

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

**ASLEY HANNA DE SOUSA ANDRADE**  
**FABIANA ARAUJO MAIA**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA  
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA DE  
SOLOS PLÁSTICOS ENSAIADOS NO APARELHO DE CASAGRANDE**

**PATOS - PB**  
**2025**

**ASLEY HANNA DE SOUSA ANDRADE  
FABIANA ARAUJO MAIA**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA  
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA DE  
SOLOS PLÁSTICOS ENSAIADOS NO APARELHO DE CASAGRANDE**

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

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

A554d Andrade, Asley Hanna de Sousa.

Desenvolvimento e validação de um modelo matemático para determinação da resistência ao cisalhamento não drenada de solos plásticos ensaiados no aparelho de casagrande / Asley Hanna de Sousa Andrade, Fabiana Araujo Maia. - Patos, 2025.

66 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. Mecânica dos solos 2. Engenharia geotécnica 3. Cisalhamento-Solos 4. Limite de liquidez-Aparelho de Casagrande  
I. Título II. Maia, Fabiana Araujo III. Santos, Valteson da Silva IV. Instituto Federal da Paraíba.

CDU – 624.131

**ASLEY HANNA DE SOUSA ANDRADE  
FABIANA ARAUJO MAIA**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA  
DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA DE  
SOLOS PLÁSTICOS ENSAIADOS NO APARELHO DE CASAGRANDE**

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: 20/03/2025**

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Profª. Dra. Albaniza Maria da Silva Lopes – Examinadora Interna  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

---

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

Eu, Asley Hanna, dedico este trabalho ao meu Deus, que tem me sustentado com a sua maravilhosa graça todos os dias da minha vida, a quem sou imensamente grata por todas as bênçãos derramadas por Ele durante todos esses anos. Soli Deo Gloria.

Eu, Fabiana, dedico este trabalho à minha mãe, Maria Aparecida Araujo da Silva, a quem agradeço por não medir esforços, me apoiar e incentivar ao longo desta jornada e em todas as etapas de minha vida.

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.”*

**(Provérbios 16:3)**

## AGRADECIMENTOS

Eu, Asley Hanna, agradeço, primeiramente, a Deus que me concedeu seu amor e bondade todos os dias, e demonstrou sua soberana graça durante a minha trajetória no curso, guiando meus passos e me concedendo força, sabedoria e paz. Agradeço à minha família, meus pais, Rivaldo e Neusa por estarem sempre ao meu lado, orando por mim, me apoiando e acreditando em mim, e meus irmãos, Carol e Samuel. Também agradeço aos meus melhores amigos, Ana, Ruthe e Antônio, que sempre torceram por mim e pela minha felicidade. À minha amiga, parceira e dupla de TCC, Fabiana Maia, que esteve comigo desde o início, compartilhando tantos momentos bons durante esses anos, me incentivando e apoiando. Agradeço ao meu professor e orientador Valteson, que foi bastante dedicado e paciente conosco, nos auxiliando em todos os momentos. Agradeço a todos que fizeram parte dessa trajetória de aprendizado e crescimento.

Eu, Fabiana, agradeço a Deus por me conceder força e discernimento para seguir em busca dos meus sonhos. À minha mãe, Maria Aparecida, meu alicerce inabalável, e ao meu pai, José Francimar, por seu apoio incondicional - sem vocês, nada disso seria possível. À minha família, por confiar em mim nesta jornada, especialmente à minha avó Neusa (in memoriam), cuja presença sempre foi fonte de inspiração. Ao meu namorado, Iwry, por estar ao meu lado, me incentivando e apoiando em cada passo do caminho. Aos meus amigos, que foram peças fundamentais nessa trajetória. Um agradecimento especial à minha amiga, parceira do curso e de TCC, Asley Hanna, por compartilhar comigo essa caminhada desde o início, tornando cada desafio mais leve. Ao professor e orientador, Valteson, sou imensamente grata pelas valiosas contribuições e pela paciência ao longo deste processo. Ao IFPB e a todos que fazem parte dessa instituição, meu sincero muito obrigada por terem sido minha casa e minha família nesses cinco anos de aprendizado e crescimento.

## RESUMO

A resistência ao cisalhamento dos solos é um parâmetro fundamental na engenharia geotécnica, influenciando diretamente a estabilidade de estruturas como fundações, muros de contenção e taludes. O ensaio de limite de liquidez, realizado com o aparelho de Casagrande, é amplamente utilizado para caracterizar solos plásticos. No entanto, esse método apresenta limitações na determinação direta da resistência ao cisalhamento não drenada. Diante disso, este estudo teve como objetivo desenvolver e validar um modelo matemático para estimar a resistência ao cisalhamento de solos ensaiados pelo aparelho de Casagrande, com base em princípios de conservação de energia. O modelo considera a energia potencial aplicada ao sistema e sua dissipação por meio da deformação e do cisalhamento do solo. Para aprimorar a análise, o estudo também incorpora o ensaio do Cone de Penetração, que permite uma avaliação mais direta da resistência ao cisalhamento dos solos, especialmente em condições não drenadas. A validação do modelo foi realizada utilizando dados experimentais da literatura, comparando os resultados obtidos pelo método de Casagrande e pelo método do Cone de Penetração, além de analisar a variação dos erros de cálculo. Os resultados demonstraram que o modelo proposto apresenta maior precisão para solos com elevados teores de umidade, reduzindo as incertezas associadas à determinação da resistência ao cisalhamento. Contudo, para solos mais arenosos e com baixos teores de umidade, os erros de cálculo foram mais expressivos, possivelmente devido à maior influência da parcela de resistência mobilizada pelo atrito, indicando a necessidade de ajustes adicionais no modelo. Concluiu-se que a metodologia proposta, ao integrar o ensaio de Casagrande com os dados do Ensaio do Cone de Penetração, pode ser uma ferramenta útil para aprimorar a interpretação do comportamento dos solos, contribuindo para maior confiabilidade em análises geotécnicas e para a otimização de projetos de Engenharia Civil.

**Palavras-chave:** resistência ao cisalhamento não drenada; limite de liquidez; mecânica dos solos; modelagem matemática; cone de penetração.

## ABSTRACT

Shear strength of soils is a fundamental parameter in Geotechnical Engineering, directly influencing the stability of structures such as foundations, retaining walls, and slopes. The liquid limit test, performed using the Casagrande apparatus, is widely used to characterize plastic soils. However, this method presents limitations in directly determining undrained shear strength. Given this, this study aimed to develop and validate a mathematical model to estimate the shear strength of soils tested with the Casagrande apparatus, based on energy conservation principles. The model considers the potential energy applied to the system and its dissipation through soil deformation and shear. To enhance the analysis, the study also incorporates the Cone Penetration Test, which allows for a more direct assessment of soil shear strength, particularly under undrained conditions. The model validation was carried out using experimental data from the literature, comparing the results obtained through the Casagrande method and the Cone Penetration Test, in addition to analyzing variations in calculation errors. The results showed that the proposed model provides greater accuracy for soils with high moisture content, reducing uncertainties associated with determining shear strength. However, for more sandy soils with low moisture content, calculation errors were more significant, possibly due to the greater influence of the frictional resistance component, indicating the need for further model adjustments. It is concluded that the proposed methodology, by integrating the Casagrande test with Cone Penetration Test data, can be a useful tool for improving the interpretation of soil behavior, contributing to greater reliability in geotechnical analyses and the optimization of Civil Engineering projects.

**Keywords:** undrained shear strength; liquid limit; soil mechanics; mathematical modeling; cone penetration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico da comparação entre os métodos, amostra 6. ....	31
Figura 2: Gráfico limite de liquidez pelo cone sueco, amostra 18. ....	32
Figura 3: Gráfico dos erros de cálculo.....	33
Figura 4: Boxplot dos erros de cálculo.....	35
Figura 5: Histograma de erros. ....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela com as faixas de umidade.....	30
--	----

## LISTA DE SIGLAS

% - Porcentagem  
A – Área de contato  
d – Distância de deformação radial  
Ecis – Energia dissipada durante cisalhamento  
Epot – Energia potencial  
g – Aceleração da gravidade  
Gs – Densidade real dos grãos  
h – Altura de queda  
h – Profundidade de penetração do cone  
hmed – Média das umidades  
K - Fator empírico  
kPa - Kilopascal  
LL - Limite de liquidez  
m – Massa do solo  
mm – milímetros  
N – Número de golpes  
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora  
Pa - Pascal  
Q – Peso do cone x gravidade  
S – Grau de saturação  
V – Volume do solo  
w – Umidade do solo  
 $\gamma$  – Densidade do solo  
 $\lambda_w$  – Densidade da água  
Su – Resistência ao cisalhamento  
 $\tau_b$  – Resistência ao cisalhamento de base

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS .....	16
1.1.1 Geral .....	16
1.1.2 Específicos.....	16
<b>2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>16</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
3.1 LIMITE DE LIQUIDEZ.....	18
3.2 APARELHO CASAGRANDE .....	19
3.3 CONE DE PENETRAÇÃO.....	20
3.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS.....	21
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
4.1. TIPOLOGIA DA PESQUISA .....	22
4.2. VARIÁVEIS DE ESTUDO .....	22
4.3. POPULAÇÃO E AMOSTRAGEM .....	23
4.4. COLETA DE DADOS .....	23
4.5. ANÁLISE DO MODELO .....	24
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
5.1. ELABORAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO .....	24
5.2. VALIDAÇÃO DO MODELO .....	28
5.3. GRÁFICOS .....	31
5.4. ERRO DE CÁLCULO .....	32
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>38</b>
<b>APÊNDICE A - COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PELO MÉTODO DE CASAGRANDE COM VARIÂNCIA DE <math>\pm 10\%</math> PELO CONE DE PENETRAÇÃO. ....</b>	<b>41</b>

<b>APÊNDICE B - COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
<b>APÊNDICE C - LIMITE DE LIQUIDEZ PELO CONE SUECO .....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A resistência ao cisalhamento dos solos é uma propriedade fundamental para a análise e o dimensionamento de estruturas geotécnicas, como fundações, muros de contenção e taludes. Terzaghi e Peck (1948) destacam que a investigação da resistência ao cisalhamento dos solos é essencial para o desenvolvimento de empreendimentos geotécnicos, influenciando diretamente a capacidade de carga de fundações e estabilidade de taludes.

A resistência ao cisalhamento do solo é determinada pelas características coesivas e friccionais entre as partículas do solo, sendo definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (Pinto, 2000). Esse parâmetro reflete a capacidade do solo de resistir aos esforços cortantes sem falhar, sendo controlado por variáveis como a coesão, o ângulo de atrito interno e a pressão efetiva aplicada. Silva (2007) classifica a coesão do solo como a força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente.

A coesão real refere-se à força atrativa efetiva entre as partículas, enquanto a coesão aparente inclui, além dessa força, a parcela de sucção causada pela presença de água na matriz do solo. Além disso, existe o intercepto coesivo, que é um ajuste matemático na equação de resistência, sem significado físico real. Dessa forma, é fundamental distinguir entre esses conceitos ao analisar a resistência ao cisalhamento do solo.

O ensaio de limite de liquidez, comumente realizado pelo aparelho de Casagrande, é uma técnica amplamente utilizada para determinar o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido. Embora o ensaio não meça diretamente a resistência ao cisalhamento, estudos como Bicalho (2014) mensuram valores a partir do limite de liquidez, em condições não drenadas. Entretanto, apesar de sua popularidade, o método do ensaio de Casagrande apresenta limitações. Bicalho (2014) cita que o método desenvolvido por Casagrande (1932) possui limitações que podem impactar os resultados, como a interferência do operador e das condições do equipamento (concha e cinzel). Além disso, é importante destacar a simplificação das condições de campo e a complexidade envolvida na interpretação dos resultados.

Além disso, o comportamento mecânico dos solos ensaiados é influenciado por diversos fatores, onde se incluem as condições de saturação, a compactação inicial, o histórico de tensões e a granulometria. Tais aspectos tornam a análise de seus resultados desafiadora e, muitas vezes, dependente de modelos teóricos que simplificam fenômenos complexos.

Nesse contexto, o desenvolvimento de modelos matemáticos para analisar os dados provenientes do ensaio de limite de liquidez pode proporcionar uma abordagem mais precisa

para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ), integrando fatores geotécnicos e condições experimentais específicas.

O presente estudo tem como objetivo desenvolver um modelo matemático capaz de correlacionar os dados obtidos no ensaio de limite de liquidez do aparelho de Casagrande com a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) do solo ensaiado comparando-o com resultados obtidos no ensaio do Cone de Penetração. A pesquisa buscou identificar e modelar padrões nos resultados experimentais, utilizando técnicas matemáticas e computacionais avançadas para aprimorar a confiabilidade na previsão da resistência ao cisalhamento. Além disso, será investigada a aplicabilidade prática do modelo proposto em diferentes tipos de solos, com foco em seu potencial contribuição para a otimização de projetos de Engenharia Geotécnica.

## 1.1 OBJETIVOS

Neste tópico, serão apresentados os objetivos que norteiam o desenvolvimento deste estudo, estruturados de forma a garantir uma abordagem sistemática e alinhada aos princípios teóricos e experimentais que sustentam a pesquisa.

### 1.1.1 Geral

Elaborar e validar um modelo matemático para o cálculo da resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) dos solos baseado no ensaio de Limite de Liquidez, realizado pelo aparelho de Casagrande, considerando princípios de conservação e transformação de energia, e propor ferramentas práticas que otimizem sua aplicação em análises geotécnicas.

### 1.1.2 Específicos

- Comparar os resultados obtidos de resistência ao cisalhamento não drenada obtidos por meio do método do Cone de Penetração com os obtidos no modelo matemático.

## 2 JUSTIFICATIVA

A resistência ao cisalhamento dos solos é um parâmetro importante para a Engenharia Geotécnica, pois afeta diretamente a estabilidade e a segurança de fundações, taludes, muros de contenção e diversas outras estruturas. A precisão na determinação deste parâmetro é essencial para garantir a durabilidade e o desempenho adequado das obras civis. O ensaio de limite de liquidez, realizado com o aparelho de Casagrande, é amplamente utilizado para a caracterização dos solos devido à sua praticidade, rapidez e aplicabilidade na classificação geotécnica.

Entretanto, esse ensaio possui limitações no que se refere a determinação direta da resistência ao cisalhamento, o que pode levar a imprecisões em análises e projetos geotécnicos.

Os métodos tradicionais de análise do limite de liquidez nem sempre consideram de forma robusta os fenômenos físicos associados ao comportamento do solo durante o ensaio, como a conservação e a transformação de energia. Dessa forma, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos que possam correlacionar com maior precisão os resultados obtidos no ensaio de Casagrande com a resistência ao cisalhamento do solo. O aprimoramento da interpretação dos dados desse ensaio pode contribuir de forma significativa para a melhoria das análises geotécnicas, reduzindo incertezas e aumentando a confiabilidade dos projetos.

O desenvolvimento de um modelo matemático específico para essa correlação melhora a precisão na determinação da resistência ao cisalhamento dos solos, mas também viabiliza a análise preditiva para diferentes tipos de solos e condições geotécnicas. Estudos presentes na literatura científica demonstram que uma caracterização inadequada da resistência ao cisalhamento pode resultar em falhas estruturais, como recalques diferenciais, ruptura de taludes e colapsos de fundações, evidenciando a importância da busca por métodos mais confiáveis e precisos.

Assim, ao propor um modelo matemático mais refinado, este estudo busca preencher lacunas existentes na modelagem da resistência ao cisalhamento dos solos, fornecendo uma ferramenta inovadora para engenheiros geotécnicos e pesquisadores. Destaca-se que os resultados obtidos neste estudo através do ensaio de Casagrande foram comparados com resultados provenientes da literatura, devido à ausência de equipamentos para realização de ensaios como compressão simples, compressão triaxial e cisalhamento direto. A melhoria na interpretação dos ensaios laboratoriais não apenas contribuirá para o avanço do conhecimento científico, mas também viabilizará a aplicação de soluções mais seguras, sustentáveis e econômicas na Engenharia Civil.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A Mecânica dos Solos possibilita o estudo integrado de conceitos relacionados ao comportamento dos solos e suas aplicações, contribuindo tanto para as práticas da Engenharia Geotécnica quanto para o desenvolvimento de metodologias mais eficientes na análise e aplicação de parâmetros. Nesta pesquisa, foram investigados conceitos interdependentes

essenciais para a caracterização do solo e sua atuação em diversas aplicações da Engenharia Civil.

O aparelho de Casagrande foi desenvolvido com objetivo de determinar o limite de liquidez das argilas, um parâmetro fundamental para o estudo dos solos. Esse parâmetro está diretamente associado à resistência ao cisalhamento não drenada, que define o comportamento mecânico do solo. Tal comportamento determina a capacidade do solo de suportar tensões aplicadas em relação às deformações sofridas, integrando os conceitos de resistência ao cisalhamento e energia potencial de deformação. Um dos meios para realizar a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada é através do método do Cone de Penetração, ensaio que utiliza o limite de liquidez para determinar o valor da resistência.

Na mecânica, a energia é definida como a capacidade de realizar trabalho, o que resulta do produto entre uma força e o deslocamento na direção do movimento. A energia de deformação, especificamente, refere-se ao trabalho realizado por uma força durante um deslocamento (Mascia, 2017). Portanto, quando um objeto é submetido a uma pressão e se desloca, ocorre uma variação na energia do sistema, que é igual ao produto da força aplicada pelo deslocamento.

### 3.1 LIMITE DE LIQUIDEZ

Os limites de Atterberg, especialmente o limite de liquidez, estão entre os parâmetros mais utilizados na Engenharia Geotécnica para aplicações na Engenharia Civil e para classificação de solos finos (Crevelin, 2018). Kelly *et al* (2017) ressaltam que esses limites também são empregados para estimar a resistência ao cisalhamento, deformação e outros parâmetros importantes da mecânica dos solos. Wang (2024) destaca ainda a aplicação desses parâmetros de consistência na avaliação de suscetibilidade de tuneladoras, máquinas utilizadas para escavar túneis com seção transversal circular, ao fenômeno de *clogging*. Devido a sua ampla aplicabilidade, torna-se necessário realizar o estudo do limite de liquidez do solo do ponto de vista experimental e algébrico.

O limite de liquidez (LL) de um solo plástico é definido como o valor máximo de umidade no qual ela mantém sua consistência plástica. Segundo Crevelin (2018), o LL é teoricamente definido como o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido. No entanto, como o solo dificilmente apresenta resistência ao cisalhamento nula, o LL é determinado com base em um valor arbitrário de resistência ao cisalhamento, considerado suficientemente baixo. Esse valor representa a transição em que o solo apresenta um comportamento progressivamente enfraquecido com o aumento da umidade.

Bicalho *et al* (2017) afirmam que o limite de liquidez, é amplamente utilizado em análises preliminares para avaliar a viabilidade do uso de argilas em fundações, aterros compactados para construção de rodovias e obras de armazenamento ou retenção de água e contaminantes. Portanto, a determinação incorreta do LL pode levar à rejeição de materiais satisfatórios ou à aceitação de materiais inadequados.

Conforme Couto *et al* (2015), o limite de liquidez é atualmente determinado em laboratório principalmente por meio de duas metodologias distintas. Uma delas utiliza o aparelho de Casagrande, equipamento amplamente empregado para avaliar a consistência e o comportamento plástico das argilas, fornecendo resultados para as análises geotécnicas. A outra técnica é o método do cone de penetração, ensaio geotécnico que consiste em cravar uma ponteira cônica no solo para avaliar a resistência do terreno. Kayabali (2016) também apresenta metodologias não convencionais para determinação do limite de liquidez, que podem incluir técnicas como o uso de sensores eletrônicos, métodos baseados em imagens digitais ou até mesmo abordagens automatizadas. Essas metodologias modernas buscam aumentar a precisão, reduzir a subjetividade e agilizar o processo de análise em comparação com os métodos tradicionais.

### 3.2 APARELHO CASAGRANDE

O aparelho Casagrande é amplamente utilizado em ensaios na área da engenharia geotécnica e geologia. Desenvolvido para determinar o limite de liquidez das argilas em solos, esse aparelho foi padronizado por Casagrande (1932) e é empregado no método de percussão, o procedimento mais tradicional para a determinação do limite de liquidez (Bicalho, 2014). Conforme Crevelin (2018), o método de Casagrande ainda é adotado oficialmente em muitos países, como Brasil e Portugal, e é amplamente aceito pela comunidade geotécnica.

De acordo com Cerbino (2018), Arthur Casagrande, auxiliar de Terzaghi, desenvolveu e padronizou os ensaios de índices de consistência inicialmente propostos por Atterberg. Terzaghi (1927) destacou a importância de caracterizar os solos quanto à sua plasticidade e sugeriu a padronização dos ensaios, que foram posteriormente consolidados por Casagrande em 1932 (Peixoto, 1995).

Apesar de ainda ser muito utilizado, o método de Casagrande apresenta certas limitações. Segundo Couto *et al.* (2015) o Aparelho apresenta algumas limitações, como a sensibilidade ao tipo de solo (principalmente aqueles que apresentam percentuais elevados de areia em sua composição); sensibilidade do equipamento de Casagrande (relacionado ao desgaste do aparelho ao longo do tempo); técnica do operador (alinhamento do sulco,

velocidade da execução dos golpes, quantidade de solo disposta sobre a concha). Cerbino (2018) também lista algumas desvantagens desse método, e alguns fatores que podem influenciar no resultado final do ensaio, como: habilidade e sensibilidade do operador, condições da concha e do cinzel e ainda, solos com baixa plasticidade possuem a tendência de se liquefazer antes de fluir por plasticidade. Cerbino (2018) ainda cita outra desvantagem reconhecida pelo próprio Casagrande, o fato de o estudo laboratorial caracterizar-se, essencialmente, em um ensaio dinâmico de cisalhamento.

A norma brasileira NBR 6459:2017 padroniza o ensaio, no qual o wL (limite de liquidez) como o teor de umidade, em porcentagem, correspondente a 25 golpes necessários para fechar uma ranhura de 13 mm de comprimento e 2 mm de espessura, aproximadamente. O aparelho consiste numa concha semi esférica que é solta repetidamente de uma altura de 1 cm sobre uma base de ebonite, macia ou dura, por meio do uso de um mecanismo de manivela e engrenagens. Alguns aparelhos contêm também um contador de golpes, que facilita a operação e um riscador ou cinzel com a qual se procede à abertura da ranhura que irá separar em duas porções a mistura de solo com água destilada (Crevelin, 2018).

### 3.3 CONE DE PENETRAÇÃO

O Cone de Penetração, também conhecido como Cone Penetrômetro ou *fall cone test* foi desenvolvido por John Olsson, com o objetivo de corrigir e melhorar alguns dos fatores que influenciavam negativamente os resultados obtidos pelo método da Concha de Casagrande, como a influência do operador, a variação na energia aplicada e dificuldade na identificação da ranhura, visando uma metodologia mais rápida, simples e de maior precisão (Sousa, 2011). Originalmente, o ensaio foi concebido para avaliar a resistência ao cisalhamento não drenada e sensibilidade de argilas remoldadas (Hansbo, 1957). No ensaio de penetração de cone de queda livre, o LL corresponde ao teor de umidade ao qual a pasta de solo é penetrada por um cone de 80g e 30° de ápice, liberado da superfície da pasta, em 20 mm (referência britânica - British Standard BS 1377/1990) ou 17 mm (Rosa, Bastos e Alves, 2013).

O princípio do ensaio é simples: um cone com dimensões e massa padronizadas, penetra em um provete preparado especificamente para o teste ou retirado diretamente de amostras de sondagem (Canelas, 2018).

A interpretação dos resultados do ensaio, para estimar a resistência não drenada baseia-se em correlações empíricas a partir de outros ensaios ou através de análises teóricas da penetração do cone (Viegas *et al*, 2014). A consistência dos solos permite estimar seu

comportamento sob tensões e deformações, influenciando a resistência à penetração, a compactação e a condutividade hidráulica (Clemente, Moncada e Kormann, 2016).

### 3.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

Uma das grandes contribuições da mecânica dos solos para construção civil são os estudos sobre a resistência ao cisalhamento dos solos. Esses estudos são realizados através de ensaios específicos, que permitem determinar a capacidade de resistência de diferentes tipos de solo às solicitações impostas, prevenindo rupturas. Além disso, eles promovem segurança e eficiência econômica nos projetos de engenharia civil, otimizando o uso de materiais e reduzindo riscos nas construções (Stoll *et al*, 2019). A resistência à ruptura por cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão que o solo é capaz de suportar antes de sofrer ruptura. A capacidade dos solos de suportar cargas e manter sua estabilidade está diretamente relacionada à resistência ao cisalhamento. Simplificadamente, quando essa resistência é ultrapassada, ocorre o rompimento da massa de solo (Caputo, 1988). Para este estudo, considerou-se a resistência ao cisalhamento não drenada, sendo esta entendida como a resistência ao cisalhamento oferecida pelo solo quando solicitado rapidamente, sem que haja condição de drenagem da água intersticial (Eichelberger *et al.*, 2017).

A resistência ao cisalhamento desempenha um papel crucial na análise e na solução de problemas essenciais da mecânica dos solos, sendo um dos ramos mais importantes da engenharia civil. Os parâmetros associados à resistência ao cisalhamento têm aplicação direta em projetos como estabilidade de taludes, construção de barragens, dimensionamento de muros de arrimo, fundações e diversas outras áreas (Queiroz, 2016).

Conforme Zorzan e Boszczowski (2019), atualmente, um considerável número de ensaios se propõe a fornecer valores de resistência do solo utilizando métodos e equipamentos diversos. A compreensão dos mecanismos de deformação e mobilização da resistência é, portanto, essencial para garantir análises seguras, econômicas e precisas. Caputo (1988) enfatiza que a determinação adequada da resistência ao cisalhamento dos solos é um dos problemas mais complexos da Mecânica dos Solos. Por isso, a resistência ao cisalhamento deve ser determinada através de ensaios laboratoriais, como cisalhamento direto, compressão triaxial e compressão simples. Além disso, fatores como o estado de adensamento do solo, a sensibilidade da sua estrutura, as condições de drenagem e a velocidade de aplicação das cargas influenciam os resultados da resistência ao cisalhamento dos solos.

## 4 METODOLOGIA

Neste tópico, descrevem-se as etapas e os procedimentos adotados para o desenvolvimento e a validação do modelo matemático proposto. Será apresentada a abordagem metodológica utilizada, incluindo os critérios de coleta e análise de dados, as variáveis consideradas e os procedimentos normativos seguidos. A metodologia adotada visa garantir a precisão dos resultados e a confiabilidade do modelo, aplicado à determinação da resistência ao cisalhamento de solos ensaiados pelo aparelho de Casagrande.

### 4.1. TIPOLOGIA DA PESQUISA

O presente estudo é classificado como uma pesquisa de desenvolvimento, conforme Bandeira (1999), pois busca aprimorar um processo existente com base em conhecimentos prévios, introduzindo inovações. O objetivo do estudo é desenvolver um modelo matemático para a determinação da resistência ao cisalhamento dos solos utilizando o ensaio realizado no aparelho de Casagrande.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa é caracterizada como experimental, pois envolve análises baseadas em dados de ensaios laboratoriais realizados em solos com características específicas. Segundo Gil (2007), a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que podem influenciá-lo, definir formas de controle e observar os efeitos que essas variáveis produzem no objeto.

### 4.2. VARIÁVEIS DE ESTUDO

O objeto de estudo e suas variáveis baseiam-se na pesquisa experimental e analítica desenvolvida por Kim, Cortes e Santamarina (2007) que abordaram um modelo físico baseado em energia. Esse modelo explica a contribuição relativa da perda de energia potencial no cisalhamento e no cisalhamento de base, bem como a correlação entre eles. Com base nesse estudo, foram desenvolvidas as variáveis de energia potencial, energia de deformação e resistência ao cisalhamento para aplicação no modelo matemático. Constatou-se também o limite de liquidez como uma variável que influencia nos resultados do objeto de estudo.

Outra variável utilizada na análise dos resultados do objeto de estudo é a equação utilizada para calcular a resistência ao cisalhamento do solo por meio do Cone de Penetração. A equação 1 pode ser representada da seguinte forma, conforme apresentado na Equação 1:

$$\tau = \frac{K \cdot Q}{h^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

K: fator empírico (tabelado)

Q: Massa do cone x gravidade

h: profundidade de penetração do cone

Portanto, as variáveis consideradas para o objeto de estudo são:

- Limite de Liquidez (LL): parâmetro fundamental obtido através do ensaio de Casagrande, representando a umidade em que o solo transita de estado plástico para líquido;
- Energia potencial: energia aplicada no sistema pelo movimento do aparelho de Casagrande;
- Energia de deformação: energia consumida na deformação do solo durante o ensaio de LL;
- Resistência ao cisalhamento ( $S_u$ ): parâmetro derivado do modelo matemático proposto, relacionado às características do solo ensaiado.

#### 4.3. POPULAÇÃO E AMOSTRAGEM

A população deste estudo compreende solos com diferentes características, com ênfase em solos plásticos, que são comumente ensaiados no aparelho de Casagrande para a determinação do limite de liquidez. As amostras utilizadas para aplicação no modelo matemático foram obtidas de trabalhos científicos que realizaram em seu estudo os ensaios de Casagrande e Cone de Penetração.

#### 4.4. COLETA DE DADOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos por meio de uma revisão bibliográfica, que inclui análise da literatura técnica e científica sobre o limite de liquidez, ensaios de Casagrande e Cone de Penetração, energia potencial e energia de deformação no contexto dos solos. A coleta de dados foi realizada em plataformas de acervo científico, sendo estas o *Google Scholar*, *Science Direct*, *Engineering Research Database*, *Scopus* e *Web of Science*, utilizando palavras chaves específicas. Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos de acesso gratuito que relacionam resistência ao cisalhamento e umidade, além de apresentarem dados completos de limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e Cone de Penetração.

Assim, os dados coletados foram aplicados no modelo matemático e utilizados para sua avaliação com base nos resultados obtidos. Foram utilizadas três fontes principais: os estudos de Pinto *et al.* (2012), Di Matteo (2012) e Crevelin e Bicalho (2019). Esses estudos comparam resultados para determinação do limite de liquidez por meio dos ensaios de cone de queda livre

e aparelho de Casagrande para diferentes tipos de solo, além de fornecerem dados detalhados sobre o limite de liquidez.

A extração dos dados foi realizada com base nas informações contidas nos gráficos apresentados pelos autores. Nessas representações gráficas são mostrados os valores correspondentes ao número de golpes e à umidade para o aparelho Casagrande e os valores de penetração e umidade para o Cone de Penetração em cada amostra.

#### 4.5. ANÁLISE DO MODELO

Nesta etapa, procedeu-se à verificação do modelo matemático, realizada por meio da análise dos erros de cálculo obtidos, com o objetivo de determinar a forma mais adequada de aplicação do modelo. Para tanto, foram definidas condições para as variáveis utilizadas na formulação, visando controlar e avaliar os resultados gerados. Suits *et al.* (2007) ressaltam em seu estudo que a variação esperada para os resultados de Casagrande é de  $\pm 10\%$ , dessa forma, foi estabelecido que o teor de umidade medido no aparelho de Casagrande poderá variar  $\pm 10\%$  para a mesma resistência ao cisalhamento.

Além disso, será utilizado o método do cone para calcular a resistência correspondente dentro do intervalo de variação de umidade, pois se a resistência dada pelo aparelho de Casagrande estiver nesse intervalo de resistências encontradas, significa que a diferença observada pode ser explicada simplesmente pela margem de erro normal do próprio método, e não por um erro grave ou problema técnico. Dessa forma, o modelo funcionará como uma ferramenta de cálculo para determinar a resistência ao cisalhamento não drenada dos solos que forem ensaiados pelo aparelho de Casagrande.

### 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo matemático desenvolvido para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos ensaiados pelo aparelho de Casagrande. Serão discutidas a formulação do modelo, a validação dos dados, a distribuição dos erros de cálculo e as observações feitas com base nos resultados comparativos. A análise dos resultados permitiu avaliar a precisão e a aplicabilidade do modelo proposto na Engenharia Geotécnica.

#### 5.1. ELABORAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Para calcular a resistência ao cisalhamento dos solos com o ensaio de Casagrande, pode-se aplicar um modelo baseado na conservação de energia inspirado pelo estudo de Kim, Cortes

e Santamarina (2007). O modelo considera que a energia potencial aplicada no impacto é dissipada em deformação e cisalhamento do solo, levando ao fechamento da ranhura com um número específico de golpes.

Seja  $E_{POT}$  a energia potencial por golpe, define-se algebricamente a equação 2:

$$E_{POT} = m \cdot g \cdot h \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

m - Massa do solo

g - Aceleração gravitacional

h - Altura de queda

Considerando que toda a energia do impacto é usada para vencer a resistência ao cisalhamento ( $\tau b$ ) ao longo de uma área de contato A e uma distância de deformação radial d. Seja  $E_{CIS}$  a energia dissipada durante o cisalhamento, define-se algebricamente a equação 3:

$$E_{CIS} = \tau b \cdot A \cdot d \text{ (Equação 3)}$$

Considerando o princípio da conservação da energia mecânica, com N golpes necessários para fechar a ranhura, temos que a energia total aplicada é igual à energia total dissipada em cisalhamento, por meio da equação 4:

$$N \cdot E_{POT} = \tau b \cdot A \cdot d \text{ (Equação 4)}$$

Rearranjando a equação, obtêm-se o valor da resistência ao cisalhamento do solo, presente na equação 5.

$$\tau b = \frac{N \cdot m \cdot g \cdot h}{A \cdot d} \text{ (Equação 5)}$$

A massa do solo, utilizada para obter a resistência ao cisalhamento, é um parâmetro frequentemente expresso em termos de densidade e volume, e pode ser calculada através da equação 6:

$$m = V \cdot \gamma \text{ (Equação 6)}$$

Onde:

V - Volume do solo

$\gamma$  - Massa específica aparente úmida

A densidade natural do solo é uma medida da massa úmida de todo o material contido em determinado volume de solo, sendo expresso através da equação 7:

$$\gamma = \frac{(1+W) \cdot G_s \cdot \lambda_w}{1+W \cdot \frac{G_s}{S}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$G_s$  - densidade real dos grãos

$\lambda_w$  - Densidade da água

S - Grau de saturação da amostra

W - Umidade do solo

Para o cálculo da resistência utilizou-se a proposição de Kim, Cortes e Santamarina (2007), apresentada na equação 8.

$$Su = \left( \frac{\tau_b}{5,16} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde  $Su$  é a resistência ao cisalhamento do solo não drenada e  $a$  um parâmetro de estado do solo.

Este modelo permite estimar a resistência ao cisalhamento de solos no ensaio de Casagrande, considerando a energia aplicada, seu teor de umidade e o número de golpes necessários para atingir o limite de liquidez.

Para maior precisão, o modelo matemático incorpora um fator de ajuste baseado na umidade média obtida durante o ensaio, resultando na equação final para o cálculo da resistência ao cisalhamento, presente na equação 9:

$$Su = \left( \frac{\left[ \frac{N \cdot V \cdot \left( \frac{(1+W) \cdot G_s \cdot \lambda_w}{1+W \cdot \frac{G_s}{S}} \right) \cdot g \cdot h}{A \cdot d} \right]}{5,16} \right)^a \quad (\text{Equação 9})$$

onde:

h - Altura de queda do prato do aparelho de Casagrande

d - Distância percorrida pela massa de solo

A - área da concha preenchida pelo solo

O valor de  $a$  é obtido através da equação:

$$a = \frac{1}{\left( \frac{0,773 + 297,35}{(e \cdot (hmed - 31,8) + 150,95) + 0,001579 \cdot hmed} \right)} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

hmed - média das umidades obtidas durante o ensaio

No desenvolvimento do modelo matemático foram estabelecidos parâmetros representativos das condições experimentais, sendo estes desenvolvidos ao longo deste estudo. Entre esses parâmetros, destacam-se a área adotada, volume adotado e a deformação adotada, os quais foram fundamentais para a formulação e aplicação do modelo.

A área adotada corresponde à superfície da concha do aparelho de Casagrande preenchida pelo solo durante o ensaio. Para obtenção dessa área foi utilizada a seguinte fórmula, disposta na equação 11:

$$A = 4\pi r^2 \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

A: área da superfície da concha esférica

r: raio da esfera

O valor obtido foi de  $0,00381418\text{m}^2$ , garantindo uma representação adequada da interação entre o material ensaiado e a base do equipamento.

O volume adotado, por sua vez, foi determinado com base na geometria da concha do aparelho e na espessura da camada de solo depositada. Foi considerado o volume do solo como sendo a diferença entre o volume da calota esférica e o volume de um cone inserido na calota esférica, sendo  $\frac{2}{3}$  desse volume preenchido por solo. Diante disso, esse volume foi estabelecido em  $0,00002742157997\text{m}^3$ , proporcionando uma estimativa realista da quantidade de solo envolvida no processo de deformação. O volume da calota esférica pode ser calculado por meio da seguinte equação 12:

$$V = \frac{\pi h^2}{3} \cdot (3r - h) \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

V: volume

h: altura

r: raio da base da calota

O volume de um cone pode ser calculado pela equação 13:

$$V = \frac{1}{3}\pi h^2(2R - h) \text{ (Equação 13)}$$

Onde:

V: volume do cone

R: raio da base do cone

h: altura do cone

Quanto à deformação adotada, esta refere-se à distância percorrida pelo solo durante a ação dos golpes aplicados no ensaio, representando o deslocamento necessário para o fechamento da ranhura no material testado. Esse valor foi fixado em 0,00384m, sendo essencial para a equação de conservação de energia utilizada no modelo.

O coeficiente  $a$  foi obtido a partir das informações fornecidas pelas 18 amostras, sendo um valor individual por amostra, e desenvolvido por meio de uma aproximação do comportamento dos coeficientes de potência das amostras. A definição desses parâmetros permitiu estabelecer relações quantitativas entre a energia aplicada no sistema e a resistência ao cisalhamento do solo ensaiado.

Dessa forma, se fez possível estruturar um modelo matemático mais preciso, capaz de prever a resistência ao cisalhamento não drenada com base nos resultados obtidos no ensaio de Casagrande. A partir desse modelo se faz possível determinar a resistência ao cisalhamento de um solo de forma mais objetiva e fundamentada, considerando primordialmente as variáveis envolvidas no ensaio de Casagrande.

## 5.2. VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo desenvolvido consistiu em verificar a precisão por meio da aplicação de dados experimentais extraídos de estudos que determinaram o limite de liquidez utilizando os ensaios do Cone de Penetração e do aparelho de Casagrande. Para essa verificação, foram utilizados dados dos estudos de Pinto et al. (2012), Di Matteo (2012) e Crevelin e Bicalho (2019), dos quais foram extraídos dados de 18 amostras de diferentes tipos de solo, incluindo valores de limite de liquidez e umidade.

Para a aplicação do modelo, os dados foram inseridos em uma planilha automatizada, desenvolvida ao longo do estudo, utilizando o software Excel, na qual foram inseridos os dados coletados da literatura. O desenvolvimento dessa planilha envolveu a inserção de fórmulas e funções que permitiram processar os valores obtidos nos ensaios, realizando automaticamente

os cálculos necessários para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ). Além disso, a planilha foi estruturada para facilitar a organização dos dados, a verificação da consistência dos resultados e a geração de gráficos que auxiliaram na interpretação dos dados. Dessa forma, sua utilização contribuiu para uma análise mais eficiente e confiável dos resultados, minimizando erros manuais e garantindo maior precisão nas avaliações, o que permitiu a análise dos valores coletados e a verificação dos resultados relacionados à resistência ao cisalhamento.

Para garantir a compatibilidade entre os intervalos de umidade obtidos nos dois métodos, os valores identificados nos ensaios foram ajustados. Considerou-se apenas a faixa de umidade comum entre ambos os métodos para cada amostra, conforme a Figura 1, assegurando que a comparação dos resultados de resistência ao cisalhamento fosse realizada com os mesmos valores de umidade. Isso garantiu maior consistência e confiabilidade na análise das diferenças entre os métodos.

**Tabela 1:** Tabela com as faixas de umidade.

FAIXAS DE UMIDADE						
AMOSTRA	TEOR DE UMIDADE MÍNIMO DO CONE (%)	TEOR DE UMIDADE MÁXIMO DO CONE (%)	TEOR DE UMIDADE MÍNIMO DE CASAGRANDE (%)	TEOR DE UMIDADE MÁXIMO DE CASAGRANDE (%)	MÍNIMO CONSIDERADO (%)	MÁXIMO CONSIDERADO (%)
1	25.53	27.81	25.50	28.32	25.53	27.81
2	33.39	40.75	33.02	38.20	33.39	38.20
3	34.40	36.55	33.97	36.55	34.40	36.55
4	43.03	54.95	42.43	55.14	43.03	54.95
5	51.40	60.02	51.61	59.84	51.61	59.84
6	54.70	63.13	54.20	63.13	54.70	63.13
7	101.87	112.02	101.48	111.83	101.87	111.83
8	102.38	114.30	102.18	114.65	102.38	114.30
9	107.20	121.66	106.89	121.24	107.20	121.24
10	115.57	139.67	118.18	129.71	118.18	129.71
11	165.03	186.08	165.23	190.87	165.23	186.08
12	166.81	188.11	167.11	191.57	167.11	188.11
13	36.72	41.47	36.87	41.15	36.87	41.15
14	33.53	38.98	33.48	37.36	33.53	37.36
15	31.82	35.79	31.85	35.64	31.85	35.64
16	28.11	32.50	28.95	33.18	28.95	32.50
17	27.06	30.15	26.73	29.49	27.06	29.49
18	24.67	27.28	24.17	27.18	24.67	27.18

Fonte: Autores (2025).

Além disso, o intervalo comum foi subdividido em 10 níveis de umidade igualmente espaçados para cada amostra, permitindo uma avaliação mais detalhada da variação da resistência ao cisalhamento em função desse parâmetro.

Adicionalmente, para cada amostra analisada, foi gerado um gráfico comparativo entre os valores de resistência ao cisalhamento obtidos pelos métodos do Cone de Penetração e do aparelho de Casagrande. Essa representação gráfica permitiu uma análise mais precisa do

comportamento da resistência ao cisalhamento, considerando o teor de umidade correspondente a cada ensaio.

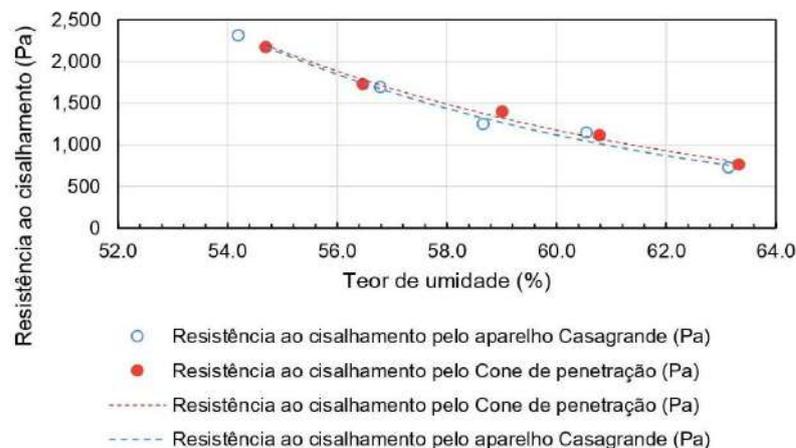
### 5.3. GRÁFICOS

Para visualizar e analisar o comportamento da resistência ao cisalhamento não drenada (Su) em função da umidade, foram gerados dois gráficos principais com base nos resultados da validação do modelo matemático. Esses gráficos foram construídos a partir dos dados coletados de 18 amostras de solo ensaiadas pelos métodos do aparelho de Casagrande e do cone de penetração.

O primeiro gráfico apresenta a relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada (Pa), no eixo das ordenadas, e o teor de umidade (%), no eixo das abcissas, comparando os valores obtidos pelos métodos, conforme ilustrado na Figura 1, onde ilustra a relação entre a resistência ao cisalhamento e o teor de umidade dos solos ensaiados pelos métodos do aparelho de Casagrande e do Cone de Penetração. Nela, os pontos representam os valores experimentais obtidos para cada método, enquanto as linhas tracejadas indicam a tendência dos dados.

Essa representação gráfica é essencial para a análise da precisão do modelo matemático, pois permite visualizar a variação da resistência ao cisalhamento em função da umidade, evidenciando a proximidade ou divergência entre os valores obtidos pelos dois métodos. A comparação direta dos dados possibilita identificar padrões de comportamento e avaliar a magnitude do erro de cálculo associado a cada ensaio. Dessa forma, a Figura 1 se destaca como a melhor ilustração dos resultados, proporcionando uma interpretação clara e objetiva da relação entre os parâmetros estudados.

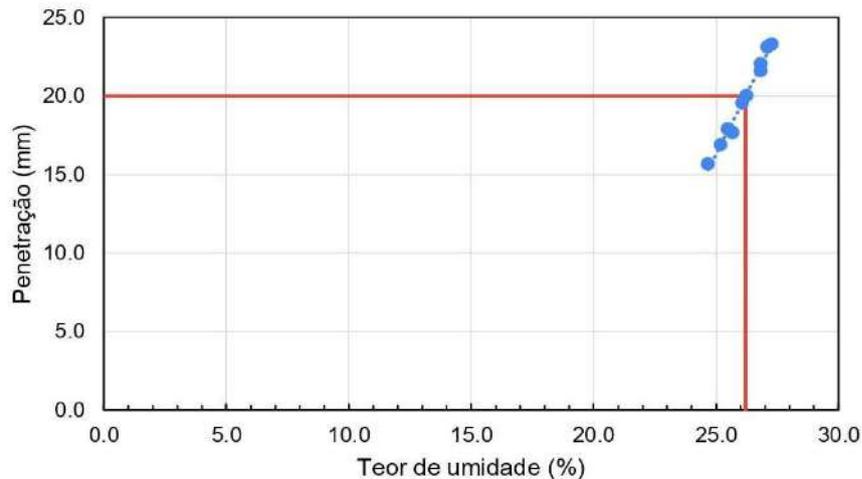
**Figura 1:** Gráfico da comparação entre os métodos, amostra 6.



Fonte: Autores (2025).

O segundo gráfico representa a relação entre a penetração do cone (mm) e o teor de umidade (%) para o método do Cone de Penetração, conforme ilustra a Figura 2. Essa representação permitiu avaliar a variação da penetração em diferentes umidades, evidenciando a tendência de aumento da penetração com o aumento da umidade. A amostra 18, mostrada na Figura 2, representa de forma clara esse comportamento da penetração em função da umidade.

**Figura 2:** Gráfico limite de liquidez pelo cone sueco, amostra 18.



Fonte: Autores (2025).

#### 5.4. ERRO DE CÁLCULO

Para a obtenção do erro de cálculo, foram utilizados os valores das resistências ao cisalhamento não drenadas ( $S_u$ ) obtidas através da formulação do Cone de Penetração e pelo modelo matemático desenvolvido neste estudo para a determinação da resistência ao cisalhamento por meio do aparelho de Casagrande.

No total, foram analisadas 180 combinações de dados, extraídos de 18 amostras dos estudos de Pinto et al. (2012), Di Matteo (2012) e Crevelin e Bicalho (2019), resultando em uma média de erro de 1,1 kPa. A distribuição dos erros foi segmentada em diferentes faixas de umidade, permitindo identificar padrões na precisão do modelo.

Para uma verificação mais precisa dos erros de cálculo, considerou-se o comportamento da resistência ao cisalhamento dos solos ensaiados por meio do ensaio do aparelho Casagrande, utilizando o critério da faixa de erro de 10% para mais ou para menos. Os valores de resistência obtidos pelo método do Cone de Penetração para esse intervalo foram utilizados para gerar 18 gráficos exponenciais, que mostram o comportamento da resistência ao cisalhamento pelo

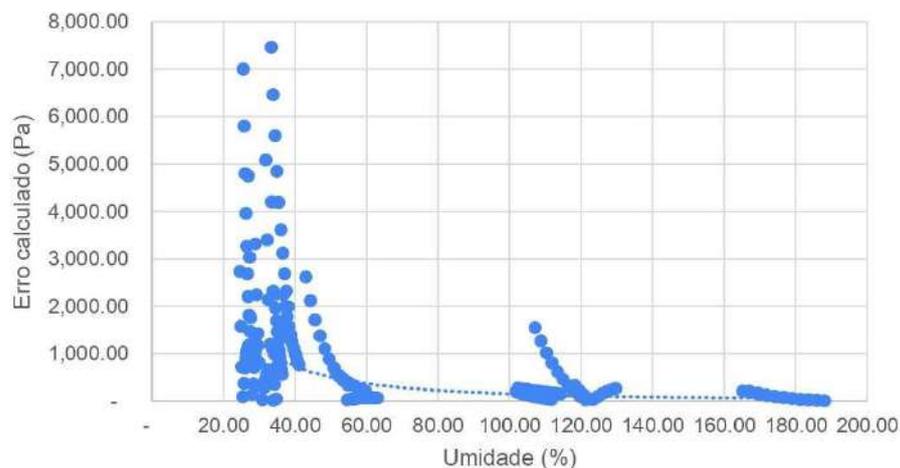
método de Casagrande e as duas resistências obtidas pelo cone dentro do intervalo de  $\pm 10\%$ . Esses gráficos estão disponíveis no apêndice deste trabalho.

Na análise gráfica, observou-se que os intervalos de resistência obtidos pelo método de Casagrande, que estão dentro do intervalo de resistências encontradas pelo Cone de Penetração, indicam que o modelo matemático pode ser considerado válido para essas condições de variação. O erro observado pode ser atribuído às limitações experimentais do aparelho Casagrande.

Das 180 amostras estudadas, 152 atenderam ao critério de erro, enquanto 28 amostras não atenderam, o que representa mais de 80% de amostras com o erro de cálculo dentro do intervalo aceitável. A Figura 3 apresenta a variação dos erros de cálculo em função do teor de umidade e da granulometria do solo. Observa-se que os erros são menores para solos ensaiados com umidade acima de 50%, enquanto, para solos com maior relevância da fração granular, ensaiados com baixa umidade, foram percebidos erros mais significativos.

Isso sugere que o modelo matemático apresenta maior confiabilidade para solos com limites de liquidez elevados, possivelmente devido à menor influência de variáveis como compactação e granulometria, e conseqüentemente, atrito, que afetam significativamente a resistência ao cisalhamento em solos mais secos.

**Figura 3:** Gráfico dos erros de cálculo.



**Fonte:** Autores (2025).

A análise dos erros de cálculo mostrou que o modelo matemático proposto é mais preciso para solos com alto teor de umidade, na execução do ensaio. Em solos arenosos e com baixa umidade durante o ensaio, os erros de cálculo foram mais significativos. Isso pode ser atribuído à menor coesão entre as partículas desses solos, resultando em uma dissipação de

energia diferente durante o ensaio de Casagrande. Além disso, a granulometria dos solos arenosos pode influenciar a distribuição de tensões e a deformação, aspectos que o modelo atual não captura completamente. A compactação inicial, mais acentuada em solos secos, também pode alterar a dissipação de energia, levando a uma superestimação da resistência ao cisalhamento.

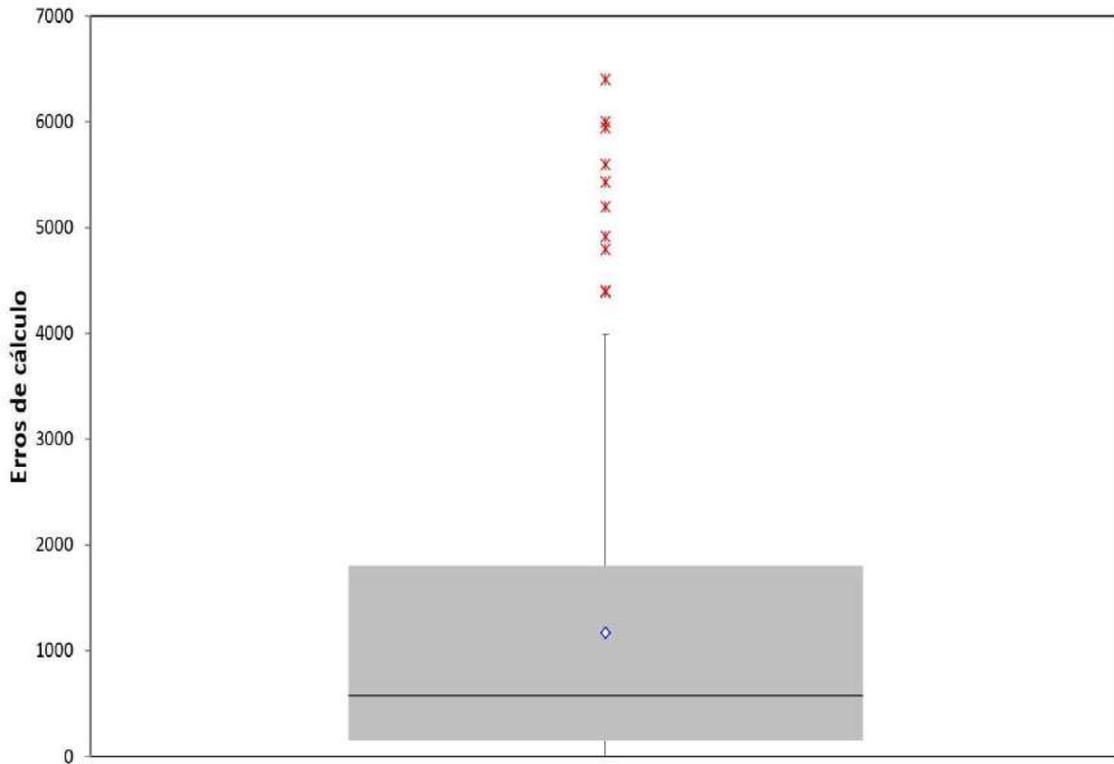
A análise gráfica confirmou a viabilidade do modelo matemático proposto, permitindo a sua aplicação como ferramenta auxiliar na determinação da resistência ao cisalhamento em ensaios laboratoriais. No entanto, ressalta-se a necessidade de estudos adicionais para compreender melhor as variações identificadas.

A verificação por faixas de umidade das amostras mostrou que amostras entre 20% e 40% de umidade apresentaram os maiores erros, variando entre 1 e 7 kPa, com o maior erro registrado de 6,4 kPa. Nessas condições, a maioria dos solos analisados apresentava características arenosas, uma vez que os ensaios foram realizados na faixa de umidade próxima ao limite de liquidez, o que pode ter influenciado as discrepâncias entre os métodos. Para amostras entre 40% e 60% de umidade, houve uma redução nos erros, com valores predominantemente entre 0 e 3 kPa, indicando maior estabilidade nos resultados. Para as amostras entre 60% e 120% de umidade, a distribuição dos erros tornou-se mais homogênea, com a maioria dos valores abaixo de 2 kPa. Nessas faixas, predominam solos argilosos e silto-argilosos, que apresentaram menor variação nos resultados entre os métodos comparados.

Para amostras com umidade entre 120% e 150%, os erros ficaram majoritariamente abaixo de 1 kPa, demonstrando maior precisão do modelo matemático. Para amostras com umidade acima de 150%, os erros foram os menores registrados, aproximando-se de 0 kPa, sugerindo que em teores elevados de umidade, o modelo matemático fornece estimativas mais precisas. O menor erro identificado foi associado a uma amostra com 188,11% de umidade, reforçando a aplicabilidade do modelo para solos altamente plásticos e saturados.

O gráfico da Figura 4 resume a distribuição dos erros, permitindo identificar valores atípicos que variam de 4,3 kPa até 6,4 kPa. A linha que se estende para cima a partir da caixa representa o valor máximo no intervalo, que é de 4 kPa. O gráfico também mostra a média dos valores, representada por um losango azul em 1,1 kPa. A linha dentro da caixa indica a mediana dos dados, mostrando que 50% dos erros estão abaixo de 0,5 kPa. A face superior da caixa mostra que 75% dos erros estão abaixo de 1,8 kPa, enquanto a face inferior da caixa mostra que 25% dos erros estão abaixo de 0,15 kPa. Por fim, a linha que se estende para baixo a partir da caixa indica o valor mínimo no intervalo, que é de 0,649 kPa.

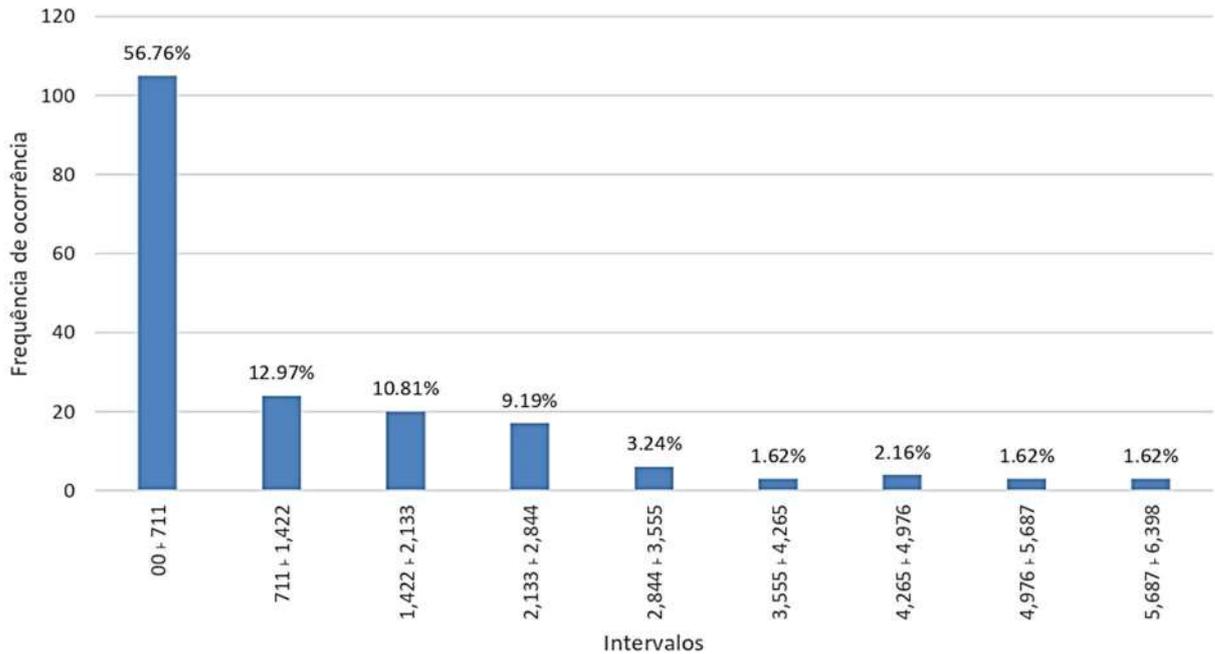
**Figura 4:** Boxplot dos erros de cálculo.



Fonte: Autores (2025).

A análise geral da distribuição dos erros mostrou que, em solos arenosos, a resistência ao cisalhamento foi superestimada pelo modelo matemático, resultando em maiores erros em baixas umidades, em função da natureza do ensaio. Em solos argilosos e com alta plasticidade, a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) calculada pelo modelo apresentou menor variação em relação aos valores do Cone de Penetração, indicando maior confiabilidade. O modelo demonstrou maior precisão para umidades superiores a 150%, enquanto, para solos secos, os resultados apresentam desvios mais significativos, sugerindo a necessidade de ajustes para aumentar a confiabilidade.

A Figura 5 apresenta o histograma da distribuição dos erros obtidos na estimativa da resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) dos solos. Esse gráfico é fundamental para a análise da precisão do modelo matemático, pois permite visualizar a frequência de ocorrência dos erros dentro de diferentes intervalos. Observa-se que a maior parte dos erros está concentrada nos menores valores, indicando que o modelo apresenta boa acurácia na maioria dos casos. No entanto, a presença de erros em intervalos superiores sugere a necessidade de ajustes adicionais, especialmente para solos com características diferenciadas.

**Figura 5:** Histograma de erros.

**Fonte:** Autores (2025).

Com base nesses resultados, conclui-se que a precisão do modelo matemático é influenciada pelo teor de umidade do solo no ensaio, sendo mais confiável e aplicável para solos com alta plasticidade e elevado teor de umidade. Para solos com menores valores de LL, os erros de cálculo foram significativamente maiores, indicando a necessidade de calibração do modelo para melhor representar esse tipo de material.

Para solos com valores de LL menores, recomenda-se a inclusão de um fator de correção que considere a granulometria do solo, pois a distribuição do tamanho das partículas pode influenciar significativamente a dissipação de energia durante o ensaio. Além disso, sugere-se a incorporação de um parâmetro que considere a compactação inicial do solo, especialmente para solos secos, nos quais a compactação é mais acentuada. Para solos de matriz granular não coesivos, uma abordagem alternativa pode ser desenvolvida, com foco na fricção interna como principal mecanismo de resistência ao cisalhamento.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo desenvolver um modelo matemático para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos ensaiados pelo aparelho de Casagrande, visando aprimorar a precisão na obtenção desse parâmetro fundamental para a Engenharia Geotécnica. Para tanto foram analisadas as relações entre energia potencial, energia de deformação e resistência ao cisalhamento, o que permitiu a formulação de um modelo baseado na conservação de energia.

A validação do modelo foi realizada com base em dados experimentais extraídos da literatura, comparando os resultados obtidos pelo método de Casagrande com aqueles provenientes do ensaio do Cone de Penetração. Os resultados demonstraram que o modelo matemático proposto apresentou maior precisão para solos ensaiados com maiores teores de umidade, reduzindo significativamente as incertezas associadas à determinação da resistência ao cisalhamento. Entretanto, identificou-se que, para solos mais arenosos e com baixos teores de umidade no ensaio, os erros de cálculo foram mais expressivos, sugerindo a necessidade de ajustes adicionais para esses casos específicos.

Recomenda-se a realização de estudos futuros para aprofundar as análises realizadas neste trabalho, ampliando o escopo da pesquisa para calibrar o modelo matemático proposto em diferentes tipos de solo, como solos arenosos, siltosos e argilosos. A integração com outros métodos de ensaio, como o cisalhamento direto ou a compressão triaxial, pode ampliar a aplicabilidade do modelo e melhorar sua precisão. Além disso, segure-se a realização de uma análise de sensibilidade para identificar as variáveis que têm maior impacto nos resultados, permitindo ajustes mais precisos e confiáveis.

Para trabalhos futuros, sugere-se também o desenvolvimento de um perfil de resistência ao cisalhamento não drenadas ( $S_u$ ) utilizando o modelo matemático proposto neste estudo. Esse perfil poderá incluir correções de níveis de tensão, permitindo comparações com perfis existentes na literatura, como os obtidos por meio do piezocone, levando em conta a umidade de campo. Essa comparação proporcionará uma análise mais aprofundada do modelo matemático proposto, validando sua aplicação.

Conclui-se que a abordagem matemática adotada pode ser uma ferramenta útil para aprimorar a interpretação dos resultados do ensaio de Casagrande, proporcionando maior confiabilidade nas análises geotécnicas. Além disso, a aplicação desse modelo pode auxiliar na otimização de projetos de Engenharia Civil, contribuindo para a segurança e a eficiência de obras que dependem da correta determinação da resistência ao cisalhamento dos solos.

## REFERÊNCIAS

BICALHO, K. ; GRAMELICH, J. ; CUNHA, C. ; SARMENTO JUNIOR, R. **Estudo dos valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e Cone para diferentes argilas.** 0379-9522 – Geotecnia n.º 140 – julho 2017 – pp. 63-72 63 <http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2017.140.04> – 2017 Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

BICALHO, K. V.; GRAMELICH, J. C.; DOS SANTOS CUNHA, C. L. Comparação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros. **Comunicações Geológicas**, v. 101, n. 3, p. 1097-1099, 2014.

CANELAS, Diogo Manuel Fonseca. **Aplicação do Fall Cone Test na estimativa da resistência ao corte não drenada de solos coesivos.** 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa (Portugal).

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos.** Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1988.

CERBINO, Lúvia Corrêa. **Comparação do limite de liquidez utilizando o aparelho de casagrande e o fall cone para um solo de formação barreiras do campus da UFRJ - Macaé.** Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

CLEMENTE, Camila Woldam; MONCADA, Monica Priscilla Hernandez; KORMANN, Alessander Christopher Morales. **Determinação do Limite de Liquidez Através do Cone Sueco.** 2016.

COUTO, Bruno de Oliveira Costa; PEREIRA, Eleonardo Lucas; GOMES, Romero César; FERREIRA, Lucas Deleon. **Correlação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone de queda livre para diferentes materiais.** COBRAMSEG 2016 — 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2015.

CREVELIN Leticia Garcia; BICALHO, Kátia Vanessa. **Comparison of the Casagrande and Fall Cone Methods for Liquid Limit Determinations in Different Clay Soils.** Rev Bras Cienc Solo 2019;43:e0180105, 2019.

CREVELIN, Leticia Garcia. **Comparação entre os valores de limite de liquidez obtidos pelos métodos de casagrande e cone para diferentes solos argilosos.** Dissertação apresentada

ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

DE SOUSA, Pedro Miguel Lopes Pepe. **Limite de Liquidez–Correlações e Comparações Entre os Métodos de Fall Cone e da Concha de Casagrande**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).

DI MATTEO, Lucio. 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, p. 79-85, 2012.

EICHELBERGER, L. V. et al. **Estudo da resistência não drenada de um solo artificial à base de caulim**. In: **XXVIII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE 2017**, 15 a 18 de novembro de 2017, Ijuí – RS, Brasil. Anais [...]. Ijuí: CRICTE, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

HANSBO, Sven. **New approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test**. Statens geotekniska institut, 1957.

KAYABALI, Kamil et al. Determination of Atterberg limits using newly devised mud press machine. **Journal Of African Earth Sciences**, [s.l.], v. 116, p.127-133, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.01.005>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/289367640>. Acesso em: 09 jan. 2019.

Kelly, T. D., Rojas, J. J., & DeGroot, D. J. (2017). **Use of fall cones to determine Atterberg limits: A review**. *Geotechnical Testing Journal*, 40(2), 156-167.

KIM, Hyun-Ki et al. Flow test: Particle-level and macroscale analyses. **ACI materials journal**, v. 104, n. 3, p. 323, 2007.

MASCIA, N. T. Energia de deformação e teoremas da energia. **UNICAMP-Faculdade de**, 2017.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos. Acesso em: 09 dez. 2024., 2000

PINTO, Paula Branco et al. Ensaio de cone de queda aplicado em estudos de plasticidade e resistência ao cisalhamento de solos artificiais. **Geotecnia**, n. 143, p. 85-110, 2018.

QUEIROZ, Rudney C. Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher Ltda, 2016

ROSA, Keli L.; BASTOS, Cezar Augusto B.; ALVES, Antônio Marcos L. O ENSAIO DE CONE DE QUEDA LIVRE (“FALL CONE TEST”) NA DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ.

SILVA, Apolino José Nogueira da; CARVALHO, Fabíola Gomes de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 853-862, 2007.

SUITS, L. D. et al. An Alternative Test Method for Assessing Consistency Limits. **Geotechnical Testing Journal**, [s.l.], v. 30, n. 4, p.274-281, 2007. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/gtj100700>.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. Nova York: John Wiley & Sons Inc, 1948.

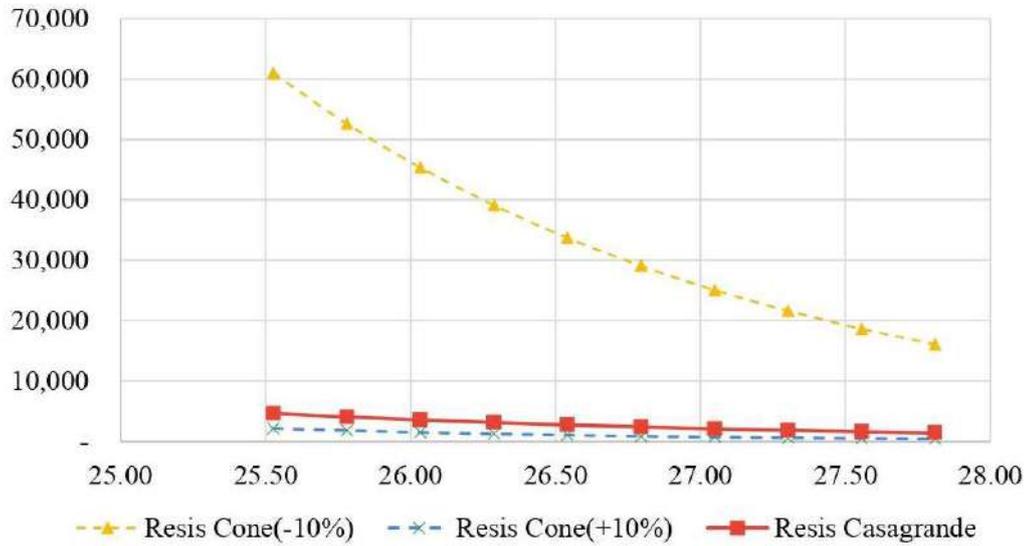
VIEGAS, Matheus Rossi; JESUS, Stella Harkins Guedes de; BASTOS, Cezar Augusto Burkert; ALVES, Antonio Marcos de Lima. **Ensaio de cone de queda livre (fall cone test) na avaliação da resistência não drenada de solos artificiais adensados**. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE 2014, 26., 2014, Alegrete, RS. Anais [...]. Alegrete: [s.n.], 2014.

WANG, G. et al. Analysis of soil clogging of TBM tunneling in clayey layers and the role of soil compositions. In: **Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground**. CRC Press, 2024. p. 147-153.

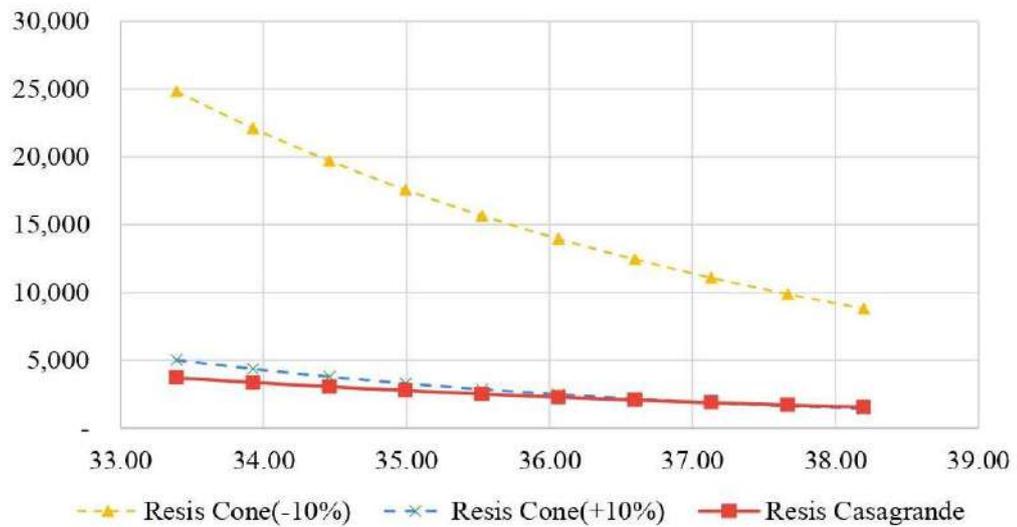
ZORZAN, Lucas Ghion; BOSZCZOWSKI, Roberta Bomfim. **Resistência ao Cisalhamento do Solo pelos Ensaio de Cisalhamento Direto e DSS: Análise Experimental e Aplicação na Estabilidade de Taludes**. GEOSUL, 2019.

**APÊNDICE A - Comportamento da resistência ao cisalhamento pelo método de Casagrande com variância de  $\pm 10\%$  pelo Cone de Penetração.**

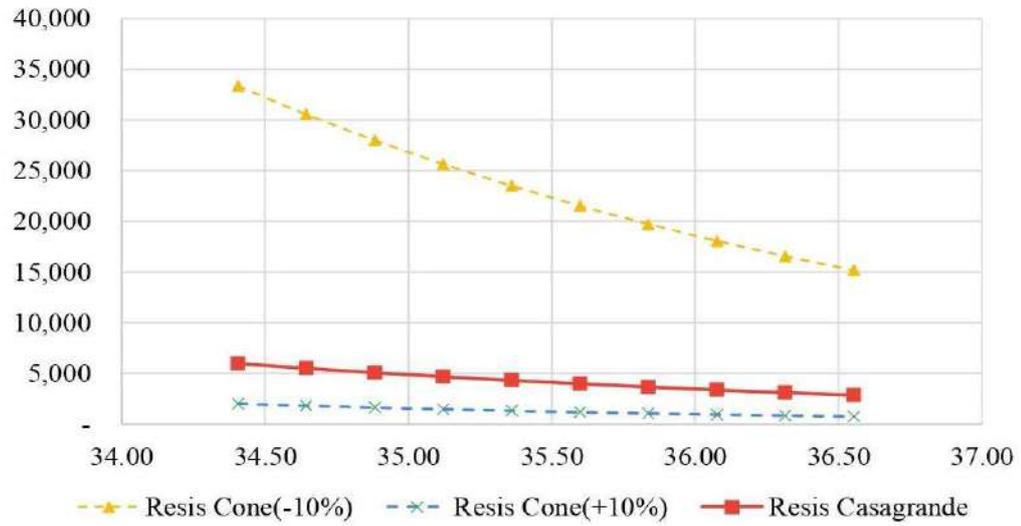
**Amostra 1**



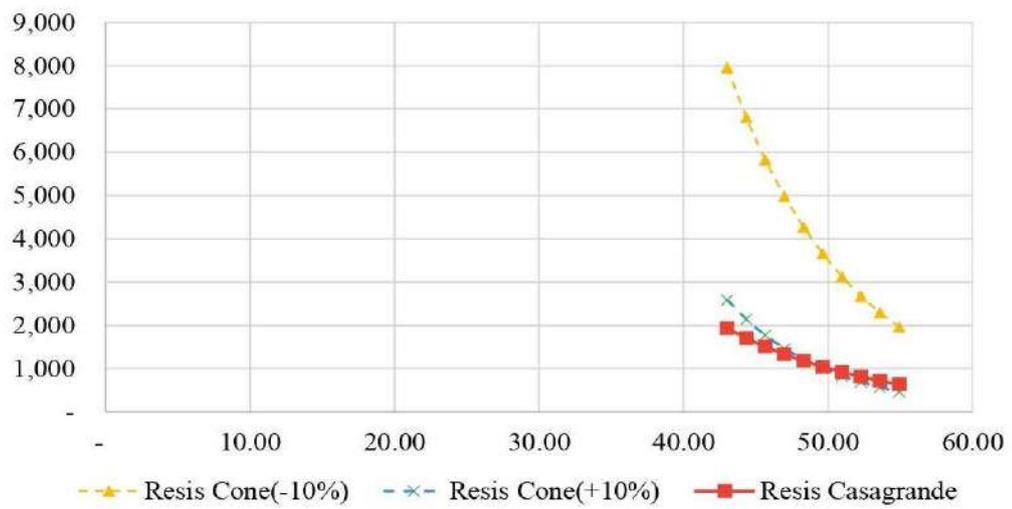
**Amostra 2**



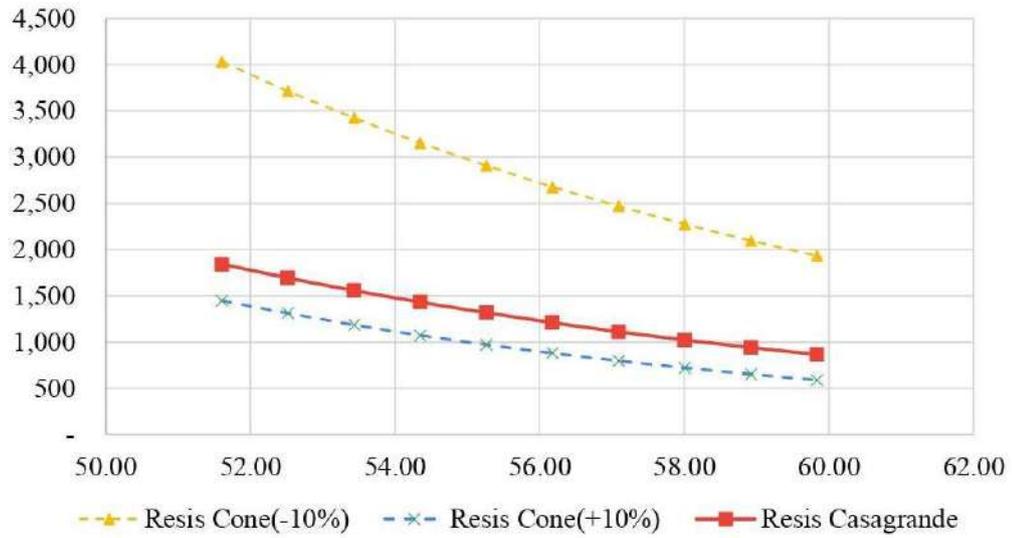
### Amostra 3



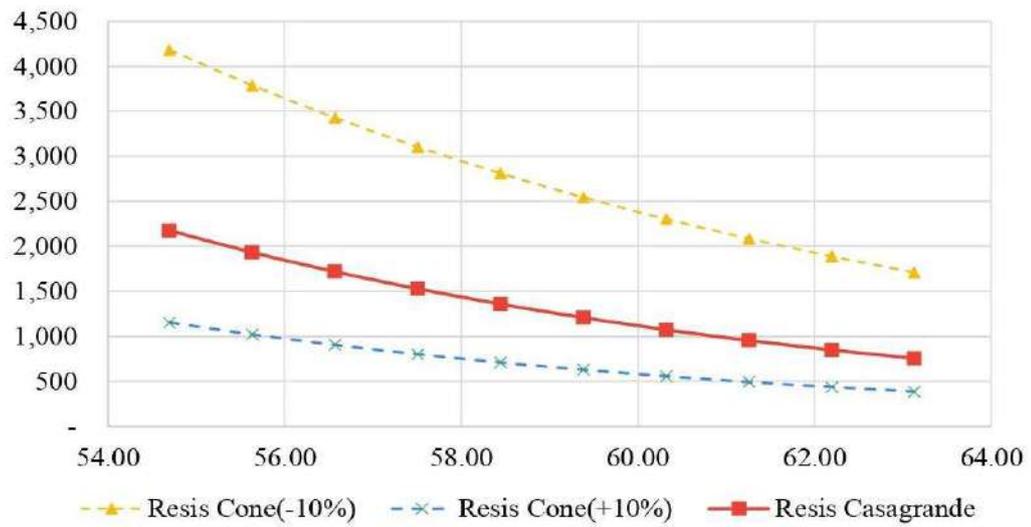
### Amostra 4



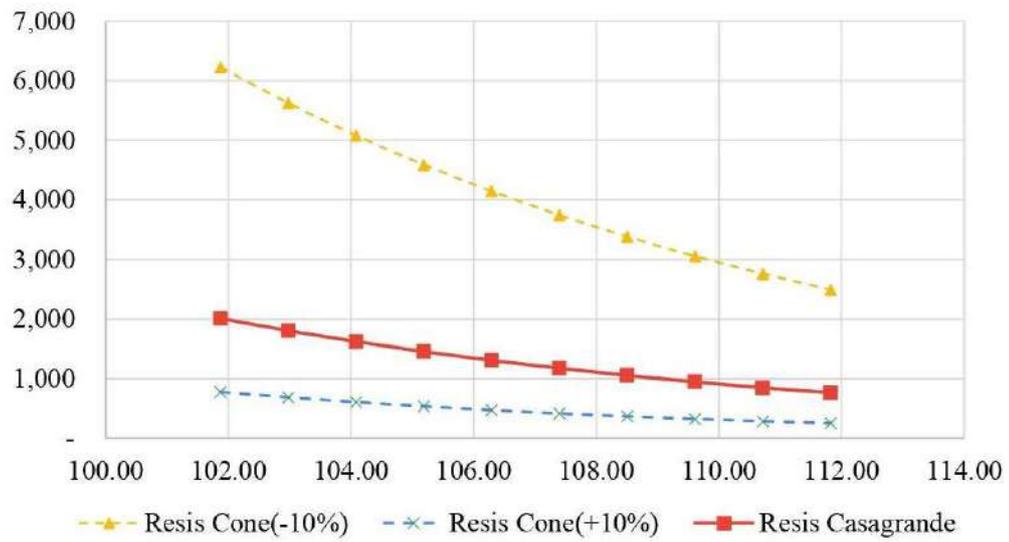
### Amostra 5



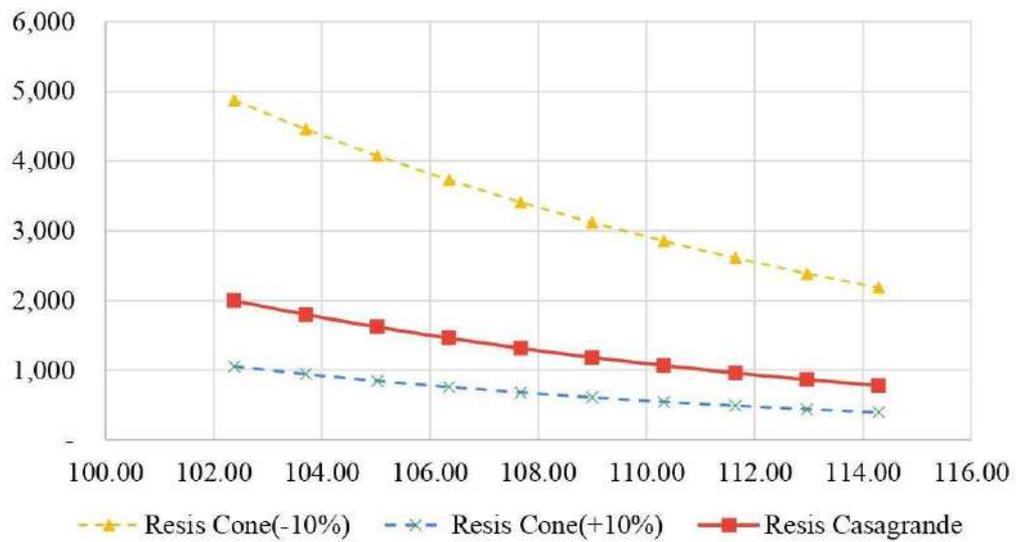
### Amostra 6



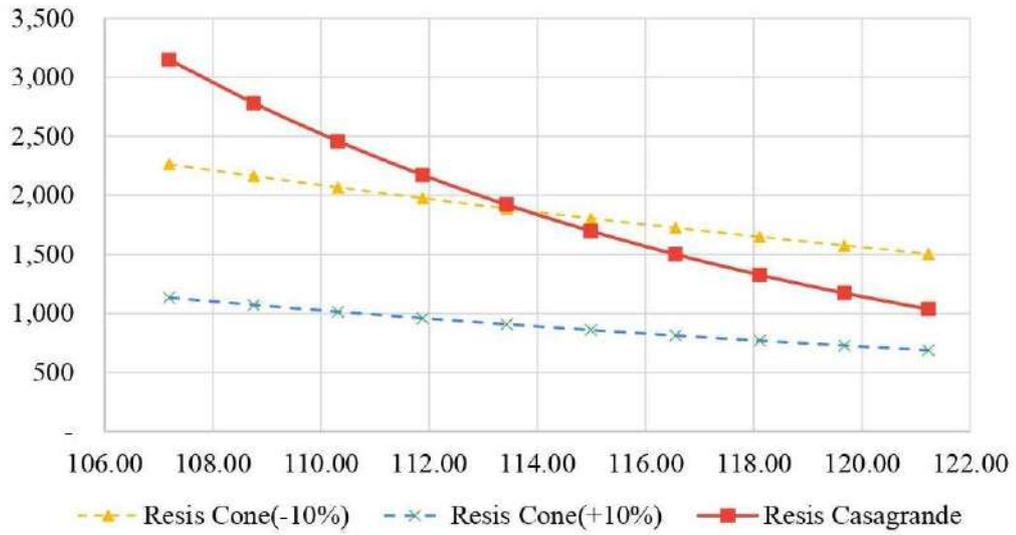
### Amostra 7



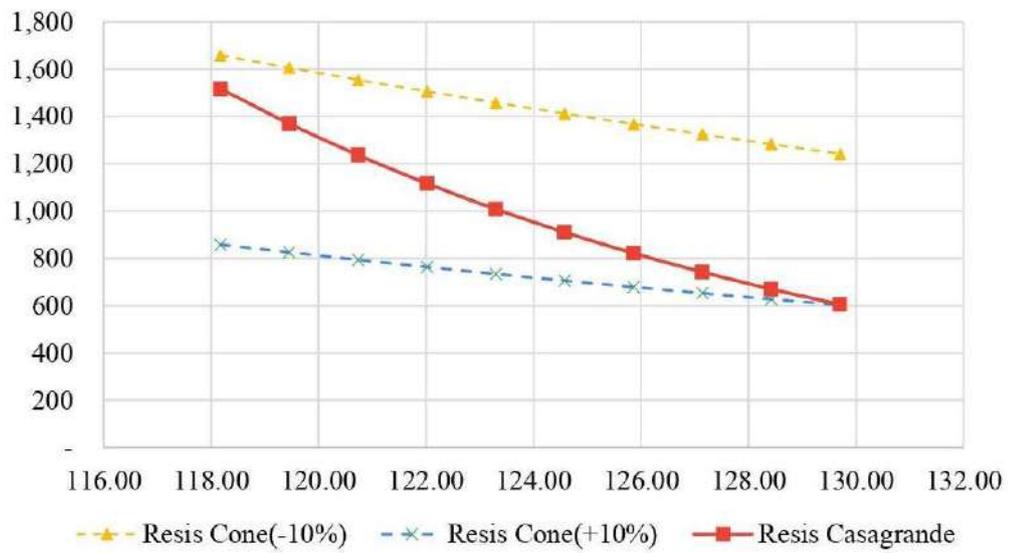
### Amostra 8



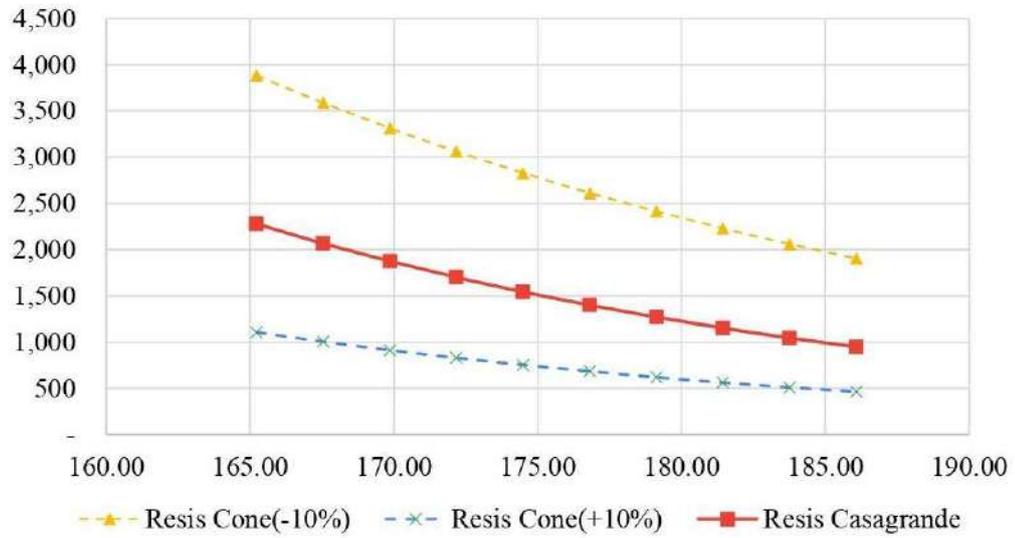
**Amostra 9**



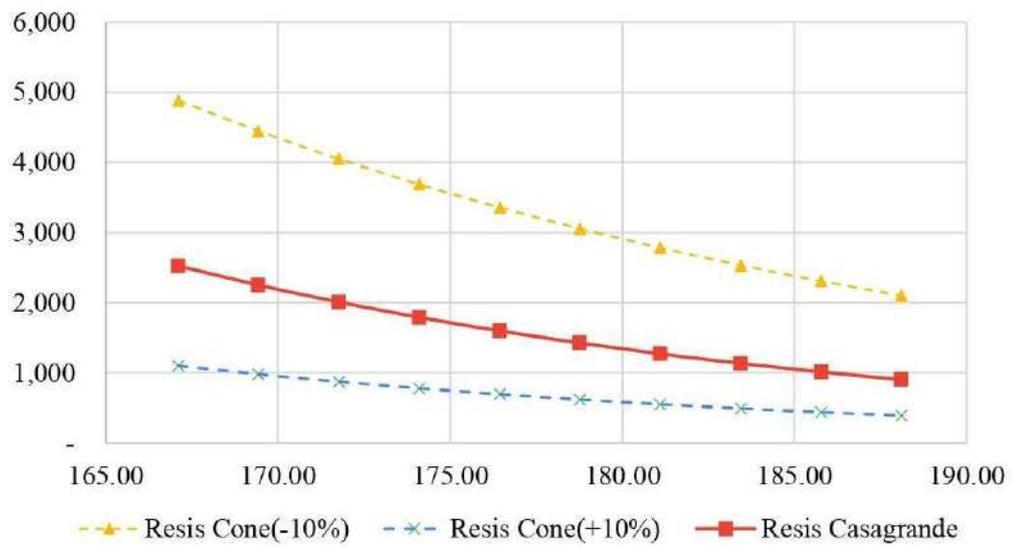
**Amostra 10**



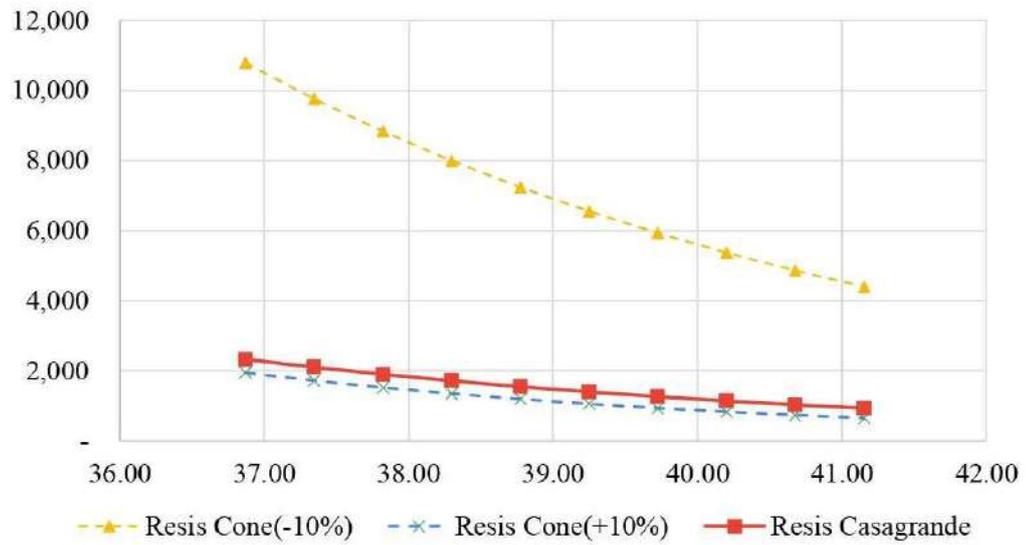
### Amostra 11



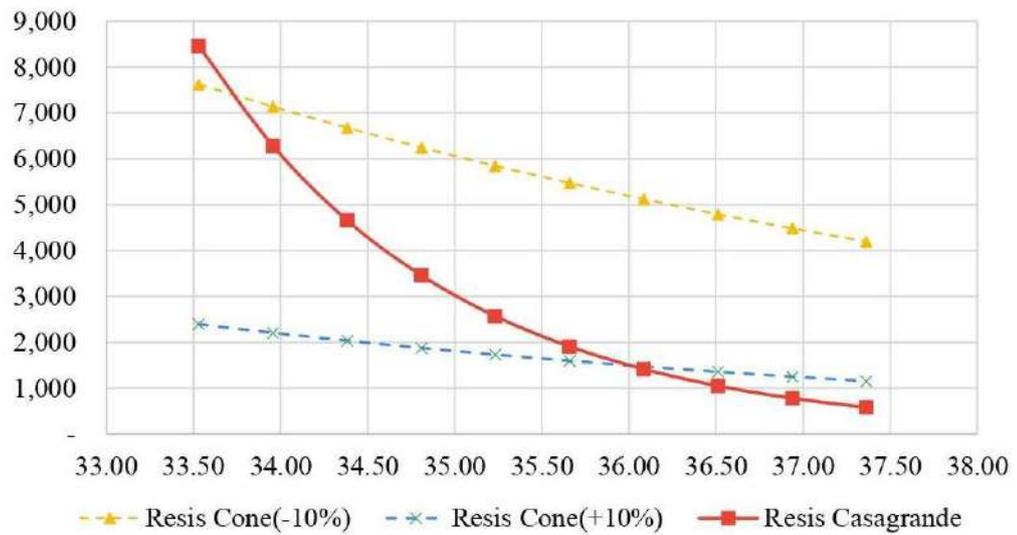
### Amostra 12



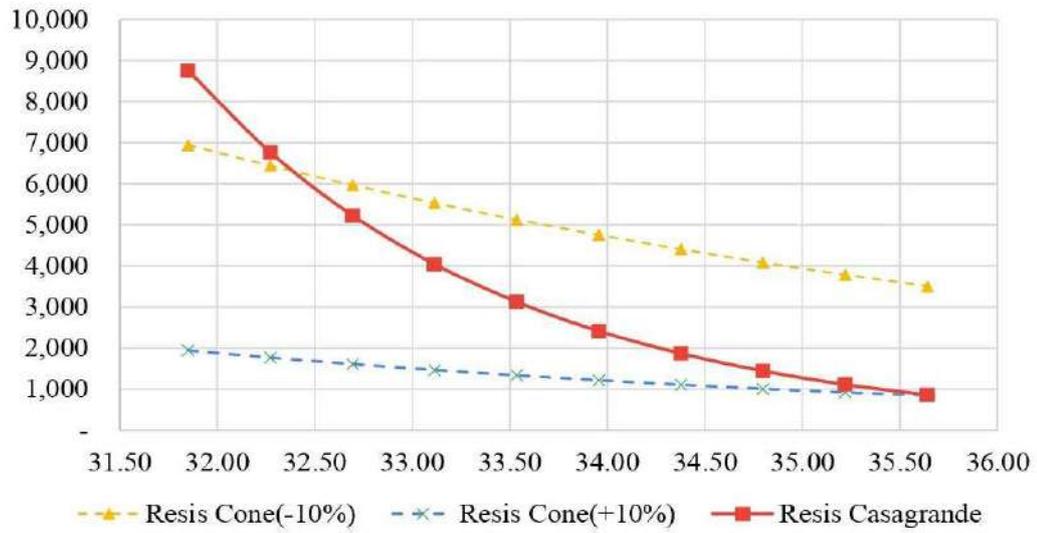
### Amostra 13



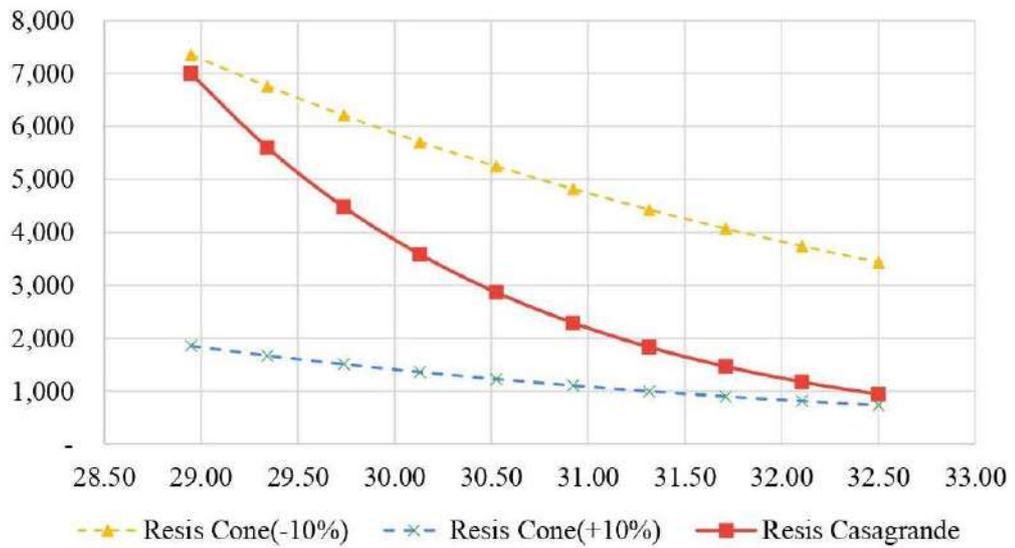
### Amostra 14



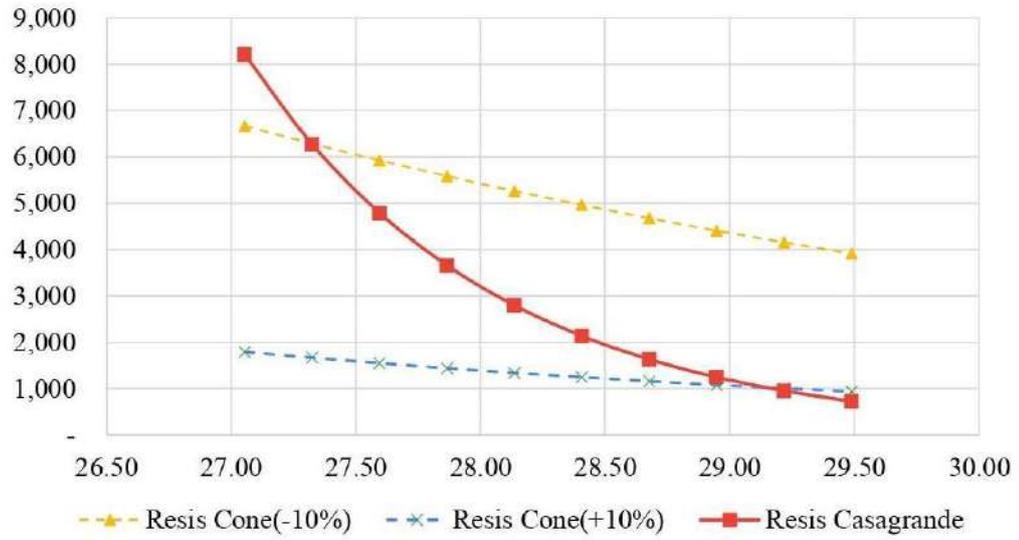
**Amostra 15**



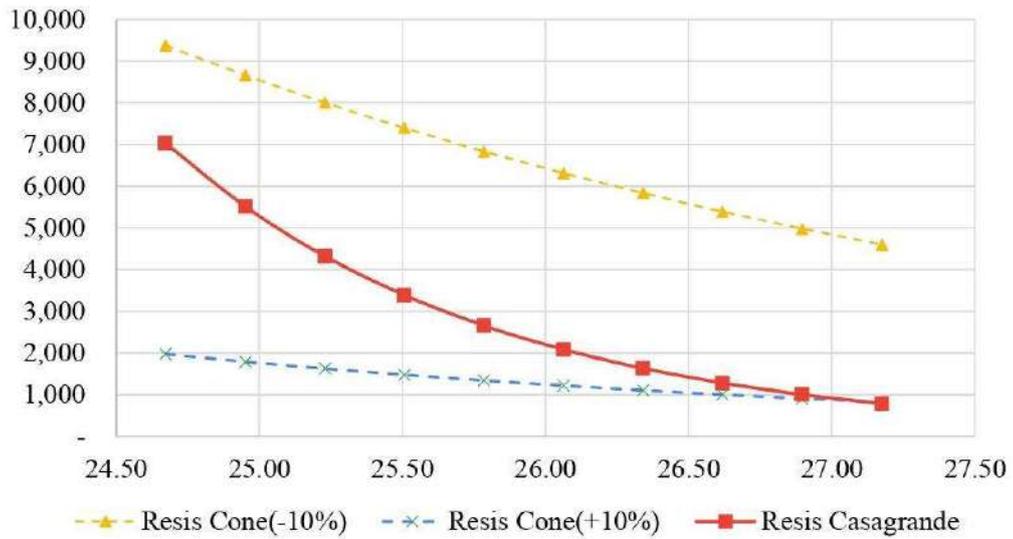
**Amostra 16**



**Amostra 17**

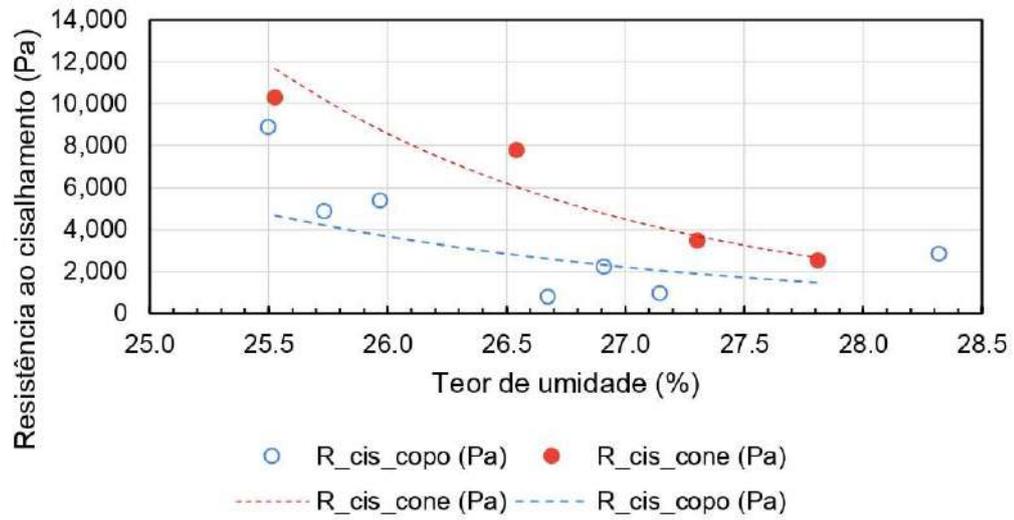


**Amostra 18**

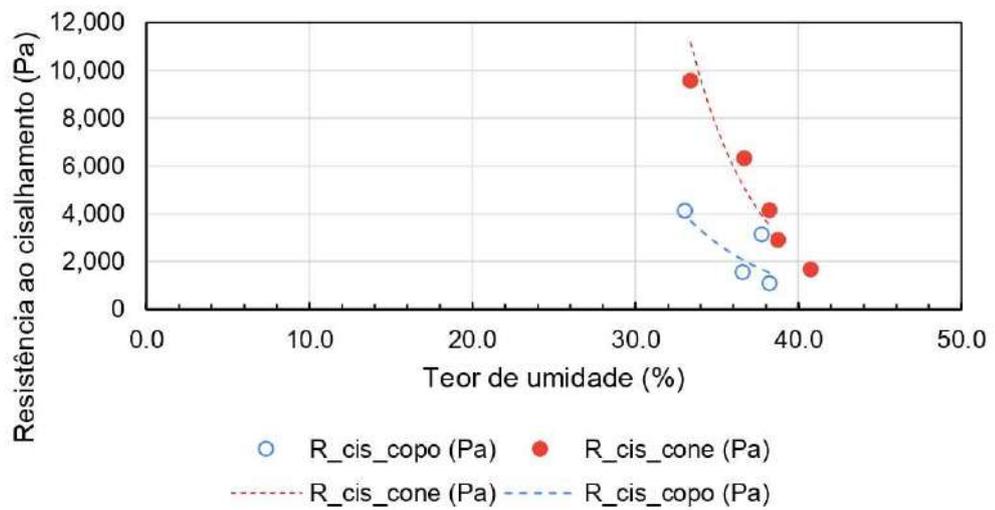


## APÊNDICE B - Comparação entre os métodos

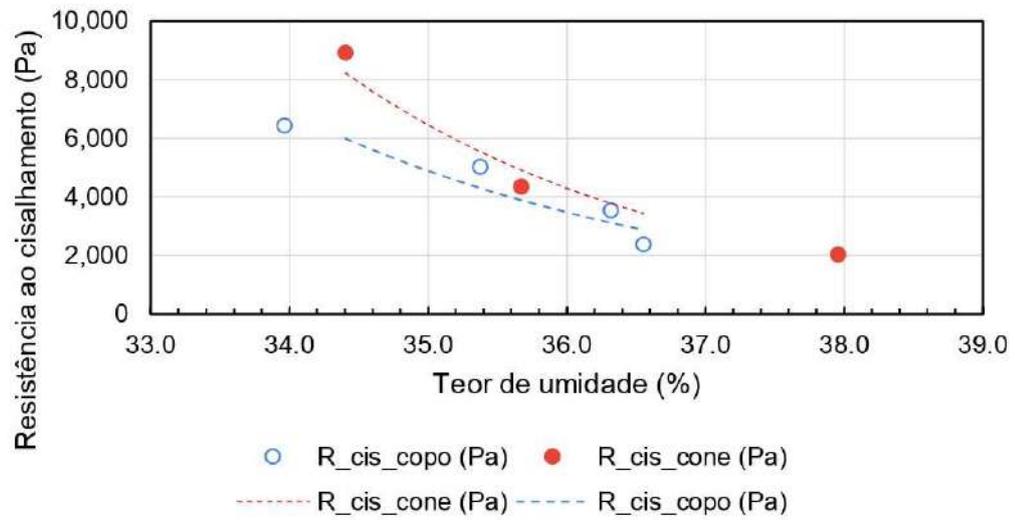
### Amostra 1



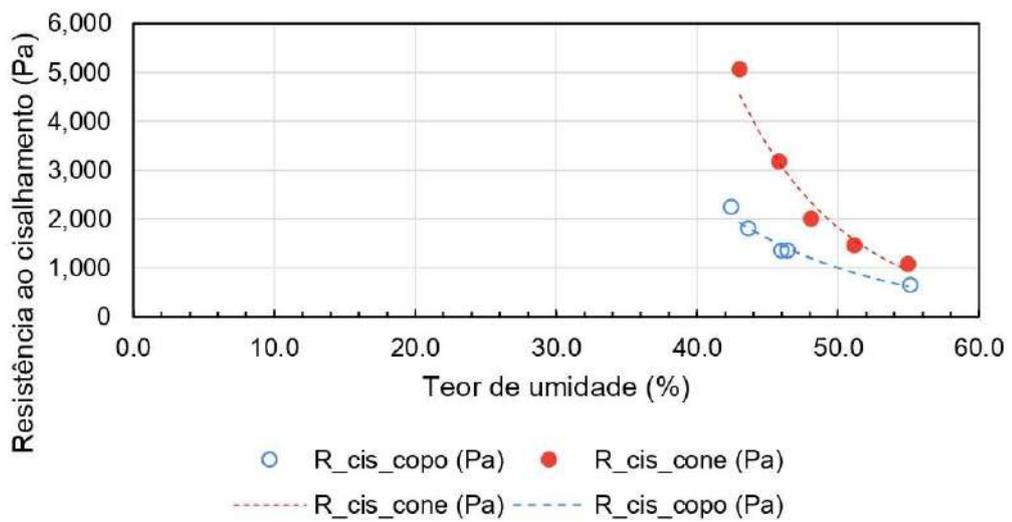
### Amostra 2



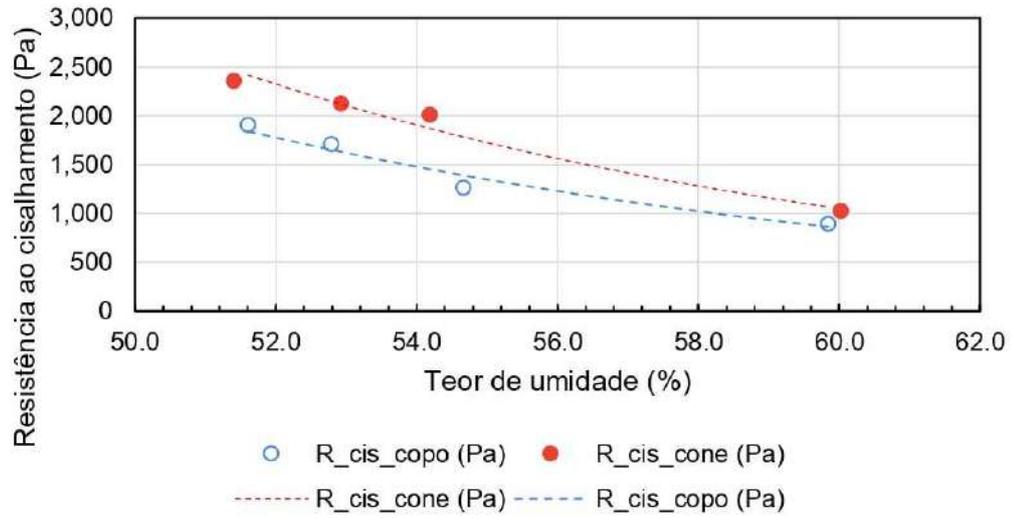
### Amostra 3



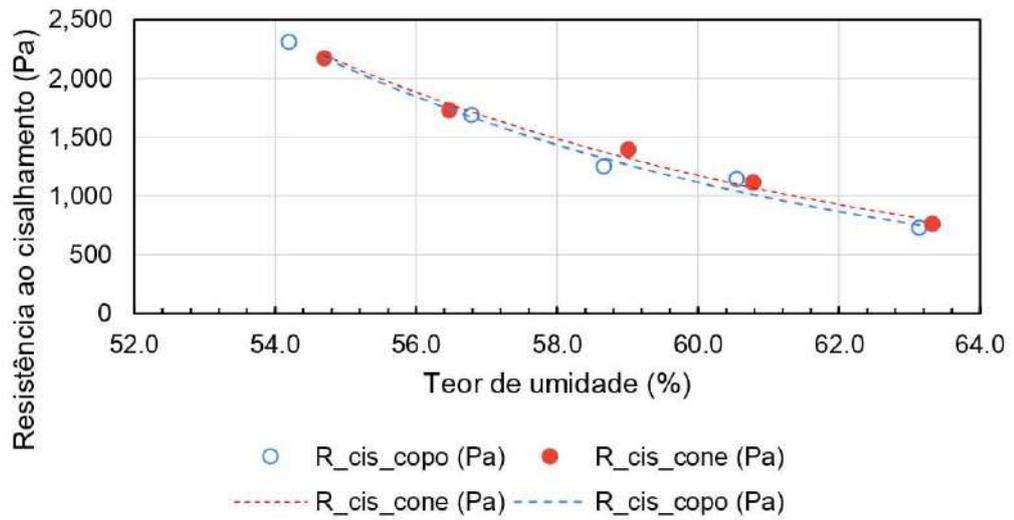
### Amostra 4



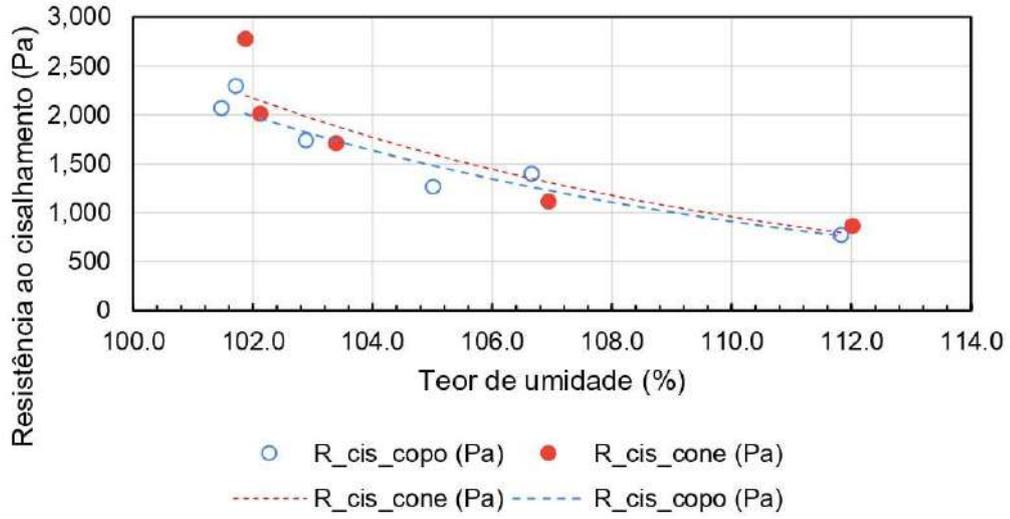
### Amostra 5



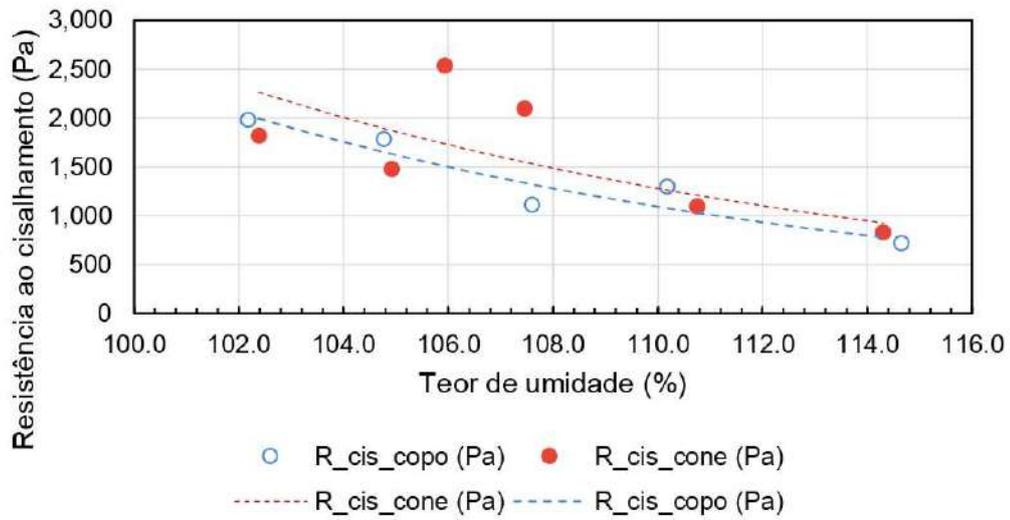
### Amostra 6



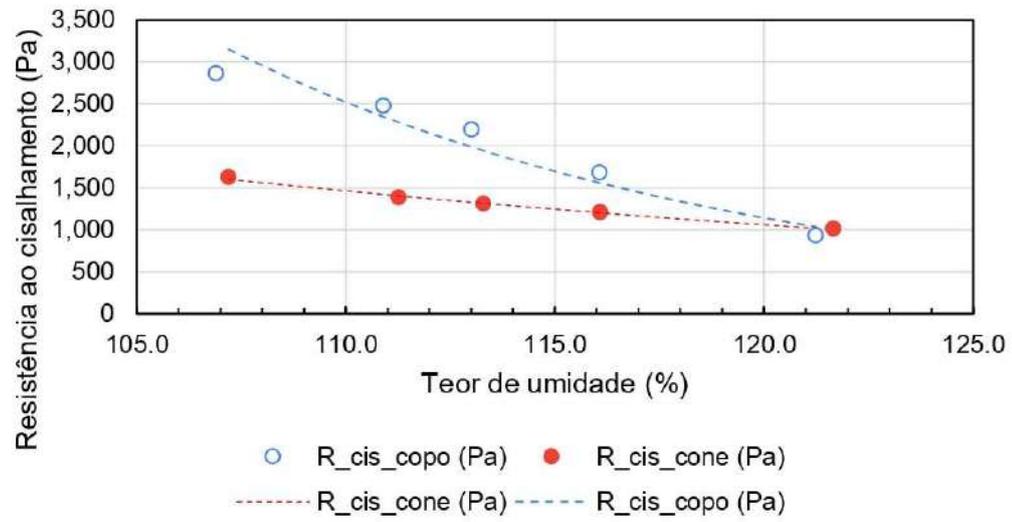
### Amostra 7



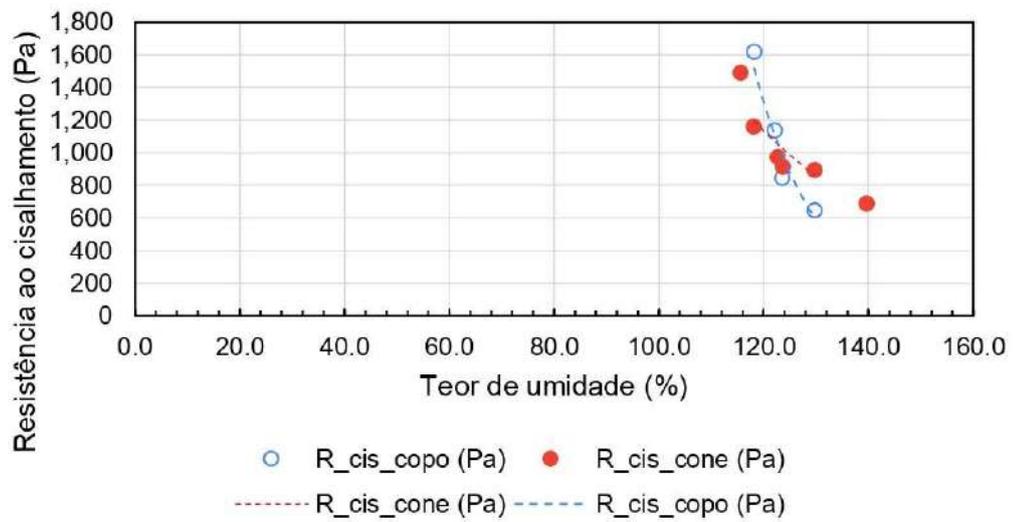
### Amostra 8



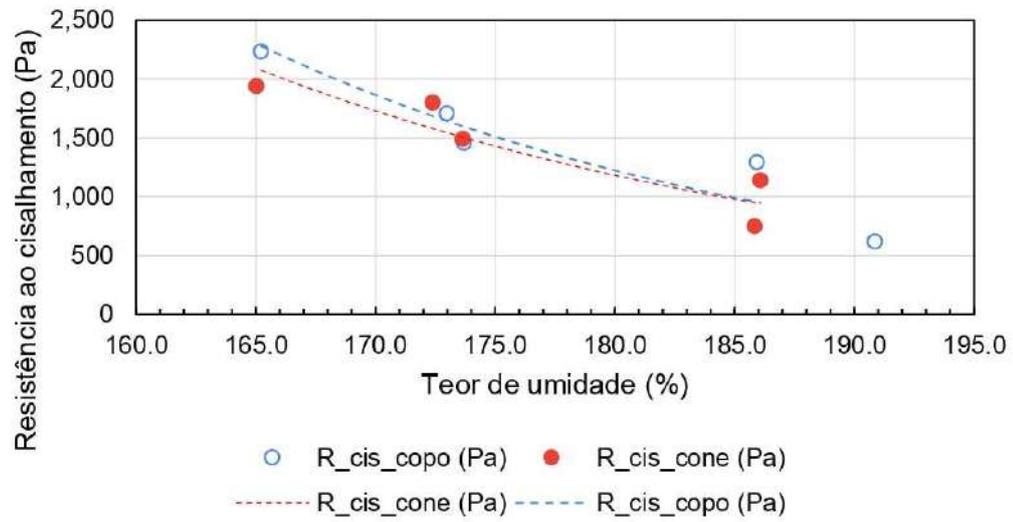
### Amostra 9



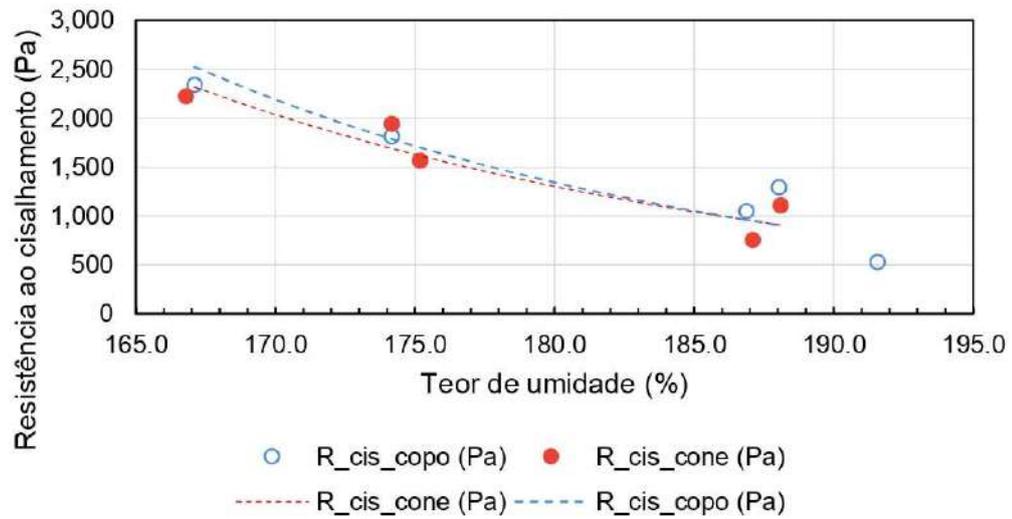
### Amostra 10



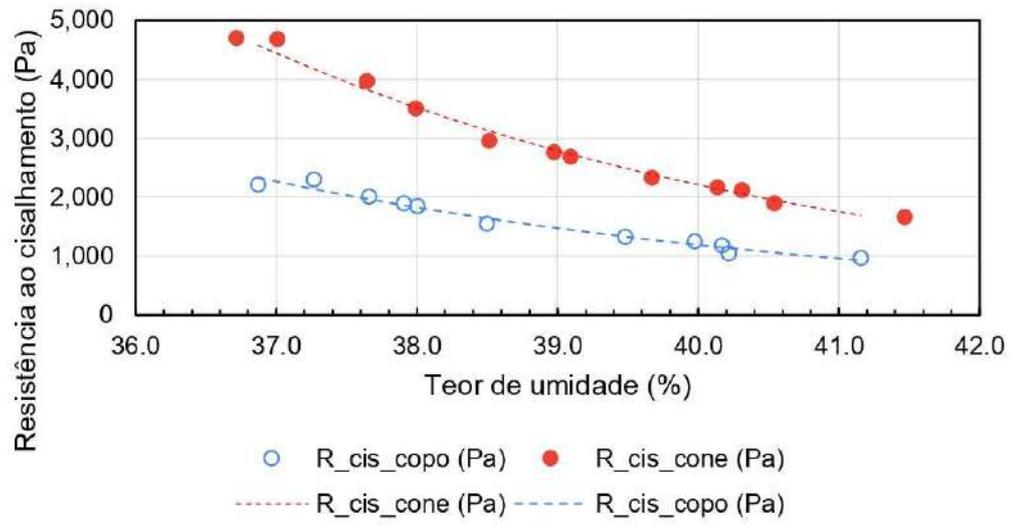
### Amostra 11



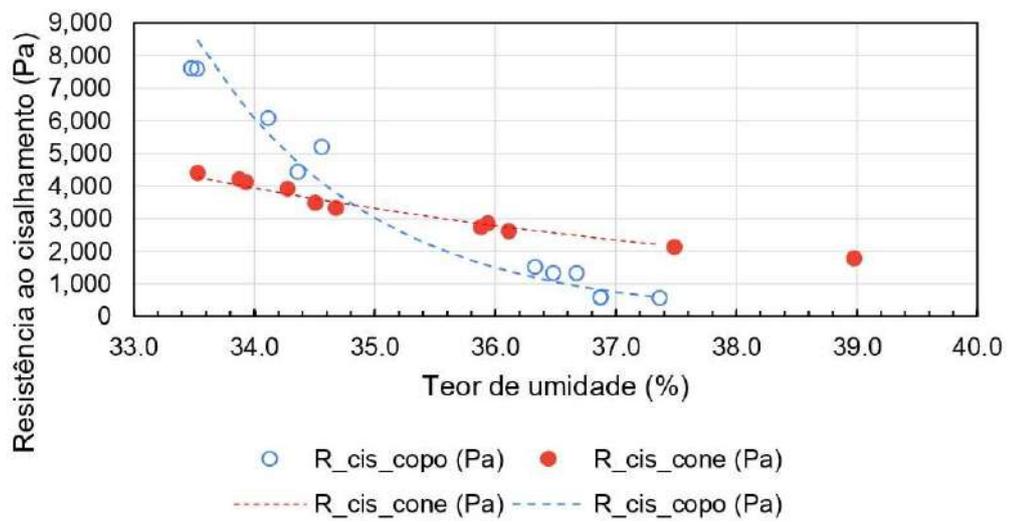
### Amostra 12



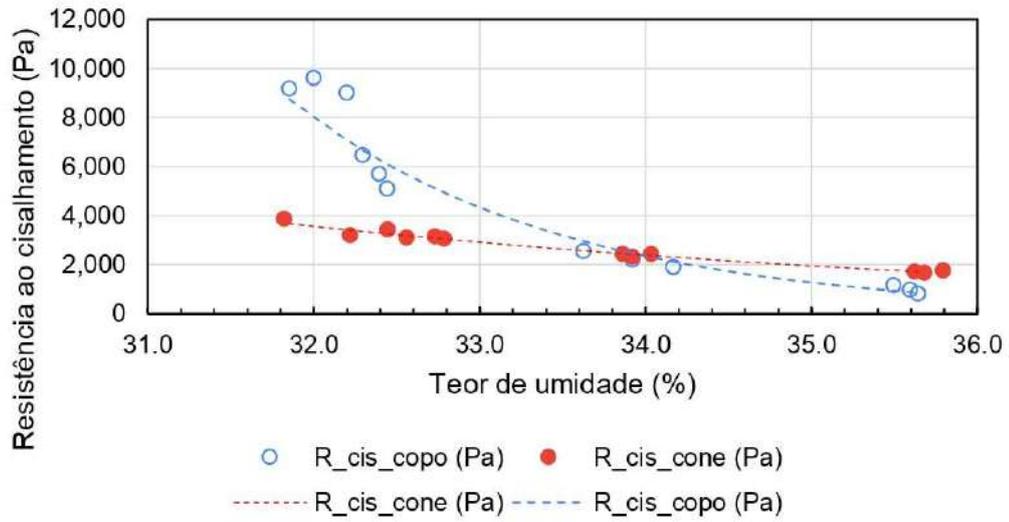
### Amostra 13



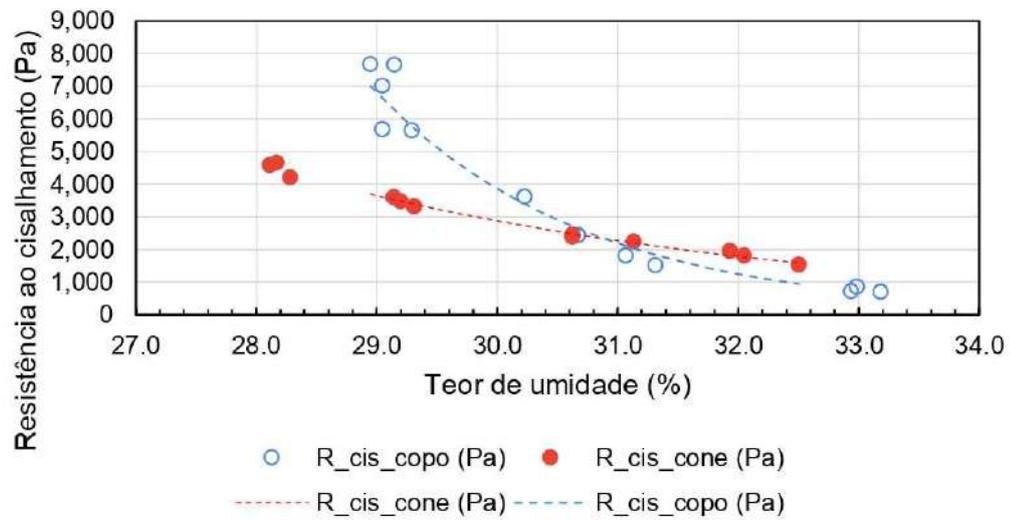
### Amostra 14



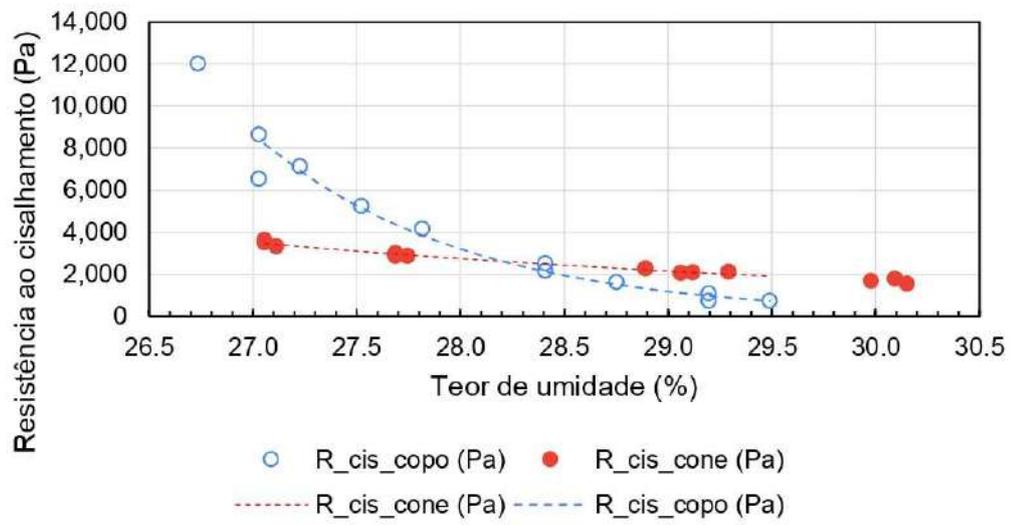
### Amostra 15



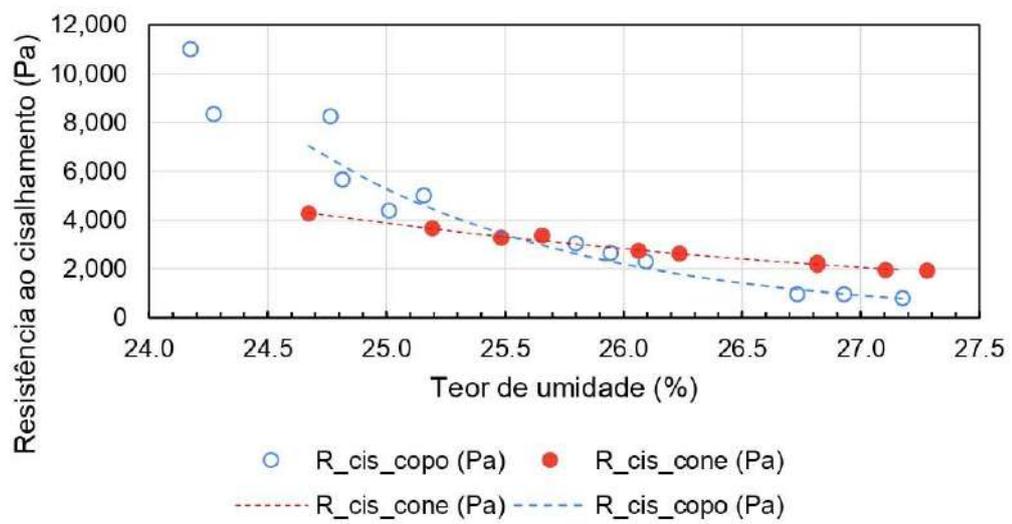
### Amostra 16

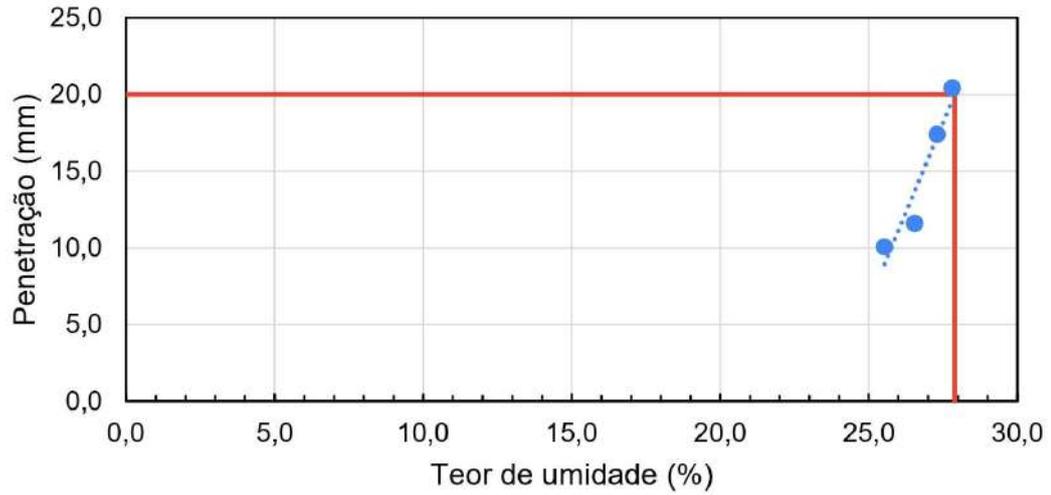
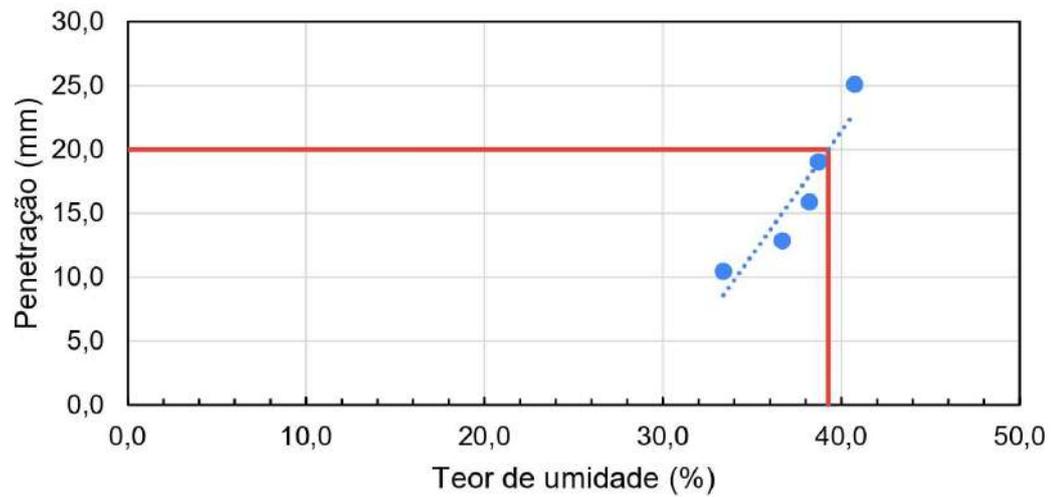


### Amostra 17

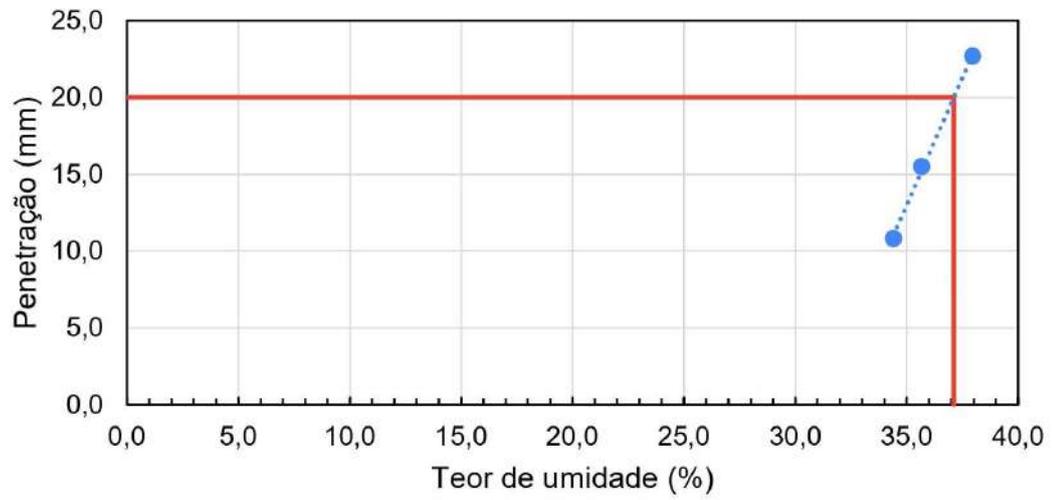


### Amostra 18



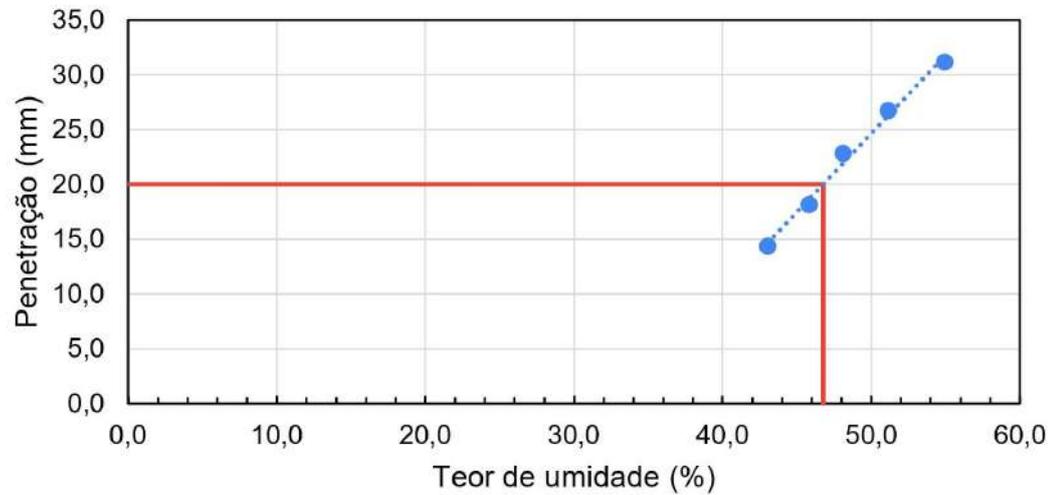
**APÊNDICE C - Limite de liquidez pelo Cone Sueco****Amostra 1****Limite de liquidez pelo cone sueco****Amostra 2****Limite de liquidez pelo cone sueco****Amostra 3**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



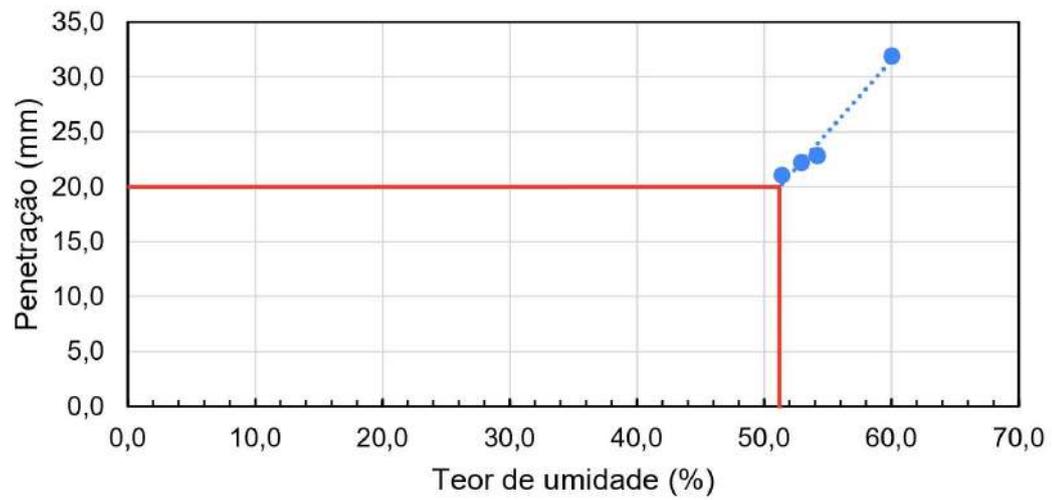
Amostra 4

### Limite de liquidez pelo cone sueco



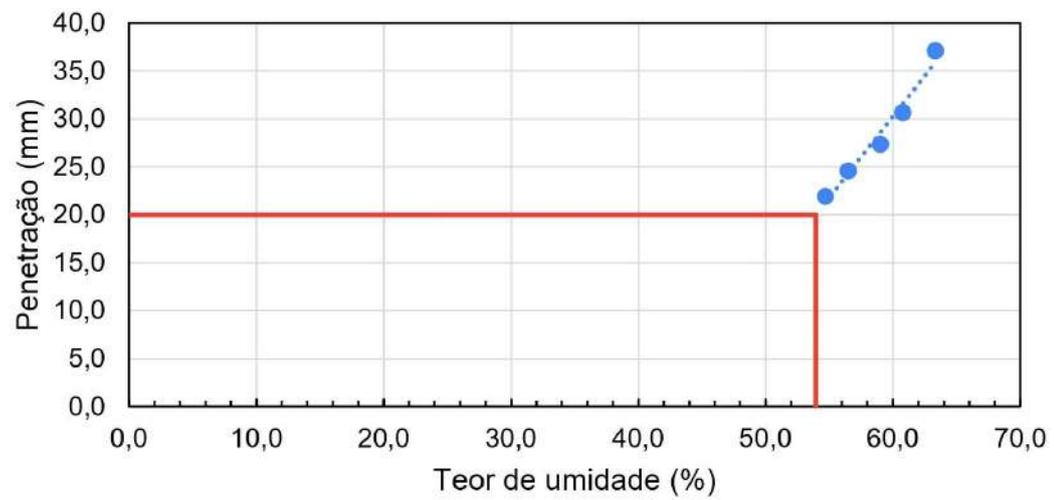
Amostra 5

### Limite de liquidez pelo cone sueco



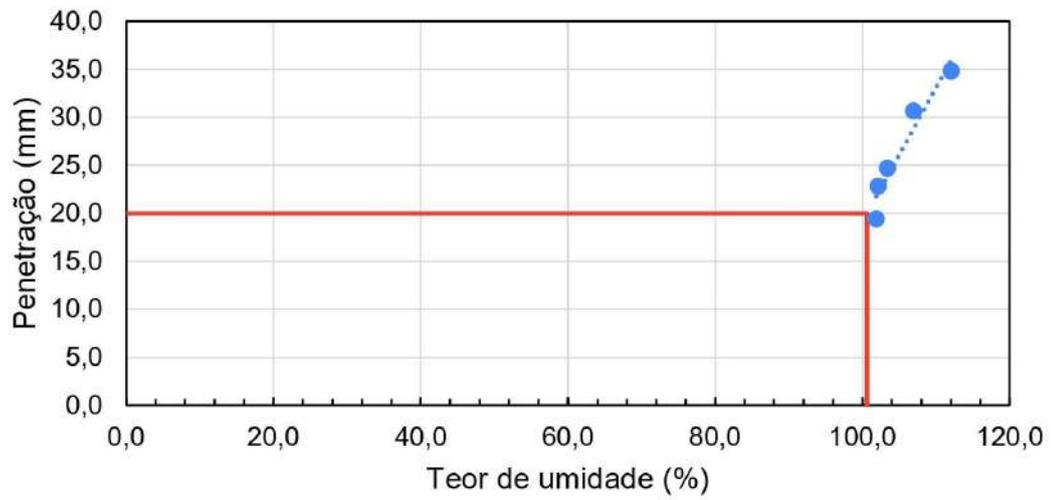
Amostra 6

### Limite de liquidez pelo cone sueco



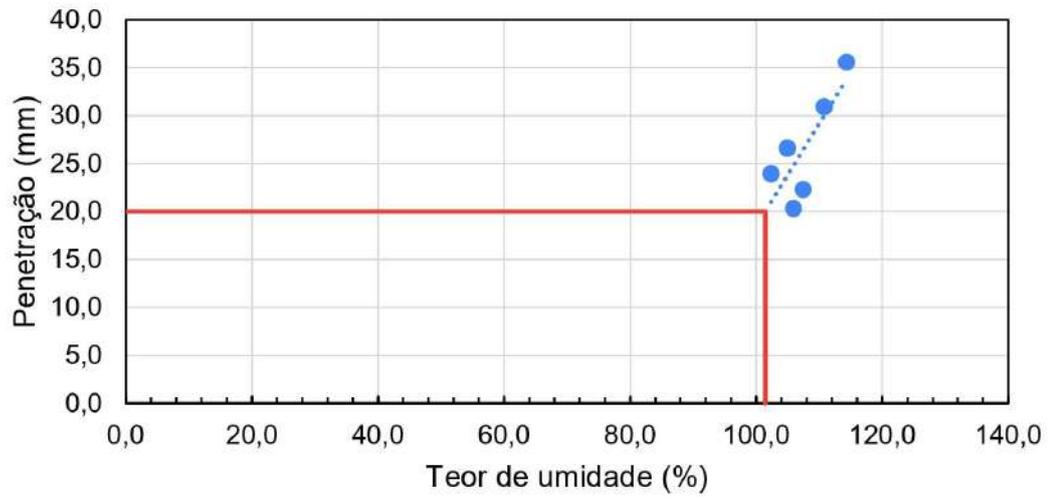
Amostra 7

### Limite de liquidez pelo cone sueco



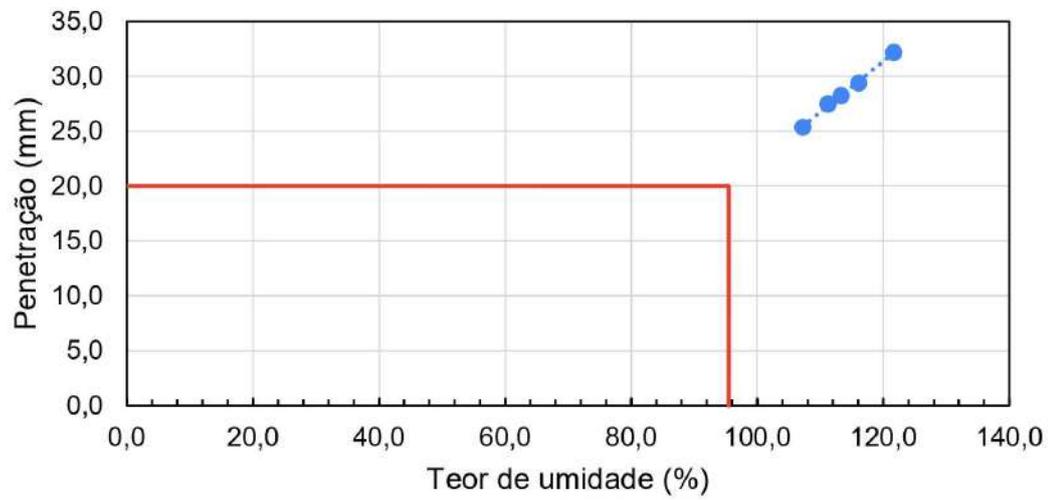
Amostra 8

### Limite de liquidez pelo cone sueco



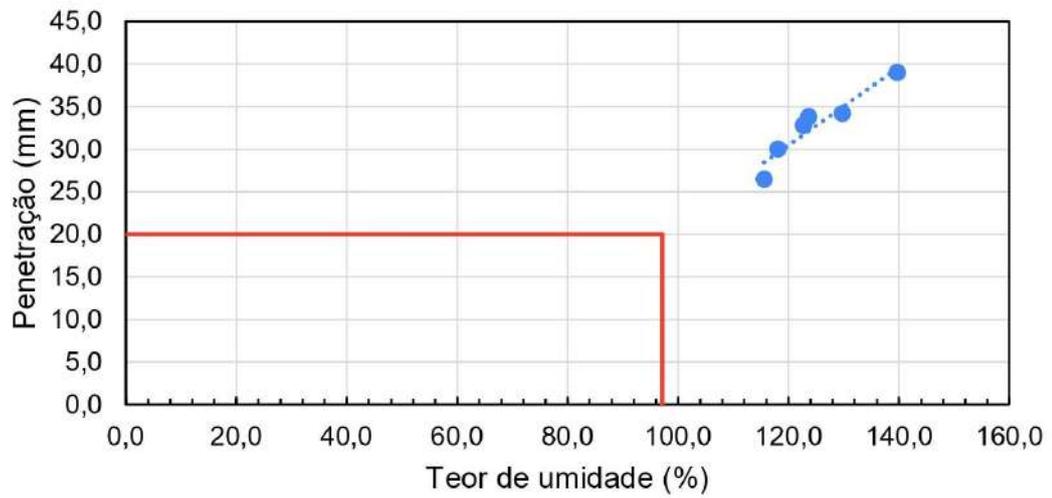
Amostra 9

### Limite de liquidez pelo cone sueco



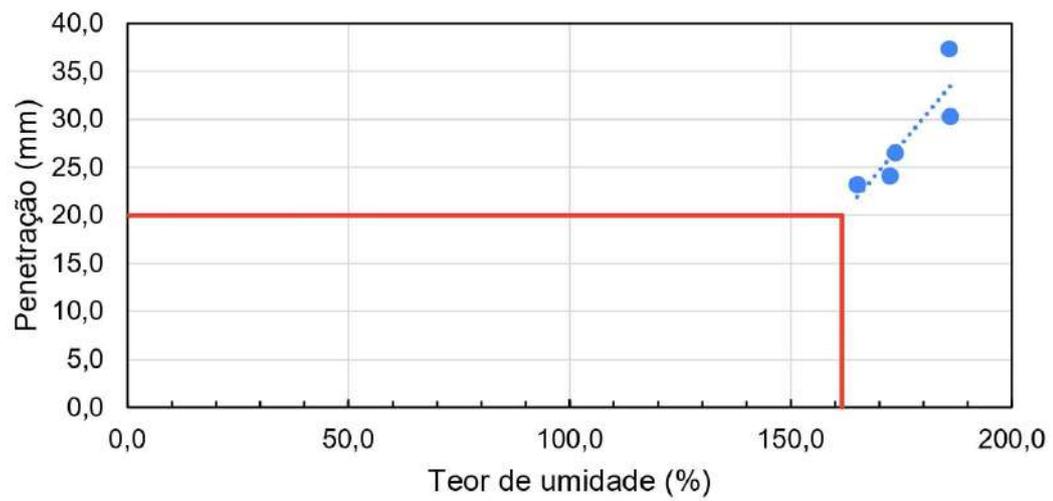
**Amostra 10**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



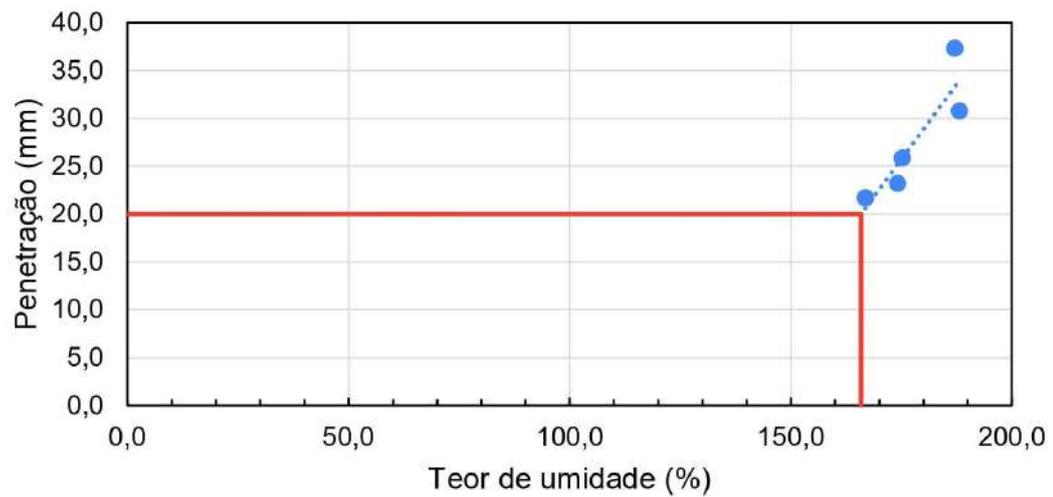
**Amostra 11**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



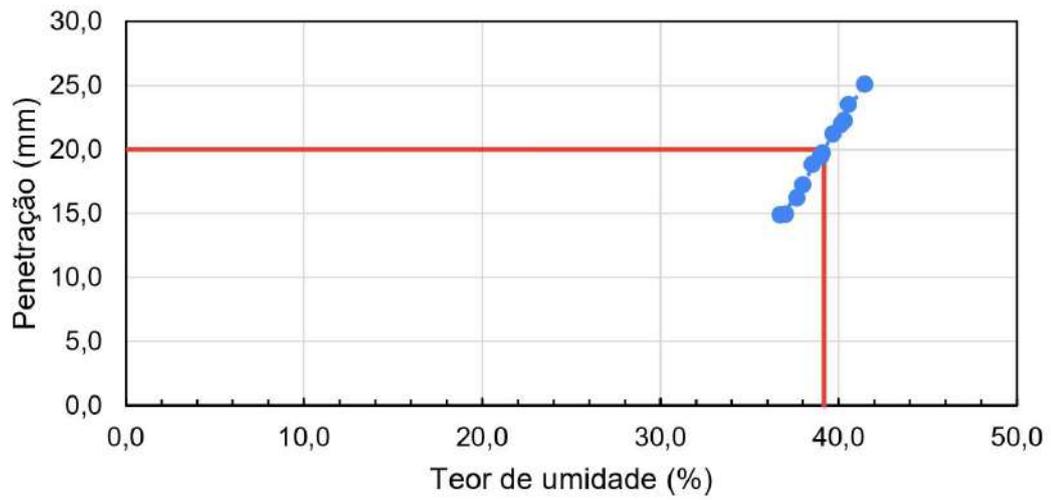
**Amostra 12**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



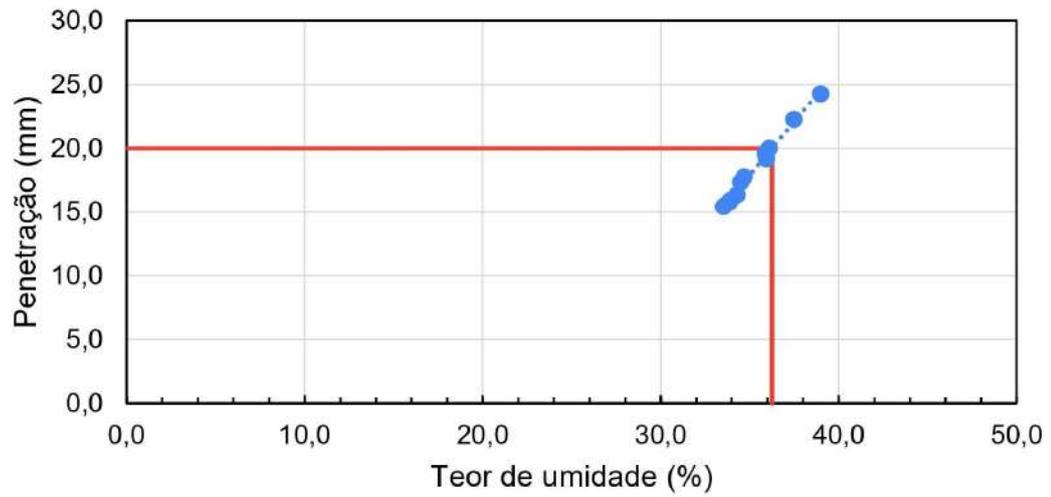
**Amostra 13**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



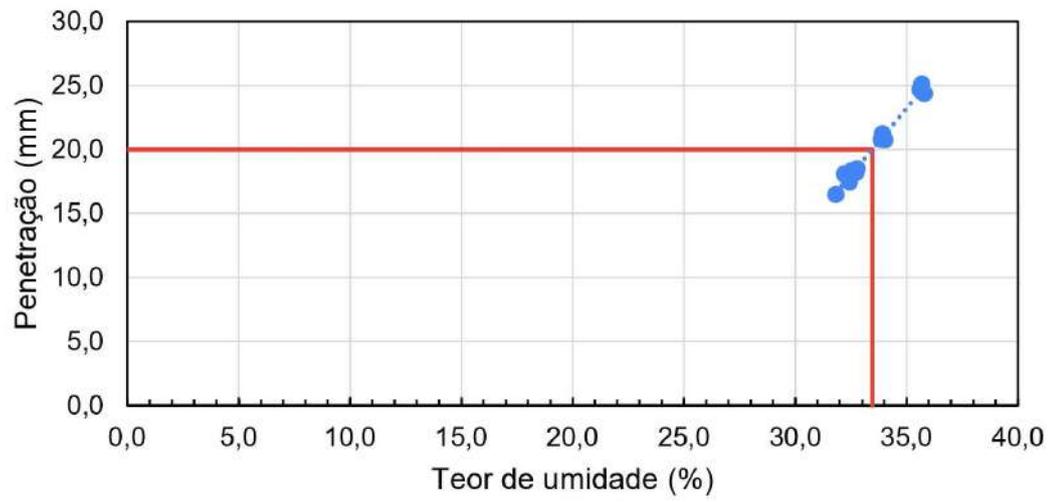
**Amostra 14**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



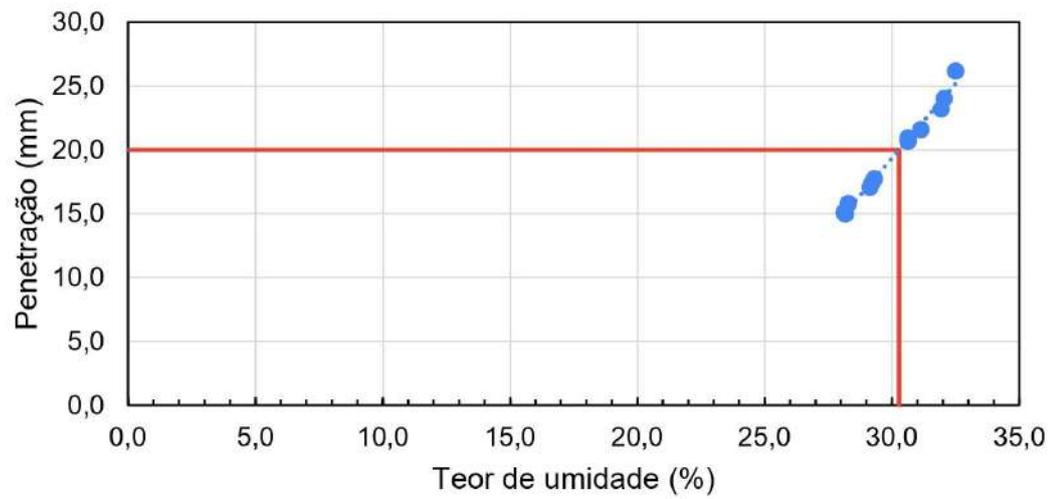
**Amostra 15**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



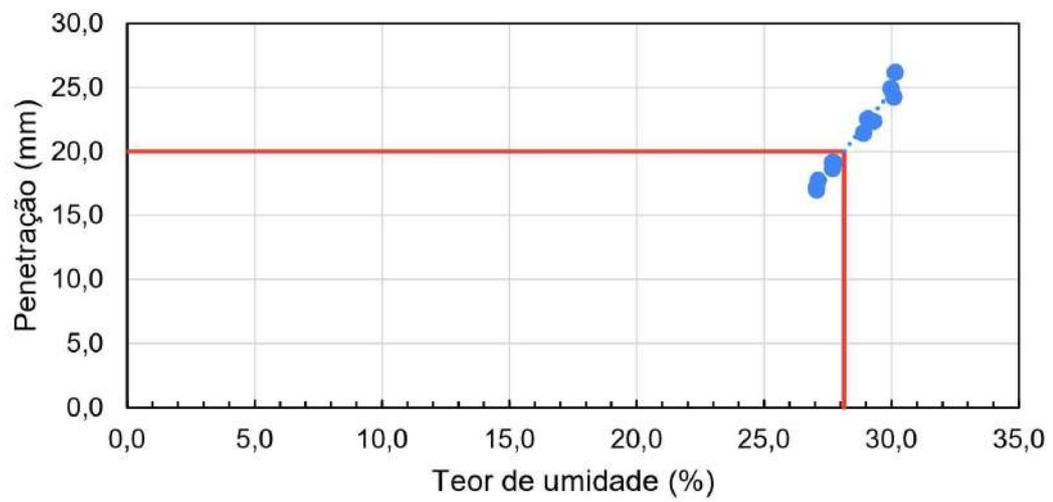
**Amostra 16**

### Limite de liquidez pelo cone sueco



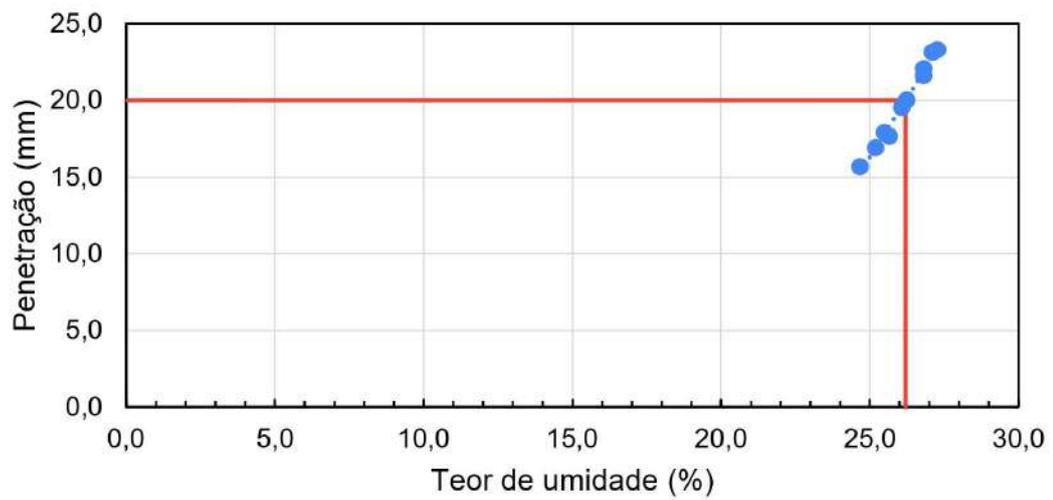
**Amostra 17**

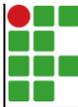
### Limite de liquidez pelo cone sueco



### Amostra 18

### Limite de liquidez pelo cone sueco



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

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### Entrega TCC

<b>Assunto:</b>	Entrega TCC
<b>Assinado por:</b>	Fabiana Maia
<b>Tipo do Documento:</b>	Diploma
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fabiana Araujo Maia, ALUNO (202016550055) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - PATOS**, em 27/03/2025 09:59:01.

Este documento foi armazenado no SUAP em 27/03/2025. 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: 1436676

Código de Autenticação: 251d0ee545

