

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS PATOS**

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ROBERTANO FLORENCIO DA SILVA SEGUNDO

**CORRELAÇÃO MATEMÁTICA ENTRE O LIMITE DE LIQUIDEZ OBTIDO PELO
APARELHO DE CASAGRANDE E PELO CONE DE PENETRAÇÃO: INFLUÊNCIA
DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

PATOS - PB

2025

ROBERTANO FLORENCIO DA SILVA SEGUNDO

**CORRELAÇÃO MATEMÁTICA ENTRE O LIMITE DE LIQUIDEZ OBTIDO PELO
APARELHO DE CASAGRANDE E PELO CONE DE PENETRAÇÃO: INFLUÊNCIA
DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

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: Prof. Me. Valteson da Silva Santos

PATOS - PB

2025

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CAMPUS PATOS/IFPB

S586c Silva Segundo, Robertano Florencio da.
Correlação matemática entre o limite de liquidez obtido pelo aparelho de casagrande e pelo cone de penetração: influência da resistência ao cisalhamento / Robertano Florencio da Silva Segundo. - Patos, 2025.
60 f. : il.

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

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

1. Caracterização de solos 2. Limite de Liquidez-Solo 3. Concha de Casagrande 4. Fall Cone 5. Solo plástico 6. Parâmetros geotécnicos I. Título II. Instituto Federal da Paraíba.

CDU – 624.131

ROBERTANO FLORENCIO DA SILVA SEGUNDO

**CORRELAÇÃO MATEMÁTICA ENTRE O LIMITE DE LIQUIDEZ OBTIDO PELO
APARELHO DE CASAGRANDE E PELO CONE DE PENETRAÇÃO: INFLUÊNCIA
DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

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:07/03/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Valteson da Silva Santos – Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Me. Allan Benício Silva de Medeiros – Examinador Externo
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Me. Romário Stéffano Amaro da Silva – Examinador Externo
Universidade Federal do Rio de Janeiro

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por toda a força que colocou em meu coração e que me ajudou a lutar até o fim. Foste Tu que me ensinaste que nada é impossível e que, perante qualquer dificuldade quem acredita no teu amor encontrará o caminho da superação;

À minha esposa Pamela Rodrigues, que representa minha segurança em todos os aspectos, minha companheira incondicional, que me dá total apoio e suporte nos momentos mais difíceis. Obrigado por tudo!

Aos meus filhos, Isadora Morais e Robertano Neto, pela paciência e pelo amor incondicional durante todas as horas dedicadas a este trabalho, cujos sorrisos e abraços me motivaram a continuar nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Robertano Florêncio e Socorro Morais, e às minhas irmãs, Roberta Morais e Raquel Morais, pelo amor incondicional, pelo incentivo e pelo estímulo constante. Obrigado por serem minha referência de tantas maneiras e por estarem sempre presentes em minha vida de forma indispensável, apoiando-me em tudo que precisei ao longo da minha vida.

Ao meu orientador, Professor Mestre Valteson da Silva Santos, pelo total apoio, confiança, incentivo, amizade e disponibilidade demonstrada na resolução dos problemas, assim como na orientação dada ao longo de toda a pesquisa.

Aos meus colegas de curso Avanil Martins, Kyvia Dayse, Ítalo Roberto, Anderson Nascimento, Alan Queiroz, Mayara Dias, Gabriel Morais, Ewerton Fernandes, Ricardo Pedrosa, Fabrício Cândido, Felipe Lucena, Lucas Candeia, Gabriel Soares, Lucas Monteiro, Joseildo Avelino, Walber Marinho, Jucélio Torres, Cristianny Werlanny, Andressa Batista, Fabiana Maia, Asley Hana e Henrique Melo, pela amizade demonstrada ao longo deste curso, em especial, ao meu colega Paulo Antônio Maia, pela ajuda e colaboração em todos os momentos bem passados ao longo da vida acadêmica.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus Patos, por ter proporcionado um ambiente criativo e amigável, além da oportunidade de possuir mais uma formação superior e expandir meus horizontes.

Aos professores do curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFPB, Campus Patos, que com muita paciência e dedicação, ensinaram-me não somente o conteúdo programado, mas também o sentido da amizade e do respeito.

A todos os bibliotecários do campus, pelo carinho e apoio.

À professora Doutora Albaniza Maria da Silva Lopes pela oportunidade e pelo apoio durante todo o processo de construção deste trabalho.

Ao professor Doutor Frankleudo Luan pela análise, orientações e sugestões acerca deste estudo, meu muito obrigado.

À mestra Maria Kelyane, por todo o apoio, empenho e dedicação ao me auxiliar na elaboração deste trabalho.

Aos engenheiros civis Luan Moraes e Antônio Neto, meu sincero agradecimento por toda ajuda e atenção.

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação, expresso minha eterna gratidão.

A todos os policiais militares do ROTAM que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada, meu profundo agradecimento e um forte abraço.

RESUMO

O Limite de Liquidez (LL) é uma característica básica de um solo, o qual representa o ponto de transição que delimita os estados líquido e plástico. Para a determinação do LL de solos, existem distintas metodologias, cujos resultados apresentam variações significativas, sendo objeto de debates e comparações no âmbito técnico e científico. No Brasil, tradicionalmente, a medição do LL é realizada pelo método da percussão, desenvolvido por Casagrande, e pelo método do cone de penetração. À vista disso, o objetivo geral deste estudo foi analisar comparativamente os métodos de Casagrande e do cone de penetração na determinação do limite de liquidez, com ênfase no impacto da resistência ao cisalhamento e na densidade da mistura. Para tal propósito, o delineamento metodológico adotado foi a pesquisa de desenvolvimento não-experimental, onde as investigações foram conduzidas com base em princípios teóricos, que viabilizaram a criação de um banco de dados em formato de planilha, via *software Microsoft Excel*, para o armazenamento dos dados amostrais. Os resultados obtidos indicam que, em solos com LL baixo, os métodos de Casagrande e cone de queda livre apresentam valores semelhantes, com uma correlação linear. Observou-se que a resistência ao cisalhamento não drenado se mostrou inversamente proporcional ao teor de umidade. Conclui-se que o método do cone gera valores mais elevados ao cisalhamento não drenado, além de apresentar maior sensibilidade às variações de umidade, enquanto o método de Casagrande resulta em valores inferiores, com uma dispersão mais acentuada.

Palavras-chave: Caracterização de solos; Fall Cone; Concha de Casagrande; Solo plástico; Parâmetros geotécnicos.

ABSTRACT

The Liquid Limit (LL) is a fundamental characteristic of soil, representing the transition point that defines the boundary between the liquid and plastic states. Various methodologies exist for determining the LL of soils, and their results exhibit significant variations, making them a subject of debate and comparison in technical and scientific contexts. In Brazil, the LL is traditionally measured using the percussion method, developed by Casagrande, and the cone penetration method. Given this, the general objective of this study was to comparatively analyze the Casagrande method and the cone penetration method in determining the liquid limit, emphasizing the impact of undrained shear strength and mixture density. For this purpose, a non-experimental development research design was adopted, in which investigations were conducted based on theoretical principles. This approach enabled the creation of a database in spreadsheet format using *Microsoft Excel* for storing sample data. The results indicate that, in soils with a low LL, the Casagrande and fall cone methods yield similar values, showing a linear correlation. It was observed that undrained shear strength is inversely proportional to the moisture content. It is concluded that the cone method generates higher values for undrained shear strength and exhibits greater sensitivity to moisture variations, whereas the Casagrande method results in lower values, with a more pronounced dispersion.

Keywords: Soil Characterization; Fall Cone; Casagrande Cup; Plastic Soil; Geotechnical Parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1. Comparação entre metodos	43
Gráfico 2. Limite de liquidez da amostra T0-NA pelo Casagrande	45
Gráfico 3. Limite de liquidez da amostra T0-NA pelo cone sueco	45
Gráfico 4. Erro de previsão do Limite de Liquidez corrigido (LLc)	47
Gráfico 5. Limite de Liquidez através do método teórico e pontual	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aparelho Casagrande elétrico com contador de golpes	20
Figura 2. Sulco no ensaio Casagrande.....	20
Figura 3. Linha de escoamento do material entre 6 e 35 golpes	21
Figura 4. Cone de penetração	23
Figura 5. Limite de Liquidez obtido pelos métodos de Casagrande e do cone de penetração	26
Figura 6. Fluxograma da Metodologia PRISMA com diferentes fases de uma revisão sistemática	29
Figura 7. Fluxograma do delineamento metodológico.....	30
Figura 8. Cone de penetração com ângulo de 30°	36
Figura 9. Determinação da distância de deformação.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Padrões para o ensaio de LL pelo cone de queda em diferentes países.....	24
Tabela 2. Distribuição granulométrica dos solos sintéticos.....	42
Tabela 3. Dados da amostra T0-NA	44
Tabela 4. Dados de umidade, número de golpes e densidade do grão	54
Tabela 5. Comparação entre Limites de Liquidez (LL)	57
Tabela 6. Dados do cone, umidade, resistência ao cisalhamento e densidade dos grãos	58
Tabela 7. Limite de liquidez teórico e pontual	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Projeção do equipamento	22
Quadro 2. Normas estabelecidos em cada país	28
Quadro 3. Comparação entre os métodos para determinação do Limite de Liquidez	32
Quadro 4. Constantes de ajustes A e B	33
Quadro 5. Valores do LL em diversos tipos de solos	34
Quadro 6. Valores de τ_u no LL	35
Quadro 7. Parâmetros utilizados como base de informação	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i>
DBR	<i>Design-Based Research</i>
GCSSR	<i>Geotechnical Commission of the Swedish State Railways</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
g	Aceleração gravitacional
β	Ângulo do ápice do cone
K	Fator de cone
LL	Limite de Liquidez
LL_C	<i>Limite de Liquidez através do aparelho de Casagrande</i>
LL_P	<i>Limite de Liquidez através do cone de penetração</i>
LP	Limite de Plasticidade
Q	Peso do cone
h	Profundidade de penetração
τ_0	Resistência ao cisalhamento do próprio material
τ_b	Resistência ao cisalhamento na interface entre a argamassa e a base
s_u	Resistência ao cisalhamento não drenada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Geral	17
1.1.2	Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	MÉTODO DE CASAGRANDE	19
2.1.1	Contexto Histórico.....	19
2.1.2	Aparelho Concha de Casagrande	20
2.2	MÉTODO DO CONE DE PENETRAÇÃO	22
2.2.1	Contexto Histórico.....	22
2.2.2	Ensaio do Cone de penetração	23
2.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS	25
2.4	NORMAS E PADRÕES TÉCNICOS APLICÁVEIS	27
3	MÉTODOS.....	29
3.1	AMOSTRA E TÉCNICA DE COLETA DOS DADOS	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ.....	32
4.2	DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CORRELAÇÃO	35
4.3	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS	41
4.4	IMPACTO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E DA DENSIDADE ..	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE A	54
	APÊNDICE B.....	57
	APÊNDICE C	61

1 INTRODUÇÃO

O solo constitui um dos principais componentes da construção civil, sendo responsável pela sustentação das edificações e construções em geral (Nogueira, Santos e Borges, 2020). Salienta-se que o solo trata-se de um sistema trifásico composto por minerais ou matéria orgânica, água e ar (Cerbino, 2018). Pormenorizadamente, é a camada superficial da Terra, oriunda do intemperismo e meteorização das rochas, resultante de uma série de fatores químicos, físicos e biológicos provenientes da ação dos agentes externos (Nogueira, Santos e Borges, 2020).

O estudo das propriedades e características do solo é imprescindível na geotécnica. Nesse contexto, ensaios de caracterização possibilitam a determinação de parâmetros para a caracterização do mesmo, como a distribuição granulométrica, o Limite de Plasticidade (LP) e o Limite de Liquidez (LL) (Wasti e Bezirci, 1986). Vale frisar que o LL é um ponto de transição que delimita os estados líquido e plástico do solo, sendo utilizado como indicativo na avaliação da capacidade de suportar cargas e no dimensionamento de fundações, estradas e barragens (Küster, 2022).

Não obstante, os valores de LL são aplicados na avaliação de características como a compressibilidade e a permeabilidade de solos argilosos (Mitchell e Sitar, 1982). Para a determinação do LL de solos, existem distintas metodologias, cujos resultados apresentam variações significativas, sendo objeto de debates e comparações no âmbito técnico e científico. No Brasil, tradicionalmente, a estimativa do LL é realizada pelo método da percussão, desenvolvido por Casagrande, e o método do cone de penetração (Küster, 2022).

Conforme apontado por Küster (2022, p. 30) “O método do cone foi aceito como o método padrão em muitos países, como Inglaterra, Índia e Canadá, enquanto o método de Casagrande ainda é adotado oficialmente em muitos países, tais como Brasil e Portugal”. Detalhadamente, o método de Casagrande utiliza um aparelho que gera dados para correlacionar o teor de umidade do solo ao número de golpes necessários para fechar uma ranhura de 2 mm de largura ao longo de 13 mm de comprimento, no qual o LL é definido como o teor de umidade correspondente a 25 golpes (Casagrande, 1958).

O método de penetração do cone consiste na medição da penetração estática de um cone padronizado, que, sob condições específicas de peso, ângulo e tempo de queda, é inserido verticalmente em uma amostra de solo previamente preparada (Bicalho *et al.*, 2017). É bem sabido que, o método de Casagrande abrange algumas limitações com alto potencial de influenciar os resultados, como a interferência do operador, as condições do equipamento e,

principalmente, a ocorrência de cisalhamento dinâmico durante o ensaio (Bicalho, Gramelich e Santos Cunha, 2014).

Assim como o método do cone limita-se devido à dependência das características do solo em relação ao equipamento. Amostras excessivamente rígidas podem dificultar a penetração do cone, conseqüentemente, nessa ocasião o método de Casagrande torna-se preferível (Mariano, 2021). Posto isto, destaca-se que apesar das limitações, o método de Casagrande continua sendo, tradicionalmente, o procedimento mais usual para a determinação do LL dos solos (Bicalho *et al.*, 2017).

Os dois métodos são normatizados para a determinação do LL e amplamente aceitos, porém existem discrepâncias nos resultados obtidos quando uma mesma amostra de solo é submetida a ambos os testes, especialmente quando os valores de umidade ultrapassam a marca de cem por cento (Santos, 2019). Nesse encadeamento, o estudo de Bicalho *et al.* (2017) buscou correlacionar empiricamente os resultados dos métodos de Casagrande e penetração do cone, porém, não considerou o impacto da densidade da mistura.

Similarmente, Crevelin (2018) avaliou as correlações empíricas entre os métodos para argilas de diferentes mineralogias e plasticidades, com intuito de investigar os valores dos intervalos de LL, observando as maiores variações entre eles. Complementando, é necessário desenvolver pesquisas “... cujos resultados venham a aumentar a exatidão e a precisão dos resultados experimentais do ensaio de determinação do Limite de Liquidez dos solos fornecendo dados mais confiáveis para a tomada de decisão do engenheiro” (Santos, 2019, p. 14).

Destarte, no âmbito acadêmico observa-se que são escassos os estudos que analisam, de forma abrangente, a influência da resistência ao cisalhamento não drenada e da densidade da mistura na determinação do LL dos solos, realçando a importância de ampliar as investigações científicas nessa área, a fim de subsidiar os profissionais da engenharia geotécnica. Em face do exposto, este estudo justifica-se pela necessidade de fornecer dados que possam aprimorar os métodos existentes e contribuir com o processo decisório no contexto da geotecnia.

Os resultados obtidos nesta pesquisa poderão servir de base para futuros estudos que explorem de forma mais aprofundada as vantagens, limitações e diferenças entre os métodos de caracterização de solos. Além disso, com os objetivos alcançados, espera-se contribuir para a transição gradual do método de Casagrande, amplamente reconhecido por suas limitações, para o método do cone de penetração, que apresenta maior acurácia, promovendo avanços técnicos significativos na área de geotecnia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Propor uma relação matemática que correlacione o método de Casagrande e do cone de penetração.

1.1.2 Específicos

- a) Identificar as diferenças metodológicas e normativas entre o método da percussão de Casagrande e o método do cone para a determinação do limite de liquidez;
- b) Descrever os princípios que regem o método de Casagrande e o método do cone de penetração, destacando suas bases mecânicas e normativas;
- c) Avaliar a influência da resistência ao cisalhamento não drenada e da densidade da mistura obtidas por ambos os métodos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O solo é comumente definido como a superfície da Terra; no entanto, o engenheiro civil considera-o parte da matéria-prima para a construção de aterros, estradas, e açudes. *A priori*, o processo de formação do solo surge a partir das rochas da litosfera, que, submetidas à ação direta do calor, da umidade das chuvas e do crescimento de organismos, ocasionam uma série de modificações na composição química dos minerais e nas características físicas do solo, nomeadas como intemperismo ou meteorilização (Lepsch, 2010).

Com o intemperismo, uma rocha, mesmo das mais endurecidas, pode transformar-se em um material solto, o saprolito, que permite a vida de plantas e pequenos animais [...] Ao mesmo tempo, alguns dos minerais da rocha, menos resistentes ao intemperismo, transformam-se em argilas. Então, as águas das chuvas podem aí se infiltrar, translocando materiais de uma parte mais superficial para outra um pouco mais profunda (Lepsch, 2010, p. 30).

A infiltração das águas pluviais propicia a mobilidade de nutrientes, beneficiando a fertilidade do solo e sustentando ecossistemas diversos. Todavia, o contingente de fluído disposto no mesmo favorece o solo com plasticidade, cujo limite entre os estados físico líquido e o plástico é definido como Limite de Liquidez (LL) (Ibrahim; Noori, 2019). Conforme apontado por Ibrahim e Noori (2019), há diferentes métodos para determinar o LL, sendo os mais comuns o método de Casagrande e o método do cone de penetração.

No âmbito do ensaio pelo método de Casagrande, o LL refere-se ao teor de umidade no qual um sulco, com dimensões predefinidas, fecha-se ao longo de uma extensão de meia polegada, devido à aplicação de 25 golpes sucessivos no aparelho de Casagrande (Kestler, 1982). Vale frisar que o ensaio de determinação de LL desenvolvido pelo o engenheiro austríaco-americano Arthur Casagrande, em 1947, foi baseado nos limites de consistência do solo de Albert Atterberg (Cerbino, 2018).

Os limites de Atterberg referem-se ao Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Contração (LC), sendo iguais aos valores de umidades que separam um estado de consistência do solo de outro. Conhecendo-se os valores dos limites de Atterberg, é possível saber, em função da umidade natural do solo (U), se o solo se encontra no estado sólido ($U < LC$), no estado friável ($LC < U < LP$), no estado plástico ($LP < U < LL$) ou no estado viscoso ($U > LL$) (Ribeiro; Souza, 2018, p. 186).

Destarte, Casagrande aperfeiçoou e padronizou os métodos de determinação propostos por Atterberg, com ênfase no LL. Circunstancialmente, idealizou um aparelho, que leva o seu nome, denominado disco de Casagrande, o qual permanece amplamente utilizado até os dias atuais na realização desses ensaios.

Posteriormente, o método do cone de penetração foi desenvolvido com o objetivo de corrigir e aprimorar fatores que influenciavam os resultados obtidos pelo método de Casagrande. Minuciosamente, baseia-se na medição da penetração estática de um cone padronizado, que, sob condições controladas de peso, ângulo e tempo de queda, penetra verticalmente em uma amostra de solo previamente preparada.

2.1 MÉTODO DE CASAGRANDE

2.1.1 Contexto Histórico

No início do século XX, o cientista sueco Albert Atterberg, ao investigar a plasticidade de solos de granulação fina, chegou à conclusão de que trata-se de uma propriedade bidimensional definida pelos limites superior e inferior da faixa plástica (Casagrande, 1956). Posteriormente, "... propôs dois testes simples para definir esses limites, denominados Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, atualmente conhecidos como limites de Atterberg (Casagrande, 1956, p. 84, tradução nossa).

Subsequente, em 1926, a agência governamental dos Estados Unidos, *Bureau of Public Roads* (BPR), sob a direção do professor Terzaghi, ao replicar os testes de Atterberg identificou que o LL apresentava gargalos na reprodução por diferentes operadores. Em resposta, Terzaghi propôs a criação de um dispositivo mecânico para reduzir as incertezas oriundas do método manual (Casagrande, 1956).

Constatou-se que as falhas ocorreram em função do afastamento do princípio original do teste de Atterberg. À vista disso, sob orientação de Karl von Terzaghi, em 1932, Arthur Casagrande elaborou um equipamento, contendo uma came responsável por elevar uma cápsula, com o propósito de obter precisão na repetição dos resultados. Para tanto, o engenheiro considerou aspectos críticos, desde o material da base às dimensões do sulco (Casagrande, 1956).

Elucidando, a princípio, a base foi composta por ebonite, uma resina sintética de natureza plástica, escolhida devido à sua uniformidade de dureza. Contudo, durante a Segunda Guerra Mundial, perante as dificuldades de fornecimento da mesma, a ebonite foi temporariamente substituída por madeira, comprometendo os resultados. Com isso, a partir de 1945, iniciou-se a análise de materiais plásticos como alternativas (Casagrande, 1956).

A seleção apontou o plástico à base de tecido Micarta nº. 221, produzido pela Westinghouse. Não obstante, em 1946, testes comparativos reafirmaram a confiabilidade do tecido, que demonstrou menor desgaste e maior durabilidade. Porém, a precisão dos

dispositivos dependia, equitativamente, de ajustes meticulosos na altura de queda da cápsula, sendo este um fator crítico para garantir a exatidão dos resultados obtidos no teste de LL (Casagrande, 1956).

2.1.2 Aparelho Concha de Casagrande

O aparelho Concha de Casagrande (Figura 1) é o dispositivo mecânico padrão para a determinação do LL do solo (Mariano, 2021). Detalhadamente, o aparelho é “...constituído por uma concha semiesférica de latão e por um dispositivo mecânico que permite fazer levantar a mesma que em seguida é deixada cair, de uma altura regulável sobre uma base de madeira, borracha dura ou outro material de características idênticas” (Silva, 2013, p. 53).

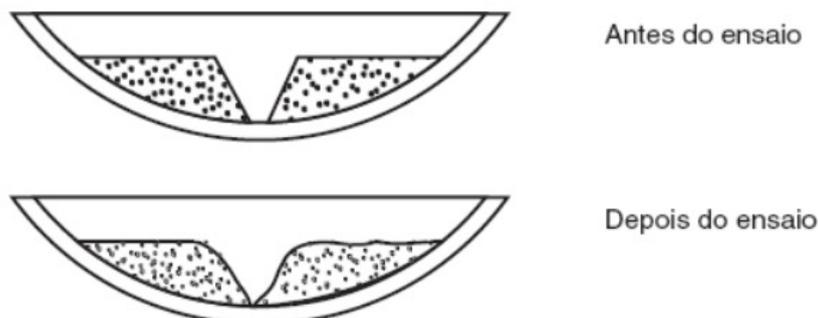
Figura 1. Aparelho Casagrande elétrico com contador de golpes



Fonte: Mariano (2021)

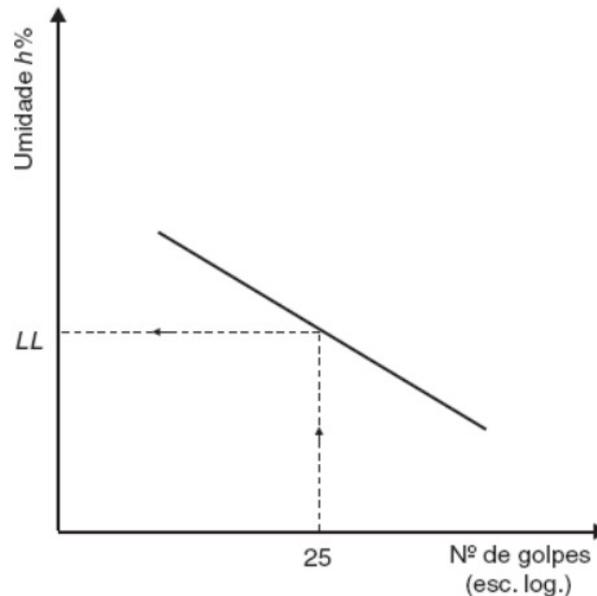
Complementando, o aparelho Concha de Casagrande dispõe “... um contador de golpes e um riscador (cinzel) com o qual se executa um sulco que separa o solo em duas metades” (Silva, 2013, p. 53). Vale acentuar que, a quantidade de golpes necessária para o fechamento do sulco formado na amostra (Figura 2) permite a construção de uma linha reta, ilustrada na Figura 3, a qual representa a relação entre o número de golpes aplicados e o teor de umidade da amostra, no intervalo entre 6 e 35 golpes (Caputo, 2015).

Figura 2. Sulco no ensaio Casagrande



Fonte: Caputo (2015)

Figura 3. Linha de escoamento do material entre 6 e 35 golpes



Fonte: Caputo (2015)

Matematicamente, conforme os estudos da *Federal Highway Administration*, o LL é determinado pelo método conhecido como um único ponto, por meio da Equação 1, onde h é a umidade, em porcentagem, e n corresponde ao contingente de golpes (Caputo, 2015).

Equação 1. Limite de Liquidez

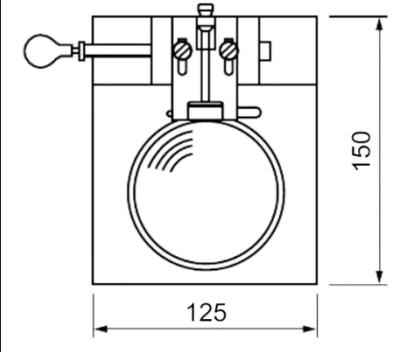
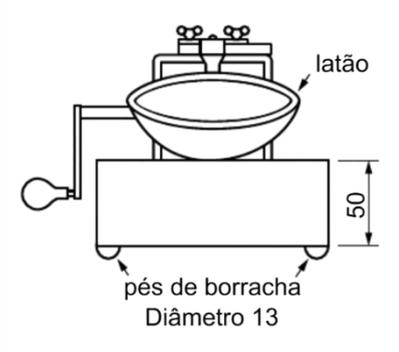
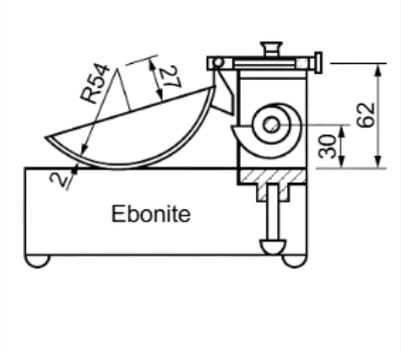
$$LL = \frac{h}{1,419 - 0,3 \log n}$$

Fonte: Caputo (2015)

Não obstante, a técnica do operador é um fator imprescindível na determinação do LL pelo método de Casagrande, cuja variação dos resultados intensifica-se ainda mais em função da experiência do operador e das diferenças entre laboratórios (Sousa, 2011). Além disso, a concha de Casagrande possui bases distintas, as quais influenciam nos resultados obtidos, sendo que a base mole tende a fornecer valores de LL superiores em relação aos da base dura (Sousa, 2011).

No Brasil, o método de determinação do LL pelo dispositivo de Casagrande é padronizado pela NBR 6459:2016, que define as diretrizes para este ensaio, mencionando que “...deve ser executado em condições ambientais que minimizem a perda de umidade do material por evaporação, preferencialmente em recintos climatizados” (ABNT, 2016, p. 3). Quanto à projeção do equipamento, disposto no Quadro 1, a norma estabelece as dimensões em milímetros.

Quadro 1. Projeção do equipamento

VISTA EM PLANTA	VISTA FRONTAL	VISTA LATERAL
		

Fonte: ABNT (2016)

É bem sabido que, a dimensão correta assegura que o ensaio seja realizado de acordo com os padrões técnicos, permitindo comparações consistentes entre diferentes laboratórios e operadores. Contudo, em virtude das limitações do aparelho de Casagrande, como a dependência da habilidade do operador, das condições do equipamento e a dificuldade em testar solos com baixa plasticidade, o método do cone de penetração emerge como um método alternativo (Kestler, 1982; Silva, 2013).

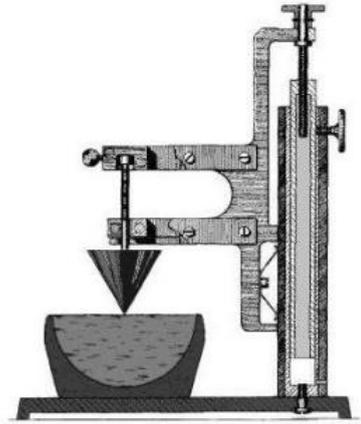
2.2 MÉTODO DO CONE DE PENETRAÇÃO

2.2.1 Contexto Histórico

No início da década de 1890, a Suécia deparou-se com uma série de ocorrência de deslizamentos de terra. Como efeito, criou-se uma comissão nomeada de *Geotechnical Commission of the Swedish State Railways* (GCSSR), traduzida como Comissão Geotécnica das Ferrovias Estatais Suecas, com o objetivo de investigar as forças das argilas (Kestler, 1982). Por conseguinte, em meados de 1915, o secretário da GCSST, John Olssen, elaborou o *fall cone test*, conhecido como Cone de penetração, equipamento desenvolvido para obtenção do LL (Sousa, 2011).

A princípio, o Cone de penetração, ilustrado na Figura 4, foi desenvolvido para “... medir a resistência ao cisalhamento não drenada dos solos de granulação fina (Kuster, 2022, p. 40). De modo minucioso, trata-se de um método utilizado para estimar a resistência de solos plásticos remoldados, que, ao longo do tempo, consolidou-se como um procedimento amplamente utilizado para a determinação padronizada do LL das argilas (Koumoto; Houlsby, 2001).

Figura 4. Cone de penetração



Fonte: Souza (2011) *apud* Hazell (2005)

A partir de então, surgiram uma gama de variantes a nível global, com modificações no peso e no ângulo do cone, bem como na profundidade associada ao LL, estimado pelos engenheiros da GCSST como “...o teor em água dado por um cone com 60 g de massa e um ângulo de 60°, após uma penetração de 10 mm na amostra ensaiada” (Souza, 2011, p. 62). Na contemporaneidade, o Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) aperfeiçoou este método, automatizando-o (Souza, 2011).

2.2.2 Ensaio do Cone de penetração

O método do cone de penetração “...consiste em se medir a penetração estática que um cone, padronizado sob condições especificadas de peso, ângulo e tempo de queda, penetra verticalmente em uma amostra de solo previamente preparada. (Bicalho, Gramelich; Santos Cunha, 2014, p. 1097).

Em linhas gerais, o funcionamento deste dispositivo baseia-se na queda de um cone de massa m e ângulo do cone α sobre uma amostra remoldada de solo, anotando-se o valor da penetração do cone. No mínimo deverão ser realizados 4 ensaios repetidos, com diferentes teores de água, de forma a traçar um gráfico linear de penetração (mm) versus teor em água (%). O limite de liquidez será o valor do teor em água para uma profundidade de penetração de 20 mm (Souza, 2011, p. 60).

Comumente, os ensaios do cone de penetração são realizados em materiais remoldados, por isso, despreza-se a possibilidade de sensibilidade, conseqüentemente, não há perda de resistência não drenada devido à deformação por cisalhamento (Koumoto; Houlsby, 2001). Em paralelo, observa-se que em argilas com rigidez de média a elevada, a penetração do cone é relativamente baixa (Kestler, 1982).

Circunstanciadamente, a penetração do cone está diretamente relacionada ao teor de

água do solo. Acrescenta-se que, o tipo de solo e a preparação das amostras têm o potencial de influenciar o valor do LL (Crevelin, 2018). Em concordância com Küster (2022), a depender do tipo de solo, o ensaio do cone de penetração é classificado como não drenado, visto que a velocidade do mesmo impede que as poropressões se dissipem.

Geometricamente, o cone de penetração é descrito por meio do ângulo do vértice do cone e a profundidade da penetração, variando conforme as normas e padrões adotados por cada país, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Padrões para o ensaio de LL pelo cone de queda em diferentes países

País	Detalhes do cone			Detalhes do recipiente		Penetração (tempo) (s)	Penetração no LL (mm)	Fator do cone (K)	Resistência não drenada no LL (kPa)
	Ângulo do vértice	Massa	Comprimento	Diâmetro	Profundidade				
	(°)	(g)	(mm)	(mm)	(mm)				
Suécia/ Noruega	60	60	>20	60 ou 50	30 ou 25	10	10	0.305	1.83
Canadá	60	60	20	50	≥25	5	10	0.305	1.83
Japão	60	60	≥20	≥60	≥30	5	11.5	0.305	1.38
Índia	31	148	30.48	-	-	-	25.4	1.24	2.84
Reino Unido	30	80	35	≥55	40	5	20	1.33	2.66
Nova Zelândia	30	80	35	55	≥40	5	20	1.33	2.66
França	30	80	35	-	-	-	17	1.33	3.68
China	30	76	25	50	30	5	17	1.33	3.50
União Soviética	30	76	25	-	-	5	10	0.595	4.52
Geórgia	30	75	-	-	-	-	10	0.595	4.46

Fonte: Adaptado de Koumoto e Houslby (2001)

Graficamente, a partir dos valores obtidos para o teor de umidade (h) e a respectiva penetração (d), elabora-se um gráfico em que as ordenadas representam as profundidades de penetração, enquanto as abscissas correspondem aos valores de teor de umidade. Posteriormente, realiza-se a interpolação de uma reta entre os pontos plotados no gráfico, permitindo a determinação de valores intermediários com maior acurácia (Crevelin, 2018).

No entanto, o método do cone de penetração abrange limitações relacionadas à interação do equipamento com o solo; isto é, quando o teste é realizado com uma amostra excessivamente rígida, observa-se uma certa dificuldade na penetração do cone (Mariano, 2021). Além disso, “... à medida que o cone penetra no solo, a argila é deslocada, de modo que a superfície do solo

deixa de ser plana” (Koumoto; Houlsby, 2001, p. 702, tradução nossa).

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

O cone de penetração foi “... desenvolvido com o intuito de corrigir e melhorar alguns dos fatores que influenciavam os resultados obtidos pelo método da concha de Casagrande, tentando assim obter uma metodologia mais rápida, simples e de maior precisão” (Sousa, 2011, p. 27). Quanto ao tipo de solo, para solos de baixa plasticidade, o método de Casagrande geralmente apresenta valores inferiores aos obtidos pelo método do cone, enquanto para solos de alta plasticidade, os valores do cone são mais baixos (Ibrahim; Noori, 2019).

É plausível ainda, alegar que o método do Cone de penetração é o mais confiável para a determinação do LL, como efeito, progressivamente, vem sendo adotado por diversos países para essa finalidade (Koumoto; Houlsby, 2001). Ao analisar comparativamente os métodos, notou-se que o aparelho de Casagrande contém grandes variações em relação ao cone de penetração, em virtude das interferências do operador e da concha (Mariano, 2021).

Ademais, “... quando comparado com o cone, o aparelho de Casagrande de base dura geralmente fornece um limite de liquidez mais baixo, cerca de 70%, para solos de baixo LL, enquanto o aparelho de base macia fornece um limite de liquidez maior, cerca de 40%, para solos com um LL superior” (Kuster, 2022, p. 42).

No que tange a resistência ao cisalhamento não drenada, na determinação do LL, o método de Casagrande considera-a constante, “... aproximadamente 2,5 kPa, ou seja, cada golpe para fechar a ranhura corresponde a uma resistência de 1gf/cm²” (Bicalho; Gramelich; Santos Cunha, 2014, p. 1098). Segundo Bicalho *et al.* (2017) o valor da resistência ao cisalhamento não drenada é inversamente proporcional ao LL obtido durante o ensaio, e aumenta em função do teor de argila e da plasticidade do solo.

Em relação ao cone de penetração, a profundidade alcançada durante o ensaio está relacionada com a resistência do cisalhamento não drenada do solo, onde o solo influencia o movimento do equipamento (Crevelin, 2018). Nesse cenário, Hansbo (1957) quantificou a relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada (s_u) e penetração do cone, expressa pela Equação 2, onde Q é o peso do cone, h é a profundidade de penetração e K é o fator de cone.

Equação 2. Relação teórica entre a resistência não drenada do solo e a penetração do cone

$$s_u = \frac{KQ}{h^2}$$

Fonte: Hansbo (1957)

É inegável que, a base de dados disponível, que correlaciona os valores de LL obtidos pelos métodos mencionados, fomenta o estudo comparativo entre os valores por eles determinados, podendo ainda ser utilizada como parâmetro de referência (Bicalho, 2017). Ao visualizar a Figura 5, observa-se a relação entre o LL resultante pelo método de Casagrande conforme a norma estadunidense ASTM D423 e o cone de penetração e usado no *Georgian Institute of Technology* (Sousa, 2011).

Figura 5. Limite de Liquidez obtido pelos métodos de Casagrande e do cone de penetração



Fonte: Sousa (2011)

Em comparação com o método de Casagrande, as desvantagens associadas ao método do cone de penetração são retrizes e, além disso, podem ser mitigadas, elucidando, a técnica do operador é o fator de influência menos relevante (Kestler, 1982). De acordo com Silva (2013), no que se refere ao tempo de execução, o método do cone de penetração destaca-se por ser mais rápido, enquanto o método de Casagrande demanda mais tempo devido ao controle manual necessário.

Além disso, a dependência dos componentes difere entre os métodos, elucidando, no cone de penetração, apenas o vértice do cone pode sofrer desgaste, enquanto, no método de Casagrande, diversos componentes, como a concha e o riscador, podem se desgastar e afetar os resultados. Ademais, o método do cone de penetração apresenta menor interferência do executor, garantindo uma variação mínima entre diferentes realizadores do ensaio (Silva, 2013).

Em relação ao controle do ensaio, o cone de penetração permite um controle mais preciso do tempo de queda, fixado em 5 segundos, enquanto o método de Casagrande exige a realização de golpes a um ritmo de dois por segundo, devido à dificuldade de padronização (Silva, 2013). Além disso, o cone de penetração possui o melhor desempenho em solos de baixa

plasticidade. Sendo assim, a escolha entre os métodos deve considerar tanto a experiência do operador quanto as características do solo e a necessidade de precisão dos resultados.

2.4 NORMAS E PADRÕES TÉCNICOS APLICÁVEIS

A determinação do LL dos solos, por meio dos métodos de Casagrande e do cone de penetração, é conduzida de acordo com as normas e padrões técnicos estabelecidos pelos órgãos regulamentadores de cada país. Atualmente, nos Estados Unidos, o método padrão para a determinação do limite de liquidez é realizado por meio do copo de Casagrande, conforme estabelecido pelo método ASTM D423 (Kestler, 1982).

De modo análogo, no Brasil, o método de Casagrande é exclusivo, sendo este definido pela NBR 6459/2016 “...que resumidamente consiste em acionar a manivela sobre a concha metálica, golpeando repetidas vezes a base do aparelho, com quedas de altura de 1cm e intensidade constante definida pelo operador” (Bandeira, 2019, p. 28:29). Em Portugal, o método da concha de Casagrande é estabelecido conforme a norma portuguesa NP-143 (Silva, 2013).

Quanto ao método do *fall cone*, por ser menos difundido necessita da adoção de normas estrangeiras para a sua execução, sendo a CEN ISO/TS 17892-12 a principal referência adotada para a realização desse ensaio (Silva, 2013). *A posteriori*, o Quadro 2 dispõe algumas normas técnicas adotadas por países que utilizam os métodos de Casagrande e/ou do cone de penetração.

A determinação do LL dos solos é regida por uma vasta variedade de normas internacionais com predominância do método de Casagrande. Destarte, normas como a ISO/TS 17892-12, intitulada de *Geotechnical Investigation and Testing* da Suécia e NZS 4402 nomeada de *Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes* da Nova Zelândia são primordiais para garantir a padronização internacional dos ensaios.

A ISO/TS 17892-12 detalha os dois métodos distintos para a determinação do LL, considerando o método de Casagrande tradicional e o do cone de penetração mais objetivo e reprodutível. Vale frisar que a ISO/TS 17892-12 representa um padrão técnico para a caracterização geotécnica de solos, uma vez que proporciona uma base sólida para o desenvolvimento de projetos de engenharia com maior segurança e precisão.

Por outro lado, a aplicação da NZS 4402 garante que os dados obtidos sejam consistentes com as condições geotécnicas específicas do país, contribuindo para a segurança e desempenho das estruturas. Como resultado, a norma permite que engenheiros e geotécnicos sigam práticas reconhecidas nacionalmente, reduzindo o risco de falhas estruturais decorrentes de

inadequações no comportamento do solo.

Quadro 2. Normas estabelecidos em cada país

PAÍS	MÉTODO	
	Cone de Penetração	Casagrande
África do Sul	-	SANS 3001-GR10
	-	TMH1
Alemanha	-	DIN 18122-1
Austrália	-	AS 1289.3.1.1
Brasil	-	NBR 6459
Canadá	-	CAN/BNQ 2501-090
China	SD128-007-84	
Coreia do Sul	-	KSF 2303
Espanha	-	UNE 103103
EUA	-	ASTM D4318
França	LCPC	NFP 94-051
Índia	IS 2720-5	IS 2720
Japão	JGS 0142-2000	JIS A1205
Noruega	NS 8002	-
Nova Zelândia	-	NZS 4402
Reino Unido	BS1377-2	BS 1377-2
Rússia	GOST 5184	-
Suécia	-	SS 27119
	-	ISO/TS 17892-12
Suíça	-	SN 670345a

Fonte: Adaptado de Cerbino (2018) e Crevelin (2018)

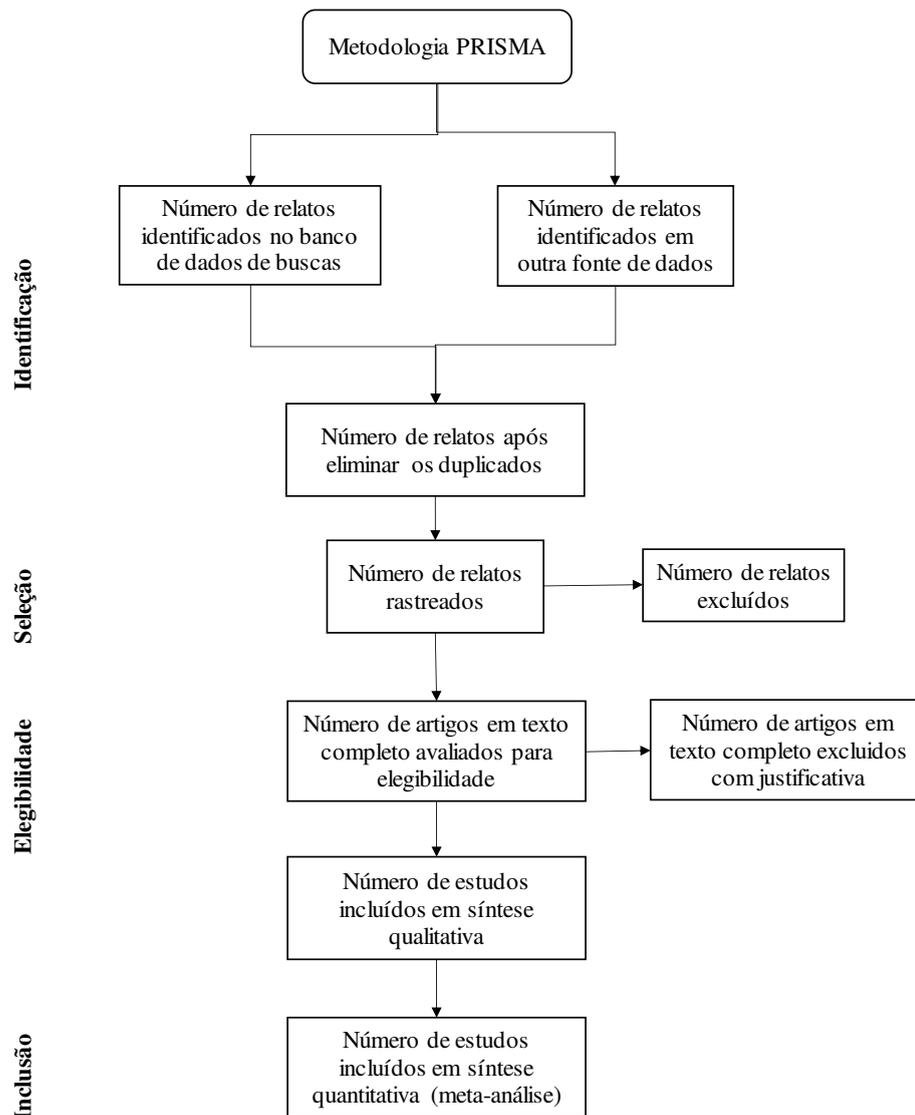
De modo geral, percebe-se que as normas são frequentemente revisadas e atualizadas, com intuito de assegurar a comparabilidade dos resultados obtidos por diferentes metodologias. Conjuntamente, embora os métodos de Casagrande e cone de penetração sejam amplamente aceitos, a forma como cada país regula sua aplicação por meio de normas técnicas específicas garante que os ensaios atendam às exigências locais, ao mesmo tempo em que possibilita a comparação e integração dos dados no cenário global.

3 MÉTODOS

O delineamento metodológico adotado foi o *Design-Based Research* (DBR), conhecido em português como Pesquisa de Desenvolvimento, na qual as investigações são conduzidas com base em princípios teóricos que servem como ponto de partida para o estudo (Santiago, 2018). Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa foi classificada como não-experimental, que “...consiste no estudo de fenômenos sem a intervenção sistemática do pesquisador” (Wazlawick, 2009, p. 51).

A princípio, efetuou-se uma revisão sistemática sobre a determinação do limite de liquidez de solos pelo método de Casagrande e pelo método do cone, através da metodologia *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), traduzida como Principais Itens para Relatar Revisões Sistemática e Meta-Análise (Figura 1).

Figura 6. Fluxograma da Metodologia PRISMA com diferentes fases de uma revisão sistemática



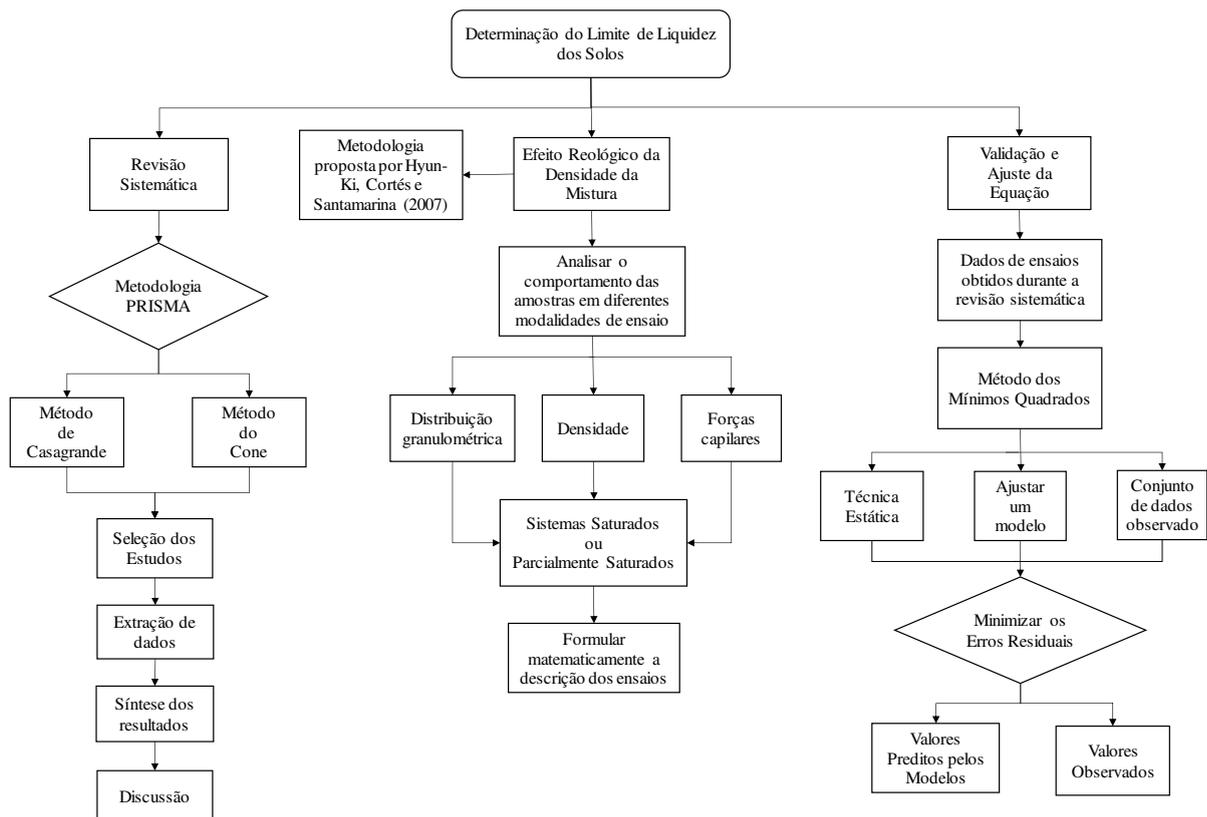
Fonte: Souza (2022)

A busca foi conduzida nas bases de dados *SciELO*, *Scopus* e *Google Scholar*, ambas conceituadas por abranger estudos revisados por pares. A seleção dos estudos teve como critérios de inclusão aqueles que abordavam simultaneamente os métodos de Casagrande e do cone de penetração, além de estarem disponíveis integralmente de forma gratuita e conterem os termos pesquisados no título, palavras-chave, resumo ou corpo do texto.

Conjuntamente, empregou-se a metodologia proposta por Hyun-Ki, Cortés e Santamarina (2007), a qual permitiu uma análise aprofundada do comportamento das amostras ensaiadas no aparelho de Casagrande. Em seguida, idealizou-se a primeira versão da equação estritamente teórica que correlacione os valores de limite de liquidez obtidos pelo aparelho de Casagrande e pelo cone de penetração.

Conforme ilustrado na Figura 2, a pesquisa foi desenvolvida em três etapas.

Figura 7. Fluxograma do delineamento metodológico



Fonte: Autor (2024)

A validação e o ajuste da equação proposta foram realizados com base nos dados provenientes dos ensaios conduzidos durante a primeira etapa da revisão sistemática. Na validação usou-se o método dos mínimos quadrados, técnica estatística amplamente utilizada para ajustar um modelo, geralmente uma função, a um conjunto de dados observados, com

intuito de minimizar os erros residuais entre os valores preditos pelo modelo e os valores observados.

Vale frisar que o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) “... para que a função calculada seja a que melhor se ajusta aos dados, deve-se minimizar a somados quadrados das diferenças entre os valores observados e aqueles definidos pela curva de ajuste” (Silva; De Mattos, 2017, p. 2).

3.1 AMOSTRA E TÉCNICA DE COLETA DOS DADOS

A amostra foi caracterizada como não probabilística, uma vez que o pesquisador possui a prerrogativa de selecionar, de forma arbitrária ou consciente, os elementos a serem incluídos no estudo (Oliveira, 2011).

Amostra é um subgrupo de uma população, constituído de n unidades de observação e que deve ter as mesmas características da população, selecionadas para participação no estudo. O tamanho da amostra a ser retirada da população é aquele que minimiza os custos de amostragem e pode ser com ou sem reposição (Oliveira, 2011, p. 30).

A amostra foi coletada por meio da revisão sistemática, nos estudos de Pinto *et al.* (2012) e Matteo (2012), que viabilizaram a criação de um banco de dados em formato de planilha, via *software Microsoft Excel*, para o armazenamento dos dados amostrais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ

A pesquisa retornou 487 estudos disponíveis na íntegra, aos quais foram analisados 144 artigos. Após uma análise cuidadosa da existência de duplicatas, bem como avaliação dos títulos e leitura dos resumos, selecionou-se 16 publicações que relacionavam-se diretamente com a temática da pesquisa, levando em consideração os princípios e divergências dos métodos Casagrande e cone de penetração.

O Quadro 3 apresenta as comparações entre os valores de LL obtidos pelos métodos de Casagrande (LL_c) e cone de queda livre (LL_p) variam conforme o tipo de solo e o valor do LL.

Quadro 3. Comparação entre os métodos para determinação do Limite de Liquidez

Título	Comparação	Valores de LL	Referências
<i>A suggested new calibration for the cone penetrometer liquid limit</i>	A razão entre o LL_c e o LL_p é aproximadamente um.	LL_c [30%:875%] LL_p [26%:825%]	Mohajerani (1999)
Comparação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros	Os valores medidos de LL_p são maiores que os valores medidos de LL_c .	LL_c [14%:98%] LL_p [18%:98%]	Bicalho; Gramelich; Santos Cunha (2014)
Comparação entre Resultados de Ensaios de Casagrande e de Cone de Queda Livre para Determinação do Limite de Liquidez	Para $LL > 80\%$ os resultados indicam que a relação linear entre LL_c e LL_p torna-se não linear.	LL [30%:180%]	Pinto <i>et al.</i> (2012)
<i>Comparison In Undrained Shear Strength Between Low And High Liquid Limit Soils</i>	À medida que o LL aumentou, o LL_c encontrado foi maior que o LL_p .	LL_c [32,7%:324%] LL_p [34,9%:248%]	Das <i>et al.</i> (2013)
<i>Comparison of the Casagrande and Fall Cone Methods for Liquid Limit Determinations in Different Clay Soils</i>	Para baixo LL tem-se que $LL_p > LL_c$. Para LL alto verificou-se que o $LL_p < LL_c$ e constatou-se uma maior dispersão entre os resultados.	LL_c [20:460%] LL_p [20%:98%]	Crevelin; Bicalho (2018)
<i>Determining Casagrande Liquid Limit Values from Cone Penetration Test Data</i>	Os resultados mostraram que LL_c forneceu um valor menor do que o LL_p .	LL [15%:66%]	Ibrahim; Noori (2019)
<i>Discussion of "Determination of liquid limit by the fall cone method"</i>	Os valores medidos de LL_p são aproximadamente 2,7% maiores que os valores medidos de LL_c .	LL_c [14%:98%] LL_p 2,7% maior	Bicalho <i>et al.</i> (2021)
<i>Liquid limit of low- to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test</i>	Os valores medidos de LL_p são aproximadamente 2,2% maiores que os valores medidos de LL_c .	LL_c [14%:98%] LL_p [18%:98%]	Matteo (2012)

Fonte: Autor (2025)

A análise indica que, em solos com valores de LL baixos, os métodos de Casagrande e cone de queda livre apresentam resultados próximos, com uma correlação linear. À vista disso, presume-se que para solos menos plásticos, as diferenças entre os dois métodos são pouco

expressivas, e ambos fornecem estimativas similares. No entanto, à medida que o LL aumenta, as diferenças tornam-se expressivas, onde em solos com maior plasticidade, o LL_p tende a ser maior do que o LL_c , conforme observado nos estudos de Bicalho *et al.* (2014) e Pinto *et al.*, (2012).

A *posteriori*, o teste de *Fisher-Snedecor*¹ indicou a existência de uma correlação empírica entre os dois métodos de determinação do LL (Equação 3), fornecendo uma base sólida para a comparação das variabilidades e comportamentos dos métodos, em função das características dos solos analisados (Matteo, 2012; Bicalho *et al.* 2017).

Equação 3. Correlações empírica entre os métodos para determinar LL

$$LL_C = A.LL_P + B$$

Fonte: Bicalho *et al.* (2017)

Onde A e B são constantes de ajustes obtidas através da correlação linear. Assim sendo, o Quadro 4 exibe algumas correlações lineares encontrada na literatura.

Quadro 4. Constantes de ajustes A e B

Correlação empírica	A	B	LL (%)	Referência
$LL_C = 1.00LL_P - 2.07$	1.00	- 2.07	[14:100]	Bicalho <i>et al.</i> (2014)
$LL_C = 1.0148LL_P - 1.366$	1.0148	1.366	[20:100]	Crevelin; Bicalho (2019)
$LL_C = 1.103LL_P - 7,601$	1,103	-7,601	[50:460]	
$LL_C = 0.95LL_P + 9.4$	0.95	9.40	[100:340]	Gronbech <i>et al.</i> (2011)
$LL_C = 1.06LL_P - 4.3$	1.06	- 4.30	[15:66]	Ibrahim; Noori (2019)
$LL_C = 1.00LL_P + 2.20$	1.00	2.20	[24:50]	Matteo (2012)
$LL_C = 1.01LL_P + 4.92$	1.01	4.92	[27:110]	Wasti; Bezirci (1986)

Fonte: Autor (2025)

Neste estudo, o intervalo do LL das amostras analisadas varia entre 25% e 184%. A partir disso, foi possível estabelecer uma base de dados para possibilitar a comparação dos valores de LL_p e LL_c obtidos no mesmo com os resultados de pesquisas anteriores, considerando diferentes tipos de solo e áreas geográficas distintas.

Vale salientar que, a classificação dos solos ocorre em função de sua consistência e

¹ O teste de Fisher-Snedecor, ou teste F, é uma análise estatística empregada para comparar as variâncias de duas ou mais amostras, a fim de verificar se existe uma diferença significativa entre elas. Comumente, é aplicada em modelos de análise de variância (ANOVA) e visa avaliar a hipótese de igualdade de variâncias entre os grupos investigados.

propriedades físicas, particularmente relacionadas à plasticidade e ao comportamento em relação à umidade (Lepsch, 2010). Dessa maneira, o Quadro 5 contém os valores do LL obtidos por meio de diferentes métodos, aplicados a uma variedade de tipos de solos, incluindo misturas de caulinita, bentonita e areia fina.

Quadro 5. Valores do LL em diversos tipos de solos

Nº do Solo	Descrição	LL_C (%)	LL_P (%)	Penetração do Cone no LL (mm)
1	Argila Marrom Arenosa	30	30	20
2	40% Caulinita I + 60% Areia Fina	34	31	25
3	Silte Argiloso Marrom Claro	44	41	24
4	70% Caulinita I + 30% Areia Fina	55	48	25
5	Argila Cinza	56	52	24
6	Argila Silto-Marrom	74	65	27
7	Caulinita I	78	68	25
8	20% Bentonita I + 80% Areia Fina	129	96	28
9	30% Bentonita I + 70% Areia Fina	195	133	29
10	40% Bentonita I + 60% Areia Fina	287	187	28
11	80% Bentonita I + 20% Areia Fina	580	367	28
12	Bentonita I	875	498	31
13	15% Caulinita II + 50% Bentonita II	297	229	29
14	30% Caulinita II + 70% Areia Fina	30	28	24
15	70% Caulinita II + 30% Bentonita II	212	156	30
16	70% Caulinita II + 30% Areia Fina	63	60	23
17	15% Bentonita II + 85% Areia Fina	68	65	21
18	Caulinita II	90	84	23
19	80% Caulinita II + 20% Bentonita II	161	128	28

Fonte: Mohajerani (1999)

Observa-se que solos com alto teor de bentonita apresentam LL mais elevados, enquanto aqueles com maior presença de areia ou caulinita possuem valores mais baixos. No que tange aos métodos, LL_C abrange uma faixa de valores mais elevados em comparação com o LL_P . Diante do exposto, é plausível mencionar que a disponibilidade de um vasto banco de dados contendo correlações entre os valores de LL dos métodos em questão, como também diversas propriedades da engenharia, possibilita e fortalece a realização de estudos comparativos.

4.2 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CORRELAÇÃO

A resistência não drenada de um solo no LL foi sugerida por Casagrande, em 1939, como sendo da ordem de 2,5 kPa. Mais tarde, outros autores propuseram valores alternativos, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6. Valores de s_u no LL

Valores de τ_u no LL (kPa)	Referência
2,50	Casagrande (1939)
0,8 a 1,6	Norman (1958)
0,7 a 1,75	Skempton; Northey (1953)
1,3 a 2,4	Youssef <i>et al.</i> (1965)
0,7 a 2,75	Wroth; Wood (1978)

Fonte: Sousa (2011)

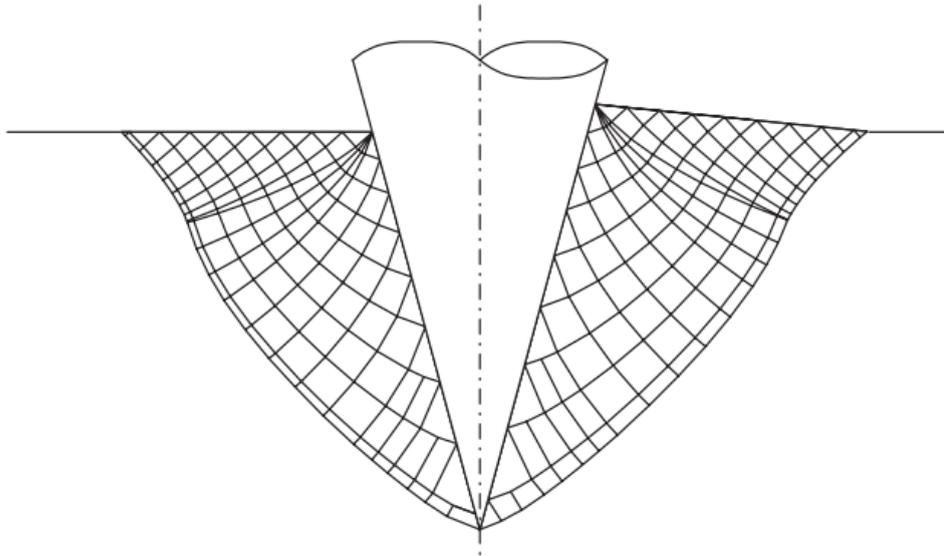
A discrepância reforça a importância de considerar fatores contextuais, como a metodologia empregada e as características do solo, para uma avaliação mais precisa da resistência não drenada em função do LL. Nesse contexto, Santos (2011) acentua que a interpretação dos resultados do ensaio de cone de queda depende das correlações empíricas derivadas a partir de ensaios de molinete.

Ciente que o LL_p do solo é determinado pelo valor de umidade correspondente à penetração de 20 mm (Pinto *et al.*, 2012; Bicalho *et al.*, 2014), este estudo adotou o valor de K (Tabela 1), conforme o padrão para o ensaio de LL pelo método do cone de penetração adotado no Reino Unido, Nova Zelândia e França, equivalente a 1,33.

Sucessivamente, utilizando a Equação 2, onde Q representa o peso do cone, o qual é calculado pela massa do cone multiplicada pela aceleração devido à gravidade, obteve-se a relação teórica entre a resistência não drenada do solo e a penetração do cone. A s_u foi determinado com base na massa e no ângulo do cone, cujos valores, conforme indicado na Tabela 1, são 80 gramas e 30°, respectivamente (Figura 8).

$$s_u = \frac{(1,33) * [(0,08kg) * (9,81m.s^{-1})]}{(0,02)^2} = 2,609 kPa$$

Figura 8. Cone de penetração com ângulo de 30°



Fonte: Koumoto e Houlsby (2001)

Em contrapartida, aplicou-se a metodologia de Hyun-Ki, Cortés e Santamarina (2007) para obter a resistência ao cisalhamento para o método de Casagrande. A princípio, a Equação 4 busca correlacionar a resistência ao cisalhamento na interface entre a argamassa e a base (s_{bs}) com a resistência ao cisalhamento do próprio material (s_0).

Equação 4. Correlação entre a resistência ao cisalhamento na interface e o material

$$s_{bs} = 5,16 * \left(\frac{s_0}{kPa} \right)^{0,44}$$

Fonte: Hyun-Ki, Cortés e Santamarina (2007)

Vale frisar que, as constantes 5,16 e 0,44 são resultantes de ajustes experimentais dos dados coletados durante o teste de Hyun-Ki, Cortés e Santamarina (2007), ou seja, os parâmetros são determinados através de análises estatísticas e regressão dos dados, fornecendo um modelo que adequadamente representa a relação observada entre as variáveis.

No entanto, o modelo (Equação 4) usa dois parâmetros ajustados, s_0 e s_{bs} , que representam a resistência ao cisalhamento em condições específicas, posto isto, reorganizando:

Equação 5. Correlação entre as resistências ao cisalhamento modificada

$$s = \left(\frac{s_b}{5,16} \right)^{\frac{1}{0,44}} kPa$$

Fonte: Adaptado de Hyun-Ki, Cortés e Santamarina (2007)

Tendo conhecimento de que, quando uma partícula se encontra a uma determinada altura (h), a energia potencial gravitacional (Equação 6) age sobre o corpo, onde m é a massa da partícula, g é a aceleração devido à gravidade e h é a altura pela qual a partícula encontra-se posicionada.

Equação 6. Energia potencial gravitacional

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Fonte: Halliday; Resnick e Walker (2013)

Quando a partícula cai, a energia potencial é convertida em trabalho ou em outras formas de energia, dependendo da resistência ao movimento, assim, Q pode ser substituído por E_p . Conjuntamente, ao considerar quantidade de golpes necessária para o fechamento do sulco formado na amostra (N), é possível trocar de K por N , visto que ambos estão relacionados à determinação do limite de plasticidade de um solo.

Não obstante, para entender como a energia se distribui ao longo do processo de fluxo, é necessário considerar a área (A) pela qual o material flui, nesse caso, a área da cavidade onde a amostra de solo é colocada. Também, faz-se necessário analisar o deslocamento da massa (d) de solo dentro da cavidade a cada golpe.

Por conseguinte, a resistência ao fluxo (s_b) refere-se à quantidade de energia necessária mover a massa através da A , o que leva à Equação 7.

Equação 7. Resistência ao cisalhamento de partículas granulares

$$s_b = \frac{Nmgh}{Ad}$$

Fonte: Autor (2025)

Prosseguindo, o peso específico (γ) de uma partícula é o peso da substância sólida (m) por unidade de volume (V) (Equação 8).

Equação 8. Peso específico

$$\gamma = \frac{m}{V}$$

Fonte: Caputo (2015)

Portanto, $m = V\gamma$.

Substituindo na Equação 7, chega-se à Equação 9.

Equação 9. Resistência ao cisalhamento de partículas granulares modificada

$$s_b = \frac{NV\gamma gh}{Ad}$$

Fonte: Autor (2025)

Vale frisar que, m é a soma das massas da partícula sólidas (m_s) e da massa da água (m_w), onde $m_w = w \cdot m_s$, onde w é a umidade ou taxa de água em relação à massa das partículas sólidas no material, portanto, $m = m_s(1 + w)$. De modo análogo, o V é a soma do volume das partículas sólidas (V_s) e do volume dos vazios (V_v).

Sabendo que o grau de saturação (S) é definido como a razão entre V_s pelo V_v , assim, $V = V_s \left(1 + \frac{1}{S}\right)$, obtém-se:

Equação 10. Peso aparente modificado

$$\gamma = \frac{m_s(1 + w)}{V_s \left(1 + \frac{1}{S}\right)}$$

Fonte: Autor (2025)

A densidade das partículas sólidas é $\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \therefore V_s = \frac{m_s}{\rho_s}$, então, efetuando a substituição na Equação 10:

Equação 11. Peso aparente modificado

$$\gamma = \frac{m_s(1 + h)}{\frac{m_s}{\rho_s} \left(1 + \frac{1}{S}\right)} = \frac{\rho_s(1 + h)}{\left(1 + \frac{1}{S}\right)}$$

Fonte: Autor (2025)

Em concordância com Wasti e Bezirci (1986) a densidade real dos grãos (G_s) é definida pela relação entre a densidade das partículas sólidas (ρ_s) e o peso aparente da água (γ_w).

Equação 12. Densidade real dos grãos

$$G_s = \frac{\rho_s}{\gamma_w}$$

Fonte: Wasti e Bezirci (1986)

Posteriormente, ao alterar a Equação 11, quanto a densidade real dos grãos, ao substituir ρ_s por $G_s \cdot \gamma_w$, chega-se à Equação 13.

Equação 13. Peso aparente

$$\gamma = \frac{G_s \cdot \gamma_w (1 + w)}{\left(1 + \frac{1}{S}\right)}$$

Fonte: Autor (2025)

Conforme Almeida (2014) o grau de saturação pode ser expresso pela Equação 14, na qual e refere-se ao índice de vazios.

Equação 14. Grau de saturação

$$S = \frac{\gamma_s \cdot w}{e \cdot \gamma_w}$$

Fonte: Almeida (2014)

Ao inserir a Equação 14, e considerar $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \therefore S = \frac{G_s \cdot h}{e}$, na Equação 13, obtém-se:

Equação 15. Peso aparente alterado

$$\gamma = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{\left(1 + \frac{e}{G_s w}\right)}$$

Fonte: Autor (2025)

Efetuada as manipulações algébricas, encontra-se que o peso aparente é dado por:

Equação 16. Peso aparente

$$\gamma = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + \frac{G_s w}{S}}$$

Fonte: Autor (2025)

Após idealizar a equação do peso aparente (ou densidade aparente), e retornar à Equação 7, substituindo-o:

Equação 17. Resistência ao cisalhamento de partículas granulares modificada

$$s_b = \frac{NV \left(\frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + \frac{G_s w}{S}} \right) gh}{Ad}$$

Fonte: Autor (2025)

Complementando, ao inserir a Equação 17 na correlação entre a resistência ao cisalhamento modificada, conforme os testes de Hyun-Ki, Cortés e Santamarina (2007), encontra-se a Equação 18, que representa a resistência ao cisalhamento para o método de Casagrande.

Equação 18. Resistência ao cisalhamento para o método de Casagrande

$$s = \left(\frac{NV \left(\frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + \frac{G_s w}{S}} \right) gh}{\frac{Ad}{5,16}} \right)^{\frac{1}{0,44}}$$

Fonte: Autor (2025)

Como foi abordado previamente, as constantes são resultantes de ajustes experimentais dos dados coletados durante o teste. Neste estudo, o valor $\frac{1}{0,44}$ foi determinada através da umidade das amostras, por meio da umidade, onde $w_{méd}$ representa a média das w , onde C corresponde a constante (Equação 19).

Equação 19. Cálculo de um Parâmetro em Função da Umidade Média

$$\frac{0,773 + 297,35}{e^{[(w_{méd} - 31,8) + 150,95 + 0,01979 * w_{méd}]} = C$$

Fonte: Autor (2025)

A equação proposta (Equação 18) para a resistência ao cisalhamento no método de Casagrande pode ser considerada de aplicabilidade geral para a maioria dos solos de baixa a alta plasticidade, sendo particularmente útil na conversão de dados obtidos de bancos de dados relacionados a propriedades do solo.

4.3 CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

A idealização dos dados deste estudo adotou como base de informações os parâmetros dispostos no Quadro 7. Utilizou-se a notação [Ac] para definir os parâmetros correlacionados ao aparelho de Casagrande e a notação [Cp] para definir parâmetros correlacionados ao cone de penetração.

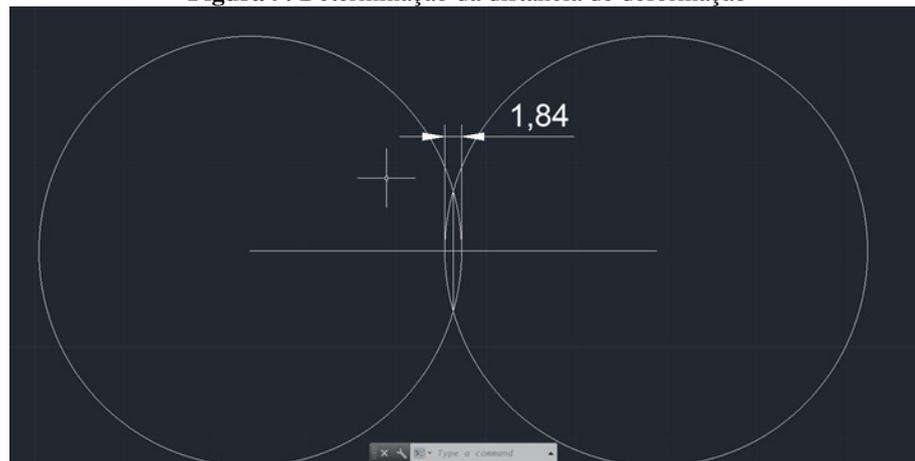
Quadro 7. Parâmetros utilizados como base de informação

Parâmetro	Aplicação	Símbolo	Valor	Unidade	Referência
Número de golpes	[Ac]	N	25	-	Casagrande (1958)
Massa do solo	[Ac]	m_s	-	kg	Autor (2025)
Volume do solo	[Ac]	V_s	$2,74 \cdot 10^{-5}$	m^3	Autor (2025)
Altura da queda	[Ac]	h	0,01	m	Koumoto e Houslby (2001)
Área de contato	[Ac]	A	0,003814	m^3	Autor (2025)
Distância de deformação radial	[Ac]	d	0,00384	m	Autor (2025)
Fator do cone	[Cp]	K	1,33	-	Koumoto e Houslby (2001)
Ângulo	[Cp]	β	60	°	Koumoto e Houslby (2001)

Fonte: Autor (2025)

A distância de deformação radial foi determinada por meio de modelagem no AutoCAD (Figura 9), considerando círculos com diâmetro de 46,8 mm.

Figura 9. Determinação da distância de deformação



Fonte: Autor (2025)

A distância necessária para que o contato entre eles atinja 13 mm é igual a 1 mm de cada metade, acrescido de 1,84 mm, correspondendo a 3,184 mm. Vale frisar que, o modelo de Hyun-Ki, Cortés e Santamarina (2007) considera a m_s como a massa total, em paralelo, tendo em conta que a análise envolve o solo em si, este estudo segue a mesma abordagem.

A amostra deste estudo foi extraída do trabalho de Pinto *et al.* (2012) e Matteo (2012), na qual os solos utilizados foram sintetizados em laboratório, conforme as relações apresentadas na Tabelas 2.

Tabela 2. Distribuição granulométrica dos solos sintéticos

Amostra	Caulim	Bentonita	Areia	Silte	Argila
T0-0	100%	0%	0%	0%	0%
T5-0	95%	5%	0%	0%	0%
T20-0	80%	20%	0%	0%	0%
T30-0	70%	30%	0%	0%	0%
T0-20	80%	0%	20%	0%	0%
T0-30	70%	0%	30%	0%	0%
T5-20	75%	5%	20%	0%	0%
T20-20	60%	20%	20%	0%	0%
S1	0%	0%	2%	66%	32%
S2	0%	0%	9%	63%	28%
S3	0%	0%	17%	57%	26%
S4	0%	0%	26%	52%	22%
S5	0%	0%	35%	46%	19%
S6	0%	0%	44%	40%	16%

Fonte: Pinto *et al.* (2012) e Matteo (2012)

As amostras T0-0 a T20-20 representam solos sintéticos, onde os componentes foram misturados intencionalmente para criar combinações específicas de minerais e partículas. Enquanto, as amostras S1 a S6 correspondem a solos naturais, cujas composições remetem as formações geológicas reais.

As amostras sintéticas T0-0 a T30-0 variam apenas na quantidade de bentonita, que é um tipo de argila expansiva, afetando propriedades como coesão, plasticidade e permeabilidade. Por outro lado, as amostras T0-20 a T20-20 introduzem areia na composição, modificando o comportamento mecânico do solo ao reduzir a coesão e aumentar a permeabilidade. A partir das amostras, foram gerados os dados apresentados nos Apêndice A e B, organizados em tabela.

4.4 IMPACTO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E DA DENSIDADE

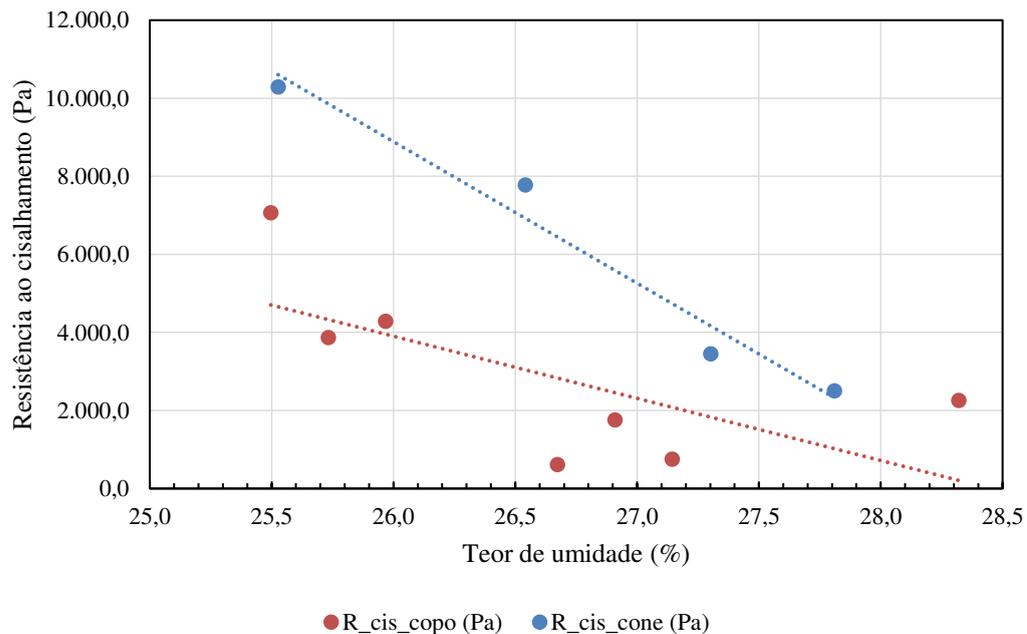
A resistência ao cisalhamento não drenado (s_u) e a densidade (d) são propriedades determinantes na estabilidade dos solos, influenciando desde o comportamento mecânico a segurança de estruturas geotécnicas. Neste estudo, os dados referentes à τ são apresentados em

gráficos, permitindo uma análise visual dos mesmos.

Observa-se no Apêndice A, que a G_s mantém-se majoritariamente constante, com variação de 2,51 g/cm³ a 2,73 g/cm³, similar ao estudo de Wasti e Bezirci (1986), cujo intervalo foi de 2,40 g/cm³ a 2,71 g/cm³, sugerindo que os solos analisados possuem características mineralógicas comparáveis. Como os valores estão dentro da faixa reportada na literatura, isso reforça a confiabilidade dos dados coletados.

O estudo assumiu que a resistência ao cisalhamento para o método de cone é determinada pela Equação 1, enquanto para o método de Casagrande, foi calculada pela Equação 18. O Gráfico 1 ilustra a variação da resistência ao cisalhamento (Pa) em função do teor de umidade (%) para dois métodos distintos, o método do cone e o método do copo de Casagrande, nomeado como R_cis_cone e R_cis_copo, respectivamente.

Gráfico 1. Comparação entre metodos



Fonte: Autor (2025)

A resistência ao cisalhamento foi inversamente proporcional ao do teor de umidade, evidenciando o comportamento para solos plasticos. Paralelamente, à medida que a umidade aumenta, as forças de atração entre as partículas diminuem, resultando em uma menor capacidade do solo de resistir a esforços de cisalhamento.

A coesão de um solo está diretamente relacionada à sua fração de partículas finas, ou seja, ao teor de argila e, em menor grau, ao silte. Ciente que, solos coesivos são predominantemente compostos por partículas de argila, analisando a Tabela 2, observa-se que

as amostras T0-0 a T20-20 são compostas majoritariamente por caulim e bentonita, que são tipos de argilas industriais, apresentando de 70 a 100%, podem ser considerados solos altamente coesivos.

De modo análogo, as amostras S1 a S6 possuem teores de argila entre 32% e 16%, tendendo a ser coesivas. Contudo, conforme a fração de areia aumenta nas amostras de S3 a S6, a tendência é que a coesão diminua, tornando-se solos intermediários ou não coesivos (mais arenosos. No que tange a declividade da linha de tendência, é evidente que o método do cone apresenta a mesma mais acentuada, indicando uma maior sensibilidade dessa metodologia à variação do teor de umidade.

Em contrapartida, os pontos do método do cone seguem um padrão mais consistente ao longo da tendência negativa, os dados do método de Casagrande apresentam uma distribuição ligeiramente mais dispersa. Reforçando o exposto, a Tabela 5, disposta no Apêndice B, indica que, conforme a umidade aumenta, a resistência ao cisalhamento tende a diminuir, evidenciando uma perda de coesão do material.

Quantitativamente, nota-se que a maior resistência ao cisalhamento registrada foi de 10,29 kPa, correspondente a uma umidade de 25,53%. Por outro lado, a maior umidade observada foi de 186,08%, associada a uma resistência ao cisalhamento de apenas 1,14 kPa. Ao relacionar com a literatura, o menor valor de τ_u está dentro do intervalo encontrado por Norman (1958), Skempton e Northey (1953), Youssef *et al.* (1965) e Wroth & Wood (1978) (Quadro 6).

Acrescentando, a Tabela 3 apresenta a relação entre o teor de umidade, a penetração do cone e o número teórico de golpes de Casagrande, da amostra T0-NA, escolhida por exibir o maior erro. O número teórico de golpes foi calculado considerando a penetração obtida no cone e o teor de umidade. Em outras palavras, esse valor representa a quantidade teórica de golpes necessária para fechar a ranhura caso o solo tivesse sido ensaiado no Aparelho de Casagrande.

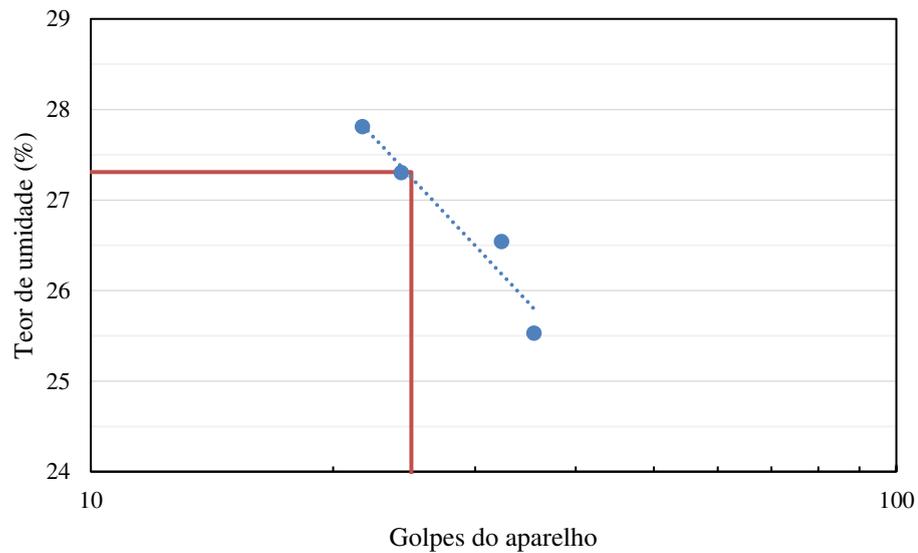
Tabela 3. Dados da amostra T0-NA

h (%)	Cone de penetração	Casagrande
	Penetração cone (mm)	$N_{teórico}$
25,53	10,07	35,49
26,54	11,59	32,34
27,30	17,40	24,30
27,81	20,43	21,73

Fonte: Autor (2025)

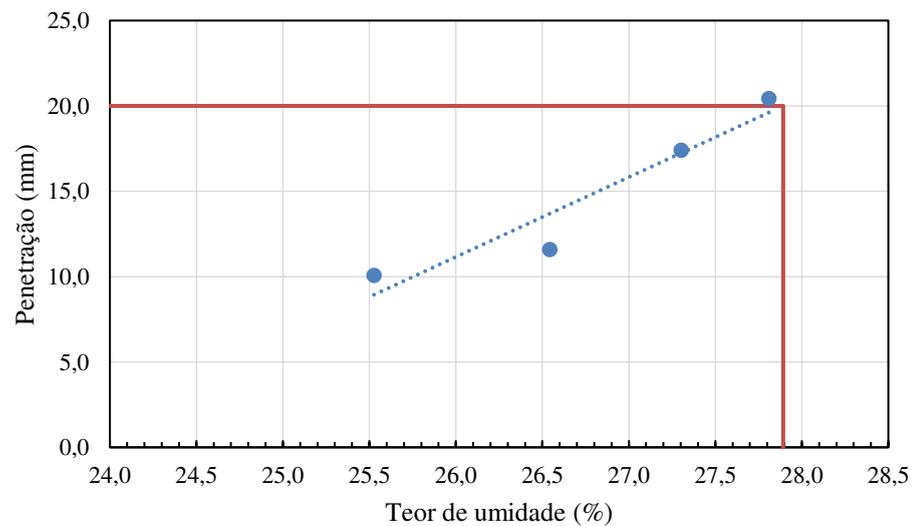
Por conseguinte, o Gráfico 2 ilustra o resultado de um ensaio de LL através do método de Casagrande, estimado teoricamente, através da penetração do cone. Minuciosamente, h foi transformado em um valor equivalente ao número de golpes através de uma relação empírica previamente estabelecida, baseada na calibração entre os dois métodos. Paralelamente o Gráfico 3 apresenta o resultado de um ensaio de LL através do *Fall Cone*, onde a interseção das linhas vermelhas indica o LL, ou seja, a umidade correspondente a $N = 25$ golpes.

Gráfico 2. Limite de liquidez da amostra T0-NA pelo Casagrande



Fonte: Autor (2025)

Gráfico 3. Limite de liquidez da amostra T0-NA pelo cone sueco



Fonte: Autor (2025)

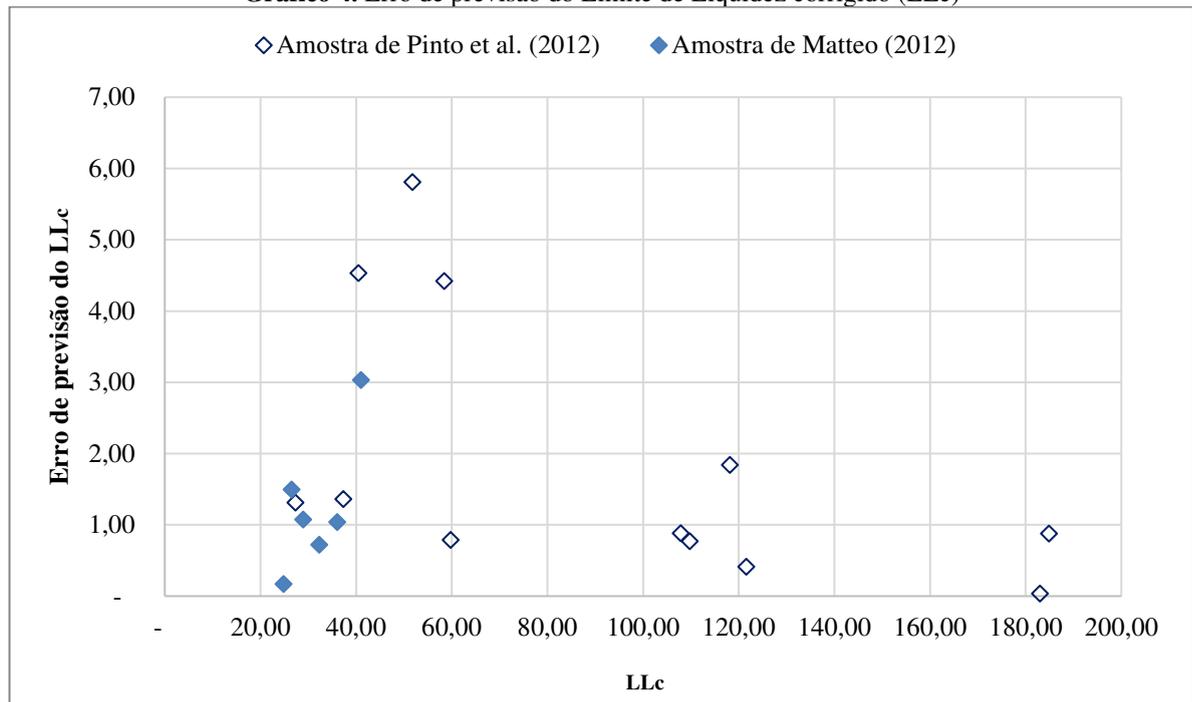
A distribuição dos pontos experimentais, em ambos os métodos, mostra uma tendência decrescente da umidade com o aumento do número de golpes, como esperado. No método de Casagrande, o ponteiro no gráfico corresponde ao ponto [25: 27,31], indicando que, com 25 golpes, o teor de umidade necessário para o fechamento do sulco é de 27,31%, valor esse que determina o limite de liquidez do solo.

No método do cone, o ponteiro no gráfico corresponde ao ponto [20: 27,89], ou seja, o solo alcança seu comportamento de liquidez quando sua umidade atinge 27,89%, permitindo a comparação direta com os resultados do método de Casagrande. Ao analisar comparativamente os métodos de Casagrande e do cone de penetração na determinação do LL, conforme a Tabela 5, disposta no Apêndice B, verificou-se que as previsões para os valores de LL_C são relativamente próximos dos valores reais de Casagrande (LL_{Real}), porém há variações significativas em alguns casos.

Por exemplo, para a amostra T0-20-A, o erro de previsão é de 4,53, enquanto para T5NA, o erro é de apenas 0,79. Posto isto, sugere-se que a precisão das previsões pode variar dependendo das características específicas da amostra. Além disso, os erros de previsão tendem a ser menores para amostras com valores de LL mais altos, como a T30NA e T30A, indicando que os métodos de previsão são mais confiáveis para solos com maior LL.

A maioria dos erros de previsão está na faixa de 0% a 5%, pressupõe-se que os métodos de previsão são razoavelmente confiáveis, mas não perfeitos. A exceção é a amostra T0-NA, onde o erro é de 5,81, sugerindo que para certos tipos de solo, os métodos de previsão podem não ser adequados.

Nesse cenário, o Gráfico 4 apresenta a comparação visual dos dados da amostra deste estudo, onde o erro de previsão do LL varia de 0,17 a 5,81.

Gráfico 4. Erro de previsão do Limite de Liquidez corrigido (LLc)

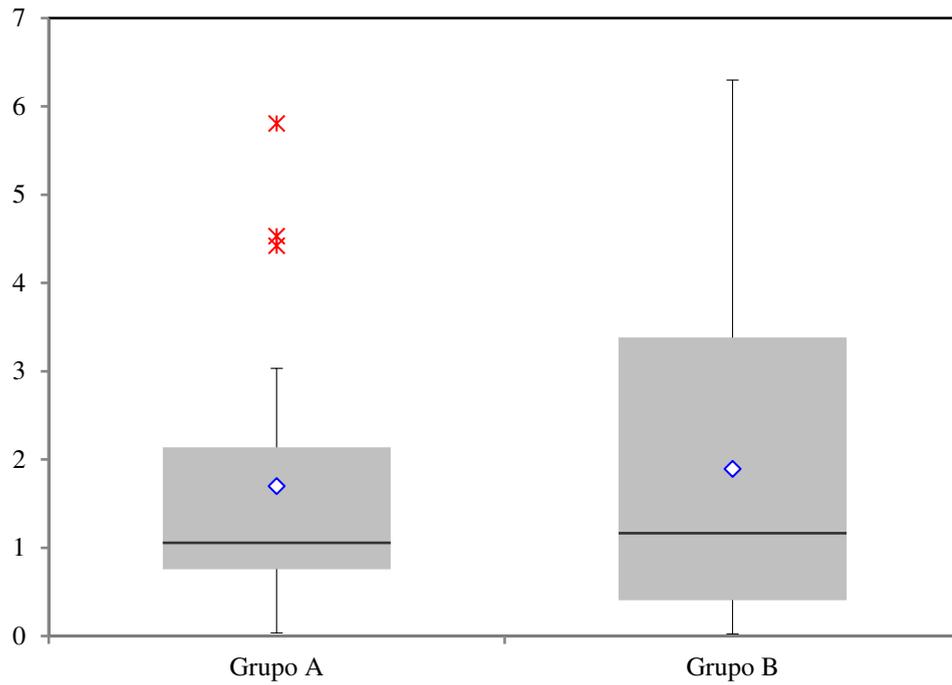
Fonte: Autor (2025)

A diferença nos valores entre os conjuntos das amostras demonstra variações nas características dos solos estudados ou nos métodos de análise utilizados. Quantitativamente, ao avaliar os valores de LL, tem-se que LL_C equivale a 27,31, indicando o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido. Subsequente, o valor de LL_P igual a 27,89, ligeiramente superior ao obtido pelo método de Casagrande, sugere uma pequena variação na sensibilidade do método ou nas condições de teste.

Contudo, o LL de Casagrande pontual, determinado pelo método conhecido como um único ponto (Equação 1), neste estudo foi de 27,17. Observa-se que o resultado foi muito próximo ao LL_C sugerindo consistência nas medições. Apesar de divergentes, os valores são próximos, variando entre 27,17 e 27,89, conseqüentemente, há uma boa consistência entre os métodos, sugerindo que ambos são confiáveis para determinar o LL deste solo específico.

Elucidando, a diferença entre o LL_P e o LL_C pode ser atribuída à sensibilidade do método do Cone, que pode detectar mudanças no estado do solo de forma mais precisa.

Em face ao exposto, utilizou-se o Gráfico 5 para confirmar que o método pontual apresentou um desempenho inferior em comparação ao outro método na estimativa do LL. Esmiuçadamente, o Grupo A representa o método teórico e o Grupo B refere-se ao método pontual, conforme disposto no Apêndice C.

Gráfico 5. Limite de Liquidez através do método teórico e pontual

Fonte: Autor (2025)

Quanto aos conjuntos, o Grupo B apresenta uma média mais alta e uma dispersão maior em comparação com o Grupo A, indicando que os valores do Grupo B são, em geral, mais elevados e variáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao término deste estudo, a comparação entre os métodos de Casagrande e do cone de penetração na determinação do LL revelou que, apesar de ambos serem amplamente utilizados e normatizados, existem discrepâncias nos resultados obtidos. Evidenciou-se que o dispositivo de Casagrande é influenciado por variáveis operacionais que podem afetar o resultado, enquanto o cone de penetração fornece uma abordagem mais direta da resistência do solo à penetração, tornando-se um método vantajoso em situações que requerem maior precisão.

Quanto a resistência ao cisalhamento, o método do cone de penetração gerou valores de mais elevados, com uma sensibilidade maior às variações de umidade. Em contraste, o método de Casagrande apresentou resultados inferiores e uma dispersão maior, o que indica que esses métodos podem responder de maneira diferente às condições de umidade e densidade da mistura. No que diz respeito a densidade da mistura, o estudo indicou uma influência direta nos resultados dos LL, sendo fundamental para entender o comportamento do solo sob diferentes condições.

A equação idealizada neste estudo foi validada através por meio da análise dos dados coletados das amostras, onde os resultados obtidos foram comparados com os valores previstos pela equação. Assim sendo, a consistência entre os valores obtidos neste estudo e a base teórica reforçou a validade da correlação proposta, evidenciando a aplicabilidade da equação para a estimativa dos parâmetros de interesse.

Apesar disso, este trabalho reconhece algumas limitações, dentre elas destaca-se a análise baseada em uma abordagem não-experimental, o que pode limitar a capacidade de fazer inferências causais diretas sobre como a densidade e a resistência ao cisalhamento afetam o LL. Diante disso, sugere-se para futuros estudos a investigação de uma abordagem experimental, que permita uma análise direta e controlada das variáveis envolvidas, como a densidade e a resistência ao cisalhamento, de modo a avaliar de forma mais precisa seu impacto sobre o limite de liquidez.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. G. R. **Índices Físico-Geotécnicos**. Geotecnia I. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2014. Disponível em: <<https://www.slideserve.com/betty/ndices-f-sico>>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **NBR 6459:2016 – Solos – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.
- BANDEIRA, F. C. A. S. **Estudo da viabilidade técnica e execução de aterros sobre solos moles: estudo de caso**. 2019. 83f. Monografia (Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- BARBOSA, C.E.B. **Predição da necessidade de calagem em área de pivô central por meio de rede neural artificial**. 2020. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Goiás, 2020.
- BICALHO, K. V.; GRAMELICH, J. C.; SANTOS CUNHA, C. L. dos. Comparação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros. **Comunicações Geológicas**, v. 101, ed. especial III, p. 1097-1099, 2014.
- BICALHO, K. V.; GRAMELICH, J. C.; SANTOS CUNHA, C. L. dos. JUNIOR SARMENTO, R. G. Estudo de liquidez e plasticidade dos solos determinados por Casagrande e Cone Penetrométrico para diferentes solos argilosos. **Geotecnia**, v. 140, p. 63-72, jul. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2017.140.04>>.. Acesso em: 16 jan. 2025.
- BICALHO, K. V.; KÜSTER, J. S. H.; TOTOLA, L. B.; CRISTELLO, L. G. C. *Discussion of “Determination of liquid limit by the fall cone method”*. **Soils and Rocks**, v. 44, n. 2, e2021062721, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.28927/SR.2021.062721>>. Acesso em: 16 fev. 2025.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 7 ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 2015.
- CASAGRANDE, A. *Notes on the design of the liquid limit device*. **Géotechnique**, v. 8, n. 2, p. 84-91, 1958. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.2.84>>. Acesso em: 22 jan. 2025.
- CERBINO, L. C. **Comparação do limite de liquidez utilizando o aparelho de Casagrande e o Fall Cone**. 2018. 92f. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- CREVELIN, L. G. **Comparação entre os valores de limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para diferentes solos argilosos**. 2018. 157 f. : il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Vitória, 2018.
- CREVELIN, L. G.; BICALHO, K. V. *Comparison of the Casagrande and Fall Cone Methods for Liquid Limit Determinations in Different Clay Soils*. **Revista Brasileira de Ciência do**

Solo, v. 42, e0180105, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180105>. Acesso em: 18 fev. 2025.

DAS, N.; SARMA, B.; SINGH, S.; SUTRADHAR, B. B. *Comparison in undrained shear strength between low and high liquid limit soils*. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 2, n. 1, jan. 2013. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=a3132148de3d9b258c5b0ff99f62bedb9f32717c>>. Acesso em: 20 fev. 2024.

GRONBECH, G. L.; NIELSEN, B. N.; IBSEN, L. B. *Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of Casagrande and fall cone apparatus*. In: **GEOTECHNICAL CONFERENCE**, 2011.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of physics*. 10. ed. New York: Wiley, 2013.

HANSBO, S. *A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test*. 14 ed., Stockholm: Royal Swedish Geotechnical Institute, 1957.

HYUN-KI, K.; CORTES, D. D.; SANTAMARINA, J. C. *Flow Test: Particle-Level and Macroscale Analyses*. **Materials Journal**, v. 104, n. 3, p. 323-327, 2007. DOI: 10.14359/18679. Acesso em: 28 jan. 2025.

IBRAHIM, H. H.; NOORI, K. M. *Determining Casagrande liquid limit values from cone penetration test data*. **Zanco Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 31, n. s3, p. 114-120, 2019.

KESTLER, M. A. *Correlations and comparisons between the Casagrande liquid limit device and the fall cone*. 1982. 280 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1982.

KOUMOTO, T.; HOULSBY, G. T. *Theory and practice of the fall cone test*. **Geotechnique**, v. 51, n. 8, p. 701-712, 2001.

KÜSTER, J. S. H. **Estudos de correlações e comparações entre limites de liquidez de solos obtidos pelos métodos de Casagrande e cone**. 2022. 269 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2022.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MARIANO, J. M. **Automação de dispositivo para medição de limite de liquidez: Concha Casagrande com sensor laser**. 2021. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo, Toledo, 2021.

MATTEO, L. D. *Liquid limit of low- to medium-plasticity soils: Comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test*. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 71, n. 1, p. 79-85, 2012. DOI: 10.1007/s10064-011-0412-5. Acesso em: 16 fev. 2025.

MITCHELL, J. K.; SITAR, N. *Engineering Properties of Tropical Residual Soils*. In: ASCE Geotechnical Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils, Honolulu, Hawaii, 1982.

MOHAJERANI, A. *A suggested new calibration for the cone penetrometer liquid limit*. **Australian Geomechanics Journal**, v. 34, n. 4, p. 71-78, 1999. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/299535418>>. Acesso em: 16 fev. 2025.

NOGUEIRA, G. D. S.; SANTOS, I. A.; BORGES, R. R. de S. Estudo de permeabilidade de solo estabilizado com cal / *Permeability study of stabilized soil with lime*. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 5, p. 25646–25662, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-134. Disponível em: <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/9727>>. Acesso em: 16 jan. 2025.

OLIVEIRA, M. F. de. **Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração**. Catalão: UFG, 2011.

PINTO, P. B.; ALVES, A. M. L.; BASTOS, C. A. B. Ensaio de cone de queda aplicado em estudos de plasticidade e resistência ao cisalhamento de solos artificiais. **Geotecnia**, n. 143, p. 85-110, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.05>>. Acesso em: 16 fev. 2025.

PINTO, P. B.; ROSA, K. L.; ALVES, A. M. L.; BASTOS, C. A. B. **Comparação entre resultados de ensaios de Casagrande e de cone de queda livre para determinação do limite de liquidez**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Porto de Galinhas, ResearchGate, 2012. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/283914710>>. Acesso em: 08 fev. 2025.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. *Correlation between granulometry and organic soil matters with limits of Atterberg*. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 185–196, 2018. Disponível em: <<https://seer.cloud.prodb.com.br/index.php/BIOENG/article/view/663>>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ROHDE, L. L. **Análise de ensaios índice de suporte califórnia: determinação de traço ótimo de solo-brita com materiais de Alegrete-RS**. 2023. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2023.

SANTIAGO, R. C. C. A. *Framework design-based research para pesquisas aplicadas*. 2018. 301f. Tese (Doutorado em Difusão do Conhecimento) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

SANTOS, V. S. **Estudo da viabilidade técnica da determinação do limite de liquidez dos solos finos pela mesa de consistência**. 2019. 60f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

SILVA, A. C. S. **Definição de padrões de plasticidade de solos através do cone de penetração, por comparação com o método de Casagrande**. 2013. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Geotécnica, Porto, 2013.

SILVA, V. M.; DE MATTOS, V. L. D. O método dos mínimos quadrados no ajuste de um

modelo polinomial. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 13, n. 4, 2017. Disponível em: <<https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/3689>>. Acesso em: 16 jan. 2025.

SOUSA, P. M. L. P. **Limite de liquidez – correlações e comparações entre os métodos de Fall Cone e da concha de Casagrande**. 2011. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SOUZA ELIE, C. H. D. **Incorporação de resíduos de lodo da ETA no tijolo de solo-cimento: uma alternativa sustentável**. Revisão Sistemática de Literatura – RSL. 2023. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

SOUZA, H. D. H. J. de. **Metodologia PRISMA**. Gama, DF: UNICEPLAC, 2022.

WASTI, Y.; BEZIRCI, M. *Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test*. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 23, n. 2, p. 241-246, 1986.

APÊNDICE A
DADOS DAS AMOSTRA

Tabela 4. Dados de umidade, número de golpes e densidade do grão

Amostra	Umidade (%)	Golpes	Densidade do grão
T0-30	27,14	14,00	2,65
T0-30	26,91	19,00	2,65
T0-30	25,97	26,00	2,65
T0-30	25,50	31,00	2,65
T0-30	26,67	13,00	2,65
T0-30	28,32	21,00	2,65
T0-30	25,73	25,00	2,65
T0-20-A	33,02	30,00	2,65
T0-20-A	37,73	27,00	2,65
T0-20-A	36,55	19,00	2,65
T0-20-A	38,20	16,00	2,65
T0-20-NA	33,97	33,00	2,65
T0-20-NA	35,38	30,00	2,65
T0-20-NA	36,32	26,00	2,65
T0-20-NA	36,55	22,00	2,65
T0-NA	55,14	10,00	2,65
T0-NA	46,43	23,00	2,65
T0-NA	45,96	23,00	2,65
T0-NA	43,61	32,00	2,65
T0-NA	42,43	41,00	2,65
T0A	50,20	12,00	2,65
T0A	49,02	15,00	2,65
T0A	49,26	18,00	2,65
T0A	46,43	28,00	2,65
T520NA	42,90	52,00	2,65
T520NA	45,96	35,00	2,65
T520NA	49,73	22,00	2,65
T520NA	50,20	19,00	2,65
T520NA	49,73	17,00	2,65
T520A	43,61	42,00	2,65
T520A	44,32	33,00	2,65
T520A	46,90	20,00	2,65
T520A	50,43	14,00	2,65
T5A	51,61	35,00	2,65
T5A	52,78	31,00	2,65
T5A	54,67	22,00	2,65
T5A	59,84	15,00	2,51
T5NA	54,20	44,00	2,51
T5NA	56,78	31,00	2,51
T5NA	58,67	22,00	2,51
T5NA	60,55	20,00	2,65
T5NA	63,13	12,00	2,65
T2020A	101,71	47,00	2,65
T2020A	101,48	42,00	2,65
T2020A	102,89	35,00	2,65
T2020A	106,65	28,00	2,65
T2020A	105,01	25,00	2,65
T2020A	111,83	15,00	2,65
T2020NA	102,18	40,00	2,65
T2020NA	104,77	36,00	2,65
T2020NA	110,18	26,00	2,65

Amostra	Umidade (%)	Golpes	Densidade do grão
T2020NA	107,59	22,00	2,65
T2020NA	114,65	14,00	2,65
T20A	106,89	60,00	2,65
T20A	110,89	52,00	2,65
T20A	113,00	46,00	2,65
T20A	116,06	35,00	2,65
T20A	121,24	19,00	2,65
T20NA	118,18	33,00	2,65
T20NA	122,18	23,00	2,65
T20NA	123,59	17,00	2,65
T20NA	129,71	13,00	2,65
T30NA	165,23	46,00	2,65
T30NA	172,99	36,00	2,65
T30NA	173,70	31,00	2,65
T30NA	185,93	28,00	2,65
T30NA	190,87	14,00	2,65
T30A	167,11	48,00	2,65
T30A	174,17	38,00	2,65
T30A	188,05	28,00	2,65
T30A	186,87	23,00	2,65
T30A	191,57	12,00	2,65
S6	27,18	12,96	2,7
S6	26,73	13,81	2,7
S6	26,93	13,87	2,7
S6	26,09	18,92	2,7
S6	25,95	19,88	2,7
S6	25,80	20,89	2,7
S6	25,01	23,69	2,7
S6	25,16	24,90	2,7
S6	24,81	25,92	2,7
S6	24,76	29,67	2,7
S6	24,27	29,67	2,7
S6	24,17	32,76	2,7
S5	29,19	12,91	2,69
S5	29,49	12,91	2,69
S5	29,19	14,84	2,69
S5	28,75	17,06	2,69
S5	28,41	18,92	2,69
S5	28,41	19,97	2,69
S5	27,82	23,80	2,69
S5	27,52	25,81	2,69
S5	27,03	27,86	2,69
S5	27,23	28,75	2,69
S5	27,03	30,76	2,69
S5	26,73	34,58	2,69
S4	33,18	12,91	2,71
S4	32,93	13,08	2,71
S4	32,98	13,87	2,71
S4	31,31	16,91	2,71
S4	31,06	18,01	2,71
S4	30,67	19,97	2,71
S4	30,23	22,96	2,71
S4	29,05	26,75	2,71
S4	29,29	26,75	2,71
S4	29,05	28,88	2,71
S4	28,95	29,81	2,71

Amostra	Umidade (%)	Golpes	Densidade do grão
S4	29,14	29,81	2,71
S3	35,64	13,93	2,7
S3	35,59	14,91	2,7
S3	35,49	15,87	2,7
S3	34,17	18,83	2,7
S3	33,92	19,88	2,7
S3	33,62	20,89	2,7
S3	32,44	26,75	2,7
S3	32,39	27,86	2,7
S3	32,29	29,14	2,7
S3	32,20	32,91	2,7
S3	31,85	33,06	2,7
S3	32,00	33,66	2,7
S2	36,87	11,90	2,71
S2	36,87	11,90	2,71
S2	37,36	11,90	2,71
S2	36,68	16,98	2,71
S2	36,48	16,98	2,71
S2	36,33	17,93	2,71
S2	34,36	27,86	2,71
S2	34,56	29,81	2,71
S2	34,12	31,74	2,71
S2	33,53	34,73	2,71
S2	33,48	34,73	2,71
S1	41,15	14,91	2,73
S1	40,22	15,95	2,73
S1	40,17	17,93	2,73
S1	39,97	18,92	2,73
S1	39,48	19,88	2,73
S1	38,50	22,86	2,73
S1	38,00	27,00	2,73
S1	37,91	27,61	2,73
S1	37,66	29,14	2,73
S1	37,27	32,91	2,73
S1	36,87	31,74	2,73

Fonte: Pinto *et al.* (2012) e Matteo (2012)

APÊNDICE B

DADOS OBTIDOS POR MEIO DAS AMOSTRAS

Tabela 5. Comparação entre Limites de Liquidez (LL)

Amostra	LLc Equacionado	LLp	LLc Pontual	LL Real Casagrande	Erro de Previsão do LLc	Erro LL pontual
T0-30	27,31	27,89	27,17	26,00	1,31	1,17
T0-20-A	40,53	39,27	40,31	36,00	4,53	4,31
T0-20-NA	37,36	37,11	37,16	36,00	1,36	1,16
T0-NA	51,81	46,76	52,30	46,00	5,81	6,30
T5A	58,42	51,20	57,17	54,00	4,42	3,17
T5NA	59,79	53,93	59,17	59,00	0,79	0,17
T2020A	107,88	100,62	109,57	107,00	0,88	2,57
T2020NA	109,77	101,45	111,79	109,00	0,77	2,79
T20A	118,16	95,49	115,82	120,00	1,84	4,18
T20NA	121,59	97,15	122,68	122,00	0,41	0,68
T30NA	182,97	161,53	181,69	183,00	0,03	1,31
T30A	184,88	165,87	184,46	184,00	0,88	0,46
S1	41,03	39,17	42,03	38,00	3,03	4,03
S2	36,04	36,26	35,54	35,00	1,04	0,54
S3	32,28	33,46	33,24	33,00	0,72	0,24
S4	28,93	30,28	29,75	30,00	1,07	0,25
S5	26,51	28,14	27,98	28,00	1,49	0,02
S6	24,83	26,20	25,69	25,00	0,17	0,69

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Tabela 6. Dados do cone, umidade, resistência ao cisalhamento e densidade dos grãos

Amostra	Umidade (%)	Penetração (mm)	Cone	Massa	Altura	K	τ_u	Densidade dos grãos
T0-30	25,53	10,07	80g 30°	80	20	1,33	10.288,38	2,65
T0-30	26,54	11,59	80g 30°	80	20	1,33	7.793,30	2,65
T0-30	27,30	17,40	80g 30°	80	20	1,33	3.458,08	2,65
T0-30	27,81	20,43	80g 30°	80	20	1,33	2.508,16	2,65
T0-20-A	33,39	10,45	80g 30°	80	20	1,33	9.580,10	2,65
T0-20-A	36,69	12,85	80g 30°	80	20	1,33	6.337,09	2,65
T0-20-A	38,21	15,88	80g 30°	80	20	1,33	4.149,41	2,65
T0-20-A	38,72	19,04	80g 30°	80	20	1,33	2.887,47	2,65
T0-20-A	40,75	25,10	80g 30°	80	20	1,33	1.661,33	2,65
T0-20-NA	34,40	10,83	80g 30°	80	20	1,33	8.921,70	2,65
T0-20-NA	35,67	15,50	80g 30°	80	20	1,33	4.354,66	2,65
T0-20-NA	37,96	22,70	80g 30°	80	20	1,33	2.031,05	2,65
T0-NA	43,03	14,37	80g 30°	80	20	1,33	5.070,84	2,65
T0-NA	45,82	18,15	80g 30°	80	20	1,33	3.175,48	2,65
T0-NA	48,10	22,82	80g 30°	80	20	1,33	2.008,64	2,65
T0-NA	51,14	26,74	80g 30°	80	20	1,33	1.463,63	2,65
T0-NA	54,95	31,16	80g 30°	80	20	1,33	1.077,90	2,65
T5A	51,40	21,06	80g 30°	80	20	1,33	2.360,02	2,65
T5A	52,92	22,19	80g 30°	80	20	1,33	2.124,54	2,65
T5A	54,19	22,82	80g 30°	80	20	1,33	2.008,64	2,65
T5A	60,02	31,91	80g 30°	80	20	1,33	1.027,34	2,65
T5NA	54,70	21,94	80g 30°	80	20	1,33	2.173,72	2,65
T5NA	56,47	24,59	80g 30°	80	20	1,33	1.730,27	2,65
T5NA	59,01	27,37	80g 30°	80	20	1,33	1.396,89	2,65
T5NA	60,78	30,65	80g 30°	80	20	1,33	1.113,71	2,65
T5NA	63,32	37,09	80g 30°	80	20	1,33	760,59	2,65
T2020A	101,87	19,42	80g 30°	80	20	1,33	2.775,91	2,65
T2020A	102,13	22,82	80g 30°	80	20	1,33	2.008,64	2,65
T2020A	103,40	24,72	80g 30°	80	20	1,33	1.712,63	2,65
T2020A	106,95	30,65	80g 30°	80	20	1,33	1.113,71	2,65
T2020A	112,02	34,82	80g 30°	80	20	1,33	860,96	2,65
T2020NA	105,93	20,30	80g 30°	80	20	1,33	2.533,11	2,65
T2020NA	107,45	22,32	80g 30°	80	20	1,33	2.095,32	2,65
T2020NA	102,38	23,96	80g 30°	80	20	1,33	1.818,08	2,65
T2020NA	104,92	26,61	80g 30°	80	20	1,33	1.473,85	2,65
T2020NA	110,75	30,90	80g 30°	80	20	1,33	1.092,85	2,65
T2020NA	114,30	35,58	80g 30°	80	20	1,33	824,69	2,65
T20A	107,20	25,35	80g 30°	80	20	1,33	1.624,33	2,51
T20A	111,26	27,50	80g 30°	80	20	1,33	1.380,63	2,51
T20A	113,29	28,25	80g 30°	80	20	1,33	1.307,58	2,51
T20A	116,08	29,39	80g 30°	80	20	1,33	1.208,43	2,51
T20A	121,66	32,17	80g 30°	80	20	1,33	1.008,74	2,51
T20NA	115,57	26,49	80g 30°	80	20	1,33	1.487,94	2,65
T20NA	118,11	30,02	80g 30°	80	20	1,33	1.158,14	2,65
T20NA	122,67	32,80	80g 30°	80	20	1,33	970,28	2,65
T20NA	123,69	33,81	80g 30°	80	20	1,33	913,18	2,65
T20NA	129,77	34,19	80g 30°	80	20	1,33	893,05	2,65

Amostra	Umidade (%)	Penetração (mm)	Cone	Massa	Altura	K	τ_u	Densidade dos grãos
T20NA	139,67	38,99	80g 30°	80	20	1,33	686,77	2,65
T30NA	165,03	23,20	80g 30°	80	20	1,33	1.938,74	2,65
T30NA	172,39	24,09	80g 30°	80	20	1,33	1.799,07	2,65
T30NA	173,65	26,49	80g 30°	80	20	1,33	1.487,94	2,65
T30NA	186,08	30,27	80g 30°	80	20	1,33	1.138,90	2,65
T30NA	185,83	37,34	80g 30°	80	20	1,33	748,47	2,65
T30A	166,81	21,69	80g 30°	80	20	1,33	2.219,07	2,65
T30A	174,16	23,20	80g 30°	80	20	1,33	1.938,74	2,65
T30A	175,18	25,85	80g 30°	80	20	1,33	1.561,49	2,65
T30A	188,11	30,78	80g 30°	80	20	1,33	1.101,83	2,65
T30A	187,10	37,34	80g 30°	80	20	1,33	748,47	2,65
S6	24,67	15,67	80g 30°	80	20	1,33	4.253,08	2,7
S6	25,19	16,90	80g 30°	80	20	1,33	3.652,50	2,7
S6	25,66	17,66	80g 30°	80	20	1,33	3.345,22	2,7
S6	25,48	17,90	80g 30°	80	20	1,33	3.256,21	2,7
S6	26,06	19,54	80g 30°	80	20	1,33	2.733,04	2,7
S6	26,24	20,02	80g 30°	80	20	1,33	2.603,68	2,7
S6	26,82	21,62	80g 30°	80	20	1,33	2.232,87	2,7
S6	26,82	22,06	80g 30°	80	20	1,33	2.144,76	2,7
S6	27,11	23,14	80g 30°	80	20	1,33	1.949,39	2,7
S6	27,28	23,30	80g 30°	80	20	1,33	1.922,73	2,7
S5	27,06	16,98	80g 30°	80	20	1,33	3.618,21	2,69
S5	27,06	17,26	80g 30°	80	20	1,33	3.501,89	2,69
S5	27,11	17,74	80g 30°	80	20	1,33	3.315,15	2,69
S5	27,69	18,66	80g 30°	80	20	1,33	2.996,62	2,69
S5	27,74	19,10	80g 30°	80	20	1,33	2.860,28	2,69
S5	27,69	19,14	80g 30°	80	20	1,33	2.848,35	2,69
S5	28,89	21,42	80g 30°	80	20	1,33	2.274,73	2,69
S5	29,29	22,34	80g 30°	80	20	1,33	2.091,38	2,69
S5	29,12	22,46	80g 30°	80	20	1,33	2.069,11	2,69
S5	29,06	22,54	80g 30°	80	20	1,33	2.054,46	2,69
S5	30,09	24,26	80g 30°	80	20	1,33	1.773,68	2,69
S5	29,98	24,90	80g 30°	80	20	1,33	1.683,75	2,69
S5	30,15	26,18	80g 30°	80	20	1,33	1.523,24	2,69
S4	28,17	14,99	80g 30°	80	20	1,33	4.647,47	2,71
S4	28,11	15,11	80g 30°	80	20	1,33	4.573,99	2,71
S4	28,28	15,79	80g 30°	80	20	1,33	4.188,72	2,71
S4	29,14	17,06	80g 30°	80	20	1,33	3.584,39	2,71
S4	29,19	17,34	80g 30°	80	20	1,33	3.469,69	2,71
S4	29,31	17,74	80g 30°	80	20	1,33	3.315,15	2,71
S4	30,62	20,66	80g 30°	80	20	1,33	2.445,00	2,71
S4	30,62	20,82	80g 30°	80	20	1,33	2.407,60	2,71
S4	30,62	20,94	80g 30°	80	20	1,33	2.380,11	2,71
S4	31,13	21,58	80g 30°	80	20	1,33	2.241,15	2,71
S4	31,93	23,18	80g 30°	80	20	1,33	1.942,67	2,71
S4	32,05	24,02	80g 30°	80	20	1,33	1.809,28	2,71
S4	32,50	26,18	80g 30°	80	20	1,33	1.523,24	2,71
S3	31,82	16,47	80g 30°	80	20	1,33	3.850,16	2,7
S3	32,44	17,46	80g 30°	80	20	1,33	3.422,21	2,7
S3	32,22	18,06	80g 30°	80	20	1,33	3.198,83	2,7
S3	32,73	18,22	80g 30°	80	20	1,33	3.142,95	2,7

Amostra	Umidade (%)	Penetração (mm)	Cone	Massa	Altura	K	τ_u	Densidade dos grãos
S3	32,56	18,34	80g 30°	80	20	1,33	3.102,00	2,7
S3	32,79	18,50	80g 30°	80	20	1,33	3.048,63	2,7
S3	34,03	20,74	80g 30°	80	20	1,33	2.426,20	2,7
S3	33,86	20,78	80g 30°	80	20	1,33	2.416,87	2,7
S3	33,92	21,22	80g 30°	80	20	1,33	2.317,77	2,7
S3	35,79	24,38	80g 30°	80	20	1,33	1.756,28	2,7
S3	35,62	24,66	80g 30°	80	20	1,33	1.716,65	2,7
S3	35,68	25,10	80g 30°	80	20	1,33	1.657,04	2,7
S2	33,53	15,43	80g 30°	80	20	1,33	4.386,34	2,71
S2	33,88	15,79	80g 30°	80	20	1,33	4.188,72	2,71
S2	33,93	15,95	80g 30°	80	20	1,33	4.105,15	2,71
S2	34,28	16,35	80g 30°	80	20	1,33	3.906,85	2,71
S2	34,51	17,34	80g 30°	80	20	1,33	3.469,69	2,71
S2	34,68	17,74	80g 30°	80	20	1,33	3.315,15	2,71
S2	35,94	19,18	80g 30°	80	20	1,33	2.836,50	2,71
S2	35,88	19,58	80g 30°	80	20	1,33	2.721,89	2,71
S2	36,11	20,02	80g 30°	80	20	1,33	2.603,68	2,71
S2	37,49	22,26	80g 30°	80	20	1,33	2.106,43	2,71
S2	38,98	24,26	80g 30°	80	20	1,33	1.773,68	2,71
S1	36,72	14,91	80g 30°	80	20	1,33	4.697,44	2,73
S1	37,01	14,95	80g 30°	80	20	1,33	4.672,36	2,73
S1	37,64	16,23	80g 30°	80	20	1,33	3.964,81	2,73
S1	37,99	17,26	80g 30°	80	20	1,33	3.501,89	2,73
S1	38,51	18,82	80g 30°	80	20	1,33	2.945,94	2,73
S1	38,98	19,46	80g 30°	80	20	1,33	2.755,53	2,73
S1	39,09	19,74	80g 30°	80	20	1,33	2.677,99	2,73
S1	39,67	21,22	80g 30°	80	20	1,33	2.317,77	2,73
S1	40,13	21,98	80g 30°	80	20	1,33	2.160,39	2,73
S1	40,31	22,26	80g 30°	80	20	1,33	2.106,43	2,73
S1	40,54	23,54	80g 30°	80	20	1,33	1.883,75	2,73
S1	41,47	25,10	80g 30°	80	20	1,33	1.657,04	2,73

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

APÊNDICE C

LIMITE DE LIQUIDEZ TEÓRICO E PONTUAL

Tabela 7. Limite de liquidez teórico e pontual

	Grupo A	Grupo B
X1	1,31	1,17
X2	4,53	4,31
X3	1,36	1,16
X4	5,81	6,30
X5	4,42	3,17
X6	0,79	0,17
X7	0,88	2,57
X8	0,77	2,79
X9	1,84	4,18
X10	0,41	0,68
X11	0,03	1,31
X12	0,88	0,46
X13	3,03	4,03
X14	1,04	0,54
X15	0,72	0,24
X16	1,07	0,25
X17	1,49	0,02
X18	0,17	0,69

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	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)

Trabalho de conclusão de curso Robertano

Assunto:	Trabalho de conclusão de curso Robertano
Assinado por:	Valteson Silva
Tipo do Documento:	Relatório
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Valteson da Silva Santos, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CBEC-PT**, em 19/03/2025 21:06:06.

Este documento foi armazenado no SUAP em 19/03/2025. 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: 1426772

Código de Autenticação: ff0cb1a767

