

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA**  
**CAMPUS PATOS**  
**CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JANILSON LEANDRO BATISTA DA SILVA**

**ESTIMATIVA DO LIMITE DE LIQUIDEZ DOS SOLOS FINOS PELA MESA DE  
CONSISTÊNCIA**

**PATOS - PB**

**2025**

**JANILSON LEANDRO BATISTA DA SILVA**

# **ESTIMATIVA DO LIMITE DE LIQUIDEZ DOS SOLOS FINOS PELA MESA DE CONSISTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – *Campus* Patos, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

**Orientador (a):** Prof. MSc. Valteson da Silva Santos

**PATOS - PB**

**2025**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CAMPUS PATOS/IFPB**

S586e Silva, Janilson Leandro Batista da.  
Estimativa do limite de liquidez dos solos finos pela mesa de consistência / Janilson Leandro Batista da Silva. - Patos, 2025.  
30 f. :il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Civil)-Instituto Federal da Paraíba, Campus Patos-PB, 2025.

Orientador(a): Prof. MSc. Valteson da Silva Santos.

1. Mecânica dos solos-Solos 2. Geotecnia 3. Limite de liquidez-solos finos 4. Flow table I. Título II. Santos, Valteson da Silva III. Instituto Federal da Paraíba.

CDU – 624.131

Ficha catalográfica elaborada por Lucikelly Oliveira CRB 15/574

**JANILSON LEANDRO BATISTA DA SILVA**

**ESTIMATIVA DO LIMITE DE LIQUIDEZ DOS SOLOS FINOS PELA MESA DE  
CONSISTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil  
do Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Paraíba – *Campus* Patos, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Engenheiro Civil.

**APROVADO EM:14/ 08 /2025**

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Me. VALTESON DA SILVA SANTOS - Orientador  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Eng. Me. ALLAN BENÍCIO SILVA DE MEDEIROS - Examinador Externo  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Eng. Me. ROMÁRIO STÉFFANO AMARO DA SILVA - Examinador Externo  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela vida e pelas oportunidades que tive, agradeço por me sustentar em momentos difíceis e de desespero.

Agradeço aos meus pais, Josivan e Ligia que sempre me apoiaram nos meus sonhos me motivando todos os dias e não deixando nada faltar, aliviando o processo até aqui.

Como forma de maior agradecimento, quero dedicar este trabalho à minha falecida avó, que foi uma das pessoas mais importantes dessa trajetória. Foi ela quem me inspirou a ser quem sou e que sonhava em me ver como engenheiro. Mesmo não sendo possível em vida, sei que ela está feliz e orgulhosa de mim. Obrigado por tudo, Maria Gorete.

Agradeço aos professores e servidores do Instituto Federal da Paraíba - Patos pelos ensinamentos que tanto contribuíram para minha formação acadêmica.

Em especial ao Prof. MSc. Valteson da Silva Santos, por me orientar nesse trabalho, por sua paciência e seus grandes ensinamentos que serão de grande ajuda em minha carreira. Agradeço também aos professores Deividly Araujo, Diego Paiva, Guilherme Vaz e Henrique Maciel pelos conhecimentos que me trouxeram em sala e em lições de vida. Vocês foram de extrema importância, obrigado!

Agradeço a Kayra Grego por estar ao meu lado e por me inspirar a ser alguém melhor; à professora Chalimar Grego, por todo o apoio na construção deste trabalho; e ao meu grande amigo Jordy Medeiros, por ser meu braço direito e por sempre me apoiar em tudo que preciso. Aos meus amigos Anderson Bezerra, Ismael Pereira, Mayara Dias, Flavio Xavier, Gabriel Morais, Gabriel Silva, Diogenes Freitas, Pedro Terto, Douglas Franco, Ewerton Fernandes, Guilherme Machado, Ricardo Pedrosa e Fabricio Cândido pelo apoio e pela amizade ao longo deste curso.

## RESUMO

O limite de liquidez (LL) é uma das propriedades fundamentais utilizadas na classificação e no entendimento do comportamento reológico de solos finos. Este trabalho apresenta uma metodologia alternativa para estimar o LL, utilizando a *flow table* (mesa de consistência), equipamento tradicionalmente empregado na caracterização de argamassas. Foram analisadas 12 amostras de solos finos do estado do Rio Grande do Norte, e os ensaios foram realizados com diferentes teores de umidade, permitindo o cálculo da resistência ao cisalhamento com base em modelos teóricos propostos por Kim, Cortes e Santamarina (2007). quatro abordagens analíticas foram utilizadas: regressão logística, método virtual, interpolação isolada e interpolação polinomial com três diferentes resistências de referência (1,7 kPa, 2,5 kPa e 3,0 kPa). Os resultados foram comparados com os valores obtidos pelo método tradicional de Casagrande, considerado padrão de referência. O método virtual destacou-se por apresentar maior acurácia e menor dispersão, com erros relativos inferiores a 10% em 75% das amostras testadas. A análise estatística dos erros, por meio de boxplots e correlação entre erro relativo e LL, evidenciou a eficiência do modelo, especialmente para solos com maior plasticidade. Os resultados demonstram o potencial da *flow table* como método alternativo para estimar o LL, com aplicações promissoras em obras geotécnicas, especialmente em ambientes subterrâneos. Contudo, devido à natureza inovadora da proposta, são recomendados estudos adicionais para validação e ampliação da metodologia.

**Palavras-chave:** Geotecnia; flow table; solos finos; resistência ao cisalhamento; método alternativo

## ABSTRACT

**Liquid limit (LL)** is one of the fundamental properties used in the classification and understanding of the rheological behavior of fine soils. This study presents an alternative methodology for estimating LL using the **flow table**, a device traditionally employed in mortar characterization. Twelve fine soil samples from the state of Rio Grande do Norte (Brazil) were analyzed, and tests were performed with different moisture contents, allowing the calculation of shear strength based on theoretical models proposed by **Kim, Cortes, and Santamarina (2007)**. Four analytical approaches were applied: logistic regression, virtual method, isolated interpolation, and polynomial interpolation with three different reference strengths (1.7 kPa, 2.5 kPa, and 3.0 kPa). The results were compared with values obtained by the traditional **Casagrande method**, considered the standard reference. The virtual method stood out by showing higher accuracy and lower dispersion, with relative errors below 10% in 75% of the tested samples. Statistical analysis of the errors, through boxplots and correlation between relative error and LL, highlighted the efficiency of the model, especially for highly plastic soils. The findings demonstrate the potential of the flow table as an alternative method for estimating LL, with promising applications in geotechnical works, particularly in underground environments. However, due to the innovative nature of the proposal, further studies are recommended for validation and methodological expansion.

**Keywords:** Geotechnics; flow table; fine soils; shear strength; alternative method

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mesa de consistência e solo moldado em baixa umidade **Error! Bookmark not defined.**6

Figura 2 – Moldagem da amostra e Medição do espalhamento com paquímetro. .... **Error! Bookmark not defined.**6



## LISTA DE TABELAS

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Limite de consistência das amostras.....                | 17 |
| Tabela 2 – Erros relativos.....                                    | 25 |
| Tabela 3 – Erros relativos comparados ao método de Casagrande..... | 26 |

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1. Comportamento dos solos.....                                      | 20 |
| Gráfico 2. boxplots erros absolutos .....                                    | 25 |
| Gráfico 3. Analise gráfica entre o limite de liquidez e o erro relativo..... | 26 |

## SUMÁRIO

|       |                                                                          |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....                                                          | 12 |
| 2     | MATERIAIS E MÉTODOS .....                                                | 15 |
| 2.1   | COLETA DAS AMOSTRAS .....                                                | 15 |
| 2.2   | DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DOS SOLOS PELA MESA DE<br>CONSISTÊNCIA..... | 15 |
| 2.3   | ASPECTOS TEÓRICOS .....                                                  | 17 |
| 2.4   | MODELOS UTILIZADOS PARA INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....                    | 19 |
| 2.4.1 | GEOMETRIA DAS CURVAS .....                                               | 19 |
| 2.4.2 | MÉTODO VIRTUAL .....                                                     | 20 |
| 2.4.3 | INTERPOLAÇÃO ISOLADA .....                                               | 21 |
| 2.4.4 | INTERPOLAÇÃO POLINOMIAL .....                                            | 21 |
| 3     | RESULTADOS E DISCURSSÕES .....                                           | 23 |
| 3.1   | ERROS RELATIVOS .....                                                    | 24 |
| 3.2   | ERRO RELATIVO VERSUS LIMITE DE LIQUIDEZ.....                             | 26 |
| 4     | CONCLUSÃO.....                                                           | 28 |
| 5     | REFERÊNCIAS .....                                                        | 29 |

# 1 INTRODUÇÃO

O Limite de Liquidez (LL) é comumente entendido como o teor de umidade a partir do qual um solo plástico começa a se comportar como um fluido, o que implica na não existência de resistência a esforços cisalhantes. A mudança dos estados de consistência nos solos foi pioneiramente estudada por Atterberg (1911). Para solos, entretanto, O’Kelly *et al.* (2018) destaca que tal condição de resistência nula nunca é alcançada, de modo que o LL consiste em um teor de umidade associado a um baixo valor de resistência ao cisalhamento. Casagrande (1932) aponta a resistência ao cisalhamento não drenada dos solos no LL como sendo aproximadamente 2,5 kPa. Wroth e Wood (1978), com base em dados disponíveis na época, consideraram um valor médio de resistência ao cisalhamento não drenada igual a 1,7 kPa no LL. Koumoto e Houlsby (2001) estimaram como resistência ao cisalhamento não drenada no LL um valor de 1,83 kPa para uma argila de alta plasticidade. O’Kelly (2013) reportou valores médios iguais a 1,15 kPa e 0,93 kPa, respectivamente, para os solos finos e para os sedimentos orgânicos estudados em seu trabalho. Tripathy e Mishra (2010) apontam que para a maioria dos solos finos, esses valores de resistência se encaixam em uma faixa de 1,6 até 3 kPa. Dessa forma, não é possível determinar um único valor de resistência ao cisalhamento não drenada para solos no LL, uma vez que ela pode variar de acordo com o tipo de solo,

Casagrande (1932) contribuiu para a introdução na engenharia civil dos conceitos oriundos do trabalho de Atterberg, principalmente ao elaborar ensaios de laboratório para a determinação dos limites de consistência de um solo. Especificamente para o caso do LL, desenvolveu uma metodologia baseada no uso de um equipamento portátil que posteriormente passou a ser conhecido como Copo de Casagrande. A mecânica e os demais detalhes concernentes a esse ensaio, que se encontra normatizado na ASTM D4318 – 17e1, foram detalhadamente apresentados e discutidos no trabalho de Haigh (2012). Casagrande (1958) revisou alguns aspectos relativos ao próprio ensaio e identificou graves problemas, principalmente relacionados à falta de padronização entre os equipamentos fornecidos por diferentes fabricantes. O autor também reconheceu que o ensaio se trata, na realidade, de uma medição da resistência do solo ao cisalhamento dinâmico, fato que prejudica o estabelecimento de critérios de comparação uniformes para solos coesivos de diferentes naturezas. Outros fatores também são apontados como desvantagens do ensaio, tais como a dificuldade de repetibilidade devida a subjetividades no procedimento, e.g. o julgamento do operador para o

critério de fechamento do sulco (HRUBESOVA, LUNACKOVA E BRODZKI, 2016; KAYABALI *et al.*, 2016; TRIPATHY; MISHRA, 2010). Todavia, o ensaio de LL criado por Casagrande segue sendo o mais empregado para solos em todo o mundo, principalmente em função da sua rapidez, praticidade e baixo custo.

Uma alternativa tecnicamente consagrada ao ensaio de Casagrande, bastante difundida na Europa, é o *fall cone test* (cone penetrometer test). Embora possua adaptações em diferentes normatizações para diversos países, esse ensaio consiste em liberar um cone com altura de queda e peso normatizados, em queda livre, sobre um solo. De posse da penetração desse cone no solo ao longo do tempo, se obtém a unidade referente ao LL. Dados da literatura apontam que os valores de LL para um mesmo solo, obtidos pelo método de Casagrande e o *fall cone test*, apresentam variações entre si (LEROUEIL e LE BIHAN, 1996; DI MATTEO, 2012; CREVELIN e BICALHO, 2019). Baseado nessas variações e nas limitações do método de Casagrande, existem autores que apontam o *fall cone test* como sendo mais vantajoso é preciso (CAMPBELL, 1975; KOUMOTO E HOULSBT, 2001).

A busca por alternativas fez com que outros métodos para obter o LL fossem desenvolvidos (KAYABALY *et al.*, 2016; MOUSAVI *et al.*, 2021). Nesse contexto, Oliveira *et al.* (2019) tentaram determinar o LL de misturas de solo por meio de uma *Flow Table*, adaptando uma metodologia proposta pela EFNARC (2005) para a avaliação do efeito plastificante de aditivos condicionantes aplicados a solos não coesivos. A *flow table* (ASTM C230M - 21) é um aparato originalmente desenvolvido para a determinação da consistência de argamassas, composta por uma bandeja circular metálica e lisa, instalada de tal modo que possa ser erguida a uma determinada altura e posteriormente liberada para cair. No ensaio original, molda-se sobre a bandeja metálica uma forma troncocônica de argamassa (com dimensões definidas por um molde metálico rígido) que posteriormente é submetida a um determinado número de quedas da mesa de consistência. Ao fim do ensaio, o abatimento da forma troncocônica é medido e relacionado à consistência do material.

Oliveira *et al.* (2019) concluíram que solos com os mesmos índices de consistência não necessariamente possuem comportamentos similares quando submetidos ao ensaio. Na ocasião, os autores não conseguiram correlacionar os resultados obtidos com a mesa de consistência aos valores de LL das misturas de solos ensaiadas. Apesar disso, os autores ressaltaram o potencial da aplicação da mesa de consistência na geotecnia, especialmente no caso de obras subterrâneas, podendo substituir o *Slump Test*, atualmente muito empregado na avaliação do risco da ocorrência de *clogging* na câmara de escavação e no sistema de transporte do solo escavado de tuneladoras. Além disso, ensaios utilizando a *flow table* podem produzir

melhores resultados referentes ao comportamento de misturas de solos e aditivos (condicionantes) utilizados em escavações subterrâneas por meio de tuneladoras do tipo *Earth Balanced Pressure Machines* (EPBM).

Tendo em vista o potencial de utilização da *flow table* na avaliação de características de geomateriais diretamente relacionadas aos seus limites de consistência, o presente trabalho objetiva apresentar uma metodologia inovadora para a estimar o LL de solos coesivos, a partir de ensaios com *flow table*. Nesse sentido, além de fornecer uma alternativa viável aos ensaios tradicionais para determinação do LL, visa possibilitar a otimização do emprego da *flow table* em obras geotécnicas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 COLETA DAS AMOSTRAS

Coletou-se 12 amostras de solos finos do estado do Rio Grande do Norte. O procedimento de retirada das amostras seguiu a NBR 9604:2016 - **Condições exigíveis para abertura de poço de inspeção, de trincheira e para retirada de amostras**. A Tabela 1 apresenta os resultados dos limites de consistência das amostras.

**Tabela 1: Limites de consistência das amostras.**

| <b>Amostra</b> | <b>LP (%)</b> | <b>LL (%)</b> | <b>IP (%)</b> |
|----------------|---------------|---------------|---------------|
| A1             | 16,5%         | 15,2%         | 1,3%          |
| A2             | 21,6%         | 20,4%         | 1,2%          |
| A3             | 15,7%         | 15,3%         | 0,4%          |
| A4             | 20,6%         | 10,4%         | 10,2%         |
| A5             | 27,2%         | 15,2%         | 12,0%         |
| A6             | 17,4%         | 13,9%         | 3,5%          |
| A7             | 64,6%         | 34,5%         | 30,0%         |
| A8             | 20,1%         | 10,4%         | 9,7%          |
| A9             | 38,0%         | 15,1%         | 22,9%         |
| A10            | 53,7%         | 23,7%         | 30,0%         |
| A11            | 50,4%         | 27,2%         | 23,2%         |
| A12            | 49,9%         | 28,2%         | 21,7%         |

### 2.2 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DOS SOLOS PELA MESA DE CONSISTÊNCIA

O ensaio de consistência dos solos pela mesa *flow table* (Figura 1-a), foi feito com amostras secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira de abertura 0,42 mm. As amostras foram quarteadas e pesadas em quantidades de 2,5 kg. Foram então misturadas com água destilada em umidade ligeiramente superior ao limite de plasticidade.

A fim de seguir o tempo de amolgamento de 15 min das amostras proposto pela NBR 6459:2016, alterou-se o tempo de mistura final proposto pela NBR 13276:2016 de 1 min para 15 min.



**Figura 1 (a) Mesa de consistência utilizada - (b) Solo moldado em baixa umidade.**

Cada amostra foi ensaiada em diferentes teores de umidade na mesa de consistência (Figura 2-a). O ensaio consistiu na aplicação de 30 golpes da mesa em um intervalo de 30s, após o qual mediu-se o espalhamento final com paquímetro digital de 0,01 mm de resolução (Figura 2-b). Determinou-se o teor de umidade de cada etapa pelo método da estufa.



**Figura 2 (a) Moldagem da amostra (b) Medição do espalhamento com paquímetro.**

O ensaio foi repetido com aumentos de 3% no teor de umidade até que fossem obtidas, no mínimo, seis determinações. Cada nova etapa do ensaio inicia-se com a adição de água e mistura na argamassadeira por 60s. Considerando os procedimentos necessários para início de uma nova etapa e a importância do comportamento reológico da mistura solo-água, padronizou-se um tempo de 4 min entre a finalização de uma mistura e o início da próxima.

A metodologia de preparo das amostras para o ensaio de Limite de Liquidez pela mesa de consistência obedeceu ao recomendado pela ASTM D4318. Diante da dificuldade enfrentada devido a algumas amostras de solo com umidade próxima ao limite de liquidez grudarem no



molde, utilizou-se papel filtro para café, número 103, no interior do molde facilitando a desmoldagem e mantendo a geometria do troncocônico.

Para determinação da massa específica aparente úmida de cada mistura recorreu-se ao artifício de pesar a bandeja e espátula com o solo misturado antes e após a moldagem do solo no tronco cônico. A diferença entre as pesagens correspondeu à massa de solo no interior do molde.

### 2.3 ASPECTOS TEÓRICOS

Kim, Cortes e Santamarina (2007), pontuam que a relação entre o espalhamento e o número de golpes dados na amostra é do tipo hiperbólico, sendo que à medida que são dados golpes na mesa o espalhamento aumenta. Os autores também destacam que o espalhamento depende da resistência ao cisalhamento da amostra analisada, da forma das partículas, da resistência ao escoamento e da altura inicial do corpo de prova. Os autores demonstraram analiticamente o envolvimento de três energias no processo: energia potencial ( $E_P$ ), energia de deformação ( $E_D$ ) e energia de atrito ( $E_{BS}$ ) através do cisalhamento da base da mesa.

A Equação (1) representa a energia potencial disponível no sistema em função da massa de solo e do deslocamento vertical da amostra. A Equação (2) expressa a energia de deformação da amostra, associada ao cisalhamento que ocorre durante o espalhamento. A Equação (3) refere-se à energia dissipada por atrito na base da mesa devido ao movimento do material. Por fim, a Equação (4) apresenta a expressão utilizada para estimar a tensão média de cisalhamento envolvida no processo. O balanço de energia é:

$$E_P = E_D + E_{BS}$$

Definidos os parâmetros como:

$$E_P = V_0 \cdot \gamma_t \cdot \left\{ h_d + \frac{V_0}{2\pi} \left( \frac{1}{R_{i-1}^2} - \frac{1}{R_i^2} \right) \right\} \quad (1)$$

$$E_D = \tau_0 \cdot \left( \frac{R_i^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2} \right) \cdot V_0 \quad (2)$$

$$E_{BS} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \tau_{bs} \cdot \left( \frac{R_i}{R_{i-1}} - 1 \right) \cdot R_i^3 \quad (3)$$

$$\tau_{bs} = 5,16 \cdot (\tau_0 \cdot 0,145)^{0,44} \quad (4)$$

Onde:

$V_0$  é o volume do tronco cônico;

$\gamma_t$  é o peso específico da amostra;

$h_d$  é a altura de queda da mesa (0,015m);

$R_n$  é o raio do corpo de prova no  $n$ ésimo golpe da mesa;

$\tau_0$  é a resistência ao cisalhamento da amostra e

$\tau_{bs}$  resistência ao cisalhamento da base;

Todas as variáveis serão utilizadas em unidades do Sistema internacional.

Ajustando o balanço de energia com as equações anteriores e isolando a tensão média de cisalhamento  $\tau_0$ , obtém-se a forma consolidada apresentada na Equação (5), a qual permite estimar esse parâmetro a partir das variáveis geométricas do ensaio.

$$V_0 \cdot \gamma_t \cdot \left\{ h_d + \frac{V_0}{2\pi} \left( \frac{1}{R_{i-1}^2} - \frac{1}{R_i^2} \right) \right\} = \tau_0 \cdot \left( \frac{R_i^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2} \right) \cdot V_0 + \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot 5,16 \cdot (\tau_0 \cdot 0,145)^{0,44} \cdot \left( \frac{R_i}{R_{i-1}} - 1 \right) \cdot R_i^3 \quad (5)$$

Tal equação tem todos os parâmetros conhecidos ao final do ensaio, com exceção de  $\tau_0$  que então poderá ser determinado pelo ensaio na mesa de consistência.

Ambos os lados da equação dependem do parâmetro  $\tau_0$ , e este não pode ser escrito de forma explícita na equação. Recorreu-se ao uso do Excel para encontrar, para cada teor de umidade, qual valor de  $\tau_0$ , igualava os dois lados da equação. Desta forma, obteve-se para cada amostras as curvas de teor de umidade versus  $\tau_0$ .

A equação (5), apresenta a conversão de energia potencial em energia de deformação quando o solo moldado se deforma de um diâmetro  $R_{i-1}$  para um diâmetro  $R_i$ . Conforme já citado, durante o ensaio foram aplicados 30 golpes na amostra e medido apenas o diâmetro final. Dessa forma, foi necessário se obter uma relação matemática entre o número de golpes aplicado ( $n$ ) e o espalhamento ( $F$ ).

Com base nos dados experimentais apresentados por Kim, Cortes e Santamarina (2007), obteve-se a Equação (6), que define o espalhamento da amostra ( $F$ ) como a relação entre o diâmetro inicial e o diâmetro obtido após  $n$  golpes. Em seguida, considerando a aplicação da Equação (5) para cada intervalo e somando os respectivos termos ao longo do processo, tem-se a Equação (7), a qual expressa o balanço global de energia por meio da soma das energias potencial, de deformação e de atrito em cada etapa.

$$F = \frac{n}{\left( \frac{0.51n + 1}{\left( 0.953 - \frac{1}{1 + \frac{2.35e^{27.532}}{10^8}} \right) (0.132 \ln(D) + 0.096) + \left( \frac{1}{1 + \frac{2.35e^{27.532}}{10^8}} \right) (0.00461e^{3.87D})} \right)} \quad (6)$$

Onde:

$n$  é o número de golpes;

$D$  é o espalhamento após 30 golpes.

Desta forma, a equação 5 aplicada a cada intervalo pode ser rescrita como:

$$\sum E_P = \sum E_D + \sum E_{BS} \quad (7)$$

## 2.4 MODELOS UTILIZADOS PARA INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

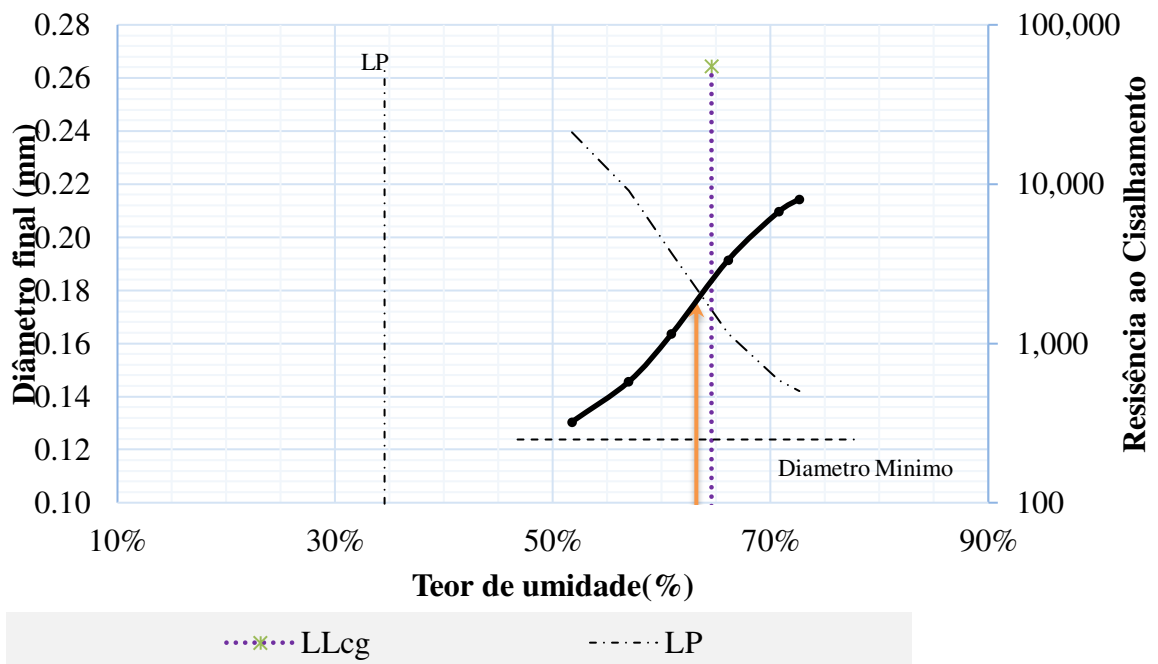
A seguir são descritos os modelos utilizados para interpretação dos dados.

### 2.4.1 GEOMETRIA DAS CURVAS

O gráfico 1 ilustra o comportamento da amostra de solo A7, apresentando semelhança com as curvas em S, ou curva sigmoide. Essas curvas, aplicadas ao ensaio de mesa de consistência, representam a transição do estado plástico para o estado líquido, fenômeno que ocorre devido à variação do teor de umidade, a qual reduz a resistência ao cisalhamento do solo conforme estudado por Atterberg (1911).

A curva pode ser interpretada em duas partes. A primeira, caracterizada por uma concavidade voltada para cima, representa o final do estado plástico, no qual aumentos iguais de teor de umidade têm efeitos cada vez mais significativos no espalhamento final. A segunda parte da curva tem concavidade voltada para baixo. Isso significa que aumentos iguais e sucessivos no teor de umidade têm cada vez menos efeito no espelhamento da amostra. Por hipótese, foi definido que o teor de umidade na fronteira entre os dois trechos representa o teor de umidade da amostra, representado por uma seta vertical.

**Gráfico 1: Comportamento dos solos.**



Fonte: acervo pessoal

#### 2.4.2 MÉTODO VIRTUAL

Utilizou-se uma adaptação da equação matemática de Kim, Cortes e Santamarina (2007), para obter a resistência não drenada de um solo ensaiado no aparelho de Casagrande. Segundo Andrade e Maia (2025), com esse modelo é possível calcular a resistência ao cisalhamento considerando a energia aplicada, teor de umidade, número de golpes e um fator de ajuste considerando a umidade média.

$$\tau = \left( \frac{\left[ N \cdot V \cdot \left( \frac{(1 + W) \cdot G_s \cdot \lambda_w}{1 + W \cdot \frac{G_s}{S}} \right) \cdot g \cdot h \right]}{\frac{A \cdot d}{5,16}} \right)^a \quad (8)$$

$\tau$  é a resistência ao cisalhamento da amostra (kPa)

$N$  é o número de golpes

$V$  é o volume da amostra (m<sup>3</sup>)

$W$  teor de umidade

$G_s$  é a densidade

$\lambda_w$  = peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>)

$g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$h$  é a altura de queda (m)

$A$  é a área da concha preenchida ( $m^2$ )

$d$  é a distância percorrida pela massa de solo (m)

$a$  é o fator de ajuste definido por Andrade e Maia (2025).

O método, denominado virtual, tem como objetivo calcular a quantidade de golpes ( $N$ ) necessários para o fechamento da ranhura no aparelho de Casagrande, caso a amostra tivesse sido ensaiada neste equipamento em vez da mesa de consistência. Para isso, utilizou-se uma equação de correlação entre os dois métodos. A partir desse método foi possível obter a curva teor de umidade versus número de golpes. A partir dessa curva, obteve-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes usando regressão linear. Da mesma forma que para os dados tradicionais de limite de liquidez obtidos pelo aparelho de Casagrande, obteve-se uma correlação semilogaritmica entre o número de golpes virtual e o teor de umidade.

#### 2.4.3 *INTERPOLAÇÃO ISOLADA*

Utilizando a equação completa de Kim, Cortes e Santamarina (2007), foi estimada a resistência ao cisalhamento para cada teor de umidade de cada amostra. Uma vez que não há fórmula explícita para a resistência ao cisalhamento na equação, utilizou-se um método numérico iterativo para obter este parâmetro. Utilizou-se a ferramenta Solver do software MS EXCEL. A interpolação isolada considera apenas dois pontos consecutivos da amostra, cujas resistências ao cisalhamento estão imediatamente acima e abaixo do valor de referência adotado neste estudo, 2,5 kPa. Busca-se um valor entre esses dois pontos que será responsável por estimar o teor de umidade correspondente, que é então definido como o limite de liquidez segundo esse método.

#### 2.4.4 *INTERPOLAÇÃO POLINOMIAL*

Com base nos dados experimentais de resistência ao cisalhamento e teor de umidade obtidos por meio da mesa de consistência, foram aplicadas interpolações polinomiais com o objetivo de estimar o teor de umidade correspondente a determinados valores de resistência. Essa abordagem permitiu ajustar curvas aos dados obtidos em cada amostra, possibilitando a estimativa precisa da umidade associada a resistências específicas.

Considerando os valores de resistência ao cisalhamento discutidos na literatura, e visando analisar a sensibilidade dos critérios adotados para definição do limite de liquidez, foram selecionados três valores de referência: 1,7 kPa, 2,5 kPa e 3,0 kPa. Cada um desses valores foi utilizado como base para interpolação polinomial

### 3 RESULTADOS E DISCURSSÕES

Utilizando a mesa de consistência (*flow table*), foram analisadas 12 amostras de solo, por meio dos métodos: Regressão logística, método virtual, interpolação isolada, interpolação polinomial (2,5 kPa), (3,0 kPa), (1,7 kPa). Com o objetivo de verificar a viabilidade de estimar o limite de liquidez dessas amostras. Os resultados obtidos foram comparados aos limites de liquidez determinados pelo aparelho de Casagrande, com o intuito de avaliar a acurácia dos modelos.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para cada amostra analisada. Na primeira coluna, encontra-se a identificação de cada uma das amostras. A segunda coluna exibe os valores do limite de liquidez determinados por meio do equipamento Casagrande, considerado o método padrão de referência. As demais colunas contêm os valores do limite de liquidez obtidos a partir dos diferentes métodos alternativos avaliados neste estudo.

**Tabela 2: Resultado dos métodos.**

| Amostras | LL<br>Casagrande | MÉTODOS                |                      |                         |                                         |                                        |                                         |
|----------|------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
|          |                  | Regressão<br>logística | LL método<br>virtual | interpolação<br>isolada | Interpolação<br>polinomial<br>(2,5 kPa) | interpolação<br>polinomial<br>(3,0kPa) | interpolação<br>polinomial<br>(1,7 kPa) |
| A1       | 16%              | 19%                    | 15%                  | 18%                     | 18%                                     | 17%                                    | 19%                                     |
| A2       | 22%              | 21%                    | 20%                  | 22%                     | 23%                                     | 22%                                    | 24%                                     |
| A3       | 16%              | 21%                    | 16%                  | 19%                     | 21%                                     | 20%                                    | 22%                                     |
| A4       | 21%              | 26%                    | 21%                  | 24%                     | 25%                                     | 24%                                    | 27%                                     |
| A5       | 27%              | 34%                    | 30%                  | 33%                     | 33%                                     | 32%                                    | 35%                                     |
| A6       | 17%              | 17%                    | 16%                  | 17%                     | 18%                                     | 18%                                    | 19%                                     |
| A7       | 65%              | 63%                    | 62%                  | 63%                     | 63%                                     | 63%                                    | 65%                                     |
| A8       | 20%              | 24%                    | 21%                  | 22%                     | 22%                                     | 21%                                    | 22%                                     |
| A9       | 38%              | 37%                    | 33%                  | 37%                     | 38%                                     | 37%                                    | 40%                                     |
| A10      | 54%              | 57%                    | 56%                  | 58%                     | 60%                                     | 59%                                    | 62%                                     |
| A11      | 50%              | 57%                    | 56%                  | 57%                     | 56%                                     | 56%                                    | 58%                                     |
| A12      | 50%              | 50%                    | 49%                  | 52%                     | 52%                                     | 51%                                    | 54%                                     |

Fonte: acervo pessoal

### 3.1 ERROS RELATIVOS

A tabela 3 apresenta os resultados dos métodos expressados em erros relativos, ou seja, compara o erro com o valor real do limite de liquidez.

**Tabela 3: Erros relativos comparados ao método de Casagrande.**

| Amostras | ERROS (%)           |                   |                      |                                   |                                  |                                   |
|----------|---------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|          | Regressão logística | LL metodo virtual | interpolação isolada | interpolação polinomial (2,5 kPa) | interpolação polinomial (3,0kPa) | interpolação polinomial (1,7 kPa) |
| A1       | 15,74               | 6,81              | 8,30                 | 7,94                              | 4,47                             | 15,27                             |
| A2       | 2,27                | 7,33              | 1,82                 | 5,12                              | 2,91                             | 9,82                              |
| A3       | 31,93               | 2,28              | 23,74                | 33,27                             | 30,10                            | 39,97                             |
| A4       | 24,63               | 0,43              | 18,61                | 22,41                             | 18,47                            | 30,76                             |
| A5       | 23,59               | 11,42             | 20,28                | 21,45                             | 18,19                            | 28,35                             |
| A6       | 0,54                | 8,59              | 0,39                 | 3,51                              | 1,31                             | 8,15                              |
| A7       | 2,43                | 3,28              | 1,91                 | 2,16                              | 2,16                             | 1,03                              |
| A8       | 17,55               | 3,56              | 7,56                 | 7,82                              | 5,99                             | 11,70                             |
| A9       | 1,70                | 12,66             | 1,43                 | 0,69                              | 3,22                             | 4,66                              |
| A10      | 5,41                | 4,86              | 7,41                 | 11,45                             | 9,66                             | 15,23                             |
| A11      | 13,07               | 10,38             | 12,44                | 12,06                             | 10,73                            | 14,87                             |
| A12      | 0,69                | 2,27              | 4,34                 | 4,28                              | 2,63                             | 7,79                              |

Fonte: acervo pessoal

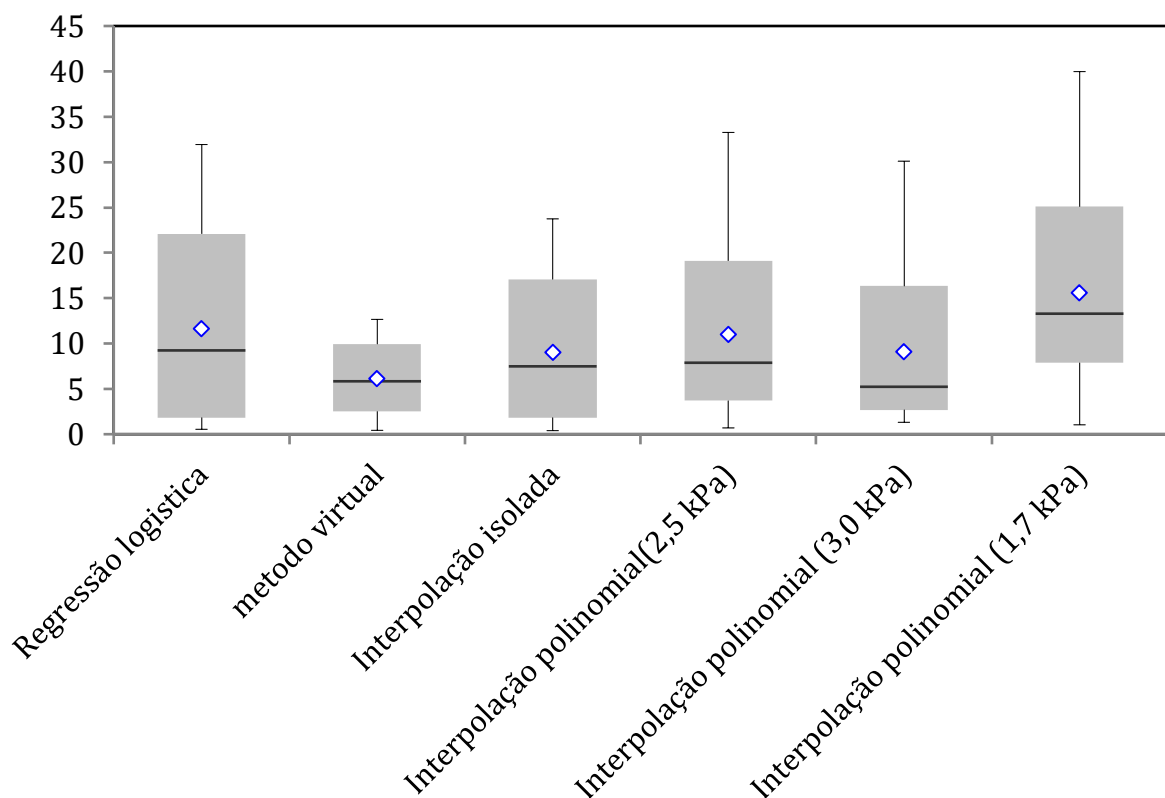
Foi adotado o critério proposto por Suits, Sheahan e Feng (2002), para avaliar a aceitabilidade dos resultados obtidos, o qual considera satisfatórios os valores que apresentam erro relativo de até 10% em relação ao método de referência. A análise dos erros relativos, apresentados na Tabela 2, revela que o método virtual foi o que obteve melhor desempenho, apresentando 9 das 12 amostras com erros inferiores a 10%. Outros métodos como o de Regressão logística, interpolação isolada e interpolação polinomial (1,7 kPa), também demonstraram resultados satisfatórios em diversas amostras. No entanto, conforme ilustrado na Tabela 2, esses métodos



apresentam variações mais expressivas em algumas amostras, com erros que ultrapassam o limite de 10%, o que indica menor consistência quando comparados ao método virtual.

O diagrama de caixa (boxplot) presente no gráfico 2 é uma representação gráfica que permite visualizar a dispersão dos dados de forma clara. Caixas mais longas indicam uma maior variação nos resultados, ou seja, os dados estão mais dispersos. Já a proximidade dos pontos em relação à linha central (mediana) sugere uma maior concentração dos valores em torno da mediana.

**Gráfico 2: boxplots erros absolutos.**



Fonte: acervo pessoal

A partir dos dados apresentados no gráfico 2, observa-se que o método virtual apresenta uma distribuição mais próxima dos resultados obtidos pelo equipamento Casagrande, evidenciando sua maior acurácia e consistência em relação aos demais métodos. A análise também permite concluir que nenhum dos dados amostrais é discrepante em relação à distribuição amostral.

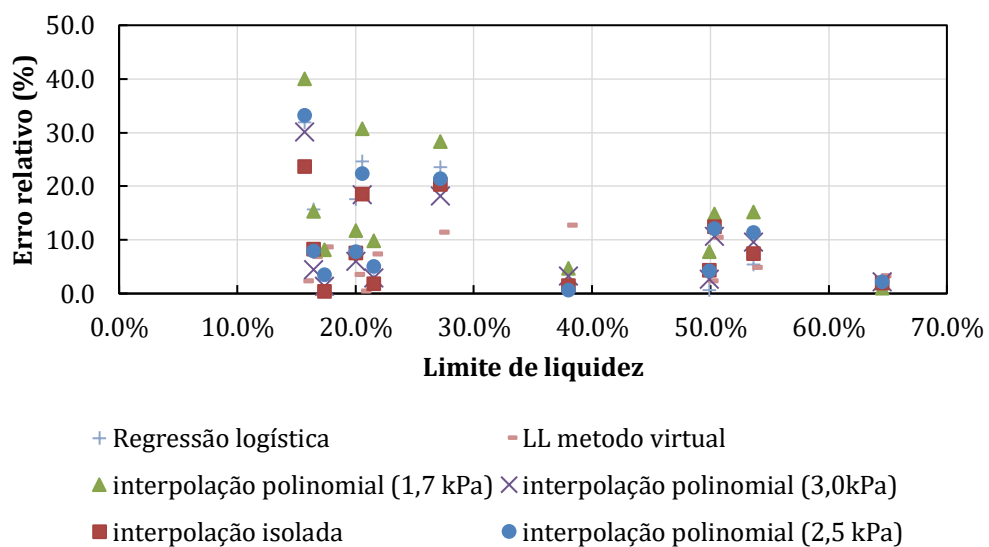
A regressão logística teve erros relativos entre 0,54% e 31%, apresentando a terceira maior dispersão. O método virtual apresentou erros relativos entre 0,43% e 12,66% e teve a menor dispersão e maior acurácia. A interpolação isolada obteve o segundo melhor resultado apresentando erros relativos entre 0,39% e 23,74%. A interpolação polinomial 2,5 kPa obteve

erros relativos entre 0,69% e 33,7% e foi o quinto melhor resultado entre os métodos. Obtendo valores entre 1,31% e 30,10 a Interpolação polinomial 3,0 kPa teve o pior resultado e acurácia em nossa análise. A interpolação polinomial 1,7 kPa obteve o quarto melhor resultado apresentando erros relativos entre 1,03% e 39,97%.

### 3.2 ERRO RELATIVO VERSUS LIMITE DE LIQUIDEZ

O gráfico 3 é fundamental para a compreensão das variações nos erros correspondentes a cada amostra. No eixo X, estão representados os valores do limite de liquidez obtidos pelo equipamento Casagrande, enquanto o eixo Y apresenta os erros associados a cada um dos métodos utilizados.

**Gráfico 3: Análise gráfica entre o limite de liquidez e o erro relativo.**



**Fonte: acervo pessoal**

Embora os autores Andrade e Maia (2025), tenham apontado que as equações para previsão de resistência pelo aparelho de Casagrande apresentem maiores erros para solos menos plásticos, o método virtual ainda apresentou resultados satisfatórios. Os mesmos descrevem o modelo matemático como mais adequado para solos com características plásticas e com alto grau de saturação. Essa adequação se justifica pelo fato de que, ao serem aplicados a solos secos e de natureza arenosa, os resultados obtidos apresentaram níveis significativamente inferiores de acurácia, comprometendo a confiabilidade das previsões. Segundo (2025) observou que a

ocorrência de erros é substancialmente menor quando os solos apresentam limites de liquidez mais elevados. Esse comportamento reforça a ideia de que o modelo se mostra mais eficiente em solos de comportamento mais argiloso, nos quais a plasticidade e a saturação influenciam diretamente os parâmetros de previsão.

Ao analisar as amostras com menor limite de liquidez, é possível perceber que, na maioria dos métodos utilizados, os erros relativos são mais elevados. Isso sugere que, para solos menos plásticos, os métodos apresentam maior variação nos resultados, menor acurácia e menor precisão. Dessa forma, conclui-se que os erros e a dispersão tendem a ser maiores em solos com baixa plasticidade, o que pode comprometer a confiabilidade das medições do limite de liquidez nesses casos.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de utilizar a mesa de consistência (flow table) como método alternativo para estimar o limite de liquidez de um solo. Para isso, foram aplicadas diferentes abordagens analíticas baseadas na relação entre o teor de umidade e a resistência ao cisalhamento.

Os resultados obtidos com 12 amostras indicaram que o método virtual apresentou o melhor desempenho entre os analisados. Em comparação com o método tradicional de Casagrande, 9 das 12 amostras apresentaram erro relativo inferior a 10%, além de exibirem menor dispersão nos valores obtidos. Outros métodos, como a interpolação isolada e a interpolação polinomial a 2,5 kPa, também mostraram desempenho satisfatório, embora com maior variabilidade nos resultados.

Conclui-se, portanto, que é possível estimar o limite de liquidez de forma alternativa ao ensaio de Casagrande utilizando o método virtual. No entanto, devido à proposta inovadora deste estudo, recomenda-se a realização de ensaios complementares para validar e consolidar os achados.

.

## 5 REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 9604:2016 – **Apresentação de artigos em publicações técnico-científicas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ANDRADE, Asley; MAIA, Fabiana. **Desenvolvimento e validação de um modelo matemático para determinação da resistência ao cisalhamento não drenada de solos plásticos ensaiados no aparelho de casagrande**. Patos: IFPB, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - **Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASTM (2010). **ASTM D4318-10e1: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils**. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM C230M-21: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. Available at: <https://www.astm.org/>. Accessed on: 11 June 2025.

Atterberg, A. (1911). **Die Plastizität der tone**. Int. Mitt Bodenkd. 1, 10-43 (em Alemão).

CAMPBELL, D. J. LIQUID LIMIT DETERMINATION OF ARABLE TOPSOILS USING A DROP-CONE PENETROMETER. **Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 234-240, set. 1975. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1975.tb01946.x>.

Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. **Public Roads** 13, No. 8, 121–136.

Casagrande, A. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. **Géotechnique** 8, No. 2, 84–91, <https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.2.84>.

CREVELIN, Letícia Garcia; BICALHO, Kátia Vanessa. Comparison of the Casagrande and Fall Cone Methods for Liquid Limit Determinations in Different Clay Soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 1-12, jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20180105>.

Di Matteo, L. (2012). Liquid limit of low- to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test. **Bull. Engng Geol. Environ.** 71, No. 1, 79–85.

EUROPEAN PROJECT GROUP. **European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use**. May 2005. Available at: [https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP\\_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf](https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf). Accessed on: 11 June 2025.

Haigh, S. K. (2012). Mechanics of the Casagrande liquid limit test. **Can. Geotech. J.** 49, No. 9, 1015–1023 and Corrigenda 49, No. 9, 1116 and 49, No. 11, 1329.

HRUBESOVA, Eva; LUNACKOVA, Barbara; BRODZKI, Ondrej. Comparison of Liquid Limit of Soils Resulted from Casagrande Test and Modified Cone Penetrometer Methodology. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 142, p.364-370, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.063>.

Hyun-Ki, K., Cortes, D. D., and Santamarina, J. C. (2007). **Flow test; particles-level and macroscale analyses**. *ACI Material Journal*, 104(3), 323-328.

KAYABALI, Kamil et al. **Determination of Atterberg limits using newly devised mud press machine**. Journal Of African Earth Sciences, [s.l.], v. 116, p.127-133, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.01.005>. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/289367640>>. Acesso em: 10 Maio. 2025.

Koumoto, T. & Houlsby, G. T. (2001). Theory and practice of the fall cone test. **Géotechnique** 51, No. 8, 701–712, <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.8.701>.

Leroueil, S. & Le Bihan, J. P. (1996). Liquid limits and fall cones. **Can. Geotech. J.** 33, No. 5, 793–798.

Mousavi, F.; Abdi, E.; Ghalandarzadeh, A.; Bahrami, H.; Majnounian, B. Laboratory evaluation of the PLSR method to estimate Atterberg limits of soil by field spectroscopy. **Iran. J. Forest.** 2019, 11, 151–164.

O'KELLY, B. C.; VARDANEGA, P. J.; HAIGH, S. K.. Use of fall cones to determine Atterberg limits: a review. **Géotechnique**, [S.L.], v. 68, n. 10, p. 843-856, out. 2018. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1680/jgeot.17.r.039>.

OLIVEIRA, Daniela Garroux G. de; THEWES, Markus; DIEDERICHS, Mark S.. EPB machine excavation of mixed soils – Laboratory characterisation. **Geomechanics And Tunnelling**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 373-385, ago. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/geot.201900014>.

SEGUNDO, Robertano . **Correlação matemática entre o limite de liquidez obtido pelo aparelho de casagrande e pelo cone de penetração**: Influência da resistência ao cisalhamento. Patos: IFPB, 2025.

SUITS, L David; SHEAHAN, Tc; FENG, T-W. Discussion on “Percussion and Cone Methods of Determining the Liquid Limit of Soils: controlling mechanisms” by a. sridharan and k. prakash. **Geotechnical Testing Journal**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 104, 2002. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/gtj11085j>.

TRIPATHY, Snehasis; MISHRA, Anil Kumar. On the Use of Skempton's Compression Index Equation. **Geotechnical And Geological Engineering**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 129-135, 30 set. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-010-9359-8>.

Wood, D. M. & Wroth, C. P. (1978). The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils. **Ground Engng** 11, No. 3, 37.

|                                                                                   |                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|  | <b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b> |
|                                                                                   | Campus Patos - Código INEP: 25281925                                  |
|                                                                                   | Br 110, S/N, Alto da Tubiba, CEP 58700-000, Patos (PB)                |
|                                                                                   | CNPJ: 10.783.898/0006-80 - Telefone: None                             |

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de trabalho de conclusão de curso

|                      |                                           |
|----------------------|-------------------------------------------|
| Assunto:             | Entrega de trabalho de conclusão de curso |
| Assinado por:        | Janilson Silva                            |
| Tipo do Documento:   | Anexo                                     |
| Situação:            | Finalizado                                |
| Nível de Acesso:     | Ostensivo (Público)                       |
| Tipo do Conferência: | Cópia Simples                             |

Documento assinado eletronicamente por:

- Janilson Leandro Batista da Silva, ALUNO (201926550042) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - PATOS, em 01/09/2025 07:30:12.

Este documento foi armazenado no SUAP em 01/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1592169  
Código de Autenticação: bf20a94bd2

