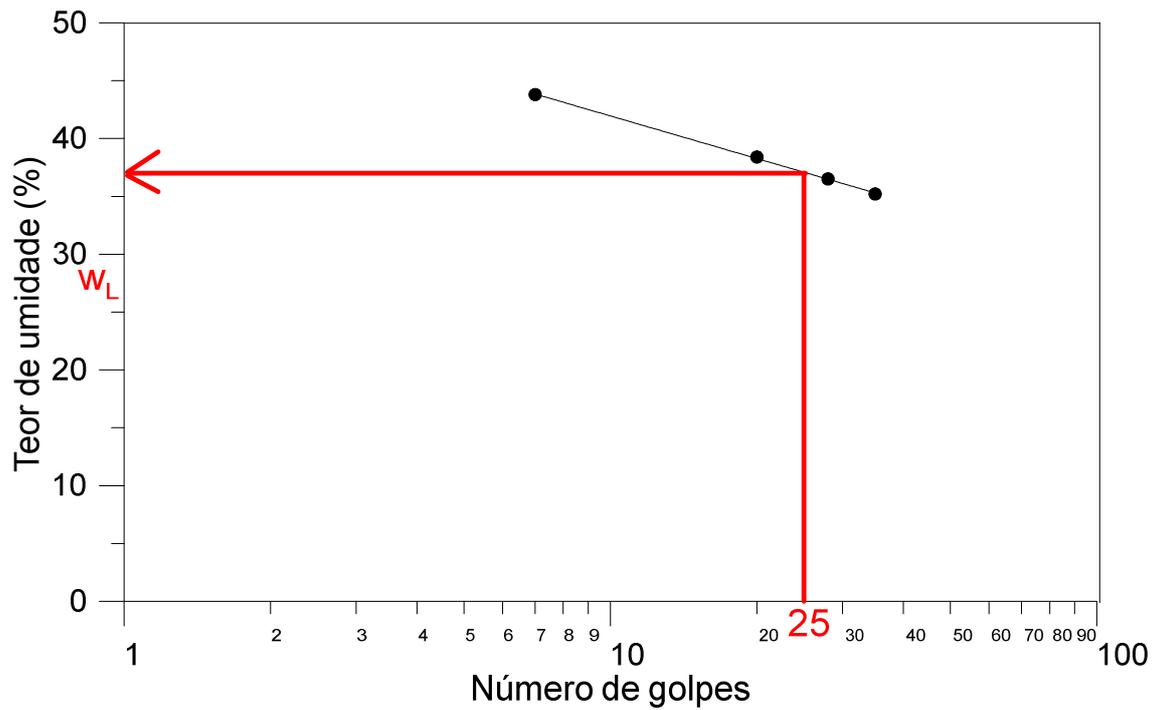


Fig. A.1 - Resultado do ensaio de w_L através do aparelho de Casagrande – Vertical 1 (0,30m)

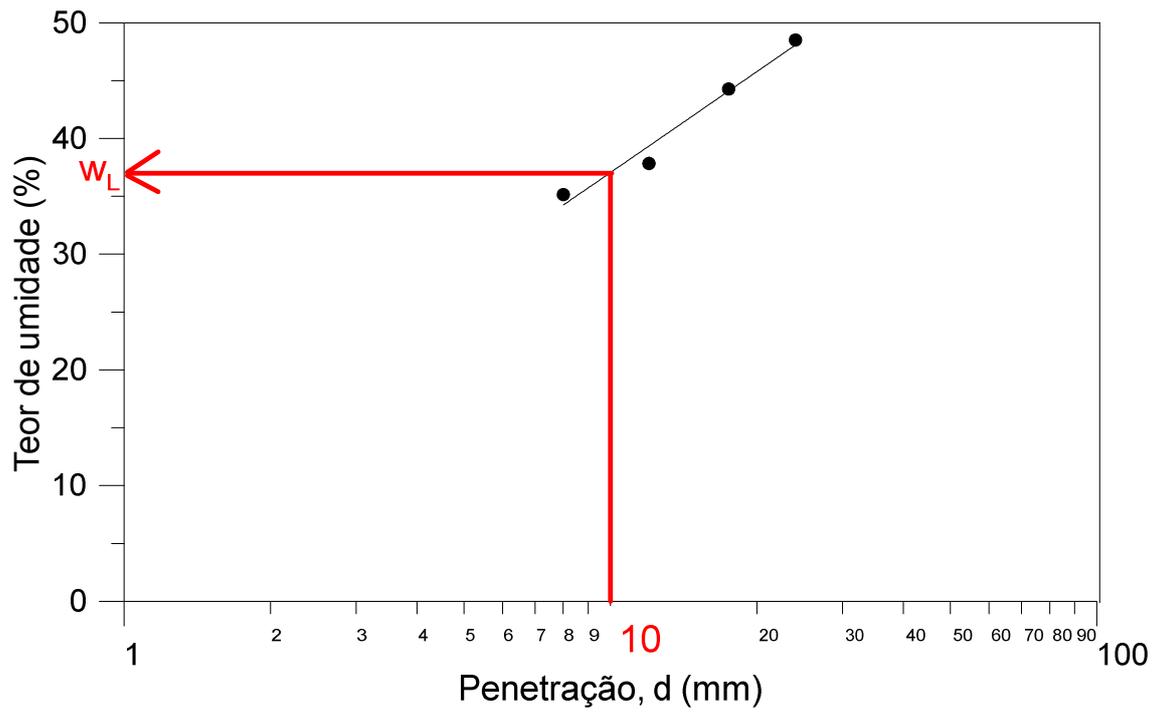


Fig. A.2 - Resultado do ensaio de wL através do aparelho Fall Cone – Vertical 1 (0,30m)

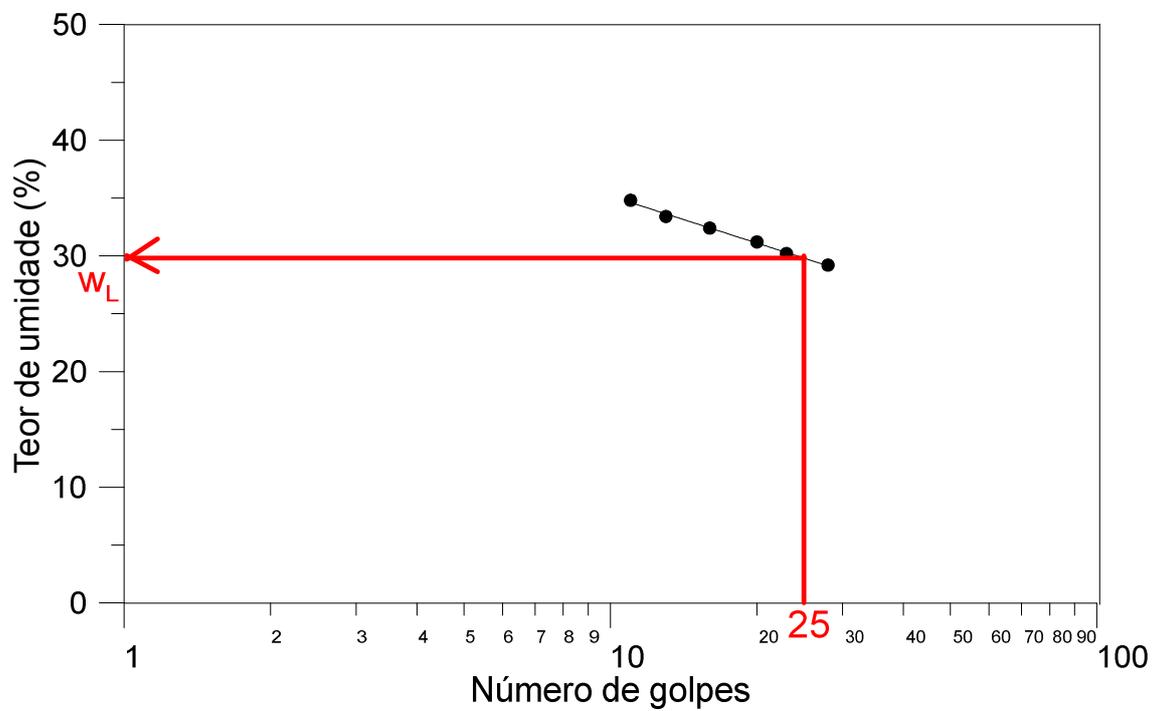


Fig. A.3 - Resultado do ensaio de wL através do aparelho de Casagrande – Vertical 1 (0,45m)

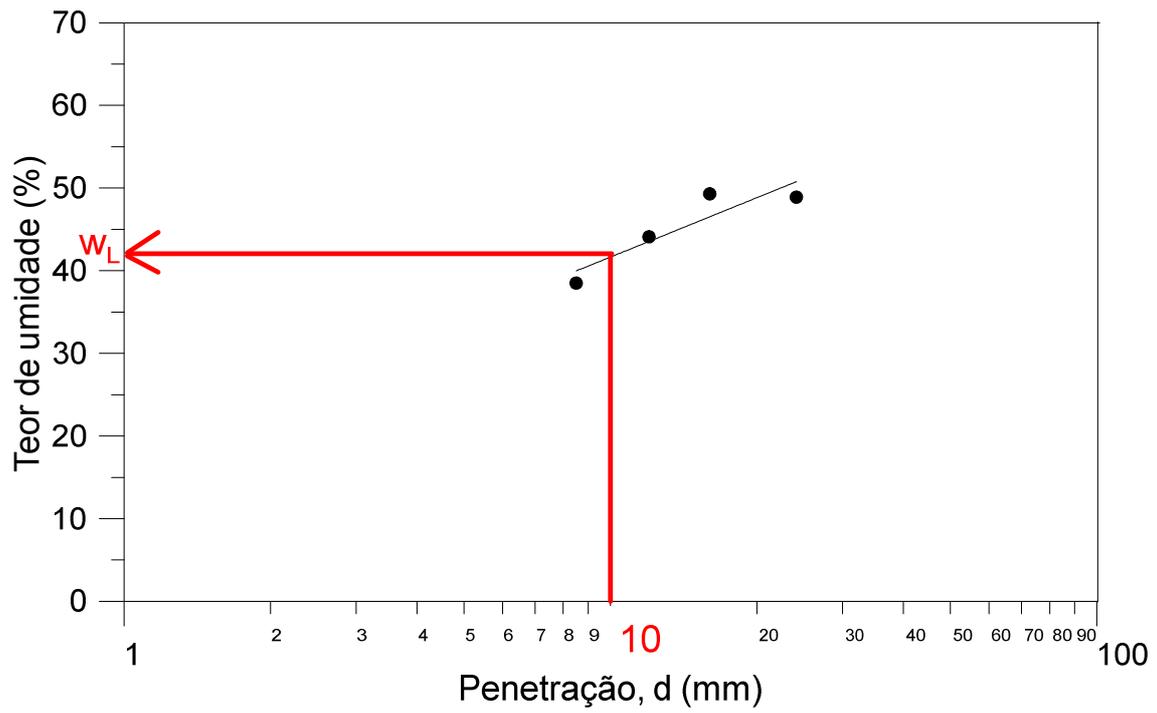


Fig. A.4 - Resultado do ensaio de wL através do aparelho Fall Cone – Vertical 1 (0,45m)

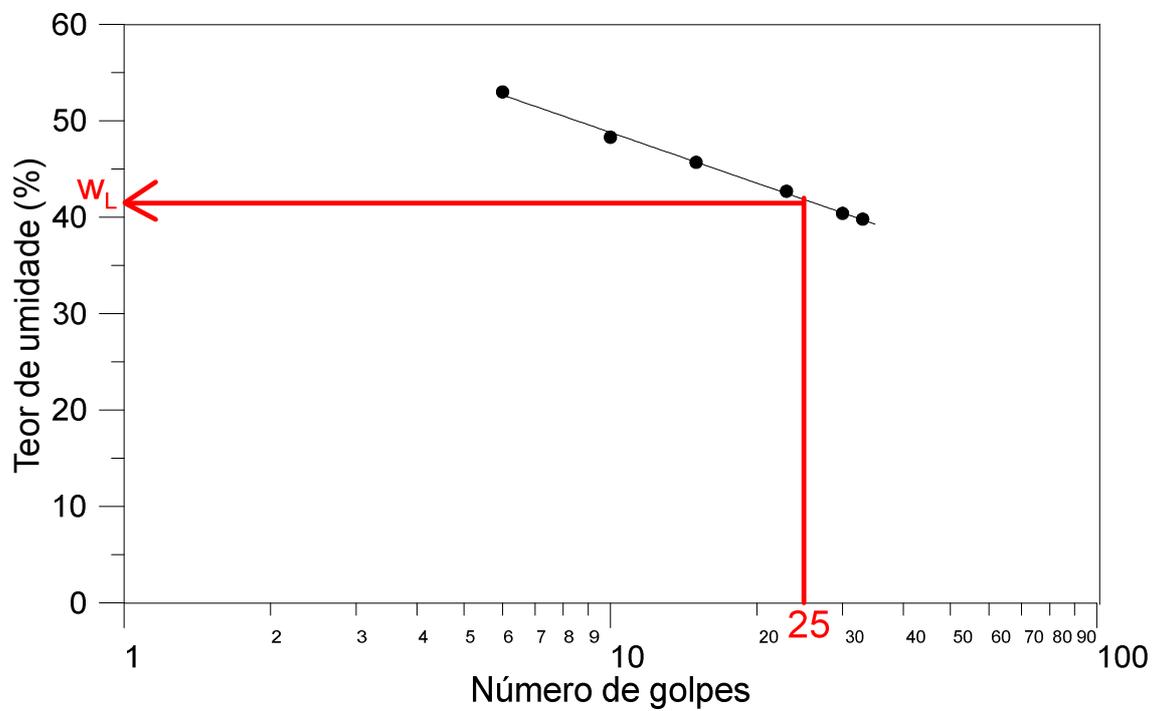


Fig. A.5 - Resultado do ensaio de wL através do aparelho de Casagrande – Vertical 2 (0,45m)

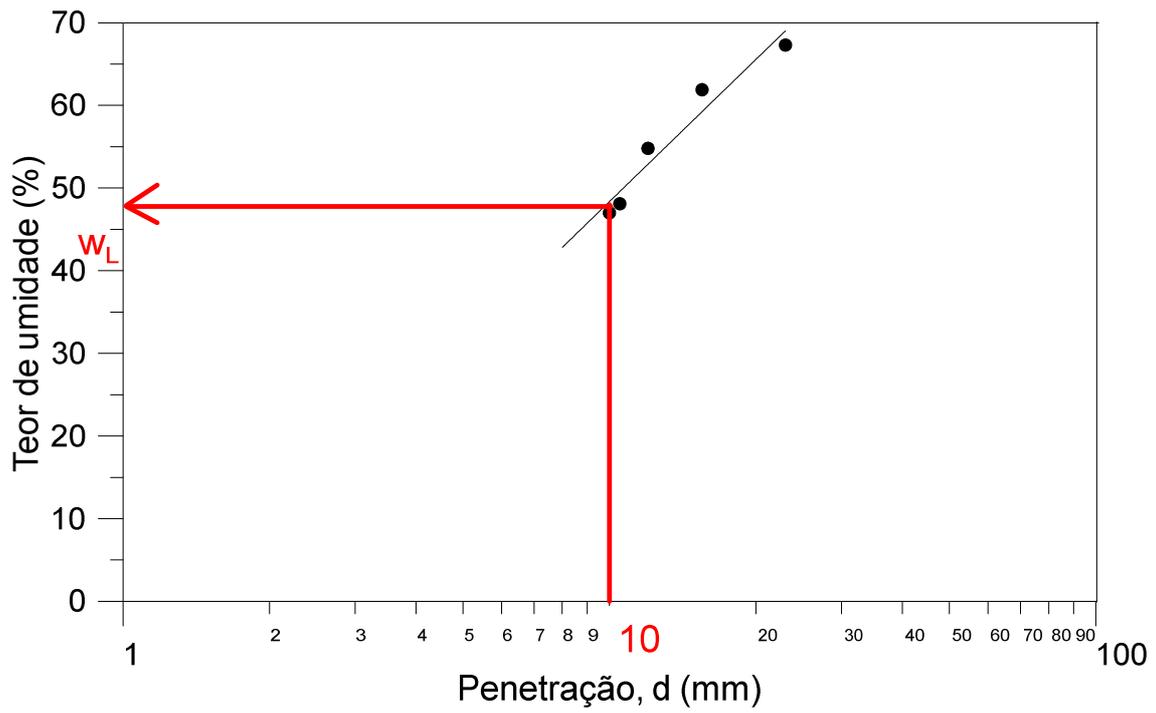


Fig. A.6 - Resultado do ensaio de w_L através do aparelho Fall Cone – Vertical 2 (0,45m)

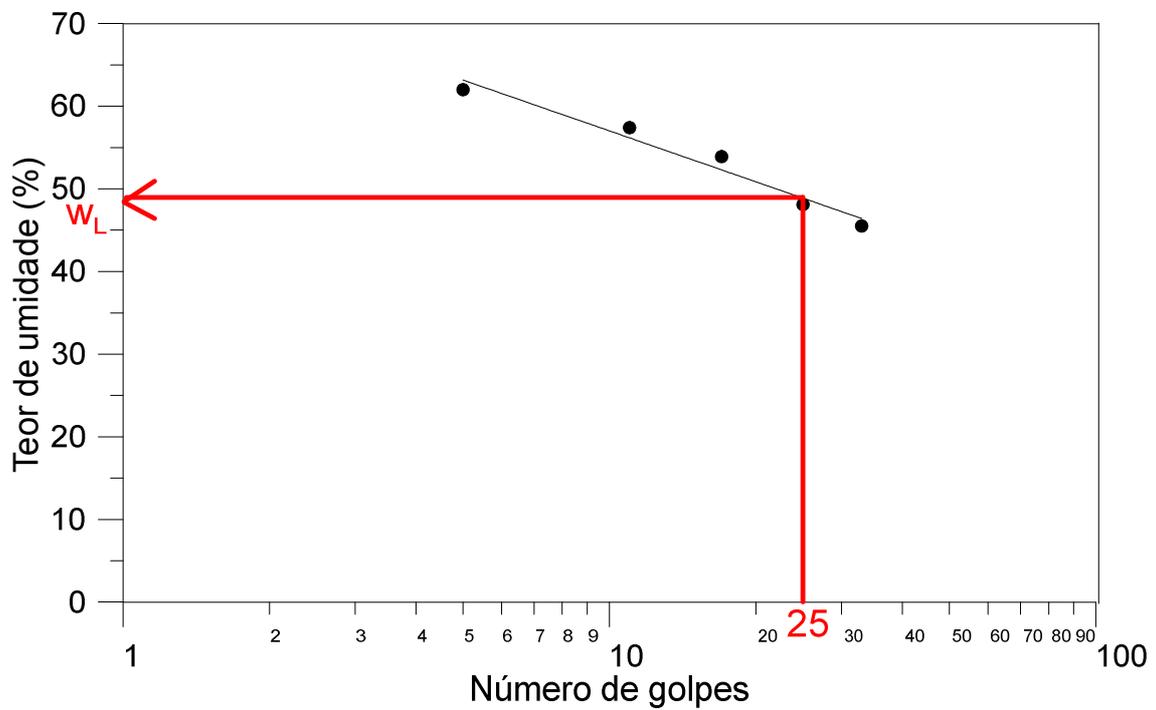


Fig. A.7 - Resultado do ensaio de w_L através do aparelho de Casagrande – Vertical 2 (0,70m)

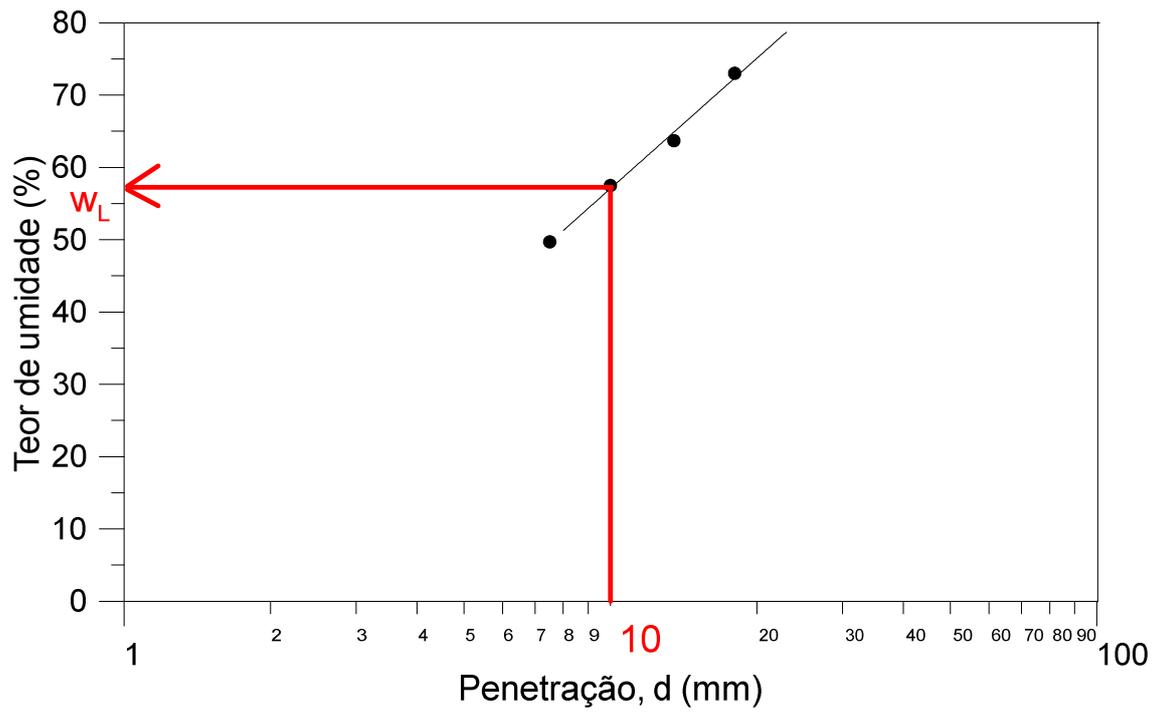


Fig. A.8 - Resultado do ensaio de w_L através do aparelho Fall Cone – Vertical 2 (0,70m)