



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA,
INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE FERRAMENTAS EM
OPERAÇÕES DE SONDAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS**

MARIO AUGUSTO ALBERTINI REGATIERI

Foz do Iguaçu
2025

MARIO AUGUSTO ALBERTINI REGATIERI

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE FERRAMENTAS EM
OPERAÇÕES DE SONDAGEM EM DIFERENTES CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia de
Materiais, da UNIVERSIDADE FEDERAL
DA INTEGRAÇÃO LATINO AMERICANA,
como requisito parcial para a Obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor, apoio e ensinamentos que sempre me acompanharam. À minha família, pelo incentivo constante, e aos amigos que estiveram ao meu lado nos momentos de desafio e superação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio incondicional, incentivo e paciência ao longo de toda minha formação acadêmica. Aos meus pais, que sempre acreditaram no meu potencial, e aos amigos que caminharam comigo durante essa jornada, meu muito obrigado.

Expresso minha gratidão ao professor Rafael Drumond Mancosu, pela orientação dedicada, pelas valiosas sugestões e pela confiança no desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para a consolidação deste estudo.

Agradeço também aos professores e colegas do curso de Engenharia de Materiais da UNILA, que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação técnica e humana.

Por fim, agradeço à empresa onde atuo, pelo apoio e pela oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos, enriquecendo ainda mais a experiência deste trabalho.

RESUMO

O desgaste de ferramentas metálicas utilizadas em sondagens geotécnicas está diretamente relacionado às características dos solos onde essas operações são realizadas. Componentes como amostradores, bicos de amostradores, hastes e tubos de revestimento, ao entrarem em contato com solos de diferentes composições, estão sujeitos a mecanismos de abrasão e corrosão. Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento dessas ferramentas submetidas a distintas condições geotécnicas, por meio da análise de dados obtidos em sondagens do tipo SPT, além de inspeções visuais e medições dimensionais após o uso. Foram analisados oito furos distribuídos em duas regiões distintas, considerando parâmetros como resistência à penetração (NSPT), coesão não drenada (S_u), ângulo de atrito interno (ϕ), módulo de deformabilidade (E_s), profundidade e nível d'água. Os resultados indicaram maior ocorrência de desgaste abrasivo em solos mais compactos e arenosos com cascalho, e corrosão localizada mais intensa em solos argilosos com presença de água. Esses achados reforçam a importância de considerar as propriedades do solo na escolha e manutenção dos equipamentos de sondagem.

Palavras-chave: sondagem geotécnica; desgaste de ferramentas; propriedades do solo; NSPT; corrosão.

RESUMEN

El desgaste de las herramientas metálicas utilizadas en sondeos geotécnicos está directamente relacionado con las características de los suelos donde se realizan estas operaciones. Componentes como muestreadores, puntas de muestreo, varillas y tubos de revestimiento, al entrar en contacto con suelos de diferentes composiciones, están sujetos a mecanismos de abrasión y corrosión. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de estas herramientas sometidas a distintas condiciones geotécnicas, mediante el análisis de datos obtenidos en sondeos del tipo SPT, así como inspecciones visuales y mediciones dimensionales tras su uso. Se analizaron ocho perforaciones distribuidas en dos regiones, considerando parámetros como la resistencia a la penetración (NSPT), cohesión no drenada (S_u), ángulo de fricción interna (ϕ), módulo de deformabilidad (E_s), profundidad y nivel freático. Los resultados indicaron mayor desgaste abrasivo en suelos más compactos y arenosos con grava, y corrosión localizada más intensa en suelos arcillosos con presencia de agua. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar las propiedades del suelo en la selección y mantenimiento de los equipos de sondeo.

Palabras clave: sondeo geotécnico; desgaste de herramientas; propiedades del suelo; NSPT; corrosión.

ABSTRACT

The wear of metallic tools used in geotechnical drilling is directly related to the characteristics of the soils where these operations are carried out. Components such as samplers, sampler tips, rods, and casing tubes, when in contact with soils of different compositions, are subjected to abrasion and corrosion mechanisms. This study aimed to evaluate the behavior of these tools under different geotechnical conditions through the analysis of data obtained from Standard Penetration Tests (SPT), along with visual inspections and dimensional measurements after use. Eight boreholes were analyzed across two distinct regions, considering parameters such as standard penetration resistance (NSPT), undrained cohesion (S_u), internal friction angle (ϕ), deformability modulus (E_s), depth, and groundwater level. The results showed greater abrasive wear in more compact and gravelly sandy soils, and more intense localized corrosion in clayey soils with the presence of water. These findings highlight the importance of considering soil properties in the selection and maintenance of drilling equipment.

Keywords: geotechnical drilling; tool wear; soil properties; NSPT; corrosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do procedimento de cravação do amostrador dividido no ensaio SPT	15
Figura 2 – Diagrama triangular da classificação de solos.....	16
Figura 3 – Modelo ilustrativo da forma usual de organização e apresentação dos resultados do Ensaio de Sondagem SPT (SPT)	21
Figura 4 – Amostrador padrão de sondagem com presença de oxidação	26
Figura 5 – Fluxograma dos procedimentos da metodologia	34
Figura 6 – Amostradores padrão	36
Figura 7 – Bicos de amostrador	37
Figura 8 – Hastes-guia.....	38
Figura 9 – Tubos de revestimento	39
Figura 10 – Tripé montado para ensaio SPT	40
Figura 11 – Trépano de lavagem em operação de perfuração	41
Figura 12 – Estrutura para sondagem à percussão SPT (adaptado de Schnaid, 2000)	41
Figura 13 – Paquímetro digital utilizado para aferir desgaste com precisão de 0,01 mm	43
Figura 14 – Croqui dos pontos de sondagem da Região A	46
Figura 15 – Croqui dos pontos de sondagem da Região B	47
Figura 16 – Equipamentos utilizados na Região A e principais tipos de danos observados	48
Figura 17 – Equipamentos utilizados na Região B e principais tipos de danos observados	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
CPT	Cone Penetration Test
E_s	Módulo de deformabilidade (kPa)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
N	Número bruto de golpes no SPT
NSPT	Número de golpes do SPT
N_{60}	NSPT corrigido para 60 % de energia
pH	Potencial de hidrogênio
SPT	Standard Penetration Test
Su	Coesão não drenada (kPa)
ϕ	Ângulo de atrito interno (°)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE SONDAÇÃO GEOTÉCNICA	14
3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO EM SONDAÇÕES SPT	15
3.3 PERFIS DE SONDAÇÃO COMO BASE PARA ANÁLISE TÉCNICA	20
3.4 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO	22
3.4.1 Mecanismos De Degradação Por Oxidação	24
3.4.2 Mecanismos De Degradação Por Fadiga	26
3.4.3 Mecanismo De Degradação Por Adesão	27
3.4.4 Mecanismo De Degradação Por Abrasão	29
3.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DEGRADAÇÃO EM EQUIPAMENTOS	30
3.6 CORROSÃO	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS REGIÕES	36
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS	39
4.3 DADOS EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS DE COLETA	45
4.4 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1. ANÁLISE VISUAL E INSPEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	50
5.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS E DOS PERFIS	54
6 CONCLUSÃO	61
7.REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

A sondagem geotécnica é uma atividade essencial para projetos de engenharia, mineração e estudos ambientais, permitindo compreender as características do solo em subsuperfícies. Os métodos mais utilizados, como a sondagem a percussão e a rotativa, envolvem o uso de ferramentas metálicas projetadas para suportar condições extremas de abrasão, impacto e atrito. No entanto, as variações nas propriedades dos solos, que incluem composição granulométrica, mineralógica e compactação, afetam diretamente o desgaste dessas ferramentas, reduzindo sua durabilidade e aumentando os custos operacionais. (Das, 2014; Massad, 2016).

Solos de diferentes profundidades apresentam particularidades que influenciam os processos de desgaste. Dependendo da geologia do local, camadas superficiais geralmente contêm solos menos compactados, enquanto profundidades maiores frequentemente apresentam materiais mais densos e ricos em minerais abrasivos, como quartzo e feldspato. Essas propriedades intensificam o desgaste abrasivo das ferramentas, enquanto solos argilosos podem favorecer o desgaste adesivo devido à alta plasticidade. Além disso, ambientes úmidos ou ácidos podem causar corrosão, representando mais um desafio para a durabilidade dos materiais. (Machado, 2009).

A preocupação com a durabilidade das ferramentas de sondagem vai além das questões técnicas. O desgaste prematuro aumenta os custos operacionais devido à necessidade de substituições frequentes, além de gerar resíduos metálicos e consumir energia na fabricação de novas peças. Em um cenário global que exige maior sustentabilidade, há uma pressão crescente para desenvolver ferramentas que não apenas resistam melhor ao desgaste, mas que também minimizem impactos ambientais. Assim, a análise dos materiais utilizados e das condições de operação se torna indispensável para equilibrar eficiência econômica e responsabilidade ecológica. (Souza, 2010).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma análise experimental do desempenho de ferramentas de sondagem submetidas a diferentes condições geotécnicas. A partir da avaliação de laudos de sondagem e da inspeção visual e dimensional dos componentes após o uso, busca-se correlacionar os tipos de solo e

seus parâmetros geotécnicos aos mecanismos predominantes de desgaste e corrosão observados em campo.

A abordagem adotada visa oferecer uma contribuição técnica relevante para o aprimoramento das práticas na área de investigação geotécnica, com potencial para orientar escolhas mais adequadas de materiais, melhorar os procedimentos de operação e manutenção e promover maior durabilidade e eficiência no uso de equipamentos em diferentes ambientes de solo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste estudo justifica-se pela necessidade de compreender, de forma mais aprofundada, como as condições geotécnicas influenciam diretamente o desempenho e a durabilidade das ferramentas empregadas em operações de sondagem. A variabilidade dos solos em diferentes profundidades, bem como a presença de água subterrânea e minerais abrasivos, representa um desafio constante para a integridade dos equipamentos utilizados em campo.

O desgaste prematuro de componentes metálicos, além de elevar os custos operacionais com substituições e manutenção, compromete a segurança e a eficiência das atividades de investigação do subsolo. Dessa forma, torna-se essencial identificar os principais mecanismos de degradação associados aos diferentes tipos de solo, a fim de orientar boas práticas de uso, seleção de materiais mais adequados e estratégias para redução de falhas.

Além dos aspectos técnicos, o estudo também se justifica por sua contribuição ao desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis no setor de geotecnia. O conhecimento gerado pode auxiliar empresas e profissionais na tomada de decisões que reduzam o impacto ambiental, otimizem recursos e melhorem a confiabilidade dos equipamentos empregados em sondagens.

Diante da crescente demanda por obras de infraestrutura e pela intensificação da exploração de solos para diversos fins, torna-se cada vez mais relevante investigar como as características geotécnicas interferem no comportamento das ferramentas de sondagem. Este trabalho, ao propor uma análise experimental baseada em dados reais de campo, apresenta-se como uma contribuição técnica e científica relevante para o aprimoramento das práticas na área.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a relação entre as características dos solos em diferentes profundidades, com base em laudos de sondagem do tipo SPT, e o impacto no desgaste e na durabilidade das ferramentas utilizadas em operações de sondagem geotécnica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Caracterizar os tipos de solo encontrados nas regiões estudadas, por meio da análise dos perfis estratigráficos e geotécnicos;
- Determinar parâmetros geotécnicos relevantes, como resistência à penetração (NSPT), coesão não drenada (S_u), ângulo de atrito interno (ϕ) e módulo de deformabilidade (E_s);
- Correlacionar os mecanismos de desgaste e corrosão com as propriedades físicas e mecânicas dos solos analisados;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE SONDAGEM GEOTÉCNICA

A sondagem geotécnica é um método de investigação utilizado para coletar informações sobre as condições físicas, mecânicas e estruturais do subsolo. Essa técnica é fundamental em projetos de engenharia, pois fornece os dados necessários para o planejamento, construção e manutenção de obras como fundações, barragens, estradas, túneis e outras estruturas. Compreender os conceitos fundamentais de sondagem geotécnica é essencial para a realização de estudos precisos e seguros.

O principal objetivo da sondagem geotécnica é caracterizar o solo e as formações rochosas, avaliando propriedades como resistência, permeabilidade, compressibilidade, estratigrafia e nível do lençol freático. Esses dados permitem prever o comportamento do terreno sob diferentes condições de carga e identificar possíveis riscos geológicos que possam comprometer a segurança das obras. Segundo Bhushan (2013), conhecer as propriedades do solo é imprescindível para evitar falhas estruturais e garantir a estabilidade das construções.

Existem diferentes tipos de sondagem geotécnica, sendo os mais comuns a sondagem a percussão e a sondagem rotativa. A sondagem a percussão, como o SPT, é amplamente utilizada para avaliar a resistência do solo. Durante esse processo, um amostrador padrão é cravado no terreno por golpes de um martelo padronizado, registrando-se o número de golpes necessários para penetrar cada camada do solo. A Figura 1 ilustra a sequência de cravação do amostrador dividido durante a realização do ensaio SPT. Por outro lado, a sondagem rotativa é aplicada em terrenos rochosos, utilizando brocas que cortam o material para obter amostras intactas e avaliar suas propriedades (Hutchings; Shipway, 2017).

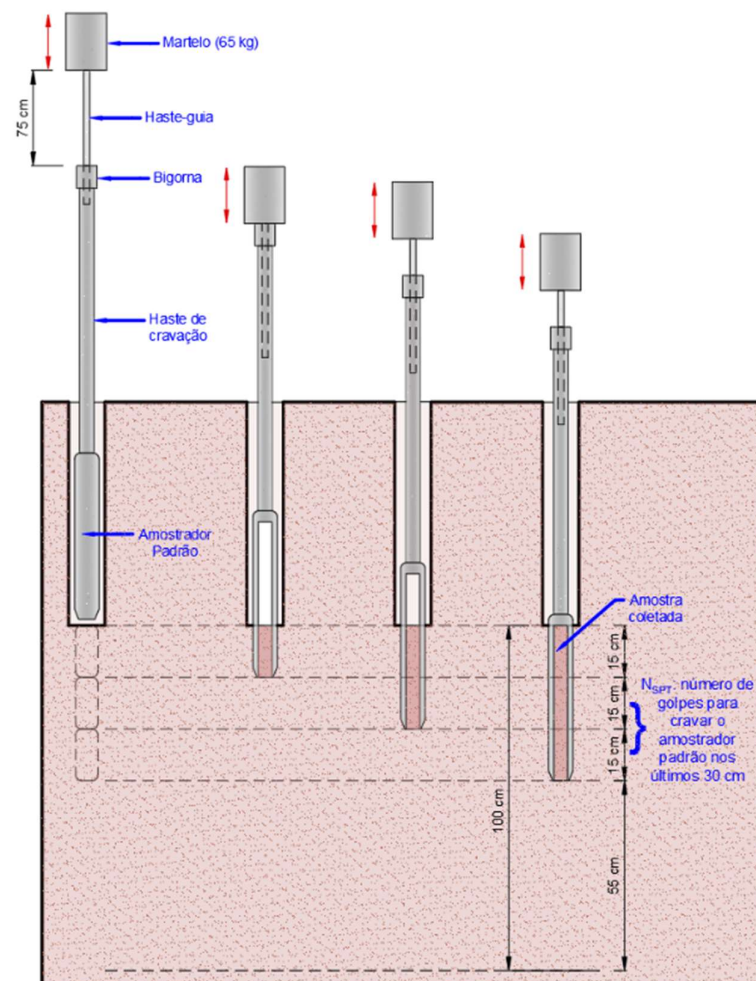
Outro conceito fundamental é o uso de ensaios in situ e laboratoriais. Ensaio in situ, como o Cone Penetration Test (CPT) e o Vane Shear Test, fornecem informações diretas sobre a resistência e a deformabilidade do solo no próprio local de estudo. Já os ensaios laboratoriais, realizados com as amostras coletadas, permitem uma análise detalhada das características do solo, como granulometria, plasticidade e limite de liquidez (Stachowiak; Batchelor, 2013).

Além disso, a sondagem geotécnica considera a interação entre o solo e os fluidos subterrâneos. Identificar o nível do lençol freático e a permeabilidade do terreno

é essencial para projetos que envolvam escavações profundas ou estruturas que necessitem de controle de drenagem.

A sondagem é uma etapa indispensável na engenharia civil e geotécnica, pois fornece as bases para o desenvolvimento de projetos confiáveis e sustentáveis. Por meio da aplicação de métodos padronizados e da interpretação criteriosa dos dados obtidos, é possível minimizar riscos, otimizar recursos e garantir o desempenho das obras. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática desse procedimento, detalhando a sequência de cravação, os intervalos de medição e os elementos envolvidos na realização do ensaio.

Figura 1 - Representação esquemática do procedimento de cravação do amostrador dividido no ensaio SPT.



Fonte: Estude Engenharia. (2025).

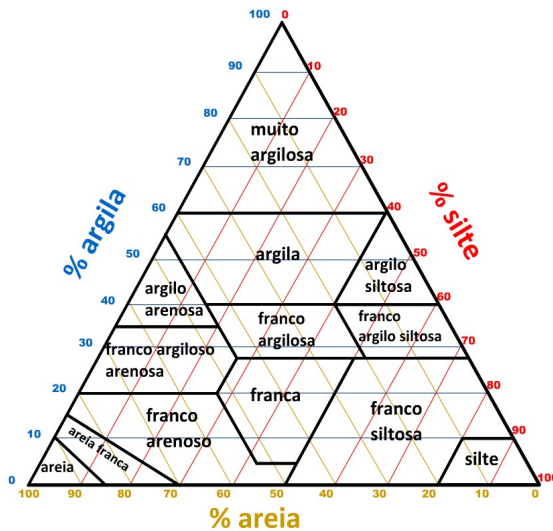
3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO EM SONDAGENS SPT

A sondagem do tipo SPT, conforme descrita na norma ABNT NBR 6484:2020, é uma das principais ferramentas para investigação geotécnica de solos no Brasil. Trata-se de um método prático, de baixo custo e com grande aplicação na engenharia geotécnica, permitindo a obtenção de dados empíricos e observacionais sobre as condições do subsolo.

Um dos principais parâmetros obtidos nesse tipo de sondagem é o índice de resistência à penetração (N), definido como o número de golpes necessários para cravar os últimos 30 cm do amostrador padrão no solo. Este valor é amplamente utilizado como base para estimativas empíricas de diversas propriedades do solo, como a resistência ao cisalhamento, o grau de compactação, a capacidade de carga admissível, entre outros (Das, 2014; Massad, 2016).

A partir dos valores de N e da descrição tátil-visual das amostras coletadas durante a sondagem, é possível realizar a classificação preliminar dos solos quanto ao tipo predominante (arenoso, silteoso ou argiloso), bem como inferir sua consistência (em solos coesivos) ou o grau de compactação (em solos granulares). Para auxiliar nessa interpretação, pode-se utilizar o diagrama triangular de classificação de solos (Figura 2), que representa graficamente a proporção relativa entre areia, silte e argila em uma amostra. Neste diagrama, cada vértice corresponde a 100% de um dos componentes, e a posição de um ponto dentro do triângulo indica a composição predominante do solo. Embora esse método exija dados laboratoriais para uma classificação precisa, ele serve como base teórica importante para compreender a natureza do solo com base em observações de campo. (Pinto, 2006).

Figura 2 - Diagrama triangular da classificação de solos.



Fonte: Silva (2015).

Além disso, os dados da sondagem possibilitam a identificação do nível d'água subterrâneo, que pode ser observado diretamente durante e após a perfuração. O conhecimento da profundidade do lençol freático é essencial para a análise de estabilidade, definição do tipo de fundação e comportamento do solo sob condições saturadas (Bodó; Jones, 2017).

A resistência ao cisalhamento, embora não determinada diretamente pelo SPT, pode ser estimada de forma indireta por meio de correlações empíricas entre os valores de N e os parâmetros de resistência, como o ângulo de atrito interno (ϕ) em solos granulares e a coesão não drenada (S_u) em solos argilosos.

Tais correlações são amplamente documentadas na literatura e oferecem uma base técnica para análise preliminar de estabilidade e capacidade de suporte (Das, 2014; Massad, 2016).

Em projetos de fundações rasas, estacas ou taludes, essas estimativas obtidas por SPT desempenham papel fundamental na fase inicial de dimensionamento e verificação de segurança, especialmente quando associadas a modelos empíricos validados e ao conhecimento prévio da geologia local (Tommasi, 2005).

Parâmetros Relacionados ao NSPT

O valor obtido diretamente em campo (NSPT) pode ser influenciado por diversos fatores operacionais, como o tipo de equipamento utilizado, condições de execução e eficiência da energia transmitida. Para tornar os dados comparáveis e padronizados, aplica-se uma correção que leva em conta a energia real fornecida durante o ensaio (Bowles, 1987). Essa correção resulta no valor denominado N_{60} , calculado pela equação:

$$N = N \times \left(\frac{Em}{60}\right) \times Cb \times Cs \times Cn \quad (1)$$

Onde:

- N = número bruto de golpes obtido no campo
- Em = eficiência do equipamento (%), medida ou estimada
- Cb, Cs, Cn = fatores corretivos relacionados ao tipo de amostrador, sistema de hastes e inclinação ou condição de campo

O valor corrigido N_{60} reflete o número de golpes normalizado para uma energia padrão de 60%, sendo fundamental para a aplicação de correlações empíricas confiáveis na estimativa de parâmetros do solo.

O ensaio SPT, apesar de não medir diretamente certos parâmetros do solo, permite estimá-los por meio de fórmulas empíricas. A seguir, são apresentadas correlações amplamente utilizadas na engenharia geotécnica:

a) Coesão

Para solos argilosos, a coesão (S_u) pode ser estimada utilizando equações empíricas, como a proposta por Bowles (1997), que define:

$$S_u = k * NSPT, 60 \quad (2)$$

onde k é um coeficiente empírico, dependendo das características do solo.

Tabela 1 - Valores típicos do coeficiente k .

Consistência	NSPT	k
Muito mole	< 3	3 a 6
Mole	3 a 5	5 a 7
Média	4 a 8	6 a 8
Rija	8 a 15	7 a 9
Muito rija	> 15	8 a 10

Fonte: Bowles, 1997.

b) Ângulo De Atrito Interno (ϕ)

O ângulo de atrito interno engloba a resistência ao cisalhamento atribuída ao atrito e ao intertravamento entre partículas. Em solos granulares, ϕ assume valores mais elevados (30° a 45°), enquanto em solos coesivos permanece mais baixo (15° a 25°). A partir da correlação com SPT normalizado, Das (2014) propõe:

$$\phi = 27.1 + 0.3 \cdot (N_{60}) - 0.00054 \cdot (N_{60})^2 \quad (3)$$

Onde:

ϕ = Ângulo de atrito interno em graus (°)

N_{60} = Valor do NSPT corrigido para energia de referência de 60%

A resistência ao cisalhamento, em qualquer solo, obedece à lei de Mohr-Coulomb:

$$\tau = Cn + \sigma' \tan \phi \quad (4)$$

c) Módulo De Deformabilidade (E)

Para solos arenosos:

$$Es = \alpha \cdot N_{60} \cdot pa \quad (5)$$

Onde:

Es = módulo de deformabilidade em kPa ou Mpa

N_{60} = número de golpes do SPT corrigido para energia de 60%

pa = pressão atmosférica de referência (≈ 100 kPa)

α = coeficiente que varia conforme a compactidade do solo (indicado na tabela a seguir)

Tabela 2 -Valores coeficiente de α .

Compactidade do Solo	NSPT	α
Fofa (o)	< 4	2 a 4
Pouco compacta (o)	5 a 8	3 a 6
Mediamente compacta (o)	9 a 18	5 a 10
Compacta (o)	19 a 40	8 a 20
Muito compacta (o)	> 40	10 a 30

Fonte: Bowles, 1997.

Para Solos Argilosos (Baixa Permeabilidade):

$$E_s = 350 * N_{60} \quad (6)$$

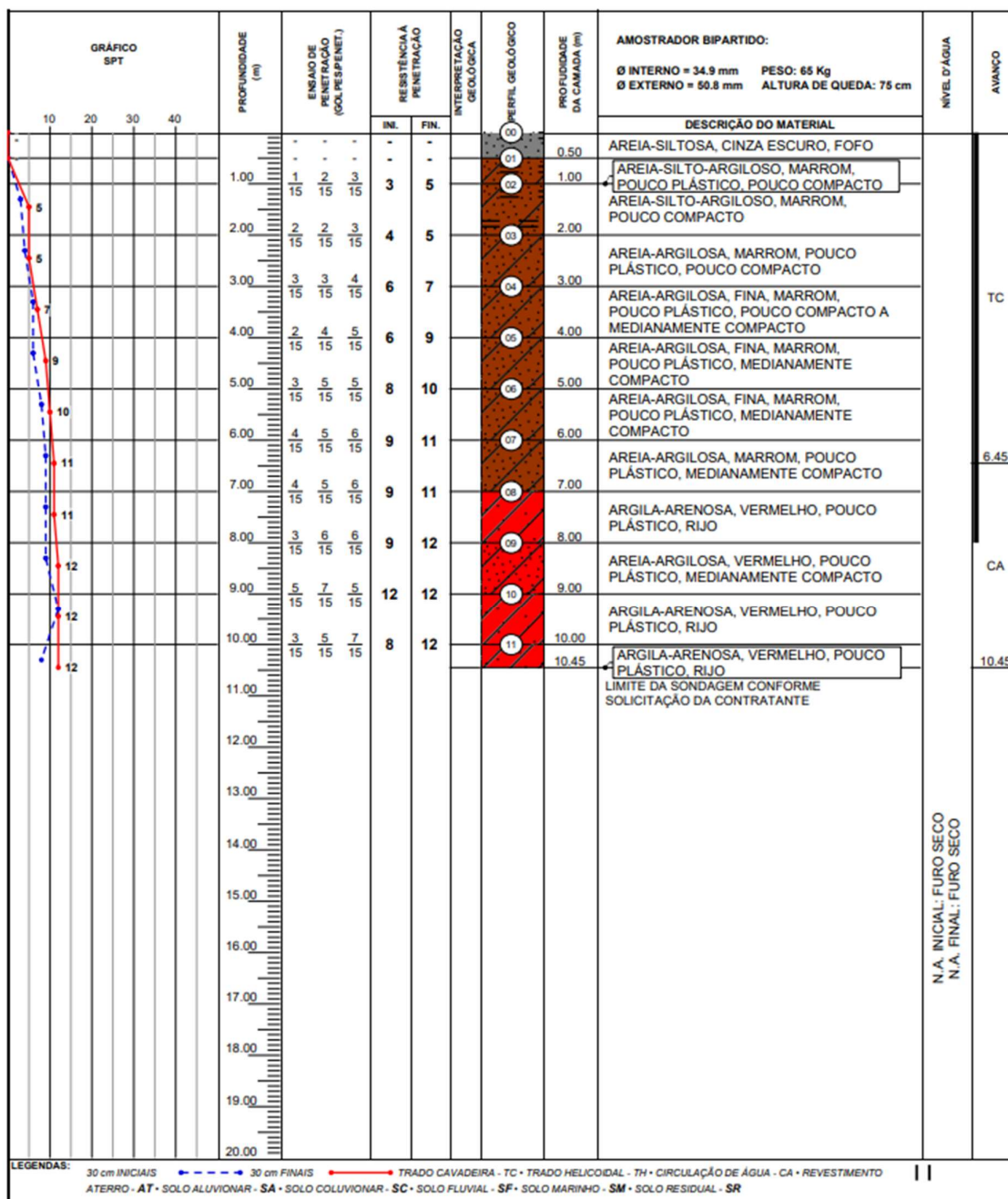
3.3 PERFIS DE SONDAGEM COMO BASE PARA ANÁLISE TÉCNICA

Os perfis de sondagem são instrumentos fundamentais na análise técnica de solos e desempenham um papel central no planejamento e execução de obras de engenharia, estudos ambientais e projetos geotécnicos. Eles oferecem informações detalhadas sobre as características do subsolo, permitindo que profissionais tomem decisões embasadas e reduzam riscos associados às intervenções no terreno.

A sondagem do solo tem como objetivo investigar as condições físicas, químicas e mecânicas do subsolo, criando um perfil estratigráfico que descreve as camadas e suas propriedades. O processo envolve métodos variados, como a sondagem a percussão, sondagem rotativa e métodos diretos, como a abertura de trincheiras. Cada método é selecionado com base no tipo de projeto e nas condições específicas do terreno (Braja, 2006).

Os perfis de sondagem registram a sequência estratigráfica do solo, destacando espessura, composição e comportamento mecânico das camadas. Esses dados são essenciais para identificar potenciais problemas, como a presença de solos expansivos, camadas orgânicas compressíveis ou níveis de água subterrânea. Por exemplo, o nível freático, identificado durante a sondagem, influencia significativamente a estabilidade de fundações e taludes, além de determinar a necessidade de sistemas de drenagem (Vargas, 1978). A Figura 2 apresenta um modelo ilustrativo da forma usual de organização e apresentação dos resultados do Ensaio de Sondagem SPT.

Figura 3 - Modelo ilustrativo da forma usual de organização e apresentação dos resultados do Ensaio de Sondagem SPT.



Fonte: Estude Engenharia.

Conforme a norma ABNT NBR 6484:2020, os resultados do Ensaio SPT devem ser apresentados em relatório técnico contendo informações essenciais, como o sistema utilizado (manual ou mecanizado), os métodos de perfuração e suas profundidades, a posição do tubo de revestimento e as mudanças nas camadas do

solo. Também devem ser descritas as amostras coletadas, com base em características como granulometria, cor e origem, além do número de golpes aplicados a cada trecho do amostrador padrão. O nível d'água também deve ser registrado, com data, horário e profundidade. Esses registros padronizados são fundamentais para a interpretação adequada das condições geotécnicas do subsolo.

Na prática de engenharia, os perfis de sondagem são a base para o dimensionamento de fundações e estruturas. Para obras como edifícios, pontes e rodovias, o perfil permite a escolha do tipo de fundação mais adequado, seja ela superficial, como sapatas, ou profunda, como estacas. Em adição, a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade do solo, obtidas por meio de ensaios específicos, são parâmetros críticos para o cálculo da capacidade de carga e do recalque admissível das fundações (Caputo, 1988).

Estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas utilizam perfis de sondagem para delimitar a extensão de contaminantes e planejar ações de remediação. Em mineração, esses perfis auxiliam na avaliação de jazidas, oferecendo informações sobre profundidade, composição e potencial econômico dos recursos minerais (Almeida et al., 2013).

A precisão e a confiabilidade dos dados obtidos dependem da execução adequada da sondagem e da interpretação criteriosa dos resultados. Equipamentos calibrados, profissionais capacitados e análises complementares, como ensaios de laboratório e geofísicos, garantem que os perfis de sondagem forneçam um panorama detalhado do subsolo.

Os avanços tecnológicos também têm ampliado as possibilidades de análise. Softwares de modelagem geotécnica permitem integrar os dados dos perfis de sondagem com informações tridimensionais do terreno, oferecendo visualizações mais precisas para projetos complexos. Assim, os perfis de sondagem não apenas servem como base para análises técnicas, mas também evoluem continuamente para atender às demandas crescentes de precisão e sustentabilidade nos projetos de engenharia.

3.4 MECANISMOS DE DESGASTE

Os mecanismos de desgaste envolvem a interação dinâmica e multifacetada entre superfícies submetidas a diferentes condições de contato. Esses fenômenos são

influenciados por fatores físicos, químicos e mecânicos que atuam na interface, resultando na remoção ou modificação do material. Ludema (1981) classifica o desgaste como perda de material ou dano superficial, enquanto Bayer (1994) propõe que ele seja descrito de acordo com os vestígios deixados, os mecanismos envolvidos ou as condições do ambiente em que ocorre.

No que se refere à aparência dos danos, o desgaste pode manifestar-se como sulcamentos, cavacos, fissuras ou polimentos. Mecanicamente, pode ser dividido entre adesão, abrasão, fadiga e reação triboquímica, enquanto as condições externas incluem fatores como a presença de lubrificação, deslizamento metal-metal ou altas temperaturas (Bayer, 1994).

A norma DIN 50320 descreve os quatro principais mecanismos básicos de desgaste. O primeiro, abrasão, consiste na remoção de material devido ao contato com partículas ou superfícies mais duras, podendo ocorrer por sulcamento, corte ou fratura. Este mecanismo é particularmente comum em aplicações industriais que envolvem contato frequente com materiais abrasivos. O segundo, adesão, ocorre pela formação de ligações interfaciais entre superfícies sob carga, que são rompidas durante o movimento relativo, causando transferência de material ou formação de partículas de desgaste. A fadiga superficial resulta de tensões cíclicas aplicadas às superfícies, levando à formação de microtrincas que, ao se propagarem, destacam fragmentos do material. Por fim, a reação triboquímica inclui a formação de produtos químicos devido à interação entre as superfícies, sendo a oxidação um exemplo recorrente em condições de deslizamento (Din, 2002).

Em condições de contato por deslizamento, os mecanismos frequentemente atuam em conjunto. Segundo Zum Gahr (1987), embora seja possível observar uma combinação de adesão, oxidação, fadiga e abrasão, a abrasão tende a predominar, especialmente em situações de riscamento de materiais sólidos.

Esses mecanismos, embora descritos de forma geral, podem ser claramente identificados nas ferramentas utilizadas em sondagens geotécnicas e ambientais. Ferramentas como o amostrador padrão, o bico cortante, as hastes de perfuração e os tubos de revestimento estão sujeitas a desgaste abrasivo intenso, especialmente quando operam em solos com alta concentração de partículas minerais duras, como o quartzo. Estudos como o de Batista et al. (2015), embora realizados em ferramentas agrícolas, evidenciam efeitos semelhantes aos observados em campo, com destaque para sulcamentos profundos e alterações na geometria de extremidades metálicas

devido ao atrito com o solo. Da mesma forma, Schuitek (2007) analisou o desgaste por riscamento circular em materiais metálicos, identificando a atuação combinada de abrasão, adesão, oxidação e fadiga. Todos esses mecanismos também ocorrem em ferramentas de sondagem, especialmente sob condições de deslizamento, cargas cíclicas e presença de água. Esses danos reduzem a eficiência da coleta de amostras, aumentam o torque necessário para perfuração e comprometem a vida útil dos componentes. A compreensão prática desses desgastes, portanto, é fundamental para a escolha de materiais mais resistentes e para o planejamento de substituições periódicas em campo.

3.4.1 Mecanismos De Desgaste Por Oxidação

O desgaste por oxidação é um processo complexo que ocorre quando superfícies metálicas em contato experimentam reações químicas, promovidas principalmente pela presença de oxigênio. Esse tipo de desgaste resulta da interação tribológica entre superfícies em movimento relativo, associada ao aumento local de temperatura provocado pelo atrito.

Quando duas superfícies metálicas deslizam entre si, o atrito gera picos de temperatura nas áreas de contato. Dependendo da velocidade relativa e das propriedades térmicas dos materiais, essas temperaturas podem atingir centenas de graus Celsius, criando condições favoráveis à formação de óxidos metálicos (Zum Gahr, 1987). Esses óxidos se formam inicialmente como ilhas ou platôs que crescem até uma espessura crítica, criando uma camada protetora sobre a superfície. Essa camada reduz o contato direto entre os metais, minimizando o desgaste inicial.

O processo é dinâmico, envolvendo a formação e a ruptura contínua das camadas de óxido. Sob altas pressões de contato, essas películas podem trincar e se desprender, gerando partículas que intensificam o desgaste abrasivo. Em atmosferas ricas em oxigênio, a composição dos detritos depende da temperatura na interface: em condições mais baixas predomina $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, enquanto em temperaturas elevadas são mais comuns Fe_3O_4 e FeO , conforme descrito por Ian M. Hutchings (1992).

Um aspecto interessante desse mecanismo é o ciclo de remoção e renovação da camada de óxido, denominado "oxidação-raspagem-reoxidação". Nesse processo, o óxido formado é removido pelo contato com a superfície oposta, expondo novamente o metal base à oxidação. Esse ciclo contínuo pode gerar partículas de

desgaste muito finas, que se aglomeram antes de serem eliminadas como fragmentos maiores, potencializando o desgaste abrasivo secundário (Zum Gahr, 1987).

Além disso, a natureza do óxido formado é um fator crítico no comportamento do desgaste por oxidação. Óxidos como o $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, mais resistentes mecanicamente, podem oferecer maior proteção superficial, enquanto óxidos mais frágeis são rapidamente removidos, expondo o material base e acelerando o desgaste. A presença de variações na composição química do material e as condições ambientais, como umidade e presença de contaminantes, também influenciam significativamente esse tipo de desgaste.

Compreender os mecanismos do desgaste por oxidação é essencial para o desenvolvimento de materiais e revestimentos mais resistentes, especialmente em aplicações industriais onde altas temperaturas e pressões são comuns.

Nas operações de sondagem geotécnica, o desgaste por oxidação é particularmente relevante em ferramentas como hastes de perfuração, tubos de revestimento e amostradores. Durante a perfuração, o atrito constante com o solo, aliado à presença de água subterrânea e ao movimento rotacional das ferramentas, favorece a formação de óxidos metálicos (Plinninger; Spaun; Thuro, 2002). Em solos argilosos ou ricos em matéria orgânica, há maior presença de umidade e gases como o CO_2 , o que acelera processos corrosivos e a formação de óxidos instáveis (Gutiérrez et al., 2023). Na Figura 4, observa-se um amostrador padrão de sondagem cuja superfície metálica exibe oxidação difusa, evidenciada pela coloração ferruginosa e pela formação de óxidos ao longo do corpo.

Figura 4 - Amostrador padrão de sondagem com presença de oxidação.



Fonte: Autor, 2025.

Com o tempo, a camada de óxido formada nas hastes pode se romper repetidamente devido ao atrito e à carga vertical aplicada. Esse desgaste cíclico libera fragmentos metálicos, que atuam como abrasivos entre as superfícies de acoplamento das juntas entre hastes, onde é necessário suportar o peso acumulado da coluna conforme a profundidade do furo aumenta, esse processo acelera a degradação do material e compromete sua integridade (Santos, Costa, Souza 2012).

3.4.2 Mecanismos De Desgaste Por Fadiga

O desgaste por fadiga é um fenômeno caracterizado pela formação de trincas e pelo destacamento subsequente de material devido à aplicação repetitiva de tensões cíclicas sobre uma superfície sólida. Esse tipo de desgaste ocorre frequentemente em componentes que operam em condições de rolamento, deslizamento ou impacto, como engrenagens e rolamentos, onde há repetida interação mecânica entre as superfícies.

A sequência de falha por fadiga superficial geralmente inicia com a deformação elástica e evolui para a deformação plástica na superfície e subsuperfície do material. Com o tempo, essas deformações acumuladas resultam no encruamento, que promove a nucleação e a propagação de trincas. Essas trincas podem se desenvolver paralelamente ou perpendicularmente à superfície, dependendo das condições de carga e do tipo de material envolvido (Zum Gahr, 1987).

O destacamento do material ocorre quando as trincas atingem a superfície, liberando partículas ou fragmentos maiores, um processo amplificado por carregamentos repetitivos. A força normal e a força de atrito geradas no contato contribuem significativamente para o avanço dessas trincas, especialmente sob condições de altas pressões e movimentos cíclicos. Segundo Suh (1973), a interação entre adesão, abrasão e tensões tribológicas acelera o processo de delaminação, exacerbando o desgaste por fadiga.

Esse mecanismo é amplamente influenciado pelas propriedades do material e pelas condições de operação. Materiais com alta resistência à fadiga, como ligas metálicas tratadas termicamente, apresentam maior durabilidade em aplicações que envolvem tensões cíclicas. Além disso, fatores como rugosidade superficial, presença de lubrificação e temperatura também desempenham papéis cruciais na taxa de desgaste.

No contexto da sondagem a percussão, esse mecanismo é especialmente observado nas hastes e em suas conexões roscadas, que estão sujeitas a impactos verticais repetitivos durante os golpes do amostrador padrão. Com o acúmulo de ciclos de carga ao longo de diferentes furos e profundidades, surgem microtrincas que, ao se propagarem, podem comprometer a integridade estrutural do componente.

Fatores como o desajuste nas conexões, a falta de alinhamento na coluna de hastes e a presença de contaminações entre as roscas agravam ainda mais esse tipo de desgaste. Além disso, a ausência de inspeções periódicas pode levar à falha súbita de uma haste por fratura por fadiga, prejudicando o andamento da sondagem e elevando os custos operacionais.

3.4.3 Mecanismo De Desgaste Por Adesão

O mecanismo de desgaste por adesão ocorre quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra, resultando na interação direta entre suas asperezas em

contato. Essa interação pode levar à formação de ligações de caráter químico ou físico, como forças covalentes, iônicas, metálicas ou de Van der Waals. Essas ligações são criadas nas áreas de contato devido às altas pressões locais que, em geral, induzem deformação plástica nos materiais (Suh, 1973).

Durante o movimento relativo, essas junções adesivas são rompidas, frequentemente causando transferência de material de uma superfície para a outra ou a formação de partículas de desgaste. Esse fenômeno é influenciado por fatores como a composição química e a dureza dos materiais, a limpeza das superfícies (presença de óxidos ou contaminantes) e o meio ambiente, que pode incluir atmosferas com oxigênio ou condições de vácuo. A formação de fragmentos de desgaste é, muitas vezes, cíclica, com partículas aderindo inicialmente a uma superfície, destacando-se posteriormente e, em alguns casos, retornando ao material original ou sendo convertidas em resíduos (Zum Gahr, 1987).

Entre as principais teorias que explicam o desgaste por adesão, destaca-se o modelo de delaminação de Suh (1973). Nesse modelo, o processo começa com o alisamento da superfície do material mais macio, seguido pela deformação acumulativa abaixo da superfície e pela formação de trincas sub superficiais. Essas trincas propagam-se até alcançar a superfície, gerando partículas de desgaste na forma de lâminas.

Outro modelo relevante é o mecanismo de transferência adesiva proposto por Kayaba (1979), que descreve a formação de junções adesivas repetidas e a subsequente propagação de trincas, resultando na separação de fragmentos de material. Uma terceira abordagem, sugerida por Sasada (1979), enfatiza o acúmulo gradual de pequenas partículas que, ao longo do tempo, se fundem em fragmentos maiores, até serem removidas da interface de contato.

O desgaste por adesão é especialmente relevante em sistemas onde há movimento deslizante sob condições de carga elevada e baixa lubrificação, como em engrenagens, rolamentos e sistemas de transporte. Mitigar esse tipo de desgaste envolve o uso de materiais com baixa afinidade química, aplicação de lubrificantes adequados e melhorias na rugosidade superficial, reduzindo a área efetiva de contato.

No contexto da sondagem SPT, as hastes e suas conexões roscadas estão sujeitas a esforços repetitivos durante os golpes do amostrador. A repetida montagem e desmontagem dos equipamentos, somada ao impacto vertical dos golpes, favorece a formação de microjunções adesivas, o que pode resultar em travamentos e desgaste

localizado por arrancamento de material. Além disso, a falta de lubrificação adequada e a presença de partículas abrasivas podem agravar o desgaste por adesão. (Santos, 2005).

3.4.4 Mecanismo De Desgaste Por Abrasão

O desgaste por abrasão ocorre quando partículas duras ou asperezas de uma superfície interagem com outra, removendo material por meio de sulcamento, corte ou fratura. Esse mecanismo é particularmente relevante em contextos industriais, representando cerca de 50% dos casos de desgaste em componentes mecânicos (Stachowiak; Batchelor, 2013).

O desgaste por abrasão é geralmente dividido em duas categorias: abrasão de dois corpos e abrasão de três corpos. Na primeira, os grãos ou asperezas mais duros permanecem aderidos a uma das superfícies, promovendo o desgaste direto da outra durante o contato. Já na abrasão de três corpos, as partículas abrasivas ficam soltas entre as superfícies em movimento relativo, atuando como elementos intermediários no processo de remoção de material, conforme descrito por Ian M. Hutchings (1992). Em ambas as situações, a relação de dureza entre as partículas abrasivas e o material da superfície afetada exerce influência decisiva na severidade do desgaste, uma vez que partículas mais duras tendem a intensificar a remoção de material.

Os mecanismos subjacentes ao desgaste abrasivo podem ser agrupados em dois processos principais: deformação plástica e fratura frágil. No caso da deformação plástica, o material é deslocado sob a ação de partículas abrasivas, formando sulcos ou cristas laterais. Já na fratura frágil, o trincamento ocorre em áreas onde a tensão supera a resistência do material, levando ao destacamento de fragmentos maiores (Hutchings, 1992).

Na sondagem SPT, o desgaste abrasivo é evidente principalmente no bico do amostrador padrão e nas hastes de perfuração. Durante a cravação por golpes de martelo, o atrito entre as ferramentas e os sedimentos arenosos ou solos com partículas minerais mais duras promove sulcamentos nas superfícies metálicas expostas. Essas superfícies, muitas vezes sem revestimento protetor, sofrem desgaste acelerado quando a abrasividade do solo é elevada, especialmente em profundidades maiores.

Além disso, o acúmulo de partículas finas nos encaixes rosqueados, combinado ao atrito seco gerado durante o torque manual ou mecânico das hastes, favorece a abrasão de três corpos. Como destacado por Boart Longyear (2020), a ausência de lubrificação e a má compatibilidade entre hastes de fabricantes diferentes também são fatores que contribuem para o desgaste abrasivo em campo.

Assim, a escolha adequada de materiais com dureza compatível, o uso de lubrificantes apropriados nas conexões e a inspeção periódica das superfícies metálicas são práticas recomendadas para minimizar o desgaste abrasivo e prolongar a vida útil dos equipamentos.

3.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DESGASTE EM EQUIPAMENTOS

Os métodos de avaliação de desgaste são fundamentais para compreender o comportamento das superfícies em interação e para otimizar a vida útil de materiais e ferramentas. Essas análises são amplamente utilizadas em aplicações industriais, especialmente em processos de usinagem, perfuração e sondagem, onde o desgaste das ferramentas é um dos principais fatores que influenciam a eficiência e a qualidade do trabalho realizado.

A avaliação do desgaste pode ser feita de forma direta ou indireta. Métodos diretos envolvem a observação e medição do desgaste visível em uma superfície, como o desgaste de flanco em ferramentas de corte, geralmente avaliado pela medida da largura da área desgastada. Esse tipo de análise é realizado utilizando instrumentos como paquímetros, microscópios ópticos ou eletrônicos de varredura (MEV), que permitem identificar mudanças na topografia e microestrutura do material desgastado. Essas técnicas são particularmente úteis para caracterizar os mecanismos de desgaste, como abrasão, adesão e corrosão, que podem ocorrer dependendo das condições de trabalho (Bicalho, 2015).

Já os métodos indiretos utilizam o monitoramento de variáveis operacionais para inferir o estado de desgaste. Entre essas variáveis estão as forças de corte, temperatura, emissão acústica e vibração. A análise de forças de corte, por exemplo, é um indicador relevante, pois o aumento progressivo dessas forças geralmente reflete a degradação da ferramenta. Sensores integrados em máquinas-ferramenta podem coletar esses dados em tempo real, permitindo o monitoramento contínuo do processo (Pizza; Farias, 2022).

A tribologia, ciência que estuda o desgaste, o atrito e a lubrificação, fornece uma base teórica importante para a compreensão dos processos de desgaste. Nessa área, testes tribológicos padronizados, como o ensaio de pino sobre disco, são amplamente utilizados para simular condições de desgaste em laboratório. Esses testes permitem avaliar as interações entre diferentes materiais sob controle rígido de variáveis, como carga, velocidade e ambiente (Oerlikon, 2021).

Avanços na tecnologia têm permitido o uso de sistemas inteligentes para a avaliação do desgaste. Por meio de aprendizado de máquina, sensores avançados podem interpretar grandes quantidades de dados operacionais e prever com precisão o momento em que a ferramenta atingirá seu limite de desgaste. Essa abordagem melhora a previsibilidade e reduz custos operacionais, otimizando o uso dos equipamentos (Pizza; Farias, 2022).

Dessa forma, os métodos de avaliação de desgaste evoluíram para atender às demandas de precisão e eficiência da indústria moderna. A combinação de técnicas tradicionais com tecnologias avançadas permite não apenas identificar os tipos e causas do desgaste, mas também prever e prevenir sua progressão, garantindo maior eficiência e vida útil aos materiais e ferramentas.

3.6 CORROSÃO

A corrosão é o processo de deterioração de materiais metálicos por reações eletroquímicas com o ambiente, constituindo um dos maiores desafios à durabilidade de estruturas e componentes metálicos expostos a solos e águas agressivas (Silva, 2020). Os mecanismos de corrosão variam conforme as condições químicas e físicas do meio:

Corrosão uniforme

Caracteriza-se pela perda de material de forma homogênea ao longo de toda a superfície metálica. Em sondagens, esse mecanismo reduz gradualmente a espessura do equipamento utilizado, comprometendo a estabilidade do furo e aumentando o risco de rompimento durante a perfuração (Fontana, 1986).

Corrosão localizada

Pitting: formação de pequenos poços que avançam em profundidade, criando pontos de concentração de tensão em adaptadores e conexões roscadas. Em sondagem,

esses poços podem iniciar trincas que levam à quebra súbita de componentes (Revie; Uhlig, 2008).

Corrosão em frestas: ocorre em áreas com baixa circulação de fluido, como em junções rosqueadas de tubos. Nas operações de sondagem, sedimentos e lama acumulados em frestas intensificam o ataque localizado, exigindo desmontagem periódica para inspeção (Nace, 2016).

Corrosão galvânica

Surge quando metais de diferentes potenciais eletroquímicos (por exemplo, diferentes ligas de aço em brocas e hastes) permanecem em contato elétrico e imersos em eletrólitos presentes no solo ou no fluido utilizado para perfuração. O metal menos nobre sofre corrosão acelerada, afetando principalmente os acessórios de transição entre materiais (Bodó; Jones, 2017).

Erosão

Combina desgaste mecânico e ataque químico: partículas abrasivas do solo transportadas pelo fluido de sondagem removem continuamente a camada passiva do metal, expondo novas superfícies ao meio corrosivo. Esse fenômeno acelera a perda de material em brocas e bicos de amostrador (Santos; Lima, 2019).

Corrosão sob tensão

Ocorre quando tensões de tração (residuais ou aplicadas durante a perfuração) somam-se ao ambiente agressivo do solo, especialmente na presença de íons cloreto. Em hastes de perfuração, pequenos trincamentos intergranulares podem propagar-se rapidamente, provocando falhas sem grande aviso prévio (ASM INTERNATIONAL, 2012).

Compreender cada tipo de corrosão e seu comportamento em sondagens é essencial para definir critérios de seleção de materiais, planejamento de inspeções e estratégias de proteção (revestimentos, inibidores, controle de pH e oxigenação do fluido), assegurando maior confiabilidade e vida útil dos equipamentos (Silva, 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desgaste de componentes de sondagem, incluindo amostrador, bico, hastes e tubos de revestimento em função da profundidade e das condições geotécnicas encontradas nas regiões analisadas. Para tanto, foram adotadas as seguintes etapas metodológicas:

Foram escolhidas duas regiões com características geológicas distintas, de modo a abranger diferentes tipos de solo e condições de operação. Os pontos de sondagem foram selecionados de forma a representar adequadamente a variabilidade do subsolo em cada região.

As sondagens foram realizadas seguindo os procedimentos padronizados do SPT (Standard Penetration Test). Durante a execução, foram registrados os seguintes parâmetros:

- NSPT: número bruto de golpes do ensaio;
- N_{60} : número de golpes corrigido considerando a energia efetiva transmitida;
- Coesão do solo (S_u);
- Ângulo de atrito interno (ϕ);
- Módulo de deformabilidade (E_s).

As correções e cálculos dos parâmetros foram realizados conforme as metodologias propostas por Bowles (1997) e complementadas por correlações empíricas sugeridas por Das (2014) e Massad (2016).

Após a execução dos ensaios, os componentes de sondagem foram coletados e inspecionados. A análise contemplou:

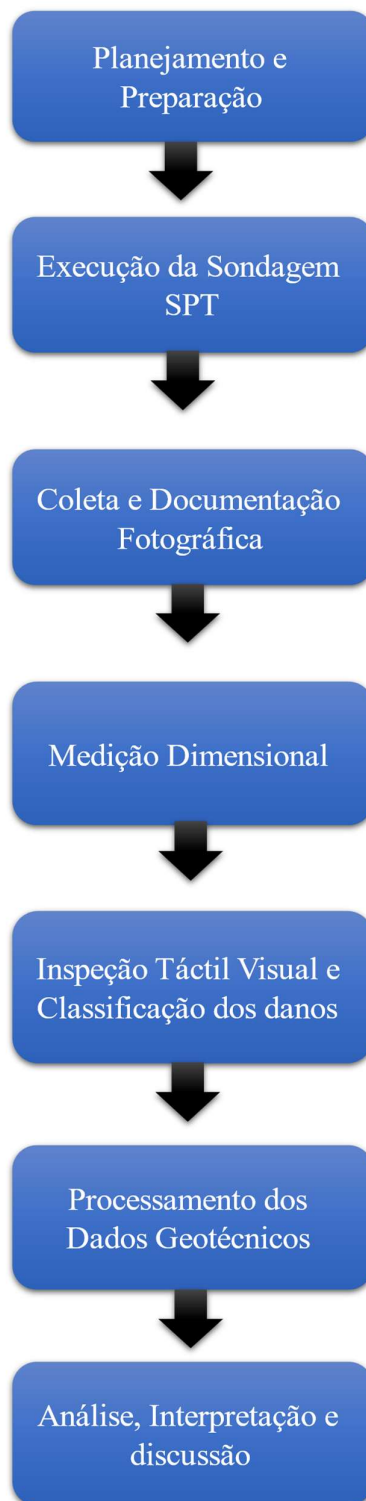
- Medidas de espessura inicial e final dos componentes;
- Avaliação tátil e visual dos sinais de desgaste;
- Classificação dos danos em tipos de desgaste: abrasivo, corrosivo ou plástico;
- Determinação da intensidade do dano: leve, moderado ou severo.

Os dados obtidos nos ensaios SPT foram correlacionados com os tipos de solo encontrados em cada ponto de sondagem. Essa análise permitiu avaliar a influência das propriedades geotécnicas do solo sobre os mecanismos de desgaste dos

componentes, possibilitando identificar padrões de dano e relacioná-los às condições operacionais e características do subsolo.

O objetivo central é correlacionar medidas dimensionais (espessura inicial e final, perda percentual) e tipologias de dano (abrasivo, corrosivo, plástico), identificadas por inspeção tátil-visual e classificadas segundo intensidade (leve, moderado, severo), com parâmetros obtidos em ensaios SPT (NSPT corrigido para N_{60} , ângulo de atrito ϕ , coesão não drenada S_u e módulo de deformabilidade E_s), calculados a partir de correlações empíricas consolidadas na literatura (Das, 2014; Massad, 2016).

A Figura 5 ilustra o fluxo geral do método experimental concebido para permitir uma comparação justa e homogênea entre os componentes avaliados. O método inicia-se com o planejamento e preparação (seleção das regiões e pontos de sondagem), seguido pela execução dos ensaios de percussão SPT, coleta e documentação fotográfica dos componentes, medições dimensionais, inspeção tátil-visual e classificação dos danos; e finalmente, interpretação estrutural dos resultados, confrontando-os com os tipos de solo investigados.

Figura 5 - Fluxograma dos procedimentos da metodologia.

Fonte: Autor, 2025.

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS REGIÕES

Região A

A Região A corresponde à área de estudo localizada na zona rural do município de Santa Rita de Caldas, no sul de Minas Gerais. O local insere-se em um relevo montanhoso, com altitudes que podem atingir até 1.764 metros, como observado na Serra da Pedra Branca. Essa topografia acidentada contribui para a complexidade do solo e para a diversidade de microclimas locais, fatores que influenciam diretamente os processos geotécnicos.

O clima da região é classificado como tropical de altitude (Cwb, segundo a classificação de Köppen-Geiger), caracterizado por verões amenos e úmidos e invernos frios e secos. A temperatura média anual é de aproximadamente 18,2 °C, com a maior concentração de chuvas ocorrendo nos meses de verão (Ferreira et al., 2020). A combinação entre as variações térmicas e a elevada pluviosidade acelera os processos de intemperismo químico, alterando gradativamente a composição e a estrutura dos solos ao longo do tempo.

Do ponto de vista pedológico, predominam solos argilosos, siltosos e arenosos, dispostos de forma heterogênea nos perfis investigados. Essa variabilidade é típica de regiões com relevo movimentado, como é o caso de Santa Rita de Caldas, e resulta em um desgaste diferenciado nos componentes de sondagem, especialmente em contextos com transições abruptas entre camadas de diferentes materiais (Stachowiak; Batchelor, 2013).

A escolha da Região A como área de estudo justifica-se por suas características geológicas relevantes para a análise do desempenho e do desgaste dos equipamentos de sondagem.

A escolha de cinco furos para a Região A e três para a Região B considerou a extensão das áreas e a variabilidade esperada dos solos. A Região A, por ser mais ampla e heterogênea, exigiu uma amostragem mais detalhada, enquanto a menor complexidade da Região B permitiu representatividade adequada com três furos.

A Figura 6 apresenta a localização da área dentro do município e a planta de situação com os pontos de sondagem marcados. Já os perfis de solo e os dados obtidos em campo estão disponíveis no Apêndice A.

Figura 6 – Croqui dos pontos de sondagem da Região A.



Fonte: Autor, 2025.

Região B

A Região B está situada no município de José Bonifácio, no noroeste do estado de São Paulo, a aproximadamente 467 km da capital. A área apresenta relevo predominantemente plano, com solos homogêneos compostos principalmente por areia fina, com baixo teor de argila. Essa composição resulta em solos de textura leve, com boa drenagem e baixa capacidade de retenção de água, características que influenciam diretamente os processos geotécnicos.

Segundo o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, a região de José Bonifácio é dominada por solos da classe Neossolos Quartzarênicos, caracterizados por sua alta permeabilidade e baixa fertilidade natural. Esses solos são comuns em áreas de planalto e regiões semiáridas do Brasil, apresentando boa drenagem, mas

com limitações para a agricultura sem o uso de técnicas de manejo adequadas (Instituto Florestal, 2017).

A escolha da Região B para este estudo justifica-se pela uniformidade geotécnica da área, proporcionando um ambiente controlado para analisar o comportamento das ferramentas de sondagem sob condições específicas de solo. A área investigada por meio de sondagens, também é destinada à futura construção de um barracão, foi realizado três furos de sondagem do tipo SPT, totalizando 36,61 metros lineares de perfuração. As sondagens foram executadas até a condição de impenetrabilidade, permitindo a caracterização completa do perfil estratigráfico local.

A Figura 7 apresenta, os pontos de sondagem marcados. Já os perfis de solo e os dados obtidos em campo estão disponíveis no Apêndice A.

Figura 7 – Croqui dos pontos de sondagem da Região B.



Fonte: Autor, 2025.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste estudo, foram empregados os seguintes equipamentos e insumos para as sondagens SPT e a análise de desgaste dos componentes:

1. Equipamentos de perfuração e acessórios

- **Tripé, roldana e moitão**, para sustentação e guia do cabo de tração durante o ensaio. (Figura 8).

Figura 8 - Tripé montado.



Fonte: Autor, 2025.

- **Martelo de percussão SPT** (65 kg de peso batente, queda de 75 cm), conforme ABNT NBR 6484. (Figura 8)
- **Trépano de lavagem e bomba d'água** utilizados quando o solo apresentava alta resistência ou nível freático elevado, permitindo circulação de água para avanço da sondagem. (Figura 9).

Figura 9 - Trépano de lavagem.



Fonte: Autor, 2025.

- **Trado concha** utilizado para perfuração inicial do solo. (figura 10)

Figura 10 - Trado concha.



Fonte: Autor, 2025.

2. Componentes de amostragem e revestimento

- **Amostrador padrão** para coleta de amostras indeformadas. (Figura 11).
- **Bico do amostrador** acoplado à ponta do amostrador padrão. (Figura 12).
- **Haste guia de perfuração** leva energia do martelo para perfurar. (Figura 13).
- **Tubo de revestimento**, cravado para estabilização do furo. (Figura 14)

3. Instrumentos de medição e registro

- **Paquímetro digital** (resolução 0,01 mm), para medições de espessura do diâmetro dos componentes.
- **Celular com câmera digital** (16 MP), para registro fotográfico.

As ferramentas escolhidas neste estudo foram aquelas que entram em contato direto com o solo durante a execução da sondagem do tipo SPT. A escolha por focar nesses componentes se justifica pelo fato de serem os principais responsáveis pela penetração, coleta de amostras e avanço do furo, estando diretamente expostos ao atrito, impacto e abrasividade dos diferentes tipos de solo encontrados nas regiões investigadas.

A seguir, são apresentadas e descritas as ferramentas avaliadas, com destaque para suas funções, partes constituintes e critérios de análise de desgaste. As imagens foram organizadas de modo a permitir a comparação entre o estado das peças antes e após a execução dos serviços.

Amostrador padrão

O amostrador padrão é o equipamento empregado na execução do ensaio de Sondagem à Percussão (SPT) para a coleta de amostras deformadas de solo a cada metro perfurado, conforme diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas na NBR 6484. Trata-se de um dispositivo constituído por um tubo bipartido, bico cortante e adaptador para acoplamento às hastes de perfuração, sendo cravado no terreno por meio de golpes de um martelo padronizado.

Em relação às suas características geométricas, o amostrador apresenta comprimento total aproximado de 650 mm, diâmetro externo de 50,8 mm (2 polegadas) e diâmetro interno em torno de 34,9 mm (1 3/8 polegadas). O comprimento efetivo destinado à coleta da amostra é de aproximadamente 450 mm, correspondente

ao trecho cravado considerado para a retirada do material. Essas dimensões são padronizadas para garantir a uniformidade dos resultados e a comparabilidade dos valores de resistência à penetração obtidos no ensaio. A Figura 6 ilustra o amostrador completo utilizado na região A, bem como o modelo aberto empregado na região B.

Figura 11 - Amostradores padrão.



Fonte: Autor, 2025.

Bico do amostrador

O bico cortante, localizado na extremidade inferior do amostrador, tem a função de penetrar no solo e facilitar a entrada da amostra no tubo. Por estar sujeito ao maior impacto e fricção direta com o material perfurado, é uma das peças que mais sofrem desgaste. O bico do amostrador foi avaliado, após uso em solos de natureza contrastante. A Figura 7 apresenta uma ilustração frontal de um bico de amostrador antes da utilização nas sondagens das regiões A e B respectivamente.

Figura 12 – Bicos de amostrador.

Fonte: Autor, 2025.

Haste guia de perfuração

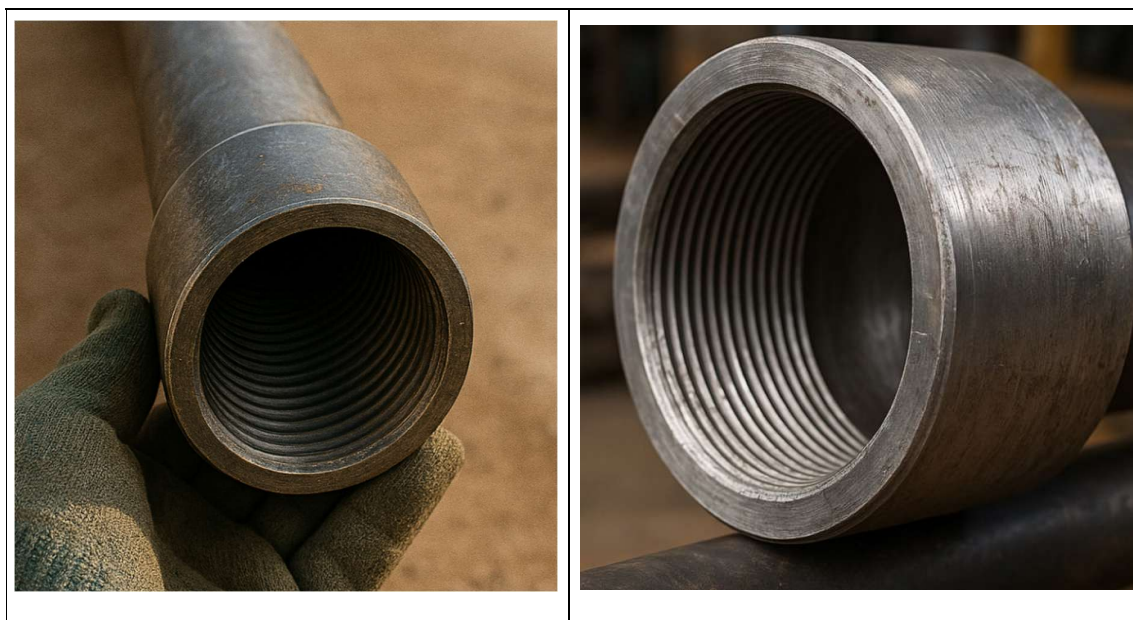
A haste guia de perfuração transmite a energia dos golpes até o amostrador. A extremidade inferior da última haste é especialmente exposta ao atrito com o solo e ao contato com o fundo do furo. A análise concentrou-se nesta parte final, avaliando o estado das roscas, amassamentos e desgastes localizados. A Figura 8 ilustra o registro das hastes antes da utilização das sondagens das regiões A e B respectivamente.

Figura 13 – Hastes-guia.

Fonte: Autor, 2025.

Tubo de revestimento

O tubo de revestimento é utilizado para manter as paredes do furo estáveis, especialmente em solos mais instáveis ou com presença de água. Seu contato constante com as paredes do terreno faz com que sofra abrasão ao longo do avanço da perfuração. Foram comparados dois tubos utilizados em solos com diferentes níveis de compactação. A Figura 14 apresenta os tubos de revestimento antes das campanhas de sondagem das regiões A e B.

Figura 14 – Tubos de revestimento.

Fonte: Autor, 2025.

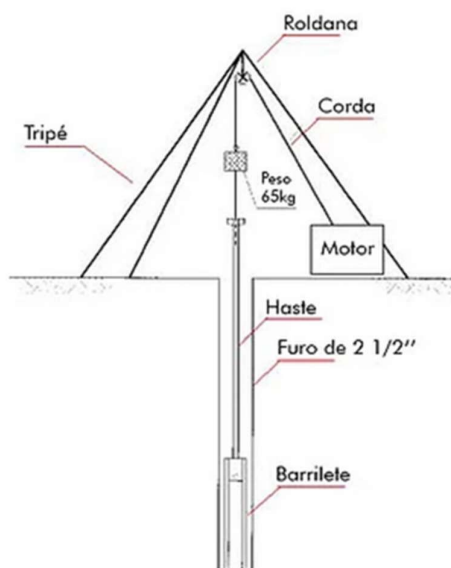
4.3 DADOS EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS DE COLETA

Os dados experimentais apresentados neste estudo foram obtidos a partir do acompanhamento de trabalhos de sondagem do tipo SPT realizados em duas diferentes regiões. A seleção dessas localidades considerou a diversidade geológica da região, permitindo a análise do desempenho das ferramentas de sondagem em diferentes tipos de solo. Essa abordagem foi essencial para avaliar como as variações nas características do subsolo. As atividades de campo foram conduzidas por duas equipes formadas por três integrantes com conjunto de equipamentos distintos de uma empresa parceira, que autorizou o acompanhamento técnico das operações. Durante os ensaios, foram registradas as condições dos equipamentos antes e após a execução dos serviços, possibilitando uma avaliação comparativa do nível de desgaste sofrido em cada contexto geológico. Essa análise foi complementada pela descrição tátil-visual das amostras de solo coletadas, bem como pela observação de fatores como a resistência à penetração e a presença de nível freático.

A sondagem SPT inicia-se com a instalação do tripé, roldana e moitão, seguida da perfuração inicial com trado concha até 1 metro de profundidade. Nesse ponto, é realizado o ensaio SPT utilizando um amostrador padrão cravado por meio da queda de um peso batente de 65 kg a partir de 75 cm de altura, o esquema da estrutura de

sondagem está ilustrado na figura 15. (NBR 6484). Durante a execução, são registradas as pancadas necessárias para cravar 30 cm no solo, sendo esse valor denominado NSPT, além disso é realizado uma classificação tátil-visual do solo, que posteriormente serão utilizados na análise das propriedades geotécnicas do terreno.

Figura 15 - Estrutura para sondagem à percussão SPT.



Fonte: Schnaid (2000), adaptado.

Caso a perfuração com trado seja inviável devido à resistência do solo ou ao atingimento do nível d'água, adota-se o método de percussão com circulação de água, utilizando trépano de lavagem e bomba d'água para viabilizar o avanço da sondagem. A profundidade do lençol freático é anotada para auxiliar na caracterização do subsolo e na interpretação das interações entre as ferramentas de sondagem e as diferentes camadas do terreno.

Os perfis estratigráficos foram elaborados com os dados dos boletins coletados em campo, utilizando o software SondGeo, uma ferramenta amplamente empregada para a organização e interpretação de dados geotécnicos. Com o uso desse programa, foi possível estruturar de forma clara a distribuição das camadas de solo ao longo das profundidades investigadas, facilitando a identificação de padrões e tendências relacionadas ao comportamento dos materiais.

Os dados obtidos serviram como base para a análise das interações entre os materiais de sondagem e os diferentes perfis geológicos, permitindo identificar os

fatores críticos que influenciam a durabilidade dos equipamentos e sugerir possíveis melhorias para otimizar seu desempenho.

4.4 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE DESGASTE

A metodologia utilizada para a análise de desgaste das ferramentas de sondagem foi baseada em uma abordagem prática e comparativa, considerando os diferentes tipos de degradação observados após a execução das sondagens e suas possíveis correlações com as características geotécnicas dos solos investigados. A avaliação foi dividida em três etapas principais: inspeção visual e registro dos danos, medições físicas para quantificação da perda de material e análise comparativa entre os desgastes observados e os parâmetros geotécnicos de cada perfil de solo.

Destaca-se que não há uma norma técnica específica que estabeleça um procedimento padronizado para a análise de desgaste de ferramentas de sondagem em campo. Normas como a NBR 6484, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, regulamentam a execução do ensaio de SPT, mas não detalham metodologias para avaliação sistemática de desgaste dos equipamentos. Dessa forma, o procedimento adotado neste estudo foi estruturado com base em práticas de inspeção utilizadas na engenharia mecânica e de manutenção, bem como em critérios comparativos aplicados à análise de desempenho de ferramentas submetidas a esforços abrasivos, sendo adaptado à realidade das operações de sondagem e aos objetivos específicos da pesquisa.

1. Inspeção Tátil-Visual e Registro Fotográfico

Após cada campanha de sondagem, as ferramentas utilizadas foram submetidas a uma inspeção visual detalhada. Nessa etapa, foram observados e registrados os seguintes aspectos:

- Presença de desgaste abrasivo (perda de material por atrito);
- Deformações plásticas (amassamentos, dobras e empenamentos);
- Fraturas ou trincas nas estruturas metálicas;
- Indícios de corrosão (oxidação, pites e corrosão por frestas).

Para cada ocorrência, foram feitas fotografias com o objetivo de documentar visualmente o estado das ferramentas.

2. Medições de Perda Dimensional

Além da análise visual, foi realizada medição com o paquímetro, figura 16, para quantificar a perda dimensional e, quando possível, a perda de massa das ferramentas. Os principais parâmetros avaliados foram:

- Redução de diâmetro externo;
- Diminuição da espessura das paredes das sapatas de corte;
- Alterações no comprimento útil das hastes;
- Variações de peso total.

Figura 16 – Paquímetro digital utilizado para aferir, com precisão de 0,01 mm.



Fonte: Autor, 2025.

3. Avaliação da Corrosão

Para a análise da corrosão, foram consideradas as condições de umidade do solo (identificadas nos relatórios de sondagem), a presença do nível freático e o tipo de solo perfurado. A avaliação seguiu os seguintes critérios:

- Tipo de corrosão observada: corrosão uniforme, corrosão localizada (pitting) ou corrosão por frestas;
- Intensidade visual da corrosão (leve, moderada ou severa);
- Localização dos danos nas ferramentas (superfícies externas, áreas de contato ou junções).

Essa análise buscou estabelecer uma relação direta entre os ambientes mais propensos à corrosão (solos saturados, solos orgânicos, zonas com água parada) e o grau de deterioração encontrado nas ferramentas.

4. Correlação com Parâmetros Geotécnicos

Com base nos perfis de solo obtidos através das sondagens SPT, foram consideradas as informações previamente determinadas de **ângulo de atrito interno (ϕ)**, **coesão (S_u)** e **módulo de deformabilidade (E_s)**. Esses parâmetros serviram como base para a análise da influência das características geotécnicas nos diferentes mecanismos de desgaste.

Para cada trecho de sondagem, foi feita uma associação entre o tipo e a intensidade do desgaste observado e os seguintes aspectos:

- Resistência e compacidade do solo (relacionada ao NSPT);
- Tipo de solo (arenoso, argiloso, silte, presença de cascalho);
- Profundidade da ocorrência de nível freático;
- Valores de ϕ , S_u e E_s correspondentes a cada camada.

A partir dessa correlação, foi possível identificar tendências entre os parâmetros geotécnicos e os mecanismos predominantes de desgaste e corrosão, permitindo avaliar quais condições de solo apresentam maior potencial de agressividade para as ferramentas de sondagem.

5. Consolidação dos Dados

Os resultados foram organizados de forma a evidenciar a relação entre os tipos de solo, os parâmetros geotécnicos e os desgastes identificados nas ferramentas utilizadas. Esta análise integrada permitiu uma compreensão mais ampla da interação entre solo e equipamento, oferecendo subsídios para recomendações futuras sobre escolha de materiais, manutenção e estratégias de operação em diferentes condições geotécnicas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE VISUAL E INSPEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Logo após cada campanha de sondagem, que teve a duração aproximadamente de 5 dias, correspondendo ao tempo efetivo de utilização contínua das ferramentas durante cada etapa analisada. Registraram-se fotos das ferramentas e examinaram-se cuidadosamente os sinais de desgaste e corrosão, anotando os detalhes e organizando em tabelas. Em seguida, relacionaram-se os dados aos parâmetros do solo, incluindo NSPT, ângulo de atrito interno, coesão, nível freático, e módulo de deformabilidade do solo juntamente com as medições de redução de espessura e os registros de corrosão para compreender melhor a conexão entre as características geotécnicas e o desgaste observado.

A figura 17 e 18 apresenta, para cada componente de sondagem, o tipo de dano observado em cada uma das duas campanhas de sondagem, respectivamente, com imagem ilustrativa em miniatura que evidencia o respectivo mecanismo de degradação.

Figura 17 - Equipamentos utilizados na Região A e principais tipos de danos observados.



Fonte: Autor, 2025

Figura 18 - Equipamentos utilizados na Região A e principais tipos de danos observados.

Equipamentos utilizados na Região B



Fonte: Autor

A Tabela 3 sintetiza os tipos de dano identificados em cada componente de sondagem (bico do amostrador, amostrador padrão e haste e tubo de revestimento), apresentando para cada um o tipo de dano, seus indicadores visuais, o nível de intensidade e as observações correspondentes.

Tabela 3 - Tipos de danos observados nos equipamentos de sondagem observados em campo.

Equipamento	Indicador Visual	Intensidade	Dano Observado
Região A			
Amostrador	Pitting	Média	Pequenas crateras superficiais
	Corrosão em frestas	Alta	Cavidades profundas em junções roscadas
Bico do amostrador	Desgaste abrasivo / erosão	Média	Afinamento da borda
	Corrosão uniforme interna	Baixa	Perda homogênea de espessura na parede do tubo
Haste-guia	Corrosão uniforme externa	Média	Redução de diâmetro por corrosão generalizada
	Corrosão em frestas	Alta	Penetração localizada com formação de cavidades
	Corrosão sob tensão	Alta	Fissuras finas e trincas por interação química-mecânica
Tubo de revestimento	Desgaste abrasivo / erosão corrosão na borda	Média	Entalhes e rebarbas na extremidade
	Corrosão em frestas	Alta	Cavidades de baixa largura e grande profundidade
	Corrosão uniforme	Média	Afinamento generalizado da parede
Região B			
Amostrador	Pitting	Baixa	Pequenas depressões superficiais
	Corrosão em frestas	Média	Cavidades rasas em junções roscadas
Bico do amostrador	Desgaste abrasivo / erosão	Alto	Alisamento leve da borda
Haste-guia	Corrosão uniforme	Baixa	Desgaste superficial generalizado
	Corrosão em frestas	Baixa	Pequenas cavidades localizadas
Tubo de Revestimento	Corrosão em frestas	Baixa	Frestas rasas com profundidade limitada
	Corrosão uniforme	Baixa	Afinamento moderado da parede

Fonte: Autor, 2025.

Por meio da inspeção e análise identificaram-se padrões claros de dano associados às condições de solo, sendo possível observar que os equipamentos utilizados na Região A sofreram danos mais evidentes e severos. O amostrador, por exemplo, apresentou marcas de pitting e cavidades profundas nas regiões de junção, enquanto o bico mostrou sinais claros de desgaste na borda cortante. As hastes também foram bastante afetadas, com corrosão em frestas e sinais de fissuras. Já os tubos de revestimento apresentaram entalhes e perdas de material nas extremidades, indicando uma combinação de abrasão e corrosão localizada.

Na Região B, embora os mesmos tipos de danos tenham sido identificados, eles foram bem mais sutis. As superfícies apresentavam apenas pequenas marcas superficiais, cavidades rasas e desgaste leve, sem comprometer o funcionamento dos componentes. Essa diferença deixa evidente como as condições do solo influenciam diretamente na intensidade do desgaste. Solos mais compactos, úmidos e com partículas abrasivas tendem a acelerar os processos de corrosão e erosão, enquanto solos menos abrasivos e com menor umidade provocam desgastes menos intensos nos equipamentos.

Além disso, fatores como a regularidade da aplicação do martelo, técnicas de avanço da perfuração, velocidade de operação, manutenção e lubrificação do equipamento impactam diretamente o esforço aplicado sobre os componentes. Procedimentos cuidadosos tendem a reduzir o desgaste, enquanto práticas inadequadas podem acelerar a degradação, mesmo em solos de características semelhantes. (Owsiak, 1997).

A Tabela 4 apresenta a espessura inicial e final do diâmetro de cada equipamento de sondagem e a respectiva porcentagem de perda de material.

Tabela 4 - diâmetro inicial e final dos equipamentos de sondagem e percentual de perda de material aferidos após a campanha das regiões A e B.

Equipamento	Diâmetro inicial (mm)	Diâmetro final (mm)	Perda (%)
Equipamentos Região A			
Bico do amostrador	46,8	46,5	0,64
Amostrador	47,6	47,3	0,63
Haste guia	24,8	24,7	0,40
Tubo de revestimento	56,4	56,2	0,35
Equipamentos Região B			
Bico do amostrador	46,8	46,7	0,21
Amostrador	47,5	47,4	0,21
Haste guia	24,7	24,6	0,20
Tubo de revestimento	56,3	56,2	0,18

Fonte: Autor, 2025.

5.2 ANALISE DOS PARAMETROS E DOS PERFIS

Primeiramente, analisaram-se os perfis coletados em campo individualmente dos furos perfurados em cada região, caracterizando-se as camadas de solo quanto ao tipo de solo, profundidade atingida e nível d'água obtido. A classificação do solo foi realizada pelo sondador, com o auxílio do geólogo responsável, garantindo maior precisão na identificação das camadas. Por fim, correlacionaram-se esses perfis aos parâmetros de coesão (quando aplicável), ângulo de atrito interno e módulo de deformabilidade, obtidos pelas fórmulas 1, 2, 3, 5 e 6.

Diante das análises mencionadas acima, foram elaboradas as tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 que correspondem aos furos SP-01, SP-02, SP-03, SP-04 e SP-05 respectivamente, da campanha de sondagem da região A. A nomenclatura "SP" refere-se a Sondagem à Percussão, indicando o método utilizado para a coleta das amostras.

Tabela 5 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-01.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	Su (kPa)	E_s (kPa)
1,00 - 2,00	Argila (aterro)	4	28,29	28	1 400
2,00 - 3,00	Argila (aterro)	4	28,29	28	1 400
3,00 - 4,00	Argila	1	27,40	7	350
4,00 - 5,00	Areia média/grossa com cascalho	5	28,59	0	1 000
5,00 - 6,00	Areia média/grossa com cascalho	6	28,77	0	1 200
6,00 - 7,00	Areia média/grossa com cascalho	6	28,77	0	1 200
7,00 - 8,00	Silte arenoso com cascalho	11	30,29	0	2 200
8,00 - 9,00	Silte arenoso com cascalho	9	29,70	0	1 800
9,00 - 10,00	Silte arenoso com cascalho	9	29,70	0	1 800
10,00 - 11,00	Silte arenoso com cascalho	9	29,70	0	1 800
11,00 - 12,00	Silte arenoso com cascalho	8	29,40	0	1 600
12,00 - 13,00	Areia fina pouco argilosa	11	30,29	0	2 200
13,00 - 14,00	Areia fina siltosa	13	30,87	0	2 600
14,00 - 15,00	Areia fina siltosa	17	32,16	0	3 400
15,00 - 15-83	Areia fina siltosa	30	36,10	0	6 000

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 6 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-02.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	Su (kPa)	E_s (kPa)
1,00 – 2,00	Argila siltosa (aterro)	7	29,07	49	2 450
2,00 – 3,00	Argila (aterro)	5	28,59	35	1 750
3,00 – 4,00	Argila	1	27,40	7	350
4,00 – 5,00	Areia média/grossa com cascalho	7	29,07	0	1 400
5,00 – 6,00	Areia média/grossa com cascalho	17	32,04	0	3 400
6,00 – 7,00	Areia média/grossa com cascalho	15	31,48	0	3 000
7,00 – 8,00	Silte arenoso	4	28,59	0	800
8,00 – 9,00	Silte arenoso	3	28,00	0	600
9,00 – 10,00	Silte arenoso	3	28,00	0	600
10,00 – 11,00	Silte arenoso	4	28,59	0	800
11,00 – 12,00	Silte pouco arenoso	4	28,59	0	800
12,00 – 13,00	Silte pouco arenoso	5	28,59	0	1 000
13,00 – 13,21	Silte pouco arenoso	10	30,05	0	2 000

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-03.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	Su (kPa)	E_s (kPa)
1,00 – 2,00	Argila siltosa (aterro)	6	28,88	42	2 100
2,00 – 3,00	Argila	3	27,99	21	1 050
3,00 – 4,00	Argila	1	27,40	7	350
4,00 – 5,00	Areia média/grossa com cascalho	4	28,29	0	800
5,00 – 6,00	Areia média/grossa com cascalho	11	30,23	0	2 200
6,00 – 7,00	Areia média/grossa com cascalho	4	28,29	0	800
7,00 – 8,00	Silte arenoso	6	28,88	0	1 200
8,00 – 9,00	Silte arenoso	8	29,47	0	1 600
9,00 – 10,00	Silte arenoso	9	29,76	0	1 800
10,00 – 11,00	Silte arenoso	17	32,04	0	3 400
11,00 – 12,00	Silte arenoso	32	36,15	0	6 400
12,00 – 12,10	Silte arenoso	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2025

Tabela 8 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-04.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	Su (kPa)	E_s (kPa)
1,00 – 2,00	Argila siltosa (aterro)	6	28,88	42	2 100
2,00 – 3,00	Argila (aterro)	5	28,59	35	1 750
3,00 – 4,00	Argila	1	27,40	7	350
4,00 – 5,00	Areia média/grossa com cascalho	1	27,40	0	200
5,00 – 6,00	Areia média/grossa com cascalho	7	29,07	0	1 400
6,00 – 7,00	Areia média/grossa com cascalho	9	29,70	0	1 800
7,00 – 8,00	Silte arenoso	12	30,29	0	2 400
8,00 – 9,00	Silte arenoso	20	32,04	0	4 000
9,00 – 9,06	Silte arenoso	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 9 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-05.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	Su (kPa)	E_s (kPa)
1,00 – 2,00	Argila siltosa (aterro)	6	28.88	42	2100
2,00 – 3,00	Argila siltosa (aterro)	5	28.59	35	1750
3,00 – 4,00	Argila siltosa (aterro)	2	27.7	14	700
4,00 – 5,00	Areia média/grossa com cascalho	1	27.4	0	200
5,00 – 6,00	Areia média/grossa com cascalho	8	29.46	0	1600
6,00 – 7,00	Areia média/grossa com cascalho	5	28.59	0	1000
7,00 – 8,00	Silte arenoso	2	27.7	0	400
8,00 – 9,00	Silte arenoso	5	28.59	0	1000
9,00 – 10,00	Silte arenoso	6	28.89	0	1200
10,00 – 11,00	Silte arenoso	9	29.76	0	1800
11,00 – 12,00	Areia siltosa	9	29.76	0	1800
12,00 – 13,00	Areia siltosa	23	33.71	0	4600
13,00 – 13,20	Areia siltosa	10	30.04	0	2000

Fonte: Autor, 2025.

Na Região A, as primeiras camadas de argila siltosa, entre um e quatro metros de profundidade, mostraram solos bastante moles, com NSPT variando de um a seis, com ângulo de atrito interno em torno de 27 a 29 graus, coesão de 7 a 42 kPa e módulo de deformabilidade entre 350 e 2100 kPa. Como a água apareceu entre 3,05 e 3,28 metros, foram observados pontos de pitting e pequenas cavidades em frestas nas roscas. Não é possível afirmar que a umidade tenha sido o único fator responsável,

mas ela provavelmente contribuiu para criar zonas de maior concentração de tensão e iniciar processos de corrosão.

Ao avançar para as camadas mais arenosas, de quatro a oito metros, o NSPT passou a registrar de cinco a onze golpes e o solo tornou-se mais rígido, com módulo chegando a 2200 kPa. Nesse intervalo, notou-se desgaste abrasivo moderado no bico do amostrador e na borda do tubo de revestimento, que ficaram ligeiramente ovalizados e com rebarbas. Esse desgaste pode estar relacionado ao aumento do esforço mecânico exigido para perfurar materiais mais duros, enquanto a corrosão interna se manteve discreta.

Abaixo de oito metros, predominou silte arenoso e areia fina com SPT de nove a trinta golpes e módulo de deformabilidade próximo a 6000 kPa. A maior compactação do solo exigiu torque adicional na cravação, o que possivelmente acelerou o desgaste mecânico de hastes e amostrador. Em contrapartida, o ambiente mais seco reduziu a ação eletroquímica, mantendo os sinais de corrosão em níveis baixos.

Em sequência, realizou-se a análise dos perfis referentes à campanha de sondagem na Região B, adotando o mesmo procedimento empregado para a Região A. Portanto, foram elaboradas as tabelas 10, 11 e 12, para cada furo (denominados SP-06, SP-07 e SP-08) foi caracterizado quanto ao tipo de solo, profundidade alcançada e nível d'água registrado em campo.

Tabela 10 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-06.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	E_s (kPa)
1,00 – 2,00	Areia fina, pouco argilosa	3	27,99	600
2,00 – 3,00	Areia fina, pouco argilosa	3	27,99	600
3,00 – 4,00	Areia fina, pouco argilosa	6	28,88	1200
4,00 – 5,00	Areia fina, pouco argilosa	10	30,04	2000
5,00 – 6,00	Areia fina, pouco argilosa	4	28,29	800
6,00 – 7,00	Areia fina, pouco argilosa	10	30,04	2000
7,00 – 8,00	Areia fina, pouco argilosa	12	30,62	2400
8,00 – 9,00	Areia fina, pouco argilosa	8	29,46	1600
9,00 – 10,00	Areia fina, pouco argilosa	27	34,80	5400
10,00 – 11,00	Areia fina, pouco argilosa	32	36,14	6400
11,00 – 12,00	Areia fina, pouco argilosa	48	40,25	9600
12,00 – 13,00	Areia fina, pouco argilosa	50	40,75	10000
13,00 – 13,05	Areia fina, pouco argilosa	-	-	-

Fonte: Autor, 2025

Tabela 11 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-07.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	E_s (kPa)
1,00 – 2,00	Areia fina, pouco argilosa	1	27,39	200
2,00 – 3,00	Areia fina, pouco argilosa	-	-	-
3,00 – 4,00	Areia fina, pouco argilosa	2	27,69	400
4,00 – 5,00	Areia fina, pouco argilosa	2	27,69	400
5,00 – 6,00	Areia fina, pouco argilosa	6	28,88	1200
6,00 – 7,00	Areia fina, pouco argilosa	4	28,29	800
7,00 – 8,00	Areia fina, pouco argilosa	11	30,33	2200
8,00 – 9,00	Areia fina, pouco argilosa	34	36,67	6800
9,00 – 10,00	Areia fina, pouco argilosa	18	32,32	3600
10,00 – 11,00	Areia fina, pouco argilosa	48	40,25	9600
11,00 – 12,00	Areia fina, pouco argilosa	46	39,75	9200
12,00 – 12,03	Areia fina, pouco argilosa	-	-	-

Fonte: Autor, 2025

Tabela 12 - Parâmetros geotécnicos obtidos para cada intervalo de profundidade do furo SP-08.

Profundidade (m)	Tipo de Solo	NSPT	ϕ (°)	E_s (kPa)
1,00 – 2,00	Areia fina, pouco argilosa	2	27,70	400
2,00 – 3,00	Areia fina, pouco argilosa	3	27,99	600
3,00 – 4,00	Areia fina, pouco argilosa	4	28,29	800
4,00 – 5,00	Areia fina, pouco argilosa	5	28,59	1000
5,00 – 6,00	Areia fina, pouco argilosa	7	29,17	1400
6,00 – 7,00	Areia fina, pouco argilosa	8	29,47	1600
7,00 – 8,00	Areia fina, pouco argilosa	3	27,99	600
8,00 – 9,00	Areia fina, pouco argilosa	9	29,76	1800
9,00 – 10,00	Areia fina, pouco argilosa	11	30,33	2200
10,00 – 11,00	Areia fina, pouco argilosa	19	32,61	3800
11,00 – 11,53	Areia fina, pouco argilosa	39	37,98	7800

Fonte: Autor, 2025.

Na Região B, o perfil geológico foi mais homogêneo, composto por areia pouco argilosa de zero a treze metros, com NSPT variando de dois a cinquenta golpes e ângulo de atrito entre 27,39 e 40,75 graus. No entanto, o desgaste observado foi predominantemente abrasivo e leve, com perdas de diâmetro inferiores a 0,3 por cento, como observado na tabela 4.

Em síntese, embora não se possa atribuir cada dano a um único parâmetro, os resultados indicam que solos mais compactos e de granulometria mais grossa tendem a gerar desgaste abrasivo mais pronunciado, enquanto camadas argilosas com maior umidade favorecem o surgimento de pitting e corrosão em frestas. Solos homogêneos, de baixa plasticidade e excelente drenagem mantêm os danos em níveis reduzidos.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como finalidade compreender, de forma experimental, o comportamento de ferramentas utilizadas em operações de sondagem submetidas a diferentes condições geotécnicas. Por meio da análise de perfis de solo, parâmetros derivados de ensaios SPT, registros fotográficos e medições dimensionais dos equipamentos, foi possível identificar como as propriedades do solo influenciam diretamente os mecanismos de desgaste e corrosão observados nos componentes metálicos envolvidos nas perfurações.

As comparações realizadas entre as Regiões A do estado de Minas Gerais e B do estado de São Paulo evidenciaram contrastes marcantes quanto à agressividade dos solos sobre os equipamentos. A Região A, caracterizada por solos mais heterogêneos, com presença de argilas, siltes arenosos e areias com cascalho, apresentou maior severidade nos danos, com destaque para corrosão em frestas, corrosão sob tensão e desgaste abrasivo nas superfícies de contato. Já a Região B, composta predominantemente por areia fina pouco argilosa e com baixa variabilidade geotécnica, resultou em desgastes de menor intensidade, com predomínio de abrasão leve e corrosão uniforme superficial.

Os resultados obtidos nas análises dimensionais e visuais demonstraram que os componentes de sondagem, especialmente o bico do amostrador e as hastes de perfuração, sofreram perdas mensuráveis de material que puderam ser diretamente associadas aos valores de resistência do solo, profundidade e presença de água. A correlação com os parâmetros geotécnicos, como o ângulo de atrito interno, a coesão e o módulo de deformabilidade, evidenciou que solos mais compactos, ou com maior teor de partículas abrasivas, são mais propensos a acelerar os processos de desgaste e falha dos materiais metálicos.

A partir dessas constatações, torna-se evidente a importância da caracterização geotécnica não apenas para fins de projeto e fundação, mas também como ferramenta preditiva para o comportamento dos equipamentos de sondagem. A seleção de materiais mais adequados, o emprego de tratamentos superficiais e a adoção de rotinas sistemáticas de inspeção podem contribuir para o aumento da durabilidade dos componentes, redução de custos e maior segurança nas operações de campo.

Embora tenha sido possível observar padrões de dano associados a diferentes condições de solo, as análises foram realizadas com base em inspeções após o uso completo dos equipamentos, sem a delimitação exata de profundidades específicas para cada tipo de desgaste. Como sugestão de trabalho futuro, propõe-se a realização de ensaios controlados, nos quais os equipamentos sejam submetidos a perfurações segmentadas por intervalos de profundidade previamente definidos. Dessa forma, seria possível correlacionar com maior precisão os danos observados com os tipos de solo encontrados em cada faixa de profundidade.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. **Fundamentos de geologia do Brasil**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: 2020 – **Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASM INTERNATIONAL. **Stress Corrosion Cracking: A Guide**. Materials Park, OH: ASM International, 2012.

BAYER, Raymond G. **Mechanical wear prediction and prevention**. New York: Marcel Dekker, 1994.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to Tribology**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

BICALHO, Izabela Silva. **Mecanismos de desgaste de ferramentas utilizadas no fresamento com alta velocidade de corte no aço AISI H13 endurecido**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

BODÓ, Béla; JONES, Colin. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

BOWLES, J. E. **Foundation Analysis and Design**. 5ª ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

BRAJA, M. Das. **Principles of Geotechnical Engineering**. 6. ed. Belmont: Thomson, 2006.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elements of the Nature and Properties of Soils**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014.

CAPUTO, Homero Pereira. **Mecânica dos Solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CRAIG, R. F. **Craig's Soil Mechanics**. 7th Edition, London: Spon Press, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9780203494103>. Acesso em: 05 jan. 2025.

CRUZ, Artur F. F.; FREITAS, Marcelo R. A.; OLIVEIRA, Adelci M.; MEDEIROS, João T. N. de. **Avaliação do desgaste abrasivo a seco de materiais de elevada dureza**. 64° Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG, Brasil, 13 a 17 de julho de 2009.

DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 8ª ed. Stamford: Cengage Learning, 2014.

DIN. Norm 50320: **Tribology - Concepts and definitions**. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2002.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

ESTUDE ENGENHARIA. Sondagem SPT – SPT. Disponível em: <https://estudeengenharia.com/sondagem-spt>. Acesso em: 27 maio 2025.

FONTANA, Mars G. **Corrosion Engineering**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

GUTIÉRREZ, S. C. et al. **Study of the Influence of Tool Wear of Two Drill Bits Manufactured with Different Coating Processes in Drilling Carbon/Glass Fiber Hybrid Composite Bounded with Epoxy Polymer**. *Coatings*, v. 13, n. 8, p. 1440, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13081440>

HLEPAS, Georgette; SEED, Raymond; ZAFIR, Zia; ARLES, Michael; DAWSON, Ethan; FINLAY, Olivia; CHOWDHURY, Khaled. **Considerations for subsurface investigations for seismic analysis of embankment dams and levees**. 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Sequence-of-Driving-Split-Spoon->

[Sampler-During-the-Standard-Penetration-Test-adapted_fig5_363809055](#). Acesso em: 23 maio 2025.

HUTCHINGS, Ian M.; SHIPWAY, Philip. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

INSTITUTO FLORESTAL. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda e explicações**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

KAYABA, T. **Adhesion and transfer in metallic sliding**. *Wear*, v. 52, p. 355–368, 1979.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do Solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. et al. **Fertilidade do Solo**. 2. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. p. 645–738.

LUDEMA, K. C. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**. Boca Raton: CRC Press, 1981.

MALHEIROS, F. C. N. **Micro-abrasão em DLC Depositado em Borracha**. Projeto de graduação. Vitória, 2013.

MASSAD, Faiçal. **Mecânica dos solos: volume único**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MACHADO, Antônio L. T. et al. **Metodologia para avaliação do desgaste em ferramentas simétricas de mobilização do solo**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 5, p. 645–650, 2009.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 2nd Edition, Hoboken: John Wiley & Sons, 1993.

NACE International. **Crevice Corrosion Testing and Evaluation**. Houston: NACE International, 2016.

OERLIKON. **Tribology Test Standards and Procedures**. Switzerland: Oerlikon Surface Solutions, 2021.

OWŚCIAK, M. **Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic factors**. 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198724001624>. Acesso em: 14 jul. 2025.

PINTO, C. R. M. **Curso básico de mecânica dos solos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2006.

PLINNINGER, J.; SPAUN, U.; THURO, K. **Tribocorrosion mechanisms in drilling tools**. *Wear*, v. 256, p. 1000–1010, 2002.

PIZZA, F.; FARIAS, R. **Machine learning for online tool wear monitoring**. 2022. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/pt/pt/portfolio/tecnologia-de-superfície/desgaste-e-tribologia/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **Corrosion and Corrosion Control**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2008.

ROCHA, M. M.; ODEBRECHT, E.; SCHNAID, F. **Estudo teórico-experimental da propagação de ondas na haste de sondagem do ensaio SPT**. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, v. 2, n. 1, p. 7–27, 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/216992>. Acesso em: 21 jul. 2025.

SANTOS, A. C.; LIMA, R. M. **Desgaste e corrosão em materiais metálicos: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2019.

SANTOS, Z. A. da S.; SOUZA, C. de J. de; COSTA, A. R. da. **A metodologia BSCEQ na seleção de materiais para otimização do desgaste de coroas de perfuração de uma indústria de sondagem**. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 212–219, 2012.

SASADA, T. **Wear mechanisms in metallic sliding systems**. *Wear*, v. 53, p. 1–16, 1979.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. Rio de Janeiro: Oficinas de Textos, 2000.

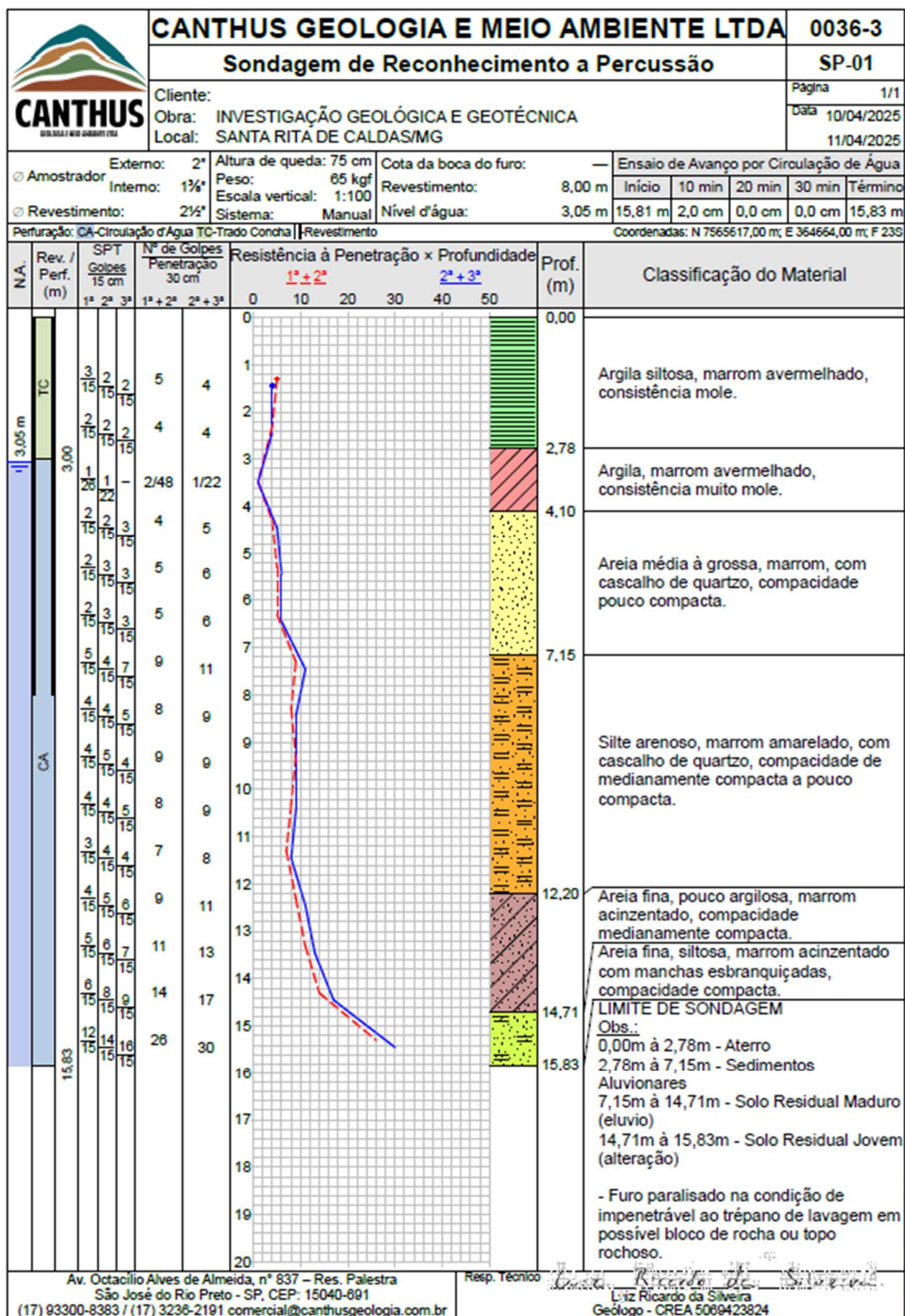
SCHUITEK, R. **Análise do desgaste por riscamento circular em materiais metálicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia).

SUH, N. P. **The delamination theory of wear**. *Wear*, v. 25, p. 111–124, 1973.

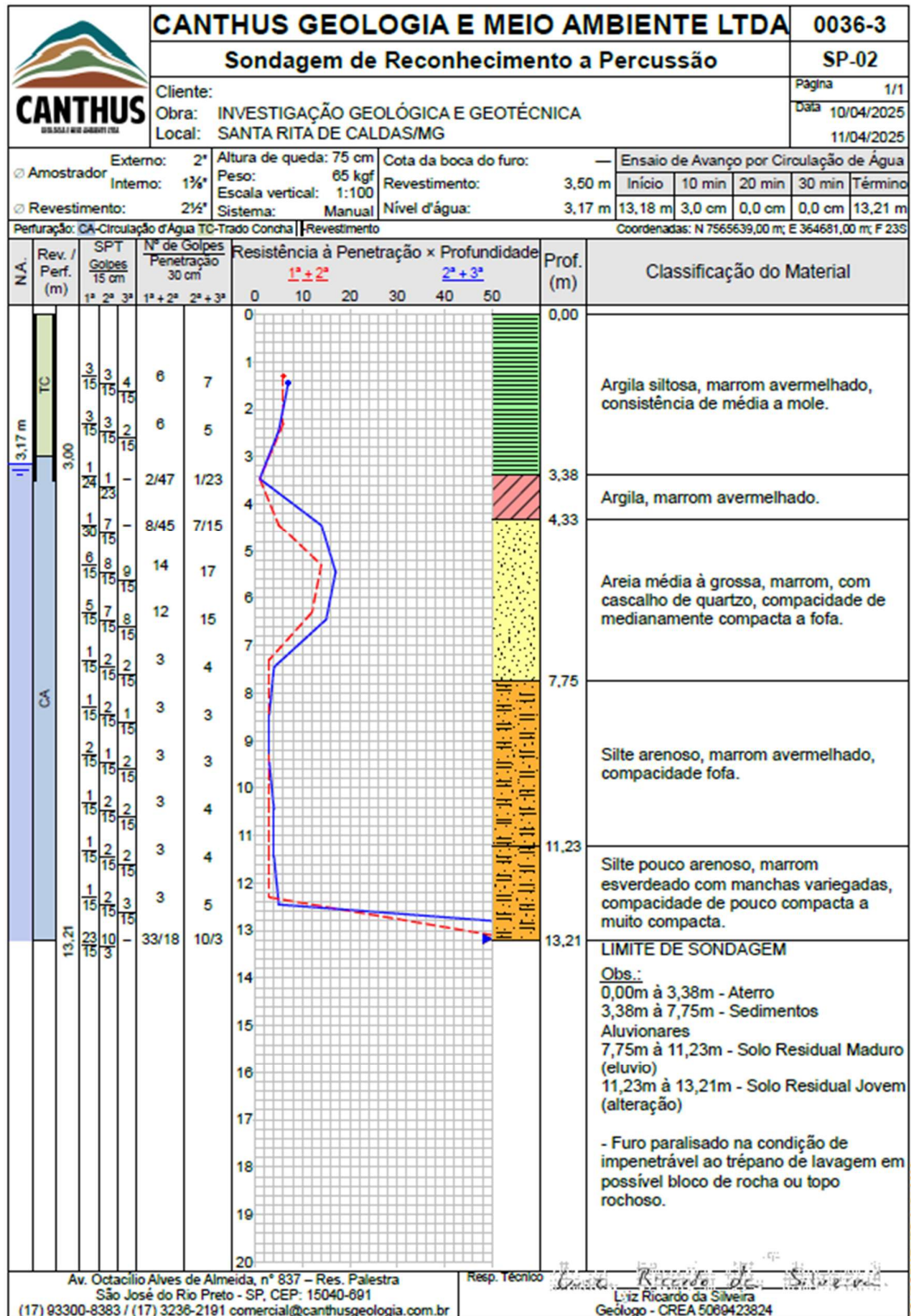
ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

Apêndices

Perfil de sondagem SP-01 região A

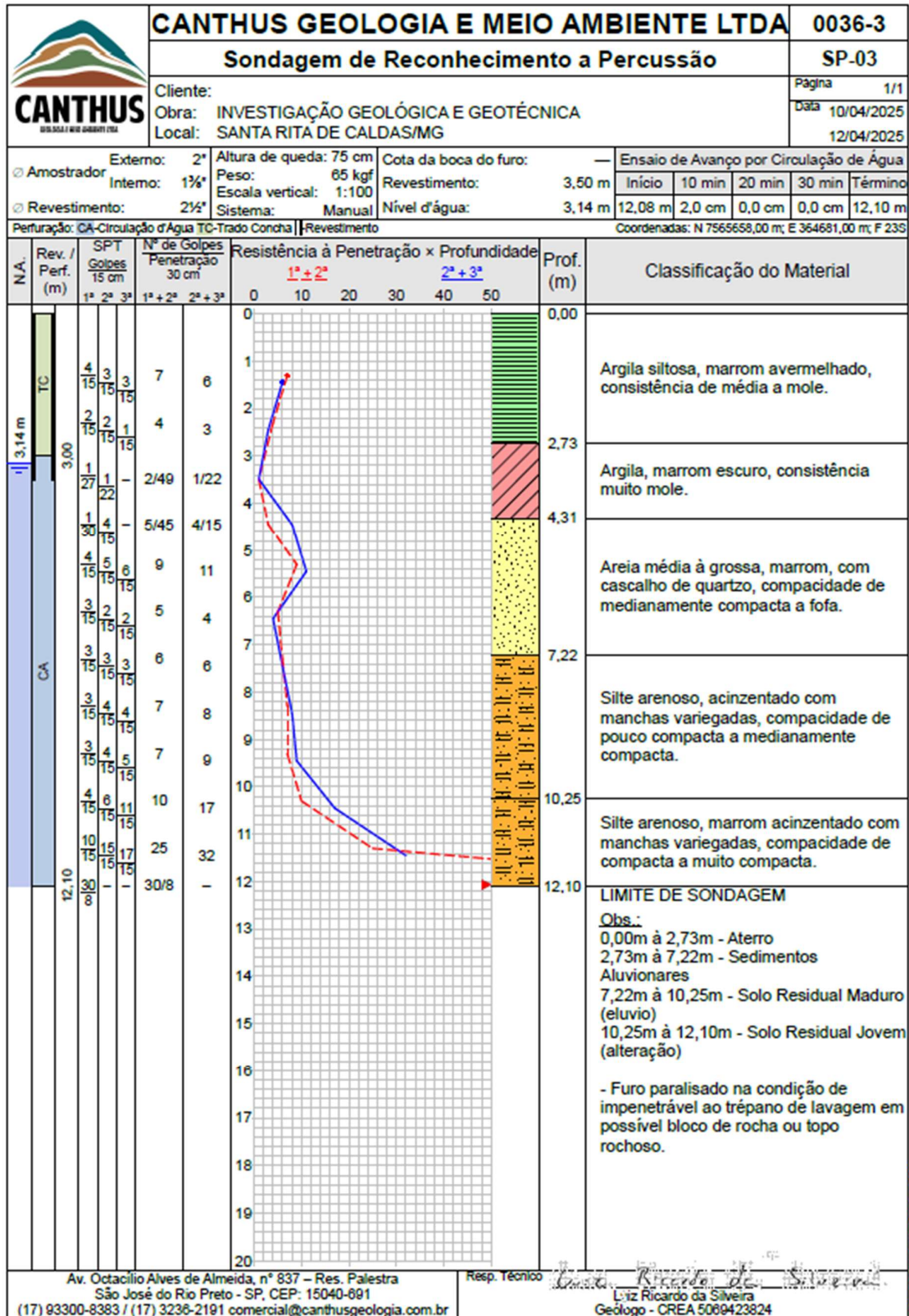


Perfil de sondagem SP-02 região A

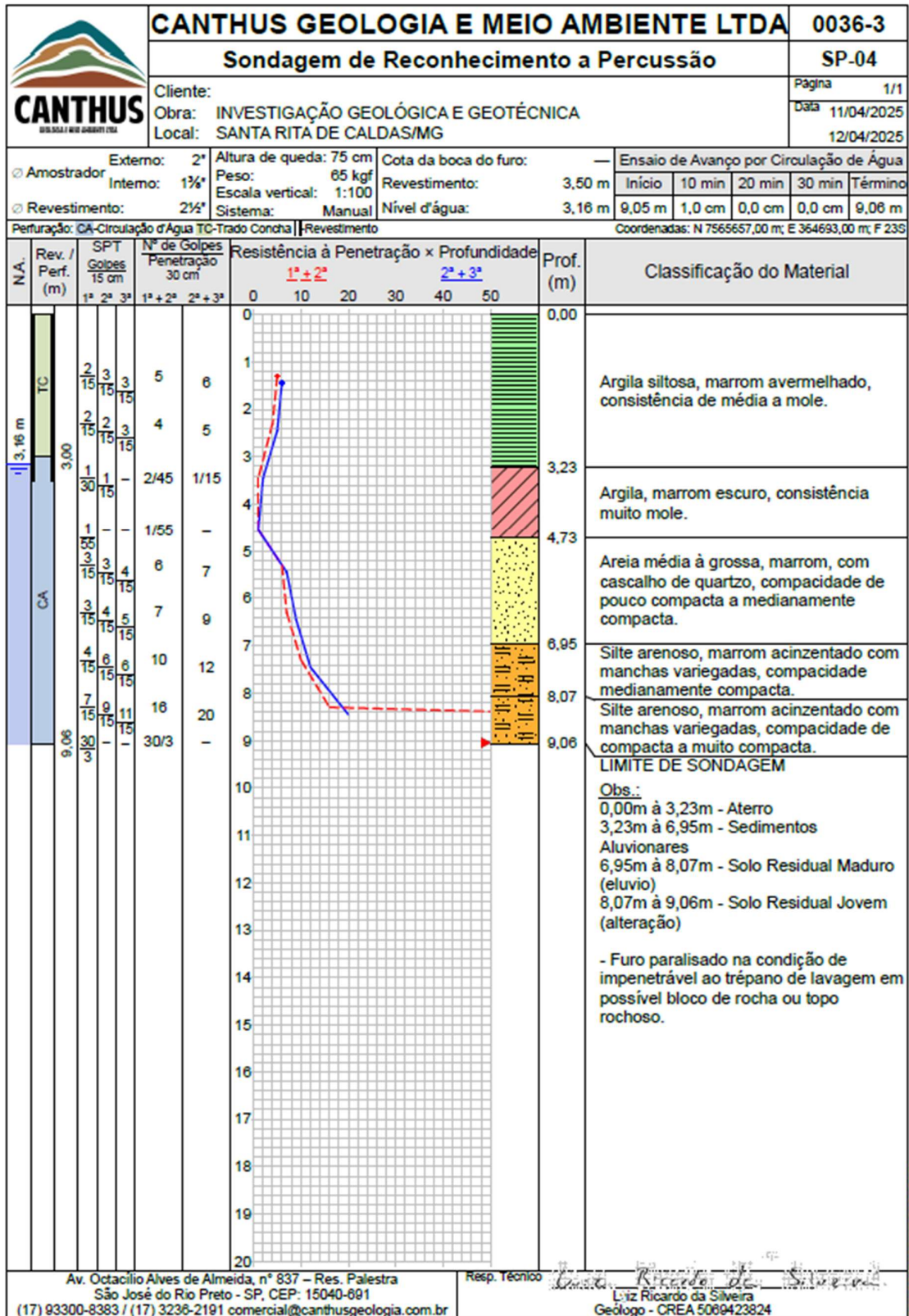


CONFORME NBR 64642:020

Perfil de sondagem SP-03 região A

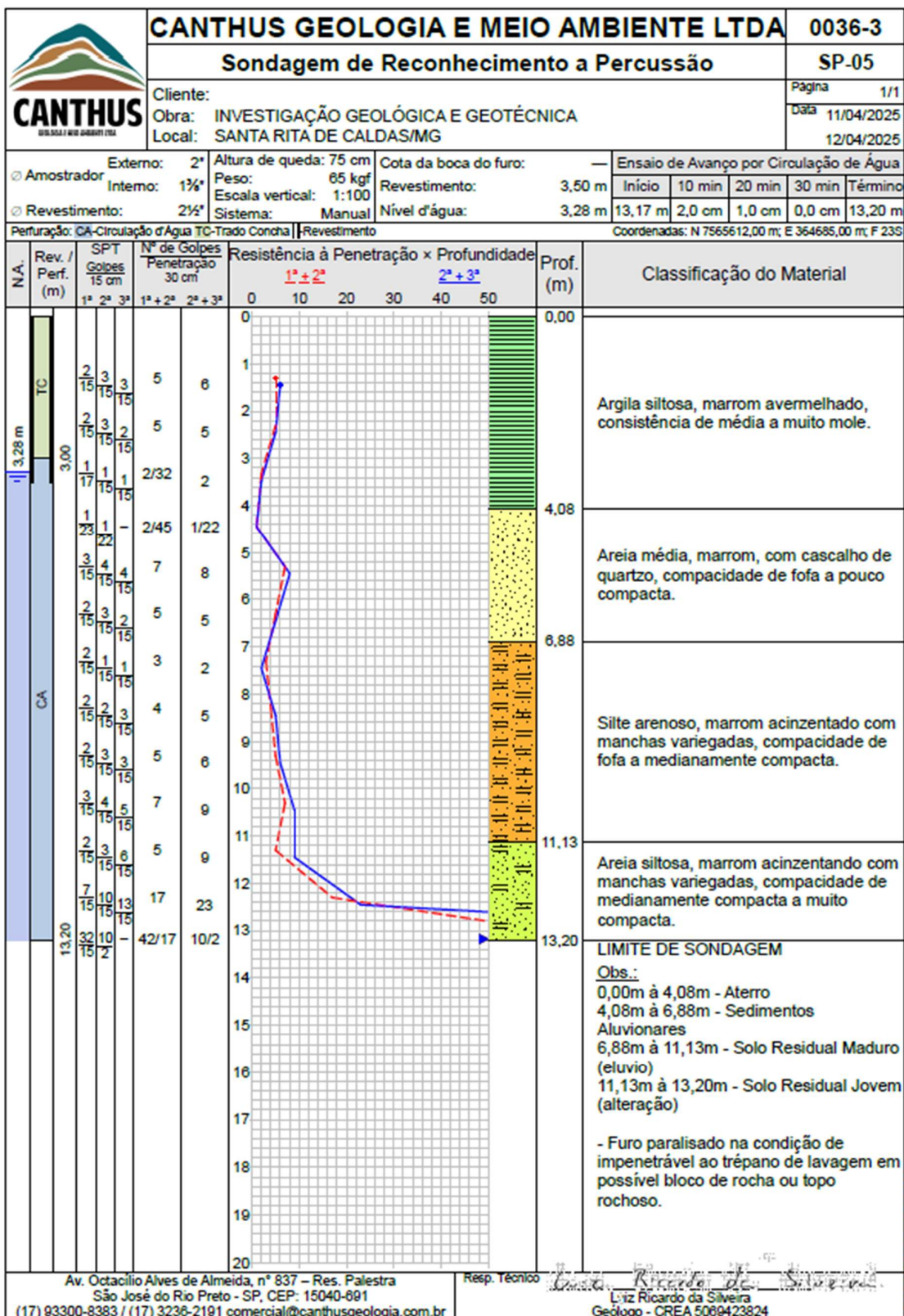


Perfil de sondagem SP-04 região A

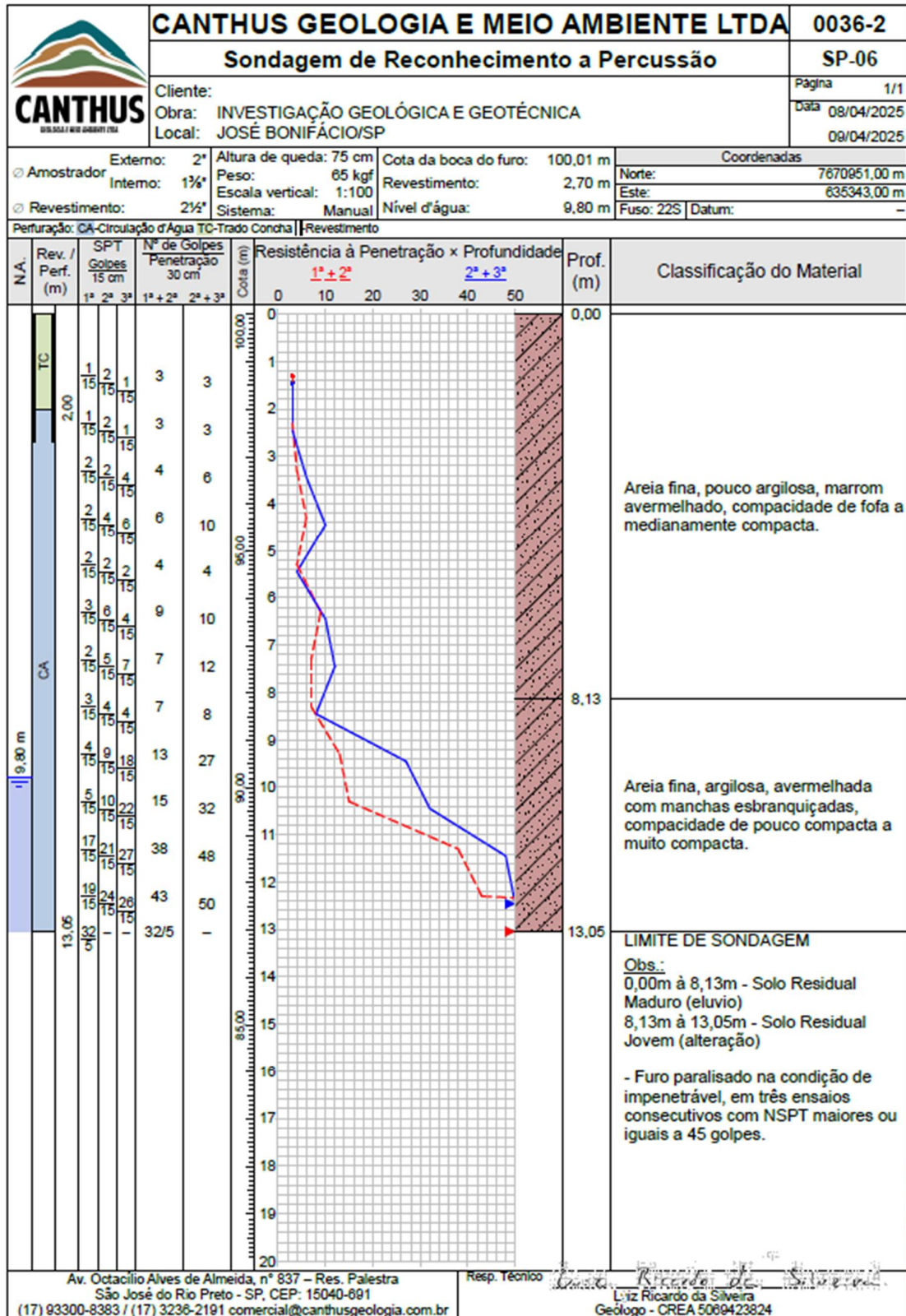


CONFORME NBR 04/84:2020

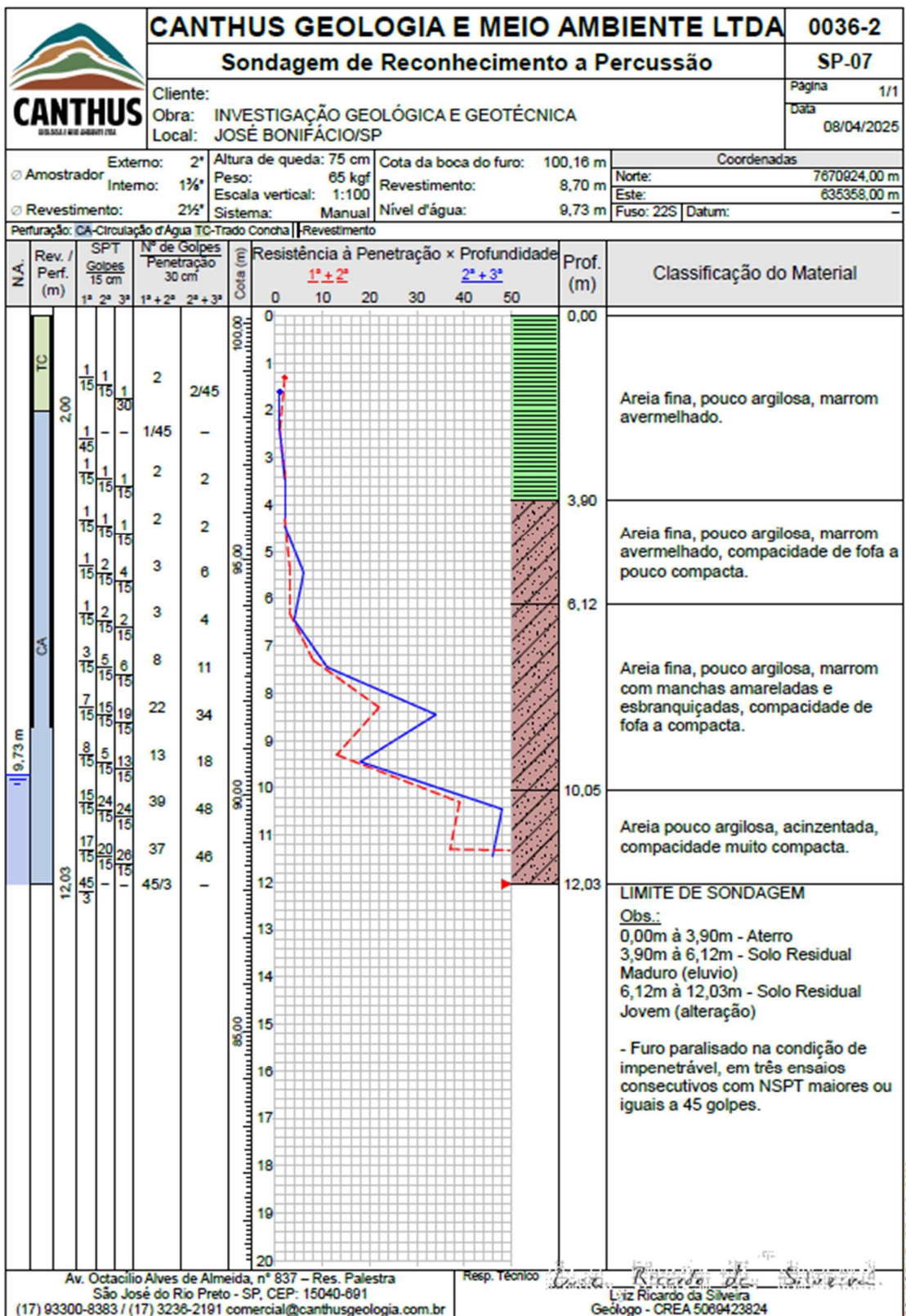
Perfil de sondagem SP-05 região A



Perfil sondagem SP-06 região B



Perfil sondagem SP-07 Região B



Perfil de sondagem SP-08 região B

