

Guia Completo de Ensaaios Geotécnicos: Da Caracterização ao Controle de Qualidade

Introdução

A engenharia geotécnica é uma disciplina fundamental para a segurança e a estabilidade de qualquer empreendimento de engenharia civil. Seja na construção de edifícios, pontes, barragens, estradas ou túneis, o conhecimento aprofundado do solo e das rochas é crucial para o sucesso do projeto e a longevidade da estrutura. Nesse contexto, os ensaios geotécnicos emergem como ferramentas indispensáveis, fornecendo os dados e parâmetros necessários para a tomada de decisões assertivas, desde a fase de concepção até a execução e o monitoramento da obra.

Este e-book, desenvolvido pela Mafrigeo, tem como objetivo ser um guia abrangente sobre os ensaios geotécnicos, abordando desde os princípios básicos de caracterização dos solos até as aplicações mais complexas no controle de qualidade de obras. Nosso propósito é desmistificar os conceitos, apresentar as metodologias e destacar a importância de cada ensaio, capacitando profissionais e estudantes a compreenderem e aplicarem esses conhecimentos de forma eficaz em seus projetos.

Ao longo das próximas seções, exploraremos os diferentes tipos de ensaios, suas finalidades, os equipamentos utilizados e a interpretação dos resultados. Abordaremos também as normas técnicas que regem esses procedimentos, garantindo que o leitor tenha acesso a informações atualizadas e alinhadas com as melhores práticas do setor. Com este material, esperamos contribuir para a formação de profissionais mais qualificados e para a promoção de uma engenharia geotécnica de excelência no Brasil.

Sumário

1. Introdução à Geotecnia e a Importância dos Ensaios

- O Papel da Geotecnia na Engenharia Civil
- Por que os Ensaios Geotécnicos são Indispensáveis?
- Tipos de Investigações Geotécnicas: Campo vs. Laboratório

2. Ensaios de Caracterização e Identificação

- Umidade Natural
- Granulometria (Análise Granulométrica)
- Limites de Atterberg (Limite de Liquidez - LL e Limite de Plasticidade - LP)
- Massa Específica (Densidade)
- Massa Específica Real dos Grãos

3. Ensaios de Resistência e Deformabilidade

- Resistência ao Cisalhamento
 - Cisalhamento Direto
 - Ensaio Triaxial (UU, CIU, CID)
 - Compressão Simples (Uniaxial)
- Resistência Mecânica

4. Ensaios de Permeabilidade e Hidráulica

- Permeabilidade em Laboratório
- Condutividade Hidráulica

5. Ensaios de Compactação e Controle de Qualidade

- Ensaio Proctor (Normal e Modificado)
- Ensaio CBR (California Bearing Ratio)

6. Ensaios Específicos de Comportamento

- Adensamento (Ensaio Edométrico)
- Colapso (Ensaio Edométrico de Colapso)
- Expansão (Ensaio Edométrico de Expansão)

7. Interpretação de Resultados e Aplicação em Projetos

- Como Utilizar os Dados dos Ensaios
- Estudos de Caso

8. Normas Técnicas e Boas Práticas em Ensaios Geotécnicos

- Principais Normas Brasileiras (ABNT)
- Certificações e Credenciamentos de Laboratórios

9. Conclusão

1. Introdução à Geotecnia e a Importância dos Ensaios

O Papel da Geotecnia na Engenharia Civil

A Geotecnia, um ramo vital da Engenharia Civil, dedica-se ao estudo do comportamento dos solos e rochas, bem como da água subterrânea, sob a influência de cargas e condições ambientais. Sua atuação é crucial em todas as fases de um empreendimento, desde o planejamento e projeto até a execução e o monitoramento. A interação entre a estrutura e o terreno é complexa e dinâmica, e a compreensão aprofundada dessas interações é o que garante a segurança, a estabilidade e a durabilidade das construções [1].

Historicamente, a falta de conhecimento geotécnico adequado resultou em inúmeros desastres, como colapsos de fundações, deslizamentos de encostas e rupturas de barragens. Tais eventos reforçam a premissa de que o solo não é apenas um suporte passivo, mas um elemento ativo que reage às intervenções humanas. A Geotecnia, portanto, atua como uma ponte entre a estrutura projetada e o ambiente natural, assegurando que as obras sejam concebidas em harmonia com as características do terreno [2].

As aplicações da geotecnia são vastas e abrangem diversas áreas da engenharia civil, incluindo:

- **Fundações:** Dimensionamento e execução de fundações rasas e profundas para edifícios, pontes e outras estruturas.
- **Estabilidade de Taludes:** Análise e estabilização de encostas naturais e de corte/aterro, prevenindo deslizamentos.
- **Obras de Terra:** Projeto e construção de aterros, barragens de terra e enrocamento, diques e outras estruturas que utilizam o solo como material de construção.
- **Contenções:** Desenvolvimento de soluções para contenção de maciços, como muros de arrimo, cortinas atirantadas e solo grampeado.
- **Pavimentação:** Estudo do subleito e dimensionamento de camadas de pavimentos para estradas e aeroportos.
- **Túneis e Obras Subterrâneas:** Análise do comportamento do maciço rochoso e do solo durante a escavação e revestimento de túneis.
- **Disposição de Resíduos:** Projeto de aterros sanitários e pilhas de rejeitos, considerando a estabilidade e a proteção ambiental.

Em suma, a geotecnia é a ciência e a arte de trabalhar com o solo e a rocha, transformando um ambiente natural complexo em um suporte seguro e confiável para as aspirações humanas de construção e desenvolvimento.

Por que os Ensaios Geotécnicos são Indispensáveis?

Os ensaios geotécnicos são a espinha dorsal de qualquer projeto geotécnico bem-sucedido. Eles fornecem os dados quantitativos e qualitativos essenciais sobre as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos solos e rochas. Sem esses dados, o projeto seria baseado em suposições, o que aumentaria exponencialmente os riscos de falhas estruturais, custos adicionais e atrasos na obra [3].

A indispensabilidade dos ensaios geotécnicos reside em sua capacidade de:

- **Caracterizar o Subsolo:** Revelar a composição, estratigrafia, umidade, densidade e outras características fundamentais do terreno.
- **Determinar Parâmetros de Projeto:** Fornecer valores de resistência ao cisalhamento, compressibilidade, permeabilidade e outros parâmetros que são diretamente utilizados no dimensionamento de fundações, taludes e estruturas de contenção.
- **Prever o Comportamento do Solo:** Permitir que os engenheiros prevejam como o solo se comportará sob diferentes condições de carga, drenagem e tempo, antecipando recalques, instabilidades e outras patologias.
- **Otimizar Soluções de Engenharia:** Com base em dados precisos, é possível otimizar o projeto, escolhendo a solução mais econômica e segura, evitando superdimensionamentos ou subdimensionamentos que podem comprometer a obra.
- **Garantir a Segurança:** Assegurar que a estrutura será construída sobre uma base sólida e que os riscos geotécnicos serão minimizados, protegendo vidas e investimentos.
- **Atender a Normas e Regulamentações:** A maioria dos projetos de engenharia civil exige a realização de ensaios geotécnicos para atender às normas técnicas e regulamentações locais, garantindo a conformidade legal da obra.
- **Controlar a Qualidade da Execução:** Durante a fase de construção, os ensaios de controle de qualidade verificam se os materiais e os processos executivos estão em conformidade com o projeto e as especificações, garantindo a integridade da obra.

Em suma, os ensaios geotécnicos transformam a incerteza do subsolo em dados concretos, permitindo que os engenheiros tomem decisões informadas e construam com segurança e eficiência.

Tipos de Investigações Geotécnicas: Campo vs. Laboratório

As investigações geotécnicas são divididas em duas categorias principais: ensaios de campo (in situ) e ensaios de laboratório. Ambas são complementares e essenciais para uma compreensão completa do comportamento do solo e da rocha.

Investigações de Campo (In Situ):

Os ensaios de campo são realizados diretamente no local da obra, fornecendo informações sobre o solo em seu estado natural, sem a perturbação causada pela remoção de amostras. Eles são particularmente úteis para avaliar a heterogeneidade do subsolo e para obter parâmetros que são difíceis de replicar em laboratório. Exemplos comuns incluem [4]:

- **Sondagens:** Como o Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT) e Pressiômetro, que fornecem informações sobre a resistência e a densidade do solo em diferentes profundidades.
- **Ensaio de Permeabilidade In Situ:** Para determinar a condutividade hidráulica do solo no local.
- **Ensaio de Carregamento de Placa:** Para avaliar a capacidade de suporte e a deformabilidade do solo em escala real.

Investigações de Laboratório:

Os ensaios de laboratório são realizados em amostras de solo coletadas no campo e transportadas para um ambiente controlado. Eles permitem uma análise mais detalhada das propriedades do solo, sob condições específicas que podem ser controladas e replicadas. As amostras podem ser indeformadas (preservando a estrutura original do solo) ou deformadas (para caracterização geral). Os ensaios de laboratório complementam as investigações de campo, fornecendo parâmetros mais precisos para o projeto. Exemplos incluem [5]:

- **Ensaio de Caracterização:** Umidade, granulometria, limites de Atterberg, massa específica.
- **Ensaio de Resistência:** Cisalhamento direto, triaxial, compressão simples.
- **Ensaio de Deformabilidade:** Adensamento.
- **Ensaio de Permeabilidade:** Em amostras de solo.

A combinação estratégica de ensaios de campo e laboratório é fundamental para obter um conjunto completo e confiável de dados geotécnicos, permitindo que os engenheiros desenvolvam projetos seguros, eficientes e economicamente viáveis.

2. Ensaio de Caracterização e Identificação

Os ensaios de caracterização e identificação são a porta de entrada para o conhecimento do solo. Eles fornecem as propriedades físicas básicas que permitem classificar o material e prever seu comportamento de forma preliminar. São ensaios relativamente simples, mas de fundamental importância para qualquer estudo geotécnico, pois os resultados obtidos são a base para ensaios mais complexos e para o dimensionamento de estruturas.

Umidade Natural

A umidade natural do solo, também conhecida como teor de umidade, é uma das propriedades físicas mais básicas e importantes a ser determinada. Ela representa a quantidade de água presente em uma amostra de solo em seu estado natural, expressa como uma porcentagem da massa de partículas sólidas secas do solo [6].

Importância:

A determinação da umidade natural é crucial por diversas razões:

- **Classificação e Comportamento do Solo:** A umidade natural influencia diretamente a consistência, a resistência e a compressibilidade do solo. Solos com alta umidade podem apresentar baixa resistência e alta compressibilidade, enquanto solos secos podem ser mais rígidos e resistentes. É um parâmetro chave para a classificação de solos finos, juntamente com os Limites de Atterberg [7].
- **Controle de Compactação:** Em obras de terraplenagem, como aterros e barragens, a umidade do solo é um fator crítico para o sucesso da compactação. O ensaio de Proctor, por exemplo, determina a umidade ótima para que o solo atinja sua máxima densidade. A umidade natural da jazida ou do material a ser compactado é comparada com a umidade ótima para ajustes no processo [8].
- **Cálculo de Parâmetros Geotécnicos:** A umidade natural é utilizada em diversos cálculos geotécnicos, como a massa específica aparente úmida e seca, o índice de vazios e o grau de saturação, que são essenciais para o dimensionamento de fundações e outras estruturas.
- **Previsão de Comportamento:** Variações na umidade natural podem levar a mudanças significativas no volume do solo (expansão ou contração), afetando a estabilidade de estruturas e pavimentos. Conhecer a umidade natural ajuda a prever esses comportamentos e a planejar medidas preventivas [9].
- **Preparação de Amostras para Ensaio de Laboratório:** Para muitos ensaios de laboratório, é necessário conhecer a umidade natural da amostra para prepará-la adequadamente ou para correlacionar os resultados com as condições de campo.

Metodologia (NBR 6484: Solo – Determinação do teor de umidade):

O ensaio de determinação da umidade natural é realizado em laboratório e segue um procedimento padronizado para garantir a precisão e a reprodutibilidade dos resultados. A metodologia básica envolve os seguintes passos [10]:

1. **Coleta da Amostra:** Uma amostra representativa do solo é coletada no campo e acondicionada em recipiente hermético para evitar a perda ou ganho de umidade.

2. **Pesagem da Amostra Úmida:** Uma porção da amostra úmida é colocada em um recipiente de massa conhecida (cápsula) e pesada com precisão.
3. **Secagem em Estufa:** A amostra é levada a uma estufa com temperatura controlada (geralmente entre 105°C e 110°C) e mantida até que toda a água seja evaporada e a massa se torne constante. O tempo de secagem varia conforme o tipo de solo e a quantidade de água presente, mas geralmente é de 16 a 24 horas.
4. **Pesagem da Amostra Seca:** Após a secagem completa, a amostra é retirada da estufa, resfriada em dessecador e pesada novamente para determinar a massa das partículas sólidas.
5. **Cálculo do Teor de Umidade:** O teor de umidade (w) é calculado pela razão entre a massa de água (massa da amostra úmida menos a massa da amostra seca) e a massa da amostra seca, multiplicado por 100 para expressar em porcentagem:

$$w (\%) = [(\text{Massa da amostra úmida} - \text{Massa da amostra seca}) / \text{Massa da amostra seca}] \times 100$$

Ou, de forma simplificada:

$$w (\%) = (\text{Massa da água} / \text{Massa do solo seco}) \times 100$$

Equipamentos Utilizados:

- Balança de precisão (com resolução de 0,01g ou 0,1g, dependendo da massa da amostra).
- Estufa com controle de temperatura.
- Cápsulas de alumínio ou porcelana (recipientes para as amostras).
- Dessecador (para resfriar as amostras após a secagem e evitar absorção de umidade do ar).

O ensaio de umidade natural, apesar de sua simplicidade, é um pilar fundamental na caracterização geotécnica, fornecendo informações valiosas que subsidiam decisões de projeto e execução em diversas obras de engenharia civil.

Granulometria (Análise Granulométrica)

A análise granulométrica é um ensaio fundamental na geotecnia que visa determinar a distribuição percentual dos tamanhos das partículas que compõem uma amostra de solo. Em outras palavras, ela nos informa a proporção de areia, silte e argila, bem como a presença de pedregulhos, que constituem o solo. Essa distribuição é crucial para a classificação do solo e para a previsão de seu comportamento em diversas aplicações de engenharia [11].

Importância:

A granulometria é um dos parâmetros mais importantes para a caracterização de solos, influenciando diretamente diversas propriedades e comportamentos:

- **Classificação do Solo:** É a base para a classificação tátil-visual e para sistemas de classificação mais formais, como o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e o Sistema Rodoviário de Classificação. A proporção de cada fração granulométrica (pedregulho, areia, silte e argila) define o tipo de solo e suas características gerais [12].
- **Permeabilidade:** Solos com predominância de partículas grossas (areias e pedregulhos) tendem a ser mais permeáveis, permitindo a passagem de água com maior facilidade. Já solos finos (siltes e argilas) são menos permeáveis, o que é relevante para projetos de drenagem, barragens e aterros sanitários [13].
- **Resistência e Compressibilidade:** A granulometria afeta a capacidade de suporte do solo e sua deformabilidade. Solos bem graduados (com boa distribuição de tamanhos de partículas) tendem a ser mais densos e resistentes, enquanto solos uniformes podem apresentar menor resistência e maior compressibilidade [14].
- **Filtros e Drenos:** O conhecimento da granulometria é essencial para o projeto de filtros e camadas drenantes em obras geotécnicas, garantindo que o material utilizado seja adequado para reter partículas finas e permitir o fluxo de água.
- **Compactação:** A distribuição granulométrica influencia a capacidade de compactação do solo e a obtenção da densidade máxima, um fator crítico em obras de terraplenagem.

Metodologia (NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica):

A análise granulométrica é geralmente realizada por dois métodos complementares, dependendo do tamanho das partículas presentes na amostra [15]:

1. **Análise por Peneiramento:** Utilizada para determinar a distribuição de partículas maiores que 0,075 mm (areias e pedregulhos). A amostra de solo seca é passada por uma série de peneiras com aberturas decrescentes, empilhadas uma sobre a outra. O material retido em cada peneira é pesado, e a porcentagem retida acumulada é calculada. Este método é regido pela NBR 7181.
2. **Análise por Sedimentação (Ensaio de Hidrômetro):** Utilizada para determinar a distribuição de partículas menores que 0,075 mm (siltes e argilas), que não podem ser separadas por peneiramento devido ao seu tamanho reduzido. Este método baseia-se na Lei de Stokes, que relaciona a velocidade de sedimentação das partículas em suspensão na água com seu tamanho. A amostra de solo é dispersa em água, e a densidade da suspensão é medida em diferentes intervalos de tempo usando um hidrômetro. Com base nessas leituras, é possível calcular a porcentagem de partículas de silte e argila.

Resultados:

Os resultados da análise granulométrica são apresentados em uma **Curva Granulométrica**, que é um gráfico onde o diâmetro das partículas (em escala logarítmica) é plotado em função da porcentagem em peso de material que passa por cada peneira (ou que tem diâmetro menor que o especificado). A partir dessa curva, é possível determinar parâmetros importantes como:

- **D10 (Diâmetro Efetivo):** Diâmetro correspondente a 10% do material passante.
- **D30:** Diâmetro correspondente a 30% do material passante.
- **D60:** Diâmetro correspondente a 60% do material passante.
- **Coefficiente de Uniformidade (Cu):** $C_u = D_{60} / D_{10}$. Indica a uniformidade dos tamanhos das partículas. Valores próximos de 1 indicam solos uniformes.
- **Coefficiente de Curvatura (Cc):** $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$. Indica a forma da curva granulométrica e a boa graduação do solo.

Equipamentos Utilizados:

- Conjunto de peneiras (para peneiramento).
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Agitador mecânico ou dispersor (para sedimentação).
- Hidrômetro (para sedimentação).
- Proveta graduada (para sedimentação).
- Termômetro.

A análise granulométrica é, portanto, uma ferramenta indispensável para o engenheiro geotécnico, fornecendo informações cruciais para a classificação do solo, a previsão de seu comportamento e o dimensionamento seguro e eficiente de estruturas.

Limites de Atterberg (Limite de Liquidez - LL e Limite de Plasticidade - LP)

Os Limites de Atterberg, desenvolvidos pelo cientista sueco Albert Atterberg e posteriormente padronizados por Arthur Casagrande, são ensaios cruciais para a caracterização de solos finos (siltes e argilas). Eles definem os teores de umidade nos quais o solo muda de estado de consistência: de líquido para plástico, de plástico para semissólido e de semissólido para sólido. Os mais utilizados na engenharia geotécnica são o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) [16].

Importância:

Os Limites de Atterberg são de extrema importância para:

- **Classificação de Solos Finos:** Juntamente com a análise granulométrica, os Limites de Atterberg são a base para a classificação de solos finos, especialmente pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Eles permitem diferenciar argilas de siltes e identificar solos com alta ou baixa plasticidade [17].
- **Previsão de Comportamento:** As variações de umidade entre esses limites indicam a faixa de plasticidade do solo, ou seja, sua capacidade de ser moldado sem fissurar. Solos com alta plasticidade tendem a ser mais compressíveis e menos resistentes, enquanto solos com baixa plasticidade podem ser mais estáveis [18].
- **Dimensionamento de Fundações:** O conhecimento dos limites de consistência auxilia na avaliação da capacidade de suporte do solo e na previsão de recalques. Solos próximos ao seu Limite de Liquidez, por exemplo, possuem baixa resistência e alta compressibilidade, o que pode ser problemático para fundações [19].
- **Controle de Qualidade:** Em obras de terraplenagem, os limites de Atterberg são utilizados para controlar a qualidade do material a ser utilizado, garantindo que ele possua as características desejadas para a finalidade da obra.
- **Identificação de Solos Problemáticos:** Solos com alto Limite de Liquidez e alto Índice de Plasticidade ($IP = LL - LP$) são geralmente argilas muito plásticas, que podem apresentar problemas de expansão e contração significativos com a variação da umidade, ou baixa resistência quando saturadas [20].

Metodologia:

a) Limite de Liquidez (LL) - NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez:

O Limite de Liquidez é o teor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. É determinado utilizando o aparelho de Casagrande. O procedimento envolve [21]:

1. **Preparação da Amostra:** Uma porção de solo fino (passante na peneira de 0,42 mm) é misturada com água até formar uma pasta homogênea.
2. **Preenchimento do Aparelho de Casagrande:** A pasta de solo é colocada na concha do aparelho de Casagrande, formando uma camada de espessura padronizada.
3. **Abertura da Ranhura:** Uma ranhura padronizada é aberta no centro da amostra de solo na concha, utilizando um cinzel.
4. **Golpes e Fechamento da Ranhura:** A manivela do aparelho é girada, fazendo com que a concha caia repetidamente sobre uma base de borracha. O número de golpes necessários para que as bordas da ranhura se unam em um comprimento de 13 mm é registrado.
5. **Determinação da Umidade:** Uma amostra de solo da região onde a ranhura se fechou é coletada para determinação do teor de umidade.

6. **Repetição e Gráfico:** O procedimento é repetido para diferentes teores de umidade, obtendo-se uma curva de fluxo (número de golpes vs. teor de umidade). O Limite de Liquidez é o teor de umidade correspondente a 25 golpes.

b) Limite de Plasticidade (LP) - NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade:

O Limite de Plasticidade é o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido. É determinado pelo método do rolamento [22]:

1. **Preparação da Amostra:** Uma porção de solo fino é misturada com água até atingir uma consistência plástica.
2. **Rolamento:** A amostra de solo é rolada sobre uma placa de vidro (ou superfície lisa) com a palma da mão, formando um cilindro de solo. O rolamento é contínuo até que o cilindro atinja um diâmetro de aproximadamente 3,2 mm e comece a fissurar.
3. **Determinação da Umidade:** Uma amostra do cilindro fissurado é coletada para determinação do teor de umidade.
4. **Repetição:** O procedimento é repetido pelo menos duas vezes para garantir a consistência dos resultados.

Índice de Plasticidade (IP):

O Índice de Plasticidade (IP) é a diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade ($IP = LL - LP$). Ele representa a faixa de umidade na qual o solo se comporta plasticamente. Um IP alto indica um solo altamente plástico, enquanto um IP baixo indica um solo pouco plástico ou não plástico [23].

Equipamentos Utilizados:

- Aparelho de Casagrande (para LL).
- Cinzel para ranhura (para LL).
- Placa de vidro (para LP).
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Cápsulas de alumínio ou porcelana.
- Dessecador.

Os Limites de Atterberg são ferramentas poderosas para a compreensão do comportamento de solos finos, fornecendo informações essenciais para a classificação, o projeto e a execução de obras geotécnicas com segurança e eficiência.

Massa Específica (Densidade)

A massa específica do solo, frequentemente referida como densidade, é uma propriedade física que expressa a relação entre a massa de uma amostra de solo e o volume que ela ocupa. Este parâmetro é fundamental para a compreensão do comportamento do terreno, pois reflete o grau de compactidade do solo e a proporção entre a fase sólida e os vazios (preenchidos por água e/ou ar). Existem diferentes tipos de massa específica, dependendo do estado da amostra (úmida, seca, saturada) e da consideração do volume (total ou apenas dos grãos) [24].

Importância:

A determinação da massa específica é vital para diversas aplicações em geotecnia:

- **Cálculo de Tensões:** A massa específica do solo é utilizada para calcular as tensões atuantes no subsolo devido ao peso próprio do material. Essas tensões são cruciais para o dimensionamento de fundações, muros de arrimo e outras estruturas que interagem com o terreno [25].
- **Controle de Compactação:** Em obras de terraplenagem, a massa específica seca máxima obtida no ensaio de Proctor é o parâmetro de referência para o controle de compactação em campo. Atingir uma alta massa específica seca garante a estabilidade e a durabilidade do aterro [26].
- **Dimensionamento de Estruturas:** A capacidade de suporte do solo e a previsão de recalques são diretamente influenciadas pela sua massa específica. Solos mais densos geralmente apresentam maior resistência e menor compressibilidade.
- **Cálculo de Volumes e Pesos:** Em projetos de movimentação de terra, a massa específica permite estimar o volume de solo a ser escavado ou aterrado e o peso dos materiais, auxiliando no planejamento e na logística da obra.
- **Classificação e Caracterização:** A massa específica, em conjunto com o teor de umidade e a granulometria, contribui para uma caracterização mais completa do solo, auxiliando na sua classificação e na identificação de solos problemáticos.

Tipos de Massa Específica:

É importante distinguir entre os principais tipos de massa específica utilizados na geotecnia:

- **Massa Específica Aparente Úmida (pt ou γ_t):** É a relação entre a massa total (sólidos + água) de uma amostra de solo e o seu volume total. Representa a densidade do solo em seu estado natural, com a umidade presente.

$$pt = \text{Massa total} / \text{Volume total}$$

- **Massa Específica Aparente Seca (pd ou γ_d):** É a relação entre a massa das partículas sólidas de uma amostra de solo e o seu volume total. É um parâmetro fundamental para

o controle de compactação e para a avaliação da capacidade do solo.

$$p_d = \text{Massa dos sólidos} / \text{Volume total}$$

- **Massa Específica dos Grãos (p_s ou γ_s):** É a relação entre a massa das partículas sólidas e o volume ocupado apenas por essas partículas sólidas (sem os vazios). Este ensaio será detalhado na próxima seção.

Metodologia (NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica aparente, NBR 16867: Solo – Determinação da massa específica aparente in situ):

A determinação da massa específica aparente pode ser realizada tanto em laboratório quanto em campo. Em laboratório, geralmente utiliza-se o método do anel volumétrico ou do picnômetro, enquanto em campo, métodos como o do frasco de areia ou do cilindro de cravação são comuns. A NBR 6458 e a NBR 16867 são algumas das normas que regem esses procedimentos [27, 28].

Exemplo de Metodologia (Anel Volumétrico - Laboratório):

1. **Coleta da Amostra:** Uma amostra indeformada de solo é coletada utilizando um anel volumétrico de volume conhecido.
2. **Pesagem da Amostra + Anel:** O anel com a amostra de solo é pesado.
3. **Determinação da Umidade:** Uma pequena porção da amostra é retirada para determinação do teor de umidade natural.
4. **Cálculos:** Com a massa total da amostra (massa do anel + amostra - massa do anel), o volume do anel e o teor de umidade, é possível calcular a massa específica aparente úmida e seca.

Equipamentos Utilizados:

- Anel volumétrico.
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Cápsulas para determinação de umidade.

O conhecimento preciso da massa específica do solo é um pilar para o projeto geotécnico, permitindo que os engenheiros avaliem a capacidade de suporte do terreno e tomem decisões informadas para a segurança e a economia das obras.

Massa Específica Real dos Grãos

A massa específica real dos grãos (p_s ou γ_s) é uma propriedade fundamental do solo que representa a relação entre a massa das partículas sólidas e o volume ocupado exclusivamente

por essas partículas, excluindo-se os vazios (poros) preenchidos por água ou ar. Diferentemente da massa específica aparente, que considera o volume total da amostra (sólidos + vazios), a massa específica real foca apenas na densidade do material sólido que compõe o solo [29].

Importância:

A determinação da massa específica real dos grãos é crucial para diversos cálculos e análises em geotecnia:

- **Cálculo de Índices Físicos:** É um parâmetro essencial para o cálculo de outros índices físicos do solo, como o índice de vazios (e), a porosidade (n) e o grau de saturação (S). Esses índices são vitais para entender a estrutura do solo e seu comportamento sob diferentes condições [30].
 - $e = (G_s * \gamma_w / \gamma_d) - 1$ (onde G_s é a massa específica real dos grãos, γ_w é o peso específico da água e γ_d é a massa específica aparente seca).
 - $n = e / (1 + e)$
 - $S = (w * G_s) / e$ (onde w é o teor de umidade).
- **Classificação de Solos:** Contribui para a classificação mais precisa de solos, especialmente quando combinada com a granulometria e os limites de Atterberg.
- **Análise de Compactação:** Embora o ensaio de Proctor determine a massa específica aparente seca máxima, a massa específica real dos grãos é utilizada para calcular o grau de saturação do solo compactado, auxiliando na avaliação da eficiência da compactação.
- **Estudos de Permeabilidade:** A porosidade, que depende da massa específica real dos grãos, influencia diretamente a permeabilidade do solo.
- **Previsão de Comportamento:** Variações na massa específica real podem indicar a presença de diferentes minerais ou materiais orgânicos no solo, o que pode afetar seu comportamento geotécnico.

Metodologia (NBR 6508: Solo – Determinação da massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm):

O ensaio para determinação da massa específica real dos grãos é realizado em laboratório, geralmente utilizando um picnômetro, que é um frasco de vidro com volume conhecido. A norma brasileira que rege este ensaio é a NBR 6508 [31]. O procedimento básico envolve:

1. **Preparação da Amostra:** Uma porção de solo seco e destorroado (passante na peneira de 4,8 mm) é utilizada. A amostra deve estar completamente seca para garantir que apenas a massa dos sólidos seja considerada.
2. **Pesagem do Picnômetro Vazio:** O picnômetro limpo e seco é pesado com precisão.

3. **Pesagem do Picnômetro com Solo:** A amostra de solo é adicionada ao picnômetro, e o conjunto é pesado.
4. **Adição de Água e Desaeração:** Água destilada é adicionada ao picnômetro, cobrindo o solo. O conjunto é então submetido a um processo de desaeração (geralmente por vácuo ou fervura) para remover todo o ar retido entre as partículas do solo. Este passo é crucial para garantir que o volume medido seja apenas o das partículas sólidas e da água, sem a interferência do ar.
5. **Completar com Água e Pesagem:** Após a desaeração, o picnômetro é completado com água destilada até a marca de referência e pesado novamente.
6. **Pesagem do Picnômetro Apenas com Água:** O picnômetro é esvaziado, limpo e preenchido apenas com água destilada até a marca de referência, sendo então pesado.
7. **Cálculo da Massa Específica Real dos Grãos:** A massa específica real dos grãos é calculada utilizando as massas obtidas e a massa específica da água na temperatura do ensaio. A fórmula geral é:

$$p_s = (\text{Massa do solo seco}) / (\text{Volume do solo seco})$$

O volume do solo seco é obtido indiretamente pela diferença entre o volume de água que o picnômetro comporta e o volume de água que ele comporta com o solo dentro.

Equipamentos Utilizados:

- Picnômetro (frasco de vidro com volume conhecido).
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Bomba de vácuo ou placa aquecedora (para desaeração).
- Termômetro (para medir a temperatura da água).
- Água destilada.

A massa específica real dos grãos é um parâmetro constante para um determinado tipo de solo, independentemente de seu estado de umidade ou compactação. Sua determinação precisa é fundamental para a caracterização completa do solo e para a realização de cálculos geotécnicos que subsidiam o projeto de obras de engenharia civil.

3. Ensaio de Resistência e Deformabilidade

Os ensaios de resistência e deformabilidade são cruciais na engenharia geotécnica, pois fornecem os parâmetros necessários para o dimensionamento de fundações, taludes, estruturas de contenção e outras obras que interagem com o solo. A resistência do solo refere-se à sua capacidade de suportar cargas sem sofrer ruptura, enquanto a deformabilidade

descreve o quanto o solo se deforma sob a ação dessas cargas. Ambos os aspectos são interdependentes e essenciais para garantir a segurança e o desempenho das estruturas.

Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento do solo é, sem dúvida, uma das propriedades geotécnicas mais importantes e complexas de se determinar. Ela representa a máxima tensão de cisalhamento que um solo pode suportar antes de entrar em ruptura. Em termos práticos, é a capacidade do solo de resistir a forças que tendem a fazê-lo deslizar ou escorregar. Essa propriedade é fundamental para a análise de estabilidade de taludes, cálculo da capacidade de carga de fundações, dimensionamento de muros de arrimo e avaliação da segurança de barragens [32].

A resistência ao cisalhamento é governada por dois parâmetros principais, conforme a equação de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \cdot \tan(\phi')$$

Onde: * τ_f é a tensão de cisalhamento na ruptura. * c' é a coesão efetiva do solo, que representa a parcela da resistência que independe da tensão normal. É mais significativa em solos coesivos (argilas). * σ_n' é a tensão normal efetiva atuante no plano de ruptura. * ϕ' é o ângulo de atrito interno efetivo do solo, que representa a resistência ao cisalhamento devido ao atrito entre as partículas. É mais relevante em solos granulares (areias e pedregulhos).

Esses parâmetros (c' e ϕ') são obtidos por meio de ensaios de laboratório que simulam as condições de tensão e drenagem a que o solo estará sujeito em campo. A escolha do ensaio mais adequado depende do tipo de solo, das condições de carregamento e drenagem esperadas na obra, e da finalidade da análise [33].

Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é um dos métodos mais comuns e simples para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (coesão e ângulo de atrito). Ele é realizado em uma caixa de cisalhamento, onde uma amostra de solo é submetida a uma tensão normal constante e, em seguida, cisalhada horizontalmente até a ruptura [34].

Metodologia (NBR 6484: Solo – Determinação da resistência ao cisalhamento direto):

1. **Preparação da Amostra:** Uma amostra de solo (deformada ou indeformada) é colocada em uma caixa de cisalhamento bipartida, geralmente quadrada ou circular.
2. **Aplicação da Tensão Normal:** Uma carga vertical é aplicada à amostra, simulando a tensão normal que o solo suportaria em campo.
3. **Cisalhamento:** A parte superior da caixa de cisalhamento é deslocada horizontalmente em relação à parte inferior, a uma velocidade constante, aplicando uma força de cisalhamento à amostra.

4. **Medição:** A força de cisalhamento e o deslocamento horizontal são medidos continuamente até que a amostra atinja a ruptura ou um deslocamento predefinido.
5. **Variação da Tensão Normal:** O ensaio é repetido para, no mínimo, três diferentes tensões normais. Isso permite obter múltiplos pontos de tensão normal versus tensão de cisalhamento na ruptura.
6. **Determinação dos Parâmetros:** Os resultados são plotados em um gráfico de Mohr-Coulomb (tensão de cisalhamento na ruptura vs. tensão normal). A envoltória de ruptura, que é a reta que tangencia os círculos de Mohr (ou os pontos de ruptura), permite determinar a coesão (intercepto com o eixo y) e o ângulo de atrito (inclinação da reta) [35].

Vantagens: Simplicidade de execução, custo relativamente baixo. **Desvantagens:** Não permite controlar as condições de drenagem da amostra de forma precisa, a superfície de ruptura é predeterminada, o que pode não corresponder à superfície real de ruptura do solo em campo.

Ensaio Triaxial

O ensaio triaxial é um dos ensaios mais versáteis e completos para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade do solo. Ele permite simular com maior precisão as condições de tensão e drenagem que o solo experimentará em campo. No ensaio triaxial, uma amostra cilíndrica de solo é submetida a tensões em três direções (axial e radial), e a tensão axial é aumentada até a ruptura [36].

Existem diferentes tipos de ensaios triaxiais, classificados de acordo com as condições de drenagem durante as fases de adensamento e cisalhamento:

- **Ensaio Não Consolidado Não Drenado (UU - Unconsolidated Undrained):**
 - **Condições:** Não há drenagem permitida durante a aplicação da tensão confinante (adensamento) nem durante o cisalhamento.
 - **Aplicação:** Simula situações de carregamento rápido em solos saturados de baixa permeabilidade, como argilas moles, onde não há tempo para a dissipação das poropressões. É comumente utilizado para análises de estabilidade de curto prazo [37].
 - **Resultados:** Fornece a resistência não drenada (c_u), que é um parâmetro de resistência total.
- **Ensaio Consolidado Não Drenado (CIU - Consolidated Isotropically Undrained):**
 - **Condições:** A amostra é consolidada sob uma tensão confinante isotrópica (drenagem permitida) antes do cisalhamento. Durante o cisalhamento, a drenagem não é permitida, e as poropressões são medidas.

- **Aplicação:** Simula situações onde o solo já sofreu um adensamento sob carregamento (por exemplo, peso próprio de um aterro) e, em seguida, é submetido a um carregamento rápido (por exemplo, tráfego). É utilizado para análises de estabilidade de longo prazo em argilas e para determinar parâmetros de resistência efetiva (c' e ϕ') [38].
- **Resultados:** Fornece os parâmetros de resistência efetiva (c' e ϕ') e a variação das poropressões.
- **Ensaio Consolidado Drenado (CID - Consolidated Isotropically Drained):**
 - **Condições:** A amostra é consolidada sob uma tensão confinante isotrópica (drenagem permitida) e a drenagem é permitida também durante o cisalhamento. A velocidade de cisalhamento é lenta o suficiente para garantir que não haja acúmulo de poropressões.
 - **Aplicação:** Simula situações de carregamento lento em solos de qualquer permeabilidade, ou carregamento rápido em solos de alta permeabilidade (areias). É utilizado para determinar os parâmetros de resistência efetiva (c' e ϕ') em condições drenadas [39].
 - **Resultados:** Fornece os parâmetros de resistência efetiva (c' e ϕ') diretamente, sem a necessidade de medir poropressões.

Vantagens do Ensaio Triaxial: Maior controle sobre as condições de drenagem, possibilidade de medir poropressões, simulação mais realista das condições de campo, obtenção de parâmetros de deformabilidade. **Desvantagens:** Mais complexo e demorado que o cisalhamento direto, custo mais elevado.

Ensaio de Compressão Simples (Uniaxial)

O ensaio de compressão simples, também conhecido como ensaio de compressão não confinada, é um ensaio rápido e simples utilizado para determinar a resistência à compressão de solos coesivos (argilas) que podem manter sua forma sem confinamento lateral. É particularmente útil para solos moles e saturados [40].

Metodologia (NBR 12770: Solo – Determinação da resistência à compressão simples):

1. **Preparação da Amostra:** Uma amostra cilíndrica de solo indeformada é preparada, com dimensões padronizadas (geralmente altura igual ao dobro do diâmetro).
2. **Aplicação da Carga:** A amostra é colocada em uma prensa e submetida a uma carga axial crescente, sem confinamento lateral, até a ruptura.
3. **Medição:** A carga aplicada e a deformação axial são medidas continuamente.
4. **Cálculo da Resistência:** A resistência à compressão simples (q_u) é calculada dividindo-se a carga máxima suportada pela área da seção transversal da amostra.

Vantagens: Rapidez, simplicidade, baixo custo. **Desvantagens:** Aplicável apenas a solos coesivos que não se desmoronam sem confinamento, não fornece parâmetros de coesão e ângulo de atrito separadamente, não simula condições de tensão de campo com precisão.

Em resumo, a escolha do ensaio de resistência ao cisalhamento depende das características do solo e das condições de projeto. O ensaio triaxial oferece a maior flexibilidade e precisão, enquanto o cisalhamento direto e a compressão simples são mais adequados para análises preliminares ou situações específicas.

Resistência Mecânica

A "resistência mecânica" do solo é um termo abrangente que se refere à capacidade do solo de suportar cargas e resistir a deformações e rupturas sob a ação de forças externas. Não é uma propriedade única e diretamente mensurável como a umidade ou a massa específica, mas sim um conceito que engloba diversas características do solo, quantificadas por meio de diferentes ensaios geotécnicos. Em essência, a resistência mecânica reflete a integridade estrutural do solo e sua aptidão para atuar como fundação ou material de construção [41].

Como a Resistência Mecânica é Determinada:

A resistência mecânica do solo é avaliada indiretamente através de ensaios que medem suas propriedades de resistência ao cisalhamento e à compressão. Os ensaios detalhados na seção anterior são os principais meios para quantificar essa resistência:

- **Resistência ao Cisalhamento:** Conforme discutido, os ensaios de cisalhamento direto e triaxial fornecem os parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). Esses parâmetros são a base para calcular a capacidade do solo de resistir a forças tangenciais que tendem a causar deslizamentos ou rupturas por cisalhamento. Um solo com alta coesão e/ou alto ângulo de atrito possui elevada resistência ao cisalhamento, sendo mais estável em taludes e capaz de suportar maiores cargas em fundações [42].
- **Resistência à Compressão Simples (Uniaxial):** Este ensaio, aplicável a solos coesivos, mede a capacidade do solo de suportar cargas axiais sem confinamento lateral. A resistência à compressão simples (q_u) é um indicador direto da resistência do solo à compressão e é frequentemente utilizada para estimar a resistência não drenada de argilas moles. Um valor alto de q_u indica um solo mais resistente à compressão [43].

Além desses, outros ensaios e conceitos contribuem para a avaliação da resistência mecânica:

- **Capacidade de Suporte:** É a carga máxima que um solo pode suportar sem que ocorra ruptura ou deformações excessivas. É calculada com base nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e nas características da fundação [44].
- **Índice de Suporte Califórnia (CBR):** Embora seja um ensaio de compactação e controle de qualidade, o CBR também fornece uma medida empírica da resistência do solo à

penetração, sendo amplamente utilizado no dimensionamento de pavimentos [45].

- **Resistência à Penetração (SPT, CPT):** Os ensaios de campo, como o Standard Penetration Test (SPT) e o Cone Penetration Test (CPT), fornecem índices de resistência à penetração que podem ser correlacionados com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a capacidade de suporte do solo. Um maior número de golpes (SPT) ou maior resistência de ponta (CPT) geralmente indica um solo mais resistente [46].

Relação com os Ensaios Geotécnicos:

Os ensaios geotécnicos não apenas fornecem valores numéricos para a resistência do solo, mas também ajudam a entender os mecanismos de ruptura e deformação. A escolha do ensaio mais adequado para avaliar a resistência mecânica depende do tipo de solo, das condições de carregamento e drenagem esperadas, e do tipo de estrutura a ser construída. Por exemplo, para uma fundação profunda em solo arenoso, o ângulo de atrito (determinado por ensaios triaxiais ou correlações com SPT/CPT) será o parâmetro mais relevante. Já para um aterro sobre argila mole, a coesão não drenada (obtida por ensaios UU ou compressão simples) será crucial para a análise de estabilidade de curto prazo.

Em síntese, a resistência mecânica do solo é um conceito fundamental na geotecnia, que é quantificado e compreendido por meio de uma série de ensaios de laboratório e campo. A interpretação correta desses resultados permite aos engenheiros projetar estruturas seguras e eficientes, minimizando os riscos associados ao comportamento do subsolo.

4. Ensaios de Permeabilidade e Hidráulica

Os ensaios de permeabilidade e hidráulica são essenciais para compreender como a água se move através do solo. A permeabilidade, ou condutividade hidráulica, é uma propriedade que descreve a facilidade com que a água pode fluir através dos vazios de um solo. Este conhecimento é vital para uma vasta gama de projetos de engenharia geotécnica, incluindo o dimensionamento de sistemas de drenagem, a análise de fluxo em barragens de terra, a avaliação da estabilidade de taludes sob condições de fluxo de água, e o projeto de aterros sanitários e outras estruturas de contenção de resíduos [47].

A água no solo pode exercer pressões significativas (poropressões) que afetam a resistência e a estabilidade do maciço. Portanto, entender a permeabilidade do solo permite aos engenheiros prever o comportamento da água subterrânea e projetar soluções que minimizem os riscos associados ao fluxo de água.

Permeabilidade em Laboratório e Condutividade Hidráulica

A permeabilidade do solo é quantificada pelo coeficiente de permeabilidade (k), que é uma medida da velocidade com que a água pode percolar através do solo sob um gradiente hidráulico unitário. Este coeficiente é influenciado por diversos fatores, como o tamanho e a

distribuição dos poros, a viscosidade da água, o grau de saturação e a estrutura do solo. Solos granulares (areias e pedregulhos) geralmente possuem alta permeabilidade, enquanto solos finos (siltes e argilas) são caracterizados por baixa permeabilidade [48].

Importância:

A determinação da permeabilidade é crucial para:

- **Dimensionamento de Sistemas de Drenagem:** Para projetos de sub-drenos, valas de drenagem e sistemas de rebaixamento do lençol freático, o conhecimento da permeabilidade do solo é fundamental para garantir a eficiência da remoção da água e a estabilidade das escavações [49].
- **Análise de Fluxo em Barragens:** Em barragens de terra, a permeabilidade dos materiais constituintes e da fundação é vital para a análise de fluxo de água (percolação) através do corpo da barragem e para o dimensionamento de filtros e drenos internos, prevenindo o fenômeno de piping [50].
- **Estabilidade de Taludes:** A presença de água no solo pode reduzir significativamente sua resistência ao cisalhamento devido ao aumento das poropressões. A análise da estabilidade de taludes sob condições de fluxo de água requer o conhecimento da permeabilidade do solo [51].
- **Contenção de Resíduos:** Em aterros sanitários e lagoas de tratamento, solos de baixa permeabilidade (como argilas compactadas) são utilizados como barreiras para evitar a contaminação do solo e da água subterrânea por lixiviados. A determinação precisa da permeabilidade é essencial para garantir a eficácia dessas barreiras [52].
- **Projetos de Irrigação e Agricultura:** Na agricultura, a permeabilidade do solo afeta a infiltração de água, a aeração do solo e a disponibilidade de água para as plantas, sendo um fator importante para o manejo da irrigação [53].

Metodologia (Ensaio de Laboratório):

Os ensaios de permeabilidade em laboratório são realizados em amostras de solo para determinar o coeficiente de permeabilidade (k). Os métodos mais comuns são o permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga variável, cada um adequado para diferentes tipos de solo [54]:

1. Permeâmetro de Carga Constante:

- **Aplicação:** Utilizado para solos de alta permeabilidade, como areias e pedregulhos.
- **Princípio:** A amostra de solo é colocada em um cilindro, e a água flui através dela sob uma carga hidráulica constante. O volume de água que passa pela amostra em um determinado tempo é medido.
- **Cálculo:** O coeficiente de permeabilidade é calculado pela Lei de Darcy:

$$k = (Q * L) / (A * h * t)$$

Onde: Q = volume de água percolada; L = comprimento da amostra; A = área da seção transversal da amostra; h = diferença de carga hidráulica; t = tempo.

2. Permeâmetro de Carga Variável:

- **Aplicação:** Utilizado para solos de baixa permeabilidade, como siltes e argilas.
- **Princípio:** A amostra de solo é colocada em um cilindro, e a água flui através dela a partir de um tubo capilar vertical de área conhecida. A carga hidráulica varia ao longo do tempo à medida que a água escoar pelo tubo.
- **Cálculo:** O coeficiente de permeabilidade é calculado com base na variação da carga hidráulica ao longo do tempo:

$$k = (a * L) / (A * t) * \ln(h_1 / h_2)$$

Onde: a = área da seção transversal do tubo capilar; L = comprimento da amostra; A = área da seção transversal da amostra; t = tempo; h_1 = carga hidráulica inicial; h_2 = carga hidráulica final.

Equipamentos Utilizados:

- Permeâmetro de carga constante ou de carga variável.
- Cilindros de moldagem.
- Cronômetro.
- Proveta graduada.
- Termômetro.

Os ensaios de permeabilidade fornecem dados cruciais para o projeto e a análise de obras geotécnicas que envolvem o fluxo de água, garantindo a segurança e a funcionalidade das estruturas em relação ao ambiente hídrico.

5. Ensaios de Compactação e Controle de Qualidade

A compactação do solo é um processo fundamental em obras de terraplenagem, como aterros, barragens, subleitos de estradas e fundações. Consiste em reduzir o volume de vazios do solo por meio da aplicação de energia mecânica, aumentando sua massa específica seca e, conseqüentemente, melhorando suas propriedades geotécnicas, como resistência, rigidez e impermeabilidade. Para garantir que a compactação seja realizada de forma eficiente e atenda aos requisitos do projeto, são utilizados ensaios específicos de laboratório e campo [55].

Ensaio Proctor (Normal e Modificado)

O Ensaio Proctor, desenvolvido por Ralph R. Proctor em 1933, é o método padrão de laboratório para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica seca de um solo compactado sob uma energia de compactação específica. O objetivo principal é encontrar a **umidade ótima** ($w_{ótima}$), que corresponde ao teor de umidade no qual o solo atinge sua **massa específica seca máxima** ($\gamma_{d_{máx}}$) para uma dada energia de compactação. Existem duas variações principais do ensaio: o Proctor Normal e o Proctor Modificado [56].

Importância:

O Ensaio Proctor é de suma importância para:

- **Dimensionamento e Projeto:** Os parâmetros de umidade ótima e massa específica seca máxima são utilizados no projeto de aterros e outras estruturas de terra, garantindo que o solo seja compactado de forma a atingir as propriedades desejadas de resistência e deformabilidade.
- **Controle de Qualidade em Campo:** Os resultados do ensaio Proctor servem como referência para o controle de compactação em campo. A umidade do solo no local da obra é ajustada para próximo da umidade ótima, e a massa específica seca obtida em campo é comparada com a massa específica seca máxima de laboratório para verificar o grau de compactação [57].
- **Otimização de Custos:** Ao determinar a umidade ótima, evita-se o uso excessivo de água ou a necessidade de secagem do solo, otimizando os custos e o tempo de execução da obra.
- **Prevenção de Patologias:** A compactação inadequada pode levar a recalques excessivos, instabilidade e outras patologias. O ensaio Proctor ajuda a prevenir esses problemas, garantindo a estabilidade e a durabilidade da construção.

Diferenças entre Proctor Normal e Modificado:

A principal diferença entre o Ensaio Proctor Normal e o Modificado reside na **energia de compactação aplicada**. O Proctor Modificado aplica uma energia significativamente maior do que o Proctor Normal. Essa diferença reflete a evolução das técnicas de compactação e o aumento das cargas em obras modernas [58].

Característica	Proctor Normal	Proctor Modificado
Energia de Compactação	Menor (simula equipamentos mais leves)	Maior (simula equipamentos mais pesados e modernos)
Número de Camadas	3 camadas	5 camadas
Número de Golpes	25 golpes por camada	25 golpes por camada
Altura de Queda do Soquete	30,5 cm (12 polegadas)	45,7 cm (18 polegadas)
Massa do Soquete	2,5 kg (5,5 libras)	4,5 kg (10 libras)
Resultados	Menor γ_d máx e maior w ótima	Maior γ_d máx e menor w ótima
Aplicação Típica	Obras de menor porte, aterros de baixa solicitação	Obras de grande porte, pavimentação, aeroportos

Metodologia (NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação):

O procedimento geral para ambos os ensaios envolve [59]:

- 1. Preparação da Amostra:** O solo é seco ao ar e destorroado, passando por uma peneira de 4,8 mm (ou 19 mm, dependendo da norma e do tipo de solo). Uma série de amostras é preparada com diferentes teores de umidade, variando da umidade natural para mais úmida e mais seca.
- 2. Compactação:** Cada amostra é compactada em um cilindro metálico de volume conhecido, em camadas, com um número específico de golpes de um soquete padronizado, caindo de uma altura definida (conforme a variação Normal ou Modificada).
- 3. Determinação da Massa Específica Úmida:** Após a compactação, a massa do solo úmido no cilindro é determinada, e a massa específica úmida é calculada.
- 4. Determinação da Umidade:** Uma pequena porção do solo compactado é retirada para determinação do teor de umidade.
- 5. Cálculo da Massa Específica Seca:** Com a massa específica úmida e o teor de umidade, a massa específica seca é calculada.
- 6. Curva de Compactação:** Os resultados (massa específica seca vs. teor de umidade) são plotados em um gráfico, formando a curva de compactação. O ponto mais alto da curva representa a massa específica seca máxima e a umidade ótima.

Equipamentos Utilizados:

- Cilindro de Proctor (molde).
- Soquete de compactação (Normal ou Modificado).

- Balança de precisão.
- Estufa.
- Cápsulas para determinação de umidade.
- Peneiras.

O Ensaio Proctor é uma ferramenta indispensável para o controle de qualidade em obras de terraplenagem, garantindo que o solo seja compactado de forma a atingir as propriedades geotécnicas necessárias para a segurança e o desempenho da estrutura.

Ensaio CBR (California Bearing Ratio)

O Ensaio CBR (California Bearing Ratio), ou Índice de Suporte Califórnia (ISC), é um ensaio empírico de penetração utilizado para avaliar a capacidade de suporte de solos e materiais granulares que serão empregados como subleito, sub-base e base de pavimentos. Desenvolvido pelo Departamento de Estradas da Califórnia, este ensaio é amplamente utilizado em todo o mundo para o dimensionamento de pavimentos rodoviários e aeroportuários [60].

Importância:

O Ensaio CBR é de fundamental importância para:

- **Dimensionamento de Pavimentos:** O valor do CBR é um dos principais parâmetros de entrada em métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Um CBR mais alto indica um material com maior capacidade de suporte, permitindo a redução da espessura das camadas do pavimento e, conseqüentemente, a otimização dos custos [61].
- **Seleção de Materiais:** Ajuda na seleção de solos e materiais granulares adequados para as diferentes camadas do pavimento, garantindo que possuam a resistência necessária para suportar as cargas do tráfego.
- **Controle de Qualidade:** Durante a execução da obra, o ensaio CBR é utilizado para verificar se os materiais compactados em campo atingem a capacidade de suporte especificada em projeto, assegurando a qualidade e a durabilidade do pavimento [62].
- **Avaliação de Subleitos Existentes:** Permite avaliar a capacidade de suporte de subleitos naturais ou existentes em projetos de reabilitação de pavimentos.

Princípio do Ensaio:

O ensaio CBR mede a relação entre a pressão necessária para que um pistão padronizado penetre uma amostra de solo a uma determinada profundidade (2,54 mm e 5,08 mm) e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre uma brita padrão (material de referência) nas mesmas profundidades. O resultado é expresso em porcentagem [63].

$$\text{CBR (\%)} = (\text{Pressão de penetração da amostra} / \text{Pressão de penetração da brita padrão}) \times 100$$

Os valores de pressão de penetração da brita padrão são fixos: * Para 2,54 mm (0,1 polegada): 6,9 MPa (1000 psi) * Para 5,08 mm (0,2 polegadas): 10,3 MPa (1500 psi)

Metodologia (NBR 9895: Solo – Ensaio de CBR):

O ensaio CBR é realizado em laboratório, geralmente em amostras de solo compactadas na umidade ótima e massa específica seca máxima determinadas pelo Ensaio Proctor. O procedimento envolve [64]:

1. **Preparação da Amostra:** O solo é compactado em um molde cilíndrico de dimensões padronizadas, utilizando a energia de compactação do Proctor Normal ou Modificado, dependendo da aplicação. Geralmente, são moldadas três amostras com diferentes teores de umidade para cada energia de compactação.
2. **Imersão (Opcional):** Para simular condições de saturação que podem ocorrer em campo, as amostras podem ser imersas em água por um período de 4 dias. Durante a imersão, a expansão da amostra é medida.
3. **Ensaio de Penetração:** A amostra é colocada em uma prensa, e um pistão cilíndrico é cravado no centro da amostra a uma velocidade constante (1,27 mm/min). A carga necessária para atingir penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm é registrada.
4. **Cálculo do CBR:** O CBR é calculado para ambas as penetrações (2,54 mm e 5,08 mm). O maior valor é geralmente adotado como o CBR do material, a menos que o valor de 5,08 mm seja consistentemente maior e justificado.

Equipamentos Utilizados:

- Prensa de CBR.
- Molde de CBR com sobrecarga.
- Pistão de penetração.
- Extrator de amostras.
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Cápsulas para determinação de umidade.
- Tanque de imersão (se aplicável).
- Relógio comparador para medir expansão.

O Ensaio CBR é uma ferramenta indispensável na engenharia de pavimentos, fornecendo um índice prático e confiável da capacidade de suporte dos materiais, o que é essencial para o

projeto e a construção de estradas e aeroportos seguros e duráveis.

6. Ensaio Específicos de Comportamento

Além dos ensaios de caracterização, resistência e permeabilidade, existem ensaios específicos que são cruciais para compreender o comportamento de solos com características particulares, como solos compressíveis, colapsíveis ou expansivos. Esses ensaios fornecem parâmetros essenciais para o projeto de fundações e outras estruturas em terrenos que apresentam desafios geotécnicos específicos.

Adensamento (Ensaio Edométrico)

O ensaio de adensamento, também conhecido como ensaio edométrico, é um dos mais importantes ensaios de laboratório para solos finos (siltes e argilas) saturados. Ele permite determinar a compressibilidade e a taxa de adensamento do solo sob carregamento vertical, em condições de deformação lateral confinada. O ensaio simula o comportamento de um solo que está sendo carregado por uma estrutura (como um aterro ou um edifício) e que se deforma principalmente na direção vertical, com pouca ou nenhuma deformação lateral [65].

Importância:

O ensaio de adensamento é fundamental para:

- **Previsão de Recalques:** É o principal ensaio para prever a magnitude e a taxa de recalques (assentamentos) de fundações e aterros sobre solos compressíveis. Os parâmetros obtidos permitem calcular o recalque total e o tempo necessário para que ele ocorra [66].
- **Dimensionamento de Fundações:** O conhecimento da compressibilidade do solo é crucial para o dimensionamento de fundações, especialmente em solos moles, onde recalques excessivos podem comprometer a integridade da estrutura.
- **Análise de Estabilidade de Aterros:** Em aterros construídos sobre solos moles, o adensamento do subleito pode levar a recalques diferenciais e instabilidades. O ensaio edométrico fornece os parâmetros para analisar esses fenômenos.
- **Determinação da Pressão de Pré-Adensamento:** O ensaio permite identificar a pressão máxima que o solo suportou no passado (pressão de pré-adensamento), o que é um indicador importante de sua história geológica e de seu comportamento sob novas cargas.
- **Cálculo de Parâmetros de Compressibilidade:** Fornece parâmetros como o índice de vazios (e), o coeficiente de compressão (C_c), o coeficiente de adensamento (C_v) e o coeficiente de permeabilidade (k), que são utilizados em análises de recalque e estabilidade [67].

Metodologia (NBR 12051: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional):

O ensaio de adensamento é realizado em um aparelho chamado edômetro. O procedimento geral envolve [68]:

1. **Preparação da Amostra:** Uma amostra indeformada de solo é cuidadosamente colocada em um anel metálico rígido (anel edométrico), que confina a amostra lateralmente. Placas porosas são colocadas nas faces superior e inferior da amostra para permitir a drenagem da água.
2. **Aplicação de Cargas Incrementais:** A amostra é submetida a uma série de cargas verticais incrementais, geralmente dobrando a carga a cada estágio (ex: 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, etc.). Cada incremento de carga é mantido por um período de 24 horas (ou até que a deformação cesse), permitindo que o solo adense e a água seja expulsa dos vazios.
3. **Medição das Deformações:** A deformação vertical da amostra é medida continuamente ao longo do tempo para cada incremento de carga, utilizando um relógio comparador ou transdutor de deslocamento.
4. **Descarregamento:** Após atingir a carga máxima desejada, a amostra é descarregada em estágios, também medindo as deformações.
5. **Curvas de Adensamento:** Os resultados são plotados em curvas de adensamento (deformação vs. tempo para cada carga) e curvas de compressão (índice de vazios vs. logaritmo da tensão vertical). A partir dessas curvas, são determinados os parâmetros de compressibilidade e adensamento.

Equipamentos Utilizados:

- Edômetro (com anel edométrico, placas porosas, célula de carga e sistema de aplicação de carga).
- Relógio comparador ou transdutor de deslocamento.
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Cápsulas para determinação de umidade.

O ensaio de adensamento é uma ferramenta poderosa para a previsão do comportamento de solos compressíveis, sendo indispensável para o projeto seguro e econômico de estruturas sobre esses tipos de solos.

Colapso (Ensaio Edométrico de Colapso)

Solos colapsíveis são solos não saturados que apresentam uma estrutura metaestável, ou seja, uma estrutura que se mantém estável em seu estado natural (não saturado), mas que sofre uma redução brusca de volume (colapso) quando saturada sob uma determinada carga. Esse

fenômeno pode causar recalques significativos e danos severos a estruturas construídas sobre esses solos, mesmo sob cargas relativamente baixas. O ensaio edométrico de colapso é projetado para identificar e quantificar o potencial de colapso desses solos [69].

Importância:

A identificação e a quantificação do potencial de colapso são cruciais para:

- **Prevenção de Recalques Danosos:** O colapso do solo pode levar a recalques diferenciais e repentinos, causando fissuras e até o colapso de edificações. O ensaio permite prever esse comportamento e adotar medidas preventivas, como a umedecimento prévio do solo, a compactação ou a substituição do material [70].
- **Dimensionamento de Fundações:** Em áreas com ocorrência de solos colapsíveis, o projeto de fundações deve considerar o potencial de colapso. O ensaio fornece os parâmetros para avaliar a necessidade de fundações mais profundas ou de tratamentos do solo.
- **Análise de Estabilidade:** O colapso pode afetar a estabilidade de taludes e aterros, especialmente em regiões com variações sazonais de umidade. O ensaio auxilia na análise de risco e no planejamento de intervenções.
- **Otimização de Custos:** Identificar solos colapsíveis na fase de investigação permite planejar soluções mais eficazes e econômicas, evitando surpresas e custos adicionais durante a construção.

Metodologia (Ensaio Edométrico de Colapso):

O ensaio de colapso é uma variação do ensaio edométrico e pode ser realizado de diferentes maneiras, sendo o método do ensaio duplo ou do ensaio simples os mais comuns. A metodologia geral envolve [71]:

1. **Preparação da Amostra:** Uma amostra indeformada de solo é cuidadosamente colocada em um anel edométrico, preservando sua umidade natural.
2. **Aplicação de Cargas em Condição Não Saturada:** A amostra é submetida a uma série de cargas verticais incrementais, em seu estado não saturado, até atingir uma tensão que simule a carga da estrutura ou uma tensão predefinida. As deformações são registradas.
3. **Saturação da Amostra:** Após a estabilização das deformações sob a carga aplicada, a amostra é subitamente saturada com água, mantendo a carga constante. O colapso do solo é observado como uma deformação vertical brusca.
4. **Continuação do Carregamento (Opcional):** Após o colapso, o carregamento pode ser continuado para obter a curva de compressão do solo saturado.
5. **Cálculo do Potencial de Colapso:** O potencial de colapso é calculado como a porcentagem de deformação vertical que ocorre após a saturação da amostra sob a carga

aplicada.

Equipamentos Utilizados:

- Edômetro (com anel edométrico, placas porosas, célula de carga e sistema de aplicação de carga).
- Relógio comparador ou transdutor de deslocamento.
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Cápsulas para determinação de umidade.

O ensaio edométrico de colapso é uma ferramenta indispensável para a avaliação de solos problemáticos, permitindo que os engenheiros tomem decisões informadas para garantir a segurança e a estabilidade de obras em regiões com ocorrência de solos colapsíveis.

Expansão (Ensaio Edométrico de Expansão)

Solos expansivos são solos argilosos que apresentam a capacidade de aumentar significativamente de volume quando em contato com a água e de contrair quando secam. Esse comportamento é devido à presença de minerais argilosos específicos, como a montmorilonita, que possuem uma estrutura cristalina capaz de absorver grandes quantidades de água entre suas camadas. As variações volumétricas podem gerar pressões consideráveis nas estruturas, causando recalques diferenciais, fissuras e danos severos a fundações, pisos e pavimentos. O ensaio edométrico de expansão é utilizado para quantificar o potencial de expansão desses solos [72].

Importância:

A identificação e a quantificação do potencial de expansão são cruciais para:

- **Prevenção de Danos Estruturais:** A expansão do solo pode levantar fundações, causar fissuras em paredes e pisos, e danificar pavimentos. O ensaio permite prever esse comportamento e projetar soluções que mitiguem os efeitos da expansão, como a remoção e substituição do solo expansivo, a estabilização química ou o uso de fundações profundas [73].
- **Dimensionamento de Fundações:** Em áreas com ocorrência de solos expansivos, o projeto de fundações deve considerar as pressões de expansão e as deformações resultantes. O ensaio fornece os parâmetros para avaliar a necessidade de medidas especiais de projeto.
- **Análise de Estabilidade de Taludes:** A variação de umidade em taludes construídos com solos expansivos pode levar a ciclos de expansão e contração, comprometendo a estabilidade a longo prazo.

- **Otimização de Custos:** Identificar solos expansivos na fase de investigação permite planejar soluções mais eficazes e econômicas, evitando reparos caros no futuro.

Metodologia (Ensaio Edométrico de Expansão):

O ensaio de expansão é uma variação do ensaio edométrico e pode ser realizado de diferentes maneiras, sendo o método da pressão de expansão ou da expansão livre os mais comuns. A metodologia geral envolve [74]:

1. **Preparação da Amostra:** Uma amostra indeformada de solo é cuidadosamente colocada em um anel edométrico, preservando sua umidade natural.
2. **Aplicação de Carga (Opcional):** Uma pequena carga vertical pode ser aplicada para simular o peso próprio da estrutura ou para garantir o contato entre a amostra e o sistema de medição.
3. **Saturação da Amostra:** A amostra é subitamente saturada com água, permitindo que ela absorva água e expanda. A deformação vertical é medida continuamente.
4. **Medição da Expansão:** A expansão é medida como a porcentagem de aumento na altura da amostra em relação à sua altura inicial, após a saturação.
5. **Determinação da Pressão de Expansão (se aplicável):** Em alguns casos, a amostra é impedida de expandir, e a pressão necessária para conter essa expansão é medida. Essa é a pressão de expansão.

Equipamentos Utilizados:

- Edômetro (com anel edométrico, placas porosas, célula de carga e sistema de aplicação de carga).
- Relógio comparador ou transdutor de deslocamento.
- Balança de precisão.
- Estufa.
- Cápsulas para determinação de umidade.

O ensaio edométrico de expansão é uma ferramenta essencial para a avaliação de solos problemáticos, permitindo que os engenheiros projetem e construam com segurança em áreas com ocorrência de solos expansivos, minimizando os riscos de danos estruturais e garantindo a longevidade das obras.

7. Interpretação de Resultados e Aplicação em Projetos

A coleta de dados por meio dos ensaios geotécnicos é apenas a primeira etapa. O verdadeiro valor desses ensaios reside na correta interpretação dos resultados e na sua aplicação inteligente no projeto e na execução de obras de engenharia. A interpretação exige não apenas

conhecimento técnico aprofundado, mas também experiência e um senso crítico para correlacionar os dados de laboratório e campo com as condições reais do subsolo e as necessidades do empreendimento [75].

Como Utilizar os Dados dos Ensaios

Os dados obtidos nos ensaios geotécnicos são a base para diversas análises e decisões de projeto:

- **Classificação e Caracterização do Solo:** Os resultados de granulometria, limites de Atterberg, umidade natural e massa específica são utilizados para classificar o solo de acordo com sistemas padronizados (como o SUCS). Essa classificação fornece uma compreensão inicial do comportamento geral do solo e auxilia na seleção de métodos de projeto e construção [76].
- **Dimensionamento de Fundações:** Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito), compressibilidade (índice de vazios, coeficiente de compressão) e capacidade de suporte são diretamente empregados no dimensionamento de fundações rasas (sapatas, radier) e profundas (estacas, tubulões). A escolha do tipo de fundação e suas dimensões dependem da capacidade de carga do solo e dos recalques esperados [77].
- **Análise de Estabilidade de Taludes e Encostas:** Os parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade são cruciais para analisar a estabilidade de taludes naturais e de corte/aterro. Modelos numéricos e métodos de equilíbrio limite utilizam esses dados para calcular o fator de segurança e projetar soluções de estabilização, como muros de arrimo, cortinas atirantadas ou sistemas de drenagem [78].
- **Projeto de Obras de Terra:** Em aterros, barragens de terra e outras obras que utilizam o solo como material de construção, os resultados dos ensaios de compactação (Proctor) e permeabilidade são essenciais. Eles garantem que o material seja compactado adequadamente para atingir a densidade e a impermeabilidade desejadas [79].
- **Previsão de Recalques:** Os dados de adensamento permitem prever a magnitude e a taxa de recalques de estruturas sobre solos compressíveis. Essa previsão é vital para evitar danos estruturais e garantir o desempenho a longo prazo da obra [80].
- **Avaliação de Solos Problemáticos:** Ensaios específicos, como os de colapso e expansão, identificam solos com comportamentos anômalos. A interpretação desses resultados leva à adoção de medidas corretivas ou preventivas, como a estabilização do solo ou o uso de fundações especiais [81].
- **Controle de Qualidade na Execução:** Durante a fase de construção, os ensaios de campo (como o SPT para verificação de compactação ou o CBR para pavimentos) e os ensaios de laboratório de controle de qualidade verificam se as propriedades do solo e dos materiais estão em conformidade com o projeto. Isso assegura que a obra está sendo

executada conforme o planejado e que os requisitos de segurança e desempenho estão sendo atendidos [82].

Estudos de Caso

Para ilustrar a aplicação prática dos ensaios geotécnicos, apresentamos alguns estudos de caso hipotéticos que demonstram como a interpretação dos resultados impacta as decisões de projeto:

Estudo de Caso 1: Projeto de Fundação para Edifício em Solo Argiloso Mole

- **Cenário:** Um novo edifício de múltiplos andares será construído em uma área com histórico de solos argilosos moles e compressíveis.
- **Ensaios Realizados:** Sondagens SPT, ensaios de laboratório de umidade natural, granulometria, limites de Atterberg, ensaios triaxiais UU e CIU, e ensaios de adensamento.
- **Resultados Chave:** SPT com baixos N (indicando solo mole), altos LL e IP (argila de alta plasticidade), e ensaios de adensamento mostrando alta compressibilidade e longos tempos de adensamento.
- **Interpretação e Aplicação:** A interpretação dos resultados revelou que fundações rasas resultariam em recalques excessivos e diferenciais. Os parâmetros de resistência (c_u e c_{ast} ; ϕ_{ast}) e compressibilidade (C_c , C_v) obtidos nos ensaios triaxiais e de adensamento foram utilizados para dimensionar estacas profundas. Além disso, a previsão de recalques a longo prazo indicou a necessidade de pré-carregamento do terreno ou de um sistema de monitoramento de recalques durante a vida útil do edifício.

Estudo de Caso 2: Estabilidade de Talude em Rodovia

- **Cenário:** Um talude de corte em uma rodovia existente apresenta sinais de instabilidade após um período de chuvas intensas.
- **Ensaios Realizados:** Sondagens SPT, ensaios de laboratório de umidade natural, granulometria, limites de Atterberg, ensaios de cisalhamento direto e triaxial CID, e ensaios de permeabilidade.
- **Resultados Chave:** A análise granulométrica e os limites de Atterberg classificaram o solo como um silte argiloso. Os ensaios de cisalhamento direto e triaxial CID forneceram baixos valores de coesão e ângulo de atrito. Os ensaios de permeabilidade indicaram uma permeabilidade moderada, sugerindo que a água poderia se acumular no talude.
- **Interpretação e Aplicação:** A interpretação dos dados revelou que a baixa resistência ao cisalhamento do solo, combinada com a infiltração de água (aumentando as poropressões e reduzindo a resistência efetiva), estava comprometendo a estabilidade do talude. Foi projetada uma solução de estabilização que incluiu a instalação de drenos

profundos para reduzir as poropressões e a construção de um muro de gabiões na base do talude para aumentar o fator de segurança.

Estudo de Caso 3: Projeto de Pavimento em Área Industrial

- **Cenário:** Projeto de um novo pátio de estocagem em uma área industrial, que será submetido a cargas pesadas de veículos e equipamentos.
- **Ensaio Realizados:** Sondagens SPT, ensaios de laboratório de umidade natural, granulometria, limites de Atterberg, ensaio Proctor e ensaio CBR.
- **Resultados Chave:** Os ensaios de caracterização classificaram o subleito como um solo argiloso. O ensaio Proctor determinou a umidade ótima e a massa específica seca máxima. O ensaio CBR resultou em um valor baixo para o subleito natural.
- **Interpretação e Aplicação:** Com base no baixo CBR do subleito, foi determinado que uma camada de reforço seria necessária. O projeto do pavimento foi dimensionado utilizando o método do CBR, especificando a espessura das camadas de sub-base e base com materiais granulares de maior CBR, e a necessidade de controle rigoroso da compactação em campo para garantir que as camadas atingissem o grau de compactação e o CBR especificados.

Esses estudos de caso demonstram que a interpretação dos resultados dos ensaios geotécnicos é um processo iterativo e crítico, que integra o conhecimento das propriedades do solo com os princípios da mecânica dos solos e as necessidades do projeto. Uma interpretação cuidadosa e experiente é a chave para o sucesso e a segurança de qualquer empreendimento de engenharia civil.

8. Normas Técnicas e Boas Práticas em Ensaio Geotécnicos

A engenharia geotécnica, por lidar com a segurança e a estabilidade de estruturas que interagem com o solo, é uma área que exige rigor técnico e conformidade com padrões estabelecidos. As normas técnicas desempenham um papel crucial nesse contexto, fornecendo diretrizes, metodologias e requisitos para a execução de ensaios, o projeto e a construção de obras. Além das normas, a adoção de boas práticas e a busca por certificações e credenciamentos de laboratórios são essenciais para garantir a qualidade e a confiabilidade dos serviços geotécnicos [83].

Principais Normas Brasileiras (ABNT)

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão responsável pela normalização técnica. Diversas normas da ABNT são diretamente aplicáveis aos ensaios geotécnicos, garantindo a padronização dos procedimentos e a comparabilidade dos resultados. Algumas das normas mais relevantes incluem:

- **ABNT NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio:** Essencial para investigações de campo, estabelece o procedimento para a execução do Standard Penetration Test (SPT), um dos ensaios in situ mais utilizados no Brasil para caracterização e estimativa da resistência do solo [84].
- **ABNT NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização:** Define os procedimentos para a preparação de amostras de solo em laboratório antes da realização de ensaios, garantindo a representatividade e a homogeneidade do material [85].
- **ABNT NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica aparente:** Estabelece a metodologia para a determinação da massa específica aparente do solo, tanto úmida quanto seca, fundamental para o controle de compactação e cálculos de tensões [86].
- **ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez:** Descreve o procedimento para a determinação do Limite de Liquidez (LL) de solos, utilizando o aparelho de Casagrande, um dos Limites de Atterberg [87].
- **ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade:** Apresenta a metodologia para a determinação do Limite de Plasticidade (LP) de solos, por meio do método do rolamento [88].
- **ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica:** Detalha os procedimentos para a análise granulométrica de solos, incluindo peneiramento e sedimentação, para determinar a distribuição de tamanhos das partículas [89].
- **ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação:** Abrange os procedimentos para a realização dos ensaios Proctor Normal e Modificado, que determinam a umidade ótima e a massa específica seca máxima do solo para fins de compactação [90].
- **ABNT NBR 9895: Solo – Ensaio de CBR:** Especifica o método para a determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e da expansão de solos, essencial para o dimensionamento de pavimentos [91].
- **ABNT NBR 12051: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional:** Descreve o procedimento para o ensaio edométrico, que determina a compressibilidade e a taxa de adensamento de solos finos [92].
- **ABNT NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos por meio de permeâmetro de carga variável:** Estabelece a metodologia para a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos de baixa permeabilidade em laboratório [93].

É fundamental que os profissionais e laboratórios de geotecnia sigam rigorosamente essas normas, pois elas garantem a qualidade, a segurança e a validade dos resultados obtidos, que servirão de base para decisões de projeto de grande impacto.

Certificações e Credenciamentos de Laboratórios

Além da conformidade com as normas técnicas, a busca por certificações e credenciamentos é um diferencial importante para laboratórios de ensaios geotécnicos. Essas acreditações atestam a competência técnica do laboratório, a qualidade de seus processos e a confiabilidade de seus resultados [94].

No Brasil, o principal órgão responsável pela acreditação de laboratórios é o **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)**, por meio da Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre). A acreditação pela ISO/IEC 17025 é o reconhecimento formal da competência de um laboratório para realizar ensaios específicos [95].

Benefícios da Certificação/Credenciamento:

- **Confiança e Credibilidade:** Laboratórios acreditados transmitem maior confiança aos clientes e ao mercado, pois seus resultados são reconhecidos como tecnicamente válidos e confiáveis.
- **Reconhecimento Internacional:** A acreditação pela ISO/IEC 17025 é um padrão internacional, facilitando o reconhecimento dos resultados em outros países.
- **Melhoria Contínua:** O processo de acreditação exige a implementação de um sistema de gestão da qualidade robusto, que promove a melhoria contínua dos processos e a competência técnica do laboratório.
- **Redução de Riscos:** A garantia da qualidade dos ensaios minimiza os riscos de erros de projeto e execução, contribuindo para a segurança das obras.
- **Vantagem Competitiva:** Laboratórios acreditados se destacam no mercado, sendo preferidos por clientes que buscam serviços de alta qualidade e confiabilidade.

Ao contratar um laboratório para a realização de ensaios geotécnicos, é altamente recomendável verificar suas certificações e credenciamentos, garantindo que os resultados obtidos sejam de fato confiáveis e atendam aos mais altos padrões de qualidade. A combinação de normas técnicas rigorosas e laboratórios acreditados é a base para uma engenharia geotécnica de excelência.

9. Conclusão

Este "Guia Completo de Ensaios Geotécnicos: Da Caracterização ao Controle de Qualidade" buscou apresentar uma visão abrangente e aprofundada sobre a importância e a aplicação dos diversos ensaios geotécnicos na engenharia civil. Desde a caracterização básica dos solos até a determinação de parâmetros complexos de resistência, deformabilidade e comportamento específico, cada ensaio desempenha um papel insubstituível na garantia da segurança, estabilidade e durabilidade das obras.

Reiteramos que o conhecimento do subsolo não é um luxo, mas uma necessidade imperativa. A realização de investigações geotécnicas adequadas, a interpretação criteriosa de seus resultados e a aplicação desses dados no projeto são pilares para o sucesso de qualquer empreendimento. A Mafrigeo, com sua expertise e compromisso com a excelência, está preparada para oferecer soluções completas em ensaios e consultoria geotécnica, contribuindo para que seus projetos sejam construídos sobre bases sólidas e seguras.

Esperamos que este e-book sirva como uma ferramenta valiosa para profissionais, estudantes e todos aqueles que buscam aprimorar seus conhecimentos em geotecnia. A constante evolução da engenharia exige que estejamos sempre atualizados e que valorizemos a ciência do solo como um alicerce para o desenvolvimento sustentável e seguro de nossa infraestrutura.

Referências

- [1] Sondaoeste. *A Importância dos Projetos Geotécnicos na Engenharia Civil*. Disponível em: <https://www.sondaoeste.com.br/post/a-import%C3%A2ncia-dos-projetos-geot%C3%A9cnicos-na-engenharia-civil>
- [2] Engeduca. *A importância do conhecimento em geotecnia para engenheiros de obras*. Disponível em: <https://engeduca.com/a-importancia-do-conhecimento-em-geotecnia-para-engenheiros-de-obras/>
- [3] Geoguima. *A Importância dos Ensaios Geotécnicos para a Construção Civil*. Disponível em: <https://geoguima.com.br/a-importancia-dos-ensaios-geotecnicos-para-a-construcao-civil/>
- [4] APL Engenharia. *Investigações Geotécnicas*. Disponível em: <https://blog.apl.eng.br/investigacoes-geotecnicas/>
- [5] Suporte Solos. *A Investigação Geológica-Geotécnica de Laboratório - Ensaios de Caracterização*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/a-investigacao-geologica-geotecnica-de-laboratorio-ensaios-de-caracterizacao/157/>
- [6] Geositu. *Teor de umidade em solo*. Disponível em: <https://geositu.com.br/servicos/teor-de-umidade-em-solo/>
- [7] Suporte Solos. *Determinação do Teor de Umidade - Ensaios Geotécnicos*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/determinacao-do-teor-de-umidade-ensaios-geotecnicos/65/>
- [8] Faw7 Energy. *Ensaio de Umidade natural*. Disponível em: <https://www.faw7.com.br/geotecnia/umidade-natural>

- [9] Meter Group. *O guia completo do pesquisador sobre umidade do solo*. Disponível em: <https://metergroup.com/br/education-guides/the-researchers-complete-guide-to-soil-moisture/>
- [10] Virtuaslab. *DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NATURAL*. Disponível em: https://www.virtuaslab.net/ualabs/ualab/116/img_conteudo/sumarioteorico/pdf/arquivo.pdf?modo=embed
- [11] Suporte Solos. *Análise Granulométrica do Solo - Ensaios Geotécnicos - O Objetivo*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-o-objetivo-e-as-fracoes-de-solo/71/>
- [12] Estude Engenharia. *ENSAIO DE GRANULOMETRIA SIMPLES POR PENEIRAMENTO*. Disponível em: <https://estudeengenharia.com/solos-ensaio-de-granulometria-simples-por-peneiramento/>
- [13] Tecfield Engenharia. *Ensaio de granulometria de solos*. Disponível em: <https://www.tecfieldengenharia.com.br/ensaio-granulometria-solos>
- [14] SP Labor. *A Importância da Granulometria do Solo: Entendendo Mais*. Disponível em: <https://www.splabor.com.br/blog/peneiras/a-importancia-da-granulometria-do-solo-entendendo-mais/>
- [15] DNIT. *Solos - análise granulométrica por peneiramento - Norma rodoviária*. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner me 080 94.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner%20me%20080%2094.pdf)
- [16] Geothra. *Limites de Atterberg*. Disponível em: <https://geothra.com.br/ensaios-laboratoriais/limites-de-atterberg/>
- [17] Suporte Solos. *Ensaios de Limites - Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP)*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/ensaios-de-limites-limite-de-liquidez-ll-e-de-plasticidade-lp/197/>
- [18] Guia da Engenharia. *Limite de liquidez e limite de plasticidade*. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/limite-liquidez-plasticidade/>
- [19] Mantovani Geotecnia. *Limite de Plasticidade*. Disponível em: <https://www.mantovani.eng.br/limite-de-plasticidade>
- [20] Suporte Solos. *Consistência do Solo - Ensaios Geotécnicos*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/consistencia-do-solo-ensaios-geotecnicos-ensaios-de-limite-de-liquidez-ll-e-de-plasticidade-lp/33/>
- [21] DNIT. *Solos - determinação do limite de liquidez - método de referência*. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de->

[normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_122_94.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_122_94.pdf)

[22] DNIT. *Solos - determinação do limite de plasticidade*. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_082_94.pdf

[23] Guia da Engenharia. *Limite de liquidez e limite de plasticidade*. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/limite-liquidez-plasticidade/>

[24] CEAG Ensaios Geotécnicos. *Massa específica do solo*. Disponível em: <https://www.ceaglab.com.br/massa-especifica-do-solo>

[25] Geothra. *Massa Específica Aparente do Solo*. Disponível em: <https://geothra.com.br/ensaios-laboratoriais/massa-especifica-aparente-do-solo/>

[26] LTEC. *Massa Específica Aparente do Solo – Determinação em Laboratório*. Disponível em: <https://ltec.eng.br/massa-especifica-aparente-do-solo-determinacao-em-laboratorio-nbr-16867-9604/>

[27] ABNT NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica aparente.

[28] ABNT NBR 16867: Solo – Determinação da massa específica aparente in situ.

[29] LTEC. *Massa específica dos grãos – ABNT NBR 6458*. Disponível em: <https://ltec.eng.br/massa-especifica-dos-graos-abnt-nbr-6458/>

[30] Support Solo Sondagens. *MASSA ESPECIFICA DOS GRÃOS (MESP)*. Disponível em: <https://site.supportsondagens.com.br/massa-especifica-dos-gros-mesp/>

[31] ABNT NBR 6508: Solo – Determinação da massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm.

[32] Contenco. *Resistência ao Cisalhamento em Solos*. Disponível em: <https://contenco.com.br/cisalhamento-em-solos/>

[33] Effyia. *Parâmetro de resistência ao cisalhamento de um solo*. Disponível em: <https://effyia.com.br/parametro-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-um-solo-quando-um-solo-se-rompe/>

[34] Testesolo. *Ensaio de Cisalhamento Direto: Procedimento e Aplicações na Engenharia Geotécnica*. Disponível em: <https://testesolo.com.br/blog/ensaio-de-cisalhamento-direto-procedimento-e-aplicacoes-na-engenharia-geotecnica/>

[35] Biopdi. *Ensaio de cisalhamento direto*. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-cisalhamento-direto/>

- [36] Suporte Solos. *O Ensaio Triaxial: Explicação e Procedimentos*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/o-ensaio-triaxial-explicacao-e-procedimentos/162/>
- [37] Geothra. *Ensaio Triaxial UU*. Disponível em: <https://geothra.com.br/ensaios-laboratoriais/ensaio-triaxial-uu/>
- [38] Geothra. *Ensaio Triaxial CIU*. Disponível em: <https://geothra.com.br/ensaios-laboratoriais/ensaio-triaxial-ciu/>
- [39] Geothra. *Ensaio Triaxial CD*. Disponível em: <https://geothra.com.br/ensaios-laboratoriais/ensaio-triaxial-cd/>
- [40] Suporte Solos. *Ensaio de Compressão Simples*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/ensaio-de-compressao-simples/161/>
- [41] SciELO. *Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo*. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/JYMz74ZbyFkrJqkJ7XKn8mD/>
- [42] Academia da Mineração. *Resistência ao cisalhamento do solo*. Disponível em: <https://acadmin.com.br/2023/06/resistencia-ao-cisalhamento-do-solo/>
- [43] Suporte Solos. *Propriedades Mecânicas dos Solos: Módulo de Elasticidade e Deformabilidade*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/conteudo-tecnico-propriedades-mecanicas-dos-solos-modulo-de-elasticidade-e-deformabilidade/339/>
- [44] APL Engenharia. *Projetos Geotécnicos*. Disponível em: <https://www.apl.eng.br/geotecnia/projetos-geotecnicos>
- [45] Testesolo. *Índice de Suporte Califórnia (CBR): Metodologia e Importância na Engenharia de Pavimentos*. Disponível em: <https://testesolo.com.br/blog/indice-de-suporte-california-cbr-metodologia-e-importancia-na-engenharia-de-pavimentos/>
- [46] Guia da Engenharia. *Ensaio SPT: aprenda como interpretar os resultados*. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/resultado-ensaio-spt/>
- [47] Testesolo. *Teste de permeabilidade de solo*. Disponível em: <https://www.ceaglab.com.br/teste-permeabilidade-solo>
- [48] Falker. *Condutividade Hidráulica do Solo*. Disponível em: <https://www.falker.com.br/br/blog-condutividade-hidraulica-do-solo>
- [49] Aeroengenharia. *Quais são os 5 benefícios do Índice de Permeabilidade?*. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/glossario/quais-sao-os-5-beneficios-do-indice-de-permeabilidade/>

- [50] Suporte Solos. *Ensaio Permeabilidade do Solo - Norma NBR 14545*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/ensaio-permeabilidade-do-solo-ensaio-de-carga-variavel-conheca-mais-detalhes-sobre-este-ensaio-norma-nbr-14545/193/>
- [51] Editora Realize. *ENTENDENDO A PERMEABILIDADE DOS SOLOS*. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/20938>
- [52] HCGEO. *Ensaio de permeabilidade em laboratório*. Disponível em: <https://www.hcgeo.com.br/ensaio-permeabilidade-laboratorio>
- [53] Embrapa. *Correlações entre a permeabilidade e os atributos físicos do solo da*. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/FrXw9Yb5zsrLM46JTfv768z/>
- [54] LAGETEC. *DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO SOLO*. Disponível em: <http://www.lagetec.ufc.br/wp-content/uploads/2016/03/Ensaio-para-determina%C3%A7%C3%A3o-da-permeabilidade-de-material-granular.pdf>
- [55] Suporte Solos. *Compactação de Solos - Ensaios Geotécnicos*. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/compactacao-de-solos-ensaios-geotecnicos-o-ensaio-e-as-energias-de-compactacao/68/>
- [56] Infratech. *Técnicas de Ensaio de compactação Proctor*. Disponível em: <https://infratech.eng.br/tecnicas-de-ensaio-de-compactacao-proctor/>
- [57] Locadora Equiloc. *Proctor: Como realizar o ensaio de compactação do solo?*. Disponível em: <https://locadoraequiloc.com.br/blog/proctor/>
- [58] CEAG. *Ensaio proctor normal para solos*. Disponível em: <https://www.ceaglab.com.br/ensaio-proctor-normal-solos>
- [59] ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.
- [60] Testesolo. *Índice de Suporte Califórnia (CBR): Metodologia e Importância na Engenharia de Pavimentos*. Disponível em: <https://testesolo.com.br/blog/indice-de-suporte-california-cbr-metodologia-e-importancia-na-engenharia-de-pavimentos/>
- [61] JEM Controle de Qualidade. *O Ensaio CBR e sua Importância na Engenharia de Pavimentação*. Disponível em: <https://www.jemcontroledequidade.com.br/o-ensaio-cbr-e-sua-importancia/>
- [62] Global Gilson. *California Bearing Ratio Test: CBR Values & Why They Matter*. Disponível em: <https://www.globalgilson.com/blog/cbr-testing?srsId=AfmBOor8PksFKRr4QGW7I7OquB70jQ9871wLIVfyVBadARxWdluzVLP>
- [63] Biopdi. *Ensaio CBR ou Índice de Suporte Califórnia*. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-cbr-indice-suporte-california/>

[64] ABNT NBR 9895: Solo – Ensaio de CBR.

[65] Testesolo. *Ensaio de Adensamento: Fundamentos e Aplicações em Projetos de Infraestrutura*. Disponível em: <https://testesolo.com.br/blog/ensaio-de-adensamento-fundamentos-e-aplicacoes-em-projetos-de-infraestrutura/>

[66] Suporte Solos. *O Ensaio de Adensamento Edométrico: Explicação pelo modelo de Terzaghi*. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/o-ensaio-de-adensamento-edometrico-explicacao-pelo-modelo-de-terzaghi-procedimentos/163/>

[67] Contenco. *ENSAIO DE ADENSAMENTO DO SOLO*. Disponível em: <https://contenco.com.br/ensaio-de-adensamento-do-solo/>

[68] ABNT NBR 12051: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional.

[69] Testesolo. *Determinação do Potencial de Colapso dos Solos*. Disponível em: <https://testesolo.com.br/blog/ensaio-de-colapsividade-determinacao-do-potencial-de-colapso-dos-solos/>

[70] Suporte Solos. *Ensaio Adensamento do solo - Norma DNER IE 005*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/ensaio-adensamento-do-solo-ensaio-de-colapso-conheca-mais-detahes-sobre-este-ensaio-norma-dner-ie-005/191/>

[71] PUC-Rio. *Ensaio de Adensamento e Colapsividade*. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5129/5129_6.PDF

[72] Suporte Solos. *Ensaio Adensamento do solo - Norma DNER IE 005*. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/ensaio-adensamento-do-solo-ensaio-de-pressao-de-expansao-conheca-mais-detahes-sobre-este-ensaio-norma-dner-ie-005/192/>

[73] Contenco. *Óleo e Gás: Tudo sobre o ensaio de expansão ou inchamento*. Disponível em: <https://contenco.com.br/oleo-e-gas-tudo-sobre-o-ensaio-de-expansao-ou-inchamento/>

[74] TuboBrasil. *Ensaio de Expansão Controlada: Entenda o Processo*. Disponível em: <https://www.tubobrasil.com.br/glossario/ensaio-expansao-controlada-tubos-hidraulicos/>

[75] Effyia. *A importância da análise e interpretação de ensaios de laboratório*. Disponível em: <https://effyia.com.br/a-importancia-da-analise-e-interpretacao-de-ensaios-de-laboratorio-na-geotecnia/>

[76] Instituto Minere. *Investigação Geotécnica: Análise e Interpretação de Ensaio de Laboratório*. Disponível em: <https://institutominere.com.br/curso/investigacao-geotecnica-analise-e-interpretacao-de-ensaios-de-laboratorio/>

[77] APL Engenharia. *Projetos Geotécnicos*. Disponível em: <https://www.apl.eng.br/geotecnia/projetos-geotecnico>

[78] RFS Engenharia. *Geotecnia e suas Aplicações: Fundamentos, Métodos e Impactos no Desenvolvimento*. Disponível em: <https://www.rfsengenharia.com.br/geotecnia-e-suas-aplicacoes-fundamentos-metodos-e-impactos-no-desenvolvimento/>

[79] Geoguima. *A importância dos ensaios geotécnicos na construção civil*. Disponível em: <https://geoguima.com.br/a-importancia-dos-ensaios-geotecnicos-na-construcao-civil/>

[80] Testesolo. *Ensaio de Adensamento: Fundamentos e Aplicações em Projetos de Infraestrutura*. Disponível em: <https://testesolo.com.br/blog/ensaio-de-adensamento-fundamentos-e-aplicacoes-em-projetos-de-infraestrutura/>

[81] Testesolo. *Determinação do Potencial de Colapso dos Solos*. Disponível em: <https://testesolo.com.br/blog/ensaio-de-colapsividade-determinacao-do-potencial-de-colapso-dos-solos/>

[82] DFTest. *Principais Tipos de Ensaios Geotécnicos e Suas Aplicações Práticas*. Disponível em: <https://dftest.com.br/df1/2022/01/27/principais-tipos-de-ensaios-geotecnicos-e-suas-aplicacoes-praticas/>

[83] Suporte Solos. *Normas Para Sondagens e Ensaios Geológico-Geotécnicos*. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/normas-para-sondagens-e-ensaios-geologico-geotecnicos/269/>

[84] ABNT NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio.

[85] ABNT NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

[86] ABNT NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica aparente.

[87] ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.

[88] ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.

[89] ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.

[90] ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.

[91] ABNT NBR 9895: Solo – Ensaio de CBR.

[92] ABNT NBR 12051: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional.

[93] ABNT NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos por meio de permeâmetro de carga variável.

[94] LinkedIn. *Como escolher um laboratório de ensaios geotécnicos*. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/advice/1/what-should-you-prioritize-when-selecting-geotechnical-t6uee?lang=pt>

[95] Inmetro. *Documentos Necessários para Acreditação de Laboratórios de Ensaio*. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/organismos/doc_organismos.asp?tOrganismo=CalibEnsaio