



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

ANA CLARICE SOUZA SILVA

**INFLUÊNCIA DA SALINIDADE DO FLUIDO PERCOLANTE SOBRE A
PERMEABILIDADE DE SOLOS ARGilosos**

FORTALEZA

2025

ANA CLARICE SOUZA SILVA

INFLUÊNCIA DA SALINIDADE DO FLUIDO PERCOLANTE SOBRE A
PERMEABILIDADE DE SOLOS ARGilosos

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental
do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti
Soares.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S578i Silva, Ana Clarice Souza.

Influência da salinidade do fluido percolante sobre a permeabilidade de solos argilosos / Ana Clarice Souza Silva. – 2025.

66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Permeabilidade. 2. Soluções salinas. 3. Argilominerais. I. Título.

CDD 628

ANA CLARICE SOUZA SILVA

INFLUÊNCIA DA SALINIDADE DO FLUIDO PERCOLANTE SOBRE A
PERMEABILIDADE DE SOLOS ARGilosos

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental
do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Ambiental.

Aprovada em: 27/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ma. Vitoria Lima Tavares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Neily e Cristiano.

Aos meus avós, Maria e Frederico, Rosália e
Sitônio (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por todas as oportunidades e conhecimentos concedidos ao longo da minha jornada acadêmica.

À minha família, minha maior rede de apoio e que mesmo à distância sempre esteve presente.

Aos meus pais e avós, por todo o suporte incondicional ao longo desses anos. Vocês foram minha força motriz e meu alicerce, sem vocês essa conquista não teria sido possível.

Em especial, à minha mãe, Neily, e às minhas avós, Maria e Rosália, que para mim representam, de forma genuína, os significados de perseverança e coragem. Se cheguei até aqui, foi porque tive mulheres fortes ao meu lado, me inspirando e apoiando.

Ao meu pai, Cristiano, e à sua esposa, Janaila, pelo carinho e apoio nos momentos difíceis.

Ao meu companheiro, Lucas Damascena, pelas palavras de incentivo e pelas risadas que tornaram os desafios mais leves, e às amizades que a faculdade me proporcionou. Em especial, aos meus colegas Clecio Ribeiro, Livia Lauren e Levy Kevin pelo companheirismo e apoio ao longo do caminho.

Ao Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares, por sua paciência, dedicação e disposição, além da excelente orientação e do conhecimento compartilhado, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Ceará e a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desse trabalho.

“Slow down, you’re doing fine
You can’t be everything you wanna be before
your time.” (JOEL, Billy. Vienna. In: The
Stranger. Nova York: Columbia Records, 1977.
Faixa 5, 3 min 34 s).

RESUMO

O estudo avalia a influência de fluidos percolantes com diferentes concentrações de NaCl sobre a permeabilidade de solos argilosos, um parâmetro essencial para aplicações em engenharia geotécnica e ambiental. A pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender as variações na condutividade hidráulica quando a composição química do fluido percolante difere da água destilada, que é comumente utilizada em ensaios laboratoriais, mas nem sempre representa as condições reais de campo. A metodologia envolveu a caracterização geotécnica e mineralógica de duas amostras de solos argilosos, por meio de ensaios de granulometria, densidade real, limites de consistência, compactação e permeabilidade. A caracterização mineralógica foi realizada utilizando a técnica de difração de raios X (DRX). Os ensaios de permeabilidade foram conduzidos com água destilada e soluções salinas com concentrações de 5, 10, 15 e 20 g/L de NaCl. Os resultados demonstraram que a condutividade hidráulica dos solos argilosos diminui com o aumento da concentração de sal na solução percolante. Esse efeito é atribuído à alteração da dupla camada difusa e à consequente dispersão das partículas de argila, o que leva a diminuição dos vazios dos poros e consequente diminuição do fluxo de água. Observou-se que para os dois solos com o mesmo argilomineral (caulinita e ilita) essa redução da permeabilidade foi mais acentuada com o aumento do teor de argila.

Palavras-chave: permeabilidade; soluções salinas; argilomineral.

ABSTRACT

The study evaluates the influence of percolating fluids with different NaCl concentrations on the permeability of clayey soils, a key parameter for geotechnical and environmental engineering applications. The research is justified by the need to understand variations in hydraulic conductivity when the chemical composition of the percolating fluid differs from distilled water, which is commonly used in laboratory tests but does not always represent actual field conditions. The methodology involved the geotechnical and mineralogical characterization of two clayey soil samples through granulometry, specific gravity, Atterberg limits, compaction, and permeability tests. The mineralogical characterization was performed using the X-ray diffraction (XRD) technique. Permeability tests were conducted using distilled water and saline solutions with NaCl concentrations of 5, 10, 15, and 20 g/L. The results showed that the hydraulic conductivity of clayey soils decreases with increasing salt concentration in the solution. This effect is attributed to the expansion of the diffuse double layer and the consequent dispersion of clay particles, leading to a reduction in pore voids and, consequently, lower water flow. It was observed that, for both soils with the same clay mineral (kaolinite-illite), this reduction in permeability was more pronounced in the soil with a higher clay content.

Keywords: permeability; saline solutions; clay mineral.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Validação da Lei de Darcy	21
Figura 2 - Estrutura de solos argilosos.	25
Figura 3 - Estrutura solos compactados.....	26
Figura 4 - Esquema de uma folha tetraédrica de silício.	27
Figura 5 - Esquema de uma folha octaédrica.	27
Figura 6 - Representação esquemática da estrutura típica de uma caulinita.	29
Figura 7 - Representação esquemática da estrutura típica de uma esmectita.	30
Figura 8 - Representação esquemática da estrutura típica de uma ilita.....	31
Figura 9 - Formação da dupla camada difusa.....	31
Figura 10 - Propriedades dos fluidos percolantes e influência na condutividade hidráulica. ..	34
Figura 11 - Aspecto visual do material	37
Figura 12 - Fluxograma do programa experimental.....	39
Figura 13 - Ensaio de densidade real.....	40
Figura 14 - Ensaio de granulometria: etapa de sedimentação.	41
Figura 15 - Ensaio de limites de consistência.....	42
Figura 16 - Permeômetro.....	43
Figura 17 - Amostras da técnica de DRX.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos solos.....	48
Gráfico 2 - Curvas de compactação dos solos.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação dos grupos de materiais em função do diâmetro médio dos grãos	24
Tabela 2 - Solos salinos, salino - sódico e sódico.....	36
Tabela 3 - Resultados de densidade real.....	46
Tabela 4 - Percentual de cada material.....	48
Tabela 5 - Resultado Limites de Consistência.....	49
Tabela 6 - Classificação dos solos por meio do índice de plasticidade (IP).....	50
Tabela 7 - Classificação dos solos usando o SUCS.....	51
Tabela 8 - Umidade ótima e densidade aparente seca máxima.	51
Tabela 9 - Resultados da difração de raios - X do solo 01.	54
Tabela 10 - Resultados da difração de raios - X do solo 02.	55
Tabela 11 - Valores de permeabilidade solo 01.	56
Tabela 12 - Valores de permeabilidade solo 02.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CTC	Capacidade de troca catiônica
CNU	Coeficiente de não uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CE	Condutividade elétrica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DRX	Difração de raios – x
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GS	Grau de saturação
IA	Indice de atividade
IP	Indice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentos
LP	Limite de plasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PST	Percentagem de sódio trocável
pH	Potencial hidrogeniônico
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
‰	Per mil
ρ_d	Densidade aparente seca
W_{ot}	Umidade ótima
Gs	Densidade real
#	Diâmetro de abertura da peneira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações preliminares	17
1.2 Justificativa	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo geral	19
1.3.2 Objetivo específicos	19
1.4 Organização do trabalho	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 A água no solo	21
2.2 Fatores que afetam a condutividade hidráulica	22
2.2.1 Textura dos solos	23
2.2.2 Estrutura dos solos	25
2.2.3 Mineralogia dos solos	26
2.2.4 Dupla camada difusa	31
2.2.4 Fluido percolante	33
2.2 Solos halomórficos (salinos, sódicos e salino-sódicos)	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Materiais	37
3.1.1 Solos	37
3.1.2 Fluidos percolantes	38
3.2 Programa experimental	38
3.3 Metodologia dos ensaios	39
3.3.1 Caracterização geotécnica	40
3.3.2 Caracterização mineralógica	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46

4.1 Determinação da caracterização física e mineralógica	46
4.1.1 Caracterização geotécnica	46
4.1.1.1 Densidade real	46
4.1.1.2 Granulometria	47
4.1.1.3 Limites de Attenberg	49
4.1.1.4 Compactação	51
4.1.2 Caracterização mineralógica	53
4.1.2.1 Difração de raio - X (DRX)	53
4.1.2.1.1 Difração de raios - X dos solos	53
4.2 Permeabilidade dos solos submetidos a diferentes fluidos percolantes	55
4.2.1 Permeabilidade a carga variável	56
5 CONCLUSÃO	59
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	59
REFERÊNCIAS	61
ANEXO A – DIFRATOGRAMA SOLO 01	67
ANEXO B – DIFRATOGRAMA SOLO 02	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações preliminares

A interação entre o solo e fluidos distintos da água pode provocar mudanças significativas no comportamento hidráulico e mecânico de determinados solos, explicando diversos fenômenos geotécnicos. Quando percolados com esses fluidos, os solos podem sofrer alterações físico-químicas que modificam sua estrutura e propriedades. Um dos principais parâmetros usados para entender como um solo reage ao fluxo de fluidos é a condutividade hidráulica. Nos solos arenosos, o fluxo de água depende, principalmente, do tamanho dos vazios entre as partículas. Já nos solos argilosos, fatores como a interação entre partículas, a estrutura do solo e as características do fluido percolante têm um papel determinante na permeabilidade. Além disso, a mineralogia da fração argilosa, a distribuição de cargas superficiais e a capacidade de troca catiônica podem impactar diretamente a condutividade hidráulica, tornando-a sensível às condições químicas do meio.

Azambuja (2004) ressalta que os solos argilosos não são materiais inertes, pois suas partículas estão sujeitas a interações físico-químicas superficiais. Isso acontece devido à estrutura molecular das argilas, que contém substituições isomórficas responsáveis por variações nas cargas elétricas da superfície das partículas. Como resultado, as partículas de argila interagem com as moléculas de água e com íons dissolvidos, formando camadas de hidratação ao seu redor. Quando há fluidos com alta concentração de sais, o potencial elétrico das partículas de argila e da água livre pode ser alterado, modificando a adesão da camada de água à matriz do solo e, consequentemente, influenciando sua condutividade hidráulica.

A composição do fluido percolante é um dos fatores que influenciam na permeabilidade dos solos argilosos. A presença de íons dissolvidos pode alterar a espessura da dupla camada difusa ao redor das partículas, o que pode levar à dispersão, floculação e reestruturação do solo. Veloso (1991) destaca que concentrações elevadas de sódio (Na^+), combinadas com a química do fluido percolante, podem comprometer a estrutura do solo, modificando o sistema de poros e alterando a infiltração e a condutividade hidráulica. Nesse contexto, Mitchell (1976) aponta que as principais variações na permeabilidade decorrem das mudanças na dupla camada difusa induzidas pelos fluidos percolantes. Fatores como a concentração eletrolítica, a valência e o tamanho dos cátions, a adsorção de ânions, a constante dielétrica do fluido, a temperatura e o pH influenciam diretamente a contração ou expansão das frações argilosas, impactando a permeabilidade do solo.

Além dessas interações físico-químicas, a influência da química do fluido percolante na condutividade hidráulica tem implicações práticas importantes. Ensaios laboratoriais de permeabilidade costumam ser realizados com água destilada ou de abastecimento público, o que nem sempre reflete as condições reais do campo. Em ambientes naturais e industriais, a presença de contaminantes, sais dissolvidos e variações de pH pode alterar significativamente a estrutura do solo e sua permeabilidade. Isso pode levar a interpretações equivocadas no dimensionamento de barreiras geotécnicas, sistemas de drenagem e na previsão da migração de fluidos em reservatórios subterrâneos.

Diante desse cenário, entender como as soluções salinas afetam a condutividade hidráulica dos solos argilosos é essencial para prever seu comportamento em condições reais. O estudo desse fenômeno contribui para aprimorar modelos preditivos e estratégias de engenharia voltadas à contenção de resíduos, ao armazenamento geológico de fluidos e ao controle da contaminação de aquíferos, promovendo maior confiabilidade nos projetos geotécnicos e ambientais.

1.2 Justificativa

A permeabilidade dos solos argilosos desempenha um papel fundamental em diversas áreas da engenharia geotécnica e ambiental, influenciando processos como o fluxo subterrâneo, a contenção de resíduos, o armazenamento geológico de fluidos e a estabilidade de maciços. No entanto, embora os ensaios laboratoriais sejam amplamente utilizados para determinar a condutividade hidráulica, a maioria desses testes é feita com água destilada ou de abastecimento público. Isso pode não refletir com precisão as condições reais de campo, onde a composição química do fluido percolante, especialmente a presença de sais dissolvidos, pode alterar significativamente a estrutura do solo e sua permeabilidade. Como consequência, os valores obtidos em laboratório podem diferir daqueles observados no meio natural.

Por isso, entender como as soluções salinas influenciam a condutividade hidráulica dos solos argilosos é essencial para prever seu comportamento de forma mais realista. A salinidade pode modificar a espessura da dupla camada difusa das partículas argilosas, provocando efeitos como floculação e dispersão, que afetam diretamente a permeabilidade do solo. Em reservatórios subterrâneos, aterros sanitários e barreiras geotécnicas, a presença de fluidos salinos pode alterar o fluxo de fluidos e a interação entre o solo e o fluido, tornando indispensável um conhecimento mais aprofundado sobre essas influências.

Além disso, a crescente preocupação com a contaminação dos solos e das águas subterrâneas reforça a importância de estudar essa interação. Saber como diferentes concentrações de sais afetam a permeabilidade do solo ajuda a aprimorar metodologias experimentais, tornando as análises mais confiáveis e auxiliando na mitigação de impactos ambientais. Dessa forma, este estudo se justifica pela necessidade de reduzir incertezas relacionadas às variações na condutividade hidráulica e fornecer embasamento técnico para projetos geotécnicos e hidrogeológicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência de fluidos com diferentes concentrações de sal sobre a permeabilidade solos argilosos.

1.3.2 Objetivo específicos

Os objetivos específicos deste trabalho, visando alcançar o objetivo geral, são:

- Realizar a caracterização geotécnica dos dois solos argilosos selecionados por meio de ensaios de granulometria, densidade real, limites de consistência, compactação e permeabilidade;
- Caracterizar mineralogicamente os solos por meio de ensaio de difração de raios X.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo corresponde à introdução, na qual são apresentados a relevância do estudo e os objetivos a serem alcançados ao longo da pesquisa. No segundo capítulo, são abordados os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento e compreensão do tema. Discute-se o comportamento da água no solo e os principais fatores que influenciam a variação da condutividade hidráulica.

O terceiro capítulo descreve os materiais utilizados e os métodos adotados na pesquisa. São apresentados os critérios de seleção dos solos, a estruturação do programa experimental e os ensaios realizados para embasar o estudo. No quarto capítulo, são

apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica e mineralógica dos solos estudados. Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões do trabalho, destacando os principais achados e suas implicações para o entendimento do tema.

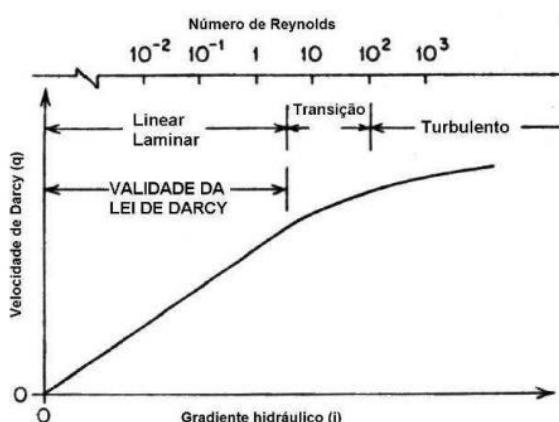
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que norteiam a pesquisa. Serão discutidos o comportamento do fluxo da água no solo e os princípios que regem a condutividade hidráulica. Além disso, serão analisados os principais fatores que influenciam essa propriedade, como textura, estrutura, mineralogia e o fluido percolante, com a apresentação de estudos que demonstram sua influência na permeabilidade do solo. Também será abordada a classificação e as características dos solos halomórficos - incluindo solos salinos, salino-sódicos e sódicos - destacando o comportamento da condutividade hidráulica nesses materiais.

2.1 A água no solo

O fluxo da água em meios porosos pode ocorrer de duas formas: laminar ou turbulento. A caracterização desse fluxo depende da velocidade do escoamento, bem como das propriedades do meio poroso e do fluido. No regime laminar, as partículas de fluido movem-se em trajetórias paralelas, sem interferências significativas entre si, devido à baixa velocidade de escoamento. Já no regime turbulento, a velocidade do fluido excede um determinado valor crítico, resultando em trajetórias desordenadas das partículas, que interagem e geram perdas de energia por turbulência. A determinação do regime de fluxo é feita por meio do número de Reynolds (Re). Freeze e Cherry (1979) apresentaram uma escala de valores para o número de Reynolds, indicando as faixas de validade da Lei de Darcy, apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Validade da Lei de Darcy.



Fonte: Freeze & Cherry (1979)

No geral, o fluxo da água no solo é considerado laminar devido à estrutura porosa e ao pequeno tamanho dos vazios, que impõem uma resistência significativa ao movimento do fluido. Para que ocorra fluxo turbulento, são necessários solos de granulometria grossa, como pedregulhos e areias, associados a elevados gradientes hidráulicos.

De acordo com Bastos (2023), o fluxo da água no solo é regido pela Lei da Conservação de Energia, representada pela equação de Bernoulli, e permeabilidade dos solos, descrita pela Lei de Darcy, e pela Lei da Conservação da Massa. O fluxo ocorre devido à diferença de energia entre dois pontos no solo, de forma que a água se desloca do ponto de maior energia para o de menor energia.

A Lei de Darcy estabelece o coeficiente de permeabilidade (k) como sendo uma propriedade fundamental dos meios porosos, definida como a razão entre a velocidade de percolação do fluido e o gradiente hidráulico. O gradiente hidráulico, por sua vez, é determinado pela relação entre a diferença de carga hidráulica entre dois pontos e a distância percorrida pelo fluxo.

Ressalta-se que a permeabilidade e a condutividade hidráulica são grandezas inter-relacionadas, mas não equivalentes. A permeabilidade é uma propriedade intrínseca do meio poroso, determinada pela estrutura e conectividade dos poros, independentemente do fluido que o atravessa. Já a condutividade hidráulica depende tanto da permeabilidade do meio quanto das propriedades do fluido percolante, como viscosidade e densidade.

Por exemplo, considere um solo com determinada permeabilidade sendo atravessado por dois fluidos com diferentes densidades e viscosidades. O fluido de maior viscosidade resultará em uma menor condutividade hidráulica, mesmo que a permeabilidade do solo permaneça inalterada. Da mesma forma, a presença de soluções salinas pode alterar a condutividade hidráulica do solo ao modificar as interações entre partículas e a estrutura dos poros.

2.2 Fatores que afetam a condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica de solos argilosos é controlada por uma interação complexa de fatores, incluindo a mineralogia da fração argilosa, o arranjo estrutural das partículas, o grau de compactação, o nível de saturação e, especialmente, as propriedades físico-químicas do fluido percolante. Esse último fator pode influenciar processos de dispersão ou flocação das partículas, alterando significativamente a permeabilidade do meio (MITCHELL, 1993; ROWE et al., 1995).

Segundo Mitchell (1965) e Benson (1994), a condutividade hidráulica dos solos está diretamente relacionada a parâmetros geotécnicos como a atividade da argila, o grau de compactação e os limites de consistência. De acordo com Shackelford (2000), a condutividade hidráulica de solos argilosos compactados é influenciada por diversos fatores, incluindo a energia de compactação, o teor de umidade, o tipo de compactação (estática ou dinâmica) e o tamanho das partículas.

Estudos de Boyton e Daniel (1985) e Sharma e Lewis (1994) indicam que, enquanto em solos arenosos a percolação é predominantemente controlada pelas propriedades do próprio solo, em solos finos a condutividade hidráulica sofre influência significativa das propriedades físico-químicas do fluido percolante. Isso reforça a importância de se avaliar diferentes tipos de fluidos em estudos de permeabilidade, especialmente em contextos onde a água destilada ou de abastecimento não está disponível, como ocorre em campo, pois a presença de íons dissolvidos pode modificar a estrutura do solo e, consequentemente, sua condutividade hidráulica.

2.2.1 *Textura dos solos*

O solo é um sistema trifásico composto por uma fase sólida, líquida e gasosa, constituído por materiais minerais e orgânicos que recobrem a maior parte das extensões continentais do planeta (EMBRAPA, 1999). A textura do solo, definida pelo tamanho relativo e a distribuição das partículas sólidas, exerce influência direta em suas propriedades geotécnicas e hidráulicas. Ela está relacionada à granulometria dos grãos e tem grande importância na engenharia geotécnica, pois afeta a permeabilidade dos solos. Segundo Pinto (2006), os solos podem ser classificados em dois grandes grupos de acordo com sua granulometria: a fração grossa, composta por areia e pedregulho, e a fração fina, formada por silte e argila. A Tabela 1 abaixo ilustra a variação dos grupos de materiais em função do diâmetro médio do grão.

Tabela 1 - Variação dos grupos de materiais em função do diâmetro médio dos grãos

Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	de 25 cm a 1 m
Pedra	de 7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	de 4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	de 2 mm a 4,8 mm
Areia média	de 0,42 mm a 2 mm
Areia fina	de 0,05 mm a 0,42 mm
Silte	de 0,005 mm a 0,05 mm
Argila	inferior a 0,005 mm

Fonte: Pinto (2006)

A granulometria do solo afeta diretamente sua condutividade hidráulica, uma vez que o tamanho e a distribuição dos poros determinam a facilidade com que a água pode percolar pelo meio. De modo geral, solos compostos por partículas de maior diâmetro, como areias e pedregulhos, apresentam maior condutividade hidráulica devido à presença de poros maiores e menor resistência ao escoamento do fluido. Em contrapartida, solos ricos em fração fina, especialmente aqueles com elevado teor de argila ativa, apresentam condutividade hidráulica reduzida, pois a pequena dimensão dos grãos resulta em porosidade menor e maior atração eletrostática entre as partículas, dificultando a percolação da água (BARDEN; COLLINS, 1973).

Crispim (2010) analisou a relação entre a granulometria do solo e suas propriedades mecânicas, demonstrando que um aumento no teor de argila leva a um incremento na plasticidade, no potencial de expansão ou contração, na compressibilidade e na coesão. Ao mesmo tempo, essa elevação no teor de argila reduz significativamente a condutividade hidráulica e o ângulo de atrito interno do solo. Benson et al. (1994) também destacaram a forte influência da granulometria na condutividade hidráulica, observando que seu aumento é diretamente proporcional à porcentagem de pedregulho e areia e inversamente proporcional ao conteúdo de silte e argila. Esses pesquisadores verificaram que a condutividade hidráulica diminui exponencialmente à medida que o teor de argila aumenta, sendo que valores inferiores a 10^{-7} cm/s só foram registrados em amostras com teor de argila superior a 15%.

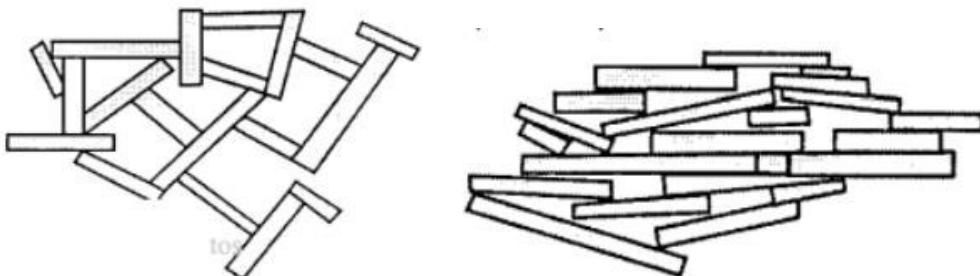
Além da granulometria, a consistência do solo também influencia sua condutividade hidráulica. Mitchell (1976) demonstrou que solos com altos valores de limite de liquidez e índice de plasticidade apresentam maior proporção de partículas de argila com alta

superfície ativa, o que acentua sua capacidade de retenção de água e reduz a permeabilidade. Assim, a condutividade hidráulica não é apenas uma função do tamanho das partículas, mas também da interação eletroquímica entre as mesmas e o fluido percolante.

2.2.2 Estrutura dos solos

A estrutura do solo refere-se ao arranjo espacial das partículas que o compõem e à forma como essas partículas são agregadas. Essa organização estrutural varia conforme o tipo de solo, podendo ser relativamente simples, como nos solos arenosos, onde as partículas se dispõem de maneira mais solta e irregular, ou bastante complexa, como nos solos argilosos, onde a interação eletroquímica entre as partículas desempenha um papel fundamental na formação da estrutura. Segundo Lambe (1958), os solos argilosos podem apresentar duas formas estruturais principais: floculada e dispersa, conforme pode ser visto na Figura 2. O fator determinante para a formação de uma dessas estruturas é o teor de umidade, pois a presença de água influencia diretamente a expansão ou contração da dupla camada difusa, dependendo do tipo de argilomineral predominante.

Figura 2 - Estrutura de solos argilosos.



(a) estrutura floculada (contato face-aresta) (b) estrutura dispersa (contato entre faces)

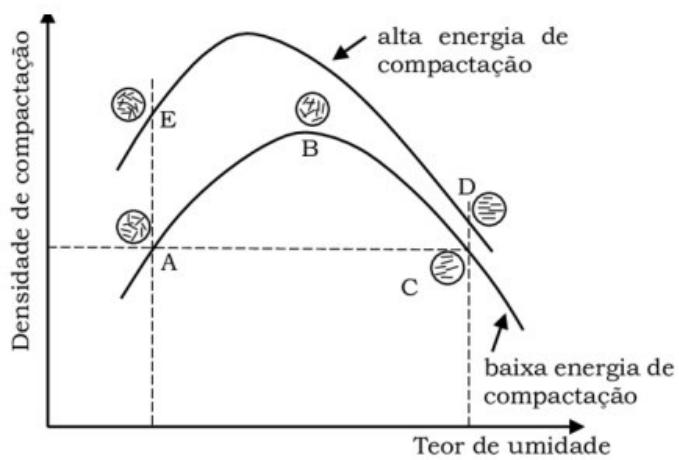
Fonte: Lambe & Whitman (1969)

De acordo com Lambe (1958), quando o teor de umidade do solo é elevado, há uma expansão da dupla camada difusa, resultando em um maior grau de dispersão das partículas. Nesse estado, as partículas de argila tendem a se organizar de forma paralela umas às outras, formando uma estrutura dispersa (Figura 2 – (a)). Por outro lado, quando a umidade do solo é reduzida, a dupla camada iônica permanece contraída, reduzindo as forças de repulsão entre as partículas. Isso favorece a formação de uma estrutura floculada, na qual as partículas se agrupam de maneira desordenada, criando maiores vazios entre si (Figura 2 – (b)).

De acordo com Shackelford (2000), a condutividade hidráulica de solos argilosos compactados é influenciada por diversos fatores, incluindo a energia de compactação, o teor de umidade, o tipo de compactação (estática ou dinâmica) e o tamanho das partículas. Segundo Mitchell (1976), variações expressivas na permeabilidade podem ocorrer dentro de intervalos relativamente estreitos de teor de umidade e densidade de compactação, devido à formação de diferentes arranjos estruturais. Esse efeito está associado ao rearranjo das partículas do solo, na qual se observa que teores de umidade mais elevados e maior energia de compactação favorecem uma disposição mais paralela das partículas, reduzindo a conectividade dos poros e dificultando o fluxo de água.

Lambe (1958) propôs uma interpretação da curva de compactação, ilustrado na Figura 3, segundo a qual, no ramo seco a atração face-aresta entre as partículas predomina sobre a energia de compactação, resultando em uma estrutura floculada. Já no ramo úmido a maior disponibilidade de água gera repulsão entre as partículas, formando uma estrutura dispersa, com partículas orientadas. Para um mesmo teor de umidade, a dispersão das partículas é tanto maior quanto maior for a energia de compactação.

Figura 3 - Estrutura solos compactados.



Fonte: Lambe (1958)

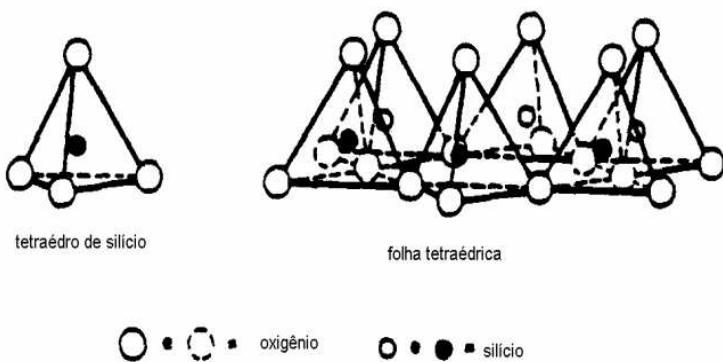
2.2.3 Mineralogia dos solos

Os solos argilosos são compostos por argilominerais, que são silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo também conter elementos alcalinos e alcalinos-terrosos em menores quantidades. Esses minerais possuem uma estrutura cristalina bem definida, com

átomos organizados em camadas ou lâminas, como descrito por Santos (1989) e Badillo e Rodríguez (1988). A estrutura dos argilominerais é caracterizada pela alternância entre camadas de tetraedros e camadas de octaedros. Segundo Mitchell (1993), a unidade tetraédrica é composta por quatro átomos de oxigênio, que se situam nas extremidades de um tetraedro, enquanto o átomo de silício ou alumínio ocupa o centro. Já a unidade octaédrica é formada por seis átomos de oxigênio ou hidroxila, dispostos em torno de um cátion central, que pode ser Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} e, em casos raros, Ni^{2+} (Grim, 1962).

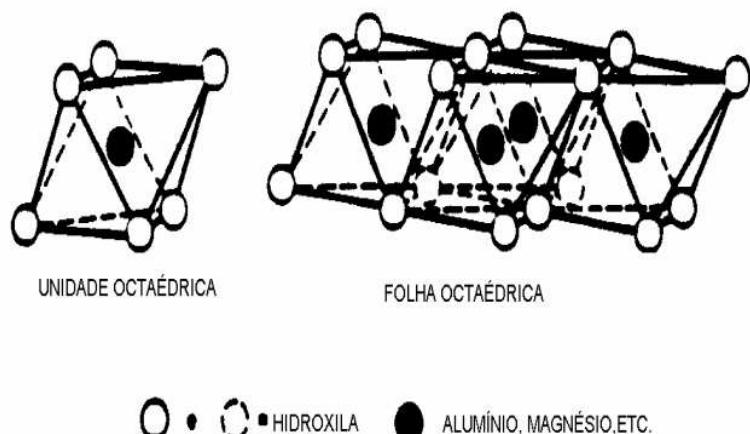
Assim, a estrutura dos argilominerais é resultado do empilhamento alternado dessas camadas tetraédricas de silício (Figura 4) e octaédricas de alumínio ou ferro (Figura 5), formando uma estrutura lamelar característica dos solos argilosos.

Figura 4 - Esquema de uma folha tetraédrica de silício.



Fonte: Grim (1962)

Figura 5 - Esquema de uma folha octaédrica.



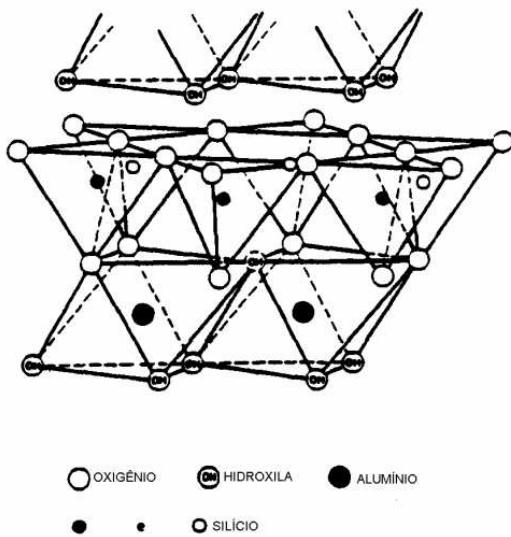
Fonte: Grim (1962)

Uma argila pode ser composta por um único tipo de argilomineral ou por uma mistura de vários, com um mineral predominante. Os minerais argilosos, juntamente com o formato e o tamanho singular das partículas, somado ao diâmetro reduzido dos vazios, são responsáveis por conferir ao solo seus baixos valores de condutividade hidráulica. Além disso, o solo argiloso é afetado por interferências físico-químicas que originam interações superficiais entre as partículas, o que também impacta diretamente na condutividade hidráulica do solo. Dessa forma, a presença e a concentração desses minerais têm grande influência nas características do solo.

Os argilominerais mais abundantes podem ser classificados de acordo com sua estrutura molecular em dois tipos: 1:1 (difórmicos) e 2:1 (trifórmicos). Esses termos fazem referência a estrutura molecular composta por uma unidade tetraédrica (folhas de sílica) ligadas a unidades octaédricas (folhas de gibsita) formando a estrutura 1:1 e a unidades octaédricas (folhas de gbsita) ligadas a duas unidades tetraédricas (folhas de sílica) formando a estrutura 2:1. Esses arranjos moleculares influenciam as propriedades do solo, como sua capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica e sua capacidade de expansão e contração (Lambe & Whitman, 1979). Os principais grupos de minerais argilosos são a caulinita, a esmectita e a ilita.

A caulinita, por exemplo, possui uma estrutura 1:1, ou seja, em cada camada existe uma folha tetraédrica de sílica e uma folha octaédrica de alumínio (gibsita), unidas por ligações de hidrogênio entre as hidroxilas do octaedro e o cátion de oxigênio do tetraedro, conforme ilustrado na Figura 6. Por se tratar de uma ligação covalente, que é mais forte do que as ligações de outros tipos de minerais, as partículas de caulinita são relativamente estáveis, dificultando a inserção de moléculas de água e sua expansão. Segundo Grim (1953), a fórmula estrutural da caulinita é representada por $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$, apresentando uma área específica de cerca de 10 m^2/g e uma capacidade de troca catiônica (CTC) em torno de 10 meq/100g (Yong et al., 1992).

Figura 6 - Representação esquemática da estrutura típica de uma caulinita.



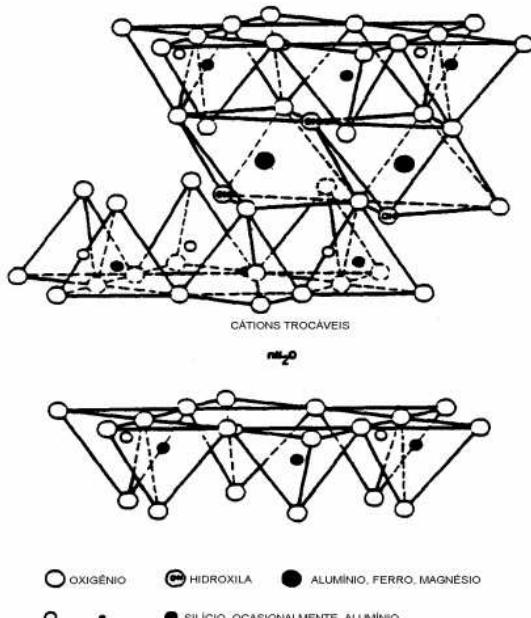
Fonte: Grim (1962)

O grupo das esmectitas, ou montmorilonitas, é composto por argilominerais com estrutura do tipo 2:1, o que significa que apresentam duas camadas tetraédricas de silício para cada camada octaédrica de alumínio, conforme ilustrado na Figura 7. Essas estruturas são unidas por ligações iônicas, que, embora mais fracas e instáveis do que as ligações covalentes presentes em outros tipos de argilominerais, ainda desempenham um papel importante nas propriedades do material.

Além disso, nas esmectitas ocorre um fenômeno denominado substituição isomórfica, comum nos argilominerais do tipo trifórmico, no qual um cátion é substituído por outro dentro da estrutura sem alterar o arranjo dos átomos, mas alterando a carga elétrica da partícula. Esse processo confere às montmorilonitas uma grande capacidade de absorção de água, o que resulta em sua notável expansão quando em contato com líquidos.

Esses argilominerais possuem composição química expressa pela fórmula $(OH)_4Al_4Si_8O_2H_2O$ e uma área específica muito alta, cerca de $800\ m^2/g$, o que confere à esmectita uma elevada plasticidade e comportamento coloidal (Carvalho, 1997). Segundo Mitchell (1976), a capacidade de troca catiônica do grupo é da ordem de 80 - 150 meq/100g.

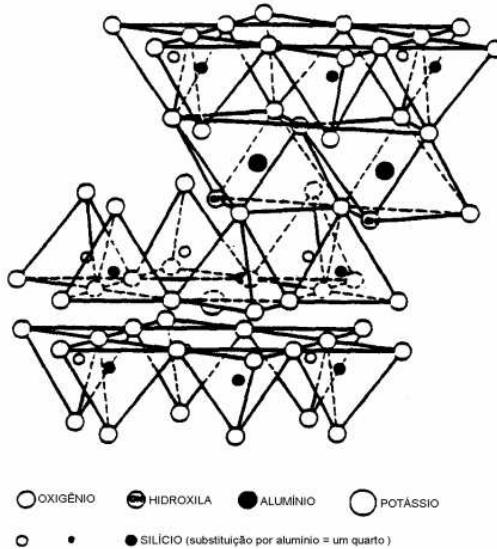
Figura 7 - Representação esquemática da estrutura típica de uma esmectita.



Fonte: Grim (1962)

As ilítas, que possuem uma estrutura semelhante à das esmectitas, ou seja, com duas camadas tetraédricas de silicato e uma camada octaédrica de gibsita, conforme ilustrado na Figura 8, também passam por substituição isomórfica. No entanto, neste caso, os íons de potássio (K^+) atuam como ligantes entre as camadas. A presença do K^+ como elemento de ligação confere maior estabilidade à estrutura das ilítas, impedindo a expansão das partículas na presença de água, como ocorre com a montmorilonita. Segundo Mitchell (1976), a capacidade de troca catiônica desse grupo da ordem de 10 - 40 meq/100g.

Figura 8 - Representação esquemática da estrutura típica de uma ilita.

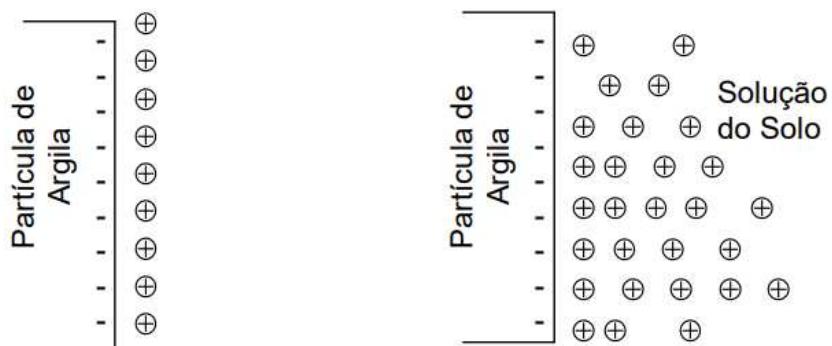


Fonte: Grim (1962)

2.2.4 Dupla camada difusa

A dupla camada difusa é um conceito fundamental para entender o comportamento dos solos argilosos, especialmente no que se refere às suas interações com a água e aos fenômenos de floculação e dispersão das partículas. Em solos argilosos, que são predominantemente compostos por argilominerais, as superfícies das partículas de argila possuem cargas negativas. Essa carga negativa atrai moléculas de água, formando ao redor das partículas uma camada de atração, conhecida como camada difusa (Bolt, 1978). A representação pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 - Formação da dupla camada difusa.



(a) partícula de argila seca

(b) partícula de argila hidratada

Fonte: Filho (2012)

A dinâmica entre as forças de atração iônica e a difusão dos íons é crucial para a formação e comportamento da camada difusa. A difusão tende a mover os cátions da camada difusa para a solução, equilibrando suas concentrações, enquanto a atração iônica da superfície da partícula de argila mantém esses cátions próximos à superfície, formando a camada difusa. A intensidade e a espessura desta camada estão diretamente relacionadas à magnitude da carga superficial das partículas (Uehara e Gillman, 1981). A camada difusa é composta por duas regiões distintas: a camada de Stern, que está fortemente associada à superfície da partícula e contém íons que estão diretamente ligados a ela, e a camada difusa propriamente dita, onde os íons estão mais afastados e mais fracamente ligados (Bolt, 1978).

De acordo com Gheyi *et al.* (2016), a dupla camada difusa é formada por uma região de distribuição de cargas elétricas ao redor das partículas carregadas negativamente, que se encontram submersas em soluções eletrolíticas. Quando o solo argiloso é umedecido, os íons presentes na solução se distribuem ao redor da partícula de maneira a neutralizar as cargas superficiais, formando a camada dupla eletrostática. A espessura dessa camada pode ser alterada pela adição de íons com maior valência ou pela alteração da concentração iônica da solução, o que tem impacto direto sobre a condutividade hidráulica do solo. A dispersão das partículas de argila ocorre em baixas concentrações de íons, especialmente os monovalentes, como o sódio (Na^+), o que leva a um aumento na espessura da camada difusa e à expansão das partículas (Fassbender e Bornemisza, 1987).

A presença de íons monovalentes, como o Na^+ , contribui significativamente para a dispersão das partículas, formando camadas de argila com baixa estabilidade estrutural, o que dificulta o movimento de água no solo. Isso é explicado pela interação dos cátions com as superfícies de carga negativa das partículas, que resulta em um aumento da espessura da dupla camada e na expansão das partículas de argila, formando camadas com baixa permeabilidade (McNeal e Coleman, 1966).

Crispim (2010) complementa que a baixa expansibilidade de argilominerais como a caulinita ocorre devido à sua estrutura cristalina, que impede a entrada de água entre as camadas. Ao contrário, minerais como as esmectitas têm uma alta expansibilidade intracristalina devido à penetração de água e outros líquidos entre as camadas, o que resulta em uma maior capacidade de troca catiônica e de adsorção de água, aumentando significativamente a plasticidade do solo (Olphen, 1963).

Snethen *et al.* (1977) explicam que o potencial expansivo de um argilomineral depende da hidratação dos cátions entre as camadas, que reduz a força de atração entre as camadas de silicato e favorece a dispersão das partículas. Este processo é fortemente

influenciado pela pressão osmótica, que aumenta com a hidratação da camada difusa e pode causar uma expansão significativa do volume do solo (Presa, 1984).

Em solos com baixa umidade, as partículas de argila não se hidratam suficientemente, o que resulta em fracas forças de repulsão e favorece a floculação das partículas. Por outro lado, quando o teor de umidade aumenta, ocorre a expansão da dupla camada difusa, o que leva à dispersão das partículas e à mudança no arranjo das mesmas, organizando-as de forma mais paralela (Lambe, 1958).

Segundo Freire e Freire (2007), a degradação de solos salinos está relacionada principalmente às suas propriedades químicas, já que a alta concentração de sais modifica a pressão osmótica, dificultando a absorção de água, mas também melhora a floculação. Em solos sódicos, o sódio favorece a dispersão das partículas de argila, o que reduz a permeabilidade do solo e aumenta a viscosidade da água, contribuindo para a redução da condutividade hidráulica e da taxa de infiltração de água no solo (Keren *et al.*, 1988).

2.2.4 Fluido percolante

O fluido percolante influencia diretamente a condutividade hidráulica do solo. Segundo Mitchell (1993), essa influência ocorre de duas formas principais: (1) por mecanismos de adsorção, como troca catiônica, pontes de hidrogênio, forças de Van der Waals, hidratação catiônica e osmótica, que modificam o arranjo cristalino, resultando em agregação, dispersão, floculação ou defloculação, alterando a porosidade do solo; (2) por mecanismos que geram fluxos associados, onde reações químicas induzem fluxos elétrico, térmico e químico, que interagem com o fluxo hidráulico.

Shackelford (1994) complementa que as variações na condutividade hidráulica decorrem da floculação de partículas argilosas induzida por soluções eletrolíticas, do encolhimento da matriz do solo na presença de solventes orgânicos e da dissolução mineral causada por ácidos ou bases. O autor destaca que o aumento da concentração catiônica e da valência dos cátions, bem como a redução da constante dielétrica e da temperatura, favorecem a floculação e elevam a condutividade hidráulica. A Figura 10 resume como a variação dessas propriedades do fluido percolante afeta a dupla camada difusa e, consequentemente, a condutividade hidráulica do solo.

Figura 10 - Propriedades dos fluidos percolantes e influência na condutividade hidráulica.

Parâmetro do Fluido	Efeito Relativo nos Parâmetros	
	Decréscimo da dupla camada, floculação e acréscimo da condutividade hidráulica	Acréscimo da dupla camada, dispersão e decrecimento da condutividade hidráulica
Concentração Eletrolítica	Acréscimo	Decréscimo
Valência dos Cátions	Acréscimo	Decréscimo
Constante Dielétrica	Decréscimo	Acréscimo
pH	Decréscimo	Acréscimo
Tamanho dos Cátions	Decréscimo	Acréscimo
Adsorção Aniônica	Decréscimo	Acréscimo

Fonte: Shackelford (1994)

Mitchell (1976) destaca que a principal causa de modificações na condutividade hidráulica decorre das alterações na dupla camada difusa causadas pelas soluções percolantes. Fatores como concentração eletrolítica, valência e diâmetro dos cátions, adsorção de ânions, constante dielétrica, temperatura e pH influenciam diretamente a contração ou expansão das frações argilosas.

Em concordância, Shackelford (1994) ressalta que essas propriedades são determinantes para a espessura da dupla camada difusa, embora sua influência varie conforme o tipo de solução. Nos fluidos salinos, por exemplo, a concentração eletrolítica, a valência e o tamanho dos cátions exercem papel preponderante.

Para investigar esse efeito, Quirk e Schofield (1955) realizaram ensaios de permeabilidade em um solo argiloso, utilizando soluções de 1,0 mol/L de NaCl, 0,0316 mol/L de MgCl₂ e 0,01 mol/L de CaCl₂. O solo foi inicialmente saturado por 12 horas e, em seguida, lixiviado com soluções progressivamente mais diluídas desses sais por cinco horas. Os autores observaram que o cloreto de sódio teve o maior impacto na condutividade hidráulica, tornando o solo quase impermeável quando lixiviado com uma solução de 0,01 mol/L. Essa redução na permeabilidade foi atribuída à expansão e dispersão da fração argila.

Yamasaki (2012) estudou a condutividade hidráulica de solos argilosos e arenosos percolados com água destilada e soluções salinas de 250 mg/L e 500 mg/L. Os resultados indicaram que as variações na permeabilidade foram limitadas. Com a solução de 250 mg/L, a permeabilidade do solo predominantemente arenoso aumentou em 41,7%, enquanto o solo mais

argiloso manteve-se inalterado. Já com a solução de 500 mg/L, houve uma redução de 5,4% na permeabilidade do solo argiloso.

Bastos (2023) analisou a influência de fluidos salinos em solos contendo cinzas de carvão e observou que a infiltração da água diminuiu com o aumento da concentração salina. Foram testadas duas misturas: M1 (20% cinzas e 80% caulinita) e M2 (80% cinzas e 20% bentonita). Usando uma solução salina de 5 g/L, a permeabilidade da mistura M1 reduziu 80% em relação à água pura, enquanto a mistura M2 apresentou um decréscimo de 45%.

Frenkel *et al.* (1978) observaram que, em solos cauliníticos, o aumento nos teores de sódio promove a dispersão da argila. Os autores destacaram que essa dispersão leva ao adensamento do solo devido ao bloqueio dos poros por partículas de argila dispersa.

Pedrotti *et al.* (2015) e Keren *et al.* (1988) reforçam que as alterações nas propriedades físico-hídricas dos solos estão associadas à dispersão química, um fenômeno diretamente influenciado pela concentração eletrolítica da solução. Quanto maior o teor de sódio no solo e menor a concentração de eletrólitos na solução, mais intensa será a dispersão das argilas. Esse efeito, aliado ao aumento da viscosidade da água, resulta em uma redução significativa da condutividade hidráulica do solo.

2.2 Solos halomórficos (salinos, sódicos e salino-sódicos)

Solos salinos e sódicos, ou halomórficos, são afetados pelo excesso de sais e se desenvolvem em condições de drenagem inadequadas ou em regiões áridas e semiáridas. Nessas áreas, a baixa precipitação, combinada com camadas quase impermeáveis e alta evaporação, contribui para a presença de sais solúveis, sódio trocável ou ambos em camadas próximas à superfície. Esses solos se formam por meio de dois processos: salinização e solonização. O processo de salinização envolve a concentração de sais solúveis na solução do solo e resulta na formação dos solos salinos. O processo de solonização promove a formação de solos sódicos, e é constituído por dois sub-processos: sodificação e dessalinização. A sodificação, primeira etapa, é o processo de passagem do íon Na^+ da solução do solo para o complexo de troca, formando os solos denominados de salino-sódicos, enquanto a dessalinização, etapa final, promove a lavagem dos sais solúveis, resultando na formação de solos unicamente sódicos (GHEYI *et al.*, 2016). Assim, um solo halomórfico pode ser classificado como salino, sódico ou salino-sódico, dependendo de três parâmetros: condutividade elétrica (CE), percentagem de sódio trocável (PST) e potencial hidrogeniônico (pH). Essa classificação é apresentada na Tabela 02.

Tabela 2 - Solos salinos, salino - sódico e sódico

Critérios	Tipos de solos			
	Normal	Salino	Sódico	Salino - sódico
CE (dS/m) 25º C	< 4	≥ 4	< 4	≥ 4
PST (%)	< 15	< 15	≥ 15	≥ 15
pH	4 a 8,5	≤ 8,5	8,5 a 10	Próximo de 8,5

Fonte: Richards (1970)

Ezlit *et al.* (2013) observaram que fatores como o tipo e o teor de argila, a concentração de sais e a quantidade de sódio trocável e solúvel influenciam significativamente a condutividade hidráulica do solo. Segundo Ribeiro *et al.* (2009), solos salinos tendem a apresentar suas partículas de argila na forma floculada devido à alta concentração de sais e à baixa quantidade de sódio no complexo de troca, o que resulta em uma permeabilidade igual ou até superior à de outros tipos de solo. Por outro lado, solos sódicos, cujo pH varia entre 8,5 e 10, favorecem a dispersão das partículas de argila, que podem migrar no perfil e formar um horizonte B enriquecido com sódio trocável, conferindo ao solo condições físicas desfavoráveis à infiltração de água. Embora os efeitos da salinidade e sodicidade dos solos sejam amplamente estudados, prever suas consequências ainda representa um desafio. Como apontado por Ezlit *et al.* (2013), variáveis como teor de argila, composição mineralógica, pH e quantidade de matéria orgânica podem influenciar a resposta dos solos à presença desses sais.

Em um experimento conduzido por Paes *et al.* (2014) para avaliar a influência do sódio na condutividade hidráulica do solo, constatou-se que o aumento da percentagem de sódio trocável (PST) e a redução da condutividade elétrica (CE) da solução estão diretamente associados à diminuição da condutividade hidráulica saturada. Ribeiro *et al.* (2009) também ressaltam que os efeitos negativos da PST sobre a permeabilidade não dependem apenas de seus níveis no solo, mas também da presença de sais na solução, da textura do solo, do tipo de argila predominante e da condutividade elétrica da água utilizada.

Os cátions trocáveis presentes no solo desempenham um papel crucial na definição de propriedades como estrutura, estabilidade dos agregados, dispersão das partículas, permeabilidade e infiltração (Shainberg e Oster, 1978). A predominância de sódio trocável, por exemplo, pode levar o solo a se tornar adensado, compacto ou disperso, dependendo das condições ambientais. Em contrapartida, a presença de sais solúveis tende a promover a floculação das partículas e aumentar a permeabilidade do solo (Gheyi *et al.*, 1991; Dias e Blanco, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais usados na pesquisa e a metodologia empregada para alcançar os objetivos propostos.

3.1 Materiais

3.1.1 Solos

Neste projeto de pesquisa, foram utilizados dois solos disponíveis no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará (UFC). A seleção dos materiais foi realizada com base em uma análise tátil-visual, considerando a porcentagem de finos e a possível tendência à expansão quando em contato com a água. Para fins de referência ao longo do texto, os solos foram nomeados como Solo 01 e Solo 02. O Solo 02 foi escolhido por apresentar, segundo a análise inicial, maior probabilidade de expansão em comparação ao Solo 01, permitindo a investigação de comportamentos distintos nos ensaios. O aspecto visual dos dois solos pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Aspecto visual do material



(a) solo 01



(b) solo 02

Fonte: autor.

3.1.2 Fluidos percolantes

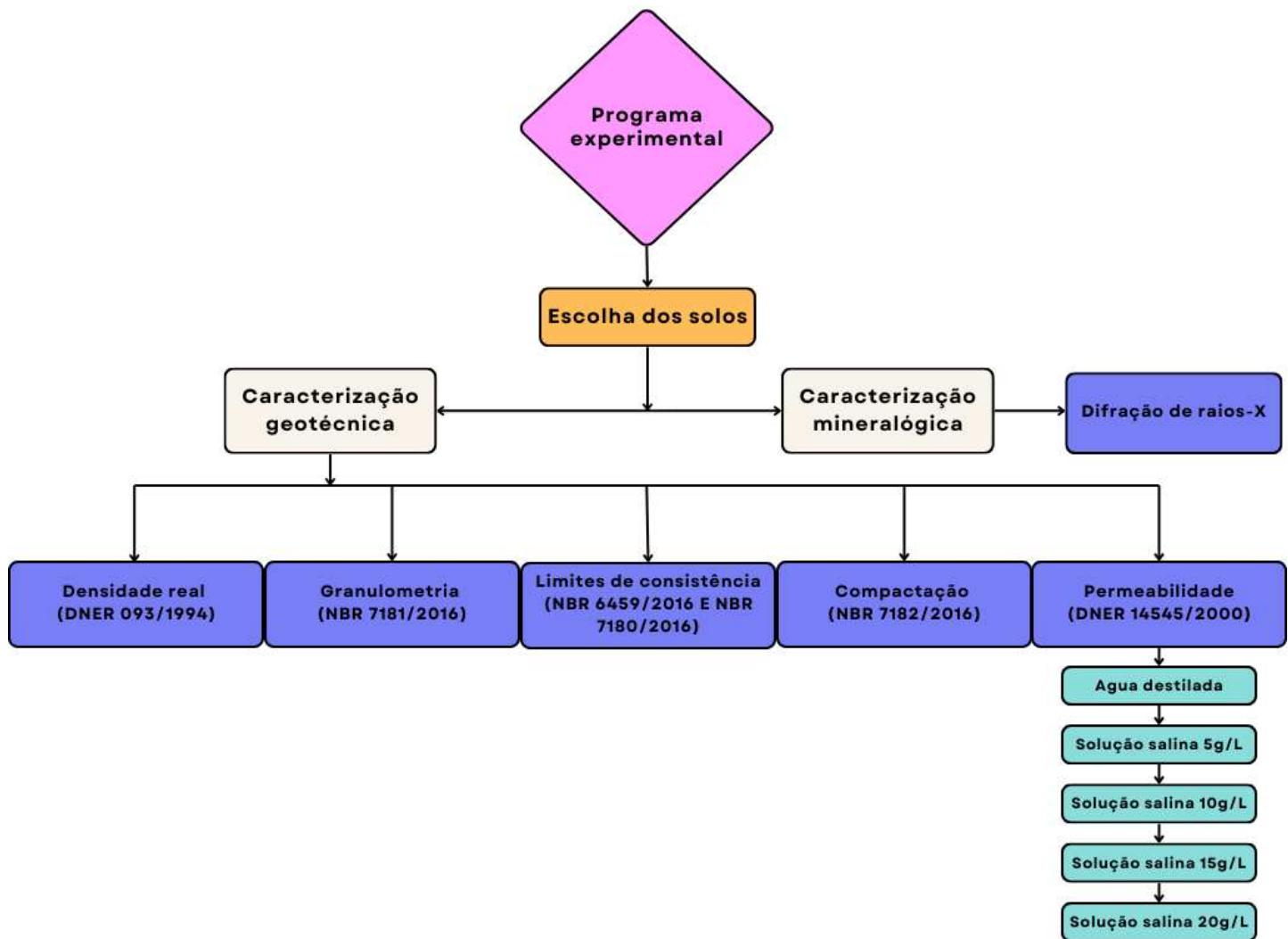
Durante a realização deste trabalho foram utilizados dois fluidos percolantes: água destilada e solução salina. A solução salina foi formada por meio de água destilada e cloreto de sódio (NaCl) em diferentes concentrações. As concentrações escolhidas foram de 5g/L, 10g/L, 15g/L e 20g/L. Esses valores foram escolhidos visando abranger a faixa de água com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰, que compreende a classificação de águas salobras de acordo com a Resolução CONAMA Nº 357/2005. Esses valores foram selecionados com o objetivo de simular condições de campo nas quais o fluido percolante apresenta uma salinidade diferente daquela testada em laboratório. Dessa forma, busca-se observar as alterações no valor do coeficiente de permeabilidade do solo em função das variações na salinidade da solução.

3.2 Programa experimental

O programa experimental deste estudo abrangeu ensaios de caracterização geotécnica e mineralógica dos solos selecionados. A Figura 12 apresenta um fluxograma ilustrando a estrutura do programa experimental idealizado, com as respectivas normas do ensaio.

Para a caracterização geotécnica, foram realizados ensaios de densidade real, granulometria, limites de Atterberg, compactação Proctor Normal e permeabilidade. Em ambos os solos, os ensaios de permeabilidade foram conduzidos utilizando água destilada e soluções salinas em todas as concentrações propostas. Além disso, a caracterização mineralógica foi realizada por meio de ensaio de difração de raios X, aplicado a ambas as amostras de solo.

Figura 12 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: autor.

3.3 Metodologia dos ensaios

Além dos ensaios de caracterização física, foi realizado um ensaio de composição mineralógica em ambas as amostras, por meio da técnica de difração de Raio-X (DRX). Todos os ensaios foram executados em duplicata para garantir a normalização dos resultados e minimizar o erro experimental.

Os ensaios mencionados foram conduzidos no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), bem como no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizados no Campus do Pici em Fortaleza-CE.

3.3.1 Caracterização geotécnica

As amostras foram cuidadosamente preparadas conforme as diretrizes da NBR 6457 (ABNT, 2016) antes da realização de cada ensaio. Para a determinação da densidade real utilizou-se o método do picnômetro, seguindo as especificações da norma DNER 093/94. O ensaio tem como objetivo determinar a densidade dos grãos sólidos do solo, ou seja, a massa por unidade de volume das partículas sólidas, desconsiderando os vazios. Este é realizado com 10g de solo passado na peneira número 10 com abertura de 2 mm e seco em estufa a 105°C-110°C. No método, o picnômetro é submetido a quatro pesagens distintas: inicialmente vazio, em seguida com 10 g de solo, depois com 10 g de solo e água até o preenchimento total, e, por fim, somente com água. O intuito é determinar o volume ocupado pelo solo, que é dado pela diferença entre o volume total do líquido e o deslocamento causado pelas partículas sólidas. A densidade real é calculada pela relação entre a massa dos grãos secos e o volume ocupado por eles. O resultado deste ensaio só foi considerado satisfatório quando a diferença da média entre os valores foi igual ou menor a 0,009, conforme a norma. A Figura 13 mostra uma etapa do ensaio.

Figura 13 - Ensaio de densidade real.



Fonte: autor

O ensaio de granulometria tem como finalidade determinar a distribuição dos tamanhos das partículas do solo, ou seja, a proporção de partículas em diferentes faixas granulométricas presentes na amostra. Este método, realizado em conformidade com a norma NBR 7181 (ABNT, 2016), combina duas etapas: peneiramento e sedimentação.

A amostra, previamente preparada, foi inicialmente passada na peneira com abertura de 2,0 mm. Os grãos retidos foram lavados para remover os finos aderidos e, em

seguida, secos em estufa, sendo posteriormente utilizados no peneiramento grosso. Do material que passou na peneira de 2,0 mm, aproximadamente 70 g foram reservados para as etapas de sedimentação e peneiramento fino. Essa fração foi imersa em uma solução defloculante de hexametafosfato de sódio por cerca de 12 horas.

Após esse período, a amostra foi transferida para o copo dispersor e, posteriormente, para a proveta, onde foram realizadas as leituras do densímetro nos tempos estabelecidos pela norma. A Figura 14 ilustra essa etapa do ensaio. Concluídas as leituras, a amostra foi passada na peneira nº 200 e novamente levada à estufa para secagem. Após essa etapa foram realizados o peneiramento grosso e fino, permitindo a construção da curva granulométrica de cada solo.

Com os dados obtidos, foi possível elaborar um gráfico, no qual as ordenadas representam as porcentagens de partículas passantes e as abscissas correspondem aos diâmetros das partículas. Esse gráfico permitiu a classificação dos solos analisados de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), contribuindo para o entendimento de suas características granulométricas e comportamentais.

Figura 14 - Ensaio de granulometria: etapa de sedimentação.



Fonte: autor

Os limites de consistência do solo foram determinados por meio do ensaio do limite de plasticidade (LP) e pelo ensaio de limite de liquidez (LL), os quais foram realizados seguindo a norma NBR 7180/2016 e NBR 6459/2016, respectivamente. O ensaio de limite de plasticidade possui como objetivo determinar o teor de umidade em que o solo passa do estado

semi-sólido para o estado plástico. Neste ensaio é adicionado água de forma gradual até ser possível moldar um cilindro com 3mm de diâmetro e 10 cm de comprimento. O limite de plasticidade é definido pelo teor de umidade correspondente ao momento em que o cilindro começa a se fragmentar ao atingir o diâmetro padronizado. Para este ensaio, foram moldadas cinco amostras. O valor final do limite de plasticidade foi obtido pela média das três amostras cujos resultados apresentaram variação dentro de $\pm 5\%$. O limite de liquidez (LL) tem como objetivo determinar o teor de umidade em que o solo passa do estado plástico para o estado líquido. O ensaio é realizado com adição gradual de água em uma amostra de solo, sendo revolvida com auxílio de uma espátula, até formar uma pasta homogênea. Posteriormente a amostra homogeneizada é transferida para uma concha que compõe o aparelho de Casagrande, como pode ser visto na Figura 15, sendo feita uma ranhura no seu interior. Em seguida, a amostra foi submetida a uma série de golpes com intensidade constante até que a ranhura se fechasse ao longo de 10 mm de comprimento. Esse procedimento foi repetido cinco vezes, para teores de umidades crescentes, e os resultados foram utilizados para traçar um gráfico, no qual as ordenadas representam o logaritmo do número de golpes e as abscissas, o teor de umidade. O limite de liquidez dos solos foi determinado como o teor de umidade correspondente a 25 golpes.

Figura 15 - Ensaio de limites de consistência.



(a) aparelho de Casagrande (b) amostra homogeneizada

Fonte: autor.

O ensaio de compactação do solo foi realizado utilizando a energia Proctor Normal, em obediência a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Os equipamentos utilizados para a compactação consistiram em um cilindro e um soquete pequeno. O material foi compactado em três camadas, cada uma submetida a 26 golpes. Esse procedimento foi repetido cinco vezes, com a adição progressiva de água a cada repetição, permitindo a obtenção de dados para traçar o gráfico de teor de umidade versus massa específica aparente seca.

A análise da permeabilidade dos solos foi feita com ensaio a carga variável, pois os solos trabalhados apresentaram uma quantidade de finos considerável, com material passando na peneira nº 200 superior a 10%. Dessa forma, o ensaio seguiu as diretrizes da NBR 14545 (ABNT, 2000) para o método B. Os corpos de prova foram compactados nas suas respectivas umidades ótimas, obtidas a partir da curva de compactação de cada solo. Ambos foram moldados em um cilindro com 15 cm de diâmetro e 10 cm de altura. O permeômetro do ensaio pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Permeômetro.



Fonte: autor.

Antes da realização de cada ensaio, os corpos de prova foram previamente saturados com o fluido percolante correspondente. Nos ensaios com água destilada, a saturação foi feita com esse mesmo fluido. Já nos ensaios com solução salina, utilizou-se a solução na concentração específica de cada teste, sendo 5 g/L, 10 g/L, 15 g/L e 20 g/L. O processo de saturação se deu por fluxo descendente, com a aplicação de um gradiente hidráulico de 14,5. Para garantir a saturação das amostras com os fluidos, foi calculado o volume de vazios da

amostra por meio de correlações dos índices físicos. Utilizou-se o valor do peso específico dos grãos do solo, obtido previamente no ensaio de densidade real, e o peso do material compactado. Como o corpo de prova deve estar saturado, o volume de poros corresponde ao volume de água que ele deve conter. Dessa forma, para cada fluido percolante correspondente ao ensaio, foi introduzido no corpo de prova um volume de fluido equivalente ao volume de poros calculado. O processo de saturação dos corpos de prova ocorreu por um período mínimo de 12 horas, correspondendo a uma noite, garantindo que pelo menos um volume de poros percolasse através do corpo de prova, assegurando a completa saturação com água destilada ou com a solução salina na concentração específica do ensaio.

Após a saturação deu-se início ao ensaio propriamente dito. Foi realizado um ensaio usando água destilada e os demais usando solução salina em diferentes concentrações, conforme especificado anteriormente.

3.3.2 Caracterização mineralógica

O ensaio de caracterização mineralógica foi realizado utilizando a técnica de difração de Raios-X (DRX) no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC). O equipamento empregado foi um difratômetro para amostras policristalinas.

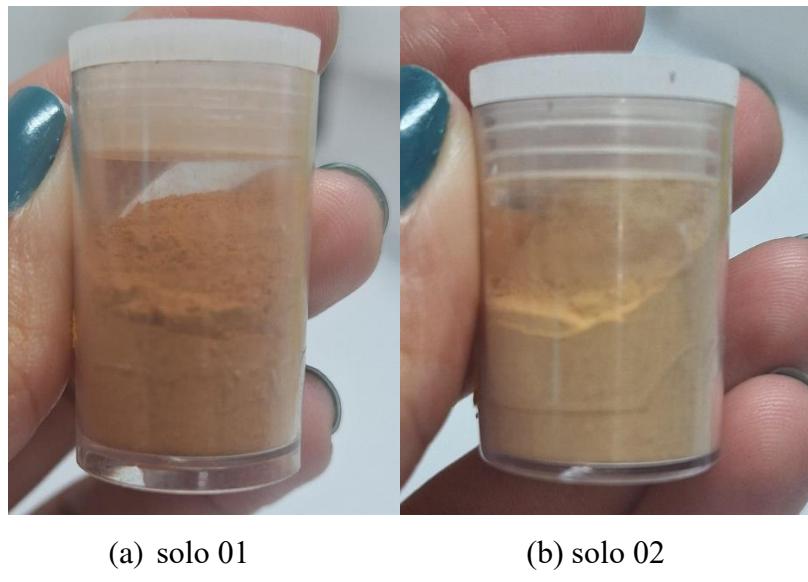
A técnica de DRX é amplamente utilizada para determinar estruturas cristalinas e espaçamentos atômicos em diversos materiais, baseado na interferência construtiva entre raios X monocromáticos e uma estrutura cristalina. Quando os raios X, com um comprimento de onda específico, incidem sobre uma amostra com uma distância interplanar definida, ocorre a difração desses raios em determinados ângulos. Os raios X difratados são então detectados, processados e contados (Silva, 2020).

A análise proporciona informações sobre a intensidade, a posição angular (2θ) e o perfil dos picos. Cada composto possui um padrão difratométrico único, permitindo sua identificação a partir das posições angulares e das intensidades relativas dos picos difratados. A intensidade desses picos não apenas revela as características da estrutura cristalina de cada componente, mas também fornece a porcentagem de cada um presente na amostra (Gobbo, 2009).

Para a realização dessa análise, as amostras passaram por um pré-tratamento. Antes do ensaio, os solos foram levados à estufa de 105°C-110°C e, em seguida, passados na peneira com abertura de malha de 0,075 mm. Aproximadamente 8 g de solo foram então reservados e

levados ao laboratório. O intervalo de difração foi escolhido entre 3° e 83°, visando cobrir o maior intervalo possível e garantir uma representatividade ampla do material. As amostras podem ser observadas na Figura 17.

Figura 17 - Amostras da técnica de DRX.



Fonte: autor.

O resultado do ensaio é apresentado por um difratograma, que exibe picos característicos do material analisado. O arquivo disponibilizado é do tipo *.xrdml e foi processado utilizando o *software* X’Pert HighScore Plus. Com esse *software*, foi possível realizar a análise do difratograma, identificando a composição mineralógica das amostras e determinando a concentração dos componentes presentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos nos ensaios propostos anteriormente. Para melhor entendimento e maior coesão, o capítulo será subdividido em dois subtópicos: (1) Determinação da caracterização física e mineralógica dos materiais e (2) Permeabilidade dos solos submetidos a diferentes fluidos percolantes.

No primeiro subtópico serão analisados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica. Estes serviram como base para classificar os solos usados neste estudo, como também para obter a composição mineralógica. Em contrapartida, no segundo subtópico será analisada a relação entre a permeabilidade dos solos e a concentração de sal dos fluidos percolantes.

4.1 Determinação da caracterização física e mineralógica

4.1.1 Caracterização geotécnica

Nessa seção serão apresentados os resultados dos ensaios de densidade real, granulometria, limites de Attenberg e compactação de Proctor Normal, que consistem na caracterização física dos solos.

4.1.1.1 Densidade real

Na Tabela 3 estão os valores de densidade real (Gs) obtidos no ensaio dos dois solos.

Tabela 3 - Resultados de densidade real.

Solo	Gs
Solo 01	2,72
Solo 02	2,64

Fonte: autor.

Frankievicz (2012) observou que os valores de densidade real do solo são principalmente influenciados pela composição da fração sólida, especialmente pelo teor de matéria orgânica e pelos constituintes mineralógicos presentes. Brady e Weil (1989) afirmam que a natureza do mineral predominante determina a densidade das partículas, o que resulta em pouca ou nenhuma variação dessa característica dentro de uma mesma classe de solo.

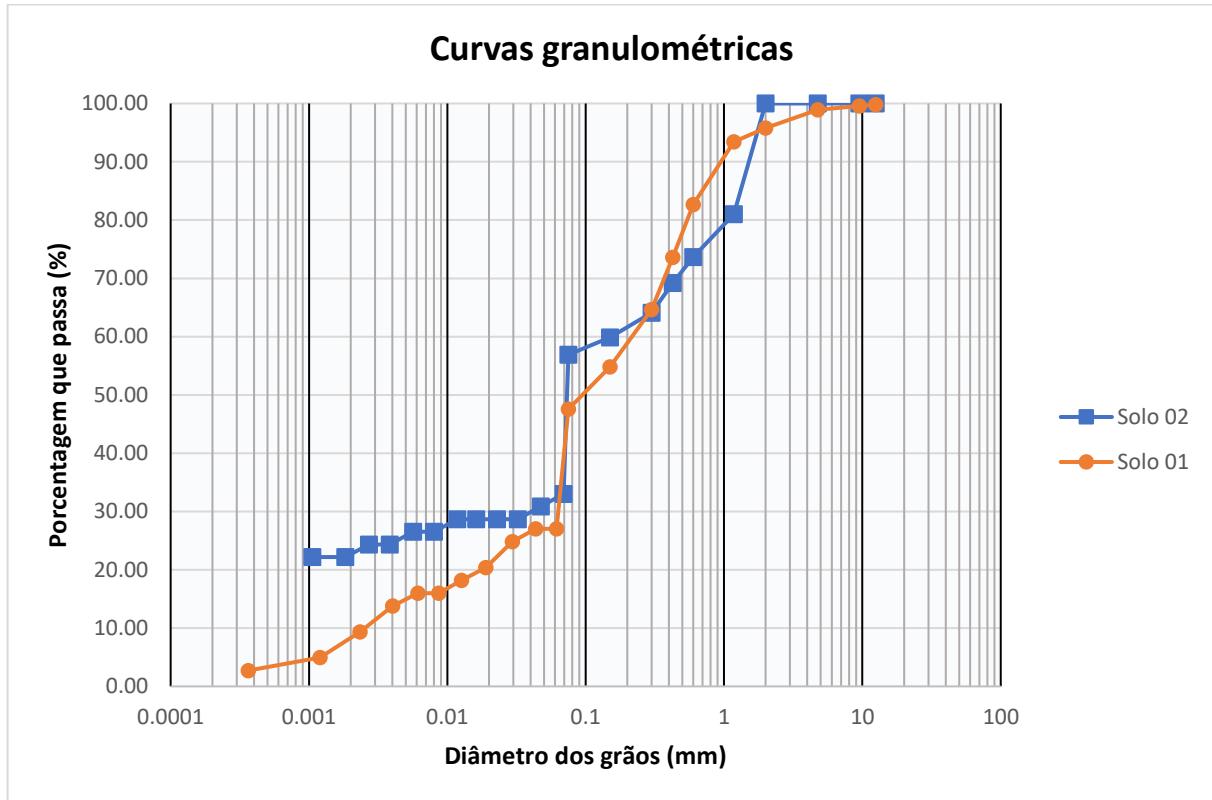
De acordo com Santos (2011), os valores de densidade de partículas variam, em média, entre 2,30 e 2,90 g/cm³. No entanto, a maioria dos valores concentra-se na faixa de 2,60 a 2,75 g/cm³, devido às densidades dos principais componentes minerais dos solos, como quartzo, feldspatos e argilas silicatadas, que estão próximos desses valores.

Peixoto (2016) destaca que minerais como o quartzo possuem densidade real de aproximadamente 2,65 g/cm³, enquanto minerais argilosos, como a caulinita, apresentam densidades em torno de 2,63 g/cm³. Minerais mais pesados, como a magnetita, podem ter densidades superiores a 5,0 g/cm³. Portanto, solos com maior proporção de minerais pesados tendem a apresentar densidades reais mais elevadas, enquanto aqueles com predominância de minerais menos densos ou maior teor de matéria orgânica apresentam densidades reais menores.

4.1.1.2 Granulometria

Para caracterizar os solos utilizados no programa experimental, foi realizado o ensaio de granulometria. A partir desse ensaio, foi possível elaborar a curva granulométrica de cada solo, conforme apresentado no Gráfico 1. Com base nesses resultados, os solos foram classificados de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos solos.



Fonte: autor.

Como pode ser visto no gráfico 1 e detalhado na tabela 2, o Solo 01 possui uma distribuição granulométrica que abrange maior diâmetro dos grãos, resultando em um coeficiente de não uniformidade (CNU) maior em comparação ao Solo 02. Isso indica que o solo 01 possui uma granulometria mais bem graduada, sendo menos uniforme. O percentual de cada material em cada um dos solos é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Percentual de cada material.

Solo	Pedregulho (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo 01	1,11	3,08	15,81	52,88	11,54	15,58
Solo 02	0	0	30,82	38,32	4,33	26,53

Fonte: autor.

Por meio da Tabela 4, observa-se que o Solo 01 possui um teor total de finos (silte + argila) inferior ao do Solo 02, com 27,12% contra 30,86%, respectivamente. Dentro desse percentual, o Solo 02 contém 26,53% de argila, enquanto o Solo 01 apresenta 15,58%.

Souza (2017) verificou que, para um mesmo tipo de argilomineral, a permeabilidade dos solos está diretamente relacionada à porcentagem de finos. O estudo mostrou que amostras com até 20% de finos apresentavam comportamento semelhante ao de solos arenosos, enquanto aquelas com mais de 30% de finos exibiam características típicas de solos argilosos, com uma significativa redução da permeabilidade. Para solos com teor de finos entre 20% e 30%, percebe-se uma transição no comportamento, com aqueles a partir de 22% de finos já se aproximando das características de solos argilosos. Além disso, foi observado que, em solos com 22% de finos, ocorre um decréscimo acentuado na permeabilidade, que passa a ser da ordem de 10^{-5} cm/s. Apesar dessa redução, esses solos ainda são classificados como areia pelo sistema unificado, embora suas propriedades hidráulicas já se aproximem das de solos argilosos.

Santana (2021) também identificou essa relação, constatando que o aumento do teor de finos em areias resulta na redução da permeabilidade. Esse efeito ocorre porque as partículas finas preenchem os vazios entre os grãos arenosos, diminuindo a porosidade e, consequentemente, o espaço disponível para a percolação da água.

4.1.1.3 Limites de Attenberg

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) dos solos 01 e 02.

Tabela 5 - Resultado Limites de Consistência.

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo 01	29	22	7
Solo 02	54	32	22

Fonte: autor

Segundo Das Braja (2011), os solos podem ser classificados com base em seu índice de plasticidade, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação dos solos por meio do índice de plasticidade (IP).

Índice de plasticidade	Classificação
0	Não plástico
1-5	Ligeiramente plástico
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

Fonte: Das Braja (2011).

Dessa forma, conforme a classificação apresentada na Tabela 6, o solo 01 pode ser caracterizado como de baixa plasticidade, enquanto o solo 02 se distingue por sua alta plasticidade. Com base nos resultados dos limites de Atterberg e na análise granulométrica, é possível classificar os solos conforme o SUCS. Este sistema de classificação considera a curva granulométrica, a porcentagem de material que passa na peneira de 0,075 mm, o limite de liquidez e o índice de plasticidade. A Tabela 7 apresenta os valores desses critérios, além do Índice de Atividade (IA) de cada solo, da porcentagem de grãos com diâmetro menor que 0,002 mm — seguindo o critério estabelecido por Pinto (2006) para partículas de mineral-argila — e da classificação detalhada dos solos com base nesses parâmetros.

Tabela 7 - Classificação dos solos usando o SUCS.

Solo	LL (%)	LP (%)	IP (%)	% P #200	% < 0,002 mm	IA	Simbolo	Descrição
Solo 01	29	22	7	47,57	9,38	0,71	SC	Areia argilosa
Solo 02	54	32	22	56,91	22,19	0,99	CL	Argila de baixa compressibilidade

Fonte: autor.

De acordo com Pinto (2006), solos com índice de atividade (IA) inferior a 0,75 são classificados como inativos, enquanto aqueles com IA entre 0,75 e 1,25 são considerados normais. Já solos com IA superior a 1,25 são classificados como ativos. Assim, o solo 01 é classificado como inativo, pois apresentou um IA abaixo de 0,75, enquanto o solo 02 é considerado normal, com um IA de 0,99, que se encontra dentro do intervalo entre 0,75 e 1,25.

4.1.1.4 Compactação

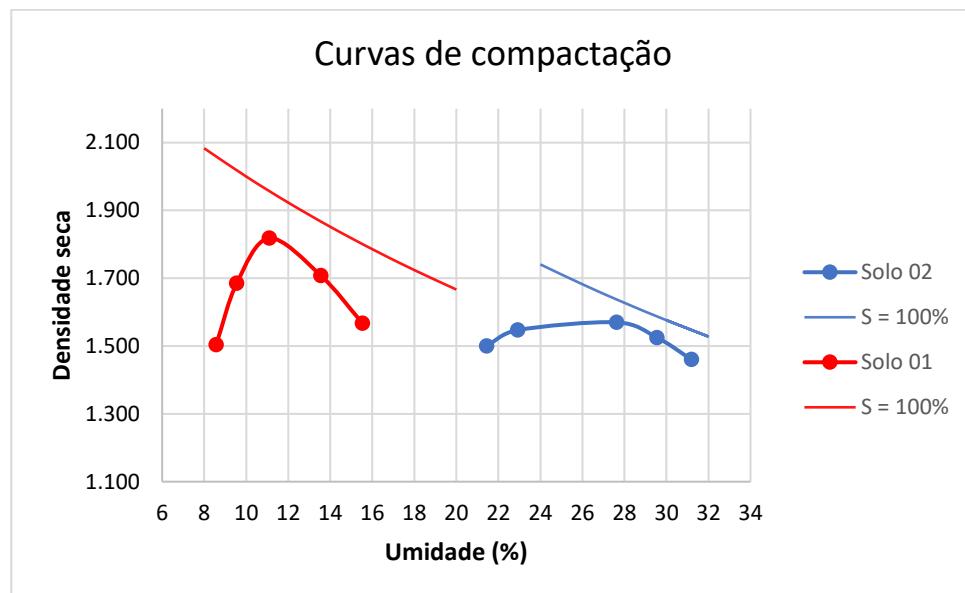
A Tabela 8 apresenta os valores de umidade ótima (W_{opt}) e a densidade aparente seca máxima ($\rho_{d,max}$) para cada uma das amostras. Já o Gráfico 2 exibe as curvas características de cada solo.

Tabela 8 - Umidade ótima e densidade aparente seca máxima.

Solo	Wot (%)	$\rho_{d,max}$ (kN/m ³)
Solo 01	11,1	1,82
Solo 02	25	1,6

Fonte: autor.

Gráfico 2 - Curvas de compactação dos solos.



Fonte: autor.

Pinto (2006) analisou que os solos apresentam curvas características que variam conforme sua composição. O autor observou que solos arenos-argilosos possuem densidades aparentes secas mais elevadas, em torno de $1,9 \text{ g/cm}^3$, e valores baixos de umidade ótima, variando de 12% a 14%. Para solos argilosos, o autor concluiu que os valores da densidade aparente seca são mais baixos, situando-se entre $1,5$ e $1,4 \text{ g/cm}^3$, enquanto os valores de umidade ótima são mais elevados, variando entre 25% e 30%.

Assim, como pode ser observado no Gráfico 2, o Solo 01 apresenta um valor elevado de densidade aparente seca máximo para baixos teores de umidade, característica típica de solos predominantemente arenosos. Por outro lado, o Solo 02 exibe altos valores de umidade ótima e baixos valores de densidade aparente seca, características comuns de solos argilosos. Esses resultados confirmam a classificação de cada solo, que foi determinada com base nos valores obtidos nos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, apresentados na Tabela 03.

Santos (2003) obteve em seus estudos valores similares. Para solos arenos-argilosos, o autor encontrou uma umidade ótima de 12,7% e uma densidade aparente seca máxima de aproximadamente $1,9 \text{ g/cm}^3$. Já para solos argilosos, a umidade ótima aumentou para 24,7%, enquanto a densidade aparente seca máxima reduziu para $1,6 \text{ g/cm}^3$.

4.1.2 Caracterização mineralógica

Neste tópico serão apresentados os resultados do ensaio de difração de raios - X dos dois solos em estudo.

4.1.2.1 Difração de raio - X (DRX)

O ensaio de difração de raios - X em solos permite analisar a composição mineralógica da amostra, identificando os minerais presentes, como quartzo, feldspato, mica e minerais argilosos. Além disso, o DRX possibilita a quantificação das proporções relativas de cada mineral, a análise da estrutura cristalina dos minerais, a identificação de minerais alterados por intemperismo e a avaliação de como a mineralogia do solo pode influenciar suas propriedades geotécnicas.

A caracterização de uma amostra é realizada através da comparação do seu difratograma com padrões de referência disponíveis em bancos de dados de DRX. Durante este procedimento, os picos mais intensos de cada composto cristalino presente no banco de dados são confrontados com os picos observados no difratograma da amostra. Após a busca e comparação, os resultados são apresentados em ordem decrescente de pontuação. A coincidência ou quase coincidência dos valores leva à identificação do mineral (Silva, 2013).

4.1.2.1.1 Difração de raios - X dos solos

A análise mineralógica do solo 01 revelou a presença de minerais como quartzo, cuja ampla ocorrência já era esperada, além dos argilominerais caulinita e ilita, e de óxidos de ferro. A comparação entre o padrão difratométrico da montmorilonita e o da amostra, realizada no software, resultou em um score de apenas 2, conforme apresentado na Tabela 9. Essa baixa compatibilidade indica uma presença insignificante de montmorilonita ou até mesmo sua ausência no solo. Em síntese, um score igual a 2 significa que a montmorilonita não foi detectada com confiança.

A análise mineralógica do solo 02 revelou resultados semelhantes aos do solo 01. O difratograma identificou a presença de quartzo, caulinita, ilita e óxidos de ferro, todos minerais esperados para esse tipo de material. Assim como no primeiro solo, a comparação entre o padrão difratométrico da montmorilonita e o da amostra resultou em um score de apenas

3, um valor baixo que não confirma a presença desse argilomineral no solo.

Dessa forma, conclui-se que ambos os solos são compostos predominantemente por uma mistura de caulinita, ilita, quartzo e óxidos de ferro. Os resultados do ensaio de difração de raios X para o solo 01 estão apresentados na Tabela 9, enquanto os dados correspondentes ao solo 02 estão na Tabela 10. Os difratogramas de ambos os solos se encontram no fim do documento, como anexo A e B.

Tabela 9 - Resultados da difração de raios - X do solo 01.

Solo	Nome do Mineral	Nome do componente	Código de referência	Score
Solo 01	Quartzo	Óxido de Silício	01-085-1054	81
	Iilita	Filossilicato	00-026-0911	25
	Caulinita		01-075-0938	18
	Montmorilonita		00-012-0204	2
	Hematita	Óxidos de ferro	00-033-0664/00-001-1053	13
	Goethita		00-019-0629/00-003-0863	10
	Magnetita		00-029-0713	8

Fonte: autor.

Tabela 10 - Resultados da difração de raios - X do solo 02.

Solo	Nome do Mineral	Nome do componente	Código de referência	Score
Solo 02	Quartzo	Óxido de Silício	01-085-1054	91
	Caulinita	Filossilicato	01-075-0938	21
	Ilita		00-026-0911	15
	Montmorilonita		00-012-0204	3
	Hematita	Óxido de ferro	00-033-0664/00-001-1053	10
	Goethita		00-019-0629/00-003-0863	8
	Magnetita		00-029-0713	6

Fonte: autor.

Segundo Oliveira (2012), a evolução pedogenética em ambientes tropicais favorece a predominância de caulinita e gibsite na fração argilosa, acompanhadas por óxidos de ferro, como hematita e goethita, responsáveis pela coloração avermelhada desses solos.

Neto (2007) também afirma que a caulinita é o principal e mais abundante mineral silicatado presente em solos intemperizados, enquanto a goethita e a hematita são os principais óxidos de ferro, e a gibsite praticamente o único óxido de alumínio presente.

4.2 Permeabilidade dos solos submetidos a diferentes fluidos percolantes

Nessa seção serão apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade a carga variável para os seguintes fluidos: água destilada e soluções salinas nas concentrações de 5g/L, 10g/L, 15g/L e 20g/L.

4.2.1 Permeabilidade a carga variável

O ensaio de permeabilidade a carga variável foi realizado nos solos 01 e 02, compactados com a energia do Proctor Normal e na umidade previamente determinada em ensaio. O solo 01 foi moldado com umidade ótima de 11,1% e densidade aparente seca máxima de 1,82 g/cm³, enquanto o solo 02 na umidade ótima de 25% e densidade aparente seca máxima de 1,6 g/cm³. O experimento foi conduzido sob um gradiente hidráulico de 14,5. As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores de permeabilidade dos solos tanto para água destilada quanto para a solução salina em diferentes concentrações.

Tabela 11 - Valores de permeabilidade solo 01.

Fluidos	$K_{20,med}$ (cm/s)
Água destilada	$1,596 \times 10^{-6}$
Solução salina – 5g/l	$1,541 \times 10^{-6}$
Solução salina – 10 g/l	$1,510 \times 10^{-6}$
Solução salina – 15g/l	$1,498 \times 10^{-6}$
Solução salina – 20g/l	$1,473 \times 10^{-6}$

Fonte: autor.

Tabela 12 - Valores de permeabilidade solo 02.

Fluidos	$K_{20,med}$ (cm/s)
Água destilada	$8,72 \times 10^{-7}$
Solução salina – 5g/l	$7,34 \times 10^{-7}$
Solução salina – 10 g/l	$6,25 \times 10^{-7}$
Solução salina – 15g/l	$5,48 \times 10^{-7}$
Solução salina – 20g/l	$5,02 \times 10^{-7}$

Fonte: autor.

Pinto (2006) afirma que as argilas costumam apresentar permeabilidades inferiores a 10^{-7} cm/s. Já Fernandes (2017) aponta que os valores típicos para esse tipo de solo variam entre 10^{-6} e 10^{-8} cm/s.

Conforme apresentado na Tabela 11, a permeabilidade do solo 01 sofreu uma pequena variação de 7,08% ao comparar os resultados com água destilada e com a solução salina de 20 g/L. Em contrapartida, o solo 02 apresentou uma redução significativa de 42,03%

nas mesmas condições. Essa diferença pode ser atribuída à fração argilosa de cada amostra. A Tabela 7 mostra que a porcentagem de partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm, correspondente ao tamanho mais próximo dos minerais-argila, é de apenas 9,38% no solo 01, enquanto no solo 02 esse valor é consideravelmente maior, atingindo 22,19%.

Apesar de ambos os solos apresentarem o mesmo argilomineral (caulinita e ilita), conforme indicado pela análise mineralógica, o solo 02 possui uma fração de finos mais elevada, o que o torna mais expansivo e, consequentemente, mais sensível às variações na concentração de sal na solução percolante, sendo confirmado pelos resultados de índice de plasticidade. Esse comportamento também está alinhado com a classificação de atividade dos solos. O solo 01 foi classificado como inativo, ou seja, apresenta pouca variação volumétrica (expansão ou contração) ao entrar em contato com a água ou ao secar. Já o solo 02, classificado como uma argila com índice de atividade normal, retém mais água e é mais sensível às mudanças no teor de umidade, o que justifica sua maior variação na permeabilidade.

Bastos (2023) também investigou a influência de fluidos salinos na permeabilidade de solos contendo cinzas de carvão e observou que a infiltração de água diminuiu à medida que a concentração salina aumentava. O solo analisado era composto por argilomineral do tipo caulinita, em uma mistura contendo 20% de cinzas de carvão mineral e 80% de solo argiloso caulinítico. Para essa composição, a utilização de uma solução salina com concentração de 5 g/L reduziu a permeabilidade da mistura em 80% quando comparada à permeabilidade obtida com água pura. O autor utilizou solos com valores elevados para a fração de finos, com 73% das partículas inferiores a 0,002 mm, caracterizando uma argila pura. Esse dado reforça a influência da fração argilosa na resposta do solo à salinidade, corroborando as diferenças observadas entre os solos 01 e 02 neste estudo.

Chiang et al. (1987) observaram uma redução na condutividade hidráulica associada ao aumento da dispersão em três solos de diferentes origens, todos com predominância de caulinita como argilomineral principal.

Rodrigues Netto (1996) destaca que, embora os processos físico-químicos responsáveis pela diminuição de cargas positivas e pelo aumento de cargas negativas no solo favoreçam a repulsão entre partículas — fator determinante para a dispersão —, esse fenômeno só ocorre se a estabilidade dos agregados for suficientemente baixa para permitir a separação das partículas, característica comum em solos mais cauliníticos. Ao estudar amostras coletadas no horizonte B de 22 solos brasileiros com ampla variabilidade mineralógica, o autor concluiu que os solos cauliníticos, especialmente aqueles com baixos teores de ferro, são mais suscetíveis à dispersão da argila.

Óxidos de ferro possuem baixa capacidade de adsorção de água e, consequentemente, apresentam pouca expansibilidade (Nunes, 2003). Nesse contexto, Neto (2007), ao estudar latossolos vermelhos, observou que a baixa expansividade desse solo, caracterizado por um alto teor de oxihidróxidos de ferro, resulta em pequenas alterações no espaço macroporoso quando saturado com água. Esse comportamento se reflete diretamente na sua baixa sensibilidade à variação da permeabilidade em função da qualidade da água percolante.

Assim, observa-se que a variação na permeabilidade dos solos em contato com as soluções salinas foi baixa, o que pode ser atribuído à presença de óxidos de ferro, como hematita e goethita, identificados na caracterização mineralógica de ambos os materiais, bem como ao baixo teor de finos, com grãos menores que 0,002 mm, presente nos solos.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que o objetivo proposto foi alcançado, uma vez que foi possível avaliar a influência das soluções salinas na condutividade hidráulica de um solo argiloso. Os ensaios de caracterização geotécnica e mineralógica permitiram a identificação das principais propriedades dos solos analisados, fornecendo subsídios para a interpretação dos resultados de permeabilidade, os quais demonstraram que a concentração de sal no fluido percolante afeta significativamente a condutividade hidráulica do solo.

A classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) indicou que o primeiro solo é um areno-argiloso, enquanto o segundo é uma argila. Além disso, o segundo solo apresentou um teor de finos significativamente mais elevado, com 22,19%, em comparação aos 9,38% do primeiro. Essa diferença também se refletiu nos limites de consistência, onde o primeiro solo foi classificado como de baixa plasticidade, enquanto o segundo apresentou alta plasticidade. Os ensaios de difração de raios X evidenciaram a presença de óxidos de ferro, como hematita e goethita, em ambos os solos. Esses minerais interferem diretamente na variação da permeabilidade.

Foi observado que, apesar de ambos os solos possuírem a caulinita e ilita como argilominerais predominantes, com o aumento da concentração salina ocorreu uma redução da permeabilidade, efeito mais pronunciado no solo com maior teor de fração argilo-mineral.

Esse comportamento está relacionado à expansão da dupla camada difusa e à consequente dispersão das partículas de argila, o que leva a diminuição do vazio dos poros e consequente menor fluxo de água. Dessa forma, os resultados reforçam a importância de considerar a composição química do fluido percolante em análises de permeabilidade de solos argilosos, uma vez que ensaios realizados apenas com água destilada podem não representar com precisão as condições de campo. Essa compreensão é essencial para a previsão do comportamento hidráulico de solos em diferentes contextos geotécnicos, como barreiras de contenção, reservatórios subterrâneos e estudos de contaminação de aquíferos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se o desenvolvimento de novas pesquisas sobre o tema, a fim de ampliar o conhecimento e enriquecer o repertório científico sobre a interação entre solos argilosos e fluidos percolantes. A seguir, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- I. Avaliação da condutividade hidráulica do solo utilizando fluidos percolantes de diferentes naturezas, como chorume, fluidos ácidos ou básicos;
- II. Investigação da condutividade hidráulica em solos contendo outros tipos de argilominerais, como a esmectita;
- III. Realização de ensaios de permeabilidade com diferentes tempos de saturação, a fim de verificar sua influência nos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6457: 2016: **Amostras de solos–preparação para ensaios de compactação e caracterização.** 2016.
- ABNT. NBR 7180: **Determinação do limite de plasticidade de solos.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- ABNT. NBR 7181: Solo - **Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- ABNT. NBR 7182: Solo - **Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- ABNT. NBR 14545: Solo - **Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ABNT. NBR 6459: Solo - **Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- AZAMBUJA, R.M.B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo cimento-bentonita para aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes.** 2004.
- BARDEN, Ll; MCGOWN, A.; COLLINS, K. **The collapse mechanism in partly saturated soil.** Engineering Geology, v. 7, n. 1, p. 49-60, 1973.
- BADILLO, E. J.; RODRIGUEZ, A. R. **Mecánica de suelos.** Tomo III, Flujo de agua en suelos. México: Editorial Limusa, 1988.
- BASTOS, I. J. F. S. **Análise da compatibilidade de mistura de solo argiloso com cinzas volantes de carvão mineral sujeita a percolação por diferentes fluidos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- BENSON, C. H.; ZHAI, H.; WANG, X. **Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners.** Journal of Geotechnical Engineering, v. 120, n. 2, p. 373-385, 1994.
- BOLT, G. H. **Surface interaction between the soil solid phase and the soil solution.** In: BOLT, G. H.; BRUGGENWERT, M. G. M. (ed.). Soil chemistry Part A: Basic elements. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 1978.
- BOYNTON, S. S.; DANIEL, D. E. **Hydraulic Conductivity Tests on Compacted Clay.** Journal of Geotechnical Engineering, v. 111, n. 4, p. 465-478, 1985.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** Bookman Editora, 2009.

CARVALHO, J. B. Q. de. **Fundamentos da Mecânica dos Solos.** 1. ed. Campina Grande: Marcone, 1997.

CRISPIM, F. A. **Influência de variáveis de compactação na estrutura dos solos: caracterização geotécnica, química, mineralógica e microestrutural.** 2010.

CHIANG, S.C.; RADCLIFFE, D.E.; MILLER, W.P. & NEWMAN, K.D. **Hydraulic conductivity of three southeastern soils as affected by sodium, electrolyte concentration, and pH.** Soil Sci. Soc. Am. J., 51: 1293 – 1299, 1987.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093/94: **Solos - Determinação da densidade real.** Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. **Efeitos dos sais no solo e na planta.** In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (orgs.). Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados. Fortaleza: INCTSAL, 2010.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 2007.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 1999.

EZLIT, Y. D.; BENNETT, L. M.; RAINES, S. R.; SMITH, R. J. **Modification of the McNeal Clay Swelling Model Improves Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity as a Function of Applied Water Quality.** Soil Science Society of America Journal, v. 77, n. 6, p. 2149-2156, 2013.

FASSBENDER, H. W.; BORNEMISTA, E. **Química de suelos, com ênfasis en suelos de América Latina.** 2. ed. San José: IICA, 1987.

FERNANDES, M. T. **Avaliação das técnicas de laboratório e campo para realização de ensaios de permeabilidade de solos.** 2017.

FRANKIEVICZ, M. S.; BAZOTTI, D. M. **Aplicabilidade do Método da Densidade Real (Dr) ou Densidade de Partículas (Dp) pela técnica do Balão Volumétrico.** IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2012.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.

FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. **Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais.** In: Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

FRENKEL, H.; GOERTZEN, J. O. & RHOADES, J. D. **Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity.** Soil Science Society America Journal, Madison, v.42, n.1, p.32 - 39, 1978.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios X e método Rietveld no estudo de cimento Portland.** 251 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados.** Fortaleza: INCTSAL, 2016.

GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F. DE; BATISTA, M.A.F. **Prevenção, manejo e recuperação de solos salinos e sódicos.** Mossoró: ESAM, 1991. 70p.

GRIM, R. E. **Clay mineralogy.** New York: McGraw-Hill, 1953.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy: The clay mineral composition of soils and clays is providing an understanding of their properties.** Science, v. 135, n. 3507, p. 890-898, 1962.

KEREN, R.; SHAINBERG, I.; KLEIN, E. **Settling and flocculation value of sodium montmorillonite particles in aqueous media.** Soil Science Society of America Journal, v. 52, p. 76-80, 1988.

LAMBE, T. W. **The structure of compacted clay.** Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, v. 84, n. 2, p. 1-35, 1958.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics.** New York: John Wiley and Sons Inc., 1979.

MCNEAL, B. L.; COLEMAN, N. T. **Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity.** Soil Science Society of America Proceedings, v. 30, p. 308-312, 1966.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior.** New York: John Wiley & Sons, 1976.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. G. **Permeability of compacted clay.** Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, v. 91, n. SM4, p. 41-65, 1965.

NETO, O. B. D. A. **Dispersão da argila e condutividade hidráulica em solos com diferentes mineralogias com soluções salino-sódicas.** 2007.

NUNES, W. A. G. A. **Efeitos da irrigação com água de poços tubulares e do Rio Gorutuba sobre propriedades de solos da região de Janaúba – MG.** Viçosa: UFV, 2003.

OLPHEN, H. V. (1963). **An introduction to clay colloid chemistry.** Wiley Interscience, New York, 301p.

PAES, J. L. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A; FREIRE, M. B. G. S; BARROS, M. F. C.; ROCHA, G. C. **Hydraulic conductivity in response to exchangeable sodium percentage and solution salt concentration.** Revista Ceres, Viçosa, v. 61, n.5, p. 715-722, 2014.

PEDROTTI, M. V. C.; ALVES, L. P.; PASCHOA, R. P.; AMARAL, A. A.; **Importância ecológica dos microrganismos do solo enciclopédia biosfera.** Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.11 n.22; p. 2015.

PEIXOTO, A.; FERREIRA, D.; MATOS, I. **Catálogo de minerais do laboratório de mineralogia.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2016.

PRESA, E. P. **Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada.** Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1984.

QUIRK, J. P.; SCHOFIELD, R. K. **The effect of electrolyte concentration on soil permeability.** Australian Journal of Soil Research, v. 6, p. 163-178, 1955.

ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M.; BOOKER, J. R. (1995). **Clay barrier system for waste disposal facilities.** E & FN Spon, Chapman Hall, London.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington: USDA, 1970. 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M. B. G. S. **Química dos solos salinos e sódicos.** In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. Química e Mineralogia do Solo. Viçosa, SBCS, p. 449-484, 2009.

RODRIGUES N. A. **Influência da mineralogia da fração argila sobre 74 propriedades físico-químicas de solos brasileiros.** Viçosa: UFV, 1996. 144p. Dissertação (mestrado).

SANTANA, C. L. de; COSTA, S. C. F. do E.; SILVA, J. R. da. **Análise da influência dos grãos**

finos nos parâmetros de consistência, consolidação e permeabilidade do solo. Geociências (São Paulo), v. 40, n. 3, p. 661-672, 2021.

SANTOS, A. G. Estudo do comportamento resiliente de três solos da região de Campo Grande-MS e de relações entre o módulo de resiliência e resultados de ensaios de compressão simples. 2003.

SANTOS, P. S. Ciência e tecnologia de argilas. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

SANTOS, P. S. M. Estudo da densidade das partículas, densidade aparente e da porosidade total como base para verificar se o solo da área experimental do ICSEZ/UFAM/PARINTINS está ou não compactado. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Amazonas, 2011.

SHACKELFORD, C. D. Transporte de poluentes em solos e remediação de solos contaminados. Escola politécnica. Universidade de São Paulo, v.2. 2000.

SHACKELFORD, C. D.; GLADE, M. J. Constant-flow and constant-gradient permeability tests on sand-bentonite-fly ash mixtures. In: Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, 1994.

SHARMA, H. D.; LEWIS, S. P. Waste containment system, waste stabilization, and landfills: design and evaluation. New York: Wiley Interscience Publication, 1994.

SILVA, A. L. Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por ICP – MS de rochas da região sul da Bahia. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, R. F. da. A difração de raios X: uma técnica de investigação da estrutura cristalina de materiais. Revista Processos Químicos, v. 14, n. 28, p. 73-82, jan./jun. 2020. Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/345467160_A_Difracao_de_Raios_X_uma_Tecnica_de_Investigacao_da_Estrutura_Cristalina_de_Materiais>. Acesso em: 21 jan. 2025.

SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D.; PATRICK, D. M. An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils. Federal Highway Administration, Washington, FHWARD, p. 77-94, 1977.

SHAIBERG, I.; OSTER, J. D. 1978. Quality of irrigation water. Bet dagon: International Irrigation Center, 1978. 65p.

SOUZA, V. Z. B. **Mistura de areia e argila (finos) e sua influência na permeabilidade.** In: Congresso Nacional de Iniciação Científica, 17., 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: [s.n.], 2017.

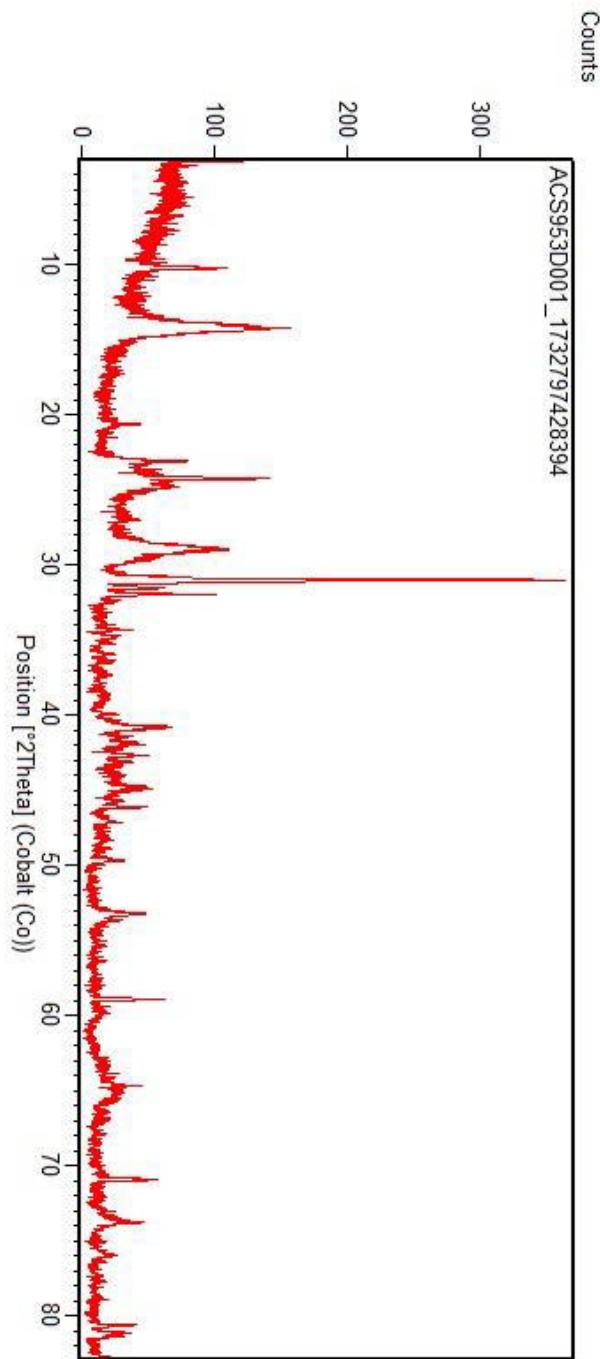
UEHARA, G.; GILLMAN, G. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays.** Boulder: Westview, 1981.

USSL STAFF – UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington: U.S. Department of Agriculture, 1954.

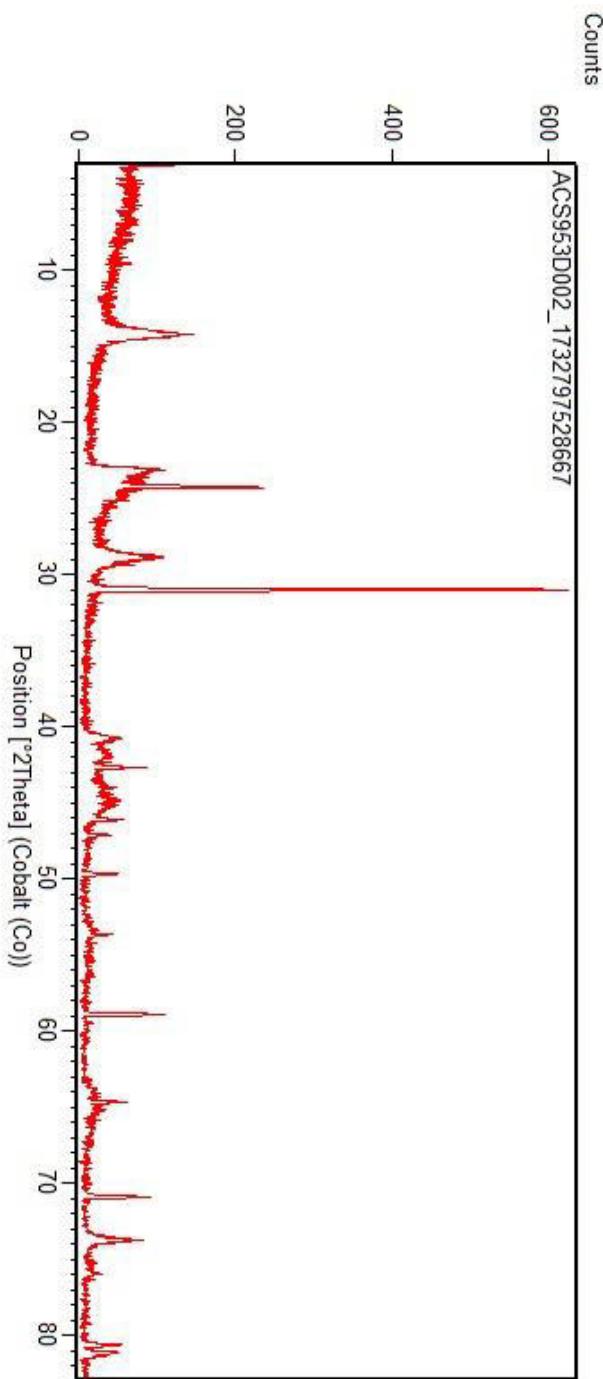
VELOSO, M. E. C. **Efeito de diferentes qualidades de água sobre algumas propriedades físico-químicas de um Brunizem Avermelhado.** 1991. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

YONG, R. N; MOHAMMED, A. M. O; WARKENTIN, B. P (1992). **Principles of contaminant transport in soils.** Elsevier Science Publishers, Amsterdam. 258 pp.

YAMASAKI, M. T. **Influência da salinidade do fluído na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos.** 2012.

ANEXO A – DIFRATOGRAMA SOLO 01

Fonte: autor.

ANEXO B – DIFRATOGRAMA SOLO 02

Fonte: autor.