



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

CÉSAR AUGUSTO DIÓGENES JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM SOLO RESIDUAL ARENÍTICO
PARA IMPLANTAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE
FELIPE GUERRA – RN**

CARAÚBAS

2025

CÉSAR AUGUSTO DIÓGENES JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM SOLO RESIDUAL ARENÍTICO
PARA IMPLANTAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE
FELIPE GUERRA – RN**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Francisco Felinto de Lima Neto

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D591c Diógenes Júnior , César Augusto .
Caracterização geomecânica de um solo residual arenítico para implantação de um aterro sanitário no município de Felipe Guerra - RN / César Augusto Diógenes Júnior . - 2025.
67 f. : il.

Orientador: Francisco Felinto de Lima Neto .
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2025.

1. aterro . 2. geomecânica . 3. resíduos . 4. permeabilidade . 5. resistência . I. Lima Neto , Francisco Felinto de , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas

Bibliotecária: Sarah Freire

Bezerra CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

CÉSAR AUGUSTO DIÓGENES JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM SOLO RESIDUAL ARENÍTICO
PARA IMPLANTAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE
FELIPE GUERRA – RN**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 31 / 07 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

PROF. FRANCISCO FELINTO DE LIMA NETO
Presidente

PROF. DR. EDUARDO MORAIS DE MEDEIROS
Membro Examinador

PROF. KARINA ESTRELA EGÍDIO
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela sabedoria, pela força e por me guiar em cada etapa desta jornada.

À minha família, em especial aos meus pais, por todo o apoio constante, pela paciência e pelo amor incondicional que sempre me foram dados durante esse período de intensa dedicação. Também sou grato à minha namorada, pela compreensão e paciência nos últimos dias.

A faculdade não me deu apenas um diploma, mas também me apresentou a amigos para a vida toda. Agradeço especialmente a Gabriel, Luilma e Geovane. Juntos, enfrentamos os desafios e celebramos as vitórias da Engenharia Civil, transformando-nos em verdadeiros parceiros. E a melhor parte é saber que essa parceria continua, agora como amigos de profissão.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão ao meu orientador e amigo de longas datas, Professor Francisco Felinto de Lima Neto. Agradeço imensamente pelo tempo dedicado, pela confiança depositada e por todo o conhecimento compartilhado que foi fundamental para a construção deste Trabalho de Conclusão de Curso. Agradeço também aos demais professores da banca examinadora, Professora Karina Estrela Egídio e Professor Dr. Eduardo Moraes de Medeiros, pela valiosa participação e por todos os ensinamentos que enriqueceram minha formação ao longo da graduação.

Por fim, meu agradecimento se estende a todos os demais professores do curso de Engenharia Civil da UFERSA Campus Caraúbas, que sempre estiveram à disposição para auxiliar os alunos e que, de diversas formas, contribuíram para a minha trajetória acadêmica.

O verdadeiro desafio da engenharia não está apenas em construir, mas em superar os limites.

Isambard Kingdom Brunel

RESUMO

O crescimento demográfico e a expansão urbana têm levado a um aumento significativo na produção de resíduos sólidos, levantando a questão crucial sobre a adequação de seu descarte. Com isso, CIDADE (2022) mostrou uma melhora no serviço de coleta de resíduo sólido para a população, porém, houve um aumento no número de lixões a céu aberto. Segundo o SINISA (2024), há mais de 1.600 lixões no Brasil. Neste estudo, foi realizada uma caracterização geomecânica de um solo arenítico para a possível implantação de um aterro sanitário no município de Felipe Guerra – RN. Foram realizados ensaios laboratoriais, incluindo granulometria conjunta, Limites de Atterberg, permeabilidade, adensamento e cisalhamento direto. Os resultados indicaram que se trata de uma argila de baixa compressibilidade (CL), com uma permeabilidade de 10^{-7} cm/s, um Limite de Liquidez (LL) de 33% e Índice de Plasticidade (IP) de 13%. Além disso, foram observadas grandes deformações a partir de uma carga de pré-adensamento de 155,0 kPa. Também foram determinados os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito). Com base nesses achados, o solo apresenta ótimos parâmetros para ser utilizado em um aterro sanitário. No entanto, é fundamental destacar que a proteção ambiental não se limita às características do solo. Para o descarte correto de resíduos sólidos, esse solo precisaria atuar em conjunto com outros mecanismos de proteção e monitoramento, garantindo a segurança e a sustentabilidade do aterro.

Palavras-chave: Aterro. Geomecânica. Resíduos. Permeabilidade. Resistência.

ABSTRACT

Demographic growth and urban expansion have led to a significant increase in the production of solid waste, raising the crucial question of proper disposal. In this context, CIDADE (2022) showed an improvement in the solid waste collection service for the population, but also an increase in the number of open dumps. According to SINISA (2024), there are more than 1,600 dumps in Brazil. This study performed a geomechanical characterization of a sandy soil for the potential implementation of a sanitary landfill in the municipality of Felipe Guerra – RN. Laboratory tests were conducted, including combined granulometry, Atterberg Limits, permeability, consolidation, and direct shear. The results indicated the soil is a low-compressibility clay (CL) with a permeability of 10^{-7} cm/s, a Liquid Limit (LL) of 33%, and a Plasticity Index (PI) of 13%. Furthermore, significant deformations were observed starting from a pre-consolidation load of 155.0 kPa. The soil's strength parameters (cohesion and angle of friction) were also determined. Based on these findings, the soil has excellent parameters for use in a sanitary landfill. However, it is essential to emphasize that environmental protection is not limited to the soil's characteristics. For the correct disposal of solid waste, this soil must work in conjunction with other protection and monitoring mechanisms to ensure the safety and sustainability of the landfill.

Keywords: Landfill. Geomechanics. Waste. Permeability. Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfis de intemperismo.	21
Figura 2 - Curva granulométrica ABNT e AASHTO.....	23
Figura 3 - Gráfico da viscosidade de acordo com a temperatura.	25
Figura 4 - Permeômetro de carga constante e variável.	26
Figura 5 - Compressibilidade de uma argila por carregamento externo.....	27
Figura 6 - Tensão-deformação das areias e argilas.....	28
Figura 7 - Aterro sanitário.	30
Figura 8 - Fluxograma dos ensaios.	32
Figura 9 - Localização no mapa de Felipe Guerra - RN.....	33
Figura 10 - Representação do Qgis.....	34
Figura 11 - Local da coleta das amostras.....	34
Figura 12 - Preparação das amostras para os ensaios.	36
Figura 13 - Procedimento do peneiramento grosso.	37
Figura 14 - Preparação da amostra sedimentação.....	38
Figura 15 - Procedimento do ensaio de sedimentação.....	39
Figura 16 - Procedimento do peneiramento fino.	40
Figura 17 - Procedimento do limite de plasticidade.	41
Figura 18 - Procedimento limite de liquidez.	43
Figura 19 - Procedimento ensaio picnômetro.	44
Figura 20 - Procedimento do ensaio de compactação.	45
Figura 21 - Procedimento ensaio de adensamento.	47
Figura 22 - Procedimento do cisalhamento direto.....	48
Figura 23 - Procedimento do ensaio de permeabilidade.....	50
Figura 24 - Procedimento ensaio de Crumb teste.....	51
Figura 25 - Curva granulométrica da amostra AM-01.	53
Figura 26 - Carta de plasticidade do solo.	54
Figura 27 - Fotos do CP no início e final do ensaio.	55
Figura 28 - Curva de compactação.	56
Figura 29 - Gráfico do adensamento.	58
Figura 30 - Envoltória do ensaio de cisalhamento direto.	60
Figura 31 - Tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal.....	61
Figura 32 - Deslocamento vertical por deslocamento horizontal.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peneiras utilizadas na granulometria conjunta.	40
Tabela 2 - Caracterização física da AM-01.	54
Tabela 3 - Resultado do ensaio de Crumb Test.	56
Tabela 4 - Resultado do ensaio de compactação.	57
Tabela 5 - Índices físicos e coeficiente de permeabilidade do solo.....	57
Tabela 6 - Parâmetros dos ensaios de adensamento do solo compactado.	58
Tabela 7 - Índices físicos das amostras indeformadas no ensaio de adensamento.	59
Tabela 8 - Pontos da envoltória de ruptura AM – 01.....	61
Tabela 9 - Índices físicos dos CP do ensaio de cisalhamento direto AM-01.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM - 01	Amostra
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CL	Argila de baixa compressibilidade
CP	Corpo de prova
HRB	Highway Research Board
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
SUCS	Sistema unificado de classificação de solos
SPT	Standard penetration test
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
UTM	Universal transversa de mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Peso específico natural
ρ_d	Peso específico seco
e	Índice de vazios
w	Teor de umidade
S_r	Grau de saturação
K	Coeficiente de permeabilidade
cc	Índice de compressão
cr	Índice de recompressão
ce	Índice de expansão
h_i	Altura inicial da amostra
h_f	Altura final da amostra
n	Porosidade

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	15
2 - OBJETIVOS.....	17
2.1 - Objetivo geral	17
2.2 - Objetivos específicos	17
3 - REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 - Solos residuais tropicais	18
3.2 - Intemperismo	19
3.2.1 - Intemperismo físico.....	19
3.2.2 - Intemperismo químico	19
3.2.3 - Perfis de intemperismo.....	20
3.3 - Arenito	21
3.4 - Caracterização / granulometria	22
3.5 - Compactação.....	23
3.6 - Permeabilidade	24
3.7 - Deformação e compressibilidade.....	26
3.8 – Resistência ao cisalhamento dos solos.....	27
3.9 - Cisalhamento direto	28
3.10 - Aterro sanitário	29
4 - METODOLOGIA	32
4.1 - Coleta das amostras	32
4.2 - Ensaio laboratoriais.....	35
4.3 - Preparação das amostras	35
4.4 - Caracterização geotécnica.....	36
4.4.1 - Peneiramento grosso	36
4.4.2 - Sedimentação	37
4.4.3 - Peneiramento fino	39
4.4.4 Limites de Atterberg.....	40
4.4.5 - Ensaio do picnômetro.....	43
4.5 - Compactação.....	44
4.6 - Adensamento	46
4.7 - Cisalhamento direto	48
4.8 - Permeabilidade	49

4.9 - Crumb test.....	50
5 - RESULTADOS	52
5.1 - Caracterização física do solo	52
5.2 - Ensaio Crumb Test	55
5.3 – Compactação	56
5.4 - Permeabilidade	57
5.5 - Adensamento	57
5.6 - Cisalhamento direto	59
6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
7 - REFERÊNCIAS	65

1- INTRODUÇÃO

A formação dos solos brasileiros é predominantemente composta por solos residuais, que são diferentes daqueles estudados na base da mecânica dos solos tradicional. Nos solos residuais, o intemperismo físico e químico provoca a decomposição das rochas-mãe em uma velocidade superior à dos agentes erosivos.

Com o avanço tecnológico, a explosão demográfica e as mudanças climáticas, nota-se uma grande preocupação em investigar o solo na indústria civil. A caracterização geomecânica torna-se uma ferramenta de grande utilidade na investigação do solo.

A disposição final dos resíduos sólidos gerados pela população é uma causa que vem sendo discutida há vários anos. Segundo a SINISA (2024), o número de lixões a céu aberto ainda é preocupante no Brasil. Estima-se mais de 1600 lixões e, aproximadamente, 25% da disposição final dos resíduos sólidos são inadequadas.

Cidade (2022) mostra que houve uma melhoria na oferta do serviço de coleta de resíduo sólido no Brasil. Porém, o número de lixões teve um considerável aumento de 2014 para 2022. Considerando esse aumento, será que os solos utilizados para disposição final dos resíduos sólidos apresentam características geomecânicas adequadas, de modo a minimizar os riscos de contaminação ambiental?

Todo solo quando amolgado necessita de técnicas de controle para implantação em obras de terra. Além do custo-benefício, o que mais impacta na construção de aterros sanitários são as características físicas do solo, sendo a permeabilidade o mais preponderante.

Compreende-se que após a compactação, o maciço tem que apresentar estabilidade e deformabilidade controlada, assim dependendo do tipo de solo utilizado para construção.

A adequada disposição final de resíduos sólidos é um dos grandes desafios enfrentados pela engenharia ambiental e geotécnica. Segundo Das (2007), os aterros sanitários têm que apresentar um alto teor de argila, visto sua baixa permeabilidade, impedindo o fluxo de materiais contaminantes para o lençol freático.

A heterogeneidade dos solos residuais de clima tropical, predominante na região nordeste do Brasil. São devido a esses perfis profundos decorrentes de fatores climáticos, dependendo da combinação, pode-se ter perfis profundos com uma camada de solo laterítico expeça rico em caulinita – argilomineral estável na presença de água – até solos negros ricos em montmorilonitas – argilomineral expansível na presença de água (Townsend, 1985).

Muitos pesquisadores têm se dedicado a compreender a mecânica dos solos em regiões de clima tropical (Lima Neto et al., 2024; Fernandes, 2016; Caputo Homero, 2022; Caputo Armando, 2022;). Quando associado a formação do solo com o tipo de rocha, despontam novos motivos para caracterizá-lo. Nessa pesquisa, será analisado a rocha arenítica, proveniente da formação Açú, localizado na cidade de Felipe Guerra - RN.

Com o desenvolvimento do trabalho será realizado os ensaios para caracterizar o comportamento mecânico desse solo e seus resultados vão mostrar se o material é apropriado para uso em aterros sanitários.

2 - OBJETIVOS

Ter como objetivo realizar a caracterização geomecânica de um solo arenítico para um aterro sanitário localizado no município de Felipe Guerra – RN.

2.1 - Objetivo geral

Realizar ensaios geotécnicos para avaliar a geomecânica do solo localizado na cidade de Felipe Guerra - RN, proveniente da rocha arenítica.

2.2 - Objetivos específicos

- Identificar a curva granulométrica do solo utilizando a granulometria conjunta;
- Estabelecer a massa específica aparentemente seca máxima e a umidade ótima de compactação;
- Determinar o coeficiente de permeabilidade;
- Identificar a tensão de pré-adensamento do solo estudado;
- Verificar o ângulo de atrito e a coesão do solo

Para caracterizar o solo, foram realizados diversos ensaios geotécnicos. A granulometria conjunta determinou a distribuição completa dos tamanhos das partículas e permitiu a classificação do solo. Para otimizar a compactação, foram avaliadas a umidade ótima e a massa específica seca máxima. A permeabilidade foi determinada para verificar a capacidade de transmissão de água do solo. O ensaio de cisalhamento direto estudou a resistência do solo a forças horizontais, enquanto o adensamento avaliou sua deformação sob carga vertical e sua capacidade de recuperação. Por fim, o Crumb Test verificou o comportamento dispersivo do solo em contato com a água.

3 - REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 - Solos residuais tropicais

Os solos são resultados de desintegração e decomposição de fragmentos de rochas originais ou rochas sãs. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, com a NBR 6502:2022, diz que os ataques de agentes químicos e físicos são os responsáveis pela decomposição das rochas em fragmentos.

Essas rochas por sua vez podem ser formadas pelo resfriamento do magma expelido do interior da terra para crosta pelos vulcões ou devido à grandes variações de pressões e temperaturas no interior da crosta terrestre (Fernandes, 2016).

Com a ação dos agentes do intemperismo tem-se uma divisão muito importante na classificação do tipo do solo. Caso as novas partículas da rocha mãe não tenha nenhum tipo de transporte, esse solo será chamado de residuais. Porém, se tiver algum dos agentes, vento, água ou gravidade que faça esse transporte das partículas fragmentadas, será chamado de solos sedimentares (Fernandes, 2016).

Os solos residuais após o processo de intemperismo podem ser considerados algo complexo, com solos formados por camadas distintas. Segundo Blinght e Leong (2012), como o intemperismo prossegue da superfície para baixo e para dentro a partir das superfícies das juntas e de outros caminhos de percolação, a intensidade do intemperismo geralmente diminui com o aumento da profundidade e a redução da intensidade da união no material entre as superfícies das juntas.

Observa-se que devido a essas diferentes formas de transformar as rochas em solos, cada um vai ter uma característica. Para os solos residuais eles vão ter uma concentração de partículas mais finas nas camadas mais próximas da superfície terrestre e com o aumento da profundidade, os grãos também vão aumentando de tamanho (Das, 2019).

Segundo Das (2007), necessita uma familiaridade sobre os tipos básicos de rochas que compõe a crosta terrestre, os minerais que formam as rochas e os processos de erosão. Com esse entendimento básico é possível entender melhor os solos residuais.

A mecânica dos solos acaba falhando em aplicar ensaios de solo sedimentar em solo residual, pois a mineralogia dos solos residuais formados em ambientes tropicais é diferente dos solos tradicionais. Essa diferença ocorre pelo processo no qual a rocha mãe é submetida

para conseguir originar esse solo, os residuais têm uma predominância maior de intemperismo químico e os sedimentares com a predominância do intemperismo físico (Das, 2019).

3.2 - Intemperismo

Sabe-se do grande papel que o intemperismo realiza na formação dos vários tipos de solos da crosta terrestre. Segundo Queiroz (2016), o intemperismo é um conjunto de processos responsável pela fragmentação ou decomposição da rocha, em camadas mais profundas ou na superfície podendo agir tanto de forma física como química nas rochas originais.

O conhecimento sobre o fenômeno e seus agentes é um instrumento muito importante para o engenheiro civil. Analisar-se um solo com um conhecimento maior pode facilitar o profissional a descobrir a origem do solo (Queiroz, 2016).

Na natureza, o intemperismo se manifesta de três maneiras principais: físico, químico e biológico. Para o propósito do trabalho em desenvolvimento, aprofundaremos nas formas física e química do intemperismo.

3.2.1 - Intemperismo físico

O intemperismo físico, processo de desgaste mecânico das rochas, é intensificado por alterações climáticas. A principal causa desse fenômeno é a variação de temperatura, que faz com que os minerais das rochas se expandam e se contraíam. Essa repetição constante causa fissuras e, com o tempo, desagrega a rocha. Dessa forma, o intemperismo físico prepara o material para ser transportado por agentes como o vento e a água, em um processo conhecido como erosão, conforme Santos e Daibert (2013).

Segundo Santos e Daibert (2013), a cor e a granulometria das rochas são agentes que podem fazer com que as rochas tenham uma interferência maior devido a temperatura. Em regiões de secas, com temperaturas muito altas ou baixas, as rochas vão sofrer mais com a dilatação ou contração devido as temperaturas. Rochas mais escuras e com grãos maiores podem sofrer mais com esse tipo de agente.

3.2.2 - Intemperismo químico

Santos e Daibert (2013), afirmam que no intemperismo químico não é uma simples quebra da rocha. Trata-se de um ataque direto nos minerais que a compõem devido as reações químicas, desfazendo-os e transformando em minerais novos.

Os autores Santos e Daibert (2013), afirmam em seu livro que um dos principais agentes responsáveis por essa degradação é a água da chuva. Pois a mesma vem carregada de elementos atmosféricos, transformando-as em chuva ácida e atacando as rochas ao entrar pelas rachaduras, fazendo com que elas se desfaçam em blocos.

Observa-se as principais reações químicas que fazem essa decomposição acontecer são:

- Oxidação;
- Hidratação;
- Dissolução;
- Hidrólise;
- Acidólise.

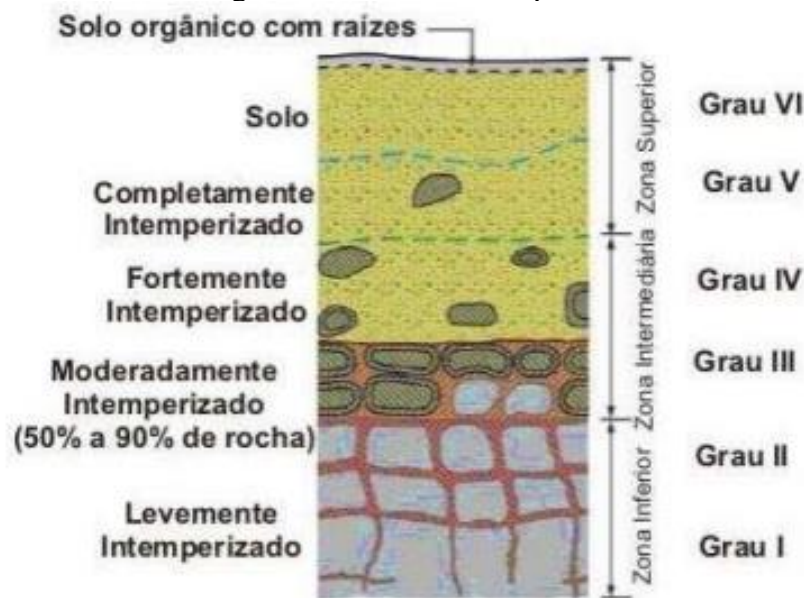
3.2.3 - Perfis de intemperismo

De acordo com o estudo de Freitas (2016), o intemperismo que é o processo de quebra e mudança das rochas e a pedogênese que é responsável pela formação do solo, são os responsáveis pela criação dos perfis de intemperismo. Esses perfis são as diferentes fases de alteração da rocha, revelando como fatores ambientais, como o clima, a água e a vida vegetal influenciaram sua vida ao longo do tempo.

Para Freitas (2016), o perfil de intemperismo deve ser estudado de baixo para cima. Na base tem-se a rocha mãe ou sã que não tem indícios de ataque pelos agentes do intemperismo. Acima dela, formam-se o saprólito, uma rocha já bem alterada, mas que ainda mantém características da rocha sã, depois o solum, rocha de solos propriamente dita com camada mais ativas de degradação. Essas duas camadas elas formam o regolito que é o solo completamente degradado.

Quando mais afastado da rocha sã, maior será o nível de intemperização do solo. Como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Perfis de intemperismo.



Fonte: Freitas, 2016.

Segundo os autores Blight e Leong (2012), esses perfis de intemperismo para um solo residual vai ter zonas com divisão distintas entre elas. Chama-se esse tipo de intemperismo como casca de cebola. Pois, em solos residuais formados por rochas ígneas é comum encontrar matações de rochas matriz (sã) envolvido por um bloco de rocha degradada pela intemperismo.

3.3 - Arenito

Freitas (2016) afirma que arenitos são rochas que foram formadas pela variedade de areia que existe na superfície. Seus grãos variam entre 0,062 e 2 milímetros de acordo com a escala de Wentworth.

Para uma melhor compreensão dos arenitos. Freitas (2016), descreve como deve ser a classificação dos arenitos. Possui duas formas diferentes, a primeira pelo critério descritivo da granulometria, que prevalece o tamanho e a aparência dos grãos. A segunda forma é pela sua origem e seu processo de formação, critério genético

Na visão de Freitas (2016), os arenitos eles são originados do processo de erosão de outras rochas, ou seja, são formados de pedacinhos de rochas mãe, fazendo com que o arenito tenha uma característica muito importante que é a variedade grande em seus minerais, como:

- Minerais pesado;
- Minerais químicos (carbonatos e silicatos);
- Minerais detríticos (feldspato).

Segundo Sgarbi (1991), a formação areado da bacia cretácea do São Francisco. Analisando-se a textura, é possível observar uma alternância de camadas. Níveis milimétricos de grãos de areia claros, de tamanho médio a grosso, são predominantemente formados por quartzo (mono e policristalino) e fragmentos de metapelitos, todos com formato de subarredondado a arredondado. Entre essas camadas, encontram-se outras de tonalidade rósea, onde a areia é mais fina e angular, composta principalmente por quartzo e minerais opacos.

Para Montanheiro (2011), a formação Botucatu também apresenta uma textura diferencial, as camadas costumam alternar entre lâminas de arenito fino e arenito médio, o que resulta em uma característica bimodalidade textural.

3.4 - Caracterização / granulometria

Das (2007) afirma que a análise granulométrica é o processo que determina a distribuição dos tamanhos das partículas que compõem um solo. Ela diz qual a porcentagem do peso seco total do solo para cada faixa de tamanho desse solo.

Conforme apontado por Pinto (2006), o solo tem sempre várias partículas de tamanhos diferentes. Observa-se que em solos de granulometrias mais finas, as partículas de areia podem ficar envolvidas com um material argiloso que quando os dois estão secos é mais difícil essa diferenciação das partículas. Mas, caso essa amostra de solo venha receber umidade, as partículas argilosas vão desprender das outras partículas formando uma pasta fina e a areia vai ser facilmente reconhecida pelo tato.

A forma como os solos são classificados é fundamental na engenharia geotécnica, e essa classificação geralmente se baseia no tamanho de suas partículas.

Conforme os estudos de Caputo (2022), a ABNT NBR 6502:1995 detalha as diferentes frações constituintes dos solos. Essa padronização é essencial para nomear cada fração como argila, silte, areia e pedregulho, baseando-se no diâmetro de suas partículas. A composição final do solo, determinada por essas frações, é que permite sua classificação precisa. São elas:

- Pedregulho: Partículas com diâmetro entre 60 mm e 2,0 mm;
- Areia grossa: Partículas entre 2,0 mm e 0,6 mm;
- Areia média: Partículas entre 0,6 mm e 0,2 mm;
- Areia fina: Partículas entre 0,2 mm e 0,06mm;
- Silte: Partículas entre 0,06 mm e 0,002 mm;
- Argila: Partículas com diâmetro inferiores a 0,002 mm.

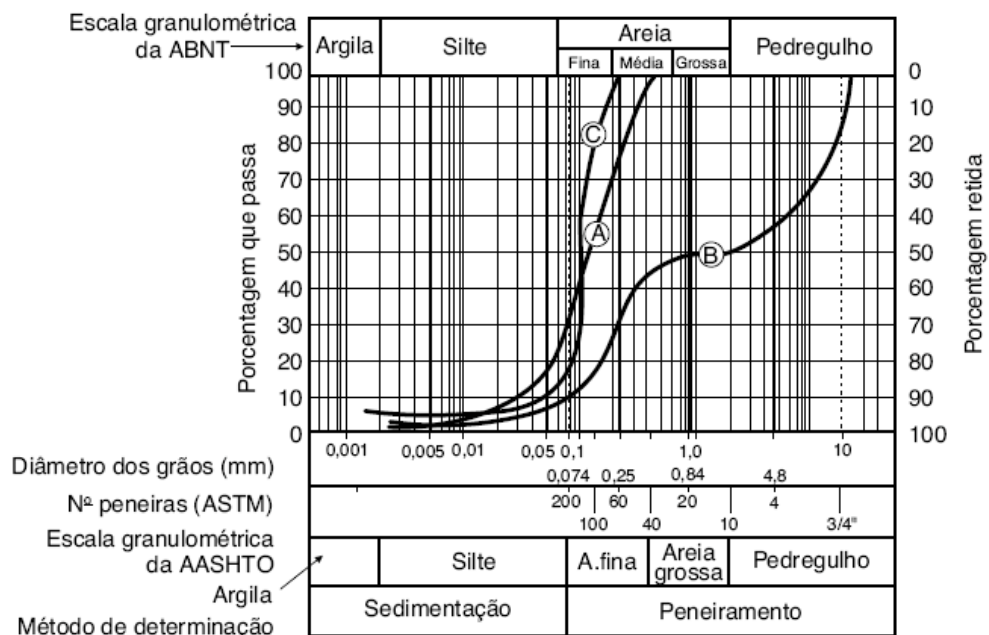
Caputo (2022) também destaca que a granulometria americana, definida pela American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 88), adota uma classificação mais simplificada em comparação com a abordagem brasileira. São elas:

- Pedregulho: Partículas com diâmetro entre 76,2 mm e 2,0 mm;
- Areia: Partículas entre 2,0 mm e 0,074 mm;
- Silte: Partículas entre 0,074 mm e 0,002 mm;
- Argila: Partículas com diâmetro inferiores a 0,002 mm.

Na visão de Caputo (2022), com essas classificações bem definidas, pode ser criada uma curva granulométrica para representar cada fração constituinte desse solo. Observa-se que cada solo vai ter sua curva granulométrica, ajudando a melhorar a representação da parte final de cada solo, mesmo que as dimensões não sejam parecidas.

Definem-se a curva de acordo com a variedade dos tamanhos das partículas e o indicador importante do tamanho predominante das partículas finas, possibilitando uma melhor classificação do solo, como curva contínua, descontínua e uniforme. Conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Curva granulométrica ABNT e AASHTO.



Fonte: Caputo *et al.*, 2022.

3.5 - Compactação

Segundo Murrieta (2019), a compactação do solo melhora diversos aspectos, resultando em aumento significativo da resistência, diminuição da permeabilidade e redução da

deformação. Esse processo, realizado por meios mecânicos, reduz o número de vazios do solo, mesmo que o peso específico aumente.

Além disso, o autor Murrieta (2019), aponta a relevante influência da umidade no processo de compactação dos solos. No entanto, essa influência não será a mesma para todos os solos. Observa-se um percentual de umidade para cada, fazendo com que o mesmo atinja seu ponto máximo de densidade. Quando isso ocorre, chama-se de umidade ótima. Dessa forma, o solo está no seu ramo úmido, se for adicionada mais água no solo vai diminuir sua densidade.

Para Das (2007), o papel da água na compactação é de um lubrificante para as partículas do solo. Com isso, causando um maior acomodamento entre as partículas e aumentando seu peso específico e a resistência do solo.

3.6 - Permeabilidade

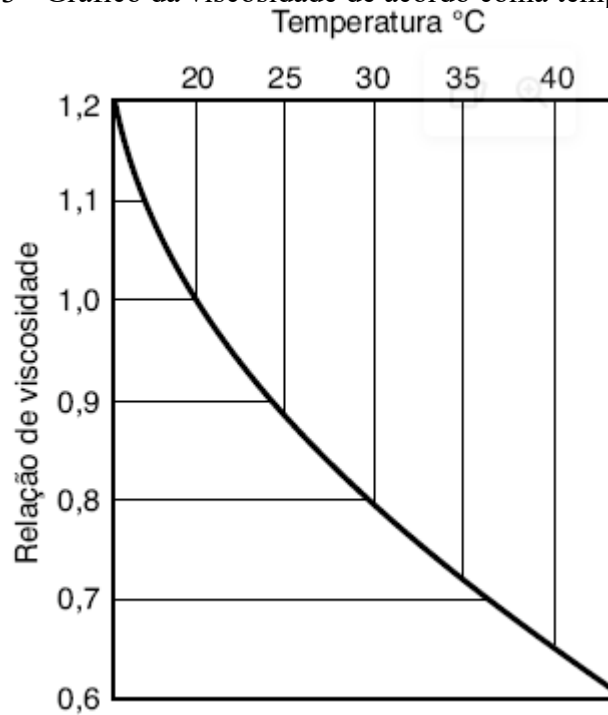
Segundo Das (2007), um solo permite a passagem da água por meio de seus vazios que estão conectados entre eles. Com isso, a água é capaz de sair de uma zona de maior pressão para uma de baixa pressão.

Para Das (2007), a permeabilidade é a capacidade de estimar a quantidade de água capaz de se movimentar no interior de um determinado solo. Crucial para estudos relacionados a estruturas de suporte de solo e análise de segurança de barragens feitas com o solo.

Caputo (2022) também fala que o coeficiente de permeabilidade muda de acordo com a estrutura de cada tipo de solo, as vezes muda para o mesmo tipo de solo. Possui fatores que influência nesse coeficiente, como é o caso da temperatura e do número de vazios presente no solo. Com esse conhecimento, torna-se capaz de solucionar vários problemas na engenharia civil como a drenagem, recalques e rebaixamento do nível d'água

Segundo Caputo (2022), ele fala na Figura 3 de uma fórmula empírica representada pelo gráfico, desenvolvida por Helmholtz, que fala que a viscosidade da água é inversamente proporcional a temperatura, quanto maior a temperatura menor a viscosidade da água. A viscosidade para o número de viscosidade é diretamente proporcional, quanto maior o número de vazios maior será a viscosidade desse solo.

Figura 3 - Gráfico da viscosidade de acordo coma temperatura.



Fonte: Caputo et al., 2022

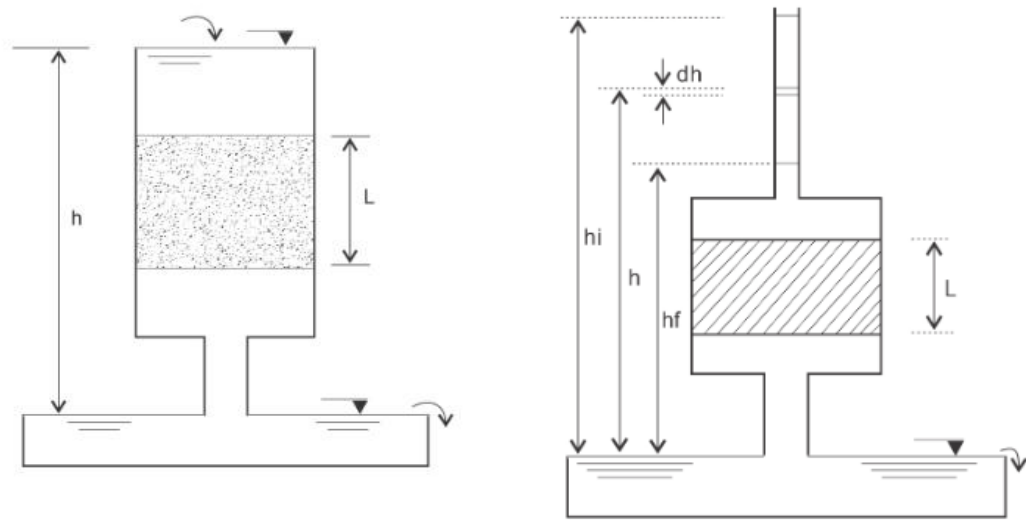
Pinto (2006) fala que quase sempre os vazios de um solo estão preenchidos com água, por isso a importância do estudo da migração dessa água. O autor fala que a Lei de Darcy é de fundamental importância para calcular a vazão e obter o coeficiente de permeabilidade do solo. A seguir será apresentada a formula de Darcy na equação 1, onde Q é a vazão, k é o coeficiente de permeabilidade para cada solo, A é a área do permeâmetro, h é a carga que se dissipa na percolação e L distância ao longo que a carga se dissipa.

$$Q = k \frac{h}{L} A \quad (1)$$

O mesmo autor fala que tem duas possibilidades para se calcular a permeabilidade de um solo. Para solos com coeficiente de permeabilidade baixo deve-se empregar o permeâmetro de carga variável, para solos de coeficiente de permeabilidade alto usa-se o de carga constante, (Pinto 2006).

Para Pinto (2006), o que vai determinar o uso de cada permeâmetro no ensaio vai ser a taxa de permeabilidade desse solo, se for maior que 10^{-7} m/s, esse solo vai possuir uma drenagem livre, logo tem que usar carga constante. Porém, se for menor que 10^{-7} m/s, tem-se que usar o de carga variável, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Permeâmetro de carga constante e variável.



a) Permeâmetro carga constante

b) Permeâmetro carga variável

Fonte: Pinto, 2006.

3.7 - Deformação e compressibilidade

De acordo com Pinto (2006), um dos pontos mais importantes é entender as deformações do solo quando ele recebe carregamento vertical, seja na superfície ou próximo a ela. Essas deformações recebem o nome de recalques, que são mais comuns em fundações de sapatas, radier ou em aterros construído sobre terreno.

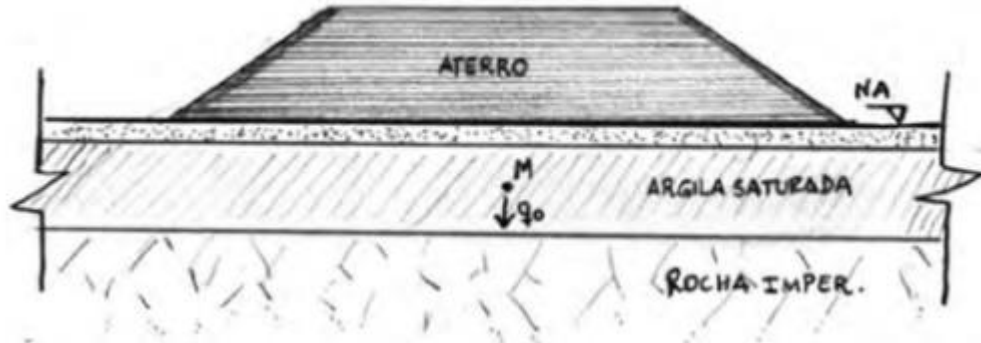
Observa-se que essas deformações, o autor fala em dois tipos: as rápidas e as lentas. Que vão depender do tipo de solo para acontecer, como solo arenoso e argiloso não saturado, vai acontecer de formas rápida, já as argilas saturadas vão levar um tempo maior para recalcar devido a água, demonstrado por (Pinto, 2006).

De acordo com a obra de Floriano (2017), ele afirma que um dos temas mais importante para a engenharia civil, saber o comportamento do solo após um carregamento. Evitando problemas no futuro com as edificações. Esse fenômeno acontece porque o solo tem uma estrutura porosa, composta por partículas sólidas e espaços vazios entre elas. A capacidade do solo ser comprimido pode ocorrer de duas formas principais: Por compactação: Quando o volume do solo diminui pela saída do ar que está nos vazios. Adensamento: Quando o volume se reduz pela expulsão da água contida nos vazios do solo.

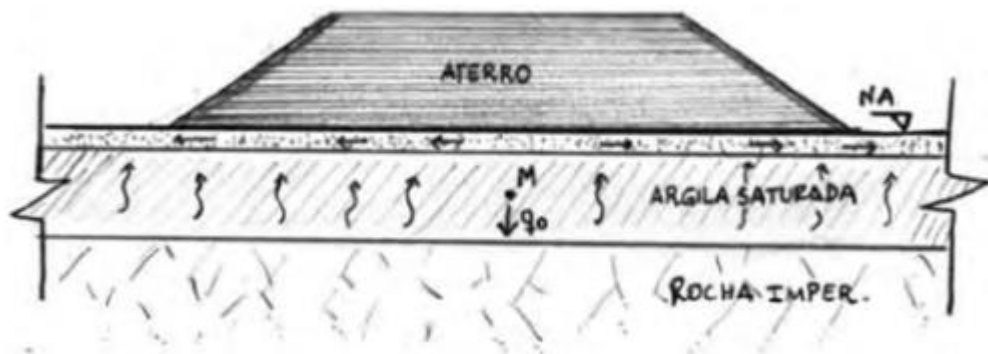
A deformação do solo argiloso é o foco principal de análise, pois tanto a água quanto as partículas de argila são consideradas incompressíveis. Essa deformação é responsável pela mudança no volume total do solo, que está diretamente ligada à variação do seu índice de

vazios. Conforme as tensões efetivas atuam no solo, ocorre uma alteração nesse índice, um processo ilustrado na Figura 5 (Floriano, 2017).

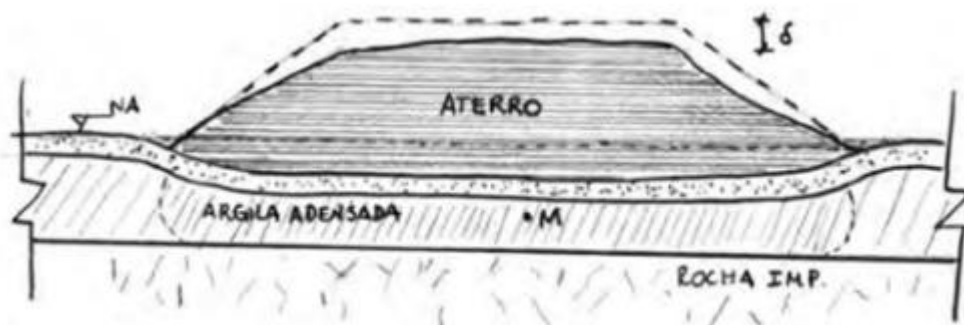
Figura 5 - Compressibilidade de uma argila por carregamento externo.



- a) Solo recebendo a carga do aterro. Não teve recalque imediato por causa da argila saturada.



- b) Processo de expulsão da água da argila satura devido a força do carregamento vertical do aterro



- c) Recalque devido o adensamento da camada de argila

Fonte: Floriano, 2017.

3.8 – Resistência ao cisalhamento dos solos

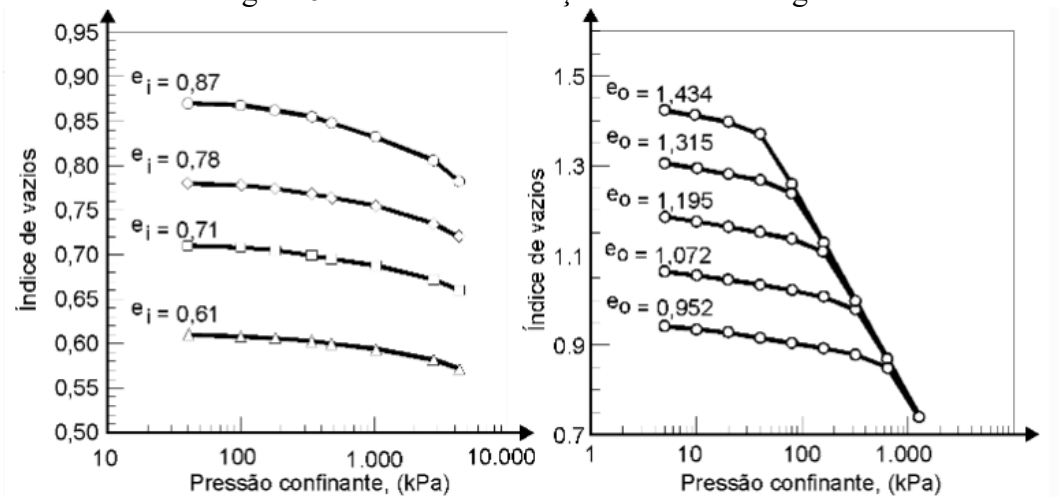
Murrieta (2019) na sua obra fala que a determinação dos parâmetros de resistência de um solo é muito importante para a mecânica dos solos. Avaliar-se de forma precisa é um passo essencial para garantir a estabilidade de qualquer obra na engenharia civil.

Pinto (2006) afirma que as areias são materiais permeáveis, com isso permite a passagem de água em seus vazios com maior facilidade. Por causa dessa característica quando um solo arenoso recebe um carregamento, a água presente consegue sair a tempo, evitando que surjam pressões internas que poderiam prejudicar sua resistência.

Pinto (2006), conclui que a resistência das areis é geralmente avaliada com base nas tensões efetivas. Levando-se em consideração apenas a relação da força que os grãos exercem uns sobre os outros, sem a interferência da água.

Observa-se que o comportamento das argilas como ilustrado na Figura 6, é diferente devido a sua permeabilidade ser mais baixa, sendo mais difícil a passagem de água por ela. Com isso o autor fala em considerar dois cenários as argilas drenadas e não drenadas. Para os solos residuais, sua rigidez ou aparente memória de carregamento não vem de carregamento externos. Mas de fatores internos como, cimentação entre as partículas e variações de volume por umidade (Pinto, 2006).

Figura 6 - Tensão-deformação das areias e argilas.



Fonte: Pinto, 2006

3.9 - Cisalhamento direto

Observa-se que a força interna essencial para que um solo não venha deslizar ou romper é a resistência a cisalhamento. Aprofundar-se no conhecimento dessa característica é de suma importância para desenvolver problemas relacionados a estabilidade do solo, como demonstrado por (Das, 2007).

Murrieta (2019), explica que Coulomb propôs que os solos se rompem quando as forças de cisalhamento que agem sobre eles em planos específicos superam a sua resistência. Onde a mesma é, em grande parte, devido ao atrito entre as partículas que compõem o solo.

Murrieta (2019), fala que Coulomb constatou que outros solos essa dedução era diferente. As argilas tinham o que Coulomb chamava de coesão ou resistência a cisalhamento, que mesmo sem ter uma força externa sendo aplicada na mesma, ela não escorria entre os dedos. Considerando-se a Lei de Coulomb um solo deve ter coesão e atrito interno, como demonstrado na equação 2. Onde τ é a tensão de cisalhamento, c é a coesão do solo, σ é a tensão normal e $\tan \phi$ é o ângulo de atrito interno. Dessa forma o Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb combina a coesão (c), que é a resistência intrínseca do solo, com o ângulo de atrito interno (ϕ), que é a resistência gerada pela fricção entre as partículas, para determinar a resistência total do solo.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

Segundo Boszczowski (2023), O ensaio de cisalhamento direto é um dos testes mais tradicionais e diretos para avaliar a resistência de um solo. Nele, uma amostra de solo em formato de prisma ou cilindro, é colocada em um compartimento que a impede de se expandir lateralmente.

Para Boszczowski (2023), uma carga vertical é aplicada e enquanto essa carga vertical atua, uma força horizontal é aplicada para empurrar e fazer com que a amostra se rompa em um ponto já determinado. A cada movimento horizontal, mede-se a resistência que o solo oferece ao cisalhamento. A ruptura é identificada no momento em que a força de cisalhamento atinge o seu limite máximo, ou seja, o ponto em que o solo não consegue mais suportar e cede.

3.10 - Aterro sanitário

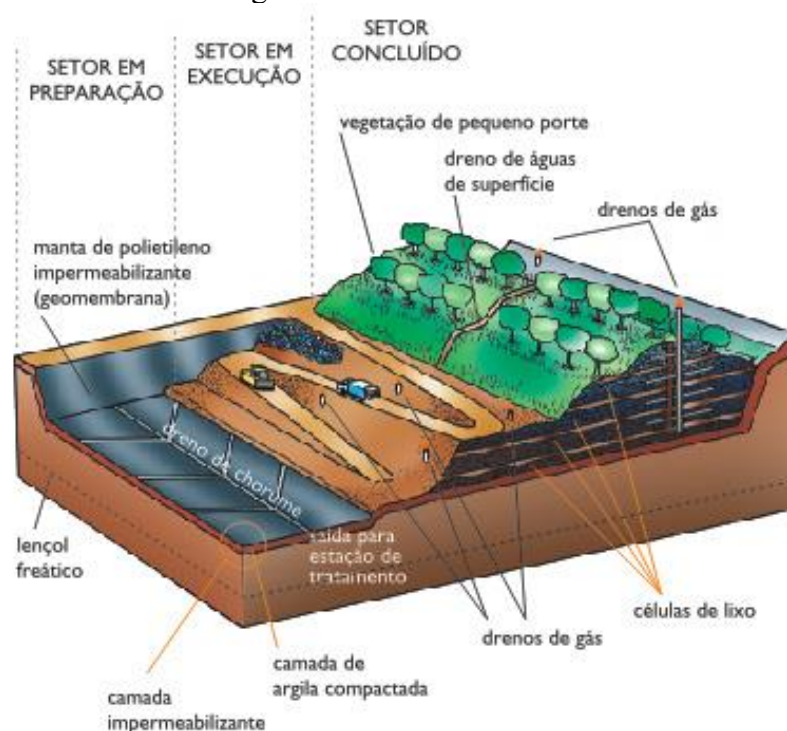
Conforme Silva e Tagliaferro (2021), um aterro sanitário constitui muito mais do que um mero local de descarte de resíduos sólidos. É uma estrutura de engenharia civil projetada para o depósito seguro desses resíduos no solo, visando minimizar impactos ambientais. A sua concepção requer um estudo detalhado para a seleção do local e para o desenvolvimento e implementação de sistemas eficazes de monitoramento e proteção.

A NBR 8419/1992, que trata da apresentação de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos, estabelece que a função principal do aterro sanitário é realizar a disposição final de resíduos de forma controlada e segura, minimizando os impactos ambientais.

O processo, que inclui a compactação, contribui para a otimização do uso da área e a redução do volume dos resíduos.

A norma enfatiza que o projeto deve ser completo, com a descrição e a especificação detalhada de todos os elementos. Isso inclui, obrigatoriamente, os sistemas de proteção e monitoramento presentes na Figura 7, que são: Sistema de drenagem de chorume: Para coletar e tratar o líquido poluente gerado pela decomposição dos resíduos; Sistema de drenagem de gases: Para captar os gases produzidos, como o metano, evitando a sua dispersão na atmosfera ou o risco de explosões; Sistema de drenagem pluvial: Para escoar a água da chuva e evitar que ela entre em contato com o lixo, o que aumentaria a produção de chorume; Sistema de monitoramento ambiental: Para o acompanhamento da qualidade das águas subterrâneas (lençol freático), águas superficiais e da qualidade do ar na área de influência do aterro.

Figura 7 - Aterro sanitário.



Fonte: Transportes e locações, 2013.

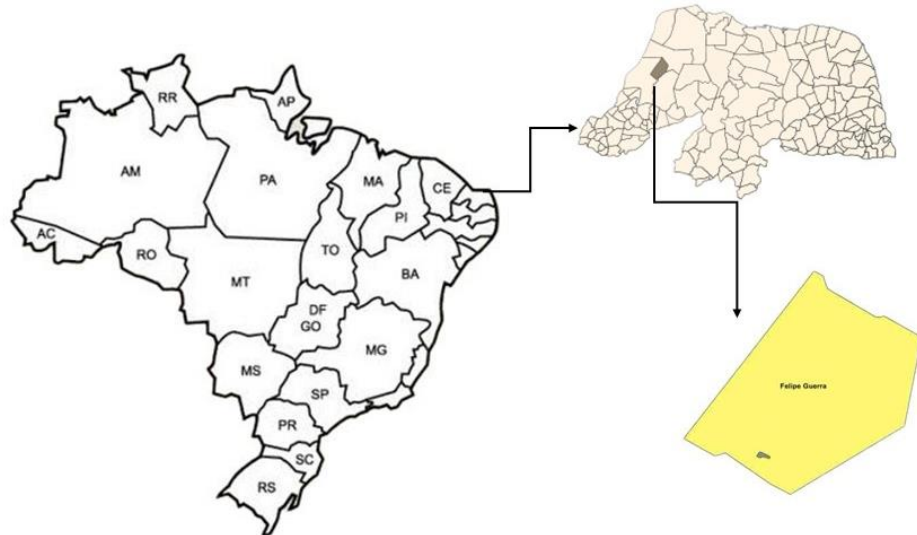
Para um aterro sanitário de resíduos não perigosos, a NBR 13896/1997 estabelece requisitos específicos para o solo a ser utilizado. Ele deve apresentar características que garantam a segurança ambiental do projeto.

É necessário que o solo seja preferencialmente argiloso, pois suas características são mais adequadas para atuar como barreira de proteção. Um dos critérios essenciais é a baixa permeabilidade, com um coeficiente inferior a 5×10^{-5} cm/s, o que é fundamental para retardar

o fluxo de contaminantes como o chorume. Além disso, a norma recomenda que o solo apresente um Índice de Plasticidade (IP) maior que 10% e um Limite de Liquidez (LL) acima de 30%, parâmetros que garantem a plasticidade e a consistência ideais para a formação de uma camada compacta e coesa, segundo a (NBR 13896/1997).

Este terreno será destinado à implantação de um aterro sanitário para a cidade. Atualmente, o local já abriga o lixão municipal, que passará por melhorias para adequá-lo à sua nova e importante função social.

Figura 9 - Localização no mapa de Felipe Guerra - RN.



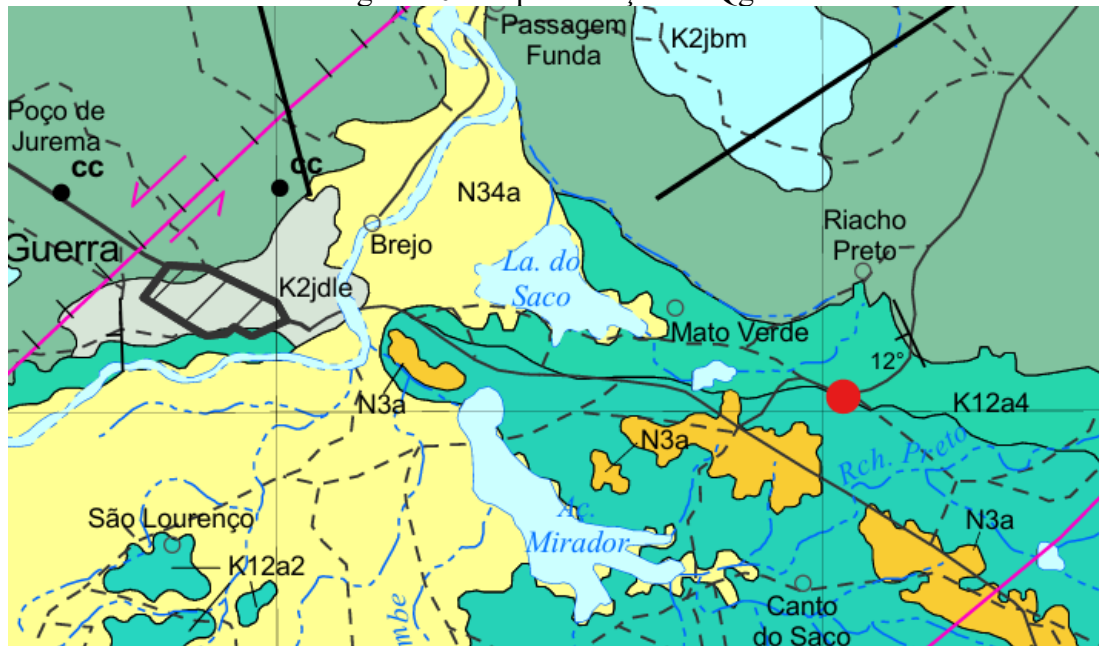
Fonte: Autor, 2025.

O material analisado neste estudo é proveniente da Formação Açú (K12a4), que possui características estuarinas e deltaicas. Seus principais litotipos (tipos de rocha) são arenitos, argilitos e siltitos. Essa formação geológica data da Era Mesozoica e Período Cretáceo, segundo os atributos do Qgis.

A Figura 10 ilustrara a localização do terreno onde o solo está sendo estudado. Esse local fica a aproximadamente 2 quilômetros de distância do centro da cidade. Essa distância é devido a proibição de lixões a céu aberto próximo a centro urbanos. Mas, com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12305/2010), todos os lixões devem ser desativados e buscar uma substituição pelos aterros sanitários.

As coordenadas quando foram transformadas de geográficas para Universal Transversa de Mercator (UTM). Com elas transformadas foram inseridas no Qgis e obtido a localização aproximada da coleta da amostra AM-01. Representada pelo ponto vermelha na Figura 10.

Figura 10 - Representação do Qgis.



Fonte: Autor, 2025.

A coleta de material no local foi realizada utilizando pá e baldes. Com a abertura das valas, o solo escavado foi empilhado dentro do terreno, e as amostras foram retiradas em diferentes pontos, mantendo uma distância variada entre elas.

A amostra AM-01, solo coletado da vala (a) e do monte da Figura 11 (c), foi a principal utilizada neste estudo. Posteriormente, uma nova coleta foi realizada, gerando a amostra AM-01R, que é a repetição da amostra 01. Só que um solo gerado pela escavação de uma nova vala (b). Esta última foi empregada pelo professor em um ensaio com sua turma de solos, permitindo a comparação de resultados em determinadas análises.

Figura 11 - Local da coleta das amostras.



a) Vala 01



b) Vala 02



c) AM-01



d) AM-01R

Fonte: Autor, 2025.

4.2 - Ensaaios laboratoriais

A caracterização do solo foi realizada em duas etapas, com ensaios conduzidos em laboratórios distintos.

A primeira etapa, no laboratório do campus de Caraúbas, incluiu os ensaios de granulometria conjunta, sedimentação, permeabilidade, compactação, crumb test e Limites de Atterberg. A segunda etapa, realizada no laboratório do campus de Mossoró, focou nos ensaios de densidade e cisalhamento direto.

Todos esses procedimentos foram essenciais para determinar os parâmetros do solo em estudo e foram executados em conformidade com as diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da American Society for Testing and Materials (ASTM).

4.3 - Preparação das amostras

A preparação das amostras seguiu as diretrizes da NBR 6457:2024, norma que aborda a preparação de solos para ensaios de caracterização, compactação e determinação de teor de umidade.

Foram observados os procedimentos específicos de cada ensaio, conforme os itens 3.2, 3.3 e 4.2 da referida norma. Algumas amostras foram secas ao ar livre, enquanto outras foram

levadas à estufa a 105 °C, entre outros passos detalhados na norma para garantir a preparação adequada.

4.4 - Caracterização geotécnica

O material foi seco ao ar livre, em seguida foi destorroado 1,5 kg de solo na umidade higroscópica. A umidade do solo foi coletada por meio da utilização de capsulas, ao qual foi coletado uma amostra de material passante na peneira #10, pesado e colocado na estufa por 24 horas. Como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Preparação das amostras para os ensaios.



Material secando ao ar livre



Material destorroado e pronto para os ensaios



Material natural



Material destorroado

Fonte: Autor, 2025

4.4.1 - Peneiramento grosso

Levando em consideração a NBR 7181/2025. Realizou-se o peneiramento grosso, utilizando fração retida na #10. Essa amostra foi lavada até a água sair limpa, e ficar apenas o

material realmente retido na peneira #10. Por fim, foi colocado na estufa para fazer o peneiramento grosso.

Realizou-se o peneiramento grosso com as peneiras de malha #3/4, #3/8, #4, #10 e anotada as massas retidas em cada. Conforme ilustrado na Figura 13

Figura 13 - Procedimento do peneiramento grosso.



Peneiramento com a #10



Retido na peneira



Lavando o material retido



Material retido nas peneiras

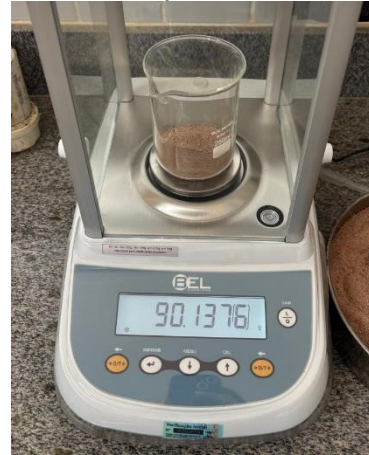
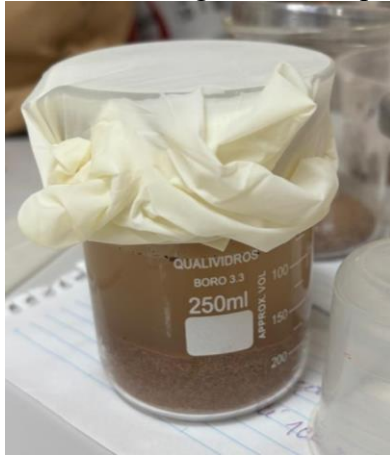
Fonte: Autor, 2025

4.4.2 - Sedimentação

Executou-se a sedimentação com parte do material que passou na peneira de abertura de 2 mm. Preparou-se uma amostra de 90g, a norma estima de 120 g até 70 g, no qual 120 g é utilizado para solos granulares e 70 g para solos coesivos.

Onde ficou de submerso em 125 ml defloculante por 24 horas em um béquer. Lembrando que esse procedimento foi realizado embasado na norma NBR 7181/2025. Conforme a Figura 14.

Figura 14 - Preparação da amostra sedimentação.



Amostra do béquer com defloculante

Peso da amostra

Fonte: Autor, 2025.

Após esse tempo em que o solo ficou com o defloculante, a mistura foi retirada do béquer com ajuda de uma pisseta. Levada para o copo do dispersor, onde é misturada com água destilada por 15 minutos. No qual será despejada em uma proveta de 1000 ml com e completar até a mesma chegar na marca de volume máximo.

Observou-se o deslocamento do densímetro na solução, e foi verificado a temperatura com base em tempos pré-determinados durante 24 horas. A Figura 15 vai ilustrar melhor o preparo, materiais usados e o procedimento.

Figura 15 - Procedimento do ensaio de sedimentação.



a) Amostra no misturador



b) Materiais usados no ensaio



c) Medindo temperatura após leitura



d) Densímetro dentro da proveta

Fonte: Autor, 2025.

4.4.3 - Peneiramento fino

O peneiramento fino foi realizado após o ensaio de sedimentação. O material retirado da proveta ao final da sedimentação foi lavado na peneira #200 e foi levado para estufa, onde ficou por 24h.

Com o material devidamente seco, usou-se as seguintes peneiras de malhas #16, #30, #40, #50, #100, #200 para peneiramento fino, e por fim anotou-se as massas retidas em cada malha.

A Figura 16 ilustra o processo de peneiramento do solo, enquanto a Tabela 01 detalha as peneiras utilizadas nas etapas de peneiramento fino e grosso. A tabela especifica as malhas e as aberturas de cada peneira, fornecendo os parâmetros para a análise granulométrica.

Figura 16 - Procedimento do peneiramento fino.



a) Peneiramento



b) Materiais retidos em cada peneira

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 1 - Peneiras utilizadas na granulometria conjunta.

Peneiras	Abertura (mm)	Peneiras	Abertura (mm)
3/4	19	16	1,2
3/8	9,5	30	0,6
4	4,75	40	0,42
10	2	50	0,30
		100	0,15
		200	0,074

Fonte: Autor, 2025

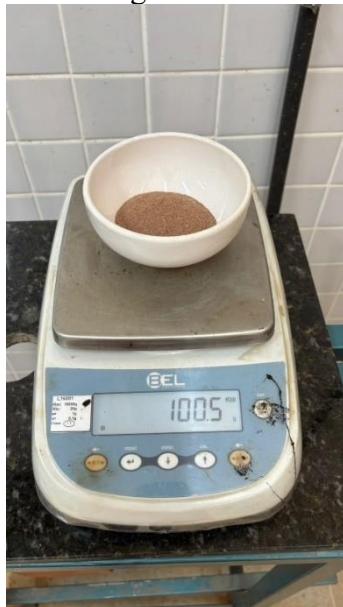
4.4.4 Limites de Atterberg

Foram realizados os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade baseado nas NBR6459:2016 e NBR 7180/2016, respectivamente. O limite de liquidez foi realizado em um aparelho Casagrande automático e o de plasticidade foi realizado os corpos de provas em uma placa de vidro para a moldagem de cilindro de 3 mm de espessura e 100 mm de comprimento.

Seguindo a norma, o ambiente que foram realizados os ensaios tiveram as centrais de ar desligada para não interferir nos resultados, pois ele pode diminuir a umidade das amostras rapidamente.

Com pouco mais de 100 gramas em uma cápsula de porcelana. Misturou-se essa amostra com água destilada por no mínimo 15 minutos. A seguir, coletou-se uma pequena quantidade da amostra e foi modelada uma pequena bola, onde foi amassada com o peso da mão na placa de vidro até alcançar um cilindro 3 mm diâmetro e 100 mm comprimento. Chegando no formato desejado, o corpo de prova foi fechado para formar um círculo. A Figura 17 ilustra, de forma mais clara, as etapas descritas no texto.

Figura 17 - Procedimento do limite de plasticidade.



a) Amostra pesada e destorroada



b) Amostra umedecida



c) Formando o CP na espessura do bastão de vidro e com 10 cm



d) Tentativa de fechar o CP formando um círculo

Fonte: Autor, 2025

O limite de liquidez foi iniciado com a preparação da amostra, que tinha pouco mais de 200 gramas do material destorroado e levado a estufa. Em uma vasilha de porcelana, homogeneizou parte do material com água destilada por no mínimo 15 minutos até arrumar o mesmo na concha do aparelho de Casagrande. Observou-se a consistência do material e os golpes necessários para a ranhura vim a fechar.

Dependendo do comportamento do solo, retirava o solo da concha e misturava mais água ou solo seco para diminuir a umidade. Tem-se que fazer para encontrar vários pontos para encontrar uma variedade de números de golpes, valores entre 15 e 35.

Após a contagem de golpes em cada ensaio, uma porção do solo contida na concha do aparelho deve ser transferida para uma cápsula metálica. Essa amostra é, então, levada à estufa para que se determine o seu teor de umidade, permitindo o cálculo final para cada ensaio. A Figura 18 ilustra, de forma mais clara o procedimento do ensaio.

Figura 18 - Procedimento limite de liquidez.



a) Peso da amostra

b) Amostra no aparelho
Casa Grande

Fonte: Autor, 2025

4.4.5 - Ensaio do picnômetro

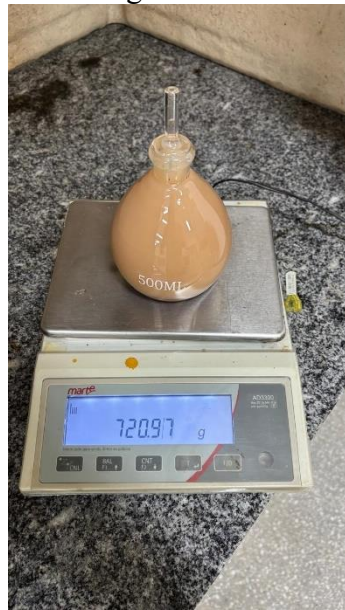
Para o ensaio em questão, a execução foi baseada nas diretrizes do anexo B da NBR 6458/2025 e também da norma DNER-ME 093/94. Buscando determinar a massa específica dos grãos sólidos do solo.

O ensaio foi realizado nas instalações da Ufersa Caraúbas. Para cada picnômetro, utilizou-se aproximadamente 60 gramas de material que passou na peneira de 4,8 milímetros. Primeiramente, o solo foi destorroado e levado à estufa por 24 horas para secagem completa. Em seguida, a amostra foi processada em um misturador por 15 minutos cada amostra.

Para garantir a total ausência de ar, o picnômetro, contendo o solo e preenchido até a metade com água, foi colocado em uma bomba de vácuo por no mínimo 15 minutos. Após esse período, adicionou-se mais água até cerca de um dedo abaixo do gargalo esmerilado e o picnômetro retornou ao vácuo por outros 15 minutos. Esse processo assegurou a retirada de todo ar.

Ao final, foram registrados os pesos do picnômetro seco, do picnômetro com água e do picnômetro com solo e água. A temperatura também foi anotada em cada etapa para a correta calibração do equipamento e para os cálculos finais. As etapas descritas no texto são ilustradas com maior clareza na Figura 19.

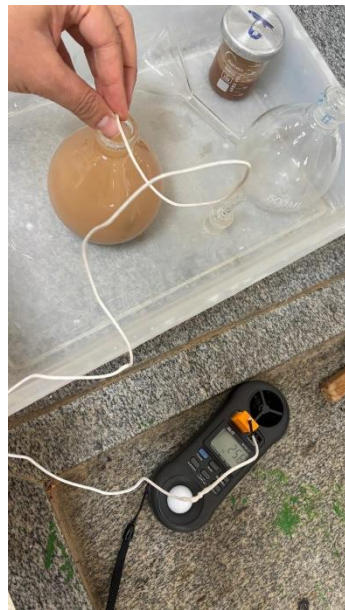
Figura 19 - Procedimento ensaio picnômetro.



a) Peso picnômetro, água e solo



b) Picnômetro e água



c) Aferindo a temperatura



d) Peso das amostras

Fonte: Autor, 2025.

4.5 - Compactação

Esse ensaio estuda a relação da umidade do solo com a massa específica aparente seca do solo. A preparação das amostras para o ensaio em questão foi baseada na NBR 7182/2025. Passando por uma secagem previa até a umidade higroscópica e reutilizando o material para as moldagens dos corpos de provas.

Separou-se 3 kg do material destorroado e peneirado na abertura de 4,75 mm e malha de número 4. Onde o material passante foi usado no ensaio para moldar os Corpos de provas (CP).

A Figura 20 vai ilustrar materiais, quantitativo da amostra e alguns corpos de provas que foram compactados. No ensaio foi utilizado o cilindro pequeno, com aproximadamente 9,949 cm de diâmetro e 989,484 cm³ de volume. Compactou-se o solo no cilindro, dividido em três camadas, 26 golpes cada, com um soquete pequeno de 2,5 kg, uma queda livre de 30,5 cm e uma energia de compactação normal.

Figura 20 - Procedimento do ensaio de compactação.



a) Equipamentos usados no ensaio



b) Peso da amostra AM-01



c) Peso do CP1 no regime seco



d) Peso do CP5 no regime úmido

Fonte: Autor, 2025

4.6 - Adensamento

O ensaio de adensamento é um ensaio que estuda a deformação sofrida pelo solo após a aplicação de um carregamento. O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D2435/2435m.

Para o ensaio foi utilizado a máquina de adensamento mecânica, presente no laboratório do campus de Mossoró. Foi necessário moldar um corpo de prova (CP) no cilindro metálico grande, retirar com o extrator e cortar ele em três pedaços iguais para modelar o CP necessário para levar para a máquina de adensamento.

Com o CP moldado e colocado no compartimento da máquina de medidas (79,8 x 20 mm), foi levado para o aparelho e saturado, onde o teste foi realizado no pior cenário. Depois ele passaria por vários carregamentos, que são padronizados pela norma 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 kPa. Observa-se que no carregamento a carga é dobrada.

No ensaio os 5 kPa, ficou apenas 30 minutos sem grande alteração. Logo a mesma foi considerada uma pré carga. As outras cargas foram colocadas e passaram 24h e depois dobrava o carregamento.

O ensaio deve ser realizado um descarregamento, onde a carga é dividida por 4. O descarregamento segue uma lógica inversa ao carregamento, e a razão para dividir a carga por 4 (ou por 2, dependendo da norma e da prática do laboratório) é principalmente para analisar a expansão elástica do solo e a sua memória de carga.

O processo de descarregamento do corpo de prova foi realizado em estágios, aplicando-se as tensões de 160 kPa, 40 kPa e 10 kPa.

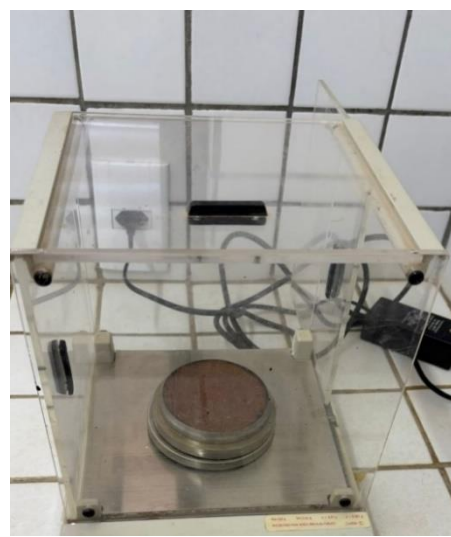
Em cada estágio, as leituras do deformímetro foram registradas em dois momentos: a leitura inicial, tomada imediatamente após a mudança de carga, e a leitura final, realizada após um período de 24 horas. Esse procedimento garante que a deformação do solo expansão seja acompanhada desde o início até a sua estabilização.

A Figura 21 vai ilustrar melhor o molde do CP, máquina e o relógio para fazer as leituras conforme o solo sofria deformação.

Figura 21 - Procedimento ensaio de adensamento.



a) Molde do CP com 79,8 mm de diâmetro



b) CP já moldado



c) Máquina de adensamento



d) Relógio para medir a deformação

4.7 - Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado na UFERSA campus de Mossoró, com o aparelho Owntec MS 101 – cisalhamento direto de solo. O ensaio teve como base a norma ASTM D3080 – 03 e ASTM D2435/2435m – 04.

A preparação das amostras foi da mesma forma do adensamento. Um cilindro grande compactado e os corpos de provas (CP) dividido em pedaços de iguais tamanhos ou aproximados. Foi necessário o molde da máquina, no formato quadrado de 100x100 milímetros para fazer a modelagem do CP.

Usando uma faca para fazer esse processo e a régua de corte para fazer um melhor acabamento das superfícies.

Com os CP moldados foram colocados na caixa da máquina para saturar, depois todos os espécimes eram submetidos a uma pré carga de 5 kPa por 24 horas. O ensaio teve 3 espécimes com cargas de adensamento de 50, 100 e 200 kPa.

Após o adensamento fez-se a parte do cisalhamento direto ou rompimento do CP. A Figura 22 vai ilustrar melhor o que está sendo falado em relação a preparação e decorrência do processo de cisalhamento direto.

Figura 22 - Procedimento do cisalhamento direto.



a) Máquina de cisalhamento direto



b) Compartimento que vai o CP



c) Procedimento de modelagem do CP



d) CP depois do cisalhamento

Fonte: Autor, 2025.

4.8 - Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade com carga variável tem como referência a norma NBR 14545:2021. Esse ensaio foi utilizado o permeâmetro do laboratório de solos, com um cilindro grande, colarinho de mesmo diâmetro, um soquete de pequeno, 3,6 kg de solo destorroadado, seco em estufa por 24 horas e peneirado na peneira de 4,75 de abertura. A amostra foi preparada na umidade ótima e compactada em 2/3 do cilindro.

Na parte superior e inferior do mesmo foi colocado duas pedras porosas, dois pedaços de geotêxtil de mesmo diâmetro do cilindro e dois pedaços de tela de galinheiro numeração 8 no mesmo diâmetro do equipamento.

Com isso foi colocado água na proveta que fica na parede e esperou o solo ser saturado por completo para ser iniciado o estudo de permeabilidade desse solo. A Figura 23 demonstra as etapas descritas no texto com mais clareza.

Figura 23 - Procedimento do ensaio de permeabilidade.



a) Permeâmetro com o solo saturado
ensaio permeabilidade carga
variável



b) Proveta de 0,5 cm de diâmetro
para solos de baixa
permeabilidade



c) Procedimento para molda o CP



d) Montagem do permeâmetro

Fonte: Autor, 2025.

4.9 - Crumb test

O ensaio foi realizado no laboratório de solos de Caraúbas baseado na norma NBR 13601/2020. Utilizou-se 3 béqueres de 200 ml, água destilada, paquímetro e o solo usado foi uma sobra do ensaio de compactação, onde o solo estava na umidade ótima.

O mesmo foi moldado três bolinha em formato de esfera de 6 até 10 mm de diâmetro. Com isso foi colocado as esferas no béquer com água destilada onde deviria ficar por 60 minutos e ser observado o comportamento do solo. Conforme a Figura 24.

Figura 24 - Procedimento ensaio de Crumb teste.



a) Amostras modeladas e secas na estufa



b) Amostra após ser colocada no béquer

Fonte: Autor, 2025.

5 - RESULTADOS

5.1 - Caracterização física do solo

Para a amostra AM-01, realizou-se um ensaio de granulometria conjunta, que indicou a presença de 28,27% de argila, classificando-o como uma argila arenosa.

A massa específica encontrada pelo ensaio de picnômetro desse solo foi determinada como 2,63 g/cm³, valor considerado próximo do usual de 2,60 g/cm³ para solos finos na geotecnia tradicional.

O resultado da sedimentação está na curva granulométrica. Seus resultados são calculados para representar as amostras passantes na abertura de 0,074 milímetros.

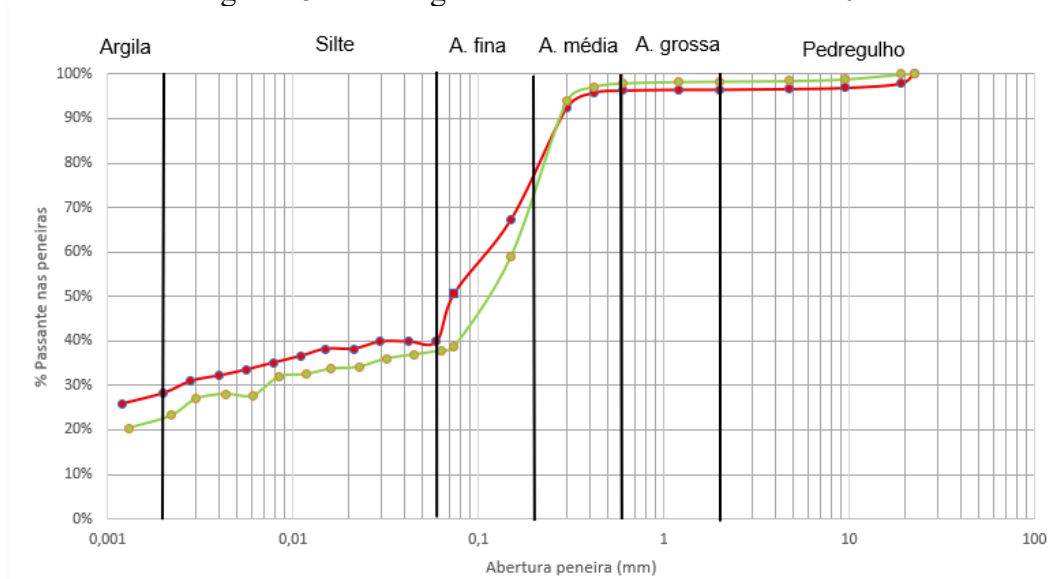
Os ensaios de Limites de Atterberg revelaram que o solo possui um Limite de Plasticidade (LP) de 20%, resultado obtido pela média de sete repetições do ensaio. Da mesma forma, o Limite de Liquidez (LL) foi de 33%, também uma média de sete valores. Com base nesses dados, calculou-se um Índice de Plasticidade (IP) de 13%.

Com base nesses resultados, o solo foi classificado como CL pela SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos). Essa classificação se deu porque o solo apresentou uma quantidade superior a 50% de material passante na peneira de número 200. Na tabela de classificação SUCS, após o solo ter uma quantidade maior de material passante na peneira, você usa a carta de plasticidade.

Pela classificação HRB (Highway Research Board), utilizada em engenharia rodoviária, o solo foi enquadrado como A-6, solo argiloso plástico. Essa classificação se deu porque ele apresentou uma porcentagem superior a 35% de material passante na peneira de número 200, o LL foi menor que 40, o índice de plasticidade IP maior que 10.

As Figuras 25 e 26 ilustrarão, respectivamente, a curva granulométrica e a carta de plasticidade da amostra do solo AM-01. Adicionalmente, a Tabela 2 será disponibilizada com todos os índices físicos relevantes do solo em estudo

Figura 25 - Curva granulométrica da amostra AM-01.



Fonte: Autor, 2025.

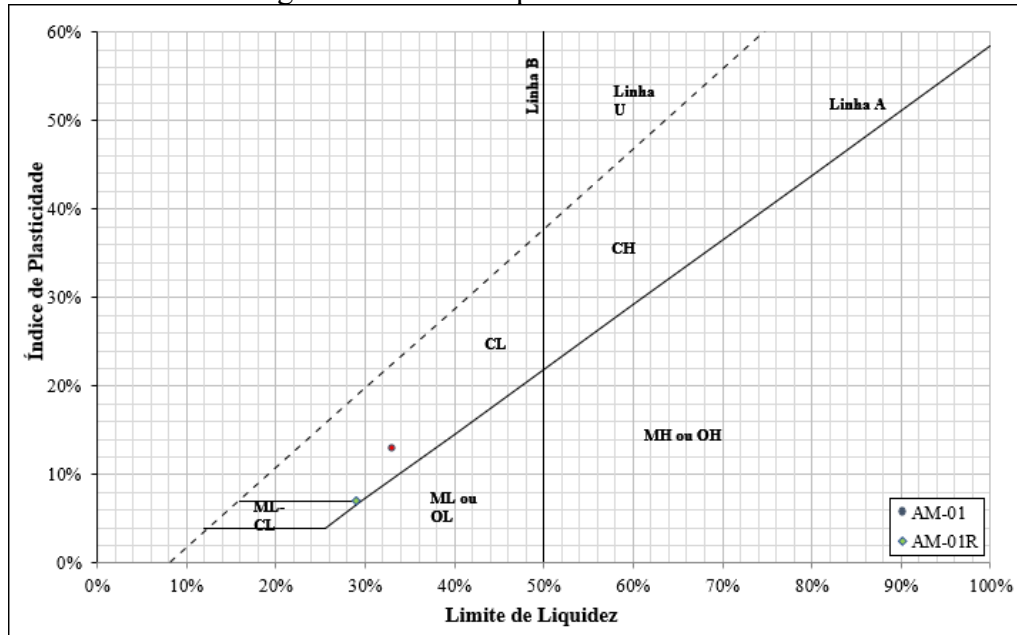
A Figura 25, observa-se duas curvas representadas uma foi a amostra AM-01 que foi a desenvolvida nos ensaios pelo autor a outra AM-01R foi uma desenvolvida pela turma do professor. Mesmo com locais diferentes onde cada uma foi coletada, as características do solo são muito parecidas.

É possível usar a curva granulométrica para determinar a composição predominante de um solo. Com ela, você consegue saber se o solo tem mais partículas grossas ou finas e se a distribuição dessas partículas é uniforme ou não.

No caso do solo em estudo, que é representado no gráfico, ele tem uma má graduação. Vale ressaltar que, em solos argilosos, a plasticidade e a consistência influenciam o comportamento mecânico muito mais do que a própria distribuição granulométrica, de acordo com a Testesolo (2024).

Por fim, utilizando-se da carta de plasticidade, Figura 26. Onde a amostra AM-01 ficou acima da linha A e do lado esquerdo da linha B, foi possível classificar esse solo como uma argila de baixa compressibilidade (CL).

Figura 26 - Carta de plasticidade do solo.



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 2 - Caracterização física da AM-01.

Solo		AM-01
Granulometria	Pedregulhos (%)	3,34
	Areia grossa (%)	0,36
	Areia média (%)	3,98
	Areia fina (%)	40
	Silte (%)	12
	Argila (%)	28,27
Limite de consistência	LL (%)	33
	IP (%)	13
Class. SUCS		CL
Class. granulométrica		Argila Arenosa
ρ_s (g/cm ³)		2,637
HRB		A – 6: Argiloso plástico
Atividade das argilas		0,459

Fonte: Autor, 2025.

5.2 - Ensaio Crumb Test

De acordo com a NBR 13601/1996, que classifica os solos conforme seu comportamento dispersivo em meio aquoso, a amostra AM-01 apresentou um comportamento não dispersivo, recebendo a classificação de grau 1, ou seja, um comportamento não-dispersivo.

Os três corpos de prova, preparados a partir dessa amostra, não apresentaram qualquer indício de turvação na água destilada do béquer. Mesmo após aproximadamente um minuto, tempo necessário para sua completa desagregação, a água permaneceu límpida, confirmando a ausência de dispersão.

Observou-se que depois de 60 minutos o solo ainda permanecia da mesma forma, completamente desagregado no fundo do béquer e a água permanecendo límpida, sem nenhum sinal de turvação. Como mostra a Figura 27.

Figura 27 - Fotos do CP no início e final do ensaio.



CP nos primeiros segundos



CP depois de 60 minutos

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 3 apresentará os resultados dos corpos de prova obtidos no ensaio de Crumb Test.

Os resultados foram satisfatórios. Como o solo tem um comportamento não-dispersivo, ele oferece uma garantia de que sua resistência contra agentes externos será maior. Isso significa que a coesão de suas partículas é alta, o que lhe confere uma resistência superior à erosão.

Tabela 3 - Resultado do ensaio de Crumb Test.

TEMPO (MIN)	GRAU DE DISPERSIBILIDADE
	AM-01
1	1
2	1
15	1
30	1
60	1

Fonte: Autor, 2025.

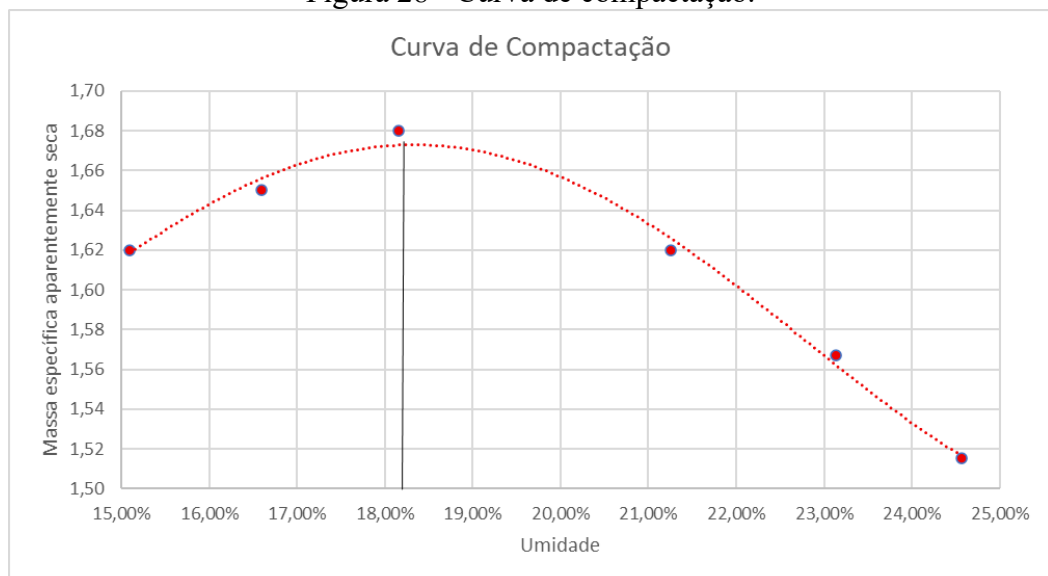
5.3 – Compactação

Os resultados do ensaio de compactação foram determinados a partir da média de seis corpos de prova moldados. A Figura 28 ilustra a curva de compactação, facilitando a visualização dos pontos que se situam tanto no ramo seco quanto no ramo úmido.

Para o ensaio de compactação, a Tabela 4 apresenta os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima. Esses parâmetros foram essenciais na preparação dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade de carga variável, cisalhamento direto e adensamento.

Notavelmente, a umidade ótima obtida foi de 18,16%, valor que representa o melhor estágio que o solo foi compactado dos seis corpos de prova utilizados no ensaio de compactação para encontrar a melhor massa específica. Associada a essa umidade, a massa específica seca máxima encontrada foi de 1,675 g/cm³.

Figura 28 - Curva de compactação.



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de compactação.

SOLO	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	w _{otm} (%)
AM-01	1,675	18,16

Fonte: Autor, 2025

5.4 - Permeabilidade

Os resultados do ensaio de permeabilidade foram obtidos com o solo compactado sob energia de compactação normal. Dado que o solo já havia sido classificado como argila por meio da análise granulométrica, esperava-se, de fato, uma baixa permeabilidade.

Os resultados obtidos serão apresentados na Tabela 5, incluindo o coeficiente de permeabilidade. Este coeficiente é um parâmetro crucial para determinar a adequabilidade do solo como material para aterro sanitário.

De acordo com a NBR 13896/1997, a permeabilidade do solo é o fator mais importante para a implantação de um aterro sanitário.

A Tabela 5 apresenta os índices físicos do corpo de prova do ensaio de permeabilidade. O resultado de $5,4 \times 10^{-7}$ cm/s encontrado está em conformidade com o que a norma estabelece, o que é um resultado satisfatório para a finalidade.

Tabela 5 - Índices físicos e coeficiente de permeabilidade do solo.

	SOLO	AM-01
	ESTADO	Compactado
Índices físicos antes do ensaio	ρ (g/cm ³)	1,90
	ρ_d (g/cm ³)	1,61
	e	76
	w (%)	19,48
	Sr (%)	3,71
Índices físicos após o ensaio	ρ (g/cm ³)	2,01
	ρ_d (g/cm ³)	1,68
	e	0,57
	w (%)	22,335
	Sr (%)	103,25
	K (cm/s)	$5,4 \times 10^{-7}$

Fonte: Autor, 2025.

5.5 - Adensamento

O ensaio de Adensamento foi realizado com corpo de prova compactado e saturado para estudar o solo na pior situação possível. O corpo de prova foi compactado com a umidade ótima e a densidade aparente máxima, buscando uma maior e melhor resistência do solo e menor deformabilidade.

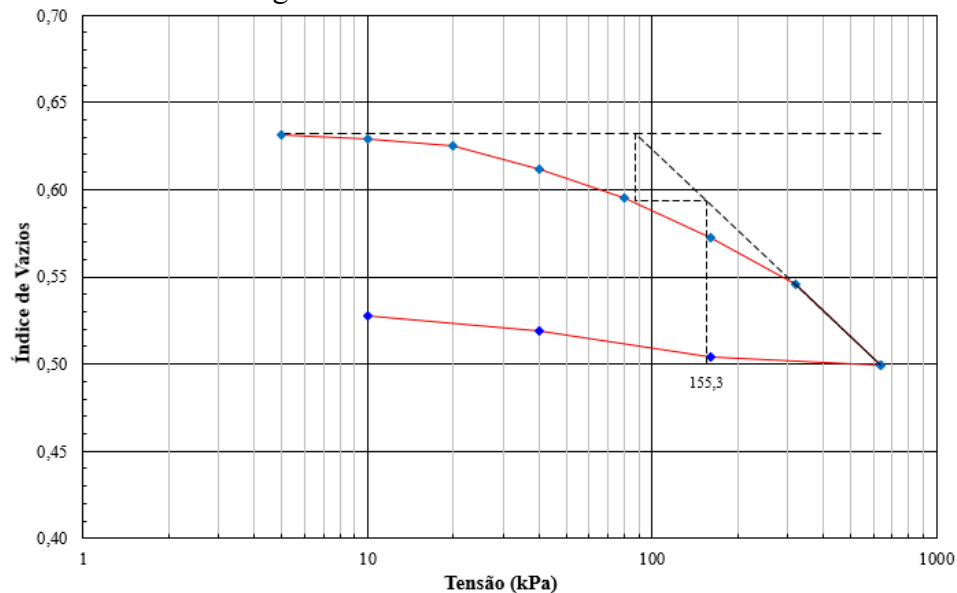
O ensaio foi realizado para estudar a deformação do solo no pior cenário após a aplicação de cargas verticais.

Utilizou-se o método de Pacheco e Silva para encontrar a tensão de pré-adensamento. Essa tensão representa a maior carga que o solo já suportou em sua história e é um dado fundamental para os projetos de fundações.

O método usa a curva de compressão do solo, obtida em laboratório, e consiste em três passos simples. Primeiro, você traça uma linha horizontal a partir do ponto de índice de vazios inicial do solo. Depois, prolonga a parte final e mais inclinada da curva de compressão, chamada de reta virgem. Por fim, desenha uma linha vertical do ponto onde essas duas retas se cruzam, até a curva de compressão. O ponto onde a linha vertical encontra a curva é a tensão de pré-adensamento.

O ensaio revelou na Figura 29, um solo de baixa resistência, com o início de grandes deformações ocorrendo a partir de 155,3 kPa. Por ser uma argila, o solo em estudo demonstrou a característica de memória de cargas sofridas no passado. Isso foi evidenciado no corpo de prova confinado, que apresentou maior resistência até atingir uma carga previamente suportada; a partir desse ponto, sua resistência diminuiu, levando a deformações mais significativas.

Figura 29 - Gráfico do adensamento.



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 6 - Parâmetros dos ensaios de adensamento do solo compactado.

SOLO	ESTADO	σ'_v (kPa)	c_c	c_r	c_d
AM-01	SATUR.	155,3	0,15	0,01	0,03

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 7 - Índices físicos das amostras indeformadas no ensaio de adensamento.

SOLO	ESTADO	ρ_i (g/cm ³)	ρ_f (g/cm ³)	ρ_{di} (g/cm ³)	ρ_{df} (g/cm ³)	w_I (%)	w_f (%)	h_i (cm)	h_f (cm)	S_{ri} (%)	S_{rf} (%)
AM-01	SATUR.	2,63	2,02	1,90	1,72	18,16	17,63	2,06	1,952	76	88

Fonte: Autor, 2025.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os parâmetros e os índices físicos do corpo de prova (CP) da amostra AM-01.

É possível observar a tensão de pré-adensamento (σ_v') desse solo, que, em solos residuais, não é resultado de um carregamento externo que ele suportou. Em vez disso, essa tensão é causada por fatores internos, como a cimentação entre as partículas e a variação de volume devido à umidade.

O texto também mostra os índices de compressão, recompressão e expansão do CP1. É possível ver a deformação do corpo de prova com suas alturas inicial e final, a umidade e a massa específica seca, que se aproxima do valor encontrado na compactação. Isso sugere que a compactação do corpo de prova foi bem-sucedida para a realização do ensaio.

5.6 - Cisalhamento direto

No ensaio de cisalhamento direto, os três corpos de prova foram moldados e compactados na umidade ótima. Este ensaio fornece a resistência do solo ao cisalhamento, que é influenciada principalmente pelo atrito entre os grãos e pela coesão. Como mostra a Tabela 09 dos índices físicos.

Para o solo em estudo, que é uma argila, a resistência esperada tende a ser menor devido à sua natureza mais coesiva. Isso ocorre porque as partículas de argila são mais finas e tendem a ter uma melhor organização, resultando em uma menor área de contato entre elas quando comparadas a solos arenosos, o que naturalmente diminui a contribuição do atrito para a resistência.

Como resultados do ensaio temos três gráficos para ser estudado. Deslocamento horizontal por deslocamento vertical, tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal e a envoltória.

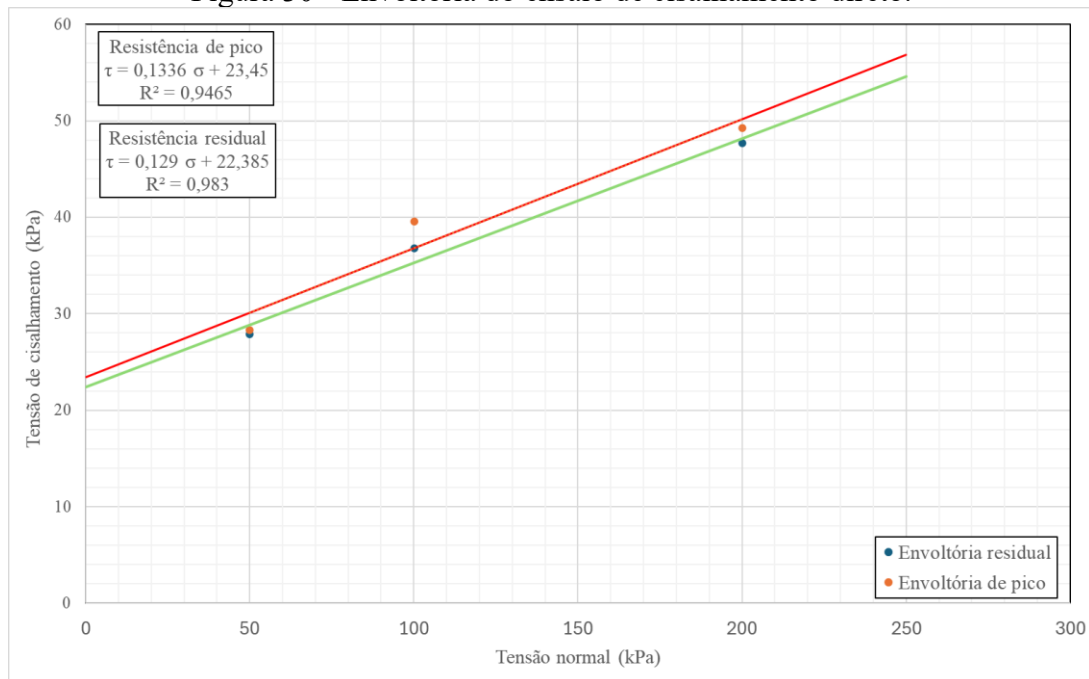
Como o solo é uma argila com IP de 13, significando que o mesmo é medianamente plástico. A envoltória ela tende a diminuir para solos com índice de plasticidade maiores, a mesma vai dizer os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito para diferentes tensões normais.

Observa-se que a Figura 31 ilustra o gráfico de tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal, ele vai representar o pico máximo que o solo suporta, residual que já é quando o solo rompeu e a capacidade de indicar a rigidez do solo. Para a amostra AM-01 podemos dizer que apenas o CP 1 que recebeu uma carga vertical de 50 kPa, tem uma curva parecida com um pico bem definido e a residual bem definida. Os outros dois corpos de provas eles tem curvas diferentes, parece que a carga aplicada está acima da suportada pelo solo.

A curva apresentada para o CP 1 é coincidente a uma curva de resistência de uma argila pré-adensada. Para o CP 2 e CP 3, como a carga chegou próximo e a outra passou dos 155,3 kPa de um pré-adensamento (carregamento passado), o comportamento dele não tem um pico definido.

O gráfico de deslocamento vertical pelo deslocamento horizontal, ele já mostra a deformação do solo pela variação volumétrica do mesmo devido a dilatação ou contração do solo

Figura 30 - Envoltória do ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Autor, 2025.

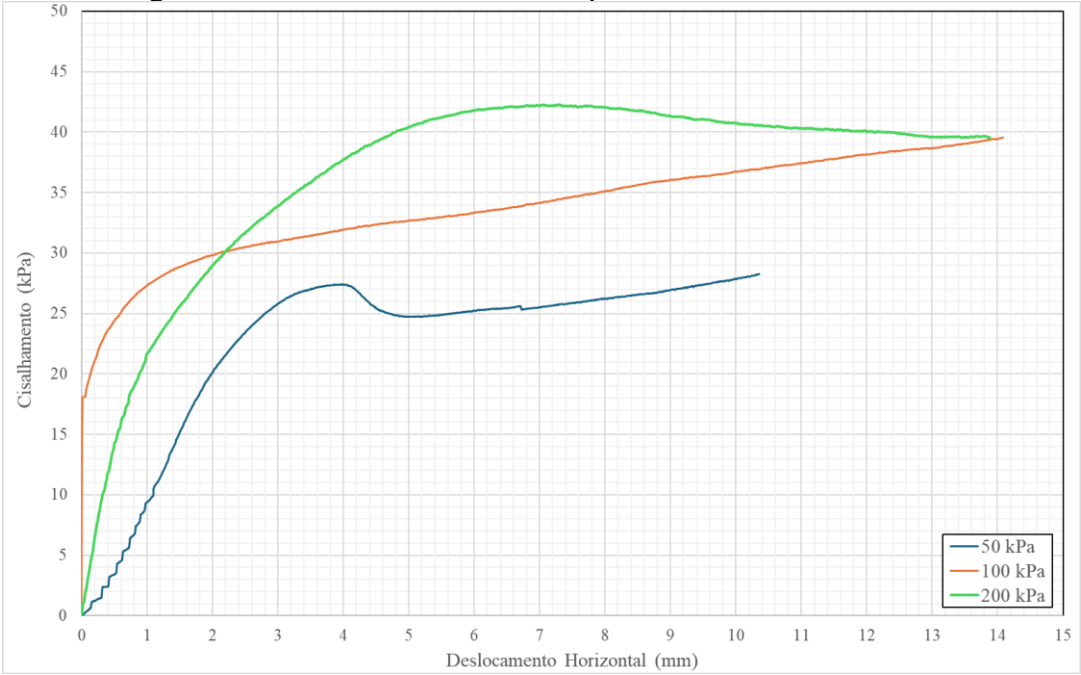
A Figura 30 com esse gráfico da envoltória é possível encontrar os ângulos de atrito do solo tanto para envoltória de pico e a residual. Na Tabela 08 temos os pontos das tensões de pico e residual e as cargas que foram aplicadas nos corpos de provas.

Tabela 8 - Pontos da envoltória de ruptura AM – 01.

σ_v (kPa)	50,09	100,06	200,00
τ_{pico} (kPa)	28,30	39,56	49,24
τ_{residual} (kPa)	27,86	36,76	47,69

Fonte: Autor, 2025.

Figura 31 - Tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal.

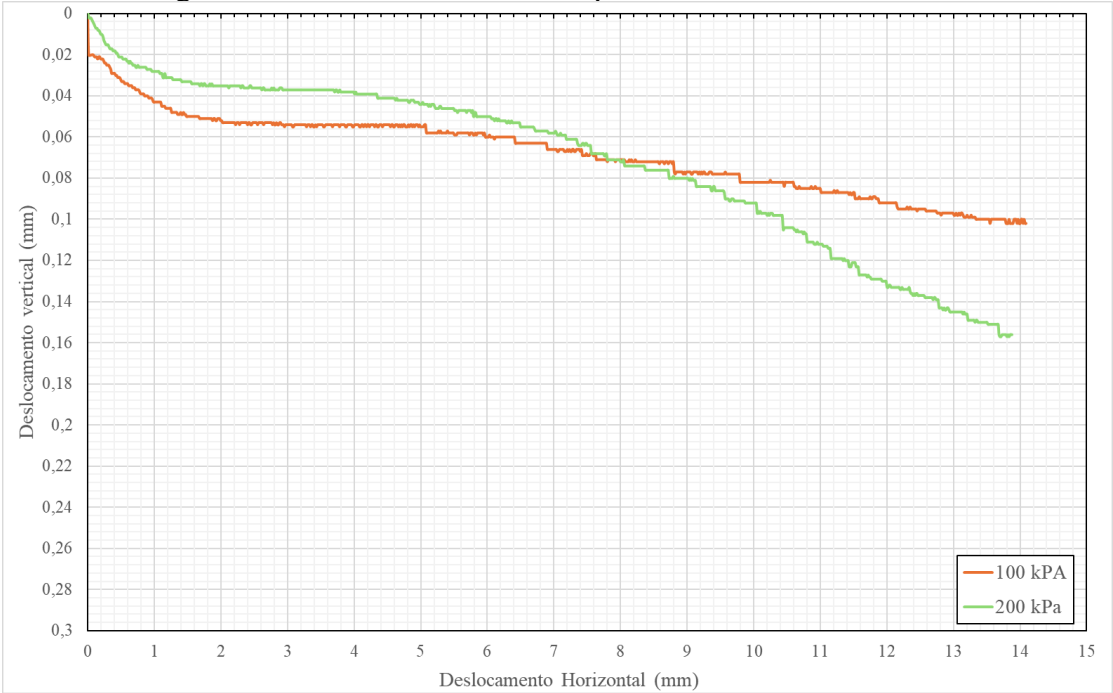


Fonte: Autor, 2025.

No ensaio de cisalhamento direto, o gráfico que relaciona o deslocamento vertical com o deslocamento horizontal mostra como o volume do solo muda à medida que ele é submetido a uma força horizontal. Como ilustrado na Figura 32.

Se o deslocamento da linha do gráfico estiver descendo, significa que o solo está se contraindo (ficando mais denso) enquanto se deforma. Isso é comum em solos mais fofos. Se o deslocamento da linha estiver subindo, significa que o solo está se expandindo (ficando menos denso) enquanto se deforma. Esse fenômeno, chamado de dilatância, ocorre geralmente em solos mais compactos.

Figura 32 - Deslocamento vertical por deslocamento horizontal.



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 9 - Índices físicos dos CP do ensaio de cisalhamento direto AM-01.

SOLO		AM-01		
ESTADO		COMPACTADO		
TENSÃO (kPa)		50	100	200
Índices físicos iniciais dos CP	ρ_i (g/cm³)	1,94	1,93	1,96
	ρ_{di} (g/cm³)	1,64	1,63	1,66
	e_i	0,60	0,60	0,57
	w_i (%)	18,16	18,16	18,16
	h_i (cm)	2,02	2,01	1,99
	n	37,56	37,77	36,63
	S_{ri} (%)	79,47	78,78	82,71
Índices físicos após a etapa de adensamento	ρ_{df} (g/cm³)	1,67	1,68	2,05
	h_f (cm)	1,96	1,96	1,62
	e_f	0,57	0,56	0,28

Fonte: Autor, 2025

Analisando todos os parâmetros quantificados nos ensaios de laboratório, conclui-se que o solo em estudo tem as características necessárias para ser usado na construção de um aterro sanitário.

Após avaliar as características do solo, é possível concluir que ele tem potencial para ser utilizado na construção de um aterro sanitário. A melhor utilização para este solo seria nas camadas de impermeabilização, ou seja, camadas de argilas compactadas que são parte fundamental do sistema de proteção de um aterro sanitário.

No entanto, é importante lembrar que a adequação de um aterro não depende apenas das propriedades do solo. Ele deve também atender a todos os outros critérios da NBR 13896:1997, garantindo a segurança da estrutura e a proteção do meio ambiente.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realizar os ensaios geotécnicos previstos nos objetivos do trabalho, foi possível caracterizar o solo arenítico de Felipe Guerra - RN. Os resultados obtidos confirmaram as características necessárias para que esse solo seja utilizado na construção de um aterro sanitário.

A pesquisa demonstrou que o solo atende aos critérios estabelecidos nas NBR13896/1992 e NBR 8419/1992 para a implantação de um aterro, principalmente no que se refere à baixa permeabilidade, limite de liquidez e o índice de plasticidade o que o torna ideal para as camadas de impermeabilização.

Para complementar este estudo, sugere-se a realização de ensaios de campo que possam aprofundar a investigação sobre o solo. Recomenda-se a execução de um ensaio de permeabilidade *in situ* para validar os resultados de laboratório em condições reais. Além disso, a aplicação do Standard Penetration Test (SPT) seria fundamental para avaliar a resistência do solo no local e identificar a possível presença de lençol freático, informação crucial para o projeto de fundações e a estabilidade do aterro.

Outras sugestões incluem a realização de ensaios de ciclos de umedecimento e secagem para simular as variações climáticas e avaliar a durabilidade do solo sob condições extremas. A análise da interação do solo com outros materiais de construção, como geomembranas, também seria relevante para garantir a eficiência do sistema de impermeabilização a longo prazo.

7 - REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 13601 Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio de torrão (Crum test)** Rio de Janeiro, 2020.

_____, ABNT. **NBR 6457: Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2024.

_____, ABNT. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016

_____, ABNT. **NBR 6459: Solos –Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.

_____, ABNT. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____, ABNT. **NBR 7180: Solos –Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

_____, ABNT. **NBR 14545: Solo –Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.** Rio de Janeiro, 2021.

_____, ABNT. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**, NBR 8419. Rio de Janeiro. 1992

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D2435:** Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. In annual book os ASTM Standards, 2004.

_____, **ASTM D2435/2435M:** Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidations Properties of Soils Using Incremental Loading. In annual book os ASTM Standards, 2011.

BOGGIANI, P. C., MONTANHEIRO, T. J., ARTHUR, A. C., MONTANHEIRO, F. NEGRI, F. A., GESICKI, A. L. **INVESTIGACAo TECNIOLOGICA DE. ARENITOS SIUCIFICADOS DA FORMACAo BOTUCATU (NE DO PARANA) PARA USO COMO ROCHA DE REVESTIMENTO.** São Paulo, 2011. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/6f03d759-0249-4d7c-ac7e-94c5b0e51939/2297774.pdf>

BOSZCZOWSKI, Roberta B. **Laboratório de Mecânica dos Solos: Ensaios Especiais.** Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. *E-book*. p.2. ISBN 9788579753619. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579753619/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. *E-book*. p.18. ISBN 9788521638032. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638032/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos Solos: Obras de Terra e Fundações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. *E-book*. p.211. ISBN 9788521638018. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638018/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

CIDADES. **Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs>.

CORPORATIVO AVB. **NBR 13896 de 06.1997 - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.pdf**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/513365779/NBR-13896-de-06-1997-Aterros-de-residuos-na-o-perigosos-Crite-rios-para-projeto-implantac-a-o-e-operac-a-o-pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 4. ed. **Porto Alegre: +A Educação** - Cengage Learning Brasil, 2019. *E-book*. p.23. ISBN 9788522128280. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522128280/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. **DNER – ME 093: Solo – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1994

FERNANDES, Manuel de M. **Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais (v.1)**. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. *E-book*. p.13. ISBN 9788579752391. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579752391/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

FLORIANO, Cleber. **Mecânica dos solos**. Porto Alegre: SAGAH, 2016. *E-book*. p.114. ISBN 9788569726975. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788569726975/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

FLORIANO, Cleber. **Mecânica dos solos aplicada**. Porto Alegre: SAGAH, 2017. *E-book*. p.43. ISBN 9788595020658. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595020658/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

FREITAS, L. G. B. G. - **CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E MINERALÓGICA DE PERFIS DE INTEMPERISMO EM ARENITOS DA BACIA DO PARANÁ NO TRIÂNGULO MINEIRO (MG)**. Disponível em:

<https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/0b97047a-55a9-4be2-8de4-af5b6cfc023b/content>

LANGE, L. C.; SIMÕES, G. F. **Guia do profissional em treinamento Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.dec.uem.br/mbr/Saneamento%20IV/aterro/aterro_sanitario.pdf>.

MURRIETA, Pedro. **Mecânica dos Solos**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. *E-book*. p.14. ISBN 9788595156074. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595156074/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

PINTO, Carlos de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3.ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. *E-book*. pág.98. ISBN 9788579751165. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751165/>. Acesso em: 26 jul. 2025.

SANTOS, Palloma Ribeiro Cuba dos; DAIBERT, João D. **Análise dos Solos**. Rio de Janeiro: Érica, 2013. *E-book*. p.12. ISBN 9788536518589. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536518589/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

SGARBI, G. N. C. **ARENITOS EÓLICOS DA FORMAÇÃO AREADO (BACIA CRETÁCEA DO SÃO FRANCISCO): CARACTERIZAÇÃO, DIAGÊNESE E ASPECTOS QUÍMICOS**. Revista Brasileira de Geociência. Dezembro, 1991. Disponível em: <http://www.bjg.siteoficial.ws/1991/n.4/5.pdf>

SILVA, W. K. A. S.; TAGLIAFERRO, E. R. **ATERRO SANITÁRIO - A ENGENHARIA NA DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS / LANDFILL - ENGINEERING IN THE FINAL DISPOSAL OF SOLID WASTE**. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 2, p. 12216–12236, 2021.

Solo arenoso: Características, vantagens e desafios para o cultivo. Disponível em: <<https://blog.connectere.agr.br/solo-arenoso/>>. Acesso em: 10 maio. 2025.

BLIGHT, Geoffrey E.; LEONG, Eng Choon (Ed.). **Mechanics of residual soils**. CRC Press, 2012.

Studocu. **NBR 13896:1997 – Aterro de resíduo não perigosos, critérios para projeto, implantação e operação**. Disponível em: <<https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-do-ceara/geotecnica-ambiental/nbr-13896-aterro-de-residuos-nao-perigosos/34506830>>.

TESTESOLO. **Análise Granulométrica do Solo - A Curva e os Tipos de Análise - Testesolo**. Disponível em: <<https://testesolo.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-a-curva-e-os-tipos-de-analise/>>.