



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ÍCARO JOSÉ FERNANDES SANTOS BASTOS

**ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE DE MISTURA DE SOLO ARGILOSO COM
CINZAS VOLANTES DE CARVÃO MINERAL SUJEITA A PERCOLAÇÃO POR
DIFERENTES FLUIDOS**

FORTALEZA

2023

ÍCARO JOSÉ FERNANDES SANTOS BASTOS

ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE DE MISTURA DE SOLO ARGILOSO COM
CINZAS VOLANTES DE CARVÃO MINERAL SUJEITA A PERCOLAÇÃO POR
DIFERENTES FLUIDOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

FORTALEZA

2023

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)

- B331a Bastos, Ícaro José Fernandes Santos.
Análise da compatibilidade de mistura de solo argiloso com cinzas volantes de carvão mineral sujeita a percolação por diferentes fluidos / Ícaro José Fernandes Santos Bastos. – 2023.
190 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.
1. Argila. 2. Cinza. 3. Barreira Impermeável. 4. Compatibilidade. 5. Chorume. I. Título.
CDD 627
-

ÍCARO JOSÉ FERNANDES SANTOS BASTOS

ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE DE MISTURA DE SOLO ARGILOSO COM
CINZAS VOLANTES DE CARVÃO MINERAL SUJEITA A PERCOLAÇÃO POR
DIFERENTES FLUIDOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Prof. Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira (Examinador Externo)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Examinador interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

*Dedico este trabalho a Deus, criador de todas
as coisas e a minha Família.*

AGRADECIMENTOS

No decorrer do desenvolvimento da presente pesquisa assim como na elaboração desta tese de doutorado, enfrentei obstáculos jamais imaginados, os quais, em diversas situações eram relacionados à pesquisa, mas também alguns que em nada teve a ver com esta, além é claro de vários problemas pessoais que, por vezes, me fizeram duvidar que tal objetivo final poderia ser alcançado. Entretanto, foi com o apoio de pessoas que acreditaram em meu potencial, que ganhei força de vontade e determinação para alcançar algo que parecia impossível. Assim sendo, é com uma gratidão inenarrável e com sentimentos absolutamente genuínos, que seguem os meus mais profundos agradecimentos:

A DEUS, o supremo Criador de todas as coisas, pela minha existência, pelo dom da minha vida, da perseverança e força espiritual a mim concedida, mostrando-me a luz nas horas difíceis que tive durante minha caminhada.

A minha mãe Valdelena dos Santos, que nunca mediu esforços para me oportunizar educação, ensinar valores importantes, incentivar a realização dos meus sonhos e ser minha maior incentivadora. Obrigado pelo amor incondicional.

A minha esposa Sarah pelo carinho, amor, apoio, paciência, amizade e momentos de felicidades por quais passamos juntos. A ela também devoto muitos agradecimentos de cunho técnico e laboral, a ajuda na elaboração de parte desta redação, assim como na revisão deste texto e na formatação deste trabalho, sua ajuda foi fundamental, meu muito obrigado.

Aos meus familiares, que mesmo não estando presentes ficariam muito orgulhosos por eu alcançar mais essa conquista, em especial a minha avó Raimunda Silvestre dos Santos, que mesmo hoje já bastante idosa e analfabeta sempre entendeu a importância da educação como a chave para algo melhor, esse título também é seu.

Aos meus amigos de universidade e da vida, Deyvid, João Victor, Flavio, Edno, Fernando e Igor e tantos outros pelas horas de estudos, parceria, esforço e momentos de descontração vivenciados nessa longa, porém vitoriosa caminhada.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil do PÓSDEHA-UFC pelo conhecimento transmitido ao longo desses anos, a quem agradeço particularmente na figura dos profs. Raimundo Oliveira, Assis Filho e Marisete Aquino.

Aos professores da área de geotecnia Chagas Filho, Silvrano Dantas, Alfran Sampaio e Anderson Borgueti pelos ensinamentos geotécnicos compartilhados.

Ao amigo Deyvid de Sousa Elias pela necessária e importante ajuda em relação à execução da campanha laboratorial assim como na formatação deste trabalho e dos conselhos valiosos.

Aos companheiros do LMSP – UFC, Anselmo, Ciroca e Roberto a quem em especial agradeço pelas palavras sempre de estímulo e perseverança.

Ao professor Dr. Chagas Filho, por ter me aceito inicialmente como orientando no doutorado e evidentemente pelo apoio, disponibilidade de tempo e contribuição na realização deste sonho tendo sido sempre um exemplo de mestre, tutor e amigo nessa parceria que já desponta de vários anos nas mais diversas empreitadas.

Ao Professor Dr. Anderson Borghetti Soares pela consideração, paciência, tranquilidade e disponibilidade de ter me recebido como orientando em meados do período de doutoramento, o que exigiu uma fibra moral e um empenho fora de precedentes para que pudéssemos obter êxito ao término dessa labuta, os meus mais sinceros agradecimentos.

A FUNCAP, a CAPES e ao CNPq, órgãos de fomento que viabilizaram economicamente esta pesquisa, assim como o pesquisador.

Aos professores Dr. Francisco Chagas da Silva Filho e Dr. Alfran Sampaio Moura pelo tempo e disponibilidade assim como pelas inestimáveis contribuições concedidas nessa banca e que de forma substancial farão parte deste trabalho.

Aos professores Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior da UFRN e Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira da UFCA pela presteza e disponibilidade em se fazer presente a essa defesa, despendendo parte de seu valioso tempo nessa empreitada, minha sincera gratidão.

À Universidade Federal do Ceará e a todos que de alguma forma contribuíram para o fim de mais uma de muitas jornadas e conquistas da vida deste humilde servo.

Gratidão a todos!

RESUMO

Em obras ambientais, tais como aterros de resíduos sólidos e barragens de rejeito são requeridos sistemas de impermeabilização, com vistas a funcionar como barreiras impermeabilizantes (*liners*) para contenção de poluentes. Os materiais empregados como barreiras impermeabilizantes devem apresentar, como características, baixa condutividade hidráulica, resistência às intempéries e ao cisalhamento, durabilidade, além de uma compatibilidade adequada com os diferentes fluidos percolantes. Diante deste contexto, esta pesquisa objetiva avaliar a influência do contato de diferentes fluidos percolantes sobre misturas de solos argilosos com resíduos oriundos da queima do carvão mineral (cinzas), no comportamento hidromecânico de tais materiais. Para isso, utilizou-se como materiais cinzas de carvão mineral advindas de termelétrica do Estado do Ceará, argila caulínica obtida de uma jazida na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e argila bentonítica cedida por uma empresa da capital cearense, proveniente de Boa Vista no estado da Paraíba (PB). Foram utilizados ainda 3 (três) fluidos percolantes, que são a água destilada, solução salina e chorume, coletado no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC). Foram propostas nesta pesquisa duas misturas, com 20% de cinzas + 80% de argila caulínica (20C80CAU) e 80% de cinzas + 20% de bentonita (80C20B). O programa experimental constou de ensaios de caracterização físico-química e mineralógica, tais como os ensaios de difração de Raio-X, espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR), análise termogravimétrica, complexo sortivo e a determinação do potencial hidrogênico (pH) e da condutividade elétrica (C.E); ensaios de caracterização geotécnica, tais como densidade real, granulometria e limites de consistência; ensaio de compactação Proctor Normal; além de ensaios geotécnicos para caracterização do comportamento hidromecânico de misturas e solos sujeitos ao fluxo de três fluidos percolantes, tais como ensaio de permeabilidade, ensaio de adensamento oedométrico e ensaio de resistência à compressão simples. Os resíduos de termelétrica e as misturas 20C80CAU e 80C20B foram classificados como Classe II-A (não perigosos e não-inertes), o que habilita o uso, do ponto de vista ambiental, para diferentes fins geotécnicos. As cinzas não apresentaram condutividade hidráulica adequada para as aplicações isoladas como material impermeabilizante. A bentonita, o solo caulínico e as misturas idealizadas apresentam permeabilidades adequadas para utilização em barreiras impermeáveis, com coeficiente de permeabilidade menor do que 10^{-7} cm/s. No que refere à compatibilidade com os fluidos percolantes, concluiu-se que a interação da solução salina promoveu melhoria nas características geotécnicas para ambas as misturas investigadas,

reduzindo a compressibilidade e aumentando a resistência à compressão simples em até 10,4%. No entanto, o chorume fragiliza a camada de impermeabilização para as duas misturas, promovendo um aumento da condutividade hidráulica e da compressibilidade e uma redução de até 14,7% da resistência à compressão simples. Deste modo, concluiu-se que se torna necessário que os projetos de camadas impermeabilizantes usem como fundamentação ensaios em que seja utilizado o chorume como percolante, diante da alta capacidade de alteração das propriedades hidromecânicas dos materiais.

Palavras-chave: Argila. Cinza. Barreira Impermeável. Compatibilidade. Chorume.

ABSTRACT

In environmental works, such as solid waste landfills and tailings dams, waterproofing systems are commonly required, with a view to functioning as waterproofing barriers (liners) to contain pollutants. The materials used as waterproofing barriers must have low hydraulic conductivity, watertightness, weathering and shear resistance, durability, in addition to adequate compatibility with different percolating fluids. Given this context, this research aims to evaluate the influence of the contact of different percolating fluids on clayey soils and mixtures of these with residues from the burning of mineral coal (ash), on the hydromechanical behavior of such materials. For this, mineral coal ashes from a thermoelectric plant in the State of Ceará, kaolinitic clay obtained from a deposit in the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF) and bentonite clay provided by a company in the capital of Ceará were used as materials. Three (3) percolating fluids were also used, which are distilled water, saline solution and manure, collected at the Metropolitan Sanitary Landfill West of Caucaia (ASMOC). Two mixtures were proposed in this research, with 20% ash + 80% kaolinite clay (20C80CAU) and 80% ash + 20% bentonite (80C20B). The experimental program consisted of physical-chemical and mineralogical characterization tests, such as X-ray diffraction tests, infrared absorption spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis, sorbent complex and the determination of the hydrogen potential (pH) and the electrical conductivity (EC); geotechnical characterization tests, such as real density, granulometry and consistency limits; Proctor Normal compaction test; in addition to geotechnical tests for characterizing the hydromechanical behavior of mixtures and soils subjected to the flow of three percolating fluids, such as permeability tests, oedometric consolidation tests and simple compressive strength tests. As a result, it was observed that all soils and mixtures analyzed are made up of fine material, with kaolinite and bentonite classified as high compressibility clays and ash as low compressibility silts. Thermoelectric waste and mixtures 20C80CAU and 80C20B were classified as Class II-A (non-hazardous and non-inert), which enables their use, from an environmental point of view, for different geotechnical purposes. The ashes did not show the desired hydraulic conductivity for their applications alone as a waterproofing material. However, bentonite, kaolinite soil and idealized mixtures have adequate permeabilities for use in impermeable barriers, with permeability coefficients lower than 10^{-7} cm/s. With regard to compatibility with percolating fluids, it was concluded that the interaction of the saline solution promoted improvement in the geotechnical characteristics for both investigated mixtures, reducing compressibilities and increasing the resistance to simple

compression by up to 10.4%. However, the slurry weakens the waterproofing layer for both mixtures, promoting an increase in hydraulic conductivity and compressibility and a reduction of up to 14.7% in the resistance to simple compression. Thus, it was concluded that it is necessary that the projects of waterproofing layers use tests in which leachate is used as a percolator as a basis, given the high capacity to change the hydromechanical properties of the materials.

Keywords: Clay. Ashes. Impermeable Barrier. Compatibility. Saline solution.

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCM	Associação Brasileira de Carvão Mineral
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanço Energético Nacional
CBR	California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)
CE	Condutividade Elétrica
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH	Argila de Alta Compressibilidade
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CL	Argila de Baixa Compressibilidade
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DCD	Dupla Camada Difusa
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raio-X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FTIR	Fourier Transformed InfraRed Spectroscopy
GCL	Geosynthetic Clay Liner
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MR	Módulo de Resiliência
NDRC	National Development and Reform Commission
OH	Material Orgânico de Alta Compressibilidade
pH	Potencial Hidrogênico
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza

SC	Areia Argilosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TGA	Análise Termogravimétrica
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regime hidrogeológico e dinâmica da água nos solos.....	34
Figura 2 – Influência do Índice de Permeabilidade na Condutividade Hidráulica.....	37
Figura 3 – Compactação e Estrutura dos Solos	38
Figura 4 – Curva de Compactação e condutividade hidráulica do solo ensaiado por Lambe & Whitman (1969).....	39
Figura 5 – Dupla camada de íons e o seu efeito na condutividade hidráulica.....	48
Figura 6 – Tipos de Porosidade	53
Figura 7 – Ensaios de adensamento com água e lixiviado	60
Figura 8 – Localização da Usina Termelétrica do Pécem	74
Figura 9 – Coleta das cinzas de carvão mineral	75
Figura 10 – Localização da jazida de argila caulínica.....	76
Figura 11 – Aspecto visual da jazida de argila caulínica	76
Figura 12 – Bentonita utilizada no estudo	77
Figura 13 – Aspecto visual dos materiais em estudo	77
Figura 14 – Localização de coleta do chorume	78
Figura 15 – Lagoa de estabilização de obtenção do chorume	79
Figura 16 - Fluxograma Experimental da pesquisa	82
Figura 17 - Ilustração da realização do ensaio de lixiviação.....	87
Figura 18 - Ilustração do ensaio de solubilização	87
Figura 19 – Preparação dos corpos-de-prova para ensaios de permeabilidade	89
Figura 20 – Equipamento de compressão oedométrica	90
Figura 21 – Corpos-de-prova ensaios de adensamento	91
Figura 22 – Corpos-de-prova desagregados obtidos de forma indeformável a partir amostras do ensaio de permeabilidade	92
Figura 23 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples (mistura M2)	93
Figura 24 – Equipamento para o ensaio de DRX	95
Figura 25 – Espectrômetro de absorção no infravermelho.....	96
Figura 26 – Analisador Termogravimétrico	98
Figura 27 – Medição de pH (pHmetro)	101
Figura 28 – Espectrômetro de absorção de infravermelho da bentonita	106
Figura 29 – Espectrômetro de absorção de infravermelho das cinzas.....	107
Figura 30 – Espectrômetro de absorção de infravermelho da caulinita	108

Figura 31 – Curva TGA da amostra de Bentonita	110
Figura 32 – Curva TGA da amostra de Cinzas.....	112
Figura 33 – Curva TGA da amostra de Caulinita.....	113
Figura 34 – Curvas TGA das amostras de Cinza Leve, Caulinita e Bentonita.....	114
Figura 35 – Complexo Sortivo e a Capacidade de Troca Catiônica das amostras estudadas.	119
Figura 36 – Análise Gráfica Densidade Real	125
Figura 37 – Curvas Granulométricas dos Materiais e Misturas	127
Figura 38 – Representação Gráfica dos Resultados de Compactação das Misturas	130
Figura 39 – Curvas de adensamento para a M1.....	140
Figura 40 – RCS para mistura M1 (20C80CAU).....	144
Figura 41 – Curvas de adensamento para a M2 com os três fluidos percolantes	147
Figura 42 – RCS para mistura M2 (80C20B) para os três fluidos percolantes	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características dos solos para barreiras impermeáveis.....	32
Tabela 2 – CTC de materiais argilosos e não argilosos.....	50
Tabela 3 – Condutividade hidráulica à água e ao lixiviado.....	61
Tabela 4 – Simbologia das misturas e materiais individuais.....	81
Tabela 5 – Detalhes resumidos dos ensaios realizados	84
Tabela 6 - Resultados da difração de raios-X na Bentonita	104
Tabela 7 – Resultados da difração de raios-X nas Cinzas	105
Tabela 8 – Resultados da difração de raios-X na Caulinita.....	105
Tabela 9 – Perda de massa em porcentagem (%) referente à análise TGA das amostras de Cinza Leve, Caulinita e Bentonita	113
Tabela 10 – Valores de pH e CE para as amostras estudadas	114
Tabela 11 – Análise química (teor de C, N e MO) para as amostras em estudo	116
Tabela 12 – Complexo Sortivo e CTC das amostras analisadas.	117
Tabela 13 – Análise Química do Chorume	120
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de Lixiviação para as cinzas	121
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de Solubilização para as cinzas.....	123
Tabela 16 – Resultados de Densidade Real.....	124
Tabela 17 – Percentuais de Composição dos Materiais	125
Tabela 18 – Resultados de Limites de Consistência.....	128
Tabela 19 – Classificação SUCS dos materiais e misturas	129
Tabela 20 – Resultados dos Ensaios de Compactação	130
Tabela 21 – Resumo das propriedades físicas dos materiais ensaiados	132
Tabela 22 – Coeficientes de permeabilidade saturada das amostras de cinzas, solo e misturas.	132
Tabela 23 – Coeficientes de permeabilidade saturada de cinzas obtidos em outros estudos	132
Tabela 24 – Coeficientes de permeabilidade da amostra M1 (20C80CAU) com os três fluidos percolantes.....	137
Tabela 25 – Viscosidade observada para a água e o chorume em estudo	138
Tabela 26 – Índice de compressão e de expansão para a amostra M1	139
Tabela 27 – Parâmetros de compressibilidade para a amostra M1.....	142
Tabela 28 – RCS para mistura M1 (20C80CAU) com os três fluidos percolantes	142

Tabela 29 - Coeficientes de permeabilidade da amostra M2 (80C20B) com os três fluidos percolantes.....	145
Tabela 30 – Índice de compressão e de expansão para a amostra M2 com os três fluidos percolantes.....	147
Tabela 31 – Parâmetros de compressibilidade para a amostra M2 com os três fluidos percolantes.....	148
Tabela 32 – RCS para mistura M2 (80C20B) com os três fluidos percolantes.....	149
Tabela 33 – Tabela Resumo Compatibilidade Solo-Chorume.....	157
Tabela 34 – Tabela Resumo Compatibilidade Solo-Solução Salina.....	161

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	20
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 OBJETIVOS	24
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	24
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	24
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES (<i>LINERS</i>).....	26
2.1.1 <i>Barreiras Impermeabilizantes de Argila Natural</i>	28
2.1.2 <i>Barreiras Impermeabilizantes de Materiais Geossintéticos</i>	29
2.1.3 <i>Barreiras Impermeabilizantes de Argila Compactada</i>	30
2.2 MATERIAIS PARA BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES	30
2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS COMPACTADOS.....	32
2.3.1 <i>A Água nos Solos</i>	33
2.3.2 <i>Fluxo de Água nos Solos</i>	34
2.4 FATORES INTERVENIENTES NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	35
2.4.1 <i>Textura e Consistência dos Solos Compactados</i>	36
2.4.2 <i>Estrutura dos Solos Compactados</i>	37
2.4.3 <i>Mineralogia</i>	40
2.4.4 <i>Cargas Elétricas dos Solos Compactados</i>	45
2.4.5 <i>Capacidade de Troca Catiônica (CTC)</i>	48
2.4.6 <i>Área Superficial Específica (ASE)</i>	51
2.4.7 <i>Outros Fatores Intervenientes na Condutividade Hidráulica</i>	52
2.5 FLUIDOS PERCOLANTES.....	54
2.6 COMPATIBILIDADE ENTRE FLUIDOS E SOLOS.....	58
2.6.1 <i>Reações dos Solos ante diferentes fluidos</i>	61
2.6.2 <i>Métodos de Avaliação da Compatibilidade</i>	62
2.7 MECANISMO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EM MEIOS POROSOS	64
2.7.1 <i>Advecção</i>	65
2.7.2 <i>Dispersão</i>	65
2.8 MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZADOS COMO <i>LINERS</i>	66
2.8.1 <i>Bentonita: Utilização como Liners</i>	66
2.8.2 <i>Cinzas: Utilização como Liners</i>	69

3 MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1 MATERIAIS.....	74
3.1.1 Cinzas de Carvão Mineral.....	74
3.1.2 Argila Caulinítica.....	76
3.1.3 Bentonita.....	77
3.1.4 Fluidos Percolantes.....	78
3.1.5 Misturas.....	79
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	81
3.3 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	83
3.3.1 Caracterização Geotécnica.....	85
3.3.2 Caracterização físico-química e mineralógica.....	94
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
4.1 ESTUDO DA APLICAÇÃO DOS MATERIAIS E MISTURAS COMO <i>LINERS</i>	102
4.1.1 Caracterização físico-química e mineralógica.....	103
4.1.2 Caracterização Ambiental.....	121
4.1.3 Caracterização Geotécnica.....	123
4.1.4 Discussão acerca da Aplicação dos Materiais e Misturas como <i>Liners</i>	134
4.2 ESTUDO DA COMPATIBILIDADE ENTRE MISTURAS E FLUIDOS PERCOLANTES.....	136
4.2.1 Resultados para Mistura 20C80CAU.....	136
4.2.2 Resultados para Mistura 80C20B.....	144
4.3 RESUMO DA COMPATIBILIDADE DAS MISTURAS COM OS FLUIDOS PERCOLANTES.....	152
4.3.1 Chorume como fluido percolante.....	153
4.3.2 Solução Salina como fluido percolante.....	155
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
5.1 PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES.....	164
5.1.1 Conclusões acerca da Caracterização Físico-Química, Mineralógica, Ambiental e Geotécnica dos Solos e Misturas Investigados.....	164
5.1.2 Conclusões acerca da Aplicação dos Materiais e Misturas como <i>Liners</i>	165
5.1.3 Conclusões acerca da Compatibilidade entre Misturas e Fluidos Percolantes.....	166
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	167
REFERÊNCIAS	169

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações preliminares

O solo vem sendo empregado como elemento filtrante, sendo muitas vezes capaz de purgar e/ou imobilizar grande parte de contaminantes nele depositado. Todavia essa capacidade de retenção é limitada. O fenômeno de transporte desses compostos no solo vai além do simples fluxo do fluido através do meio poroso, e depende de diversos mecanismos associados a processos físicos, químicos e biológicos aos quais as substâncias estão submetidas (THOMÉ; KNOP, 2006).

Muitas obras de terra estão susceptíveis a percolação de fluidos através da massa de solo. Em alguma dessas obras a percolação é desejada, entretanto, em muitas outras se busca barrar o fluxo através do maciço, tornando-se necessário a construção de barreiras hidráulicas que diminuam a percolação desses.

As barreiras impermeabilizantes são camadas compostas de materiais de baixa permeabilidade, podendo ser sintético ou natural. Em sua maioria essas barreiras eram compostas de espessas camadas de solo de baixa permeabilidade, especialmente argilas. Todavia, dentro da engenharia geotécnica, como em todas as áreas, os avanços tecnológicos possibilitaram o desenvolvimento de novos produtos, como, por exemplo, os geossintéticos, que aliam eficiência e praticidade à execução de obras geotécnicas. Atualmente, há vários produtos que podem ser empregados como barreiras hidráulicas, mas ainda é muito usual o emprego de solos argilosos como *filter cake* ou *liners*, separadamente ou em conjunto com um material geossintético.

A utilização ainda corrente de solos argilosos como barreiras se justifica por motivos diversos, como por exemplo, a disponibilidade do material, processo executivo bem difundido e especialmente pela capacidade de formação de materiais compósitos que possibilitam a obtenção de “novos” produtos com desempenho satisfatório. Outro aspecto muito importante diz respeito à sustentabilidade, uma vez que a utilização das camadas de solo como barreiras permite o reuso de volumes consideráveis de resíduos e rejeitos, utilizados para o desenvolvimento de materiais compósitos.

As configurações das barreiras impermeabilizantes são dispostas pelas normas técnicas e legislações de cada país, sendo função da periculosidade dos resíduos. No Brasil, a

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993) adota como padrão para tal finalidade a escolha de solos compactados com condutividade hidráulica $\leq 10^{-7}$ cm/s. De acordo com Potter & Yong (1993), este valor foi definido baseado na lei de Darcy e considerando-se um período de 30 anos, após o qual o lixiviado deixaria de ser poluente e atravessaria a camada compactada de um metro. A CETESB (1993) também reforça a possibilidade de utilização como barreiras impermeabilizantes de camadas de solo de um material de baixa permeabilidade sobrepostas por geomembranas, ressaltando que qualquer furo nas geomembranas promove o contato do efluente com a argila compactada.

As barreiras impermeabilizantes são empregadas em obras como aterros sanitários, barragens de rejeitos e reservatórios, impedindo que volumes consideráveis de fluidos as atravessem, gerando efeitos indesejáveis. Essas obras não estão restritas apenas a percolação de água, mas também por fluidos com diferentes composições químicas, que entram em contato direto com a matriz do solo.

Nos aterros sanitários as barreiras hidráulicas são empregadas nos sistemas de fundo e de coberturas. No maciço, além do fluxo de água, há também o fluxo de chorume, soluções ácidas e diferentes gases que possuem níveis de agressividade distintos, o que pode acarretar interações sólido-fluido significativas.

Barragens de rejeitos e pilhas de estéreis são obras destinadas a acondicionar o material sem valor econômico proveniente do processo de mineração. Esses rejeitos na sua maioria são compostos por misturas heterogêneas e com composição química variada, sendo assim, imprescindível a execução de *liners* para impedir a contaminação do solo e dos corpos hídricos.

Os efluentes que percolam em solos argilosos de uma barreira impermeabilizante (*liners*) podem alterar as propriedades hidromecânicas da mesma, sendo necessário o desenvolvimento de mais estudos para avaliar esse assunto. Segundo D'Appolonia (1980), quando poluentes entram em contato com a superfície da barreira de contenção de solo-bentonita provocam alterações nas características hidráulicas da barreira. Um dos motivos seria a dissolução mineral do solo devido à ação de poluentes, o que ocasionaria uma perda de sólidos e, conseqüentemente, a formação de vazios entre partículas, levando a um aumento da condutividade hidráulica.

Deve-se destacar que os solos argilosos não são inertes, estando suas partículas susceptíveis a diversos fenômenos de superfície de natureza físico-químicas. Estes fenômenos

estão associados à estrutura molecular da partícula argilosa, onde ocorrem substituições isomórficas responsáveis por alterações nas cargas elétricas na superfície da partícula. Como resultado, ocorre uma atração de moléculas de água e de íons presentes na solução (Na^+ , Ca^{+2} , etc.) com a superfície da partícula argilosa. Desse modo, fluidos com elevadas concentrações de sais afetam o potencial elétrico das partículas de argila e da água livre, a qual influenciam a qual a camada aderida a camada hidráulica é mantida (AZAMBUJA, 2004).

Segundo Koch (2002), barreiras constituídas de materiais granulares, sem finos, podem levar a ocorrência de “*piping*” (erosão progressiva), acarretando a ruptura do material de preenchimento do maciço. Para contornar a situação pode ser adicionado bentonita ao material granular. Todavia, a presença de sais nos efluentes poderá influenciar a capacidade de troca catiônica do material fino, além de diminuir a espessura da camada água adsorvida (que envolve a bentonita), reduzindo o tamanho efetivo da partícula. Desse modo, dependendo do gradiente hidráulico, como os poros da matriz de solo granular são maiores, as partículas de bentonita acabam sendo carregadas (*piping*), o que poderá ocasionar a ruptura do maciço.

Sabe-se que o comportamento hidráulico e mecânico dos solos estão intrinsecamente relacionados. Os processos de compressibilidade estão diretamente associados às características hidráulicas do meio, e conseqüentemente alterações na compressibilidade do solo influenciarão o comportamento tensão-deformação do material. Sabendo que as características dos sólidos e dos fluidos influenciam nas interações entre eles e, conseqüentemente, no comportamento do conjunto, torna-se importante avaliar o nível de significância dessa interações/alterações para o comportamento hidráulico e mecânico dos solos.

1.2 Justificativa

O solo é um material da crosta terrestre proveniente da decomposição das rochas por agentes do intemperismo. Devido ao seu próprio processo de formação, este é um material particulado, cuja características acabam por lhe conferir um comportamento bastante particular. Existem diversas ciências (geologia, pedologia, agronomia, geotecnia, por exemplo) que tratam do estudo dos solos e das rochas, cada um com um enfoque específico e diferente para esse material. Apesar das abordagens distintas, por se tratar do mesmo material,

as teorias, os conceitos e os estudos desenvolvidos por cada área se complementam e subsidiam as mais diversas obras de engenharia, como as que têm a função de proteger mananciais e o meio ambiente, sendo este o foco deste trabalho.

Nesse contexto, camadas de argila compactadas, denominadas de *liners*, têm sido projetadas para minimizar o fluxo de contaminantes de lixiviados gerados em obras ambientais, como aterros de resíduos sólidos e barragens de rejeito. Estas formam uma espécie de linha de defesa à percolação do contaminante, por possuírem baixa permeabilidade e apresentarem maior resistência no seu estado compactado, minimizando o fluxo dos contaminantes para camadas inferiores, que podem atingir reservatórios de água superficial e subsuperficial. O dimensionamento deste tipo de estrutura, do ponto de vista convencional, geralmente leva em conta os aspectos geotécnicos como permeabilidade, resistência e compressibilidade, desprezando a influência da passagem do fluido percolante na variação destas propriedades geotécnicas da camada argilosa compactada.

Sob este aspecto, por se tratar de um material poroso, o solo permite o fluxo de fluidos através do mesmo, o que pode influenciar diretamente no comportamento tensão-deformação do material e, conseqüentemente, na interação desse material com a estrutura do solo. A respeito disso, nota-se a importância da avaliação do comportamento tensão-deformação do material, o que requer conhecimento sobre as características a nível microscópico e macroscópico, características físico-químicas e comportamento hidráulico e mecânico. Todavia, poucos estudos foram ou vêm sendo desenvolvidos do ponto de vista a abordar a interação dos solos com diferentes fluidos percolantes e como esta interação entre eles podem alterar as características do meio.

Portanto, no intuito de contribuir para o entendimento da influência do fluido percolante na variação das propriedades geotécnicas de camadas argilosas, este estudo se propõe a investigar o tema, por meio de ensaios geotécnicos, físico-químicos e mineralógicos. Além disso, partindo do entendimento de que a engenharia moderna, seja em seus projetos, estudos e pesquisas deva ter o enfoque da sustentabilidade ambiental, como uma agenda real, a presente pesquisa permitirá avaliar como misturas de argila e cinzas volantes de carvão mineral, podem ser aplicadas como camada impermeabilizantes de aterros sanitários e demais obras, perpassando por aspectos da geotecnia ambiental e avaliando a aplicabilidade desse tipo de passivo ambiental no presente estudo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho se propõe a avaliar a influência de fluidos percolantes sobre o comportamento hidromecânico de misturas de solos finos naturais (argilas caulínicas e bentoníticas) e cinzas de carvão, com o intuito de verificar a compatibilidade quando atravessados com fluidos percolantes.

1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos pontuais da pesquisa e têm como intuito possibilitar a obtenção do proposto objetivo geral os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização físico-química e mineralógica dos solos e das cinzas leves, através das análises de complexo sortivo (S, CTC-T, PST), pH, condutividade elétrica espectrometria de absorção no infravermelho, análise termogravimétrica e difração de raios-X;
- Avaliar as características geotécnicas dos solos e das misturas de solo-cinza através de ensaios de caracterização física, compactação, permeabilidade, ensaios de compressibilidade e de resistência;
- Analisar a periculosidade dos resíduos advindos de termelétrica (cinzas de carvão) e das misturas propostas com eles;
- Proceder com a caracterização físico-química do chorume (fluido percolante) através de análises espectrométricas;
- Analisar a influência do lixiviado de aterro sanitário (chorume) e solução salina nas propriedades hidráulicas (condutividade hidráulica) das misturas estudadas;
- Verificar as modificações na compressibilidade das misturas em estudo devido à percolação de chorume e da solução salina;
- Analisar o parâmetro de resistência, na condição não drenada, das misturas estudadas após a percolação de água, chorume e solução salina nas amostras.

1.4 Estrutura do Trabalho

A presente tese é constituída de cinco capítulos, sendo este a Introdução que mostra a relevância do projeto, assim como os objetivos principais a serem alcançados durante toda a elaboração da pesquisa, e sua estrutura, com o melhor encadeamento de ideias e suas divisões.

A seguir, dar-se-á continuidade com o capítulo 2 que trata da fundamentação teórica. Neste tópico, procura-se explicitar e subsidiar todos os temas de relevância que serão tratados no presente texto, sendo eles: 1) Pressupostos que envolvem a hidráulica de solos, as teorias acerca da condutividade hidráulica e sobre os fluxos em meios particulados; 2) Definição e as tipologias das barreiras hidráulicas impermeabilizantes. São discutidos os tipos de material mais comumente utilizados assim como quais características mais importantes; 3) Características principais dos contaminantes e percolantes abordados na pesquisa assim como quais de seus parâmetros podem estar relacionados à interação química entre o solo e os contaminantes; 4) Transportes de contaminantes, sobretudo lixiviados, no solo se fundamentando nos estudos de Freeze e Cherry (1979) e Zanon (2014), por exemplo; 5) Por fim, são apresentados alguns materiais alternativos e/ou possuidores de características específicas os quais podem ser utilizados de forma diferente, como *liners*.

No terceiro capítulo, é realizada a descrição dos materiais e métodos de forma detalhada, desde a escolha do local de coleta, até a preparação das amostras e os procedimentos dos ensaios, desde os de caracterização física, passando pelos de avaliação físico-química e mineralógica, até os de avaliação das características hidráulicas e mecânicas.

No quarto capítulo são apresentadas as discussões dos resultados encontrados nos ensaios realizados para a determinação da condutividade hidráulica e das características mecânicas, dos materiais ensaiados, e das análises químicas dos líquidos percolados e dos solos contaminados.

Por fim, no quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões, bem como algumas recomendações e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trará os conceitos e teorias que nortearam o presente trabalho e servirão como referência para a pesquisa desenvolvida. Abordar-se-á sobre as estruturas denominadas barreiras hidráulicas impermeabilizantes (*liners*), assim como quais suas principais características e funções. Serão discutidos quais materiais tem maior relevância para o uso como *liners* e quais propriedades os diferenciam de demais materiais. Apresentar-se-ão onde a aplicação de tal metodologia é viável e quais inovações e/ou materiais alternativos podem trazer vantagens em relação à abordagem tradicional. Será abordada conceituação teórica sobre a condutividade hidráulica dos solos e os fatores intervenientes. Será abordado também sobre diferentes compósitos que podem ser utilizados como barreiras impermeabilizantes, tais como bentonita e cinzas de carvão advindas de termelétrica. Com relação às cinzas, será discutido o processo de geração de cinzas oriundas da queima de carvão mineral em termelétricas, os tipos de cinzas e suas características e disposição, em virtude da possibilidade de uso deste passivo como material compósito junto a barreiras impermeabilizantes. Por fim, será feita uma discussão sobre a compatibilidade entre fluidos e solos e os mecanismos de transportes de contaminantes em meio poroso, com o intuito de fomentar as discussões adiante sobre a influência dos fluidos percolados em seus meios particulados e possíveis interações e/ou alterações que possam ocorrer, sobretudo nas propriedades hidráulicas e mecânicas do meio.

2.1 Barreiras Impermeabilizantes (*Liners*)

Em regiões de disposição de resíduos ou com presença de áreas contaminadas são requeridos sistemas de impermeabilização, com vistas a funcionar como barreiras impermeabilizantes para contenção de poluentes. As barreiras de impermeabilização, também chamadas de *liners*, consistem em camadas utilizadas para diminuir a infiltração de água superficial, minimizando a geração de percolados ou reduzindo a percolação para o ambiente subjacente.

De acordo com Boscov (1997) e Sharma e Reddy (2004) os sistemas de impermeabilização com barreiras impermeabilizantes objetivam separar o subsolo de resíduos que possam liberar contaminantes. As barreiras são tecnologias para retenção de poluentes

aplicadas *in loco*, com a finalidade de prevenção da propagação de contaminantes em subsuperfícies, evitando a migração desses contaminantes para as camadas inferiores e para água subterrâneas.

As barreiras impermeabilizantes com solos são constituídas de materiais com baixa condutividade hidráulica, elevadas estanqueidade, resistência às intempéries e ao cisalhamento, durabilidade, além de que deveriam ter compatibilidade adequada com os diferentes fluidos percolantes (LINS *et al.*, 2008). O *liner* também deve reduzir a movimentação do efluente líquido gerado, agindo como um filtro químico, atenuando a presença de certos compostos e atendendo a outras funções a que for solicitado (KALTEZIOTIS *et al.*, 1994).

Os requisitos desejáveis para um determinado tipo de *liner* estão condicionados a alguns fatores, tais como o ambiente físico, a finalidade do *liner*, vida útil projetada e a composição química da solução percolada e da água subterrânea (LEITE e ZUQUETTE, 1995). Os *liners* dispostos com camadas compactadas podem variar sua compressibilidade, apresentando recalques diante do contato com resíduos agressivos quimicamente, como aqueles de potencial hidrogênico (pH) ácido. Além disso, um dos requisitos principais desses sistemas é a retenção e contenção por processos físicos.

De acordo com Sharma e Reddy (2004), os *liners* consistem em tecnologias que podem ser usadas tanto na zona saturada como na zona não saturada, incluindo a utilização, individual ou conjunta, dos seguintes componentes: barreiras verticais, de forma a limitar a propagação lateral de poluentes; e barreiras de fundo, para diminuir o fluxo descendente de poluentes. Associado a estas técnicas, pode-se aplicar outras técnicas de remediação de poluentes auxiliares.

De acordo com Lengen e Siebken (1996) os sistemas de barreiras de impermeabilização mais antigos utilizavam apenas solos compactados em suas estruturas. Atualmente, os *liners* evoluíram e passou-se a fazer uso de diversos materiais convencionais e não convencionais, tais como solo compactado, emulsões asfálticas, concreto, bentonita, geossintéticos e resíduos sólidos.

O projeto da impermeabilização de sistemas de contenção de resíduos é influenciado pelo tipo de resíduo, pelas condições climáticas e pelas condições geológicas do local. Neste contexto, podem-se ter barreiras de vários tipos, sendo as mais tradicionais as de

argila natural, de materiais sintéticos e de solo argiloso compactado (DANIEL, 1993; PIEDADE JÚNIOR, 2003; LUKIANTCHUKI, 2007).

As primeiras aplicações de barreiras empregavam apenas solos de baixa permeabilidade, em geral compactados. O advento das geomembranas e, mais recentemente, dos geocompostos bentoníticos modificaram as configurações das barreiras, graças a uma série de vantagens, entre as quais se incluem o controle de qualidade de um produto manufaturado, a facilidade de instalação, a flexibilidade, a sua reduzida permeabilidade e o ganho de espaço no aterro (VILAR, 2003).

2.1.1 Barreiras Impermeabilizantes de Argila Natural

Os *liners* de argila natural são barreiras formadas pelo terreno natural ricos em argila com baixa condutividade hidráulica (menor ou igual a 10^{-7} cm/s), de forma que o resíduo possa ser enterrado ou disposto sobre a camada. Para Knop (2007) o problema deste tipo de *liner* é a condutividade hidráulica, que, preferencialmente, deve estar entre 1×10^{-8} e 1×10^{-9} m/s. Para o funcionamento adequado, a camada de argila natural deve ser contínua e sem imperfeições, tais como fissuras e fendas.

A condutividade hidráulica dessas camadas necessita ser continuamente avaliada por meio de ensaios *in situ* e em laboratório, realizados com amostras do tipo indeformadas. Para Daniel *et al.* (1984), a medida da condutividade hidráulica em laboratório deve ser realizada por meio da utilização de permeômetros de parede flexível. Já em campo poderá ser realizada através de ensaios com furos de sondagem, submetidos à carga constante ou variável.

Em Mecânica dos Solos, análises de estabilidade baseiam-se na determinação da resistência dos materiais e índices de recompressão e compressão são usados para prever compressibilidades, de modo que testes hidromecânicos são imprescindíveis para medir tais parâmetros e julgar o uso dos materiais argilosos como adequados para barreiras impermeáveis.

2.1.2 Barreiras Impermeabilizantes de Materiais Geossintéticos

De acordo com Lavoie (2016), os sistemas de barreiras impermeabilizantes têm sofrido algumas alterações em sua configuração ao longo dos últimos anos, a partir da comercialização das mantas poliméricas no País. Os *liners* com geossintéticos são formados a partir de materiais poliméricos com condutividade hidráulica muito baixa e grandes resistências químicas e físicas.

As barreiras impermeáveis compostas de materiais geossintéticos podem ser constituídas por materiais sintéticos, tais como as geomembranas, e os *Geosynthetic Clay Liner* (GCL), pela associação de materiais industrializados e solos argilosos.

As geomembranas consistem em mantas poliméricas produzidas industrialmente na forma de bobinas, que são levadas ao local da obra, onde se procede ao lançamento da manta e execução de suas emendas (BUENO *et al.*, 1996). As geomembranas, de acordo com Sharma e Lewis (1994), apresentam condutividade hidráulica muito baixa, o que permite sua utilização como barreiras para líquidos e vapores. Atualmente estão disponíveis diversos tipos de geomembranas no mercado mundial, fabricadas com diferentes materiais e diferentes aditivos, se destacando as de polietileno e as de PVC.

As geomembranas de polietileno são as mais utilizadas, devido à alta resistência química e durabilidade. Devido a elevada rigidez, é preferível que se utilize esta membrana como barreira de fundo e não no recobrimento final. A necessidade de uso de pequena porção de aditivos estabilizadores do polímero confere as geomembranas de polietileno muita competitividade comercial em relação aos demais tipos de geomembranas (SHARMA e LEWIS, 1994; LAVOIE, 2016).

Os GCLs consistem em uma fina camada de argila bentonítica com aproximadamente 5 mm de espessura associado a dois geotêxtis ou colada a uma geomembrana. Há vários tipos de GCLs encontrados comercialmente e outros que podem vir a ser construídos em campo, utilizando-se geossintéticos alternados com camadas de argila compactada (HEINECK, 2002). Tal sistema tem sido utilizado em aterros sanitários como alternativa a barreiras de solos argilosos compactados.

2.1.3 Barreiras Impermeabilizantes de Argila Compactada

Os *liners* de argila compactada são construídos inicialmente com solo natural, podendo ser combinados com outros materiais, tais como cinzas de carvão mineral (SHACKELFORD e GLADE, 1994; HAN, 1996; ELIAS *et al.*, 2017), estabilizantes químicos (BRODERICK e DANIEL, 1990; BELLEZA e PASQUALINI, 1997) e com a adição de fibras (MAHER e HO, 1994; AL- WAHAB e EL-KEDRAH, 1995). São barreiras constituídas por material argiloso compactado.

A condutividade hidráulica é influenciada pela estrutura do material não consolidado, que inclui a granulometria, a orientação das partículas, a força de ligação entre as partículas e os agentes cimentantes. A distribuição dos tamanhos dos grãos e das partículas de argila é função da sua mineralogia, da composição química do fluido dos poros e do teor de umidade de compactação (LEITE e ZUQUETTE, 1995).

Para que as barreiras impermeabilizantes de solo compactado apresentem um bom desempenho, torna-se necessário, além do baixo valor de condutividade hidráulica, a manutenção de condições que minimizem a contração dos mesmos, já que a geração de gretas de contração e trincas de expansão causa a formação de caminhos preferenciais de fluxo (LUKIANCHUKI, 2007).

Para Piedade Junior (2003), as barreiras impermeabilizantes de solos compactados são geralmente feitas em camadas, podendo, no caso de taludes laterais, a execução ser horizontal ou paralela a ele. Mesmo que não sejam recomendadas para taludes muito íngremes, as camadas paralelas são utilizadas, uma vez que diminuem as áreas de material mal selecionado e as regiões de ligações imperfeitas cruzando as camadas.

2.2 Materiais para Barreiras Impermeabilizantes

As barreiras de solos argilosos são barreiras minerais de solos compactados argilosos ou mesmo de argilas submetidas ao beneficiamento industrial e, devido aos baixos coeficientes de permeabilidade, são usualmente recomendadas ao uso como barreiras impermeabilizantes (PIEADADE JÚNIOR, 2003; SOUZA, 2009).

Os solos argilosos podem apresentar fissuras e trincas, devido à tendência ao recalque e ao ressecamento. Com isso, pode ocorrer o vazamento do lixiviado, contaminando lençóis freáticos e mananciais próximos.

Para Daniel (1993) os requisitos mínimos recomendados, para solos de clima temperado, para se obter condutividades hidráulicas inferiores a 10^{-7} cm/s são: porcentagem de finos maior do que 20 a 30%, índice de plasticidade maior do que 7 a 10%, porcentagem de pedregulhos menor do que 30% e tamanho máximo das partículas entre 25 a 50 cm.

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993), os solos potencialmente utilizados como barreiras impermeabilizantes devem apresentar características, tais como:

- Classificação unificada CL (argila de baixa compressibilidade), CH (argila de alta compressibilidade), SC (areia argilosa) ou OH (material orgânico de alta compressibilidade), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS);
- Condutividade hidráulica (k) $< 10^{-7}$ cm/ s;
- Porcentagem de finos maior ou igual a 30 %;
- Limite de liquidez (LL) maior ou igual a 30 %;
- Índice de plasticidade (IP) maior ou igual 15 %;
- $\text{pH} \geq 7$.

Essas propriedades não são facilmente encontradas em solos naturais, necessitando-se muitas vezes da adição de argilas naturais, tais como a bentonita, a fim de se obter as características necessárias ao bom desempenho de uma camada impermeabilizante ou recorrendo-se ao uso de materiais alternativos, como resíduos industriais. Um dos cuidados para o uso de materiais de alta plasticidade é a formação de torrões duros, quando o solo está seco, e torrões gomados quando o solo está úmido, o que torna difícil o manejo desses solos no campo.

A Tabela 1 apresenta um compilado com as principais características das barreiras argilosas de acordo com alguns autores.

Tabela 1 – Principais características dos solos para barreiras impermeáveis

FONTE	LL (%)	IP (%)	FINOS ($\leq 0,075\text{MM}$) (%)	FRAÇÃO ARGILA (%)	$D_{\text{máx}}$ (mm)	FRAÇÃO PEDREGULHO (%)	k (cm/s)
Benson <i>et al.</i>	≥ 20	≥ 7	≥ 30	≥ 15	-	-	$\leq 10^{-7}$
Daniel, D.E.	-	≥ 7	≥ 20	-	25 a 50	≤ 30	$\leq 10^{-7}$
Bagchi, A.	≥ 30	≥ 15	≥ 50	≥ 25	-	-	$\leq 10^{-7}$
EPA (1989)	-	≥ 10	≥ 20	-	-	≤ 10	$\leq 10^{-7}$
Cetesb (1993)	≥ 30	≥ 15	≥ 30	-	-	-	$\leq 10^{-7}$

Fonte: Adaptado de Ferrari (2005)

2.3 Condutividade Hidráulica dos Solos Compactados

A condutividade hidráulica (k) é um parâmetro característico do meio poroso e do fluido que percola por este meio. Para um caso genérico, em que fluidos com densidades e viscosidades distintas percolam em um mesmo meio poroso, o valor de k obtido será diferente para cada caso. Considerando-se outro caso genérico onde o fluido percolado seja o mesmo, porém em meios porosos diferentes, os valores de k serão diferentes. O estudo da condutividade hidráulica dos solos torna-se imprescindível em todos os casos onde ocorre o fluxo de água neste meio. No caso específico de barreiras impermeabilizantes, a condutividade hidráulica é um fator decisivo na escolha do material, uma vez que é necessária a utilização de materiais com baixíssimos valores de condutividade hidráulica.

A condutividade hidráulica de uma barreira impermeabilizante é afetada por fatores como o grau de saturação, o método empregado para compactação, o esforço de compactação, o gradiente hidráulico, o tamanho dos aglomerados de partículas de solo, a distribuição dos tamanhos dos poros, a composição química do líquido permeante, o índice de vazios, entre outros (BOYNTON & DANIEL, 1985).

2.3.1 A Água nos Solos

A água no solo pode se apresentar sob formas distintas, dentre elas pode-se citar a água adsorvida, a água capilar e a água livre. Água adsorvida (ou água hidrocópica) está ligada às superfícies das partículas do solo por meio de forças elétricas, não se movendo nem por capilaridade nem por gravidade. A água capilar é aquela retida ao solo por meios de fenômenos interfaciais, que se eleva pelos interstícios capilares formados pelas partículas sólidas, devido à ação das tensões superficiais nos contatos ar-água-solo. Água livre ou gravitacional é aquela que não consegue mais ser retida pelas partículas sólidas e circula nos solos, podendo estar em equilíbrio hidrostático ou fluir sob a ação da gravidade ou de outros gradientes de energia. Tanto a água capilar quanto a gravitacional podem movimentar-se no solo no estado líquido.

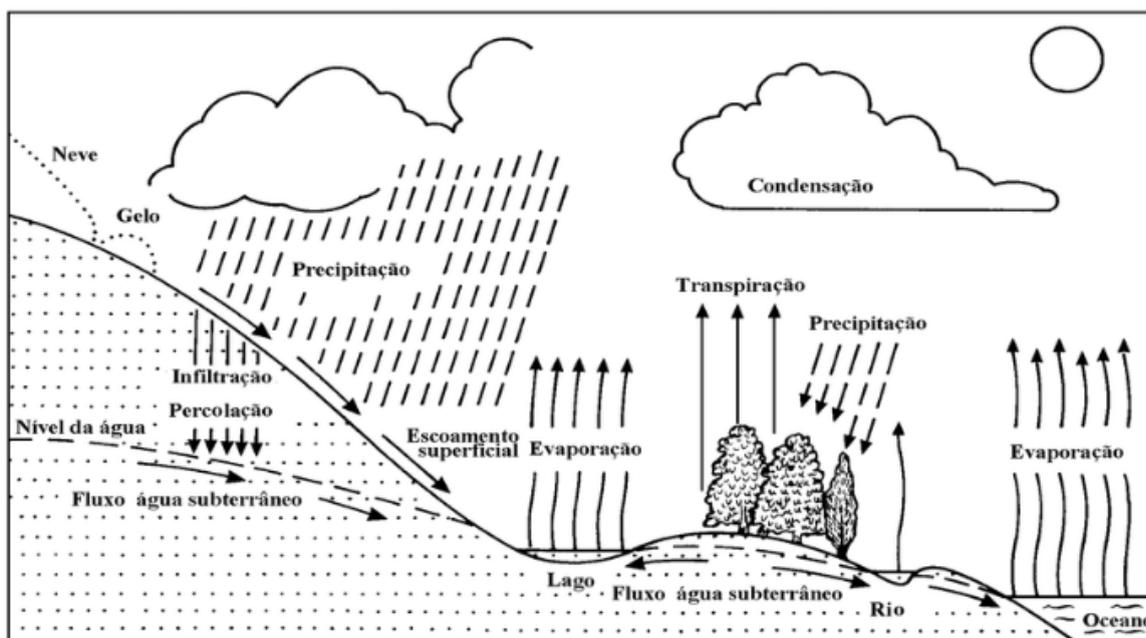
O solo funciona como um grande reservatório. Sua estrutura é composta por partículas sólidas e espaços vazios (poros e descontinuidades), também denominados interstícios, onde água que se infiltra e pode se acumular ou circular. Apesar dos interstícios poderem ter grandes dimensões, a maioria é extremamente pequeno. São geralmente interligados permitindo o deslocamento das águas infiltradas.

A água subterrânea é originada predominantemente pela infiltração de águas da chuva. A acumulação desta água nos aquíferos subterrâneos obedece a um regime hidrogeológico, que confere a esta uma dinâmica dentro do solo, conforme se visualiza na Figura 1. A presença da água no solo o separa em zonas: a zona vadosa (ou zona de aeração) e a zona saturada, sendo interface entre essas duas zonas chamadas de nível freático.

A zona vadosa é a região que está entre o lençol freático e o nível do terreno. Nessa região os espaços vazios (poros) são preenchidos por ar e, ou, água na forma de umidade, é também a zona onde ocorre a retenção de muitos metais pesados. A zona vadosa pode ser ainda dividida em três regiões: a zona de umidade, a zona intermediária e a franja capilar. A primeira é a mais superficial, onde a perda da água de adesão para atmosfera é mais intensa. A franja capilar é a região mais próxima do nível do lençol e onde a umidade é maior, devido à proximidade da zona saturada. A zona intermediária, como próprio nome sugere, está compreendida entre zona de umidade e a franja capilar, e da mesma forma sua umidade possui um valor entre a umidade das duas zonas citadas.

A zona saturada é a região abaixo do lençol freático, onde os poros e as discontinuidades das rochas estão totalmente preenchidos por água. É a região onde se encontra a água livre. O nível freático ou lençol freático pode variar de acordo com as condições hidrogeológicas, tais como clima e regime de chuvas.

Figura 1 – Regime hidrogeológico e dinâmica da água nos solos.



Fonte: TUCCI (2004).

2.3.2 Fluxo de Água nos Solos

O fluxo de água pode ocorrer sobre dois regimes distintos: o escoamento (ou fluxo) laminar ou o escoamento turbulento. No escoamento laminar as partículas do fluido se movimentam em trajetórias paralelas, uma não interferindo no movimento das outras. No regime de fluxo turbulento, as trajetórias de fluxo são irregulares, cruzando-se umas com as outras de forma aleatória (PINTO, 2006).

No estudo de fluxo em condutos fechados, *Reynolds* estabeleceu um limite inferior de velocidade entre os dois regimes, denominado velocidade crítica, de forma que o fluxo que ocorre abaixo da velocidade crítica é o escoamento laminar e acima caracteriza o fluxo turbulento. De forma prática, considera-se o fluxo no solo como sendo laminar, condicionado, sobretudo, pela estrutura porosa do solo, composta geralmente por pequenos poros. A resistência ao fluxo se deve, principalmente, à viscosidade do fluido e ao arranjo das

partículas e à distribuição dos poros. O escoamento turbulento ocorre apenas no caso de solos mais grossos, pedregulhos, todavia necessita de elevados valores de gradientes hidráulicos para que isto ocorra.

A conservação da energia (*Bernoulli*), permeabilidade dos solos (lei de Darcy) e conservação da massa são os princípios básicos que regem o fluxo de água em solos. Com base nesses princípios, pode-se afirmar que a energia total em dois pontos distintos no solo deve ser diferente para que haja fluxo entre eles, de modo que a água fluirá sempre do ponto de maior energia para o ponto de menor energia total.

O coeficiente de permeabilidade em um meio poroso é definido pela razão entre a velocidade de percolação no meio e o gradiente hidráulico (relação entre a diferença de carga hidráulica entre dois pontos e comprimento percorrido pelo fluxo), através da lei de Darcy, comprovada através de experimentos realizados em permeômetros. Vale destacar que a Lei de Darcy é válida para o fluxo de água no solo sob o regime de escoamento laminar. Ressalta-se que a condutividade hidráulica (k) é um parâmetro característico do meio poroso e do fluido que percola por esse meio.

2.4 Fatores Intervenientes na Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica nos solos pode ser influenciada por diversos fatores, tais como teor de umidade, método e esforço de compactação, grau de saturação, gradiente hidráulico, tamanho dos aglomerados das partículas de solo, distribuição e tamanho dos poros, composição química do fluido percolante e composição mineralógica (BOYNTON & DANIEL, 1985; LIKIANTCHUKI, 2007).

Mitchell *et al.* (1965) e Benson *et al.* (1994) relacionaram a condutividade hidráulica a parâmetros da mecânica dos solos, tais como a atividade da argila, o grau de compactação, os limites de consistência, confirmando a influência desses parâmetros na condutividade hidráulica dos materiais.

Rowe *et al.* (1995) relatam que um dos grandes fatores que influenciam a condutividade hidráulica de um solo para barreiras impermeabilizantes é a mineralogia da fração argilosa. Já Piedade Junior (2003) destaca a importância da estrutura do solo compactado, visto que o mesmo solo pode ter duas estruturas distintas, a floculada e a dispersa.

2.4.1 Textura e Consistência dos Solos Compactados

O solo é considerado um sistema trifásico (fase sólida, líquida e gasosa), sendo constituído por materiais minerais e orgânicos, que frequentemente sofrem deformações quando solicitados por alguma aplicação de carga.

Entende-se por textura o tamanho relativo e a distribuição das partículas sólidas que formam os solos. A textura do solo refere-se à distribuição granulométrica dos grãos - pedregulho, areia, silte e argila - e tem grande importância no estudo dos solos. De acordo com Crispim (2010), em geral, quanto maior a porcentagem da fração argila no solo, maiores são a plasticidade, o potencial de expansão ou contração, a compressibilidade e a coesão, e menores a condutividade hidráulica e o ângulo de atrito interno.

Das características dos solos, a textura faz referência à proporção relativa das partículas sólidas presentes no solo, influenciando nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do material. A ação do intemperismo sobre as rochas e solos resulta em partículas de vários tamanhos, composições e formas. É comum dividir o solo em várias frações, baseadas nas dimensões dos grãos. Sob ação prioritariamente do intemperismo químico, os grãos maiores se intemperizam formando argila, porém, minerais mais resistentes, como o quartzo, permanecem sob o tamanho areia.

Benson *et al.* (1994) relacionaram a condutividade hidráulica à granulometria dos solos, observando que a fração grossa aumenta a condutividade hidráulica, já a presença de frações finas faz com que esta diminua. Os autores concluíram que para se obter $k < 10^{-7}$ cm/s necessita-se porcentagens de finos nos solos maiores do que 30% e porcentagem de argila maior do que 15%.

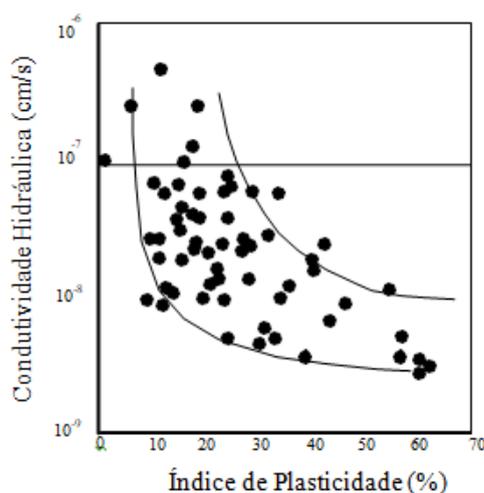
Mitchell (1976) demonstrou a importância da consistência dos solos para a condutividade hidráulica dos materiais, demonstrando que tipicamente maiores valores de limites de liquidez e de índices de plasticidade estão associados a solos de maior quantidade de partículas de argila e maior superfície ativa.

Uma tendência de decréscimo da condutividade hidráulica com o aumento da plasticidade foi apresentada por Mesri & Olson (1971), que estudaram o comportamento de 3 (três) materiais argilosos. Os autores observaram que argilas com índice de plasticidade

(IP) de 20% apresentaram condutividades hidráulicas de $1,5 \times 10^{-6}$ cm/s, enquanto que argilas com IP de 500% passaram a apresentar condutividades hidráulicas da ordem de 1×10^{-11} cm/s.

Benson *et al.* (1994) também mostraram a influência à condutividade hidráulica dos limites de *Atterberg*, demonstrando um decréscimo da condutividade hidráulica com o incremento do Índice de Plasticidade, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Influência do Índice de Permeabilidade na Condutividade Hidráulica



Fonte: Benson *et al.* (1994)

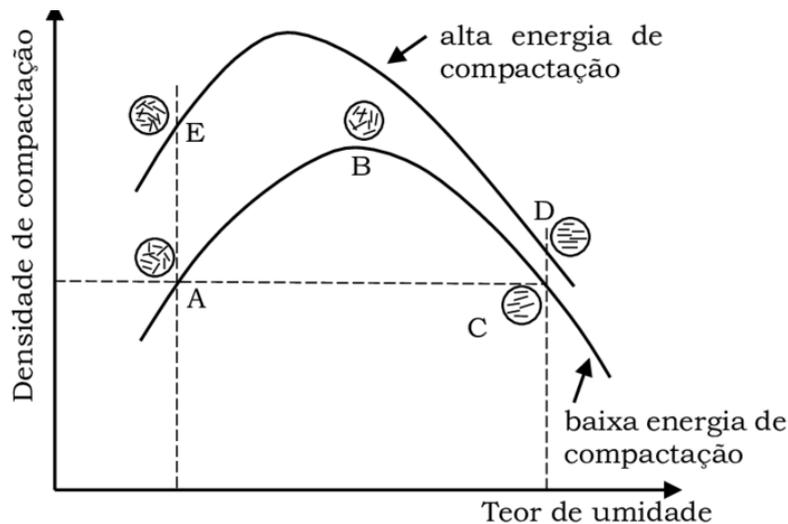
2.4.2 Estrutura dos Solos Compactados

A estrutura do solo se caracteriza pelo arranjo dos constituintes dos solos. A estrutura do solo descreve, portanto, a maneira como as partículas do solo estão agregadas. A estrutura depende do tipo de solo, podendo ser simples, como é o caso dos solos arenosos ou bastante complexa, como a dos solos argilosos. Crispim (2010) afirma que em solos arenosos compactados prevalece um comportamento baseado nas pressões grão a grão, na abrasão entre os mesmos (baseada na relação entre as quantidades de grãos arestados e lisos) e no número de contatos (compacidade). Já para os solos mais finos, tipicamente argilosos (coesivos) ocorre a formação de agregados de partículas.

A relação da condutividade com a estrutura dos solos compactados é baseada nos trabalhos principais de Lambe (1958), Seed&Chan (1959), Mitchell *et al.*, (1965), Daniel & Benson (1990).

Os solos argilosos, de acordo com Lambe (1958), possuem dois tipos de estruturas principais: a floculada e a dispersa. As estruturas são influenciadas pelo teor de umidade, uma vez que este promove a expansão ou a contração da dupla camada difusa que é comandada pelo tipo de argilomineral. Para Lambe (1958) o baixo teor de umidade faz com que a dupla camada difusa das argilas não expanda, devido à baixa hidratação das partículas, o que gera baixas forças de repulsão. Conseqüentemente haverá uma baixa orientação das partículas, resultando na tendência à floculação. Da mesma forma, o maior teor de umidade ao hidratar as partículas de argila provocará a expansão da dupla camada difusa, aumentando o grau de dispersão e orientação das partículas, fazendo com que as partículas tendam para um sistema paralelo. A Figura 3 mostra a estrutura do solo de acordo com a curva de compactação.

Figura 3 – Compactação e Estrutura dos Solos

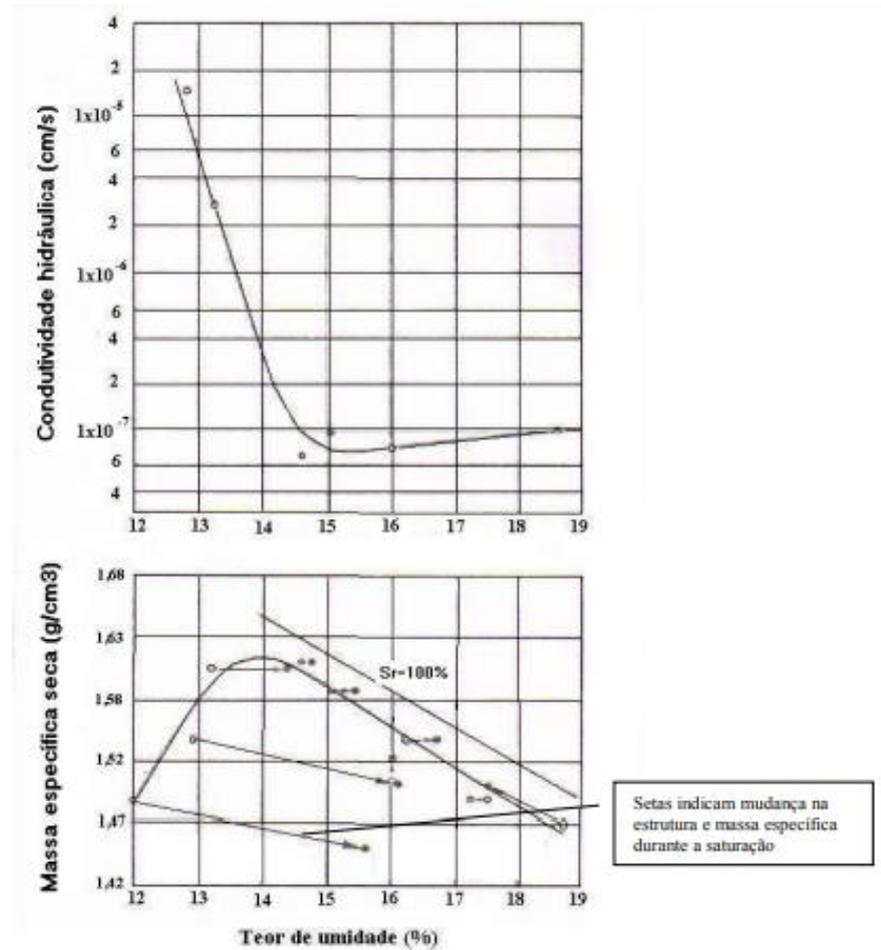


Fonte: Lambe (1958)

Lambe & Whitman (1969) estudaram a condutividade hidráulica de uma argila siltosa da Jamaica, verificando que a variação do teor de umidade na compactação alterava de forma significativa a condutividade hidráulica. Os autores observaram que a condutividade hidráulica diminuiu consideravelmente para os pontos de umidade abaixo do teor de umidade ótimo, enquanto que para as umidades acima da ótima a condutividade hidráulica permaneceu praticamente constante, com um incremento pouco significativo. Os autores concluíram que

este aumento provavelmente está relacionado com a orientação das partículas, que nesta situação é considerada paralela. A curva de compactação e os valores obtidos dos ensaios realizados pelos autores estão dispostos na Figura 4.

Figura 4 – Curva de Compactação e condutividade hidráulica do solo ensaiado por Lambe & Whitman (1969)



Fonte: Lambe & Whitman (1969)

Mitchell *et al.* (1965) mostraram em seu estudo que a condutividade hidráulica é influenciada pelo teor de umidade e a energia de compactação. Para os autores, um incremento do teor de umidade além da umidade ótima ou quando energia de compactação aumenta ocorre uma diminuição da condutividade hidráulica, como consequência da estrutura do solo, corroborando com Lambe (1958).

Benson e Daniel (1999) estudaram uma argila compactada a nível microscópico, visando verificar a importância da estrutura e dos aglomerados de partículas na condutividade hidráulica. Os autores, no entanto, não obtiveram nenhuma evidência de floculação ou dispersão da estrutura do solo em função do teor de umidade de compactação. De acordo com os autores, para uma diminuição da condutividade hidráulica em solos muito plásticos que formam aglomerados de partículas, torna-se necessária uma eliminação dos vazios entre os aglomerados durante a compactação, por meio da adição de quantidade de água para que os mesmos fiquem menos resistentes pela redução de sucção ou pela aplicação de uma energia de compactação alta para destruir os aglomerados secos e resistentes. Acar & Olivieri (1989) mostram que aumentando a energia de compactação decresce a frequência de grandes poros. Estas mudanças de tamanhos dos poros diminuem a condutividade hidráulica.

Olsen (1962), em sua teoria dos agregados de partículas, sugere que a maior parte do fluxo de água em argilas compactadas ocorre nos espaços existentes entre os aglomerados. Geralmente quando compactado mais seco a disposição das partículas (floculadas) permite maior passagem de água do que quando compactada mais úmida (estrutura dispersa). Lambe (1958) procurou explicar a estrutura do solo compactado com base nas partículas de argila individualizadas, relatando que na estrutura floculada, a orientação das partículas de argilas é aleatória, os vazios são maiores, o caminho de percolação na direção vertical é menor e a permeabilidade é maior. Já no ramo úmido, com a estrutura dispersa, as partículas de argila encontram-se em um arranjo paralelo, originando menores vazios, o caminho de percolação é mais tortuoso e a permeabilidade torna-se, portanto, menor.

2.4.3 Mineralogia

A condutividade hidráulica de uma barreira impermeabilizante é afetada, em especial, pela mineralogia do solo. A mineralogia dos solos é normalmente composta por minerais como quartzo, goethita, hematita, caulinita, gibbsita e outros como a ilmenita e magnetita.

Matéria mineral do solo é constituída, em especial, por oxigênio, silício, alumínio e ferro. Os óxidos de silício e ferro constituem 90% ou mais de peso seco da fração inorgânica na maior parte dos solos. Cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio, fósforo,

manganês, enxofre, cloro e outros elementos, expressos em óxidos, constituem, assim, em geral, menos de 10% do peso seco da fração mineral do solo.

A depender do material de origem, da intensidade do intemperismo e da drenagem em solo muito intemperizado, há um predomínio do quartzo na fração grosseira (silte + areia) e da gibbsita na unidade estrutural do argilomineral da caulinita, podendo-se esperar o predomínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, com menores proporções de outros componentes na fração argila.

Os minerais primários que compõem os siltes e areias conferem a esses tipos de solos condutividades hidráulicas relativamente altas. Fenômenos de superfícies são quase inexistente nesses tipos de solo, isso aliado à forma e ao tamanho de suas partículas condiciona ao solo valores de condutividades hidráulicas mais elevadas.

Yong *et al.* (1992) e Rowe *et al.* (1995) afirmam que a argila pode ser classificada como um material natural, terroso e de granulação fina (grãos menores do que $2\mu\text{m}$), que quando umedecida com água adquire características plásticas, ou seja, deformam-se sem romper pela aplicação de uma tensão, sendo que a deformação permanece quando a tensão aplicada é removida. Os argilominerais são assim denominados, por ocorrerem predominantemente na fração argila dos solos.

Os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo conter ainda certo teor de elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Os materiais argilosos podem ser constituídos por um único argilomineral ou por uma mistura de diversos argilominerais (SANTOS, 1989). Lamana (2009) reforça que as argilas fazem parte da família dos silicatos, podendo ser formadas por apenas um mineral argiloso ou por uma mistura deles, com um dos minerais em predominância, além da presença de matéria orgânica e impurezas. Os argilominerais apresentam estrutura em camadas, de uma forma idealizada constituída por lâminas tetraedrais ajustadas a lâminas octaedrais.

Sendo assim, os minerais argilosos são geralmente cristalinos, tratando-se quimicamente de silicatos hidratados, podendo conter os cátions Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , K^{+} , entre outros, sendo dispostos estruturalmente em camadas e folhas. Os argilominerais são oriundos principalmente por intemperismo químico, a partir da decomposição dos minerais formadores das rochas. Existem alguns fatores que se destacam na formação dos argilominerais, tais como a caráter petrográfico da rocha matriz, a temperatura e a pluviosidade, a topografia, a vegetação e o tempo geológico.

Os minerais de argila ou minerais secundários são responsáveis pelos baixos valores de condutividade hidráulica desses solos. A forma e o tamanho das partículas conferem ao solo uma textura e estrutura singular. Os poros de solos argilosos, por serem menores do que outros tipos de solo, impõem dificuldade ao movimento de fluidos no interior do meio poroso. Adicionalmente, as propriedades físico-químicas proporcionam a manifestação de diversos fenômenos interfaciais de superfície, conferindo ao solo uma baixa condutividade hidráulica. Isso evidencia que o solo pode sofrer significativas mudanças nas suas propriedades e comportamento pela presença desses minerais.

De acordo com Lambe e Whitman (1969), os argilominerais podem ser predominantes em dois tipos, conforme sua estrutura molecular: camadas 1:1 ou difórmicos e camadas 2:1 ou trifórmicos. Essa denominação refere-se ao número de camadas tetraédricas de sílica e octaédricas de hidróxidos de alumínio, nessa ordem, que entram em sua cela unitária. O tipo e a proporção dos argilominerais em um solo influenciam de forma direta suas propriedades físicas, como as propriedades de retenção de água, resistência, condutividade hidráulica e susceptibilidade à expansão e à contração.

A composição da argila é importante, afetando consideravelmente as propriedades desse material. Além dos argilominerais, as argilas são formadas por outros materiais e minerais, tais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, podendo conter também minerais não cristalinos ou amorfos.

Devido às reduzidas dimensões dos cristais dos argilominerais, tornam-se necessários métodos especiais para a identificá-los, tais como a microscopia eletrônica de varredura ou análise mineralógica por difração de raios-X, além da absorção atômica ou análise química quantitativa por fluorescência de raios-X.

Mitchell (1993) afirma que a unidade tetraédrica dos argilominerais é constituída por quatro átomos de oxigênio, O^{2-} , que estão equidistante de um átomo de silício, Si^{4+} , formando um tetraedro. Os átomos de oxigênio posicionam-se nos vértices do tetraedro e o de silício ocupa o seu centro. Mitchell (1993) afirma ainda que a unidade octaédrica é constituída por seis átomos de oxigênio, O^{2-} ou hidroxila OH^- , estando igualmente espaçados de um átomo de alumínio, Al^{3+} ou de magnésio, Mg^{2+} . As unidades básicas dispõem-se de forma hexagonal, partilhando hidróxilos ou oxigênios com octaedros vizinhos, dando origem a folhas estruturais octaédricas.

Rowe *et al.* (1995) destacam que um dos principais fatores que alteram a condutividade hidráulica de um solo para barreiras impermeabilizantes são os minerais que compõem a fração argila. Os principais grupos de minerais de argila são as caulinitas, ilitas, cloritas, montmorilonita e vermiculitas.

A caulinita é um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, originando-se a partir da alteração química principalmente de minerais primários, como os feldspatos e as micas, em condições ambientais diversas. Sharma e Lewis (1994) afirmam que condições de clima mais quente e úmido, com elevadas precipitações e boa drenagem favorece a geração da caulinita.

A caulinita é formada por camadas 1:1. Cada camada consiste em uma folha de tetraedros de SiO_4 e uma folha de octaedros de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, as quais estão ligadas entre si em uma única camada através do oxigênio presente, por meio de pontes de hidrogênio. Como as camadas sucessivas são mantidas juntas por ligação de hidrogênio (considerada muito forte), a caulinita é bastante estável possuindo uma estrutura que resiste muito bem à penetração da água nas camadas (SHARMA e LEWIS, 1994). Devido a suas características, é considerada não expansiva quando em processo de saturação, sendo muito utilizada em produções industriais.

De acordo com Sharma e Lewis (1994) e Carvalho (1997) a composição química média da caulinita é de em torno de 46,5% SiO_2 ; 39,5% Al_2O_3 e 14% H_2O . De acordo com Yong *et al.* (1992) a área específica da caulinita é da ordem de $10 \text{ m}^2/\text{g}$, e sua capacidade de troca catiônica (CTC) é um torno de 10 meq/100g.

As ilitas possuem estrutura cristalina 2:1, consistindo, portanto, de uma folha octaédrica de gibsite entre duas folhas tetraédricas de silício. As camadas das ilitas são unidas por átomos de potássio (K). O tamanho, carga, e o número de coordenação do K é tal que se ajusta adequadamente no anel hexagonal dos oxigênios das folhas de sílicas tetraédricas adjacentes. Devido à presença de potássio, a estrutura da ilita é considerada estável, não sendo suscetível ao inchamento e ao aumento de conteúdo por água.

Os argilominerais do grupo montmorilonita são formados por estruturas do tipo 2:1, com empilhamento de duas folhas tetraédricas de silicato com uma folha octaédrica de alumínio, ligadas entre si pelo oxigênio comum às folhas. Carvalho (1997) afirma que a composição química do grupo da montmorilonita é expressa por: $(\text{OH})_4\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. A ligação entre as camadas é fraca (ligações de *Van der Waals*) e com as substituições

isomórficas, a montmorilonita tem uma grande tendência em separar as camadas, absorvendo água e causando expansão.

Olphen (1963) afirma que a expansividade das montmorilonitas pode ser explicada pela hidratação dos cátions existentes entre as camadas estruturais e pela adsorção de moléculas de água. A hidratação dos cátions existentes entre as camadas estruturais pelas moléculas polares de água acaba por diminuir a força atrativa das camadas. Já a adsorção de moléculas de água ocorre na superfície das camadas formadas por oxigênio, estabelecendo ligações de hidrogênio.

Para Maciel Filho (1997), a caulinita possui carga elétrica negativa e baixo poder de retenção para a água, comparativamente aos minerais dos outros grupos. Já as montmorilonitas são caracterizadas pelo seu alto poder de retenção de água, expansibilidade elevada e por se tornar plástica em um teor de umidade superior ao correspondente ao da caulinita.

A caulinita é o argilomineral do tipo 1:1, não apresenta cátions entre as camadas estruturais. A ausência desses cátions e os espaços entre as estruturas básicas inibem a expansão desse tipo de argila (HEINECK, 2002). Em contrapartida, as montmorilonitas, são argilominerais de alta superfície específica e elevada capacidade de troca catiônica. A configuração elétrica dessas partículas, com cátions existentes entre as camadas estruturais, que hidratam na presença de água (inchamento cristalino), somada à elevada concentração de íons na superfície do argilomineral, estimula a penetração da água entre as camadas. A entrada de água entre as camadas busca um equilíbrio de concentrações (dupla camada difusa - inchamento osmótico), conferindo a esse argilomineral um alto poder de inchamento (ELIAS, 2015), o que reduz consideravelmente sua permeabilidade.

De acordo com Lukiantchuki (2007), os solos argilosos constituídos por argilominerais do grupo das montmorilonitas apresentam valores de condutividades hidráulicas menores do que aqueles para solos constituídos por argilominerais do grupo das caulinitas. Isso ocorre pelo fato de que as montmorilonitas apresentam partículas com maior superfície específica e apresentam ainda maior capacidade de troca catiônica.

Mesri e Olson (1971) avaliaram o comportamento hidráulico de argilas com diferentes composições mineralógicas, verificando que argilas caulínicas naturais apresentaram condutividades hidráulicas da ordem de $1,5 \times 10^{-6}$ cm/s, enquanto argilas

montmoriloníticas passaram a apresentar condutividades hidráulicas da ordem de 1×10^{-11} cm/s.

Nos minerais secundários das argilas, devido a suas características (partículas extremamente pequenas, baixa porosidade, elevada superfície específica, plasticidade elevada e presença de cargas elétricas), ocorrem fenômenos de natureza elétrica que influencia o comportamento do sistema. A presença de carga elétrica nos solos é fortemente atribuída ao próprio processo de formações dos minerais, que contempla o fenômeno da substituição isomórfica, responsável pela presença de valência eletropositiva ou eletronegativa. É possível observar nos solos argilosos fenômenos como a troca ou adsorção iônica e a dupla camada difusa, que influenciarão, por exemplo, o comportamento de expansão e retração dos solos, que impactará diretamente na condutividade hidráulica desse.

2.4.4 Cargas Elétricas dos Solos Compactados

O processo de formação do solo mantém uma correlação direta com a presença de cargas elétricas nessas partículas. Vários processos, como a substituição isomórfica, a dissociação do grupo OH, a protonação das hidroxilas, entre outros, induzem de forma direta ou indireta a formação de um desequilíbrio elétrico, resultando num balanço de cargas elétricas positivas ou negativas. A existência de cargas elétricas é uma ocorrência mais comum nos solos argilosos, especialmente de materiais coloidais, e é responsável por diversas características físico-químicas do solo, que exercem influência direta no comportamento mecânico e hidráulico do material.

Durante a formação dos solos, a ocorrência dos diversos processos intempéricos e as variações hidrotermais, fazem com que alguns minerais e a matéria orgânica sejam fragmentados a partículas extremamente pequenas. Associadas a essas ações provenientes dos processos de intemperismo, fenômenos físico-químicos reduzem ainda mais essas partículas que podem atingir dimensões inferiores a 0,001 mm. Além das argilas coloidais, existem ainda no solo os coloides orgânicos (húmus), provenientes da decomposição da matéria orgânica (LOPES e GUILHERME, 2004). Vale salientar que as principais responsáveis pela atividade físico-química do solo são as partículas coloidais (argila e húmus).

Os coloides geralmente apresentam cargas elétricas negativas, originadas do processo de formação (em alguns casos os coloides podem também desenvolver cargas

positivas). Esse excesso de carga negativa pode atrair e reter íons com cargas positivas, semelhante ao comportamento de um ímã. Esse tipo de comportamento dos coloides pode explicar, por exemplo, porque o nitrogênio na forma de nitrato (NO_3^-) lixivia mais facilmente no solo, do que nitrogênio na forma de amônio (NH_4^+). Segundo Lopes e Guilherme (2004), o nitrato apresenta uma carga negativa fraca, de forma que acaba sendo pouco retido no solo, permanecendo como íon livre na água do sistema, passível de ser lixiviado sob certas condições pluviométricas.

As cargas elétricas presentes no solo são geralmente divididas em dois grupos: as cargas permanentes e as cargas variáveis, sendo a última dependente do pH da solução. As cargas permanentes são cargas que não dependem do pH presentes nas estruturas dos minerais, são produtos principalmente da substituição isomórfica. Nas argilas do tipo 2:1, a carga permanente é fruto desse processo, de modo que nas montmorilonitas, por exemplo, as partículas Al^{3+} dos octaedros podem ser totalmente ou parcialmente substituídas por partículas Mg^{2+} . Essa substituição acaba resultando em uma valência (carga) negativa livre não atendida, uma vez que um átomo trivalente (Al^{3+}) é substituído por um divalente (Mg^{2+}). Já na illita, ocorre a substituição do átomo tetravalente (Si^{4+}), dos tetraedros, por átomo trivalente (Al^{3+}), deixando, dessa forma, uma valência (carga) negativa livre (ALLEONI e MELO, 2009).

Outro processo que pode levar a um balanço de carga elétrica negativa é a dissociação do grupo OH. Segundo Lopes e Guilherme (2004) a presença do grupo OH nas bordas de um cristal de argila ou da matéria orgânica pode levar a dissociação de H^+ , contribuindo para um saldo de carga elétrica negativa. De acordo com os autores, as cargas negativas são originárias da dissociação dos radicais orgânicos (carboxílicos, principalmente, e fenólicos, em menor escala) e minerais, principalmente sesquióxidos de ferro e alumínio. Essas cargas são denominadas cargas variáveis e são dependentes do pH. Observa-se que à medida que se eleva o pH, o seu aparecimento é favorecido. Em solos tropicais, predomina argilas cauliníticas (tipo 1:1). Nesse tipo de mineral (silicatado) os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio sob condição de pH elevado conferem um saldo de carga elétrica negativa.

Apesar da predominância de cargas negativas, pode ocorrer também no solo um saldo de cargas elétricas positivas. Esse balanço é favorecido por fenômenos como a protonação das hidroxilas (OH) dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio,

preferencialmente. Tratam-se, também, de cargas variáveis, mas ao contrário da dissociação do grupo OH, é favorecido por pH extremamente baixo.

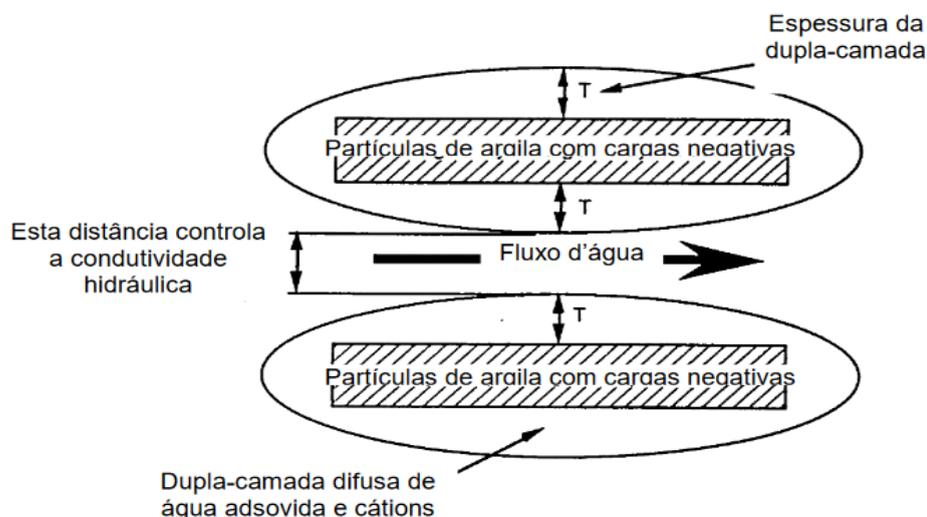
Nota-se, portanto, que as cargas elétricas variáveis no solo são originadas principalmente por óxidos e hidróxidos (óxidos hidratados) de Fe e de Al e matéria orgânica. Os óxidos hidratados de ferro e alumínio podem desenvolver tantas cargas negativas como positivas em suas superfícies, dependendo do pH da solução do meio. O desenvolvimento de cargas elétricas pela matéria orgânica, por outro lado, ocorre sob valores de pH bem mais baixos que os óxidos, o que favorece a ocorrência de cargas negativa, sendo pouco provável um saldo de cargas positivas. A origem das cargas negativas da matéria orgânica advém da dissociação de hidroxilas.

Em suma, devido a todo esse processo as partículas de argila apresentam cargas elétricas negativas nas faces e cargas positivas nos bordos, e como resultado, as cargas negativas das partículas de argila atraem íons positivos (cátions) de sais dissolvidos na água. Cada partícula pode, também, atrair várias camadas de moléculas de água em forma de esferas hidratadas dos cátions buscando certo equilíbrio iônico. É devido a esses fenômenos que argilominerais, como as montmorilonitas, apresentam um alto poder de inchamento.

Os eletrólitos (substâncias químicas que, dissolvidas em água ou outro solvente, origina íons positivos e íons negativos), podem exercer influência na condutividade hidráulica, uma vez que o aumento da concentração desses ou na valência dos cátions pode aumentar a espessura da dupla camada de íons, diminuindo a condutividade hidráulica (Figura 5). Vale destacar que a água destilada pode lixiviar eletrólitos, fazendo com que a dupla camada de íons expanda, reduzindo a permeabilidade (HEINECK, 2002).

Para Fireman (1944) e McNeal & Coleman (1966), soluções aquosas com eletrólitos e água destilada, expandem a dupla camada difusa e inibem a condutividade hidráulica. Porém soluções com altas concentrações e cátions polivalentes tendem a deixar o solo mais permeável.

Figura 5 – Dupla camada de íons e o seu efeito na condutividade hidráulica



Fonte: Daniel (1993).

2.4.5 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A presença de cargas elétricas nos solos é responsável por processos como a adsorção ou troca iônica, a dupla camada difusa, entre outras. Entender como se processam esses fenômenos é primordial para compreender o comportamento do solo em diversas situações. A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a Dupla Camada Difusa (DCD), por exemplo, exercem influência direta sobre a condutividade hidráulica dos solos, além de poderem explicar também como ocorre a dinâmica de poluentes nesse meio.

O fenômeno da troca iônica pode ocorrer de modo a induzir a retenção de cátions ou ânions, caracterizados por um excesso de cargas negativas ou positivas. Como o próprio nome sugere, a troca catiônica caracteriza-se pela troca de cátions (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , etc), enquanto a troca aniônica caracteriza-se pela troca de ânions (NO_3^- , PO_4^- , HPO_4^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , etc).

Como nos solos, em geral, predominam as cargas negativas, dar-se-á neste trabalho mais ênfase as trocas catiônicas, sendo os estudos envolvendo CTC, também, muito mais abundantes do que aqueles sobre CTA.

Segundo Lopes e Guilherme (2004) nas argilas os cátions retidos (adsorvidos) podem ser substituídos por outros cátions, o que significa dizer que eles são trocáveis. Por exemplo, o cálcio pode ser trocado pelo hidrogênio e/ou potássio. A CTC é a expressão utilizada para designar o número total de cátions trocáveis que um solo pode reter em relação a sua quantidade de carga negativa. Em outras palavras, CTC é um parâmetro físico-químico, que indica a quantidade de cátions que o solo é capaz de reter em determinadas condições, e trocar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros cátions, sendo função da intensidade de cargas negativas presentes nas próprias partículas do solo. Ou seja, essa é uma troca basal, definida como uma troca de cátion por cátion, estabelecida entre cátions das unidades estruturais das argilas e a solução aquosa, que contém o cátion de maior atração.

Essa habilidade das argilas de carregar cátions trocáveis pode ser expressa em termos de miliequivalentes por 100g de argila, e, segundo Lopes e Guilherme (2004), possui algumas características que devem ser ressaltadas face as suas implicações:

- a) *O fenômeno de troca é reversível*: isto significa que embora haja um ponto de equilíbrio na reação, um cátion desloca outro e assim sucessivamente;
- b) *O fenômeno de troca é estequiométrico*: os cátions se substituem em quantidades equivalentes;
- c) *O fenômeno de troca é instantâneo*: tão logo seja adicionado ao solo o novo cátion, a troca desse novo cátion com cátions já adsorvidos ao solo ocorre instantaneamente.

Lopes e Guilherme (2004) destacaram alguns fatores que afetam diretamente a CTC:

- a) *Espécie e quantidade de argila e matéria orgânica* – de acordo com a composição do solo, ou seja, proporção de cada material e a presença ou não de matéria orgânica, o valor de CTC pode variar significativamente (Tabela 2).
- b) *Superfície específica* - quanto mais subdividido for o material, maior será a sua superfície específica e maior a CTC do solo.
- c) *pH* - a influência do pH do meio na CTC será tanto maior, quanto maior for a presença de espécies de minerais de argila com dominância de cargas dependentes de pH e/ou matéria orgânica que, praticamente, só apresenta esta característica. Esse efeito é decorrente da dissociação dos radicais orgânicos e, ou, sesquióxidos de ferro

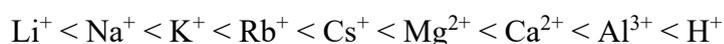
e alumínio, além de fenômenos de desobstrução de cargas da matéria orgânica ocupadas por alumínio, ferro e manganês.

Tabela 2 – CTC de materiais argilosos e não argilosos.

MATERIAL	CTC (cmol/kg)
Matéria orgânica humificada	100-250
Vermiculita	100-150
Montmorilonita	80-120
Ilita	30-50
Clorita	10 a 40
Galuconita	05 a 40
Haloisita	05 a 10
Caulinita	03 a 15
Óxidos de Fe e Al	02 a 05

Fonte: Adaptado de Grim & Guven (1978)

Os cátions que estão retidos (adsorvidos) nas estruturas dos argilominerais não são “presos” com a mesma intensidade. Em um sentido mais amplo, a energia de ligação dos cátions às estruturas dos argilominerais não são as mesmas. Essa intensidade varia com a maior ou menor valência e com o grau de hidratação dos cátions. Desse modo, esses são passíveis de serem “trocados”, seguindo uma série preferencial, que ilustra a facilidade de deslocamento de um cátion, a qual se apresenta a seguir:



Destaca-se que o hidrogênio é exceção à regra, pois, apesar de ser monovalente, apresenta uma ligação por covalência muito “forte”. Na Tabela 2 apresentada anteriormente encontra-se a CTC, bem como a superfície específica e tamanho de partículas de minerais argilosos e não argilosos.

2.4.6 Área Superficial Específica (ASE)

As cargas elétricas presentes no solo encontram-se na superfície de seus minerais, de forma que muitos dos processos e do comportamento do solo são influenciados por fenômenos interfaciais que ocorrem nessas superfícies. Propriedades elétricas, como dupla camada elétrica, associados aos fenômenos como adsorção, adesão e tensão superficial, ocorrem nessas superfícies entre as fases sólidas e líquidas, e são indispensáveis para compreensão de diversos fenômenos e processos do solo, evidenciando a importância do conhecimento das características superficiais dos sólidos.

Segundo Filho e Francelino (2001) a superfície de um sistema disperso se expressa em termos de superfície específica, que é definida como sendo a relação entre a área da superfície exposta e o seu volume ou massa. Nota-se, portanto, que área superficial exposta, densidade (massa e volume), textura e estrutura do solo e estrutura porosa estão intrinsecamente associadas, devendo ser analisadas de forma conjunta, tanto nas análises de superfície específica, como para a compreensão dos fenômenos interfaciais.

A área de uma determinada massa de sólido é inversamente proporcional ao tamanho de suas partículas, ou seja, à medida que diminui o diâmetro das partículas, aumenta a área superficial específica, influenciando propriedades relacionadas como absorção, expansão e plasticidade.

Existem dois tipos diferentes de formação porosa, a porosidade primária e a porosidade secundária. Esses dois tipos são responsáveis pela definição de superfície externa e interna. Gregg e Sing (1982 *apud* TEIXEIRA *et al.*, 2001) afirmaram que: a área externa é definida pela porosidade, sendo determinada pelos espaços existentes entre as partículas primárias e secundárias, enquanto que a área interna é formada pelas paredes dos sulcos, poros e cavidades com profundidades maiores do que o comprimento e que tenham abertura para o exterior. Segundo os autores a área externa pode aumentar quanto mais imperfeições na forma de sulcos e fissuras (com dimensões maiores em comprimento do que em profundidade) a superfície do sólido apresentar. Os mesmos afirmam ainda que área interna é muitas vezes maior que a superfície externa, sendo determinante para superfície total do sólido. Os autores ressaltam ainda que poros fechados não contribuem para o aumento da área interna.

A textura do solo aliada à superfície específica influenciam diversas outras propriedades do solo. Quanto maior for a área superficial, maior será a capacidade de retenção de água, de nutrientes e de outras substâncias químicas do solo, sendo maior a tendência de as partículas manterem-se unidas em uma massa coesa ou como pequenos agregados e maior a taxa de liberação de nutrientes para os solos através de minerais intemperizáveis.

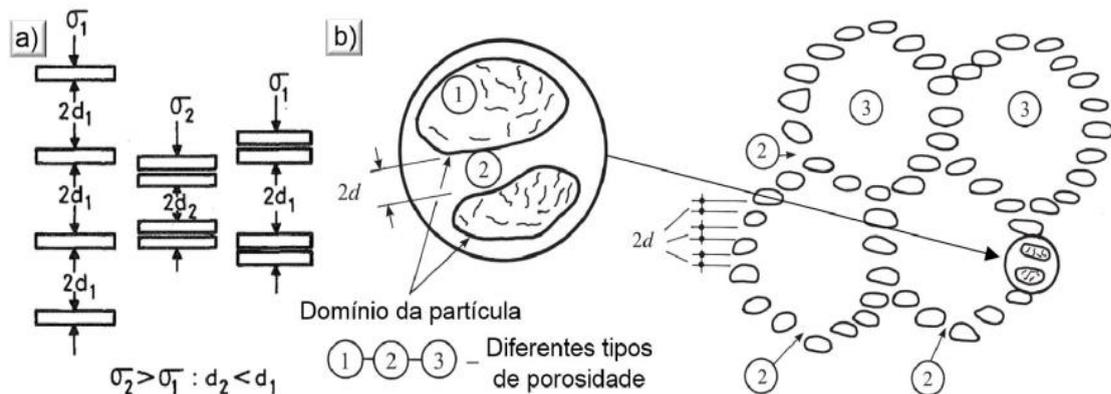
2.4.7 Outros Fatores Intervenientes na Condutividade Hidráulica

A natureza química do fluido percolante é fator que pode afetar a condutividade hidráulica, já que ela é capaz de afetar a estrutura através da flocculação das partículas ou do encolhimento do esqueleto do solo. Para evitar mudanças na estrutura do solo é muito comum realizar a estabilização química, através da adição do agente cimentante (cimento, cal, cinza). Vale destacar que o agente cimentante, além de atenuar as mudanças na estrutura do solo, “tampam” os poros, densificando a massa de solo e diminuindo a condutividade, podendo ainda aumentar a resistência mecânica. Segundo Heineck (2002) as partículas do solo tornam-se mais resistentes à alteração (flocculação ou orientação) quando estão em uma configuração mais densa, o que evidencia que um aumento do esforço de compactação é capaz de estabilizar a massa de solo e torná-la mais resistente a ataques químicos.

Segundo Póvoa (2014), os estudos da condutividade hidráulica das argilas desenvolvidos por Olsen (1962) serviram de base para teoria da agregação das partículas, que buscou justificar as discrepâncias entre a condutividade medida em ensaios e a prevista segundo a lei de Darcy. Nagaraj *et al.* (1990 *apud* PÓVOA, 2014), com base na análise da compressibilidade e permeabilidade, propuseram a existência de três níveis de porosidade no arranjo estrutural das partículas de uma argila (Figura 6). O tipo 1 se refere à porosidade intra-agregados, ou seja, entre partículas individuais de argila dentro de um agregado. O tipo 2 trata-se da porosidade inter-agregados, em outras palavras, entre dois agregados que interagem entre si (interação físico-químicas) dependendo do carregamento exterior. E, por fim, o tipo 3, referente a porosidade inter-agregados de maior diâmetro, que diz respeito a um grupo de agregados em equilíbrio com a tensão da água. Esse tipo de porosidade pode representar até 90% do volume de porosidade de uma argila, sendo a que mais influencia a condutividade hidráulica desse solo. Com base no exposto, é possível observar, portanto, a

relação direta entre essas duas características distintas dos solos (porosidade e permeabilidade), mas intrinsicamente associadas.

Figura 6 – Tipos de Porosidade



Fonte: Daniel (1993)

Assim como nos solos compactados, nos GCL's a presença de agentes orgânicos ou inorgânicos é capaz de alterar a permeabilidade do meio. É cada vez mais comum no ensaio de permeabilidade a utilização dos mesmos fluidos percolantes a que serão submetidos a massa de solo. Vale destacar que mesmo a água sendo o fluido percolante, a depender de suas características pode haver alterações na condutividade hidráulica do meio. Variações na quantidade de ar dissolvido, o tipo e concentração de eletrólitos, teor de nutrientes, podem acarretar em valores diferentes de permeabilidade para o solo. Nos ensaios é sempre preferível o uso de água deaerada, quando não for possível a água de rede de abastecimento é a mais recomendada.

Outro fator importante a se considerar que pode afetar de forma significativa a condutividade hidráulica dos solos são as tensões efetivas. Segundo Daniel (1993) solos compressíveis e solos com características como macroporos e muitas discontinuidades são os mais sensíveis a variações nas tensões efetivas. Incrementos no valor da tensão efetiva irão resultar na diminuição dos poros e no "fechamento" das discontinuidades e, conseqüentemente, resultará na diminuição da condutividade hidráulica. Deve-se, sempre que possível, realizar os ensaios submetendo as amostras as mesmas tensões efetivas a que serão submetidas em campo.

A compactação é uma técnica que visa melhorar as características mecânicas e hidráulicas do solo a partir da diminuição dos vazios. A técnica de compactação associada a condições de contorno específicas (teor de umidade, energia de compactação, tipo de solo, grau de saturação) é responsável direto pela condutividade hidráulica do solo. Como foi exposto, a depender do teor de umidade do solo e do esforço de compactação, a estrutura do solo pode variar de um estado mais flocoado para um mais disperso, influenciando a permeabilidade. Mitchell *et al.* (1965) analisaram ainda o efeito da energia de compactação na condutividade hidráulica dos solos, onde a condutividade foi avaliada para os corpos-de-prova saturado, para diferentes teores de umidade e energias de compactação. Os autores observaram uma redução significativa (em até 100 vezes) na condutividade com o incremento da energia de compactação, principalmente para pontos próximos do teor de umidade ótima.

A saturação é mais uma a afetar a condutividade hidráulica dos solos, havendo uma diminuição da permeabilidade com a queda da saturação, uma vez que os caminhos disponíveis para água percolar diminuem, pois, parte dos poros estará preenchida por ar. Além desses, muitos outros fatores podem vir a interferir no comportamento hidráulico do solo, como o gradiente hidráulico, temperatura, índice de vazios, entre outros.

2.5 Fluidos Percolantes

Propriedades de um fluido percolante, como massa específica e viscosidade, interferem de forma direta na condutividade hidráulica do solo, e essas, por sua vez, sofrem variação com alterações de temperatura. A viscosidade tem uma interferência maior, tendo em vista que, quanto mais viscoso é o fluido, mais difícil é dele percolar pelo meio particulado e menor, portanto, a condutividade hidráulica.

O lixiviado produzido a partir de resíduos detém propriedades de caráter físico, químico e biológico bastante distintas das observadas na água. As interações do percolado com o meio poroso podem causar alterações no comportamento hidráulico do meio poroso, devido a forças de atração e repulsão presentes nas moléculas do meio poroso. O alto teor de sais e metais presentes no lixiviado incita que as moléculas do fluido e do solo realizem ligações. A ocorrência dessa adesão entre as superfícies do fluido e do solo se deve, sobretudo, às forças osmóticas decorrentes do gradiente de concentração de íons ou de sais, através de uma membrana.

Existe uma significativa alteração no comportamento hidráulico do solo com fluidos percolantes específicos, devido ao lixiviado ter características muito variáveis e esse efeito depende da composição física e química do lixiviado. Zanon (2014) percebeu, em seu trabalho acerca de misturas de solo compactado com lixiviado, uma redução no parâmetro de permeabilidade do meio poroso, e ainda uma mitigação da carga contaminante do lixiviado. Por outro lado, diversos autores, como Hamada *et al.* (2004) e Nascentes (2006), que analisaram as alterações de permeabilidade em obras de solo argiloso compactado, afirmaram que a permeabilidade do meio particulado pode aumentar em situações de contato com fluxos de percolados provenientes de aterros sanitários.

Vale ressaltar, entretanto, que esta conclusão não pode ser generalizada, visto que as interações solo-lixiviado dependem de muitos mecanismos, devendo ser realizados estudos de transportes de contaminantes mais avançados para cada situação no intuito de se buscar um melhor entendimento do processo como um todo (SOARES, 2012).

A maior parcela das fontes de contaminação é formada por cloretos, nitratos, metais pesados e materiais ricos em matéria orgânica. Os cloretos, na forma do íon Cl^- , são os mais recorrentemente encontrados na superfície terrestre, podendo ser encontrados nas águas dos oceanos, assim como na maioria das rochas de origem sedimentar. As formações rochosas de origem sedimentar com grande presença de cloretos, tais como os evaporitos, possuem em sua composição predominantemente o mineral halita (NaCl). Já os nitratos, que são originados do nitrogênio inorgânico, têm sido responsáveis pelos maiores índices de contaminação de águas subterrâneas. Eles são encontrados em grande escala em sistemas de tratamento e disposição convencionais *in situ* (fossas e latrinas), assim como na aplicação de fertilizantes nitrogenados no setor agrícola. Vale salientar que especialmente no caso da contaminação via nitratos, em função do alto grau de mobilidade e alta persistência, mesmo em condições com a presença de oxigênio, gera um grande passivo ambiental (TEIXEIRA *et al.*, 2003).

Os metais pesados são normalmente encontrados no ambiente em fertilizantes e pesticidas, amplamente utilizados no meio agropecuário, na combustão de carvão e óleo, das grandes redes industriais, nas emissões veiculares, sobretudo das grandes cidades, e no refinamento e incineração de resíduos urbanos e industriais, gerando resíduos sólidos. Metais pesados apresentam baixa mobilidade, embora seja interessante ressaltar que tal

comportamento pode variar drasticamente caso ocorra alteração nas condições físico-químicas.

Alguns metais bastante pontuais, como o cádmio, também são fontes de contaminação que merecem destaque, e que são principalmente encontrados em fungicidas, baterias e na galvanoplastia. Outro desses é o chumbo, que tem ampla gama de utilização, sobretudo no setor industrial, como, por exemplo, nas petrolíferas, indústrias bélicas e de cerâmica. Outros exemplos são o níquel e o zinco, encontrados em diversos insumos que vão desde a produção de baterias até os produtos farmacêuticos e que podem, em diversas situações, alcançar cursos hídricos, como os rios e os mananciais subterrâneos (DUARTE e PASQUAL, 2000).

Os materiais com riqueza de matéria orgânica também são potenciais contaminantes, sobretudo, quando associados a variações acentuadas de temperatura e pressão, algo extremamente possível de ocorrer quando da enorme acumulação de resíduos sólidos em um aterro sanitário (PIEDADE JUNIOR, 2003).

Desta feita, o principal efluente do processo de estoque de resíduos em um aterro e que é fruto do processo de decomposição natural do material é o chorume. O chorume é entendido como um efluente com alto teor de concentração de compostos orgânicos e inorgânicos, proveniente do processo de infiltração da água do escoamento superficial ocorrido sobre os resíduos urbanos, disposto em aterros sanitários ou lixões, que se encontra em franco processo de decomposição e que pode se comportar como um lixiviado com alto potencial de contaminação.

O processo de infiltração carrega diversos materiais que estão na forma dissolvida ou em suspensão dos resíduos sólidos urbanos. Segundo Alcântara (2007) normalmente o lixiviado é composto pelo próprio líquido proveniente da umidade natural dos resíduos sólidos urbanos, pela água que é inserida no aterro vinda de diversas fontes, assim como pela água proveniente do processo de decomposição biológica.

Segundo Rodrigues (2011), a constituição físico-química do percolado é de uma enorme variação, com grande dependência de fatores que se estendem desde as precipitações da localidade, assim como do tempo de deposição dos resíduos até as características específicas da origem do próprio resíduo, salientando dentre elas, sobretudo, a umidade.

De acordo com Alcântara (2007), é importante diferenciar que os componentes do lixiviado se dividem em 4 (quatro) tipologias: metais pesados, material orgânico dissolvido, macrocomponentes inorgânicos e componentes orgânicos xenobióticos. E, obviamente, por dispor de tantos grupos diferentes de materiais com alto potencial danoso e substâncias altamente solúveis, o lixiviado pode contaminar as águas do subsolo nas proximidades do aterro sanitário e se alastrar por distâncias consideráveis, trazendo prejuízos sob a ótica da engenharia, assim como para o meio ambiente.

Outro exemplo de fluido percolante são as soluções salinas. Os efluentes salinos são produzidos em grandes volumes por diferentes ramos industriais, tais como no processamento de alimentos, na produção de químicos e na extração de petróleo (LEFEBVRE e MOLETTA, 2006). Estes efluentes, além de apresentarem uma alta concentração de sais, também podem possuir um alto teor de matéria orgânica e de nutrientes, como o nitrogênio, em sua composição (SUDARNO *et al.*, 2011). Caso não tratados, os efluentes salinos são capazes de gerar grandes danos ambientais, como a contaminação do solo, da água superficial e subterrânea.

Durante a operação de um aterro sanitário, por exemplo, é altamente provável que as águas subterrâneas possam penetrar dentro da barreira impermeabilizante. A água subterrânea geralmente contém certa salinidade, com níveis relativamente altos de Na^+ , Ca^{2+} e K^+ , e o total de sólidos dissolvidos pode atingir em torno de 80 g/L (GUO *et al.*, 2001; YE *et al.*, 2017). A composição química das águas subterrâneas tem um impacto substancial nas características de engenharia, como a expansão (CUI *et al.*, 2012; YE *et al.*, 2017; CUI *et al.*, 2017), permeabilidade (MISHRA *et al.*, 2005; LIU *et al.*, 2020) e a resistência ao cisalhamento (XU *et al.*, 2018; XIANG *et al.*, 2020).

A solução saturada de cloreto de sódio (NaCl) é representativa dos líquidos miscíveis inorgânicos salinos, segundo a classificação de Shackelford (1994). Tal solução é obtida na proporção de soluto (NaCl) e solvente (água destilada). É um composto iônico formado pela união de um metal alcalino altamente reativo e um halogênio, também reativo, constituinte principal do sal de cozinha. Essa solução é formada pelo processo de separação de íons do cloreto de sódio em meio aquoso, que nesse meio se tornam hidratados. Desta forma, as ligações iônicas se rompem e os íons ficam livres. As moléculas de água se sentem atraídas aos íons de Na^+ e ao Cl^- , conduzindo eletricidade.

Rodrigues (2011) ao avaliar a condutividade hidráulica de argila compactada e sua interação com fluidos contaminantes utilizou uma saturação da mistura de água destilada com cloreto de sódio na proporção de 3,625 g/L de NaCl. Já Morandini (2009), ao avaliar a compatibilidade em combinação de solos tropicais para uso em barreiras impermeabilizantes, empregou a solução de NaOH na concentração 5g/l, equivalente a concentração eletrolítica de 0,083 Mol/l. A concentração da solução supracitada foi escolhida visando um ambiente suficientemente agressivo ao solo, sendo pouco maior que as normalmente encontradas em chorumes de aterros sanitários urbanos, de mais ou menos 3 g/l.

2.6 Compatibilidade entre fluidos e solos

A percolação de fluidos através dos diferentes tipos de solos pode ocasionar alterações no comportamento geotécnico, como na permeabilidade, na compressibilidade ou na resistência do material. Para a previsão do funcionamento dos sistemas selantes de solo ou mistura solo-resíduo compactada é fundamental o correto entendimento dos mecanismos químicos envolvidos entre solos e fluidos contaminantes.

De acordo com Zanon (2014) o solo é considerado compatível com a solução percolante quando existe uma constância das características físicas e propriedades geotécnicas após o contato com a solução, sendo, portanto, a compatibilidade geralmente verificada por meio de ensaios de caracterização ou de propriedades geotécnicas, como os ensaios de resistência, permeabilidade, adensamento e expansão, realizados antes e após o contato do solo com o fluido percolante, determinando, assim, diretamente a constância ou variação dos parâmetros relacionados às propriedades geotécnicas de interesse.

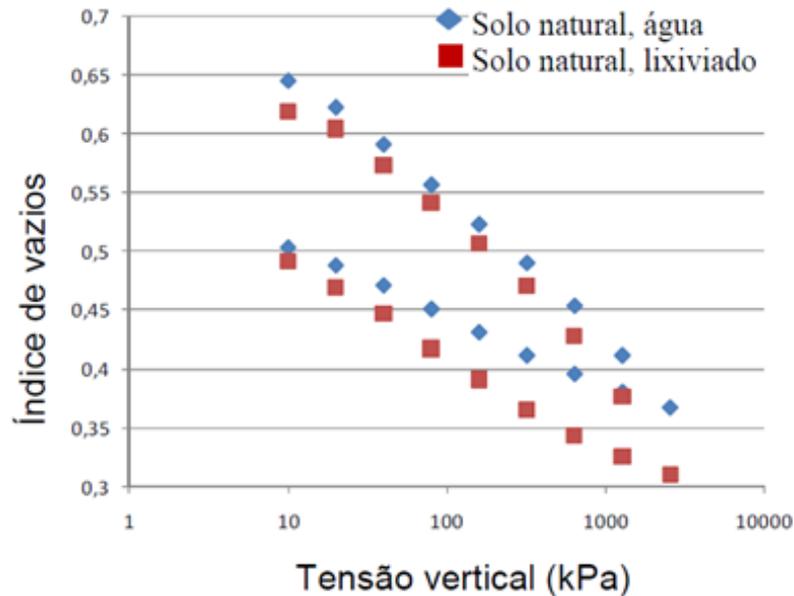
Morandini (2009) afirma que alguns processos entre o solo e fluido, tais como precipitação, sorção, complexação e hidrólise, podem vir a aumentar ou diminuir o poder contaminante dos fluidos percolantes, como também podem vir a interferir nas propriedades geotécnicas do solo, como na resistência e condutividade hidráulica. Shackelford (1994) afirma que os ensaios de limites de consistência, permeabilidade e sedimentação em água e em solução poluente são os usualmente realizados para avaliar as interações entre solo e resíduos na condutividade hidráulica do solo.

Zanon (2014) fez uso de ensaios de permeabilidade à água e ao lixiviado e ensaios de coluna, verificando que a condutividade hidráulica do solo é significativamente influenciada pelo gradiente hidráulico aplicado e pela duração da percolação. Zanon (2014) verificou que a condutividade hidráulica do solo natural à água é da ordem de 1×10^{-6} m/s, mas varia com o gradiente hidráulico aplicado e a duração do ensaio. A percolação de lixiviado do aterro sanitário de Botucatu acarretou a diminuição da condutividade hidráulica do solo natural para $6,0 \times 10^{-9}$ a $7,1 \times 10^{-7}$ m/s, considerando-se ensaios com diferentes gradientes e durações. Mesri e Olson (1971) e Folkes (1982) também evidenciam que a condutividade hidráulica depende da composição química do líquido permeante.

Gurjão (2005) acrescentou a avaliação das curvas granulométricas de seis solos tropicais brasileiros obtidas por sedimentação e por granulômetro a *laser*, de forma a verificar a constância das mesmas após o contato do solo com dois contaminantes, soluções de cloreto de cobre e cloreto de zinco. Praticamente em todos os solos os dois contaminantes aumentaram as quantidades de partículas finas, atuando, assim, como um defloculante. O autor observou também uma redução nos limites de liquidez para todos os solos contaminados com zinco que pode ser um indicativo da destruição dos micro-agregados do solo, confirmado no ensaio de expansão livre. Com relação ao cobre, os solos NG' e LA' apresentaram um aumento no limite de liquidez em quase todas as concentrações.

Soares (2012), de forma a verificar a compatibilidade de solos da Região Metropolitana de São Paulo ao lixiviado de aterro sanitário, fez uso de ensaios de permeabilidade, cisalhamento direto, adensamento e expansão, sendo os ensaios de compatibilidade realizados com corpos-de-prova compactados no ponto ótimo da energia modificada. O ensaio de permeabilidade foi iniciado com percolação de água e, posteriormente, houve a substituição do líquido percolante por lixiviado coletado em aterro sanitário. Houve uma queda de duas ordens de grandeza (100 vezes) na condutividade hidráulica ao lixiviado em relação à água (de 10^{-7} m/s para 10^{-9} m/s). Com relação aos ensaios de adensamento, Soares (2012) observou que na presença de lixiviado, os índices de compressão e de expansão foram, respectivamente, 19% e 28% superiores do que com água, conforme se verifica na Figura 7. Já com relação aos ensaios de cisalhamento direto, o autor verificou que o solo natural apresenta coesão de 10 kPa e ângulo de atrito de 32°. Quando o líquido de inundação foi o lixiviado, houve aumento de 53% na coesão e decréscimo de 15% no ângulo de atrito do solo.

Figura 7 – Ensaio de adensamento com água e lixiviado



Fonte: Soares (2012)

A compatibilidade de três solos de Brasília/DF a lixiviado de aterro controlado por meio de ensaios de coluna com corpos-de-prova compactados foi estudada por Corrêa (2001). Como resultados, o autor observou que os ensaios de coluna mostraram que houve em efeito dispersante do lixiviado nos agregados do solo, de forma que as curvas granulométricas mostraram uma redução das frações grosseiras e aumento das frações finas. Ademais, foi verificado que o valor do índice de plasticidade permaneceu relativamente inalterado. Além disso, nos estudos de Corrêa (2001), a CTC das amostras aumentou após sofrerem infiltração com lixiviado. Já nos ensaios de expansão livre, a expansão dos solos em água foram superiores aos valores apresentados pelas amostras após percolação por lixiviado. Verificou-se também que a permeabilidade diminuiu com a percolação do lixiviado, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Condutividade hidráulica à água e ao lixiviado

Solo	Amostra		
	SOB2	SAM2	SAM3
K_w , condutividade hidráulica à água (cm/s)	1×10^{-5}	3×10^{-6}	5×10^{-5}
K_{ch} , condutividade hidráulica ao lixiviado (cm/s)	2×10^{-7}	2×10^{-7}	3×10^{-7}
K_w/K_{ch}	50	15	166

Fonte: Corrêa (2001)

Desta forma, tem sido verificado que solos em contato com substâncias percolantes diferentes da água sofrem mudanças capazes de alterar as suas propriedades físico-químicas e características estruturais. Podem-se citar diferentes estudos que comprovam que a interação solo e fluidos percolantes proporcionam mudanças de comportamento físicos, químicos e mecânicos dos solos, tais como os de Reginatto e Ferrero (1993), Ferreira (1995), Collares e Vilar (1998), Gurjão (2005), França *et al.* (2007), Morandini (2009) e Francisca & Glatstein (2010).

2.6.1 Reações dos Solos ante diferentes fluidos

Os fluidos contaminantes podem ser distinguidos em dois tipos de soluções, conforme Shackelford (1994): soluções hidrofílicas (miscíveis em água) e soluções hidrofóbicas (não miscíveis em água). Os líquidos não miscíveis se dividem em componentes orgânicos densos e leves e os líquidos miscíveis se dividem em químicos inorgânicos (soluções ácidas, básicas e salinas) e componentes orgânicos hidrofílicos (ácidos orgânicos, bases orgânicas e componentes polares neutros).

Para Shackelford (1994), alterações na condutividade hidráulica podem ser originadas a partir da flocculação das partículas argilosas causadas por percolação de substâncias eletrolíticas, encolhimento da matriz do solo pela presença de solventes orgânicos e dissolução de minerais dos solos por ácidos ou bases. Shackelford (1994) mostra que o acréscimo na concentração catiônica e valência dos cátions, assim como o decréscimo na constante dielétrica e temperatura resultam em flocculação, aumentando a condutividade hidráulica.

Mitchell (1993) afirma que a principal influência da condutividade hidráulica em solos está ligada a perturbações provocadas por estas soluções na dupla camada iônica das partículas argilosas, concluindo que propriedades como concentração eletrolítica, valência e diâmetro dos cátions, adsorção dos ânions, constante dielétrica, temperatura e potencial hidrogeniônico do efluente podem interferir diretamente na contração e expansão da referida dupla camada.

De acordo com Mitchell (1993), hidróxidos (OH)⁻ presentes nas superfícies das argilas podem dissociar-se da água, sendo este fenômeno fortemente influenciado pelo pH. Quanto maior o pH, maior a tendência do H⁺ entrar em solução, dissolvendo o conjunto (SiOH) em (Si + H₂O). Shackelford (1994) realizou ensaios de sedimentação nos quais submeteu amostras de montmorilonita a uma solução de HCl em diferentes concentrações, concluindo uma elevada variação na altura de sedimentação até mesmo quando utilizadas pequenas quantidades de HCL.

A espessura da dupla camada iônica é diretamente proporcional a raiz quadrada da constante dielétrica do fluido adsorvido, sendo fator predominante na floculação quando se trata de um fluido orgânico de baixa constante dielétrica. Budhu *et al.* (1991) concluíram que a condutividade hidráulica é maior com fluido orgânico do que quando percolados com água, e que quanto menor a constante dielétrica, maior a condutividade hidráulica.

2.6.2 Métodos de Avaliação da Compatibilidade

Para avaliar a compatibilidade química entre solos e fluidos contaminantes pode-se dispor de métodos diretos e indiretos de avaliação. Shackelford *et al.* (2000) afirmam que na avaliação direta, os contaminantes são colocados em contato direto com o solo, de forma que as propriedades físicas e mecânicas desejadas são obtidas diretamente. Já na metodologia indireta, as propriedades requeridas são obtidas por correlações ou indicativos. Nesse método de avaliação, soluções químicas são aplicadas ao solo e propriedades índices (tais como índice de plasticidade, expansividade e sedimentação) são medidas em laboratório, para então, indiretamente, obter as propriedades desejadas (MORANDINI, 2009).

Para avaliação da condutividade hidráulica com fluidos contaminantes, Shackelford (1994) recomenda fazer uso de método por percolação direta, uma vez que fornecem resultados mais fidedignos às reais situações vivenciadas em campo. No entanto,

nem sempre é possível compatibilizar o equipamento utilizado na percolação com o fluido percolante, uma vez que os permeâmetros, geralmente compostos de aço e/ou cobres, não são compatíveis com soluções ácidas e básicas, e as membranas de látex, utilizadas nas prensas triaxiais não são compatíveis com algumas soluções orgânicas.

No âmbito da percolação em barreiras impermeabilizantes, a propriedade geotécnica de interesse capital é a condutividade hidráulica. Para avaliação preliminar das propriedades correlatas à condutividade hidráulica de solos e soluções químicas, pode-se usar de métodos indiretos de avaliação, tais como os limites de *Atterberg* modificados, expansão livre e sedimentação (SHACKELFORD, 1994). Bowders e Daniel (1987), Budhu *et al.* (1990), Bouazza *et al.* (2007) e Morandini (2009) fizeram uso de métodos indiretos, como os supracitados, para avaliar a compatibilidade química entre solos e fluidos contaminantes em seus estudos.

Bowders e Daniel (1987) realizaram nos seus estudos ensaios de compatibilidade em solos argilosos, ricos em montmorilonitas e caulinitas percolados com metanol, ácido acético e heptano. Ao avaliarem a compatibilidade utilizando limites de *Atterberg* modificados, os autores detectaram que houve decréscimos na plasticidade e aumento na condutividade hidráulica para soluções orgânicas concentradas (acima de 80%).

Acar e Olivieri (1989) testaram a expansão livre em amostras de montmorilonita e caulinita em meio a soluções orgânicas variadas. A metodologia indireta de avaliação da compatibilidade por meio da expansão livre baseia-se no critério da porosidade eficiente definida por Chapuis (1990), cujo princípio é que a água retida nos poros do solo não contribui para o fluxo total. Uma redução na expansão livre do solo representa, em linhas gerais, uma diminuição na capacidade de retenção de água e um aumento da condutividade hidráulica do solo. Bouazza *et al.* (2007) e Katsumi *et al.* (2008) também fizeram uso de métodos indiretos, limites de *Atterberg* e expansão livre, de diferentes solos montmoriloníticos submetidos a soluções de NaCl e CaCl₂ em diferentes concentrações. Katsumi *et al.* (2008) concluíram que a avaliação da compatibilidade por meio de limites de *Atterberg* ou expansão livre com diferentes soluções se baseia na influência desta no equilíbrio da dupla camada iônica.

Morandini (2009) afirma que a utilização de ensaios de sedimentação, com diferentes soluções, para avaliação da compatibilidade se baseia na influência do fluido nos estados de associação das partículas e, por consequência, no diâmetro aparente dos grãos e no

tempo de sedimentação. Shackelford (1994) ao realizar ensaios de compatibilidade por meio de sedimentação em amostras de três argilas em soluções de HCl, NaOH e NaCl concluiu que líquidos com propriedades flocculadoras aumentam a condutividade hidráulica dos solos, enquanto que líquidos com propriedades deflocculadoras diminuem a condutividade hidráulica dos solos.

2.7 Mecanismo de transporte de contaminantes em meios porosos

De acordo com Zanon (2014), o transporte de poluentes dissolvidos na água é estudado como transporte de massa de um soluto em um meio poroso. Essa massa refere-se a alguma substância tóxica dissolvida (poluente) que se move junto com o fluido. O transporte de massa em meios porosos é controlado por diferentes processos, não dependendo somente do fluxo do fluido no qual esta massa está dissolvida.

Os processos de transporte de contaminantes em meios porosos dependem da natureza do contaminante e do tipo do solo em análise. A composição e as propriedades dos resíduos são fatores significativos no desenvolvimento da interação com o substrato do solo. Sendo possível estimar as propriedades físicas e químicas mais importantes dos contaminantes e conhecer bem as características do solo, pode-se compreender melhor o seu transporte e, assim, dimensionar melhores barreiras naturais ou artificiais para áreas contaminadas ou para futuras áreas de disposição do resíduo.

De acordo com Fetter (1993), a difusão e a advecção são os dois mecanismos básicos que atuam no transporte de contaminantes em um solo. Esses dois mecanismos podem ser subdivididos em subprocessos, de forma que a difusão pode ser química ou molecular e a difusão por turbulência ou dispersão hidrodinâmica. Nobre (2004) cita ainda o mecanismo por atenuação que se pode subdividir em adsorção físico-química, sorção química e bioconvenção. Para Zanon (2014) os principais mecanismos do transporte de um soluto em um meio poroso são a advecção, a difusão, a dispersão mecânica, as reações químicas entre o soluto e os grãos do solo, e reações químicas do próprio soluto.

2.7.1 Advecção

A advecção, também conhecida como convecção, é o processo primário de migração do contaminante através do meio poroso, correspondendo ao processo pelo qual o contaminante é transferido, devido a um movimento preferencial do fluido (LERMAN, 1979). Desta forma, a advecção é o processo pelo qual o soluto é carregado pela água em movimento. O fluido funciona, assim, como um dispersor, diminuindo, por consequência, a concentração do contaminante.

No transporte advectivo os fluidos contaminantes que estão sendo influenciados caminham com a mesma taxa que a velocidade linear média da água no solo. Assim, a frente de contaminação é abrupta e move-se a uma velocidade igual à velocidade linear média (v_a) do fluido percolante, geralmente a água, sem alterar seu pico de concentração.

2.7.2 Dispersão

O transporte por processos dispersivos é caracterizado pelo espriamento do material através do meio. Lerman (1979) afirma que, quando se tem a dispersão de moléculas, átomos ou íons sob a ação de forças de natureza intermolecular em fluidos, tem-se o que se denomina de difusão molecular. Quando se trata da dispersão de um material devido às variações de velocidade do fluido, o processo passa a ser denominando de dispersão mecânica. Ainda segundo Lerman (1979) quando se trata da dispersão de um material por meio turbulento, o processo denomina-se dispersão hidrodinâmica.

Para Freeze e Cherry (1979), a difusão molecular é um fenômeno que ocorre em função da energia termo-cinética das partículas de poluentes dissolvidas no fluido contaminante, no qual íons e moléculas dissolvidas se movem de áreas de maior concentração para as de menor concentração.

Bear (1972) afirma que a dispersão mecânica consiste em outro fenômeno que causa um espalhamento do poluente, devido às variações de velocidade do fluido dentro do meio poroso. A dispersão mecânica é um espalhamento em relação à direção do fluxo médio advectivo, devido à variação de velocidade em magnitude e direção no espaço dos vazios (NOBRE, 2004, ZANON, 2014). Para Freeze e Cherry (1979), a dispersão mecânica é o

processo pelo qual algumas moléculas da água e da substância poluente dissolvida se movem mais rapidamente do que o valor médio de percolação, enquanto outras se movem mais lentamente.

2.8 Materiais compósitos utilizados como *Liners*

Os solos argilosos são tradicionalmente um dos componentes essenciais na execução de barreiras impermeáveis, atuando isoladamente ou em conjunto com outros materiais. Para cumprir essa função é necessário que o material tenha propriedades físico-químicas e hidráulicas adequadas para a finalidade em propósito e que essa propriedade não seja afetada por outros fatores, tais como o ressecamento do solo (formação de trincas de tração) ou a desestruturação, que podem provocar o aumento da condutividade hidráulica.

Se o solo com as características desejáveis para uso como *liners* não é encontrado no local, o solo pode ser melhorado com a adição de bentonitas ou, até mesmo, a partir do uso de materiais alternativos residuais de baixos valores de condutividade, tais como cinzas de carvão oriundas de termelétricas. A seguir serão apresentados alguns materiais que podem ser utilizados em misturas com solo com o objetivo de diminuir a condutividade hidráulica do conjunto.

2.8.1 Bentonita: Utilização como *Liners*

O termo “Bentonita” (*bentonite*) foi atribuído pela primeira vez em 1988, nos Estados Unidos, adotado em função do depósito descoberto em folhelhos argilosos de *Fort Benton, Wyoming* (EUA), onde essa argila foi pela primeira vez caracterizada como um tipo especial de argila (LUKIANCHUKI, 2007).

A bentonita é derivada da alteração do material vítreo emitido pelos vulcões, sendo primariamente composto por argilominerais do grupo da esmectita ou montmorilonitas (2:1). Grim (1968) afirma que os minerais montmoriloníticos possuem parâmetros físico-químicos diagnósticos, tais como uma granulometria composta de materiais finos, grande área ou superfície específica, grande potencial de expansão e baixa condutividade hidráulica, alta capacidade de troca catiônica e tumefação na presença de água. A esmectita tem grande

superfície específica de cerca de $800\text{m}^2/\text{g}$ e um elevado grau de cargas negativas dentro de sua molécula, que facilitam a adsorção de água (AKPE *et al.*, 2018).

Do ponto de vista químico, as bentonitas são consideradas filossilicatos hexagonais de alumínio e magnésio hidratados. De acordo com Gleason *et al.* (1997), as propriedades da bentonita são afetadas pelas interações entre as partículas e o fluido. As bentonitas possuem cátions trocáveis, originados do desbalanceamento de cargas de sua estrutura. As cargas elétricas nas partículas são negativas, atraindo os cátions dissolvidos na água para a superfície da partícula. Os cátions adsorvidos dominantes podem ser sódio ou o cálcio, sendo a bentonita sódica mais expansiva, com maior utilização em aplicações de selagem e impermeabilização. Já a bentonita cálcica é mais estável quimicamente quando exposta a certos compostos químicos (DANIEL e KOERNER, 1995).

Gleason *et al.* (1997) comprovaram que, devido ao alto poder de expansão das bentonitas sódicas, a resistência ao cisalhamento em misturas de areia-bentonita sódica é aproximadamente a metade da resistência de misturas areia-bentonita cálcica.

Karnland *et al.* (2007) estudaram a composição química de bentonitas, demonstrando que apresentam cerca de 80% de montmorilonita, com composição química típica $[\text{Si}_{7,94} \text{Al}_{0,06}] [\text{Al}_{3,10} \text{Ti}_{0,01} \text{Fe}_{0,37} \text{Mg}_{0,49}] \text{O}_{20} (\text{OH})_4 \text{Ca}_{0,05} \text{Mg}_{0,02} \text{P}_{0,01} \text{Na}_{0,46}$. Os valores em colchete simbolizam componentes das placas octaédricas e tetraédricas e os demais cátions disponíveis para trocas.

A grande afinidade da bentonita com a água, associada a sua capacidade de expansão, conferem a este material resistência à passagem de água. Em *liners* as partículas expandidas são forçadas entre si de modo que ocorre preenchimento dos vazios, formando uma barreira contra a passagem do fluxo.

Com relação à bentonita, uma das mais importantes propriedades é a carga negativa superficial de argilas esmectíticas, variável entre $80\text{meq}/100\text{g}$ e $150\text{meq}/100\text{g}$ (SILVA & FERREIRA, 2008). Argilas com alta capacidade de troca catiônica possuem maior retenção de cátions.

De acordo com Kozicki *et al.* (1994), a bentonita funciona melhor para a aplicação em barreiras hidráulicas quando for utilizada uniformemente e em pequenas quantidades, entre 3 a 8%. Em relação às barreiras impermeabilizantes de solo-cimento-bentonita, a resistência é dependente do fator água-cimento e da sua idade/tempo de cura. De

acordo com Ryan & Day (2002) existem especificações para a resistência mínima variando em um intervalo de 100 a 700 kPa, enquanto alguns projetos realizam exigência de 200 kPa aos 28 dias.

Graham *et al.* (1989) realizaram estudos em misturas de areia-bentonita na proporção de 1:1, concluindo que a resistência do material corresponde à resistência da bentonita e que o material expande a baixas tensões de carregamento, sendo a expansão inibida por tensões confinantes acima de 0,8 MPa.

Lukiantchuki (2007) avaliou a utilização de solo misturado com bentonita para o emprego como barreira impermeabilizante, sendo realizados ensaios de condutividade hidráulica e resistência à compressão simples em misturas de solo e bentonita nos teores de 3%, 5% e 7%. Para os teores de 5% e 7% de bentonita, a condutividade hidráulica apresentava valores adequados para a construção de barreiras impermeáveis. Nos ensaios de resistência à compressão simples para as misturas com 5% de bentonita, a autora obteve resultados satisfatórios para o emprego da referida mistura como camadas impermeabilizantes.

De modo a assegurar a baixa condutividade hidráulica de barreiras impermeabilizantes de solo-bentonita, é necessária a presença de sedimentos finos plásticos, no entanto, isso eleva a compressibilidade. A melhor combinação deve conter matriz com índice de vazios preenchidos por solos finos e bentonita (D'APPOLONIA, 1980; AZAMBUJA, 2004).

Khera (1995) avaliou a influência do pH nas bentonitas, verificando que a expansão é fortemente afetada pelo pH, principalmente nas bentonitas sódicas. A maior expansão da argila encontra-se em pH aproximado de 8. A redução do pH provoca uma redução da dupla camada de íons, promovendo um incremento na condutividade hidráulica.

De forma a se obter melhor homogeneização, trabalhabilidade e uma aplicação econômica deste material, torna-se necessário definir uma proporção ótima de bentonita e teor de umidade para cada caso de projeto. Segundo Rowe (2000), a proporção adequada de bentonita para ser misturada com o solo está entre 4 % e 10 %, de modo a se obter valores de condutividade hidráulica entre 10^{-7} a 10^{-9} cm/s.

É recomendável a utilização de bentonita com solo em locais em que o solo natural é inadequado para a construção de barreiras impermeáveis. Segundo Daniel (1993)

uma pequena quantidade de bentonita pode acarretar uma diminuição em várias ordens de grandeza no valor da condutividade hidráulica.

As camadas impermeabilizantes de solo-bentonita podem ocorrer em diversos projetos de geotecnia, conforme citado por Lukiantchuki (2007), tais como em:

- Camada de segurança de aterros: camada localizada abaixo da camada principal (mantas e geocompostos), protegendo solo local contra falhas na camada principal;
- Camada protetora final de aterros: camada protetora de finalização do aterro, minimizando a entrada de água;
- Material de fechamento de células em aterro: os resíduos em aterros controlados devem ser confinados por uma camada protetora de solo impermeável.

2.8.2 Cinzas: Utilização como Liners

O carvão mineral pode ser definido como um combustível fóssil natural formado a partir da decomposição ao longo de milhões de anos da matéria orgânica. Ele é composto basicamente por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio e enxofre, além de minerais, como a pirita, e outros elementos rochosos (arenitos e diamictitos). Rohde *et al.* (2006) afirmam que o carvão é constituído por duas frações intimamente misturadas, sendo uma orgânica e outra mineral. A parte orgânica é a parte combustível do carvão composta de matérias voláteis mais carbono fixo. A fração mineral é composta principalmente por argilas, quartzos, piritas e carbonatos. No processo de combustão do carvão em usinas termelétricas a ação do calor transforma a fração orgânica em voláteis e coque, enquanto a fração inorgânica originam as cinzas.

Rocha *et al.* (1999) afirmam que as propriedades físicas, químicas e mineralógicas das cinzas oriundas da queima do carvão mineral dependem de fatores como a composição do carvão utilizado; o grau de beneficiamento e de moagem do carvão; o tipo, o projeto e a operação da caldeira; e o sistema de extração e manuseio das cinzas. Assim, as cinzas variam consideravelmente em sua composição e em suas propriedades físico-químicas.

Segundo Knudsen (2001) o tamanho das cinzas é função de duas classes de mecanismos formadores, sendo a primeira responsável pela formação de partículas maiores, com diâmetros superiores a 1 μm , geradas pela fragmentação do carvão e a subsequente

coalescência. Já a segunda etapa se inicia com as partículas de vapor (dos sais alcalinos contidos no carvão), associando-se para formar uma nova partícula através de um processo de nucleação.

2.8.2.1 Classificação das cinzas

Na queima do carvão mineral são gerados dois tipos principais de resíduos: cinzas volantes (*fly ash*) e cinzas pesadas (*bottom ash*). Simon e Jeffery (1960) afirmam que algumas partículas de carvão são constituídas essencialmente de material carbonoso, já outras de mistura íntima entre a matéria carbonosa e mineral, apresentando comportamentos diferentes quanto à viscosidade, ponto de fusão e conteúdo químico, resultando, desta forma, em resíduos com aspectos físico-químicos e mineralógicos distintos.

As cinzas leves são constituídas de partículas finas, inorgânicas, esféricas, tipicamente variando em tamanho entre 10 e 100 microns e de cor cinza claro, devido a menor presença de carbono (LEANDRO, 2005). Kiattikomol *et al.* (2001) e Felekoglu e Turkel (2009) afirmam que finura é uma das propriedades importantes que contribuem para a reatividade pozzolânica das cinzas volantes. Essas cinzas são normalmente caracterizadas por granulometria de tamanho de silte, por consistência não plástica e materiais não coesivos. As cinzas volantes são materiais geralmente pozzolânicos por apresentarem potencial de reação com a cal em presença de água, originando compostos hidratados estáveis com propriedades aglomerantes. Conforme a *American Society for Testing and Materials* (ASTM C618), a pozolana é um material sílico-aluminoso que quando finamente dividido e na presença de água reagem com hidróxidos alcalinos para formar compostos com propriedades aglomerantes.

As cinzas volantes apresentam materiais predominantemente amorfos (sílica de vidro), com baixas porcentagens de componentes cristalinos. Kihara (1983) afirma que as cinzas leves são caracterizadas por ser um material complexo e heterogêneo, de forma que as características composicionais e microestruturais são dependentes das condições de combustão e das características do carvão utilizado. Com relação às características químicas, as cinzas volantes são, em geral, constituídas por sílica, alumina e óxido de ferro, além de óxido de cálcio e magnésio. Segundo Vasconcelos (2018), a composição química dessas cinzas volantes é muito variável, com predominância de sílica (em torno de 40%), alumina entre 15% a 40%, ferro entre 5% a 14% e cálcio, cerca de 10%.

De acordo com Goethe (1990) e Farias (2005), as propriedades físicas e a composição química das cinzas pesadas é controlada pela fonte do carvão mineral, recebendo influências do grau de moagem do beneficiamento na pré-queima e do sistema de extração e transporte da cinza após a queima. As cinzas pesadas apresentam granulometria mais grosseira do que as cinzas volantes, com parte dos grãos na fração areia e silte e baixos teores de argila. Essas cinzas são, em geral, não plásticas e não coesivas (LOPES, 2011).

Em termos de composição química, as cinzas pesadas são composta por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), as quais correspondem a cerca de 50% e 30%, respectivamente, na composição em massa do material (FARIAS, 2005). O restante da composição química das cinzas é formado por outros óxidos, traços de outros metais como chumbo e mercúrio e sulfatos.

Santa (2012) afirma que as cinzas pesadas, após processadas em tamanho de partículas adequado, podem se transformar em material pozolânico e serem utilizadas em diversas aplicações, tais como na produção de cimento *Portland*, como agregado em unidades de alvenaria de concreto, como agregados para base e sub-base de estrada, como material de preenchimento estrutural e como material impermeabilizante.

2.8.2.2 Aplicações das cinzas como *Liners*

Estudos nacionais e internacionais verificaram a viabilidade da utilização de cinzas de carvão mineral em diferentes aplicações geotécnicas, tais como na produção de blocos de concreto (HOLMES *et al.*, 2006), como camadas de pavimentos (GHAFORI e BUCHOLC, 1997; RANGANATH, 1998, LEANDRO, 2005, VASCONCELOS, 2018) e como barreiras impermeabilizantes (HAN, 1996; ACHARI, 1995; SHACKELFORD e GLADE, 1994; HEINECK, 2002; ELIAS *et al.*, 2017; ELIAS *et al.*, 2021).

Heineck (2002) ao estudar misturas de cinzas pesadas com 3 e 6% de bentonita verificou que a variação dos parâmetros de compactação não modificou os resultados de condutividade hidráulica para as misturas contendo cinzas de fundo. Além disso, o autor verificou que a adição de bentonita não se mostrou efetiva na redução da condutividade hidráulica das misturas contendo cinza, uma vez que a mesma foi reduzida em somente uma ordem de magnitude (de $1,78 \times 10^{-6}$ m/s para $1,39 \times 10^{-7}$ m/s), mesmo utilizando-se teores muito altos de bentonita (18%).

Ubaldo (2005) propôs avaliar a viabilidade da cinza de fundo e cinza volante oriundas da queima da termelétrica Jorge Lacerda (Capivari de Baixo/SC), como material alternativo para compor um sistema de cobertura para cobrir pilhas de rejeito geradores de acidez. Nesse estudo as cinzas de fundo, que foram caracterizadas como um resíduo Classe II-A, apresentaram características geotécnicas adequadas para a aplicação como material de cobertura, com comportamento hidráulico de material granular, classificada como resíduo. Resultados semelhantes aos obtidos por Ubaldo (2005) foram obtidos por Mendonça (2007) em estudos sobre a difusão de oxigênio em camadas de cobertura, utilizando as cinzas da queima do carvão mineral.

Elias *et al.* (2017) verificaram o uso de cinzas volantes de carvão como material geotécnico impermeabilizante. A caracterização mineralógica englobou ensaios de difração de raios-X e de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras de cinzas volantes e bentonita. O MEV das misturas mostrou interações entre as partículas de cinzas e as de bentonita, que resultaram em aglutinações com uma estrutura mais floculada e, portanto, mais permeável que o esperado. Os resultados dos ensaios de permeabilidade indicaram uma condutividade hidráulica saturada para as cinzas volantes de $8,5 \times 10^{-5}$ cm/s, que é um valor considerado alto para utilização como barreira de fundo em obras ambientais, que deve ser inferior a 10^{-7} cm/s (LUKIANCHUKI, 2007).

Misturas de cinzas volantes e bentonita sódica foram testadas por Elias *et al.* (2017), variando os teores de bentonita em 5, 10 e 20%. Os resultados indicaram uma redução da permeabilidade das misturas de até $1,2 \times 10^{-6}$ cm/s, que não foi suficiente para a aplicação proposta. A explicação é que, possa ter ocorrido uma interação entre a bentonita e a cinzas volantes, que impede a expansão da bentonita.

O processo de expansão da argila pode ser minimizado e até mesmo inibido se a elas foram adicionados componentes chamados de inibidores. Para Cardoso (2005), os inibidores fazem desaparecer a pressão osmótica, uma vez que atuam reduzindo as diferenças entre as concentrações iônicas do fluido e da argila. Para o autor, os inibidores inorgânicos possuem um mecanismo de atuação baseado na fixação de sua fração catiônica na superfície negativa das partículas de argila, liberando equimolarmente o cátion original, denominado cátion intercambiável. Elias (2015) observou-se em seus estudos aglomerações de partícula que podem evidenciar a interações entre a cinza e bentonita, caracterizando-se também possíveis trocas catiônicas. Além disso, tais reações podem ter conduzido mudanças da

concentração de íons entre as camadas das unidades estruturais da montmorilonita, inibindo desse modo inchamento osmótico da bentonita e a consequente redução de permeabilidade.

Elias *et al.* (2021) realizaram ensaios de permeabilidade em cinzas de carvão advindas de termelétrica do estado do Ceará e indicaram que a aplicação das cinzas compostas de forma isolada não era viável tecnicamente como material impermeabilizante, pois não apresentava permeabilidade adequada. O uso de misturas de cinzas e solo, em diferentes proporções, mostrou que a mistura 70% de solo e 30% de cinza, reuniu as características necessárias para aplicação como material para camadas impermeabilizantes de aterros sanitários (*liner*), tendo esta uma condutividade hidráulica na ordem 10^{-7} cm/s. O material apresentou, ainda, resistência ao cisalhamento satisfatória para o emprego como barreira impermeabilizante. Deve-se ressaltar que a adição de 5% de cal resultou em ganhos significativos de resistência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão detalhados todos os materiais utilizados nesta pesquisa e o método aplicado, bem como o programa experimental realizado, de modo a se atingir os objetivos pré-definidos para este estudo.

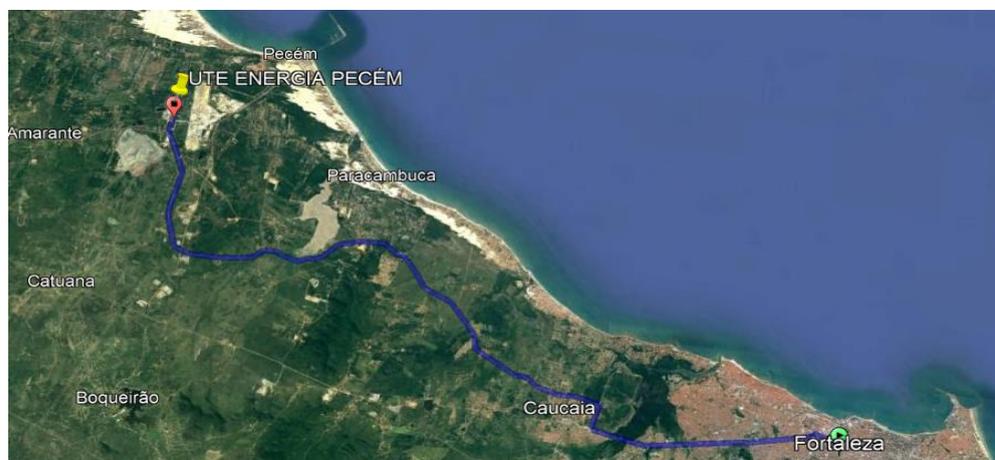
3.1 Materiais

Nesta seção estarão apresentados as características e os procedimentos de coleta dos materiais utilizados neste estudo. Foram utilizadas nesta pesquisa: a) cinzas de carvão mineral advindas de termelétrica do Estado do Ceará; b) argila caulínica obtida de uma jazida na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF); c) argila bentonítica cedida por uma empresa da capital cearense; d) efluente, o chorume, coletado no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC).

3.1.1 Cinzas de Carvão Mineral

As cinzas de carvão mineral foram advindas da Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). Esta termelétrica está situada no município de São Gonçalo do Amarante, disposto na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), a cerca de 50 km da capital cearense no sentido litoral oeste. A Figura 8 ilustra a localização da termelétrica.

Figura 8 – Localização da Usina Termelétrica do Pécem



Fonte: Google Maps (2022)

As cinzas geradas pela Usina Termelétrica Energia Pecém são dispostas em módulos de estocagem, estruturas criadas para armazenar os resíduos. Atualmente há três módulos, o módulo I, com toda a sua capacidade utilizada; o módulo II, que ainda recebe material, estando em operação; e o módulo III, atualmente já construído, porém ainda não está em operação. As cinzas utilizadas neste estudo são originadas do Módulo I, em função da disponibilidade e facilidade de coleta, uma vez que este já foi encerrado.

Em algumas partes do Módulo I, as cinzas estavam dispostas em um estado mais fofo, permitindo a coleta de amostras de forma manual, utilizando-se apenas enxadas, picaretas e pá. Em outras regiões do módulo, no entanto, o material se encontrava em um estado mais denso, necessitando a utilização de mini escavadeira e escavadeira hidráulica. A Figura 9 ilustra o processo de coleta das cinzas de carvão mineral no módulo de armazenagem. Foram obtidas cerca de 100kg de cinzas para realização dos ensaios propostos.

Figura 9 – Coleta das cinzas de carvão mineral

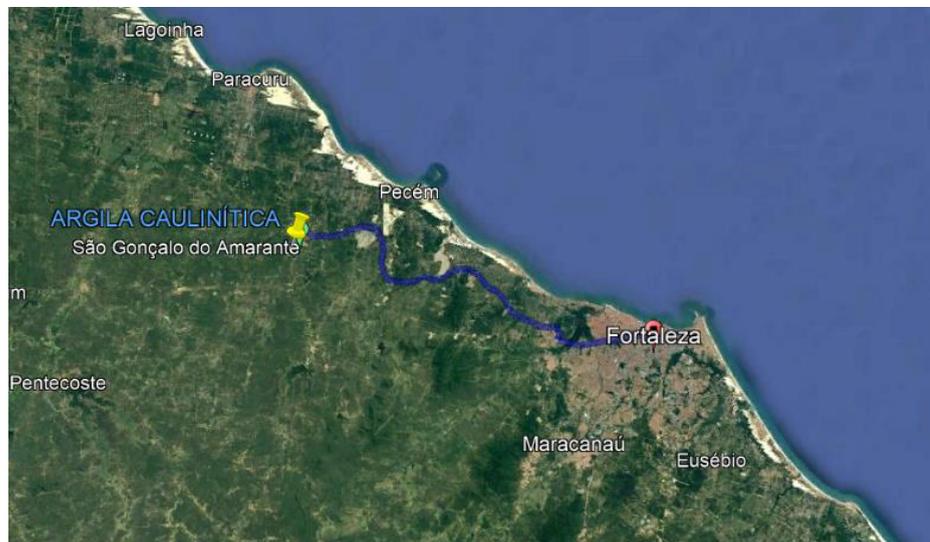


Fonte: Autor (2023)

3.1.2 Argila Caulinítica

A argila caulínítica foi coletada em uma jazida particular no município de São Gonçalo de Amarante, localizado a cerca de 60 km da cidade de Fortaleza/CE. O ponto da jazida foi georreferenciado, obtendo-se como coordenadas UTM (m) 502383 (E) e 9599781 (N). A Figura 10 ilustra a localização da jazida de coleta da argila. Já na Figura 11 está ilustrado o aspecto da jazida que a argila foi obtida. Foram coletados cerca de 100kg de argila caulínítica para realização dos ensaios propostos.

Figura 10 – Localização da jazida de argila caulínítica



Fonte: Google Maps (2022)

Figura 11 – Aspecto visual da jazida de argila caulínítica



Fonte: Autor (2023)

3.1.3 Bentonita

A bentonita utilizada neste estudo trata-se de uma bentonita sódica ativada, proveniente de doação da empresa *Durametal*. O material adquirido pela *Durametal* é oriundo da empresa Bentonita SA, cuja jazida de exploração encontra-se na cidade de Boa Vista, no estado da Paraíba. A Figura 12 ilustra o aspecto visual da bentonita utilizada na pesquisa. Foram obtidos cerca de 100 kg de bentonita para realização dos ensaios.

A Figura 13 ilustra o aspecto visual dos três materiais utilizados nesta pesquisa, após secos em estufa e destorroados em laboratório.

Figura 12 – Bentonita utilizada no estudo



Fonte: Autor (2023)

Figura 13 – Aspecto visual dos materiais em estudo



Fonte: Autor (2023)

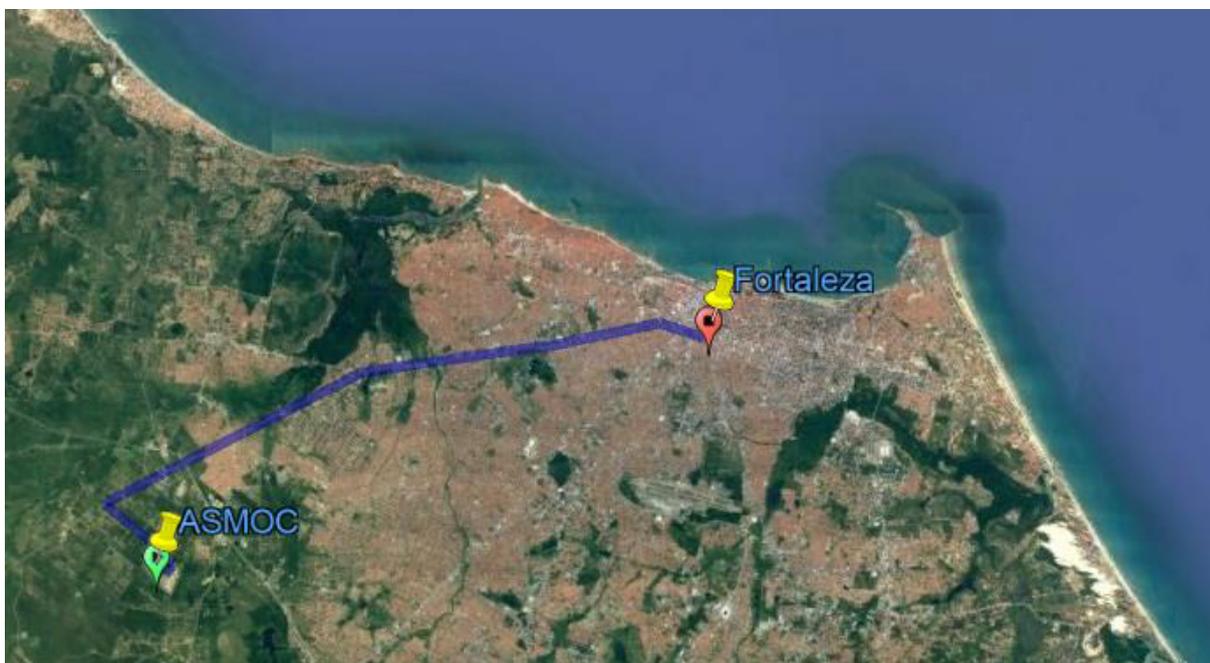
3.1.4 Fluidos Percolantes

Nesta pesquisa foram utilizados 3 (três) fluidos percolantes: água destilada, solução salina e chorume. As soluções químicas empregadas foram escolhidas de forma a representar o espectro de soluções ácidas, básicas, salinas e orgânicas.

A concentração da solução salina foi escolhida visando a simulação de um ambiente suficientemente agressivo ao solo e que, simultaneamente, não inviabilizasse a execução dos ensaios. Foi empregada na concentração 5g/l, equivalente a concentração eletrolítica de 0,083 Mol/l, valor um pouco maior que as normalmente encontradas em chorumes de aterros sanitários urbanos, em torno de 3g/l (MORANDINI, 2009).

O chorume utilizado neste estudo foi obtido no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado a aproximadamente 30 km do centro da capital cearense no sentido litoral oeste, conforme visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Localização de coleta do chorume



Fonte: Google Maps (2022)

Este aterro sanitário possui um sistema de tratamento de chorume constituído por lagoas de estabilização, duas anaeróbias e uma facultativa. A lagoa facultativa

constitui a última do sistema de tratamento, a partir da qual o efluente seria lançado tratado no recurso hídrico. Entretanto, de acordo com Costa Filho (2017), não há mais lançamento em recurso hídrico e sim uma recirculação para o topo das trincheiras.

No aterro sanitário abordado neste estudo, há um sistema de drenagem tanto para o biogás (efluente gasoso) como para o chorume (efluente líquido). Na base deste aterro, para a coleta do chorume, apresentam-se valas drenantes do tipo “espinha de peixe”, com presença de rachão que preenchem as valas. O chorume é direcionado até as lagoas de estabilização por gravidade, onde é realizado o armazenamento e o tratamento dos efluentes. Na Figura 15 está ilustrada a lagoa de estabilização de onde foi feita a amostragem do efluente. Foram coletados 50 l de chorume em dois galões de 25 l cada.

Figura 15 – Lagoa de estabilização de obtenção do chorume



Fonte: Autor (2023)

3.1.5 Misturas

De modo a se atingir os objetivos delineados para a pesquisa, foram propostas duas misturas. A Mistura 1 (M1) é composta de 20% de cinza e 80% de argila caulínica e a Mistura 2 (M2) foi proposta com 80% de cinza e 20% de bentonita, em massa bruta.

A escolha da mistura M1 foi baseada nos estudos de Elias *et al.* (2017) e Elias *et al.* (2021). Nos estudos de Elias *et al.* (2017) os resultados dos ensaios de permeabilidade indicaram uma condutividade hidráulica saturada para as cinzas volantes de $8,5 \times 10^{-5}$ cm/s, que é um valor considerado alto para utilização como barreira de fundo em obras ambientais, que deve ser inferior a 10^{-7} cm/s (LUKIANCHUKI, 2007). Elias *et al.* (2021) observou que, embora a mistura 70% de solo e 30% de cinza de carvão mineral reunisse as características necessárias para aplicação como material para camadas impermeabilizantes de aterros sanitários (*liners*), a condutividade hidráulica obtida foi na ordem 10^{-7} cm/s, que corresponde exatamente ao valor mínimo de permeabilidade permitido para solos potencialmente utilizados como barreiras impermeabilizantes, conforme a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993). Deste modo, optou-se por adotar na mistura M1 um percentual de 20% de cinzas, percentual esse um pouco menor em relação ao estudo de Elias *et al.* (2021).

Na mistura M2, devido à expansibilidade característica de materiais bentoníticos e baseado em estudos de Heineck (2002) optou-se pela utilização de 20%, em massa, de bentonita. No estudo de Heineck (2002), a adição de 18% de bentonita em misturas constituídas com solo arenoso reduziu a condutividade hidráulica de $3,17 \times 10^{-5}$ m/s para $5,15 \times 10^{-10}$ m/s, tornando-se adequadas sob este critério para utilização em *liners*. Nos estudos de Silva (2022), ao comparar-se a permeabilidade de misturas de solo natural com de 15% e 25% de bentonita, obteve-se valores de permeabilidade de $8,31 \times 10^{-8}$ m/s e $9,87 \times 10^{-9}$ m/s, respectivamente. A autora concluiu que ambas as misturas atendem aos valores mínimos de permeabilidade a água para utilização em barreiras impermeabilizantes, sendo que a mistura com 25% de bentonita atenderia melhor a todos os critérios para utilização como barreira impermeável, com base em recomendações de Potter e Yong (1993), Rocca (1993) e Qasim e Chiang (2017). Deste modo, optou-se por adotar nesta pesquisa um teor intermediário, de 20% de bentonita. Contribuem para justificativa desse teor, os estudos de Ye *et al.* (2017) que comentam que a adição de argila bentonítica em valores superiores a 20% pode se tornar inviável financeiramente para a maioria das aplicações em engenharia, a não ser em casos de barreiras de material radioativo, que pode requerer valores entre 10% e 30%.

Salienta-se, também, que o emprego de 80% cinzas na mistura M2 auxilia também a dar uma destinação técnica e ambientalmente adequada para os resíduos advindos de centrais termelétricas. Tais resíduos oriundos da Usina Termelétrica do Pecém, conforme Barros (2015) e Vasconcelos (2018), geram altos custos de estocagem e altos riscos

ambientais. A Tabela 4 resume os materiais e misturas estudados e as simbologias adotadas para esta pesquisa.

Tabela 4 – Simbologia das misturas e materiais individuais

Material/ Mistura	% Cinza	% Caulinita	% Bentonita	Simbologia
Cinza	100			C
Caulinita		100		CAU
Bentonita			100	B
Mistura 1 (M1)	20	80		20C80CAU
Mistura 2 (M2)	80		20	80C20B

Fonte: Autor (2023)

3.2 Programa Experimental

O programa experimental desta pesquisa contemplou diferentes ensaios de caracterização geotécnica, de caracterização físico-química e mineralógica realizados nos materiais em estudo e nas misturas idealizadas para os três fluidos percolantes. O fluxograma disposto na Figura 16 ilustra o programa experimental idealizado.

Foram propostos nos materiais em estudo (cinzas, argila caulínica e argila bentonítica) ensaios de caracterização física, tais como densidade real, granulometria e limites de consistência; ensaio de compactação *Proctor Normal*; ensaios hidráulicos, como os de permeabilidade; ensaio de adensamento uniaxial e ensaio de resistência à compressão simples. Ademais, também foram realizados para os materiais ensaios de caracterização físico-químico e mineralógicos, tais como os ensaios de difração de Raio-X, espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR), análise termogravimétrica, complexo sortivo e a determinação do potencial hidrogênico (pH) e da condutividade elétrica (CE).

Para as duas misturas propostas, com 20% de cinzas + 80% de argila caulínica (20C80CAU) e 80% de cinzas + 20% de bentonita (80C20B) também foram realizados, além dos ensaios de caracterização física e ensaio de compactação *Proctor Normal*, ensaios de permeabilidade para os três fluidos percolantes propostos, com vistas a verificar a influência dos diferentes fluidos em parâmetros hidráulicos das misturas. Ademais, os ensaios de adensamento e de resistência à compressão simples também foram realizados com os fluidos água destilada, solução salina e chorume.

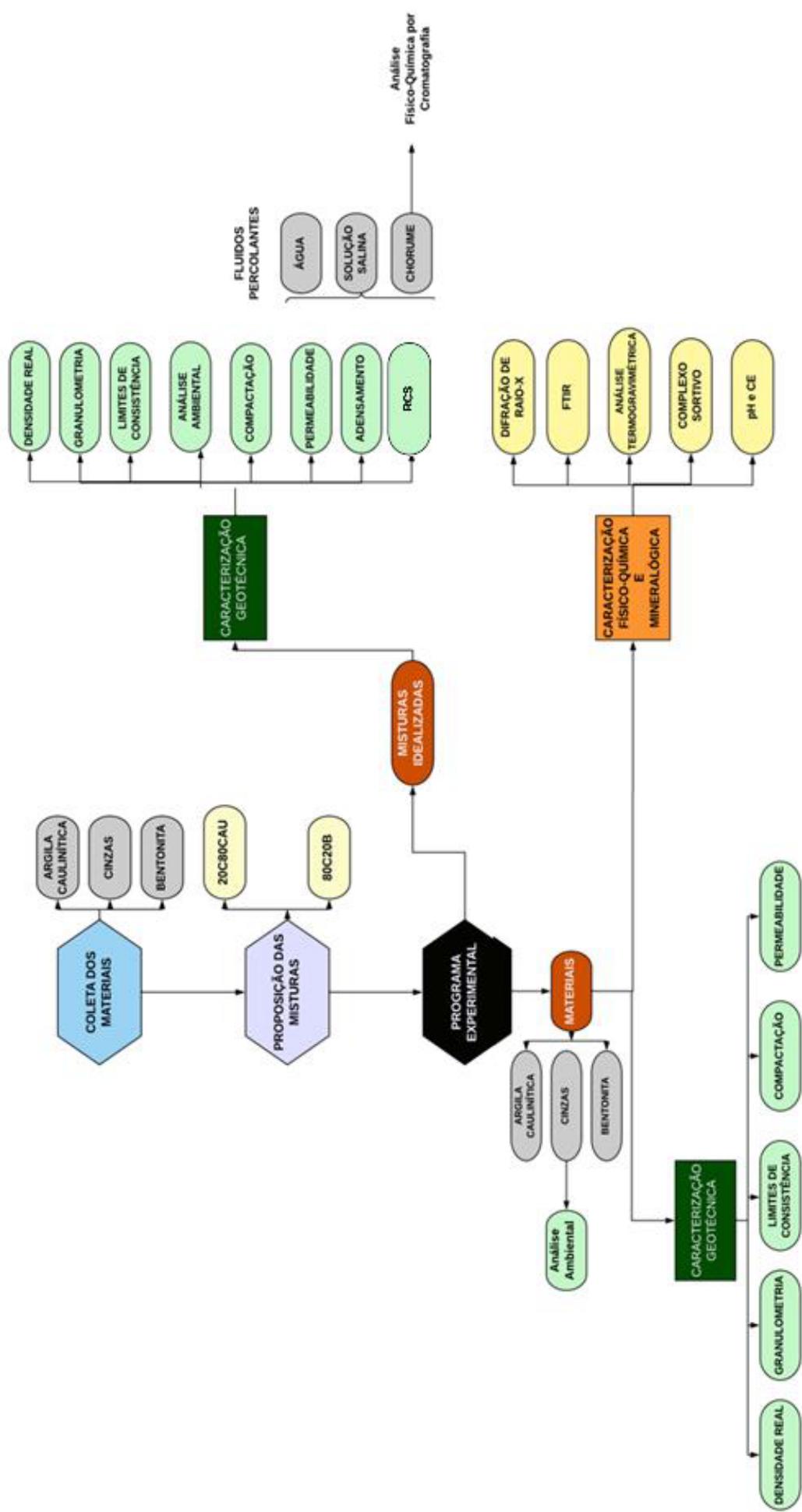


Figura 16 - Fluxograma Experimental da pesquisa

3.3 Métodos e Procedimentos de Ensaios

O processo de caracterização dos materiais e misturas idealizados compreenderam ensaios de caracterização geotécnica (densidade real, granulometria, limites de consistência e compactação) e de comportamento hidromecânico (permeabilidade, adensamento e resistência à compressão simples) e ensaios de caracterização físico-químico e mineralógicos, tais como difração de Raio-X, espectroscopia de absorção no infravermelho, análise termogravimétrica e complexo sortivo. Para as cinzas advindas de termelétrica, por se tratar de um resíduo sólido e para as misturas idealizadas com este resíduo foram realizados ensaios ambientais de lixiviação e solubilização.

Neste estudo, os ensaios necessários para a caracterização da cinza, da caulinita e da bentonita e das misturas idealizadas foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC), no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UFC e no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFC, sendo todos os laboratórios localizados no *Campus* do Pici em Fortaleza/CE.

Na Tabela 5 estão apresentadas todas as normas que balizaram os ensaios realizados geotécnico e físico-químicos e mineralógicos realizados, bem como a quantidade de material necessária para realização de cada ensaio e o pré-tratamento que essas amostras devem ter para realização de cada teste.

Nos tópicos a seguir serão apresentados os detalhes executivos de cada ensaio que compõe o programa experimental deste estudo.

Tabela 5 – Detalhes resumidos dos ensaios realizados

	ENSAIO	MÉTODO	QUANTIDADE DE AMOSTRA	PRÉ-TRATAMENTO
ENSAIOS GEOTÉCNICOS	Densidade Real dos Grãos	DNER 093/1994	10 g	Amostra representativa passada na 10 #
	Granulometria	NBR 7181/2016	1,5 kg	Amostra representativa da porção preparada, por exemplo, solo, seca ao ar, homogeneizada e quarteadada
	Limites de Atterberg (LL e LP)	NBR 6459/2016 e 7180/2016	120 g	Amostra representativa passada na 40 #
	Compactação	NBR 7182/2016	3,0 kg (por ensaio)	Amostra representativa passada na 4 #
	Permeabilidade	NBR 14545/2000	1,0 a 3,0 kg (por ensaio)	Amostra representativa passada na 10 # e compactada
	Adensamento	NBR 16853/2000	200 a 250 g (por corpo-de-prova)	Amostra representativa passada na 10 # e compactada
	Resistência à Compressão Simples	NBR 12770/92	3,0 kg (por ensaio)	Amostra representativa passada na 4 #
ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E MINERALÓGICOS	pH e CE	Embrapa	80 g	Amostra representativa passada na 10 #
	Complexo Sortivo (S, CTC-T)	Embrapa	100 g	Amostra representativa passada na 10 #
	Espectroscopia de absorção no infravermelho	*Não há Norma	5 mg	Amostra representativa passada na 200 #
	Análise Termogravimétrica	*Não há Norma	15 mg (\pm 1 mg)	Amostra representativa passada na 10 #
	Difração de Raios-X	Não há norma	10g	Amostra representativa separada. granulometricamente.

3.3.1 Caracterização Geotécnica

Na etapa de caracterização geotécnica foram realizados os ensaios para identificar as propriedades índices dos materiais (cinza, argila caulínica e bentonita) e das misturas propostas.

3.3.1.1 Caracterização Física

Os ensaios de densidade real, análise granulométrica e limites de *Atterberg* foram realizados nos materiais em estudo (cinzas, bentonita e argila caulínica) e nas misturas propostas.

O ensaio de densidade real foi realizado pelo método do Picnômetro, conforme norma DNER 093/94. Já as análises granulométricas foram realizadas de forma conjunta, ou seja, através do peneiramento e da sedimentação. As análises realizadas foram regidas pelo método preconizado na NBR 7181/2016. A preparação das amostras segue o preconizado na norma NBR 6457/1986.

A bentonita, devido a suas características texturais (trata-se de um coloide), sua elevada expansão e baixa dispersão em água, impossibilitou a realização da análise granulométrica pelo método preconizado pela NBR 7181/2016, sendo a mesma analisada pelo método da pipeta. No procedimento de análises granulométricas pelo método da pipetagem utiliza-se cerca de 60 g de amostra previamente pesada, seca e desagregada. A pipetagem é realizada após a amostra ter sido colocada em suspensão em proveta, utilizando-se agitador manual.

Os limites de consistência ou de *Atterberg* são determinados por meio dos ensaios de determinação do Limite de Liquidez (LL) e do Limite de Plasticidade (LP). Os ensaios de limite de liquidez e de plasticidade foram realizados conforme as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984, além da preparação prévia das amostras segundo a NBR 6457/1986.

3.3.1.2 Ensaio de compactação

As cinzas, a argila caulinítica e a bentonita, bem como as misturas idealizadas foram submetidas ao ensaio de compactação na energia *Proctor Normal*, conforme os procedimentos normativos dispostos na NBR 7182/2016, além da preparação prévia das amostras conforme o estabelecido na NBR 6457/1986. Com a amostra integralmente passante na peneira n° 4 (4,8mm de abertura), realizou-se a compactação com reuso de material, com 3kg de amostra. A compactação foi realizada com uso de um cilindro pequeno (volume de $1000 \pm 10\text{cm}^3$) por impacto de um soquete também pequeno ($2500\text{g} \pm 10\text{g}$), compactando-se o material em 3 camadas com 26 golpes cada.

A partir da realização do ensaio, os dados foram compilados em tabelas e sob a forma de gráficos do *Teor de Umidade x Massa Específica Aparente Seca* e a partir dele obtiveram-se dois parâmetros importantes, indispensáveis para a realização dos demais ensaios de caracterização geotécnica: a umidade ótima e a massa específica seca máxima.

3.3.1.3 Ensaio Ambientais

Os ensaios de lixiviação são utilizados para se determinar o comportamento de um material frente aos fenômenos físico-químicos que ocorrem durante uma percolação, sendo mundialmente utilizados para caracterizar a periculosidade de um resíduo.

Knop (2003) destaca que vários procedimentos de lixiviação têm sido desenvolvidos para ensaiar rejeitos e solos que passaram pela técnica de encapsulamento. Foram realizados nas cinzas e nas misturas propostas os ensaios tradicionais de lixiviação e solubilização, conforme as normas NBR 10005 (2004) e NBR 10006 (2004), respectivamente.

No ensaio de lixiviação foram utilizados 2000 ml de uma solução de ácido acético e água (5,7 ml de ácido acético para 1000 ml de solução) que foi adicionada a 100 g de cada amostra analisada. A solução e a amostra foram transferidas para o frasco de lixiviação e colocadas sob agitação durante 18 ± 2 h à temperatura de 25°C no agitador giratório, conforme se pode observar na Figura 17. Após essa etapa, cada amostra passou por um processo de filtragem para obtenção do extrato lixiviado. Os extratos obtidos de todas as amostras foram posteriormente analisados em um cromatógrafo para obtenção das concentrações dos compostos iônicos.

Figura 17 - Ilustração da realização do ensaio de lixiviação



Fonte: Autor (2023)

No ensaio de solubilização, 250 g de cada amostra foram adicionadas, em um frasco volumétrico, a 1000 mL de água destilada, promovendo-se então uma agitação por 5 min, conforme observado na Figura 18. Posteriormente, o frasco foi coberto com filme de PVC e deixado em repouso por 7 dias, em temperatura de 25°C. Após essa etapa, cada amostra passou por um processo de filtragem para obtenção do extrato solubilizado. Os extratos obtidos foram analisados em um cromatógrafo para obtenção das concentrações dos compostos iônicos.

Figura 18 - Ilustração do ensaio de solubilização



Fonte: Autor (2023)

3.3.1.4 Ensaio de permeabilidade a carga variável

A permeabilidade de um solo é representada pelo coeficiente de permeabilidade K , também chamado de coeficiente de condutividade hidráulica, que consiste em uma constante de proporcionalidade relacionada com a facilidade pela qual o fluxo passa através de um meio poroso. Nos materiais não coesivos, como as areias, nos quais existe uma grande porosidade, o fluxo da água através do meio ocorre mais facilmente do que em materiais finos e coesivos, como as argilas, em que a água percola em velocidade bem mais reduzida.

No presente trabalho, nos materiais (cinzas, argila caulínica e bentonita) e nas misturas propostas (M1 e M2), devido às características de todas as amostras ensaiadas que possuem porcentagem de finos superior a 10% em massa de material passante na peneira nº 200, com coeficientes de permeabilidade inferiores a 10^{-3} cm/s, os ensaios foram realizados conforme o *método B* da NBR 14545/2000, que consiste na determinação do coeficiente de permeabilidade de solos à carga variável.

O ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável fundamenta-se na lei de Darcy, pressupondo a existência de proporcionalidade direta entre as velocidades de percolação e os gradientes hidráulicos. Admite-se, adicionalmente, a continuidade do escoamento, sem variações de volume do solo, durante o ensaio, e a saturação total do corpo de prova.

No ensaio de permeabilidade, tal propriedade foi medida a partir da imposição de um fluxo através de um corpo de prova contido numa célula chamada permeâmetro. Para as amostras, os ensaios foram realizados em permeâmetros de parede rígida. Os corpos de prova foram preparados compactando-se dinamicamente amostras deformadas com dimensões de 15 cm de diâmetro e 13 cm de altura. Os valores dos parâmetros de compactação foram obtidos através dos resultados do Ensaio de *Proctor Normal*.

Após a moldagem, foi colocada uma camada de brita 0 acima do corpo de prova, dentro do permeâmetro, conforme ilustrado na Figura 19. Em seguida a amostra foi submetida a uma saturação, através de um fluxo descendente com um gradiente hidráulico igual a 20, uma vez que esse é o valor máximo obtido a partir do aparato do laboratório. Após, a saturação foi imposta ao corpo-de-prova contido na célula fluxo de percolação, e observou-se a variação do nível de fluido em uma bureta.

Figura 19 – Preparação dos corpos-de-prova para ensaios de permeabilidade



Fonte: Autor (2023)

Para as misturas idealizadas, foram realizados os ensaios de permeabilidade utilizando-se três fluidos percolantes: água destilada, chorume e solução salina, com concentração de 5g/L, com vistas a verificar a influência dos fluidos percolantes nas propriedades hidráulicas dos materiais e misturas analisados. Os ensaios foram conduzidos com carga variável, sendo a condutividade hidráulica calculada utilizando-se a Lei de Darcy.

3.3.1.5 Ensaio de Adensamento Oedométrico

O ensaio de adensamento oedométrico fornece informações relativas às propriedades de adensamento do solo, caracterizadas pela velocidade e magnitude das deformações, quando o mesmo é lateralmente confinado e axialmente carregado e drenado. O ensaio foi realizado com base na norma NBR 16853/2000. A Figura 20 ilustra a prensa utilizada nos ensaios de compressão unidimensional localizada no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará.

Figura 20 – Equipamento de compressão oedométrica



Fonte: Autor (2023)

Nos ensaios de compressão oedométrica foram utilizados corpos cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura (conforme Figura 21), que são as dimensões do anel da célula de adensamento. As compactações dos corpos-de-prova dos materiais foram feitas de forma dinâmica no próprio anel da célula de adensamento, devidamente lubrificado, utilizando a mesma energia de compactação do ensaio Proctor normal. Todas as amostras utilizadas foram compactadas com o teor de umidade ótimo e com a massa específica aparente seca máxima, obtidos no ensaio *Proctor* normal.

No que se referem às misturas, o ensaio de adensamento foi feito após os ensaios de permeabilidade, realizados com três fluidos percolantes. A partir do ensaio de permeabilidade (para cada um dos três fluidos percolantes) a amostra foi talhada de forma a se obter uma amostra indeformada, com dimensões do anel da célula de adensamento.

Figura 21 – Corpos-de-prova ensaios de adensamento

Fonte: Autor (2023)

O ensaio de adensamento consiste, basicamente, em submeter um corpo-de-prova cilíndrico a carregamentos verticais, ao longo do período necessário de tempo, e com uma precisão de 0,5% da carga aplicada. Inicialmente cada CP foi pré-adensado com uma tensão de 5 kPa. Após a aplicação da carga a célula foi inundada e somente após, no mínimo 24 h, o ensaio prosseguiu-se. O carregamento deu-se em estágios de cargas (12, 25, 50, ..., até 400 kPa) e o tempo de espera de cada estágio foi, no máximo, 24 h. Após o fim desses estágios de carregamento, promoveu-se o descarregamento total do corpo-de-prova e o seu desconfinamento da célula de adensamento.

3.3.1.6 Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples (RCS) pode ser interpretado como um caso especial do ensaio de compressão triaxial. O ensaio de compressão triaxial consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo. O corpo-de-prova é submetido a uma tensão de confinamento hidrostática (σ_3) e, após um período de adensamento ou consolidação, aplica-se um acréscimo de carga axial ($\Delta\sigma$) até atingir a ruptura. No ensaio de RCS a tensão confinante é a própria

pressão atmosférica ($\sigma_3 = 0$), de modo que o valor da tensão principal na ruptura (σ_1) é denominado de resistência à compressão simples (VILAR, 2005).

De acordo com Vilar (2005), admite-se que o ensaio de RCS representa uma situação de ruptura não drenada, sendo necessário que solo esteja saturado e que o cisalhamento se processe em um tempo curto, de modo a não ocorrer dissipação da poropressão.

Neste ensaio, os corpos de prova cilíndricos foram obtidos após os ensaios de permeabilidade realizados com três fluidos percolantes, de forma indeformada, com dimensões de 5cm de diâmetro e 12,5 cm de altura. Relatam-se dificuldades para a obtenção desses corpos de prova de forma indeformável, uma vez que os CPs já estavam saturados do ensaio de permeabilidade (Figura 22).

Figura 22 – Corpos-de-prova desagregados obtidos de forma indeformável a partir amostras do ensaio de permeabilidade



Fonte: Autor (2023)

No ensaio de RCS ocorrem leituras de força aplicada ao pistão por meio de um anel dinamométrico e de variação da altura do corpo de prova, através de um transdutor de deslocamento. A velocidade utilizada para o ensaio foi de 1,27 mm/minuto, dentro da

recomendação proposta pela norma NBR 12770/92. A Figura 23 ilustra o ensaio de resistência à compressão simples sendo realizado.

Figura 23 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples (mistura M2)



Fonte: Autor (2023)

A Equação 1 representa o cálculo da deformação do corpo-de-prova.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo ΔH e H_0 a variação da altura do corpo de prova e a altura inicial do corpo de prova, respectivamente.

A tensão é calculada a partir da força aplicada e da área da seção transversal do corpo de prova, conforme Equação 2. Assim, com os valores calculados é possível traçar a curva de tensão *versus* deformação e obter o valor da resistência à compressão simples do corpo de prova ensaiado.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

3.3.2 Caracterização físico-química e mineralógica

A mineralogia, a composição química e o arranjo das partículas estão intrinsicamente ligados às propriedades físicas e químicas dos materiais amostrados. Dessa forma, o conhecimento prévio das características físico-químicas e mineralógicas dos materiais e das misturas idealizados conduz a uma melhor compreensão das características e propriedades desses, inferindo acerca de seus comportamentos geotécnicos e hidráulicos.

Com vistas a se reconhecer as propriedades químicas e mineralógicas dos materiais utilizados nesta pesquisa, realizaram-se ensaios de difração de Raio-X, espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR), análise termogravimétrica e complexo sortivo.

3.3.2.1 Difração de raios-X

A análise de Difração de Raio-X (DRX) foi realizada para todos os materiais em análise. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Raio-X no Departamento da Física da Universidade Federal do Ceará (UFC) utilizando-se o equipamento *Difratômetro para amostras policristalinas*, modelo *XPert Pro MPD*, da marca *Panalytical*. A Figura 24 ilustra o equipamento do ensaio.

A DRX corresponde a uma das principais técnicas para caracterizar microestruturalmente materiais cristalinos, fornecendo informações qualitativas e quantitativas dos minerais constituintes das amostras. Pode-se entender por difração o desvio na propagação de uma onda, quando um obstáculo se interpõe ao seu trajeto original. Assim, o princípio desta técnica consiste na interação dos raios X com os átomos da estrutura cristalina das amostras em análise, a qual pode ou não resultar no fenômeno chamado de difração.

Para análise dos materiais por DRX, foram utilizados aproximadamente 10g de amostra em pó. No procedimento, o comprimento de onda foi mantido constante, variando-se o ângulo de difração. Como resultado se obteve uma representação gráfica do arranjo atômico no retículo cristalino, denominado de difratograma. O conjunto de picos que aparecem no difratograma é característico para cada material.

Figura 24 – Equipamento para o ensaio de DRX



Fonte: <http://goo.gl/EZMF1T>

A intensidade dos picos de difração fornece uma base para a estimativa da concentração dos minerais presentes na amostra. Para Cullity e Stock (1978) há vários fatores relacionados às características físicas e/ou químicas das amostras, como a descontinuidade nos cristais, a presença de substâncias amorfas e a variação na composição química, que podem influenciar na intensidade de difração, afetando a validade da estimativa quantitativa dos minerais.

Após a análise das amostras pelo difratômetro foi gerado um arquivo **.xrdml*. Os dados foram tratados pelo *software X'Pert HighScore Plus*, através do qual analisou-se os difratogramas das amostras, sendo possível identificar a composição mineralógica das mesmas, e obter informações, como porcentagem de cada constituinte, da distância interplanar, entre outras.

3.3.2.2 Espectroscopia de absorção no infravermelho

A espectroscopia infravermelha (FTIR) baseia-se no fato de que a maioria das moléculas absorve luz na região infravermelha do espectro eletromagnético, convertendo-a em vibração molecular. O ensaio de FTIR é utilizado na caracterização e identificação de grupamentos químicos de materiais orgânicos e inorgânicos e permite avaliar diversas características como: identificar materiais desconhecidos e contaminações, determinar o índice de oxidação, avaliar degradação, quantificar alguns compostos e avaliar misturas de materiais.

Foi realizada espectroscopia de absorção no infravermelho nos materiais estudados, por meio de um espectrômetro de absorção no infravermelho por transformada de Fourier FT-IR VERTEX 70V da *Bruker*. Tal equipamento (Figura 25) é equipado com um detector de Alanina Dopada com Sulfato de Triglicina Deuterada (DLaTGS) e um divisor de feixe de silício, de modo a permitir medidas no infravermelho médio e distante.

Figura 25 – Espectrômetro de absorção no infravermelho



Fonte: bruker.com

Geralmente, o espectro infravermelho está dividido em três regiões, sendo: uma de alta frequência, compreendido entre $4000 - 1300 \text{ cm}^{-1}$; média frequência, conhecida por região da “impressão digital”, devido servir de referência às demais, indo de $1300 - 900 \text{ cm}^{-1}$;

e por último, a de baixa frequência, que vai de 900 - 650 cm^{-1} . Uma lâmpada de vapor de mercúrio foi utilizada como fonte de luz na região do infravermelho distante e uma lâmpada global (carbeto de silício) foi usada para as medidas na região do infravermelho médio. Todas as medidas foram realizadas sob vácuo, com 128 varreduras e resolução de 2 cm^{-1} .

As medidas com baixas temperaturas foram realizadas em uma pastilha compactada de cada material ensaiado com brometo de potássio (KBr). Essa pastilha foi obtida a partir do seguinte procedimento: aproximadamente 5 mg da amostra em pó dos materiais foi dissolvida em 100 mg de KBr, em seguida esse composto foi colocado sobre um pastilhador de 13 mm de diâmetro e prensado a 7 toneladas por uma prensa hidráulica. O intervalo de frequência medido em todas as temperaturas foi de 350 até 3360 cm^{-1} .

3.3.2.3 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) consiste na técnica na qual a massa de uma substância é medida em função da temperatura, enquanto a substância a ser amostrada é submetida a uma programação controlada de temperatura. O registro é a curva termogravimétrica (TGA). A análise térmica diferencial (ATD) é a técnica na qual a diferença de temperatura entre a substância e o material referência é medida em função da temperatura, enquanto a substância e o material referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura. O registro é a curva térmica diferencial. A ATD e TGA têm demonstrado que é possível a obtenção de variáveis mineralógicas quantitativas, bem como a caracterização e identificação de minerais. O ensaio de análise termogravimétrica foi realizado no Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos, no Departamento de Química Orgânica da UFC. O Analisador Termogravimétrico utilizado foi do modelo *Mettler Toledo TGA/SDTA 851e*, conforme se visualiza na Figura 26.

Figura 26 – Analisador Termogravimétrico

Fonte: <https://lpt.ufc.br/wp-content/uploads/2021/07/img-1083-300x225.jpg>

O equipamento de análise termogravimétrica é composto de uma termobalança, que permite uma pesagem contínua da amostra em função da temperatura, à medida que ela é aquecida e resfriada. Foram utilizados 15 mg (± 1 mg) de cada material dispostos em cadinhos de platina e analisados de 30 até 1200 °C sob atmosfera de gás N₂, com fluxo de 40 ml min⁻¹. Foi utilizado um cadinho de platina vazio como material termicamente inerte de referência. A quantificação dos minerais foi realizada com base na perda de massa evidenciada pela TGA, com intervalos aferidos pelos eventos térmicos produzidos pela ATD.

3.3.2.4 Complexo Sortivo (S, CTC-T)

O Complexo Sortivo do solo consiste no conjunto de partículas trocadoras de íons no solo. Devido as suas propriedades de carga, o solo é capaz de trocar e fornecer íons para a solução com a qual esteja em contato.

Os cátions consistem em íons carregados positivamente, como o cálcio (Ca²⁺), o magnésio (Mg²⁺), o potássio (K⁺), o sódio (Na⁺), o alumínio (Al³⁺), o ferro (Fe²⁺), o manganês (Mn²⁺) e o cobre (Cu²⁺). Os ânions consistem em íons carregados negativamente, tais como o nitrato (NO³⁻), o fosfato (PO⁴⁻) e o sulfato (SO⁴⁻²⁻).

As frações argilosas apresentam cargas elétricas, podendo resultar em um excesso de cargas positivas ou negativas, conferindo ao solo a capacidade de reter partículas

eletricamente carregadas (íons). Esse fenômeno é denominado de troca ou adsorção iônica, chamado de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) quando favorece a troca de cátions (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , etc.) e aniônica quando favorece a troca de ânions (NO_3^- , PO_4^{4-} , HPO_4^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , etc.). Desta forma, a CTC de um solo representa a quantidade total de cátions trocáveis que o solo pode adsorver.

Para obtenção do Complexo Sortivo utilizou-se como referência o procedimento normativo disponível no Manual de Análises de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Para determinar a CTC do solo é necessário obter a Soma de Bases Trocáveis (S) que é o somatório dos teores das bases cálcio, magnésio, potássio e sódio, em $cmolc\ kg^{-1}$, conforme Equação 3.

$$S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+ \quad (3)$$

Em que:

S: soma de bases trocáveis, em $cmolc.kg^{-1}$.

Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ : teor de cálcio, magnésio, sódio e potássio trocáveis no solo, respectivamente, em $cmolc.kg^{-1}$.

Para se determinar a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) efetiva, que corresponde à CTC determinada ao pH natural do solo, soma-se as quantidades trocáveis dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e Al^{3+} , os quais são normalmente determinados nas análises químicas do solo. A Equação 4 representa a obtenção do $CTC_{efetiva}$ dos materiais.

$$CTC_{efetiva} = S + Al^{3+} \quad (4)$$

Em que:

$CTC_{efetiva}$: Capacidade de Troca de Cátions efetiva, em $cmolc.kg^{-1}$;

S: Soma de Bases Trocáveis, em $cmolc\ kg^{-1}$;

Al^{3+} : Concentração de Alumínio trocável no solo, em $cmolc.kg^{-1}$

O Valor T corresponde, de acordo com o Manual da EMPRAPA, ao total de cargas negativas que o solo pode adsorver, e é determinado pela soma entre o valor S e a

acidez potencial (H^+ e Al^{3+}). Ele corresponde a Capacidade de Troca de Cátions Total (CTC Total), conforme Equação 5.

$$T = S + (H^+ + Al^{3+}) \quad (5)$$

Em que:

T: Capacidade de troca de cátions total, em $cmolc.kg^{-1}$;

S: soma de bases trocáveis, em $cmolc.kg^{-1}$;

($H^+ + Al^{3+}$): acidez potencial do solo, em $cmolc.kg^{-1}$.

3.3.2.5 pH e CE

O pH (Potencial Hidrogênio) é uma escala de medição da acidez e alcalinidade de um material, tendo significativa influência sobre as propriedades e comportamento dos solos, uma vez que afeta desde mecanismos pedogênicos (FRITZ & TARDY, 1976) até cimentações existentes entre partículas (DE BRITO GALVÃO & SHULZE, 1996). O pH pode variar devido a fatores como a temperatura e composição das substâncias e pode influenciar processos diversos como a solubilização, por exemplo.

De acordo com Krauskopf & Bird (1995), o pH pode ser definido como o logaritmo negativo da concentração de íons hidrogênio, de forma que valores menores de pH de uma substância, estão atrelados a maior concentração de íons H^+ e menor concentração de íons OH^- . Define-se que o meio é considerado ácido quando o pH é menor do que 7, neutro quando o pH é igual a 7 e básico quando maior do que 7.

A determinação do pH foi realizada para os materiais em estudo e para as misturas idealizadas, conforme o Manual de Análises de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Neste manual estão descritos todos os materiais e equipamentos utilizados, bem como a preparação de reagentes e soluções.

A medida do pH é feita com a imersão do eletrodo na solução a ser analisada. Ou seja, a medição do potencial hidrogeniônico é realizada por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo-líquido (água, KCl), na proporção 1:2,5. A Figura 27 ilustra o processo de medida do pH das amostras ensaiadas.

Figura 27 – Medição de pH (pHmetro)

Fonte: Autor (2023)

De forma sucinta, o procedimento consistiu em pesar cerca de 10 g de cada material e mistura, adicionando em copo plástico de 100 ml. Em seguida adicionou-se 25 ml de água destilada (ou 25 ml de solução salina de KCl 1 mol.L^{-1} ou CaCl_2 $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$). Logo após, agitou-se a amostra com bastão de vidro por cerca de 60 segundos, seguido de 1 hora. Agitou-se, posteriormente, cada amostra com bastão de vidro, mergulhando, então, os eletrodos na suspensão homogeneizada para a leitura do pH.

A Condutividade elétrica (CE) consiste na capacidade que um material possui em conduzir corrente elétrica. Para mensurar a CE, geralmente são utilizados o sistema de indução eletromagnética e o de contato direto. Neste estudo, assim como na determinação do pH, a Condutividade Elétrica das amostras foi realizada conforme Manual de Análises de Solo da EMBRAPA.

A C.E da solução foi medida de forma direta fazendo-se uso do condutímetro digital de leitura direta. Foi utilizada solução com a mesma quantidade de amostra e água da determinação do pH. Em seguida, mediu-se a temperatura da solução. O condutímetro é ligado com certa antecedência, aferindo-se sua leitura com solução de KCl $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ (condutividade de $1,4 \text{ mS.cm}^{-1}$). Depois se lava a célula de condutividade com água destilada, para, então, inserir a célula na solução a ser ensaiada, realizando-se a leitura direta da condutividade, em mS.cm^{-1} .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do programa experimental proposto. Para uma melhor organização e consequente análise dos resultados, o capítulo estará subdividido em três subtópicos: Estudo da Aplicação dos Materiais e Misturas como *Liner*, Estudo da Compatibilidade entre Misturas e Fluidos Percolantes e Análise Resumo Comparativa da Compatibilidade das Misturas com os Fluidos Percolantes.

No primeiro subtópico serão apresentados todos os resultados da caracterização físico-química, mineralógica, ambiental e geotécnica dos solos e misturas investigados. A análise será conduzida com vistas à aplicação de tais materiais em barreiras impermeabilizantes.

No segundo subtópico abordar-se-ão os resultados inerentes ao estudo da compatibilidade entre as misturas e os três fluidos percolantes investigados nesta pesquisa. Desta forma, serão apresentados os resultados de permeabilidade à carga variável, adensamento oedométrico e resistência à compressão simples para cada mistura considerando como lixiviados água, chorume e solução salina.

No terceiro subtópico serão apresentados de forma resumida discussões acerca da compatibilidade das misturas M1 e M2 com a presença dos fluidos percolantes chorume e solução salina comparativamente à percolação com água destilada, elaborando-se tabelas resumos com as principais influências dos fluidos nas propriedades hidromecânicas das misturas e as principais causas associadas.

4.1 Estudo da Aplicação dos Materiais e Misturas como *Liners*

Neste tópico serão apresentados todos os resultados obtidos a partir da caracterização físico-química e mineralógica (difração de Raio-X, espectroscopia de absorção no infravermelho, análise termogravimétrica e complexo sortivo, pH e condutividade elétrica) e caracterização geotécnica e ambiental (densidade real, granulometria, limites de consistência, compactação, lixiviação, solubilização e permeabilidade à carga variável) para solos e misturas investigados, analisando-os de modo a verificar se atendem aos requisitos mínimos recomendados para utilização em barreiras impermeabilizantes.

4.1.1 Caracterização físico-química e mineralógica

Neste tópico serão apresentados os ensaios de difração de Raios-X, espectroscopia de absorção no infravermelho, análise termogravimétrica e complexo sortivo, pH e condutividade elétrica para os três materiais em estudo: bentonita, cinzas e argila caulínica.

4.1.1.1 Difração de Raios-X

Os ensaios de difração permitiram a identificação da composição mineralógica, tendo sido possível avaliar também a cristalinidade, dimensões das partículas, e grau de substituição isomórfica, sobretudo nas argilas. Tal ensaio foi realizado nos três materiais em estudo: bentonita, cinzas e argila caulínica.

4.1.1.1.1 Difração de Raios-X da Bentonita

A difração da amostra de bentonita sódica mostrou a presença do mineral primário quartzo, o que era de se esperar, uma vez que se trata de um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, além de confirmar a presença de montmorilonita, filossilicato característico das argilas bentoníticas.

A análise do difratograma da bentonita sódica confirma a presença da esmectita (montmorilonita) responsável pela grande capacidade de expansão da bentonita, quando imersa em água. O quartzo é oriundo de sua formação geológica, confirmando a análise de fluorescência que revelou na composição da amostra a presença de silicatos. Portanto, pode-se afirmar que a bentonita é formada por uma mistura de argilomineral montmorilonita e quartzo. A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de difração de Raio-X realizados na Bentonita.

Tabela 6 - Resultados da difração de raios-X na Bentonita

AMOSTRA	NOME DO MINERAL	NOME DO COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA	CÓDIGO DE REFERÊNCIA	PONTUAÇÃO
Bentonita	Quartzo	Óxido de Silício	SiO ₂	01-085-1054	86
	Montmorilonita	Filosilicato	N _x (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .zH ₂ O	00-012-0204	13

Fonte: Autor (2023)

4.1.1.1.2 Difração de Raios-X das Cinzas

O estudo mineralógico de cinzas de carvão mostrou que elas podem apresentar uma mineralogia complexa e variada, variabilidade essa influenciada por aspectos como a composição do carvão, ambientes de armazenamento, calcinação, processos de queima, etc. É observado em cinzas a presença de constituintes vítreos sílico-aluminosos, quartzos, mulita, magnetita e hematita, além de calcita (CaCO₃), gipsita (CaSO₄.2H₂O), anatásio (TiO₂), alumina (Al₂O₃) entre outros.

Nas cinzas estudadas observou-se a predominância de quartzo (SiO₂), calcita e gipsita, característica do linhito (lignito), além da presença de silicatos de alumínio. Isso explica, por exemplo, a alta disponibilidade de cálcio intercambiável nestas cinzas, obtidas na análise do complexo sortivo (Tabela 7).

Ubaldo (2005) e Mendonça (2007), avaliando as cinzas volantes obtidas da queima do carvão na Usina Termoeletrica Jorge Lacerda, encontram como constituintes mineralógicos da cinza os minerais quartzo, caulinita, muscovita, gipsita e pirita. Como citado anteriormente, a composição mineralógica do carvão mineral e conseqüentemente das cinzas, pode variar de região para região e de jazida para jazida. As cinzas analisadas pelos autores são o resíduo da combustão do carvão brasileiro (predominantemente a hulha) o que pode explicar as diferenças mineralógicas encontradas.

Os resultados dos ensaios de difração de Raio-X realizados nas cinzas estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados da difração de raios-X nas Cinzas

AMOSTRA	NOME DO MINERAL	NOME DO COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA	CÓDIGO DE REFERÊNCIA	PONTUAÇÃO
Cinza	Gipsita	Sulfato de Cálcio Hidratado	CaSO ₄ .2H ₂ O	00-036-0432	47
	Calcita	Carbonato de Cálcio	Ca(CO ₃)	01-086-2339	59
	Muscovita		KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	01-075-0948	23
	Quartzo	Óxido de Silício	SiO ₂	01-083-0539	56

Fonte: Autor (2023)

4.1.1.1.3 Difração de Raios-X da Argila Caulinitica

A análise mineralógica do solo caulinitico identificou o quartzo (mineral presente em toda amostra de solo) característico da fração grosseira da amostra, além da caulinita, argilomineral predominante na amostra de solo analisada. Além dessas, foram encontrados minerais secundários como albita e o diopsídio. Essas características explicam, por exemplo, a baixa expansão do solo, a baixa capacidade de troca catiônica, evidenciando a importância do estudo mineralógico.

A partir dessas análises pode-se inferir mais sobre a textura e estrutura dos solos, além de compreender melhor suas propriedades físico-químicas e seu comportamento geotécnico. A Tabela 8 representa o resultado dos ensaios de difração de Raio-X realizados na caulinita.

Tabela 8 – Resultados da difração de raios-X na Caulinita

AMOSTRA	NOME DO MINERAL	NOME DO COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA	CÓDIGO DE REFERÊNCIA	PONTUAÇÃO
Caulinita	Quartzo	Óxido de Silício	SiO ₂	01-085-1054	80
	Caulinita	Filosilicato	N _x (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .zH ₂ O	00-012-0204	15

Fonte: Autor (2023)

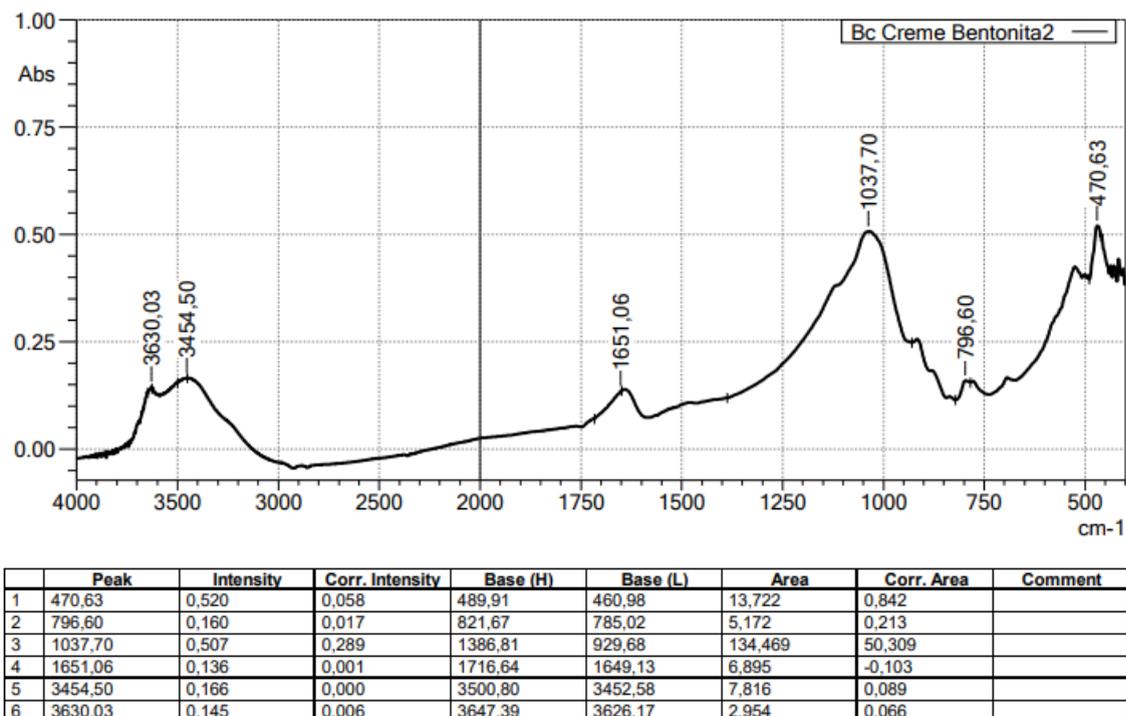
4.1.1.2 FTIR

Neste tópico serão apresentados os resultados da espectroscopia de absorção no infravermelho realizados nos materiais em estudo.

4.1.1.2.1 Espectroscopia de absorção no infravermelho da Bentonita

O espectrômetro de absorção de infravermelho da bentonita está ilustrado na Figura 28. A partir dos resultados de espectroscopia de absorção no infravermelho da bentonita, notou-se que os picos localizados entre 4000 e 3300 cm^{-1} são referentes ao grupo funcional do tipo O-Al-OH (óxido de hidróxido de alumínio). Em torno de 3454 cm^{-1} encontra-se o pico que corresponde a água e uma hidroxila (H-OH)+(O-H); em torno de 1651,06 cm^{-1} encontra-se uma ligação referente a uma hidroxila; em torno de 1037,70 cm^{-1} o grupo funcional encontrado foi, novamente, o óxido de hidróxido de alumínio (O-Al-OH) e bandas de absorção em 470,6 cm^{-1} representativa da ligação Si-O-Si e da presença de ligações Si-O-M dos tetraedros que informam a ocorrência de isomorfismo, conforme observa-se na Figura 28.

Figura 28 – Espectrômetro de absorção de infravermelho da bentonita

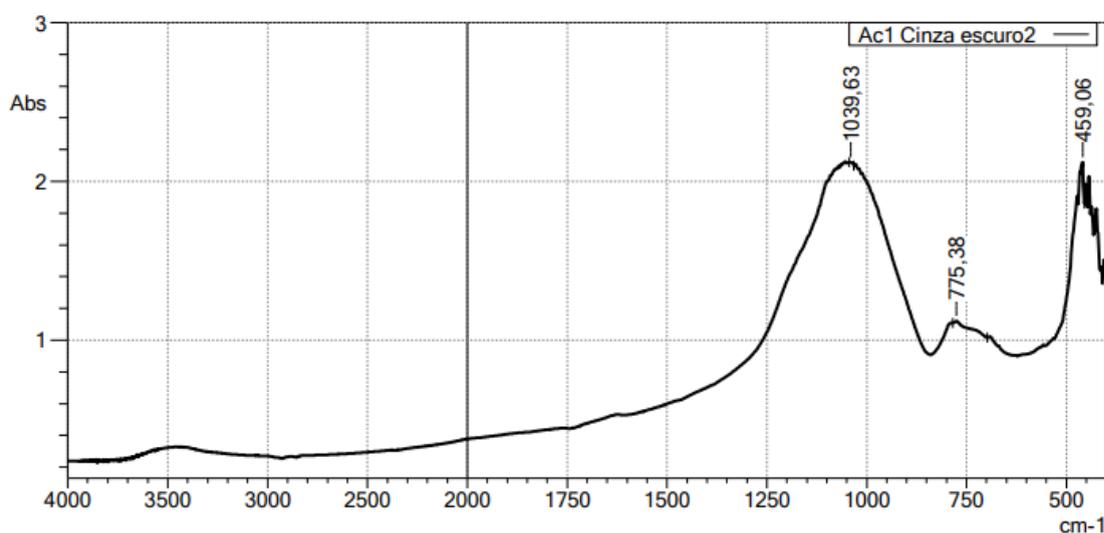


Fonte: Autor (2023)

4.1.1.2 Espectroscopia de absorção no infravermelho da Cinza

Na Figura 29 é possível observar o espectrômetro de absorção de infravermelho da cinza. O espectro IV da cinza apresenta bandas de absorção em $459,06\text{ cm}^{-1}$ representativa da ligação Si-O-Si e da presença de ligações Si-O-M dos tetraedros que informam a ocorrência de isomorfismo. Ocorrem ainda bandas em 775 cm^{-1} do SiO_2 e outra em, aproximadamente, 3500 cm^{-1} associadas a presença de hidroxilas nas cinzas referentes a água de hidratação. O espectro de infravermelho das amostras de cinzas estudadas refere-se provavelmente a material argiloso com grande capacidade de hidratação tanto nos planos das argilas como entre moléculas em pontes de hidrogênio que se relaciona à plasticidade, resistência mecânica, retração linear de secagem, compactação, tixotropia, viscosidade, entre outros.

Figura 29 – Espectrômetro de absorção de infravermelho das cinzas



	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	459,06	2,120	0,105	460,99	455,20	11,713	0,278	
2	775,38	1,120	0,021	785,03	698,23	93,084	0,846	
3	1039,63	2,122	0,009	1043,49	1031,92	24,495	0,080	

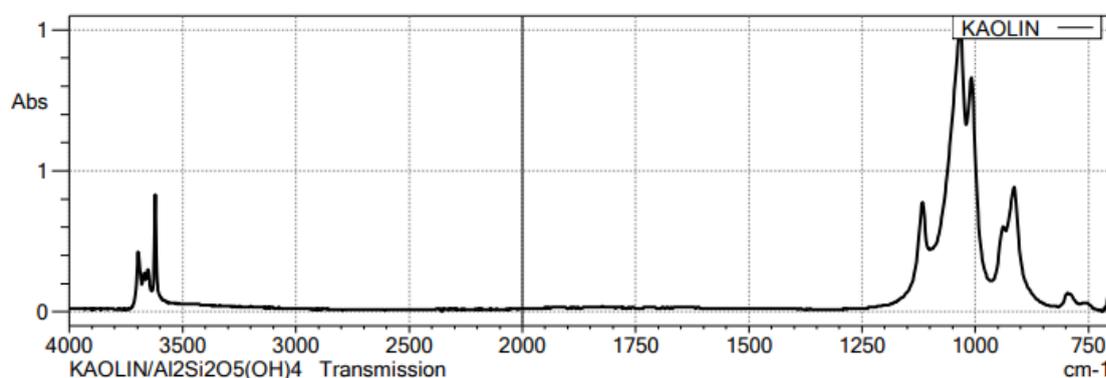
Fonte: Autor (2023)

4.1.1.2.3 Espectroscopia de absorção no infravermelho da Caulinita

A análise do espectro de infravermelho na caulinita (bem como na montmorilonita, em região próxima) denota entre 3695 e 3655 cm^{-1} a ocorrência de absorções referentes ao estiramento das hidroxilas externas (livre da superfície interna, $\text{Al}_2\text{O}-\text{H}$) e em 3626 cm^{-1} das hidroxilas octaédricas internas ($\text{Al}_2\text{O}-\text{H}$) que se encontram voltadas para as cavidades interlamelares. Entre 3000 e 2840 cm^{-1} ocorrem absorções pela matéria orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos) associadas ao estiramento de ligações C-H de alcanos, entre 1679 e 1652 cm^{-1} bandas de deformação δ H-O-H (absorção de água) e entre 1652 e 1635 cm^{-1} , absorções devido à forte interação O-H propicia a existência de sítios ácidos.

A Figura 30 ilustra os resultados de espectrometria de absorção de infravermelho das caulinitas.

Figura 30 – Espectrômetro de absorção de infravermelho da caulinita



	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	466,77	1,669	0,482	491,85	439,77	73,185	11,156	
2	536,21	1,317	0,360	638,44	505,35	121,766	13,064	
3	692,44	0,629	0,130	721,38	661,58	33,131	3,248	
4	912,33	0,951	0,189	929,69	829,39	64,737	3,634	
5	1031,92	1,841	0,238	1089,78	1016,49	115,036	6,321	
6	1637,56	0,389	0,120	1749,44	1579,70	53,240	9,334	
7	3620,39	0,564	0,111	3643,53	3604,96	19,261	1,678	

Fonte: Autor (2023)

4.1.1.3 Análise Termogravimétrica

No presente tópico serão apresentados os resultados de análise termogravimétrica aplicada aos materiais *in natura* utilizados na presente pesquisa: Argila Caulínica, Bentonita e Cinza de Carvão Mineral.

A difração de raios-x é uma técnica utilizada para analisar a estrutura cristalina dos minerais presentes em uma amostra. Por outro lado, a termogravimétrica (TGA) é uma técnica que permite acompanhar a perda de massa de uma amostra como função da temperatura.

Existe uma forte correlação entre as informações obtidas por essas duas técnicas quando aplicadas às amostras. A DRX pode ser usada para identificar os minerais, enquanto a TGA pode ser usada para medir a perda de massa devido à decomposição térmica desses minerais. A combinação desses dois métodos pode fornecer informações complementares sobre a estrutura cristalina dos minerais presentes nas amostras e sobre as condições térmicas necessárias para a sua decomposição.

Vale salientar que se utilizando da técnica de termogravimetria e de posse de seus resultados foi possível identificar reações endotérmicas com perda de massa e variação dimensional, referente à liberação de água livre, desidroxilação dos argilominerais e minerais de argila presentes nos materiais da pesquisa.

É comum que as variações de massa (TGA) em função da temperatura desejada permitam atestar e concluir acerca da estabilidade térmica das amostras, sobre a composição e estabilidade dos compostos intermediários e sobre a composição do resíduo avaliado. Essa inferência foi determinante para a escolha do presente método visto a importância da determinação da presença de água livre e/ou matéria orgânica no material estudado, possibilitando avaliar algum tipo de influência destes no comportamento final das amostras estudadas.

4.1.1.3.1 Análise Termogravimétrica da Bentonita

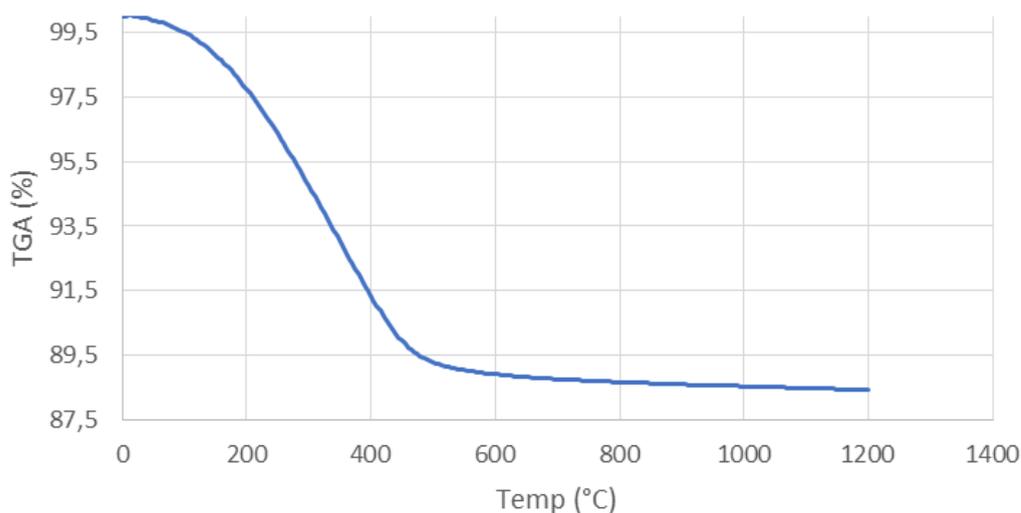
A análise termogravimétrica foi usada para analisar a estabilidade térmica de amostras de bentonita e identificar possíveis mudanças na estrutura cristalina que ocorrem com o aquecimento. Isso é útil para entender como a bentonita reage a diferentes condições térmicas e como essas reações afetam suas propriedades físicas e químicas. A Figura 31 ilustra a curva de TGA da amostra de bentonita utilizada neste estudo.

As perdas de massa até 200°C confirmam a liberação de água livre. Em torno de 95°C, nota-se certa mudança no coeficiente angular das curvas de TGA analisadas de bentonita, associadas com a perda de massa referente à água (H₂O) absorvida dos

argilominerais. Observou-se uma perda de água livre de 2,25%, a maior obtida entre os três materiais em estudo.

As perdas entre 200°C e 400°C são devidas principalmente à combustão de matéria orgânica (CO₂, CO) e sulfetos, sendo elevadas em amostras bentoníticas (-6,41%). Em torno de 450°C inicia-se a perda de massa devido às reações endotérmicas de desidroxilação dos argilominerais estendendo-se até a temperatura em torno de 600°C. Entre 600°C e 900°C ocorreu uma pequena perda de massa de amostra bentonítica (-0,49%) em consequência da descarbonatação.

Figura 31 – Curva TGA da amostra de Bentonita



Fonte: Autor (2023)

A análise termogravimétrica (TGA) da bentonita pode mostrar diferentes fases ou estágios de transformações térmicas que ocorrem durante o aquecimento da amostra. Algumas das fases comuns que podem ser observadas incluem:

- **Desidratação:** A primeira fase é geralmente a desidratação da amostra, durante a qual a bentonita perde água adsorvida. Essa perda de massa pode ser observada a temperaturas abaixo de cerca de 100-150 °C;

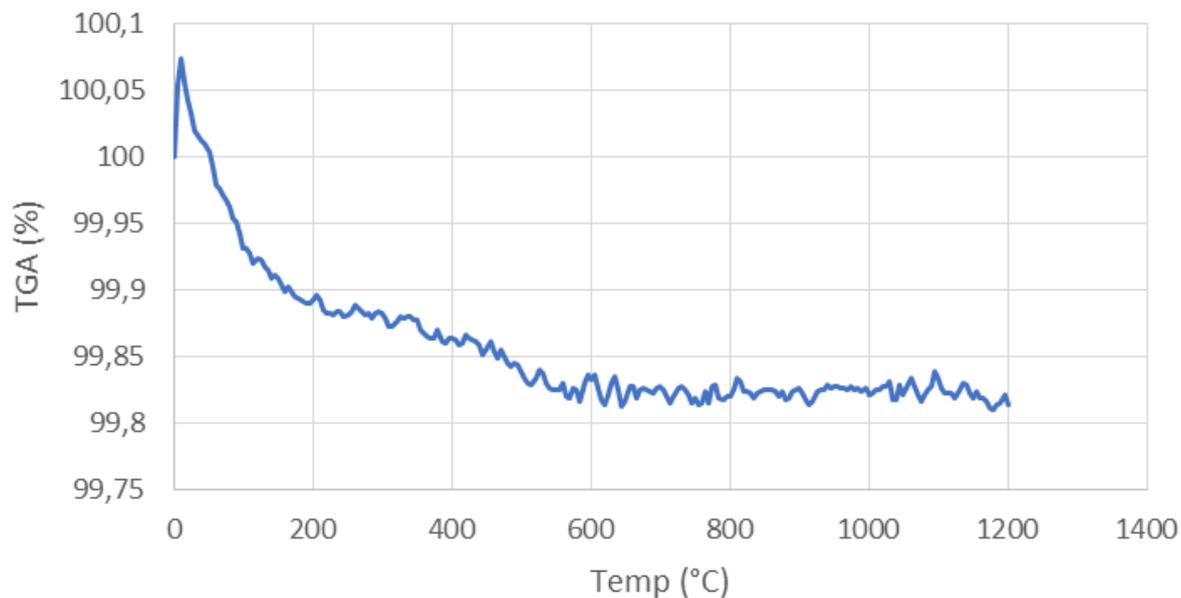
- Desorção de água: A desorção de água ocorre em temperaturas mais elevadas, geralmente entre 150-200 °C, e pode ser observada como uma perda adicional de massa;
- Decomposição térmica: A decomposição térmica de componentes orgânicos pode ocorrer em temperaturas ainda mais elevadas, geralmente acima de cerca de 300-400 °C. Essa decomposição pode ser observada como uma perda adicional de massa.

4.1.1.3.2 Análise Termogravimétrica das Cinzas de Carvão

A análise de TGA das cinzas fornece informações sobre a perda de massa devido à perda de água e outros voláteis, assim como sobre a decomposição térmica dos minerais presentes nas cinzas. Na faixa de temperatura baixa (25-150°C) é esperada a perda de massa devido à evaporação da água, enquanto que na faixa intermediária (150-500°C) é esperada a decomposição térmica de minerais alcalinos, como carbonato de sódio e potássio. Já na faixa de temperatura elevada (500-800°C) é esperada a decomposição térmica de minerais de alumínio, como o feldspato. Além disso, é importante observar que a faixa de temperatura pode variar, dependendo da amostra e do objetivo da análise. A Figura 32 ilustra a curva de TGA da amostra de cinzas de carvão utilizada neste estudo.

Observou-se que a perda de massa total das cinzas foi de -0,21%, observando-se, assim, que a massa inicial permanece praticamente estável para o espectro de temperatura utilizado. Desta forma, a amostra de cinzas utilizada apresenta pequenas perdas de água livre (-0,11%), de material orgânico (-0,04%), de desidroxilação dos argilominerais (-0,04%) e de descarbonatação (-0,02%).

Esses são valores gerais e variações podem ser observadas dependendo do tipo de cinzas utilizadas e condições de análise. Além disso, a perda de massa não é um indicador preciso da quantidade de água ou outros componentes presentes na amostra de cinzas, sendo simplesmente uma medida da variação de massa da amostra com o tempo ou temperatura. Apesar disso, em virtude das baixíssimas perdas observadas, leva-se a inferir que as cinzas de carvão utilizadas apresentam baixas quantidades de água livre e material orgânico em sua composição.

Figura 32 – Curva TGA da amostra de Cinzas

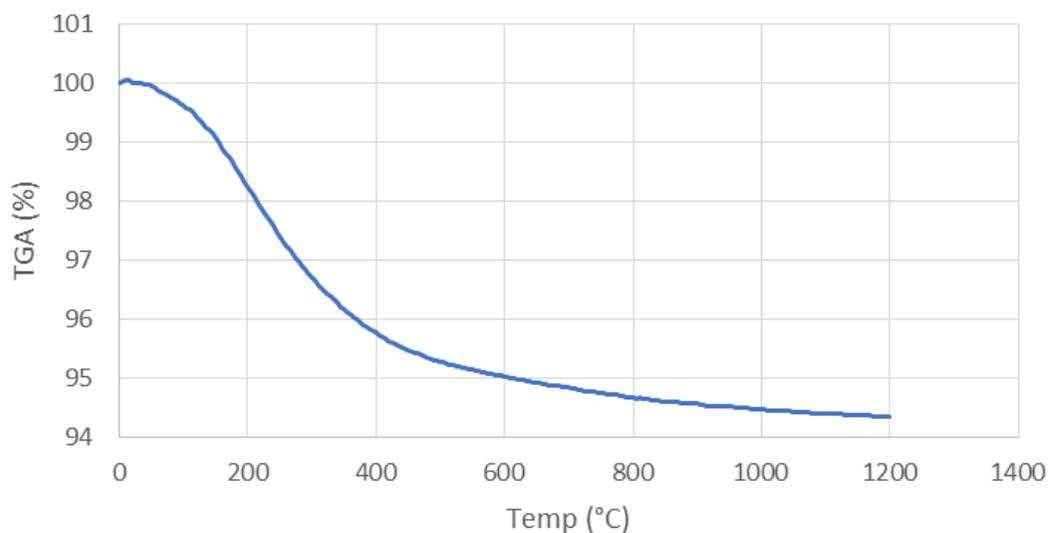
Fonte: Autor (2023)

4.1.1.3.3 Análise Termogravimétrica da Caulinita

A análise termogravimétrica da argila caulinítica, utilizada neste estudo, está ilustrada na Figura 33. Observa-se uma perda de massa de -1,75% até cerca de 200°C devido à desidratação da amostra, durante a qual a caulinita perde água adsorvida e a desorção de água do material. Em torno de 95°C, observa-se mudança no coeficiente angular da curva de TGA da caulinita, referente a perda de massa da água (H₂O) absorvida dos argilominerais.

A combustão de matéria orgânica (CO₂, CO) ocorreu de 200°C e 400°C, representando uma perda de 2,5% de massa para a amostra caulinítica, comprovando a presença de material orgânico na amostra.

Ademais, a perda de massa referente à desidroxilação dos argilominerais e a descarbonatação foram de -1,76% para a amostra de caulinita, de modo que, no total, a perda de massa do material, no espectro de temperatura utilizado, foi de -5,71%, cerca da metade da perda de massa obtida de amostra bentonítica.

Figura 33 – Curva TGA da amostra de Caulinita

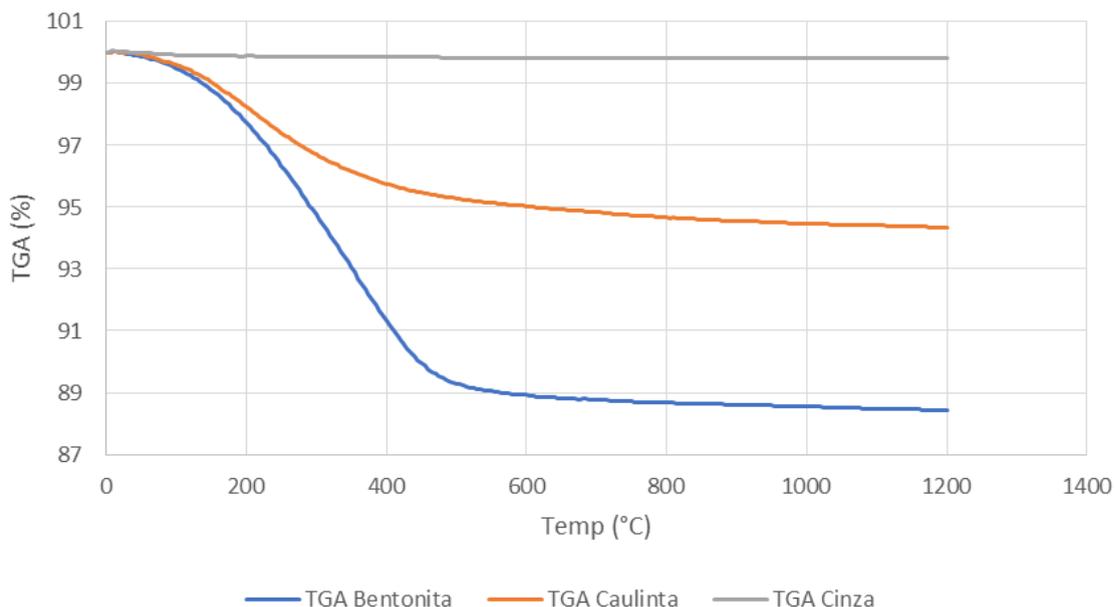
Fonte: Autor (2023)

A Tabela 9 apresenta, de forma resumida, a análise termogravimétrica observada para os três materiais em estudo para cada faixa de temperatura associada. Já na Figura 34 ilustram-se de forma gráfica e comparativa as curvas de TGA obtidas para os três materiais em análise, comprovando-se a perda mais significativa obtida para bentonita em relação aos outros materiais.

Tabela 9 – Perda de massa em porcentagem (%) referente à análise TGA das amostras de Cinza Leve, Caulinita e Bentonita

-	Temperaturas °C				-
	0°C - 200°C	200°C - 400°C	400°C - 600°C	600°C - 1200°C	
AMOSTRAS	H ₂ O LIVRE (%)	Matéria Orgânica / Sulfetos (%)	Desidroxilação dos Argilominerais (%)	Descarbonatação (%)	Perda Total de Massa (%)
Cinza	-0,11	-0,04	-0,04	-0,02	-0,21
Caulinita	-1,75	-2,5	-0,76	-0,7	-5,71
Bentonita	-2,25	-6,41	-2,42	-0,49	-11,57

Fonte: Autor (2023)

Figura 34 – Curvas TGA das amostras de Cinza Leve, Caulinita e Bentonita

Fonte: Autor (2023)

4.1.1.4 Análise Química (pH, CE, Complexo Sortivo, CTC e Matéria Orgânica)

A Tabela 10 apresenta os resultados de pH e condutividade elétrica realizadas para os materiais (cinzas, caulinita e bentonita) e as duas misturas propostas neste estudo. A acidez de um material granular pode ser devido à perda de bases (Na, K, Ca e Mg) pela infiltração de água e que resulta em alterações de pH, tendo influência direta na permeabilidade dos solos, pois modifica a agregação das partículas.

Tabela 10 – Valores de pH e CE para as amostras estudadas

MATERIAL/ MISTURA	pH	CE (dS/m)
Cinza	8,3	8,11
Caulinita	5,5	0,13
Bentonita	9,9	2,76
20C80CAU	6,6	1,47
80C20B	8,3	4,37

Fonte: Autor (2023)

De acordo com a classificação proposta por Bigarella *et al.* (1996), solos com pH menores do que 5,0 são considerados ácidos; já aqueles com $5,5 < \text{pH} < 6,4$ são considerados moderadamente ácidos; $6,5 < \text{pH} < 6,9$ praticamente neutros; $\text{pH} = 7,0$ são considerados neutros; e $\text{pH} > 7,1$ são considerados alcalinos.

Os resultados de pH mostram a alcalinidade característica das cinzas de carvão mineral (pH de 8,3) e da bentonita (pH de 9,9). Morandini (2014) e Elias (2018) também comprovam em seus estudos a alcalidade característica desses materiais. O elevado pH poderá exercer influências diversas no comportamento dos materiais, como na aglomeração de partículas e na solubilização de substâncias poluentes.

A caulinita é considerada moderadamente ácida, com pH de 5,5. Shackelford *et al.* (2000) reforçam que o pH baixo pode promover a dissociação das bordas das argilas, liberando cargas positivas que se deslocam para a face das argilas (carregadas negativamente), reequilibrando as cargas do sistema em um potencial de menor eletronegatividade. Este efeito é observado mais frequentemente e com maior intensidade nos argilominerais de caulinita.

Observa-se que a mistura M2, com 20% de bentonita, apresenta-se com pH de 8,3, com característica alcalina. Morandini (2009) comprova que em suspensão aquosa, as amostras contendo solo laterítico passaram de um pH ácido para um pH alcalino com a adição de aproximadamente 6% de bentonita. Já dentre as amostras contendo solo transicional, uma pequena quantidade de bentonita foi suficiente para torná-lo alcalino.

A condutividade elétrica (CE) é uma medida através da qual se pode avaliar a quantidade de sais presentes no material, de forma que, de acordo com Brandão (2002), quanto maior a quantidade de sais presentes em solução do solo maior o valor de condutividade elétrica obtida. Os sais podem levar a mudanças na estrutura do solo, principalmente devido à presença de sódio. Em termos de CE, observa-se que as cinzas são os materiais que apresentam o valor mais elevado (8,11 dS/m), enquanto que a caulinita apresenta o menor valor de condutividade elétrica, de 0,13 dS/m. A condutividade elétrica da bentonita é de 2,76 dS/m, 66% inferior à CE das cinzas de carvão.

A CE está diretamente ligada à concentração eletrolítica da solução, ou seja, a quantidade de sais presentes no solo que são “lavados” e diluídos no extrato aquoso. Observa-se que a amostra de solo caulítico apresenta baixa CE (0,13dS/m) e, conseqüentemente, credita-se este resultado a uma baixa quantidade de sais presentes. A elevada CE das cinzas (8,11 dS/m) aponta uma grande quantidade de sais contidos nesse material e liberados em solução.

A Tabela 11 apresenta a análise química realizada, em termos de concentração de carbono, nitrogênio e material orgânico para os materiais (cinzas, caulinita e bentonita) e as duas misturas propostas neste estudo.

Tabela 11 – Análise química (teor de C, N e MO) para as amostras em estudo

MATERIAL/ MISTURA	C (g/kg)	N (g/kg)	C/N	MO (g/kg)
Cinza	7,17	0,78	9	12,36
Caulinita	5,53	0,56	10	9,54
Bentonita	7,85	0,83	9	13,53
20C80CAU	5,31	0,54	10	9,15
80C20B	5,93	0,64	9	10,22

Fonte: Autor (2023)

C – Carbono (Teor); N – Nitrogênio (Teor); C/N – Relação Carbono-Nitrogênio; MO – Matéria Orgânica.

Observa-se que o teor de carbono nos materiais em estudo variou entre 5,31 g/kg a 7,85 g/kg. Já com relação ao nitrogênio, ocorreu uma variação de 0,54 g/kg a 0,83 g/kg. Em ambos, a amostra bentonítica apresentou os teores mais elevados. O carbono e o nitrogênio presentes no solo têm grande relação com características de fertilidade do solo, atividades microbiológicas, nutrição de espécies vegetais, entre outras. A relação C/N é um índice que permite avaliar o grau de evolução da matéria orgânica do solo e sua mineralização, além de possibilitar, também, avaliar a atividade microbiológica do solo. Essas características podem influenciar fortemente a textura e estrutura do solo, determinando, por exemplo, a densidade do material.

Elias (2018) afirma que para aplicação como *liner*, a relação C/N não possui tanta importância, mas pode ajudar nas análises da textura e estruturas dos materiais, que influenciará no comportamento geotécnico tanto dos materiais como das misturas.

Quanto à matéria orgânica (MO), os maiores teores obtidos foram para a cinza (1,35%) e para bentonita (1,23%). Valores similares foram encontrados por Mendonça (2007), Elias (2018) e Costa (2019). De acordo com Silva (2017), o teor de matéria orgânica aponta a capacidade de retenção de água no solo, a influência no efeito de agregação e consistência das partículas, a capacidade de tamponamento (estabilização do pH), agente da capacidade de

troca catiônica (CTC), controle da variação de umidade e contribui para o aumento na capacidade de retenção de metais no solo.

Costa (2019) reforça que a característica do argilomineral predominante na composição da bentonita, montmorilonita, contribui para a falsa impressão de um solo com elevado teor de matéria orgânica, visto que ela apresenta elevada área de superfície e alta capacidade de retenção de água nos espaços interlamelares da sua estrutura. Esses teores não são significativos o suficiente para influenciar parâmetros, tais como a superfície específica, a CTC e a condutividade hidráulica, propriedades fortemente influenciadas pela presença de MO.

A Tabela 12 apresenta o complexo sortivo e a capacidade de troca catiônica das amostras estudadas. De acordo com Rowe *et al.* (1995), um solo para ser empregado como barreira selante deve ter uma CTC de no mínimo 10 cmol_c/kg. Os valores de CTC obtidos para as amostras são todas superiores ao limite mínimo estabelecido.

Tabela 12 – Complexo Sortivo e CTC das amostras analisadas.

MATERIAL/ MISTURA	Complexo Sortivo (cmol _c /kg)							CTC
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ²⁺	K ⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Al ³⁺	S	
Cinza	17,6	24,8	0,67	0,05	0	0	43,1	43,1
Caulinita	17,1	16,9	0,54	0,11	3,3	0,4	34,6	37,9
Bentonita	21,0	12,6	3,68	0,05	0	0	37,3	37,3
20C80CAU	17,9	2,6	0,52	0,1	1,65	0	21,1	22,8
80C20B	19,1	4	2,79	0,08	0	0	26	26

Fonte: Autor (2023)

S – Soma de bases; CTC (Capacidade de Troca Catiônica)

A análise do complexo sortivo mostra que o Mg²⁺ é o cátion trocável mais abundante nas amostras de cinzas, enquanto para as demais amostras o cátion trocável mais abundante é o Ca²⁺. Os maiores teores de sódio intercambiável foram presentes na amostra bentonítica, de 3,68 cmol_c/kg, cerca de 5,5 e 6,8 vezes maior ao obtido para as cinzas e para a amostra caulínica, respectivamente. O processo de expansão reduz a condutividade hidráulica, através do fechamento dos poros inter-agregados. Além disso, o processo de expansão gera pressões, que empurram as partículas de argila aproximando umas das outras, modificando a estrutura, que passa a ser mais dispersa, desfazendo-se os agregados de

partículas. Uma vez desagregadas as partículas finas podem movimentar-se livremente de maneira desuniforme nos poros do solo, reduzindo a permeabilidade do mesmo.

Já para a análise da acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), as amostras com caulinita foram as únicas que apresentaram concentrações, no valor de 3,3 cmol_c/kg para a argila caulínica e 1,65 cmol_c/kg para a mistura M1, com 80% de caulinita. Tais resultados estão em consonância com os pH obtidos, sendo essas duas amostras as únicas não alcalinas.

Diversos fatores influenciam a CTC, além da espécie e quantidade de argila e material orgânica, a superfície específica e o pH são outros fatores que muito contribui para os valores de CTC.

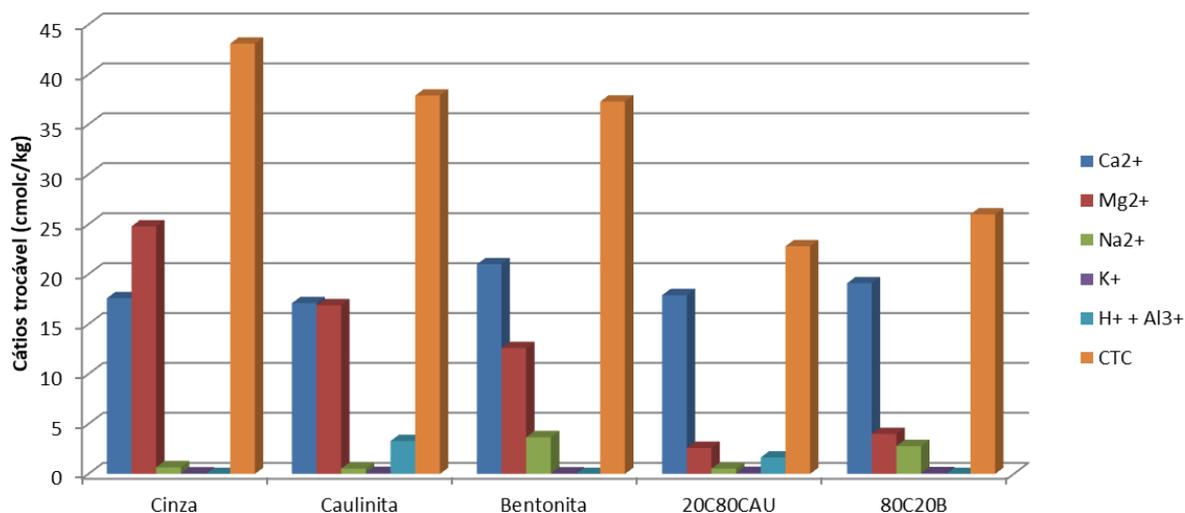
Nos solos observa-se uma tendência de aumento de CTC à medida que aumenta a superfície específica (LOPES e GUILHERME, 2004). Comparando a relação entre a superfície específica e a CTC da cinza, da bentonita e da caulinita, observa-se um contrassenso, pois a princípio, esperavam-se valores de CTC das cinzas e da caulinita inferiores ao da bentonita. Porém, como foi mencionado, existem outros fatores que podem contribuir para a CTC. Ainda segundo Lopes e Guilherme (2004), o pH tem grande contribuição na CTC, sendo maior sua influência, quanto maior for teor de matéria orgânica e a presença de espécies de minerais de argila com a dominância de cargas dependentes do pH.

É possível observar, portanto, que o valor de CTC depende de uma série de condições, devendo-se ressaltar que apesar da similaridade do material com os solos, as particularidades mineralógicas, morfológicas, texturais, estruturais, e sobretudo de formação do material, confere a cinza características singulares, o que torna difícil a comparação do material com o comportamento dos solos sobre esse quesito, e contribuem para as diferenças encontradas.

Entretanto, algumas inferências podem ser feitas a respeito do comportamento da cinza, a partir da CTC. A elevada CTC juntamente com pH pode determinar a formação de aglomerado de partículas (estruturas mais floculadas ou dispersas), que influenciaram na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento das cinzas e das misturas.

A Figura 35 ilustra comparativamente o complexo sortivo e a capacidade de troca catiônica das amostras estudadas.

Figura 35 – Complexo Sortivo e a Capacidade de Troca Catiônica das amostras estudadas.



Fonte: Autor (2023)

4.1.1.5 Análise Química do Chorume

A análise química do chorume, obtido do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), está representada na Tabela 13. Devido às altas concentrações de matéria orgânica e de metais pesados, assim como às grandes variações de suas concentrações, o chorume pode causar sérios problemas ambientais e de saúde pública. A contaminação das águas superficiais e subterrâneas pelos líquidos percolados é um dos maiores problemas ambientais atuais, sendo que o uso destas poderá ficar comprometido por longo tempo (SISINNO e OLIVEIRA, 2000).

Ressalta-se que há grande variação da qualidade do chorume produzido em aterros sanitários, uma vez que é dependente da composição dos resíduos, da profundidade das células do aterro, da idade do lixo, da umidade e da quantidade de oxigênio disponível, entre outros fatores. Todos estes fatores influenciam de forma direta na composição.

Tabela 13 – Análise Química do Chorume

Parâmetros	Concentração (mg/L)
DQO	3870,0
DBO	2300,0
NTK	415,8
NH ₄ ⁺	310,1
Fósforo total	171,2
Ortofosfato	146,0
Clorito	175,2
Cloreto	2543,1
Nitrito	102,9
Clorato	179,9
Brometo	174,3
Nitrato	157,1
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	198,5

Fonte: Autor (2023)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio obtida para o chorume foi de 2300 mg/L. Tal parâmetro está relacionado à quantidade de oxigênio que os processos biológicos precisam para degradar a matéria orgânica. Quando a DBO está elevada significa que existe muita matéria orgânica no efluente. Nos estudos de Francisca e Glatstein (2010) os valores de DBO nos chorumes investigados variaram entre 2.500 a 68.500 mg/L. Para Pohland & Harper (1985) a DBO de chorumes obtidos de aterros variam entre 4 a 57.700 mg/L.

Pela análise química realizada constata-se a presença de elevadas concentrações de cloreto (2543,1 mg/L) no chorume analisado, resultado em consonância com os obtidos por Costa Filho (2017), Santos e Medeiros (2011), Soares (2012), Zanon (2014) e Costa (2019). Conforme Segato e Silva (2000), os resíduos de tubos de PVC, negativos de filmes e raios-X contribuem para um aumento na carga de cloretos encontrados no chorume. De acordo com Pohland & Harper (1985) e Qasim & Chiang (1994) ao analisar os valores e faixas de variação mais frequentes de alguns dos parâmetros de qualidade analisados em aterros sanitários para caracterizar o chorume, é comum concentrações de cloreto de até 5000 mg/L.

4.1.2 Caracterização Ambiental

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados do ensaio de lixiviação realizado para as cinzas advindas de termelétrica e para as misturas investigadas. No ensaio de lixiviação quando um ou mais parâmetros do lixiviado estiverem acima dos valores máximos permitidos (VMP), conforme a NBR 10005/2004, a amostra é classificada como Resíduo Classe I (Perigoso). Observa-se que a amostra de cinzas e as duas misturas estudadas não ultrapassaram o valor máximo permitido dos parâmetros analisados, sendo classificadas como resíduos não perigosos.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de Lixiviação para as cinzas

Concentração (ppm)	Cinzas	M1 (20C80CAU)	M2 80C20B	VMP (ppm)
F ⁻	0,847	0,125	0,237	150
Cl ⁻	29,406	11,254	20,875	-
Br ⁻	<LD	<LD	<LD	-
NO ₂ ⁻	<LD	<LD	<LD	-
NO ₃ ⁻	1,655	<LD	<LD	-
PO ₄ ³⁻	2,887	0,225	0,183	-
SO ₄ ²⁻	1841,362	365,8	445,3	-
Pb ⁺²	0,410	0,410	0,410	1
Zn ⁺²	<LD	<LD	<LD	-
Cr ⁺²	0,161	<LD	<LD	5
Fe	0,017	<LD	<LD	-
Cu ⁺²	0,011	<LD	<LD	-
Ni	0,127	<LD	0,065	-
Cd ⁺²	<LD	<LD	<LD	0,5
Co	<LD	<LD	<LD	-
Mn	0,077	<LD	<LD	-

Fonte: Autor (2023)

Pode-se observar pela Tabela 14 que as concentrações do extrato lixiviado percolado, através das misturas M1 e M2, foram, em geral, menores do que as obtidas para as cinzas puras. A concentração de sulfato, por exemplo, para a mistura M1 (20C80CAU) e M2 (80C20B) foi cerca de 80% e 76% menores do que para as cinzas puras, respectivamente. A

mistura M1 apresenta apenas 20% de resíduo, o que justifica a diminuição significativa de concentração obtida.

Conforme observado por Soares (2012) e Costa (2019), a bentonita tem a propriedade de expandir, quando em contato com a umidade, promovendo uma diminuição da permeabilidade. Desta forma, ao iniciar a percolação pelo corpo de prova, o lixiviado percola por um ambiente menos permeável e menos poroso, apresentando assim, uma barreira filtrante mais eficaz para o lixiviado, justificando, assim, os valores observados para mistura M2.

Amadi & Odedede (2019) reforçam os resultados obtidos ao estudar o efeito da adição de bentonita às camadas de impermeabilizante de aterros sanitários construídas com solos lateríticos, segundo essa pesquisa, quanto maior foi o acréscimo de argila bentonítica, maior foi a quantidade de contaminantes adsorvidos.

Os resultados dos ensaios de solubilização estão dispostos na Tabela 15, constando as concentrações dos parâmetros inorgânicos no extrato solubilizado. No ensaio de solubilização quando um ou mais parâmetros do extrato solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos (VMP), conforme a NBR 10006/2004, a amostra é classificada como Resíduo Classe II-A (não inertes). Foi observado que as amostras de cinzas foram classificadas como materiais não inertes (Classe II-A), por apresentarem concentrações acima do valor máximo permitido de chumbo e cromo. Lopes *et al.* (2015) e Barros (2015) também classificaram as cinzas volantes estudadas como materiais Classe II-A, reforçando que, por ser um resíduo não perigoso, sua utilização é possível.

Com relação às misturas investigadas, observa-se que ambas apresentaram concentração de chumbo maiores do que o valor máximo permitido normativo, sendo classificadas como amostras de Classe II-A. Em relação à cinza pura, observou-se uma diminuição da concentração de chumbo das misturas M1 (20C80CAU) e M2 (80C20B) de 51% e 42%, respectivamente. Com relação à concentração de cromo, as misturas apresentaram concentrações menores em relação às da cinza pura, enquadrando-se dentro do valor máximo permitido por norma.

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de Solubilização para as cinzas

Concentração (ppm)	Cinzas	M1 (20C80CAU)	M2 80C20B	VMP
F ⁻	<LD	<LD	<LD	1,5
Cl ⁻	9,435	2,325	4,568	250
Br ⁻	<LD	<LD	<LD	-
NO ₃ ⁻	<LD	<LD	<LD	10
PO ₄ ³⁻	<LD	<LD	<LD	-
SO ₄ ²⁻	76,2565	22,547	28,547	250
Pb ⁺²	0,29	0,142	0,167	0,01
Zn ⁺²	<LD	<LD	<LD	-
Cr ⁺²	0,065	0,027	0,032	0,05
Fe	<LD	<LD	<LD	0,3
Cu ⁺²	0,123	<LD	<LD	2,0
Ni	0,156	<LD	<LD	-
Cd ⁺²	<LD	<LD	<LD	0,005
Co	<LD	<LD	<LD	-
Mn	0,081	<LD	<LD	0,1

Fonte: Autor (2023)

4.1.3 Caracterização Geotécnica

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios geotécnicos obtidos a partir dos ensaios de caracterização física (densidade real, granulometria e limites de Atteberg) e hidromecânicos (compactação *Proctor* e permeabilidade a carga variável).

4.1.3.1 Densidade Real

A densidade real dos grãos foi obtida para os três materiais puros, bem como para as misturas propostas (20C80CAU e 80C20B). Na Tabela 16 estão os resultados desta análise.

Tabela 16 – Resultados de Densidade Real

MATERIAL/ MISTURA	Gs
Cinza	2,45
Caulinita	2,69
Bentonita	2,72
20C80CAU	2,65
80C20B	2,56

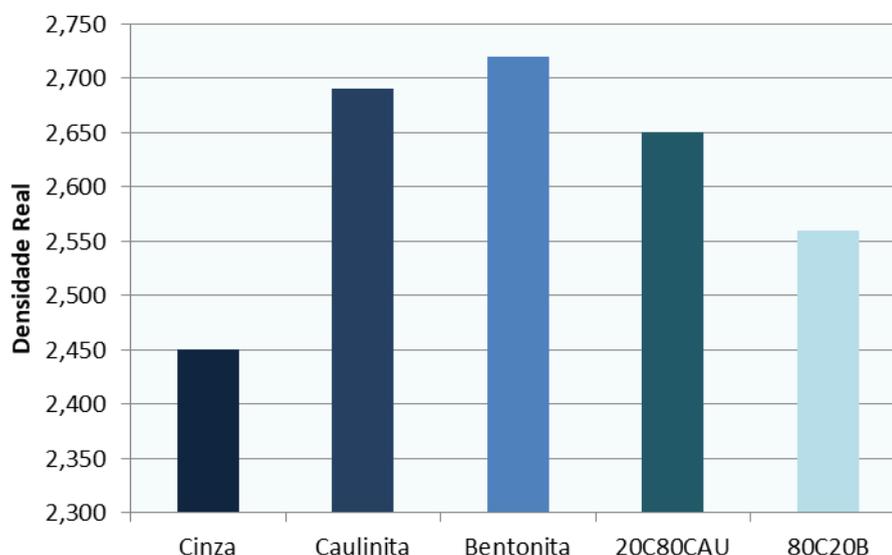
Fonte: Autor (2023)

Elias (2015) e Vasconcelos (2018) estudaram cinzas de carvão mineral advindas da mesma termelétrica deste estudo, localizada no estado do Ceará. Tais autores obtiveram valores de densidade real de 2,46 e 2,44, respectivamente. O valor obtido para este estudo encontra-se em consonância com os observados por esses autores. Nardi (1975), Rohde *et al.* (2006) e Barros (2015) encontraram valores de densidade real para as cinzas um pouco menores, variando entre 2,15 e 2,32. O tipo de cinzas, seu processo de produção e o tipo de carvão de origem podem justificar essas diferenças observadas.

A densidade real para a bentonita foi de 2,72, valor em consonância com os encontrados na literatura. Lukiantchuki (2007) e Silva (2015) encontraram, por exemplo, em seus estudos, valores de densidade real para as bentonitas de 2,82 e 2,83, respectivamente, em torno de 4% maiores do que os obtidos nesta pesquisa.

Para as misturas os valores variaram de 2,56 para a mistura 80C20B a 2,65 para a mistura 20C80CAU. Tais valores foram esperados, uma vez que a densidade das partículas sólidas da bentonita são maiores do que a do solo caulínítico natural e a densidade do solo caulínítico são maiores do que a da cinza pura.

A Figura 36 ilustra comparativamente as densidades reais obtidas para os materiais e misturas.

Figura 36 – Análise Gráfica Densidade Real

Fonte: Autor (2023)

4.1.3.2 Granulometria

Nesta fase do programa experimental, com o intuito de realizar a caracterização física dos materiais, além da densidade real dos grãos, apresentada no tópico anterior, foi realizada também a verificação dos percentuais de materiais pertencentes às diversas faixas granulométricas, para cada um dos 3 tipos de material, assim como para as duas misturas. Os percentuais de cada fração granulométrica nas amostras em estudo estão dispostos na Tabela 17.

Tabela 17 – Percentuais de Composição dos Materiais

Material/ Mistura	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
Cinza	0	0	0	4	95	1
Caulinita	0	0	0	1	40	59
Bentonita	0	0	1	1	24	74
20C80CAU	0	0	1	4	51	45
80C20B	0	0	1	6	78	16

Fonte: Autor (2023)

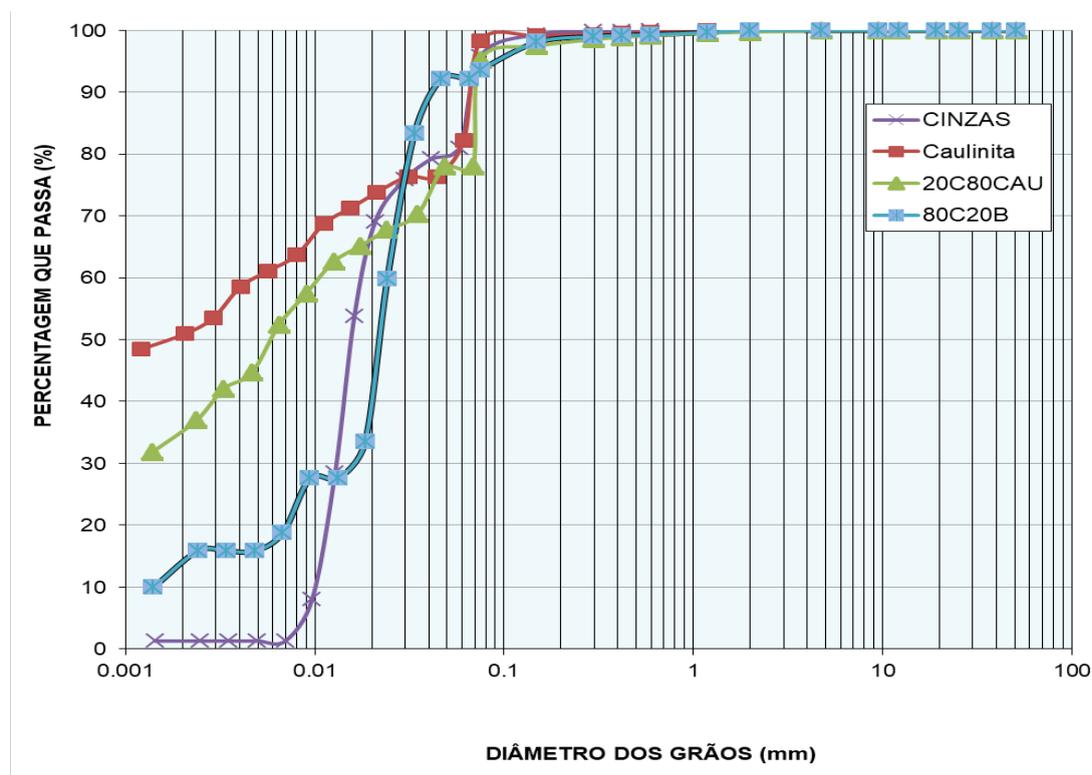
Analisando-se a Tabela 17, observa-se que as cinzas são materiais essencialmente finos, apresentando 95% de siltes e 1% de argila. Mendonça (2007) ao estudar cinzas volantes advindas de termelétrica do sul do Brasil, encontrou 67% de presença de siltes e 2% de finos argilosos. Já Vasconcelos (2018) obteve percentuais de finos siltosos de 56,8% e 12% de argila em cinzas estudadas advindas do Ceará. Todos os autores confirmaram a característica fina das cinzas volantes, com divergência entre os valores obtidos justificáveis pela variação das propriedades desses materiais com o tipo de carvão e o processo de obtenção das cinzas. A análise granulométrica do solo caulínico e da bentonita mostrou que os materiais são predominantemente constituídos de partículas com dimensões inferiores a 0,0075mm, características de solos finos.

As análises granulométricas das misturas apresentaram-se como o esperado, com granulometrias intermediárias em relação aos materiais puros. A mistura 20C80CAU apresentou uma redução do percentual de argila de 23,7% em relação ao solo caulínico, o que se justifica em virtude do baixo percentual de argila das cinzas. Já a mistura 80C20B apresentou um acréscimo do percentual de argila em relação às cinzas puras, em virtude da adição de bentonita.

O gráfico disposto na Figura 37 possibilita a visualização conjunta das curvas granulométricas de todos os materiais e misturas idealizadas, possibilitando a comparação mais efetiva entre esses resultados.

A bentonita, devido a suas características texturais (trata-se de um coloide), sua elevada expansão e baixa dispersão em água, somada a outras propriedades desse solo, impossibilitou a realização da análise granulométrica pelo método preconizado pela NBR 7181/2016, sendo a mesma analisada pelo método da pipeta (pipetagem). Por este método o resultado da análise são apenas as porcentagens das frações de solo, motivo pelo qual não há a representação de uma curva granulométrica na Figura 37.

Figura 37 – Curvas Granulométricas dos Materiais e Misturas



Fonte: Autor (2023)

4.1.3.3 Limites de Consistência

Na Tabela 18 estão dispostos os dados de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) dos materiais e misturas idealizadas. Os dados da bentonita foram obtidos pela empresa *Durametal*.

Com relação aos limites de *Atterberg*, as cinzas caracterizadas foram apresentadas como não plástico (NP), dada a característica granular do material as amostras não apresentaram características plásticas para a execução do ensaio. A não plasticidade das cinzas está em consonância com diversos outros estudos, como os de Nardi (1975), Leandro (2005), Farias (2005), Lopes (2011) e Barros (2015).

Tabela 18 – Resultados de Limites de Consistência

MATERIAL/ MISTURA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Cinza	NL	NP	-
Caulinita	63	26	37
Bentonita	604,7	139,1	465,6
20C80CAU	32	15	17
80C20B	48	20	27

Fonte: Autor (2023)

Lukiantchuki (2007) encontrou em seus estudos limite de liquidez para bentonitas de 454%, com índice de plasticidade de 401%. Já Silva (2015) obteve para a bentonita limite de liquidez de 458%, com IP de 403%. Mesri e Olson (1971) estudaram o comportamento de argilas com diferentes composições mineralógicas. Os autores encontraram IP para argilas montmoriloníticas de 500%.

Para Lemos (2006) quanto maior o limite de liquidez e plasticidade, melhor é a qualidade da bentonita para barreiras impermeabilizantes, constatando que uma bentonita sódica de média qualidade possui limite de liquidez entre 300 e 500% enquanto que a de alta qualidade entre 500 e 700%.

Na mistura 80C20B observou-se aumento do limite de liquidez e índice de plasticidade com o acréscimo de 20% de bentonita em cinzas. Tal comportamento era esperado em virtude da adição desse mineral, que se caracteriza por ser uma argila de alta plasticidade. Comportamento semelhante foi observado na mistura 20C80CAU. O solo caulínico estudado apresenta IP de 37%, classificado como altamente plástico, de forma que a adição de cinzas não plásticas nesse material promoveu uma redução de 54% da plasticidade.

De posse dos resultados dos ensaios de limites de Atterberg, associados às análises granulométricas realizadas, pode-se realizar a classificação dos materiais e misturas segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). A classificação nesse sistema leva em conta a curva granulométrica, o limite de liquidez e o índice de plasticidade. Tal sistema é utilizado com frequência na engenharia geotécnica, auxiliando na proposição de aplicação dos materiais. A classificação está apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Classificação SUCS dos materiais e misturas

Material/ Mistura	LL (%)	LP (%)	Granulometria	Símbolo	Descrição
Cinza	NL	NP	Material Fino	ML	silte de baixa compressibilidade
Caulinita	63	26	Material Fino	CH	argila de alta compressibilidade
Bentonita	604,7	139,1	Material Fino	CH	argila de alta compressibilidade
20C80CAU	32	15	Material Fino	CL	argila de baixa compressibilidade
80C20B	48	20	Material Fino	CL	argila de baixa compressibilidade

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que todos os solos e misturas analisados são constituídos de material fino, sendo a caulinita e a bentonita classificados como argila de alta compressibilidade, enquanto as duas misturas ensaiadas, em virtude dos menores limites de liquidez, classificaram-se como argila de baixa compressibilidade. Heineck (2002) verificou que as bentonitas estudadas apresentavam 50,42% de argila, 46,17% de silte e 3,41% de areia fina (0,074 a 0,42mm), podendo ser classificada geotecnicamente como uma argila inorgânica de alta compressibilidade (CH), segundo a classificação unificada, mesma classificação obtida neste trabalho. Elias (2015) também chegou a mesma classificação para a bentonita estudada.

As cinzas em estudo classificaram-se como siltes de baixa compressibilidade, haja vista o alto teor de siltes em sua constituição e a não plasticidade do material. Vasconcelos (2018) e Elias (2015) também obtiveram a mesma classificação para as cinzas analisadas.

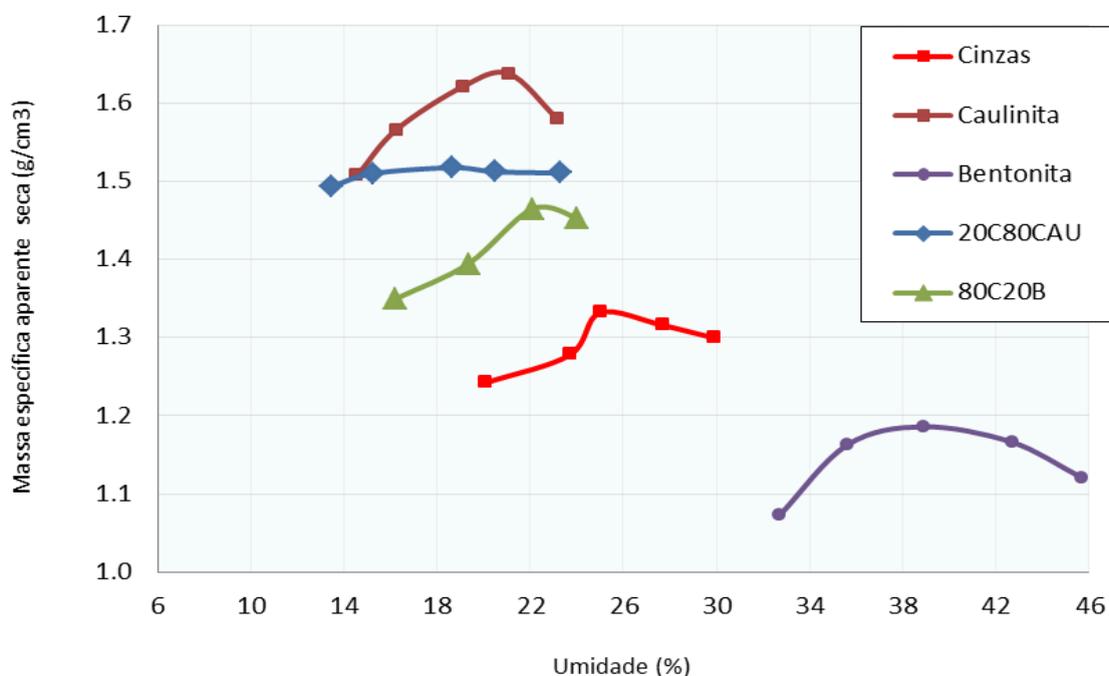
4.1.3.4 Compactação

Na Tabela 20 são apresentados os valores de umidade ótima (h_{ot}) e peso específico aparente seco máximo (γ_d), respectivamente, obtidos para as amostras ensaiadas. A Figura 38 ilustra as curvas de compactação dos materiais e misturas idealizados.

Tabela 20 – Resultados dos Ensaio de Compactação

MATERIAL/ MISTURA	COMPACTAÇÃO	
	w _{ót} (%)	γ _d (g/cm ³)
Cinza	25,0	1,33
Caulinita	21,1	1,64
Bentonita	39,1	1,19
20C80CAU	18,6	1,52
80C20B	22,2	1,47

Fonte: Autor (2023)

Figura 38 – Representação Gráfica dos Resultados de Compactação das Misturas

Fonte: Autor (2023)

Os resultados mostraram que o teor de umidade ótimo variou de 18,6% (em misturas com 20% de cinzas e 80% de caulinita) a 39,1% na bentonita. O maior teor de umidade ótimo da bentonita é justificável pelo fenômeno da absorção de água pela bentonita durante o processo de homogeneização da umidade da mistura. Camargo (2012) e Lukiantchuki (2007) encontraram valores de umidades ótimos de 50% para a bentonita. Já Elias (2015) obteve, para a energia normal de compactação, umidade ótima de bentonita de 40%.

As cinzas obtiveram teor de umidade ótimo de 25%, valores em consonância com os observados nas literaturas (LOPES, 2011; BARROS, 2015; ELIAS, 2015). Vasconcelos (2018), ao estudar 32 amostras de cinzas advindas de termelétricas no Ceará, obteve umidades ótimas variando de 22,1% a 57,1%. Barros (2015) e Elias (2015) obtiveram umidade ótima de 20 a 27,1% para as cinzas analisadas, respectivamente. Farias (2005), Trichês *et al.* (2006) e Rohde *et al.* (2006) apresentaram cinzas leves com teores de umidades ótimos um pouco mais elevados, variando entre 42 a 49,7%, possivelmente oriundas de fontes de carvão mineral de outra qualidade.

A Figura 38 ilustra as curvas de compactação dos materiais ensaiados. Observa-se que as cinzas apresentaram um pico de densidade máxima pouco pronunciado, o que dificulta, em alguns casos, a determinação dos parâmetros de compactação. Lovell *et al.* (1991) observaram que ensaios de compactação de cinzas pesadas produzem, em geral, curvas mais achatadas, dada a complexa estrutura porosa das partículas que as constituem. Heineck (2002) e Lopes (2011) também comprovaram esse fato em seus estudos.

No que se refere às misturas propostas, observou-se que a adição de 20% de bentonita às cinzas promoveu uma redução de 11% da umidade ótima e um acréscimo de 10,5% da massa específica seca máxima em relação às cinzas puras. Nos estudos de Heineck (2002), Lukiantchuki (2007) e Elias (2015) o acréscimo de bentonita a um solo natural conduziu a uma elevação no valor da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima das misturas.

A Tabela 21 compila a caracterização física completa dos materiais e misturas ensaiados, dispondo dos percentuais de cada fração granulométrica, dos índices de consistência e suas respectivas classificações pelo SUCS e dos parâmetros de compactação *Proctor*. Na Tabela 21 está apresentada também o Índice de Atividade (IA) dos materiais e misturas. Quando o IA está entre 0,75 e 1,25 a argila é considerada normal, menor que 0,75 é considerada inativa e acima de 1,25 a argila é ativa, sendo, desta forma, a bentonita e a mistura M2, que apresenta na sua composição 20% de bentonita, são consideradas ativas.

Tabela 21 – Resumo das propriedades físicas dos materiais ensaiados

Material/ Mistura	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IA	$h_{ót}$ (%)	γ_s (g/cm ³)	Classificação
Cinza	0	0	0	4	95	1	NL	NP	-	0	25,0	1,33	ML
Caulinita	0	0	0	1	40	59	63	26	37	0,63	21,1	1,64	CH
Bentonita	0	0	1	1	24	74	605	139	466	6,3	31,9	1,19	CH
20C80CAU	0	0	1	4	51	45	32	15	17	0,38	18,6	1,52	CL
80C20B	0	0	1	6	78	16	48	20	27	1,69	22,2	1,47	CL

Fonte: Autor (2023)

4.1.3.5 Permeabilidade à carga variável

A Tabela 22 apresenta os resultados dos ensaios de permeabilidade realizados, com água como fluido percolante, em amostras compactadas com o peso específico associado ao teor de umidade ótima, obtidas através do ensaio de compactação. Todos os ensaios foram realizados em amostras saturadas com fluxo descendente e submetidas a um gradiente hidráulico igual 20. O gradiente hidráulico estabelecido visava garantir a saturação completa das amostras em um intervalo de tempo menor.

Tabela 22 – Coeficientes de permeabilidade saturada das amostras de cinzas, solo e misturas.

AMOSTRA	$K_{20\text{ méd}}$ (cm/s)	w_{ot} (%)	ρ_d (g/cm ³)	G_s	e
Cinza Leve	8,52E-05	25,0	1,33	2,45	0,842
Bentonita	1,00E-12	39,1	1,89	2,72	0,439
Caulinita	6,50E-8	21,1	1,64	2,69	0,640
20C80CAU	8,89E-8	18,6	1,52	2,65	0,743
80C20B	1,79E-7	22,2	1,47	2,56	0,741

Fonte: Autor (2023)

As cinzas apresentaram valor de permeabilidade de $8,52 \cdot 10^{-5}$ cm/s, material mais permeável investigado neste estudo. Tal valor está em consonância com o obtido por outros estudos, tais como de Heineck (2002), Cruz (2004), Ubaldo (2005) e Elias (2018). A Tabela 23 compara os coeficientes de permeabilidade obtidos por esses autores.

Tabela 23 – Coeficientes de permeabilidade saturada de cinzas obtidos em outros estudos

CONDUTIVIDADE HIDRAÚLICA – K (cm/s)				
Autor (2022)	Heineck (2002)	Cruz (2004)	Ubaldo (2005)	Elias (2018)
$8,52 \times 10^{-5}$	$5,67 \times 10^{-5}$	$5,43 \times 10^{-5}$	$6,0 \times 10^{-5}$	$8,21 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2023)

A bentonita pura apresentou coeficiente de permeabilidade de 10^{-12} cm/s, tal ordem de grandeza está de acordo com literatura (PREVITI, LAVOIE, 2018; SANTINI, 2020) com valores de permeabilidade inferior a 10^{-9} cm/s. Fernandes (2016) considera a classificação de Terzaghi e Peck (1967) quanto aos graus de permeabilidade dos solos, classificando como material praticamente impermeável, aqueles com valores menores que 10^{-7} cm/s. Assim, a bentonita é característica de solos argilosos de baixíssima permeabilidade.

A caulinita seguiu a metodologia de análise prevista na NBR 14545/2000. As amostras de solos, previamente preparadas, foram submetidas ao ensaio de permeabilidade, encontrando-se valores coerentes com a literatura. A permeabilidade de $6,50 \times 10^{-8}$ cm/s é característica de solos mais tipicamente argilosos. Pinto (2006) afirma que as argilas costumam apresentar permeabilidade menores que 10^{-7} cm/s. Para Fernandes (2016), por exemplo, as argilas apresentam a ordem de grandeza entre 10^{-6} a 10^{-8} cm/s.

A mistura M1 (20C80CAU) apresentou coeficiente de permeabilidade no valor de $8,89 \times 10^{-8}$ cm/s. Observou-se que a adição de 20% de cinzas, que é um material mais permeável à amostra caulinitica, promoveu um acréscimo no coeficiente de permeabilidade de 36,8% em relação ao solo caulinitico. Elias *et al.* (2021) também observou um acréscimo do coeficiente de permeabilidade com adição de 30% de cinzas a um solo natural do estado do Ceará, de $1,09 \times 10^{-7}$ cm/s para $4,26 \times 10^{-7}$ cm/s, correspondendo a um acréscimo de 290%. Neste estudo, o percentual de cinzas utilizado foi menor, justificando menores variações em comparação com Elias *et al.* (2021).

Observou-se na mistura M2 (80C20B) um coeficiente de permeabilidade de $1,79 \times 10^{-7}$ cm/s, da ordem de 100 vezes menor do que o coeficiente de permeabilidade da cinza pura. Tal tendência é justificável, uma vez que a elevada capacidade de retenção de água e de expansão da bentonita, como forma de preenchimento dos poros, conferem, em geral, ao solo resistência à passagem de água e líquidos, como o chorume, características do argilomineral montmorilonita. Silva (2017) e Costa (2019) afirmam que nos casos em que o solo natural apresenta altas taxas de permeabilidade à água, a adição de bentonita a este material reduz a condutividade hidráulica do solo, possibilitando que sejam atendidas as exigências normativas com relação a permeabilidade à água.

Aurinko e Kujala (2005), numa pesquisa sobre diversos materiais alternativos para utilização em camadas impermeáveis, utilizaram como material de referência um silte,

observando que a adição de 2,5% de bentonita diminuiu para 46% da permeabilidade do solo natural. Francisca e Glatstein (2010) também observaram reduções no coeficiente de permeabilidade, da ordem de 10^{-6} para 5×10^{-8} cm/s com adição de 5% de bentonita a um solo areno siltoso. Soares (2012) também observou uma redução da ordem de 100 vezes (10^{-6} para 10^{-8} cm/s) com adição de 10% de bentonita a um solo natural siltoso.

Likianthuki (2007) estudou misturas de areia e bentonita com teores de bentonita de no máximo 7%, obtendo reduções significativas no valor do coeficiente de permeabilidade saturada, passando de $3,61 \times 10^{-5}$ cm/s para o solo puro, para $8,76 \times 10^{-8}$ cm/s para a mistura de solo com 7% de bentonita.

Elias (2015) adicionou bentonita a cinzas leves, e observou que mesmo com adição de elevados teores de bentonita (até 20%), não houve reduções significativas na permeabilidade da mistura. O autor concluiu que a cinza, devido a fenômenos como a troca iônica, inibia o inchamento da bentonita, de modo que para cinza leve pura obteve um coeficiente de permeabilidade saturada de $8,5 \times 10^{-5}$ cm/s, a permeabilidade da bentonita era de $1,0 \times 10^{-12}$ cm/s, e a mistura com 20% de bentonita foi a que apresentou a menor permeabilidade, $1,2 \times 10^{-6}$ cm/s. Tal tendência também foi observada para este estudo, tendo a mistura M2, com adição de 20% de bentonita, apresentado condutividade hidráulica maior do que a mistura M1, sem adição de bentonita.

4.1.4 Discussão acerca da Aplicação dos Materiais e Misturas como Liners

A permeabilidade caracteriza-se como a variável mais relevante para a análise e definição do material a ser utilizado como camadas de *liners*. Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993), os solos potencialmente utilizados como barreiras impermeabilizantes devem apresentar características, tais como condutividade hidráulica menor do que 10^{-7} cm/s, porcentagem de finos maior ou igual a 30 % e índice de plasticidade (IP) maior ou igual 15 %.

De acordo com a norma NBR 13896:97 os solos para utilização em camadas impermeáveis de aterros sanitários devem apresentar coeficiente de permeabilidade à água menores do que 10^{-6} cm/s. Conforme Soares (2012), normas internacionais definem um coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-7} cm/s para a camada impermeável de aterros. Potter e Yong (1993) relatam que se baseando na lei de Darcy, para uma camada com valor de

k de 10^{-7} cm/s, seriam necessários cerca de 30 anos para que o líquido percolasse uma camada de 1,0 metro desse material, o que representa tempo suficiente para o lixiviado não ser poluente.

Desta maneira, as cinzas puras, apesar de terem apresentado um elevado teor de finos (observado no ensaio de granulometria), predominando partículas de dimensão próxima a do silte, não apresentou condutividade hidráulica desejada para as aplicações dela isoladamente como material impermeabilizante.

A bentonita e o solo caulinítico em sua forma natural apresentam permeabilidades adequadas para utilização em barreiras impermeáveis, com coeficientes de permeabilidades menores do que 10^{-7} cm/s. A mistura M1 (20C80CAU) também apresentou permeabilidade adequada para utilização como *liners*, conforme critérios da CETESB (1993), NBR 13896:97 e Potter e Yong (1993), atendendo inclusive as características granulométricas e de consistências recomendadas pela CETESB (1993). Desta maneira, a partir da mistura M1 este estudo propôs uma mistura com adição de resíduos industriais que apresentou viabilidade técnica para emprego como camadas de *liners*, promovendo também viabilidade ambiental e financeira (uma vez que os resíduos estavam descartados sem valor comercial).

A mistura M2 (80C20B) apresentou permeabilidade da ordem 10^{-7} cm/s, no limite para utilização como material impermeabilizante, conforme os critérios CETESB (1993), e Potter e Yong (1993), também viabilizando sua utilização como barreiras impermeabilizantes. As bentonitas sódicas retiram umidade do meio em que estão e, como consequência, expandem, causando um decréscimo da condutividade hidráulica. Portanto, têm sido muito utilizadas como aditivos para materiais com permeabilidade acima do limite máximo especificado para *liners*, como é o caso das cinzas utilizadas neste estudo. Desta forma, a partir da mistura M2 este estudo propôs uma mistura de elevado teor de resíduos industriais que apresentou viabilidade técnica para emprego como camadas de *liners*. Devido ao elevado percentual de cinzas nesta mistura, pode-se dar uma destinação técnica e ambientalmente mais adequada a uma maior quantidade de resíduos.

O solo misturado à cinza composta tem como principal argilomineral presente na sua constituição a caulinita. Como se trata de um argilomineral, onde fenômenos de superfície como a troca iônica e dupla camada difusa são menos intensos do que em outros argilominerais. Isso justifica a pequena alteração no coeficiente de permeabilidade da mistura M1 (20C80CAU) comparativamente à argila caulinítica, mesmo com a adição de 20% de

cinzas. A M1 (20C80CAU) é uma mistura com características hidráulicas consideradas satisfatórias para seu emprego como *liner*.

4.2 Estudo da Compatibilidade entre Misturas e Fluidos Percolantes

A condutividade hidráulica é o parâmetro usado para avaliar o potencial de impermeabilização da camada de *liners*. Em mecânica dos solos, análises de estabilidade baseiam-se na determinação da resistência desses materiais e índices de recompressão e compressão são usados para prever compressibilidade, de modo que testes hidromecânicos são realizados para medir tais parâmetros e julgar o uso dos materiais argilosos como adequados para barreiras impermeáveis.

Reforça-se que evitar que o lixiviado contamine o subsolo e o lençol freático é uma das funções de uma barreira impermeabilizante, sendo necessário que haja garantia de seu desempenho mesmo após o contato com o lixiviado.

Deste modo, nesta seção serão apresentados os resultados de permeabilidade, adensamento oedométrico e resistência à compressão simples para as misturas 20C80CAU e 80C20B considerando como lixiviados água, chorume e solução salina, de modo a verificar a compatibilidade nas propriedades hidromecânicas entre misturas e fluidos.

4.2.1 Resultados para Mistura 20C80CAU

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados de permeabilidade, adensamento oedométrico e resistência à compressão simples para a mistura M1 (20C80CAU) considerando como lixiviados água, chorume e solução salina.

4.2.1.1 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável

Os ensaios de permeabilidade à carga variável foram realizados para a mistura M1 (20C80CAU), compactada com o teor de umidade ótimo obtido do ensaio de compactação na energia *Proctor* Normal. A Tabela 24 apresenta os valores de condutividade hidráulica obtidos, considerando como fluidos percolantes na mistura água, solução salina e chorume.

Tabela 24 – Coeficientes de permeabilidade da amostra M1 (20C80CAU) com os três fluidos percolantes

20C80CAU	$K_{20\text{ méd}} \text{ (cm/s)}$	$w_{ot\text{ méd}} \text{ (\%)}$	$\rho_d\text{ méd} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Gs	e
Água	$8,89 \times 10^{-8}$	18,6	1,52	2,65	0,743
Solução Salina	$1,5 \times 10^{-8}$	18,6	1,52	2,65	0,745
Chorume	$1,36 \times 10^{-8}$	18,6	1,52	2,65	0,739

Fonte: Autor (2023)

O chorume obtido do aterro sanitário do ASMOC como fluido percolante promoveu uma diminuição de 84,7% do coeficiente de permeabilidade em relação à utilização da água como fluido percolante. Tal fato demonstra a susceptibilidade de colmatação da mistura estudada promovida pelas partículas em suspensão e pelo desenvolvimento provável de flocos e partículas biológicas.

Hamada *et al.* (2004), ao realizar ensaios de coluna com infiltração de lixiviado em solo arenoso típico de Bauru, compactado em cinco diferentes graus de compactação (75%, 80%, 85% 90% e 95% da energia normal), perceberam redução na permeabilidade do solo, inclusive com atenuação da carga de contaminantes do lixiviado, devido à interação solo-chorume e às reações físico-químicas, para graus de compactação superiores a 85%. Iwai (2005) também concluiu que acerca da diminuição da permeabilidade com percolação do chorume, obteve que para maiores graus de compactação, menor era a velocidade de escoamento e mais rápida era a colmatação.

Costa (2019) durante a execução dos ensaios de permeabilidade ao chorume de solo natural para diferentes energias de compactação e teores de umidade também observou a diminuição da permeabilidade em relação aos ensaios de permeabilidade à água. Os coeficientes de permeabilidade à água encontraram-se na faixa entre $1,49 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ e $6,49 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Já os coeficientes de permeabilidade ao lixiviado encontraram-se na faixa entre $5,49 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ e $7,77 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Tal comportamento também pode ser explicado devido à diferença de viscosidade observada entre o lixiviado e a água, sendo o lixiviado mais viscoso que a água.

De forma a complementar a análise, foi medida a viscosidade da água e do chorume deste estudo em laboratório para duas temperaturas, 20°C e 25°C, sendo obtidos os valores dispostos na Tabela 25. Observa-se que o chorume tem uma viscosidade entre 18,9% e 24,2% maior do que da água.

Tabela 25 – Viscosidade observada para a água e o chorume em estudo

Temperatura	Viscosidade Cinemática (mm ² /s)	
	Água	Chorume
20°C	1,001	1,1905
25°C	0,899	1,1684

Fonte: Autor (2023)

Com relação à solução salina, observou-se um decréscimo em torno de 80% da permeabilidade em relação à percolação com água como fluido percolante. De acordo com Iiyas *et al.* (2000), o sódio da solução salina substitui o cálcio adsorvido no complexo de troca, causando a dispersão dos coloides do solo, e conseqüentemente, contribuindo para redução da condutividade hidráulica.

Pedrotti *et al.* (2015) e Keren *et al.* (1988) afirmam que uma das causas das modificações nas propriedades físico-hídricas dos solos é o fenômeno conhecido como dispersão química, que apresenta relação de dependência com a concentração eletrolítica da solução. Quanto maior a concentração de sódio no solo e mais baixa for a concentração de eletrólitos, maior será a dispersão das argilas e mais elevada será a viscosidade da água, fatores que juntos contribuem para redução da condutividade hidráulica do solo.

No entanto, Yamasaki (2012) ao estudar a condutividade de dois solos percolados com água destilada e solução salina, na concentração de 250 mg/L e 500 mg/l, verificou que os valores de permeabilidade não apresentaram grandes variações. Para a concentração de 250 mg/l de solução salina, houve um acréscimo da permeabilidade 41,7% para o solo predominantemente arenoso e manteve-se o valor para o solo de características mais argilosas. Já para a concentração de 500 mg/l de solução salina, houve um decréscimo da permeabilidade de 5,4% para o solo predominantemente argiloso.

4.2.1.2 Ensaio de Adensamento Oedométrico

De modo semelhante à condutividade hidráulica, a compressibilidade é uma das propriedades importantes que ajudam na avaliação em termos de recalque do material utilizado como barreira impermeabilizante. Em camadas de *liners* de aterros sanitários, por exemplo, devem-se avaliar os recalques causados pelas sobrecargas representadas pelo peso dos resíduos acumulados em vários metros (DUTTA e MISHRA, 2015), bem como o risco de falha do aterro que pode ocorrer durante as fases de construção, operação e fechamento do aterro (TOWNSEND, 2002). Tudo isso requer a determinação dos parâmetros geotécnicos apropriados dos *liners* durante a exploração do aterro. Os recalques estão ligados à compressibilidade, que assim como a condutividade hidráulica, é uma das propriedades mais importantes em camadas impermeabilizantes.

Em mecânica dos solos, análises de estabilidade baseiam-se na determinação da resistência desses materiais e índices de recompressão e compressão são usados para prever a compressibilidade, de modo que testes hidromecânicos são realizados para medir tais parâmetros e julgar o uso desses materiais argilosos como adequados para barreiras impermeáveis.

Devido à sua importância no comportamento da compressibilidade, vários parâmetros como índice de compressão (C_c) e índice de expansão (C_s) têm atraído muita atenção entre os pesquisadores. A Tabela 26 apresenta os resultados do índice de compressão e de expansão da mistura M1 (20C80CAU), considerando como fluidos percolantes na mistura a água, a solução salina e o chorume.

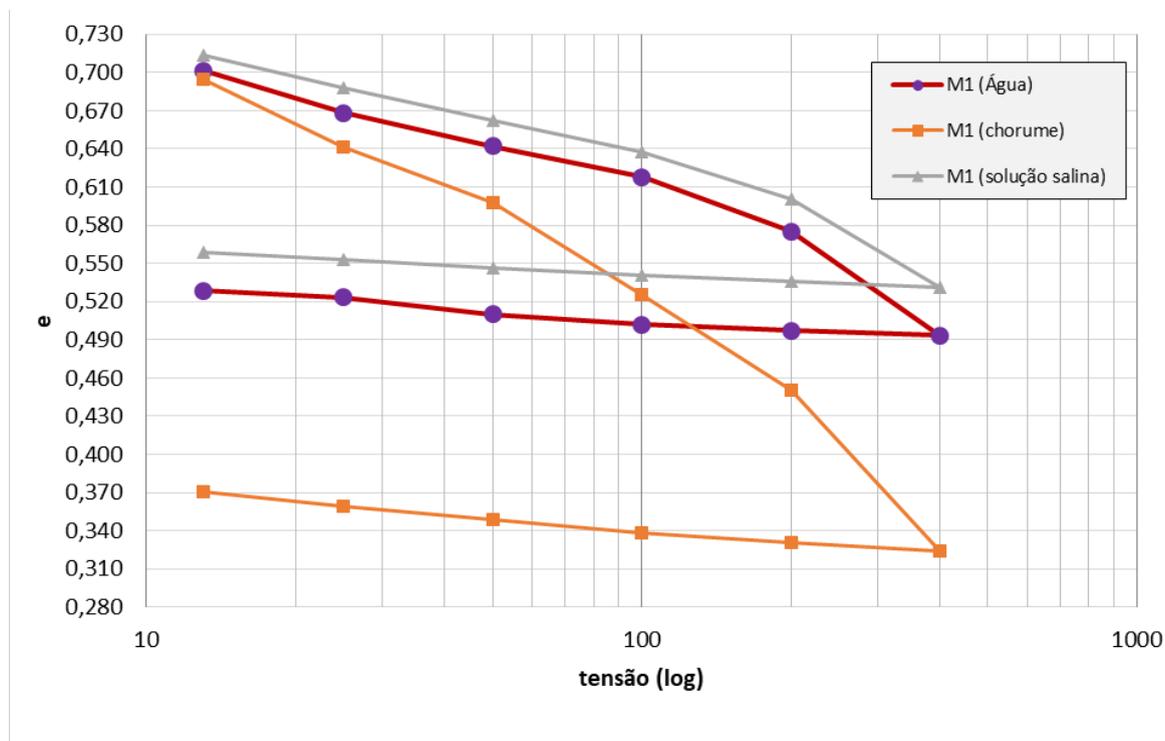
Tabela 26 – Índice de compressão e de expansão para a amostra M1

M1 20C80CAU	Índice de Compressão (C_c)	Índice de Expansão (C_e)
Água	0,207	0,026
Solução Salina	0,176	0,019
Chorume	0,335	0,034

Fonte: Autor (2023)

A Figura 39 insere as curvas de adensamento para a mistura M1 a partir da percolação dos três fluidos percolantes.

Figura 39 – Curvas de adensamento para a M1



Fonte: Autor (2023)

O índice compressão é definido como a inclinação da parte da linha reta da curva índice de vazios *versus* tensão (log) e fornece uma indicação sobre sua compressibilidade devido à aplicação de uma pressão de consolidação vertical. Observa-se pelo gráfico da Figura 39 que a inclinação da curva índice de vazios *versus* tensão (log) para o chorume como fluido percolante é mais elevada, sugerindo maior compressibilidade na presença desse fluido. Observa-se também, que comparativamente à água como fluido de percolação, a solução salina reduz levemente a inclinação da curva, creditando-se para essa mistura menores compressibilidades.

Quando o corpo de prova é descarregado gradativamente durante o ensaio pode experimentar ligeiras expansões, quantificadas por meio do índice de expansão (C_s). Observa-se na Tabela 26 que os índices de compressão e de expansão da mistura M1 após contato com o chorume foram, respectivamente, 61,8% e 30,8% maiores do que com água. Na presença de lixiviado, Soares (2012) também observou acréscimo nos parâmetros de compressibilidade,

verificando que os índices de compressão e de expansão do solo natural compactado foram, respectivamente, 19% e 28% maiores do que com água. Li *et al.* (2013) verificaram que a compressibilidade e a deformação compressiva de uma argila contaminada com diferentes concentrações de chorume também aumentaram.

A partir da Tabela 26, observa-se que os índices de compressão e de expansão da mistura M1 após contato com a solução salina foram, respectivamente, 15,0% e 23,1% menores do que com água. Al-janabi e Abdulla (2017) afirmou nos seus estudos que a característica de compressão das amostras depende do tipo de cátion e também da concentração de sal. Ao aumentar a concentração de sal, o valor de C_c diminui. A razão de tal tendência pode ser devido à redução na espessura da dupla camada difusa dado emprego de solução salina na preparação da amostra (YILMAZ, YETIMOGLU e ARASAN, 2008).

Alawaji (1999) avaliou o potencial de expansão e compressibilidade de solos usando várias concentrações de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e NaNO_3 , observando que esses parâmetros também diminuíram com o aumento da concentração de sal.

A Tabela 27 apresenta os resultados de coeficiente de variação volumétrica (m_v) e o coeficiente de compressibilidade (a_v), apresentando ainda a variação relativa destes parâmetros, comparando os resultados obtidos a partir da percolação com chorume e solução salina em relação à percolação com água destilada. O coeficiente (m_v) denomina-se coeficiente de variação volumétrica (ou deformação volumétrica). Quanto maior esse coeficiente, maior será a variação de volume unitário do solo para certo incremento de tensão efetiva. Admitida a variação linear entre as tensões efetivas e os índices de vazios, pode-se definir que a inclinação da reta corresponde ao coeficiente de compressibilidade (a_v).

Observa-se que o chorume apresenta coeficiente de variação volumétrica (m_v) e coeficiente de compressibilidade (a_v) em torno de 72,7% e 72,2%, respectivamente, superiores comparativamente aos parâmetros obtidos com a percolação de água, refletindo em maiores compressibilidades para incrementos de tensão efetiva. Enquanto que a solução salina apresenta m_v e a_v em torno de 6% inferiores aos resultados obtidos com a água como fluido percolante.

Tabela 27 – Parâmetros de compressibilidade para a amostra M1

M1 20C80CAU	mv (m ² /kN)	av (m ² /kN)	Δmv (m ² /kN)	Δav (m ² /kN)
Água	1,65x10 ⁻⁵	2,88x10 ⁻⁵	-	-
Solução Salina	1,55x10 ⁻⁵	2,70x10 ⁻⁵	-6,06%	-6,25%
Chorume	2,85x10 ⁻⁵	4,96x10 ⁻⁵	72,73%	72,22%

Fonte: Autor (2023)

4.2.1.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

No que se referem aos ensaios de resistência à compressão simples na mistura 20C80CAU, a Tabela 28 apresenta os resultados obtidos para os corpos-de-prova compactados com água e percolados após a compactação com solução salina e chorume. Salienta-se que para esta análise houve uma dificuldade para a obtenção desses corpos de prova de forma indeformável, uma vez que os CPs já estavam saturados do ensaio de permeabilidade, o que ocasionou a perda de alguns CPs por desagregação da mistura.

Tabela 28 – RCS para mistura M1 (20C80CAU) com os três fluidos percolantes

20C80CAU	RCS (kPa)
Água	218,35
Solução Salina	238,31
Chorume	186,34

Fonte: Autor (2023)

Analisando-se os resultados obtidos, observa-se que a resistência à compressão simples da mistura M1 com água e chorume como fluidos percolantes apresentaram valores de 218,35 kPa e 186,34 kPa, respectivamente, o que representa um decréscimo de 14,7% de resistência do corpo de prova percolado com chorume comparativamente à água como líquido de inundação.

Apesar dos ensaios de compressão simples apresentar resultados limitados, uma vez que, segundo a NBR 12770/92, materiais que contenham areia ou silte, ou ambos,

frequentemente apresentam resistências maiores quando ensaiados em confinamento, os resultados estão em consonância com o observado por Soares (2012) a partir de ensaios de resistência ao cisalhamento direto. Nos estudos de Soares (2012) quando o líquido de inundação foi o chorume, houve um aumento de 53% na coesão e um decréscimo de 15% no ângulo de atrito para o solo natural, não promovendo alterações significativas as características de resistência do solo.

Sunil, Shrihari & Nayak (2009) analisaram a variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, com a contaminação de chorume, identificando um aumento no intercepto coesivo efetivo (c') e uma diminuição no ângulo de atrito interno efetivo (ϕ'), resultando em menores resistências ao cisalhamento. Esse comportamento foi justificado pelo aumento da fração argila resultado da interação com lixiviado.

Xu *et al.* (2018) trabalharam com solo argiloso e percolaram durante 30 dias uma solução de água destilada e lixiviado, diluído 0, 1, 2 e 5 vezes, comprovando que o aumento da porcentagem de lixiviado no solo diminui o valor de resistência ao cisalhamento do mesmo.

A utilização da solução salina como fluido percolante promoveu um aumento da resistência da mistura, apresentando um pico de resistência de 186,34 kPa, um acréscimo de 9,14% de resistência. A salinidade interfere principalmente nos solos argilosos onde a alteração do pH do material influencia diversas propriedades do mesmo, como as de viscosidade, resistência não drenada, limites de consistência, entre outros (HAJELA e BHATNAGAR, 1972 e LOCAT e DEMERS, 1988;).

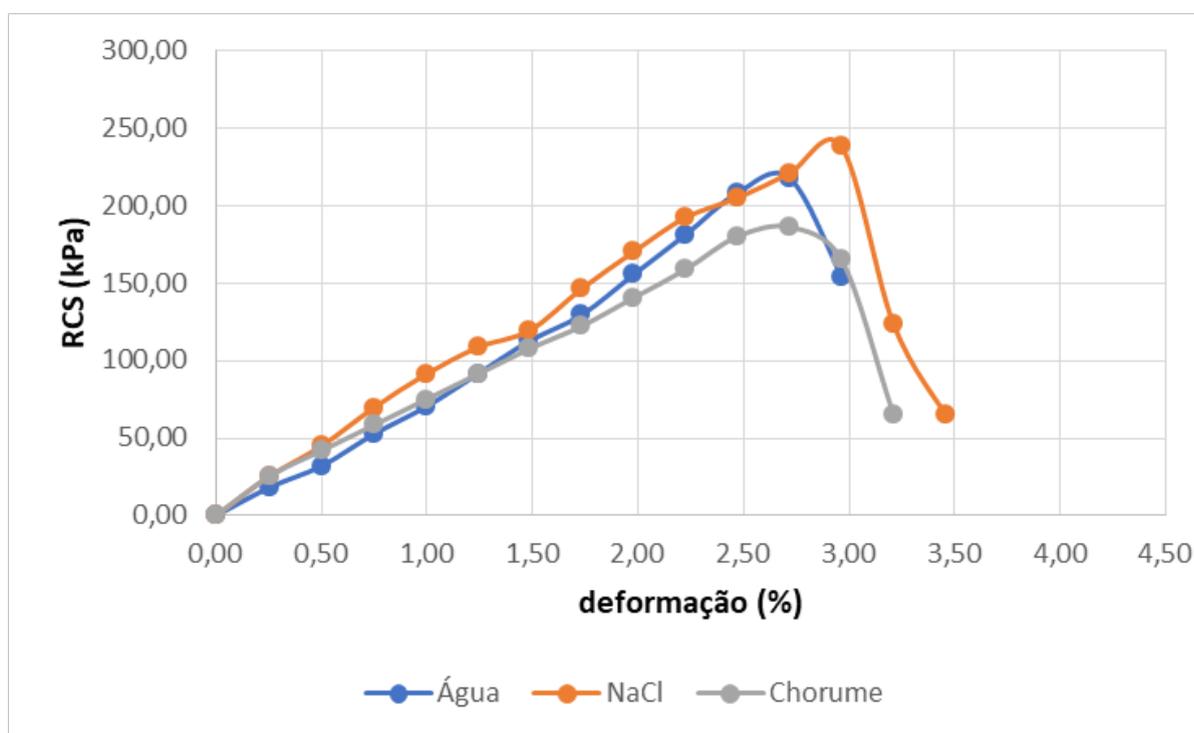
Falcão *et al.* (2017) ao estudar três amostras preparadas com mistura de solo artificial silto argiloso, sendo uma delas utilizada como referência sem a adição do cloreto de sódio e nas outras duas com adição de concentrações salinas com 10 g/l e 30 g/l, observaram que ao analisar a amostra com maior concentração salina, percebe-se que há um ganho de resistência não drenada em torno de 48,82% em relação à amostra sem sal e 58,12% em relação a de 10g/l.

No estudo de Silos (2010), a exposição do solo estudado à concentração de g/l de solução salina afetou sua resistência, diminuindo-a. Isso é evidenciado pela diminuição da massa específica aparente seca e aumento no índice de vazios, pela diminuição do valor do Índice de Suporte Califórnia e por um leve aumento da expansão, resultando em uma absorção de água um pouco maior. A salinidade possivelmente modificou a estrutura dos solos tendendo a um estado de maior floculação na presença de sais. No entanto, a

concentração de sal utilizada por Silos (2010) foi para equivaler à água do mar que possui em média essa concentração de NaCl, concentração essa sete vezes superior a desse estudo.

O gráfico da Figura 40 ilustra as curvas de resistência à compressão simples obtida para a amostra M1 (20C80CAU), a partir da percolação de água, solução salina e chorume.

Figura 40 – RCS para mistura M1 (20C80CAU)



Fonte: Autor (2023)

4.2.2 Resultados para Mistura 80C20B

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados de permeabilidade, adensamento oedométrico e resistência à compressão simples para a mistura M2 (80C20B), considerando como lixiviados água, chorume e solução salina.

4.2.2.1 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável

No que se referem aos ensaios de permeabilidade à carga variável realizados para a mistura M2 (80C20B), a Tabela 29 apresenta os valores de condutividade hidráulica obtidos, considerando como fluido percolantes a água, solução salina e o chorume.

Tabela 29 - Coeficientes de permeabilidade da amostra M2 (80C20B) com os três fluidos percolantes

80C20B	$K_{20 \text{ méd}} \text{ (cm/s)}$	$W_{ot \text{ méd}} \text{ (\%)}$	$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	G_s	e
Água	$1,79 \times 10^{-7}$	22,2	1,47	2,56	0,741
Solução Salina	$9,97 \times 10^{-8}$	22,2	1,47	2,56	0,745
Chorume	$6,35 \times 10^{-8}$	22,2	1,47	2,56	0,734

Fonte: Autor (2023)

Observa-se que com a presença do chorume como fluido percolante no ensaio de permeabilidade houve um decréscimo da condutividade hidráulica de 64% em relação à condutividade hidráulica com água como fluido de percolação. Nos estudos de Soares (2012), ensaios de permeabilidade ao lixiviado de aterro sanitário com o solo natural e com mistura de solo com 5% de bentonita compactados na energia modificada mostraram que a percolação de lixiviado causa uma redução no coeficiente de permeabilidade de duas vezes em relação à permeabilidade a água para a mistura de solo e 5% de bentonita e de 100 vezes para o solo natural.

Costa (2019) observou que a condutividade hidráulica do solo é da ordem de 10^{-6} m/s, porém significativamente influenciada pelo gradiente hidráulico aplicado e pela duração da percolação. A condutividade hidráulica diminuiu com a percolação de lixiviado para ordens de grandeza entre 10^{-7} e 10^{-8} m/s, dependendo do gradiente hidráulico aplicado.

Com relação à solução salina, observou-se um decréscimo em torno de 45% da permeabilidade em relação à percolação com água como fluido percolante. Enquanto todas as outras condições permanecem constantes, a influência da solução salina na porosidade é governada pelo fato de que a pressão total das partículas de bentonita aumenta com o aumento

da concentração de sal, o que reduz a porosidade (CASTELLANOS *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2016), o que auxilia, assim, a diminuir a permeabilidade.

Shaikh *et al.* (2020) afirmam que os teores de sódio nas águas salinas podem se relacionar a uma menor permeabilidade dos solos, onde aeração e circulação hídrica é reduzida. De acordo com Xiang *et al.* (2022), enquanto todas as outras condições permanecem constantes, a influência da solução salina na porosidade é governada por duas características principais. Em primeiro lugar, a pressão total das partículas de bentonita aumenta com o aumento da concentração de sal, o que reduz a porosidade (CASTELLANOS *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2016), melhorando assim a resistência. Em segundo lugar, a mudança de cátion entre soluções e bentonita tende a levar a porosidades variadas de bentonita, particularmente em soluções com diferentes cátions (ALAWAJI, 1999; YE *et al.*, 2017; XIANG *et al.*, 2019) que acaba afetando a permeabilidade.

Quirk e Schofield (1955) em seus estudos realizaram ensaios de permeabilidade saturando um solo com soluções de $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl, $0,0316 \text{ mol L}^{-1}$ de MgCl_2 e $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ de CaCl_2 , por um período de 12 horas. Após a saturação, sucessivas soluções mais diluídas desses sais foram utilizadas para lixiviar as amostras por um período de cinco horas. O cloreto de sódio foi o sal que mais afetou a condutividade hidráulica, tornando o solo quase impermeável quando lixiviado com uma solução de $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Os fatores apontados pelos autores como responsáveis pela redução da permeabilidade foram a expansão e a dispersão da fração argila.

4.2.2.2 Ensaio de Adensamento Oedométrico

O comportamento de compressibilidade da bentonita é controlado por fatores mecânicos e físico-químicos (BOLT, 1956). A interação das partículas de curto alcance controlada pelas propriedades físicas, como flexão, força, rolamento e esmagamento das partículas do solo, controla o efeito mecânico da compressibilidade da bentonita, enquanto os fatores físico-químicos entre as partículas dependem da interação de longo alcance entre as partículas, através da dupla camada difusa (SRIDHARAN e RAO, 1973, SRIDHARAN e JAYADEVA, 1982, MITCHELL e SOGA, 2005).

Na Tabela 30 estão apresentados os resultados do índice de compressão e de expansão da mistura M2 (80C20B), considerando como fluidos percolantes na mistura a água,

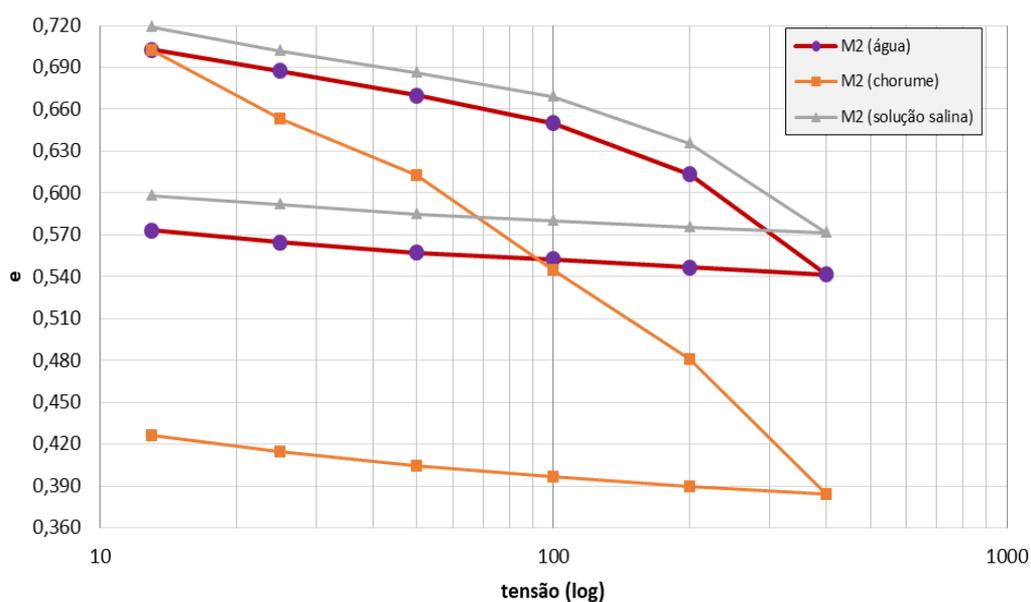
a solução salina e o chorume. Na Figura 41 inserem-se as curvas de adensamento para a mistura M2 a partir da percolação dos três fluidos percolantes.

Tabela 30 – Índice de compressão e de expansão para a amostra M2 com os três fluidos percolantes

M2 80C20B	Índice de Compressão (C _c)	Índice de Expansão (C _e)
Água	0,18	0,022
Solução Salina	0,162	0,019
Chorume	0,266	0,031

Fonte: Autor (2023)

Figura 41 – Curvas de adensamento para a M2 com os três fluidos percolantes



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 31 apresenta os resultados de coeficiente de variação volumétrica (mv) e o coeficiente de compressibilidade (av), apresentando ainda a variação relativa destes parâmetros, comparando-os os resultados obtidos a partir da percolação com chorume e solução salina, em relação à percolação com água destilada.

Tabela 31 – Parâmetros de compressibilidade para a amostra M2 com os três fluidos percolantes

M2 80C20B	mv (m ² /kN)	av (m ² /kN)	Δmv (m ² /kN)	Δav (m ² /kN)
Água	2,08x10 ⁻⁵	3,63x10 ⁻⁵	-	-
Solução Salina	1,70x10 ⁻⁵	2,97x10 ⁻⁵	-18,27%	-18,18%
Chorume	2,35x10 ⁻⁵	4,07x10 ⁻⁵	12,98%	12,12%

Fonte: Autor (2023)

Os índices de compressão e de expansão da mistura M2, com adição de 20% de bentonita, após contato com o chorume foram, respectivamente, 16% e 3% maiores do que com água. Yonli *et al.* (2022) e Soares (2012) também comprovaram a influência do chorume no incremento da compressibilidade das misturas.

Com relação à mistura M2, após contato com a solução salina os índices de compressão e de expansão foram, respectivamente, 10,0% e 13,6% menores do que com água. Dutta e Mishra (2016) notaram uma diminuição do índice de compressibilidade de bentonitas na presença de soluções salinas. Conforme Shariatmadari, Yazdanpanah e Saeidijam (2014) a água salina do mar, águas subterrâneas em cúpulas de sal ou lixiviados de resíduos municipais podem afetar as propriedades hidromecânicas da bentonita como material de impermeabilização. Os autores investigaram o efeito da solução de cloreto de sódio (em concentrações de 0,05, 0,1, 0,5 e 2 mol/l) sobre o limite de Atterberg, expansão, consolidação e permeabilidade. Considerando os resultados, concluíram que um pequeno aumento na concentração da solução reduziu a expansão da bentonita e a compressibilidade foi reduzida pelo aumento da concentração de cloreto de sódio na solução.

Ming *et al.* (2021), em seus estudos de solo com bentonita, concluíram que os limites de consistência e resistência à compressão não confinada aumentaram à medida que a concentração de sais aumentou, enquanto a permeabilidade tende a diminuir à medida que a concentração de sal aumenta. Além disso, o índice de compressão diminuiu à medida que a concentração de sais aumentou de 2% para 5%.

Shariatmadri *et al.* (2011) investigaram o efeito de três diferentes soluções de sais inorgânicos (NaCl, CaCl₂ e MgCl₂) em algumas propriedades geotécnicas de misturas de solos bentonitas como barreiras, eles também concluíram que o índice de compressão (Cc) diminuiu com o aumento das concentrações de sal.

Mishra e Dutta (2016) investigaram o efeito de soluções salinas de diferentes concentrações, no comportamento de consolidação de duas bentonitas compactadas com diferentes composições mineralógicas para uso em camadas impermeabilizantes em aterros sanitários. A bentonita de maior qualidade, definida por possuir maior capacidade de troca catiônica, percentual de sódio trocável e capacidade de intumescimento, apresentou maiores valores para C_c em comparação com a bentonita de menor qualidade.

Os fatores como mineralogia da argila, tipo de bentonita, tipo de cátions trocáveis e química da água intersticial também influenciam a espessura difusa da dupla camada (DUTTA e MISHRA, 2015; MITCHELL e SOGA, 2005; OLSON e MESRI, 1970), conseqüentemente, podem produzir uma influência significativa nas propriedades de consolidação. Os valores de C_c das misturas de bentonita arenosa/siltosas com teor relativamente baixo de bentonita (5%) são muito baixos. Esse comportamento também foi relatado em estudos anteriores (YEO, SHACKELFORD e EVANS, 2005; FAN *et al.*, 2014). Esta observação pode ser atribuída ao fato de que uma estrutura granular de areia é formada quando há um baixo teor de bentonita na mistura. Este arranjo estrutural pode resistir melhor à tensão efetiva de compressão vertical em comparação com a condição de partículas de areia que existe em uma matriz argilosa com maior teor de bentonita (WATABE, YAMADA e SAITOH, 2011).

4.2.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples na mistura M2 (80C20B) para os corpos-de-prova compactados com água e percolados após a compactação com solução salina e chorume estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – RCS para mistura M2 (80C20B) com os três fluidos percolantes

80C20B	RCS (kPa)
Água	127,44
Solução Salina	140,71
Chorume	118,54

Fonte: Autor (2023)

Analisando-se os resultados obtidos, observa-se que a resistência à compressão simples da mistura M2 com água destilada como percolante é de 127,44 kPa e com o chorume é de 118,54 kPa, correspondendo a um decréscimo de aproximadamente 7%.

Ramírez, Gonzalez & Valencia (2017), ao estudar a contaminação por chorume em solos tropicais nas proximidades do aterro sanitário do município de *El Santuario*, na Colômbia, identificaram laboratorialmente mudanças no comportamento geomecânico do solo compactado, como a diminuição dos parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo contaminado em comparação ao solo limpo.

Khodary, Negm e Tawfik (2018) reportaram resultados de resistência de solos contaminados por lixiviado de aterro sanitário, concluindo que o comportamento da resistência de amostras contaminadas tende a diminuir com a contaminação devido aos processos químicos de interação entre solo e lixiviado.

A utilização da solução salina como fluido percolantes promoveu uma melhora na resistência da mistura, apresentando um pico de resistência de 140,71 kPa, um acréscimo de 10,41% de resistência.

Jia, Sun e Zhang (2018) realizaram estudo experimental envolvendo testes de cisalhamento direto para investigar os efeitos da concentração de solução salina no comportamento mecânico e nas características microestruturais de uma areia misturada com bentonita sódica. A bentonita e mistura areia e bentonita foram submetidas a soluções de cloreto de sódio em diferentes concentrações (0,2, 0,5 e 1,0 mol/L). Os resultados dos testes indicam que a resistência ao cisalhamento tem uma melhora notável com o aumento da concentração da solução salina. Os resultados do teste da bentonita revelam que o ângulo de atrito aumenta razoavelmente com a concentração da solução salina, mas o mesmo não ocorre com o intercepto coesivo. Por fim, as alterações microestruturais associadas às variações na concentração da solução salina foram fotografadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As fotografias mostram que o aumento da concentração da solução salina alteraria a rugosidade superficial e a área superficial específica dos agregados, o que produziria maior interação entre os agregados.

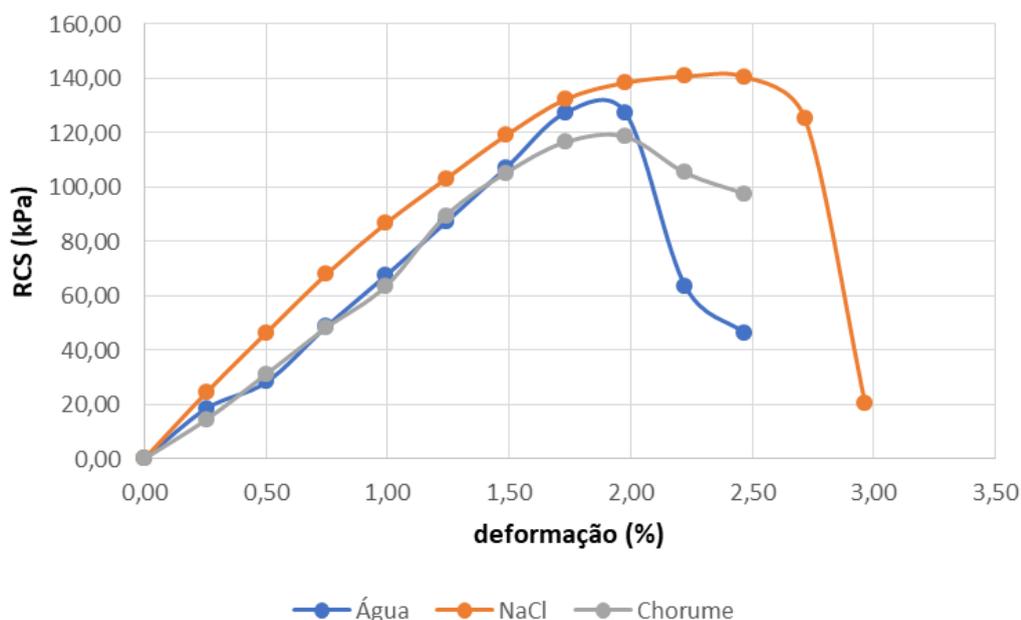
Naeini e Jahanfar (2011) realizaram testes de laboratório para determinar o efeito da plasticidade e das soluções salinas no comportamento de argila compactada de baixa, média e alta plasticidade para uso como barreiras impermeabilizantes. Com base nos resultados dos testes de laboratório, os autores verificaram que a adição de solução salina aumenta até cerca de 40% a resistência ao cisalhamento não drenada de NaCl compactado até

a concentração de 20g/l, devido a mudanças na estrutura química da argila, porém, à medida que a concentração salina aumenta de 20g/l até 100g/l, ocorre uma diminuição da resistência, haja vista à floculação de sal.

Anson e Hawkins (1998) e Calvello *et al.* (2005) investigaram que o pico de resistência ao cisalhamento do solo bentonítico aumenta com várias concentrações de salinidade. Além disso, Di Maio e Scaringi (2016) concluíram que o ângulo de atrito interno da bentonita aumentou substancialmente com maior concentração de água intersticial. De acordo com vários ensaios de cisalhamento direto em argila em soluções com água deionizada, CaCl₂, KCl, NaCl, etanol e glicol, Di Maio e Scaringi (2016) descobriram que o pico de resistência ao cisalhamento da montmorilonita foram significativamente afetados pela composição química da água intersticial. Em outro estudo, Man *et al.* (2006) apontaram que a composição química das soluções é um parâmetro importante que afeta consideravelmente a relação tensão-deformação da bentonita, de modo que o pico de resistência ao cisalhamento da montmorilonita foram significativamente afetados pela composição química da água intersticial.

O gráfico da Figura 42 ilustra as curvas de resistência à compressão simples obtidas para a amostra M2 (80C20B), a partir da percolação de água, solução salina e chorume.

Figura 42 – RCS para mistura M2 (80C20B) para os três fluidos percolantes



Fonte: Autor (2023)

Naeini e Jahanfar (2011) dentro da faixa percentual de solução salina investigada nos seus estudos (0 a 100 g/l), concluíram que a resistência ao cisalhamento não drenado aumenta não linearmente com o aumento do índice de plasticidade, concluindo-se que argilas de plasticidades médias tem maior resistência ao cisalhamento em todas as concentrações de sal. Essas mudanças na resistência podem ser mais bem explicadas pela teoria dos fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de argilas compactadas desenvolvida por Lambe (1958). Por um lado, quando a plasticidade aumenta, a estrutura do solo torna-se floclada devido à redução da repulsão interpartículas. Lambe (1958) relatou que menor repulsão resulta em maior resistência ao cisalhamento. Por outro lado, quando a plasticidade se desenvolveu incrivelmente, isso causou um aumento no volume de vazios e, portanto, diminuiu a resistência ao cisalhamento não drenado. Isso justifica o fato da mistura M2 (80C20B), de alta plasticidade, percolada com solução salina apresentar valores de resistência à compressão simples cerca de 40% menor do que a mistura M1 (20C80CAU), de menor plasticidade, também percolada com solução salina.

Ressalta-se ainda que, de acordo com os resultados encontrados, a interação do chorume com ambas as misturas estudadas tende a fragilizar a camada de impermeabilização à medida que esse lixiviado interage com a camada, ressaltando a importância de compreender como a camada de impermeabilização se comporta em campo, pois, nessa pesquisa indicou uma redução da resistência ao cisalhamento do solo com a presença de chorume.

Em termos gerais, sugere-se que os projetos de camadas impermeabilizantes usem como fundamentação, além dos resultados de ensaios realizados para obras geotécnicas tradicionais, ensaios em que seja utilizado o chorume como percolante, uma vez que esse percolante possui alta capacidade de alteração das propriedades hidromecânicas dos materiais.

4.3 Resumo da Compatibilidade das Misturas com os Fluidos Percolantes

Neste tópico será apresentada uma discussão resumo acerca da compatibilidade das misturas M1 e M2, com a presença dos fluidos percolantes, chorume e solução salina comparativamente à percolação com água destilada.

Knop (2007) reforça que as normas existentes não exigem que os ensaios para a verificação de adequabilidade de uma barreira impermeabilizante sejam realizados com o

lixiviado de campo ou solução sintética semelhante, sendo, portanto, o ensaio normalmente realizado com água, o que não representa o comportamento real do sistema. Desta maneira, torna-se necessário uma compilação dos principais resultados e os motivos associados dos parâmetros geotécnicos obtidos com a presença dos lixiviados deste estudo.

4.3.1 Chorume como fluido percolante

Neste tópico será apresentada uma análise do efeito do lixiviado chorume, obtido do aterro sanitário ASMOC, nas propriedades de permeabilidade, compressibilidade e resistência à compressão simples.

4.3.1.1 Influência do Chorume na Condutividade Hidráulica das Misturas

Os efeitos do lixiviado na permeabilidade do solo dependem principalmente da composição química do lixiviado, do tempo de contato do solo com o lixiviado e do tipo de solo. Observou-se neste estudo que:

- i. Na mistura M1 o chorume obtido do aterro sanitário do ASMOC como fluido percolante promoveu uma diminuição de 84,7% do coeficiente de permeabilidade em relação à utilização da água como fluido percolantes;
- ii. Na mistura M2 a presença do chorume como fluido percolante no ensaio de permeabilidade promoveu um decréscimo da condutividade hidráulica de 64% em relação à condutividade hidráulica com água.

Deste modo, o chorume, independentemente do tipo de mistura e de argilomineral presente, acarretou uma diminuição do k , em relação ao fluido percolado água. O chorume apresentou um pH básico, no valor de 8,4. A permeabilidade poderia ser gradualmente aumentada à medida que o chorume contenha partículas de solo dissolvidas em ácido, uma vez que o lixiviado ácido dissolve minerais argilosos e aumenta o espaço efetivo dos poros, o que não é o caso do chorume utilizado neste estudo.

Devido à elevada demanda bioquímica de oxigênio no chorume, sugere-se a presença de matéria orgânica elevada no efluente. A presença de sólidos em suspensão e microrganismos é um dos principais fatores que justificam a redução na condutividade

hidráulica das misturas. Redução na permeabilidade do solo ocorre principalmente devido à migração de fragmentos de partículas presentes no chorume, promovendo colmatção dos poros. A diferença de viscosidade entre chorume e água destilada também pode explicar a diferença de permeabilidade.

Na Tabela 33 estão retratados os principais resultados obtidos na literatura de pesquisa bibliográfica relacionados à influência do chorume na condutividade hidráulica de diferentes solos e misturas, além dos mecanismos associados aos resultados obtidos.

4.3.1.2 Influência do Chorume na Compressibilidade das Misturas

A análise da compressibilidade dos lixiviados ajuda na avaliação em termos de recalque do material utilizado como barreira impermeabilizante, após percolação de soluções presentes in situ. A partir de ensaios de adensamento oedométrico realizados a partir de corpos-de-prova das misturas M1 e M2 percolados com chorume, obteve-se que:

- i. Os índices de compressão e de expansão da mistura M1 após contato com o chorume foram, respectivamente, 61,8% e 30,8% maiores do que com água;
- ii. Para a mistura M2, os índices de compressão e de expansão após contato com o chorume foram, respectivamente, 16% e 3% maiores do que com água. Tal mistura tem mais cinza em sua composição, tendendo a ter uma redução de compressibilidade menor comparativamente à M1.

As reações químicas existentes entre o lixiviado e as misturas e o incremento do teor de argila e de material orgânico na presença do chorume são os principais responsáveis pelo aumento dos recalques por adensamento, promovendo maiores compressibilidades às misturas.

Na Tabela 33 estão compilados os principais resultados obtidos de pesquisa bibliográfica relacionados à influência do chorume na compressibilidade de solos e misturas.

4.3.1.3 Influência do Chorume na Resistência à Compressão Simples das Misturas

O lixiviado pode ajustar as propriedades de compactação, densidade e resistência dos solos. No entanto, a resistência varia com base nas características do lixiviado e no tipo de

solo. Conforme mencionado por Nanda *et al.* (2011), as propriedades geotécnicas do solo contaminado com lixiviados podem alterar com a profundidade e a classificação das amostras de solo.

Concluiu-se neste estudo que:

- i. A resistência à compressão simples da mistura M1 com água e chorume como fluidos percolantes obteve-se valores de 218,35 kPa e 186,34 kPa, respectivamente, o que representa um decréscimo de 14,7% de resistência do chorume comparativamente a água como líquido de inundação;
- ii. A resistência à compressão simples da mistura M2 com água destilada como percolante é de 127,44 kPa e com o chorume 118,54 kPa, um decréscimo de aproximadamente 7%.

A diminuição de resistência pode ser devido a alguns fatores, tais como às reações químicas existentes entre o lixiviado e as misturas, o que promove menores resistências; ao aumento do teor de argila nas misturas após a interação com o chorume; à diferença de viscosidade do chorume, que pode alterar os parâmetros de resistência das misturas; e argila poluída com chorume podem se dispersar devido a um processo corrosivo, promovendo diminuição no intercepto coesivo e, conseqüentemente, na resistência.

A compatibilidade solo-chorume em termos de resistência está refletida na Tabela 33.

4.3.2 Solução Salina como fluido percolante

A análise da influência da percolação da solução salina, nas propriedades de permeabilidade, compressibilidade e resistência à compressão simples das misturas será apresentada neste tópico.

4.3.2.1 Influência da Solução Salina na Condutividade Hidráulica das Misturas

Concluiu-se, neste estudo, a partir da percolação da solução salina nas misturas M1 e M2:

- i. Decréscimo em torno de 80% da permeabilidade em relação à percolação com água como fluido percolantes para a mistura M1.
- ii. Observou-se um decréscimo em torno de 45% da permeabilidade em relação à percolação com água como fluido percolantes para mistura M2.

O sódio da solução salina substitui o cálcio adsorvido no complexo de troca, causando a dispersão dos coloides do solo, e conseqüentemente, contribuindo para redução da condutividade hidráulica. Quanto maior a concentração de sódio no solo e mais baixa for a concentração de eletrólitos, maior será a dispersão das argilas, diminuindo a espessura da dupla camada difusa, o que também leva à floculação das partículas de argila e à alteração de sua microestrutura, fatores que juntos contribuem para redução da condutividade hidráulica e permeabilidade do solo.

O aumento da concentração de NaCl pode modificar, de acordo com Xu *et al.* (2020) a agregação da argila, aumento a rugosidade do material. Esse fenômeno é causado pela difusão dos íons sódio na superfície da argila, resultando na diminuição da repulsão eletrostática e no aumento da força de atração de *Van der Waals*. Além disso, com a percolação, vários tipos de sais são lixiviados, o que leva ao afrouxamento da estrutura com maior espaço poroso, o que justifica o aumento da permeabilidade com a solução salina.

Na Tabela 34 estão retratados os principais resultados obtidos na literatura de pesquisa bibliográfica relacionados à influência da solução salina na condutividade hidráulica de diferentes solos e misturas, além dos mecanismos associados aos resultados obtidos.

Tabela 33 – Tabela Resumo Compatibilidade Solo-Chorume

Compatibilidade solo-chorume: Influência na Condutividade Hidráulica			Mecanismos Associados
Autores	Tipo de Solo	Principais Resultados	
Ozoban et al. (2006)	Solo Argiloso	K aumentou de $9,848 \times 10^{-10}$ para $10,8 \times 10^{-10}$ m/s	A permeabilidade pode ser gradualmente aumentada à medida que o chorume contém partículas de solo dissolvidas com ácido, uma vez que o lixiviado ácido dissolve minerais argilosos e aumenta o espaço efetivo dos poros. Aumento da concentração de cátions ou a valência de cátions no lixiviado diminui a espessura da dupla camada de argila e as forças repulsivas, fazendo com que as partículas de argila floculem, aumentando a permeabilidade.
Nayak et al. (2007)	Solo Laterítico	K aumentou com intervalo de 4,3 a 52,5%	
George e Beena (2011)	Solo Laterítico	K aumentou de $2,7 \times 10^{-5}$ para $7,7 \times 10^{-5}$ cm/s	
Hamada <i>et al.</i> (2004)	Solo Arenoso	Redução na permeabilidade do solo, inclusive com atenuação da carga de contaminantes do lixiviado	A presença de sólidos em suspensão e microrganismos podem causar uma redução na condutividade hidráulica do solo. Redução na permeabilidade do solo ocorre principalmente devido à migração de fragmentos de partículas presentes no chorume, promovendo colmatção dos poros. A diferença de viscosidade entre chorume e água destilada também pode explicar a diferença de permeabilidade.
Soares (2012)	Solo bentonita	Uma redução no coeficiente de permeabilidade de duas vezes em relação à permeabilidade à água para a mistura de solo e 5% de bentonita e de 100 vezes para o solo natural.	
Li et al. (2013)	Argilo siltosa	K diminuiu com o tempo	
Costa (2019)		A condutividade hidráulica diminuiu com a percolação de lixiviado para ordens de grandeza entre 10^{-8} e 10^{-6} m/s, dependendo do gradiente hidráulico.	
Compatibilidade solo-chorume: Influência na Compressibilidade			
Autores	Tipo de Solo	Principais Resultados	Mecanismos Associados
Li <i>et al.</i> (2016)	Solo Argiloso	que a compressibilidade e a deformação compressiva de uma argila contaminada com diferentes concentrações de chorume aumentaram	As reações químicas existentes entre o lixiviado e as misturas e o incremento do teor de argila e de material orgânico na presença do chorume aumenta os recalques por adensamento, promovendo maiores compressibilidades às misturas
Soares (2019)	Solo Saprolítico	Os índices de compressão e de expansão do solo natural compactado foram, respectivamente, 19% e 28% maiores do que com água	

Continua

Continuação

Compatibilidade solo-chorume: Influência na Resistência			Mecanismos Associados
Autores	Tipo de Solo	Principais Resultados	
Sumil, Shrihari & Nayak (2009)	Solo argiloso	aumento no intercepto coesivo efetivo (c') e uma diminuição no ângulo de atrito interno efetivo (φ'), resultando em menores resistências ao cisalhamento.	
Soares (2012)	Solo bentonita	Aumento de 53% na coesão e um decréscimo de 15% no ângulo de atrito para o solo natural; já para a mistura com 5% de bentonita houve um decréscimo de 12% da coesão e de 4% do ângulo de atrito	
Harun et al. (2013)	Argilo Arenosa	O intercepto coesivo reduziu de 156 para 55,44 KN/m ²	
Li et al. (2013)	Argilo siltosa	O intercepto coesivo diminuiu, mas φ aumentou com o aumento do lixiviado	
Ramírez, Gonzalez & Valencia (2017)	Solos Tropicais	Observaram-se mudanças no comportamento geomecânico do solo compactado, como a diminuição dos parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo	
Khodary, Negr e Tawfik (2018)		O comportamento da resistência de amostras contaminadas tende a diminuir com a contaminação	
Xu et al. (2018)	Solo argiloso	Aumento da porcentagem de lixiviado no solo diminuiu o valor de resistência ao cisalhamento do mesmo.	
			Reações químicas existentes entre o lixiviado e as misturas e o aumento do teor de argila nas misturas após a interação com o chorume podem causar redução da resistência. Além disso, pode-se ter uma redução de resistência devido à diferença de viscosidade do chorume e a redução no intercepto coesivo, uma vez que a estrutura da fração argila das misturas podem se tornar mais dispersa devido à corrosão do solo na presença de lixiviado

Fonte: Autor (2023)

4.3.2.2 Influência da Solução Salina na Compressibilidade das Misturas

A partir de ensaios de adensamento oedométrico realizados com corpos-de-prova das misturas M1 e M2 percolados com solução salina observou-se uma redução da compressibilidade, obtendo-se que:

- Os índices de compressão e de expansão da mistura M1 após contato com a solução salina foram, respectivamente, 15,0% e 23,1% menores do que com água.
- Com relação à M2, após contato com a solução salina os índices de compressão e de expansão foram, respectivamente, 10,0% e 13,6% menores do que com água.

A característica de compressão das amostras depende do tipo de cátion e também da concentração de sal. Ao aumentar a concentração de sal, as compressibilidades diminuem à medida que ocorre a redução na espessura da dupla camada difusa devido ao emprego de solução salina na preparação da amostra.

Na Tabela 34 estão compilados os principais resultados obtidos de pesquisa bibliográfica relacionada à influência da solução salina na compressibilidade de solos e misturas.

4.3.2.3 Influência da Solução Salina na Resistência à Compressão Simples das Misturas

Concluiu-se neste estudo, a partir dos ensaios de resistência à compressão simples realizados com corpos de prova das M1 e M2 percolados com solução salina incrementos de resistência para o teor de sal investigado, obtendo-se que:

- A utilização da solução salina como fluido percolantes promoveu um acréscimo da resistência da mistura M1, apresentando um pico de resistência de 186,34 kPa, um acréscimo de 9,14% de resistência;
- Já na mistura M2, foi apresentado um pico de resistência de 140,71 kPa, que corresponde a acréscimo de 10,41% de resistência.

O aumento da concentração da solução salina altera a rugosidade superficial e a área superficial específica das misturas, o que produziria maior interação entre os grãos, contribuindo para o aumento da resistência das misturas. Além disso, com a presença de solução salina, a estrutura do solo pode tornar-se mais flokulada devido à redução da repulsão interpartículas, resultando em maior resistência ao cisalhamento. Ademais, a composição química das soluções é um parâmetro importante que afeta consideravelmente a relação tensão-deformação de solos bentoníticos, de modo que o pico de resistência ao cisalhamento da montmorilonita foram significativamente afetados pela composição química da água intersticial.

A compatibilidade solo-solução salina em termos de resistência está refletida na Tabela 34.

Tabela 34 – Tabela Resumo Compatibilidade Solo-Solução Salina

Compatibilidade solo-solução salina: Influência na Condutividade Hidráulica			
Autores	Tipo de Solo	Principais Resultados	Mecanismos Associados
Quirk & Schofield (1955)	Solo argiloso com soluções de 1,0 mol L ⁻¹ de NaCl, 0,0316 mol L ⁻¹ de MgCl ₂ e 0,01 mol L ⁻¹ de CaCl ₂	O cloreto de sódio foi o sal que mais afetou a condutividade hidráulica, tornando o solo quase impermeável quando lixiviado com uma solução de 0,01 mol L ⁻¹ .	A maior concentração de sódio aumenta a dispersão das argilas, diminuindo a espessura da dupla camada difusa, o que também leva à flocculação das partículas de argila, contribuindo para redução da condutividade hidráulica das misturas. Além disso, aumento da concentração de NaCl pode modificar, a agregação da argila, aumentando a rugosidade do material. Com a percolação da solução, vários tipos de sais são lixiviados, o que leva ao afrouxamento da estrutura com maior espaço poroso, o que justifica o aumento da permeabilidade com a solução salina.
Ismael (1993)	silte arenoso	O coeficiente de permeabilidade aumentou de 1,75-10-5 m/s para 3,5.10-5	
Xu et al. (2020)	solo loess	A condutividade hidráulica saturada de loess remodelado aumenta com o tempo em resposta a diferentes concentrações de cloreto de sódio. Para as concentrações de NaCl de 0,001, 0,0025, 0,005, 0,01 e 0,1 mol.L ⁻¹ , os valores médios de K sat foram de até 1,20, 1,22, 1,26, 1,33 e 1,53 vezes maiores, respectivamente, que os da água deionizada.	
Compatibilidade solo-solução salina Influência na Compressibilidade			
Autores	Tipo de Solo	Principais Resultados	Mecanismos Associados
Alawaji (1999)		Os parâmetros de expansão e de compressibilidade dos solos usando várias concentrações de Ca(NO ₃) ₂ e NaNO ₃ diminuíram com o aumento da concentração de sal	
Vanda (2014)	Solo Argiloso	diminuição nos parâmetros de consolidação (Cc e Cs) quando a concentração de sal aumenta	
Shariatmadari, Yazdanpanah e Saetdijjam (2014)	Solo Bentonita	Ao estudar o efeito da solução de cloreto de sódio (em concentrações de 0,05, 0,1, 0,5 e 2 mol/l) observou-se que um pequeno aumento na concentração da solução reduz a expansão da bentonita e a compressibilidade da bentonita foi reduzida pelo aumento da concentração de cloreto de sódio na solução.	Ao aumentar a concentração de sal, as compressibilidades diminuem à medida que ocorre a redução na espessura da dupla camada difusa devido ao emprego de solução salina na preparação da amostra
Dutta e Mishra (2016)	Solo Bentonita	diminuição índice de compressibilidade de bentonitas na presença de soluções salinas.	
Aljanabi (2017)	Solo Argiloso	Ao aumentar a concentração de sal, o valor de Cc diminuiu	

Continua

Continuação

Compatibilidade solo-solução salina Influência na Resistência			Mecanismos Associados
Autores	Tipo de Solo	Principais Resultados	
Nacini e Jahanfar (2011)	argila compactada de baixa, média e alta plasticidade	aumenta até cerca de 40% a resistência ao cisalhamento não drenada de NaCl compactado até 20g/l, devido a mudanças na estrutura química da argila e, em seguida, diminui ligeiramente até 100g/l de NaCl devido à flocculação de sal.	A solução salina promove uma alteração na estrutura química da argila, modificando a rugosidade superficial e a área superficial específica das misturas, o que produziria maior interação entre os grãos. Além disso, na presença de solução salina, a estrutura do solo pode tornar-se mais flocculada devido à redução da repulsão interpartículas, resultando em maior resistência ao cisalhamento.
Zhang, Sun e Jia (2016)	Solo Arenoso e bentonita submetidas a soluções de cloreto de sódio em diferentes concentrações (0,2, 0,5 e 1,0 mol/L).	Os resultados dos testes indicam que a resistência ao cisalhamento tem uma melhora notável com o aumento da concentração da solução salina.	
Zhang et al. (2016)	Areia e bentonita	resistência da bentonita pura e sua mistura de areia melhoraram consideravelmente em maior concentração de solução de NaCl	
Falcão et al. (2017)	solo silto argiloso, com adição de concentrações salinas com 10 g/l e 30 g/l	ao analisar a amostra com maior concentração salina, percebe-se que há um ganho de resistência não drenada em torno de 48,82% em relação à amostra sem sal e 58,12% em relação a de 10g/l.	
Elkady e Al-Mahbashi (2017)	solo bentonita	o pico de resistência ao cisalhamento da bentonita saturada com água do mar com concentração de 4 mol/l foi marcadamente maior do que para a solução de concentração de 1 mol/l.	

Fonte: Autor (2023)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Camadas de argila compactadas têm sido projetadas visando minimizar o fluxo de contaminantes de lixiviados gerados em obras ambientais, como aterros de resíduos sólidos e barragens de rejeito, formando uma espécie de linha de defesa à percolação do contaminante. O dimensionamento deste tipo de estrutura, tradicionalmente, leva em conta os aspectos geotécnicos, como permeabilidade, resistência e compressibilidade, desprezando a influência da passagem do fluido percolante na variação destas propriedades geotécnicas da camada argilosa compactada. Verificou-se que poucos estudos vêm sendo desenvolvidos do ponto de vista a abordar a interação de solos com diferentes fluidos percolantes e como esta interação pode alterar as características do meio e influenciar o comportamento do material e, conseqüentemente, a interação solo-estrutura.

Diante disto, este estudo objetivou avaliar a influência de diferentes fluidos percolantes em solos finos naturais e misturas de argila e resíduos de termelétrica, visando verificar quais variações observadas são mais significativas, sobretudo nas propriedades mecânicas e hidráulicas. Concluíram-se, de acordo com os resultados encontrados, que as misturas de solos argilosos com cinzas não apresentam compatibilidade com o fluido percolantes, alterando as propriedades hidromecânicas. A interação do chorume com ambas as misturas estudadas fragiliza a camada de impermeabilização, com uma redução da resistência ao cisalhamento e aumento da compressibilidade das misturas, ressaltando-se a importância de compreender como a camada de impermeabilização se comporta em campo. Já a solução salina, promove diminuições da compressibilidade e incrementos de resistência para a concentração utilizada, promovendo, assim, melhorias na camada de impermeabilização. No entanto, todas as misturas quando percolados por diferentes fluidos aqui testados apresentaram uma diminuição da permeabilidade do compósito que é uma propriedade fundamental em um projeto de *liners*.

Esta pesquisa contribuiu, assim, para o entendimento da influência dos fluidos percolantes chorume e solução salina na variação das propriedades geotécnicas de camadas argilosas, tendo como enfoque a aplicabilidade das misturas propostas em barreiras impermeáveis.

5.1 Principais Constatações

As principais constatações obtidas neste estudo estarão subdivididas em: Conclusões acerca da Caracterização Físico-Química, Mineralógica, Ambiental e Geotécnica dos Solos e Misturas Investigados, Conclusões acerca da Aplicação dos Materiais e Misturas como Liners e Conclusões acerca da Compatibilidade entre Misturas e Fluidos Percolantes.

5.1.1 Conclusões acerca da Caracterização Físico-Química, Mineralógica, Ambiental e Geotécnica dos Solos e Misturas Investigados

A partir dos ensaios realizados de caracterização físico-química e mineralógica e caracterização geotécnica e ambiental para solos e misturas investigados, foi concluído que:

- i. A partir dos resultados de condutividade elétrica, observou-se que as cinzas são os materiais que apresentam o valor mais elevado (8,11 dS/m), enquanto a caulinita apresenta o menor valor de condutividade elétrica, de apenas 0,13 dS/m. A condutividade elétrica da bentonita foi de 2,76 dS/m, 66% inferior a das cinzas de carvão;
- ii. Os resultados de pH mostraram a alcalinidade característica das cinzas de carvão mineral (pH de 8,3) e da bentonita (pH de 9,9). Já a argila caulinítica foi considerada moderadamente ácida, com pH de 5,5;
- iii. Pela análise química realizada no chorume, concluiu-se a presença de elevadas concentrações de cloreto (2543,1 mg/L) resultado em consonância com os obtidos por outros autores;
- iv. A partir das análises termogravimétricas, concluiu-se que as perdas de massa para as cinzas, bentonita e argila caulinítica foram, respectivamente, de -0,21%, -11,57% e -5,71%. Em virtude das baixíssimas perdas observadas, inferiu-se-se que as cinzas de carvão utilizadas apresentam baixas quantidades de água livre e material orgânico em sua composição;
- v. A densidade das partículas sólidas da bentonita (densidade de 2,72) foram maiores do que a do solo caulinítico natural (densidade de 2,69) e estes maiores do que a da cinza pura (densidade de 2,45), valores em consonância com dados obtidos de literatura.

Observou-se também que, a partir da análise granulometria, as cinzas são materiais essencialmente finos, apresentando 95% de siltes e 1% de argila.

- vi. A análise granulométrica do solo caulínico e da bentonita mostrou que os materiais são predominantemente constituídos de partículas com dimensões inferiores a 0,0075mm, características de solos finos;
- vii. Com relação aos limites de Atterberg, concluiu-se que as cinzas caracterizadas foram apresentadas como não plásticas (NP), dada a característica granular do material. A bentonita apresentou índices de plasticidade de, aproximadamente, 466%, sendo, conforme Lemos (2006) classificada como bentonita sódica de média qualidade para uso em barreiras estabilizantes;
- viii. Constatou-se, a partir da análise granulométrica e dos ensaios de limites de consistência que todos os solos e misturas analisados eram constituídos de material fino, sendo a caulinita e a bentonita classificados como argila de alta compressibilidade e as cinzas como siltes de baixa compressibilidade;
- ix. Em relação aos ensaios de compactação Proctor, concluiu-se que o teor de umidade ótimo variou de 18,6% (em misturas com 20% de cinzas e 80% de caulinita) a 39,1% na bentonita. O maior teor de umidade ótimo da bentonita é justificável diante da absorção de água pela bentonita durante o processo de homogeneização da mistura;
- x. No que se refere aos ensaios de permeabilidade com água destilada como fluido percolante, a caulinita apresentou um coeficiente de $6,50 \times 10^{-8}$ cm/s. Já as cinzas apresentaram uma permeabilidade de $8,50 \times 10^{-5}$ cm/s. As misturas idealizadas (80C20B e 20C80CAU) também apresentaram baixas permeabilidades ($1,79 \times 10^{-7}$ e $8,89 \times 10^{-8}$ cm/s, respectivamente).

5.1.2 Conclusões acerca da Aplicação dos Materiais e Misturas como Liners

No que refere à aplicabilidade dos materiais e misturas idealizados com barreiras impermeabilizantes, concluiu-se que:

- i. As cinzas puras, apesar de terem apresentado um elevado teor de finos, predominando partículas de dimensão próxima a do silte, não apresentou condutividade hidráulica desejada para as aplicações dela isoladamente como material impermeabilizante;

- ii. A bentonita e o solo caulinítico em sua forma natural apresentam permeabilidades adequadas para utilização em barreiras impermeáveis, com coeficientes de permeabilidades menores do que 10^{-7} cm/s;
- iii. A mistura M1 (20C80CAU) apresentou permeabilidade adequada para utilização como *liners*, conforme critérios da CETESB (1993), NBR 13896:97 e Potter e Yong (1993);
- iv. A mistura M2 (80C20B) apresentou permeabilidade da ordem 10^{-7} cm/s, também viabilizando sua utilização como barreiras impermeabilizantes. A partir da mistura M2 este estudo propôs uma mistura de elevado teor de resíduos industriais que apresentou viabilidade técnica para emprego como camadas de *liners*. Devido ao elevado percentual de cinzas nesta mistura, concluiu-se a viabilidade de uma destinação técnica e ambientalmente mais adequada aos resíduos de centrais termelétricas.

5.1.3 Conclusões acerca da Compatibilidade entre Misturas e Fluidos Percolantes

Evitar que o lixiviado contamine o subsolo e o lençol freático é uma das funções de uma barreira impermeabilizante, sendo necessário que haja garantia de seu desempenho mesmo após o contato com o lixiviado. Diante disso, a partir dos ensaios geotécnicos realizados com a percolação de chorume e solução salina nas misturas, concluiu-se que:

- i. A adição de bentonita presente na mistura M2 (80C20B) contribui para decréscimos em torno de 40% da resistência à compressão simples da mistura comparativamente à M1 (20C80CAU) utilizando-se a água como fluido percolantes;
- ii. O chorume como fluido percolante promoveu uma diminuição do coeficiente de permeabilidade nas misturas M1 (20C80CAU) e M2 (80C20B) de 84,7% e 64,0%, respectivamente, em relação à água;
- iii. Ao utilizar a solução salina como percolante, concluiu-se que houve um decréscimo da permeabilidade para as misturas M1 (20C80CAU) e M2 (80C20B) de, respectivamente, 80% e 45% em relação à percolação com água;
- iv. A compressibilidade das misturas com a percolação de chorume aumentou. Os índices de compressão e de expansão da mistura M1 (20C80CAU) após contato com o chorume foram, respectivamente, 61,8% e 30,8% maiores do que com água. Já para

- M2 (80C20B) os índices de compressão e de expansão obtidos foram, respectivamente, 16% e 3% maiores;
- v. Ao promover a lixiviação com solução salina, observou-se que as compressibilidades de ambas as misturas diminuíram. Os índices de compressão e de expansão da mistura M1 após contato com a solução salina foram, respectivamente, 15,0% e 23,1% menores do que com água. Já para M2 os índices de compressão e de expansão foram, respectivamente, 10,0% e 13,6% menores.
 - vi. Constatou-se, no ensaio de resistência à compressão simples um decréscimo de resistência das misturas M1 (20C80CAU) e M2 (80C20B) de 14,7% e 7%, respectivamente, com a presença do chorume;
 - vii. A utilização da solução salina como fluido percolante promoveu um acréscimo da resistência da mistura M1 e M2 de, respectivamente, 9,14% e 10,41% comparativamente à utilização da água como fluido percolante.

Em termos gerais, sugere-se, a partir dos resultados obtidos, que os projetos de camadas impermeabilizantes usem como fundamentação ensaios em que seja utilizado o chorume como percolante, diante da alta capacidade de alteração das propriedades hidromecânicas dos materiais. Pode-se sugerir também a adoção de fatores de segurança elevados nesses projetos quando dispostos em ambientes sujeitos a percolação de chorumes, como em barreiras impermeabilizantes dispostas em aterros sanitários.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se o desenvolvimento de novas pesquisas nesta área a fim de aumentar o nível de conhecimento acerca da interação solo e fluidos percolantes. Apresentam-se a seguir, algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- i. Avaliar o comportamento físico-químico, mineralógico e geotécnico de misturas com diferentes teores de bentonita, verificando-se a influência deste material propriedades hidromecânicas das misturas para uso em barreira impermeabilizante;

- ii. Analisar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas quando percoladas com outros tipos de líquidos percolantes, de modo a compreender a interação química entre diferentes fluidos e solos argilosos;
- iii. Proceder análises de resistência ao cisalhamento das misturas a partir de ensaios de compressão triaxial, haja vista a possibilidade de obter a envoltória de ruptura e, por conseguinte, da determinação dos parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de atrito) na condição drenada;
- iv. Realizar ensaios de expansão e de contração volumétrica nas misturas idealizadas para uso em barreiras impermeabilizantes, a fim de quantificar o aparecimento de trincas e fissuras nestas barreiras.

REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

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

_____. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação, 2016.

_____. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **ABNT NBR 10005**: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **ABNT NBR 10006**: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **ABNT NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

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

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

_____. **ABNT NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ACAR, Y. & OLIVIERI, I. Pore Fluids Effects On The Fabric And Hydraulic Conductivity Of Laboratory - Compacted Clay. Transp. Res. Rec. 1219, **Transportation Research Board**, Washington, D.C., 144 -159, 1989.

ACHARI, G. **Modified Bentonite And Fly Ash Bentonite Landfill Liners**. 1995. 305p. Tese doutorado – Department of Civil Engineering – Calgary, Alberta.

AHMED, A. Compressive Strength And Microstructure Of Soft Clay Soil Stabilized With Recycled Basanite. **Applied Clay Sciences**, p. 27-25, 2015

AKPE, E. I.; EBUNILO, P. O.; OKOVIDO, J. Geotechnical Evaluation Of Bentonite Clay For Municipal Solid Waste Landfill Lining Membrane. **Journal of Environmental Engineering Science**, 4, 3, p. 337-351, 2018.

AL WAHAB, R. M.; EL-KEDRAH, M. A. Using Fibers To Reduce Tension Cracks And Shrink/Swell In A Compacted Clay. In: **Geoenvironment Characterization, Containment, Remediation and Performance in Environmental Geotechnics**, New Orleans. Proceedings... ASTM STP n. 46, ASTM, v.1, 2v, p. 791-805, 1995.

ALAWAJI, H.A. Swell And Compressibility Characteristics Of Sand-Bentonite Mixtures Inundated With Liquids. **Applied Clay Sciences**. 15 (3), 411–430, 1999.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, CTG, UFPE. 364p.4, 2007.

AL-JANABI, K.R.M & ABDULLA, B.M. Consistency and Compressibility Characteristics of contaminated Compacted Clay liners. **Iraqi Journal of Civil Engineering**. 2017, Volume 11, Issue 2, Pages 1-8, 2017.

ALLEONI, L. F. F; MELO, V. F. **Química e Mineralogia do Solo**. Ed. SBCS. Viçosa, 2009.

AMADI, A., e ODEDEDE, O. Atenuação de contaminantes. Aterro lixiviado por solo laterítico aprimorado com bentonita. **Geomecânica e Geoengenharia**. 2019. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1670872> Vol.

ANSON, R.W.W., HAWKINS, A.B. The Effect Of Calcium Ions In Pore Water On The Residual Shear Strength Of Kaolinite And Sodium Montmorillonite. **G´eotechnique** 48 (6), 787–800, 1998.

AURINKO, H.; KUJALA, K. Comparision Of Mineral Liners Used In Landfill Construction. **Tenth International Waste Management and Landfill Symposium**, Proceedings, CDRom, 8p., S. Margherita di Pula, Itália, 2005.

AZAMBUJA, R.M.B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento- bentonita para aplicação em barreiras verticais de contenção de**

contaminantes. 2004.98 p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.

BARROS, K.S. **Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BATISTA, P. **Avaliação Geotécnica De Misturas De Um Solo Laterítico Com Cimento E Bentonita Para Uso Em Cortinas Verticais.** Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.

BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media.** American Elsevier. New York, 1972.

BELLEZZA, I.; PASQUALINI, E. Hydraulic Performance Of Soil-Cement Liners. In: **Geoenvironment.** Proceedings... Bouazza, Kadikara & Parker ed, Balkema, Rotterdam, 1997. p.271-276.

BENSON, C.H.; DANIEL, D. Influence Of Clods On Hydraulic Conductivity Of Compacted Clay. **Journal of Geotechnical Engineering,** New York, v.116, n.8, p. 1231-1248, 1999.

BENSON, C.H.; ZHAI, H.; WANG, X. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. **Journal of Geotechnical Engineering,** New York, v.120, n.2, p. 366- 387, 1994.

BIGARELLA, J.J., BECKER, R.D., PASSOS, E. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais.** Editora da UFSC: Florianópolis, v. 1, 875 p, 1996.

BOLT, G. H. Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays. **Géotechnique,** v. 6, p. 86-93, 1956.

BOSCOV, M. E. G. **Contribuição ao Projeto de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos** – Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.

BOSCOV, M.E.G. **Geotecnia ambiental.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

BOUAZZA, A.; JEFFERIS, S. & VANGPAISAL, T. Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet-dry cycles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25:3, p. 170-185, 2007

BOWDERS, J. J.; DANIEL, D. Hydraulic Conductivity Of Compacted Clay To Dilute Organic Chemicals. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, 113, n. 12, p.1432-1448, 1987.

BOYNTON, S.S.; DANIEL, D.E. Hydraulic Conductivity Tests On Compacted Clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.111, n.4, p. 465-478, 1985.

BRODERICK, G. P.; DANIEL, D. Stabilising Compacted Clay Against Chemical Attack. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, 116, n. 10, p.1549- 1567, 1990.

BUDHU, M., GIESE, R.F., CAMPBELL, G., BAUMGRASS,L. The Permeability Of Soils With Organic Fluids. **Canadian Geotechnical Journal**. v 28. p.140-147. 1991.

BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO, N.J. Soil Fiber Reinforcement: Basic Understanding. In: **International Symposium On Environmental Geotechnology**, 3., 1996, San Diego. Proceedings... v.1, p.878-884 ,1996.

CALVELLO, M., LASCO, M., VASSALL, R., Maio, C.D. Compressibility And Residual Shear Strength Of Smectitic Clays: Influence Of Pore Aqueous Solutions And Organic Solvents. Ital. **Géotechnique**. J. 1, 33–46, 2005.

CAMARGO, K.R. **Avaliação da Condutividade Hidráulica e da Resistência ao Cisalhamento de Misturas Solo-Bentonita: Estudo de Caso de um Aterro Sanitário Localizado em Rio Grande (RS)**. 2012. 85 p. Dissertação de Mestrado (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CARDOSO, J. J. B. **Estudo do inchamento de bentonitas sódicas e avaliação de inibidores pela difração de raios X**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. 1º ed., Campina Grande - Paraíba, Ed. Marcone. 1997. 310 p

CASTELLANOS, E., VILLAR, M.V., ROMERO, E., LLORET, A., GENS, A. Chemical Impact On The Hydro-Mechanical Behaviour Of High-Density FEBEX Bentonite. **Phys. Chem. Earth Parts A/B/C** 33, S516–S526, 2008.

CETESB- **Companhia de tecnologia e de saneamento ambiental de São Paulo**. Resíduos sólidos industriais. São Paulo/SP. 1993.

CHAPUIS, R. P. Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, v. 27, pag. 47-57.

CHEN, Y.G., ZHU, C.M., YE, W.M., CUI, Y.J., CHEN, B. Effects Of Solution Concentration And Vertical Stress On The Swelling Behavior Of Compacted GMZ01 Bentonite. **Applied Clay Sciences**. 124-125, 11–20, 2016.

COLLARES e VILAR. A influência do pH do Fluido de Saturação no Colapso dos Solos, **Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, v.1, p. 123-129, 1998.

CORRÊA, A. C. S. S. **Avaliação da capacidade de confinamento de solos tropicais: uma contribuição à escolha de novas áreas para disposição de resíduos sólidos urbanos**. 221p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

COSTA FILHO, E., da Silva Sobrinho, M., Maria Rodrigues GUILHERME, D., & Maria Marinho, M. **Estudo da Qualidade da Água Subterrânea na Área de Influência do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, Estado do Ceará**. Águas Subterrâneas. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28761>

CRISPIM, F. A. **Influência de Variáveis de Compactação na Estrutura dos Solos: Caracterizações Geotécnica, Química, Mineralógica e Microestrutural**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa 2010.

CRUZ, R. C. **Condutividade Hidráulica em Solos Contaminados Encapsulados**. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CUI, S.L., ZHANG, H.Y., ZHANG, M., 2012. Swelling Characteristics Of Compacted GMZ bentonite–sand mixtures as a buffer/backfill material in China. **Eng. Geol.** 141, 65–73.

CUI, Y.J. On The Hydro-Mechanical Behaviour Of MX80 Bentonite-Based Materials. **J. Rock Mech. Geotech.** 9 (3), 565–574, 2017

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**, 3 ed, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 678 p, 1978.

D'APPOLONIA, D.J. Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff. **Journal of the geotechnical engineering division**, New York, v. 107, n.4, p. 393 – 409, 1980.

DANIEL, D E et al. Predicting Hydraulic Conductivity Of Clay Liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 100, p. 285-300. 1984

DANIEL, D.E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**, London: Chapman & Hall, 1993. 683 p.

DANIEL, D.E.; BENSON, C.H. Water-Content Density Criteria For Compacted Soil Liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v.116, n.12, p. 1811- 1830, 1990.

DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. **Waste Containment Facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems**. New York: ASCE, 1995. 354p.

DE BRITO, Galvão, T.C. & SCHULZE, D.G. Mineralogical properties of a colapsible Lateritic soil from Minas Gerais, Brazil. **Soil Science**, Soc. Am. J., 60(6):1969-1978, 1996.

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

DI MAIO, C., SCARINGI, G. Shear displacements induced by decrease in pore solution concentration on a pre-existing slip surface. **Eng. Geol.** 200, 1–9, 2016.

DUARTE, R. P. S. PASQUAL, A. Avaliação do Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) em solos, plantas e cabelos humanos. **Energia na Agricultura**, vol. 15, n° 1. p. 46-58, 2000.

DUTTA J; MISHRA A.K. A Study On The Influence Of Inorganic Salts On The Behaviour Of Compacted Bentonites. **Applied Clay Sciences** 116–117:85–92, 2015

ELIAS, D. S. **Aproveitamento de resíduos sólidos - estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. 2015.

ELIAS, D. S.; SOARES, A. B.; SOUZA, H. P. Aproveitamento de Resíduos Sólidos - Estudo Experimental de Misturas de Solo e Cinza Volante de Carvão Mineral. In: **Congresso Brasileiro De Carvão Mineral**, V, Criciúma, SC, 2017. Anais. Criciúma, 2017.

ELIAS, D. S.; SOARES, A. B.; SOUZA, H. P.;. Caracterização geotécnica de cinzas de carvão mineral e sua utilização como barreiras impermeabilizantes. **Revista Matéria**, vol. 26, n. 3, 2021. DOI: 10.1590/s1517-707620210003.13005

ELKADY, T.Y., AL-MAHBASHI, A.M. Effect of solute concentration on the volume change and shear strength of compacted natural expansive clay. **Environ. Earth Sci.** 76 (14), 483, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional De Pesquisa De Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2º Edição. Rio de Janeiro. 212 p, 1997.

FALCÃO, P.R; EICHELBERGER, L.V; REMDE, M.Z; FAGUNDES, D.F. **Estudo do Efeito da Salinidade na Resistência não Drenada em Solo Artificial a base de Caulim**, CRICTE, 2017.

FAN RD, Du YJ, REDDY KR, LIU SY, YANG YL. Compressibility and hydraulic conductivity of clayey soil mixed withcalcium bentonite for slurry wall backfill: Initial assessment. **Applied Clay Sciences**. 101:119–127, 2014

FARIAS, E.R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2005.

FELEKOGLU, S.; TÜRKEL, K.H. Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash—Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, vol. 23, n° 5, pp. 2053–2061, 2009.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais**, v. 1. Ocina de Textos, São Paulo, 2016.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e Expansão de Solos Naturais não Saturados Devidos à Inundação**. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, 1995.

FILHO, E. I. F.; FRANCELINO, M. R. **Solo como sistema trifásico** (Apostila). Viçosa: UFV. 2001. 41p.

FIREMAN, M. Permeability Measurement on Disturbed Soil Sample. **Soil Science.**, 58, 337 – 55, 1944.

FOLKES, D. J. Fifth Canadian Geotechnical Colloquium: Control of contaminant by the use of liners. **Canadian Geotechnical Journal**, 19(3), pp.320-344, 1982.

FRANÇA, F.F.; DOURADO, A.K; VILAR, O.M. Aspectos da expansão de geocompostos bentoníticos. **V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos**, CDRom, 5p, Pernambuco, Brasil, 2007.

FRANCISCA, F. M.,GLATSTEIN, D. A. Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate. **Applied Clay Science**, v. 49, p. 187-193, 2010.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. Groundwater. Prentice-Hall, **Englewood Cliffs**, NJ. 604p, 1979.

FRITZ, B. & TARDY, Y. (1976) Prediction of mineralogical sequences in tropical soils by theoretical dissolution model. **1st International Congress on Water-Rock Interaction**, Praga, 409-416.

GEORGE M, BEENA KS (2011) Geotechnical Characteristics Of Leachate-Contaminated Lateratic Soil. **Proceedings of Indian Geotechnical Conference**, Koch, pp 769–772

GHAFOORI N., BUCHOLC J. Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete. **ACI Materials Journal**, Vol 94, No 2, pp 90-101, 1997.

GLEASON, M. H.; DANIEL. D. E.; EYKHOLT, G. R. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, ASCE, v.123, n. 5, p.438-445, 1997.

GOETHE, C.A. **Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da usina termelétrica de Jacuí – RS**. Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral. Anais. Florianópolis, Santa Catarina, 1990.

GRAHAM, J.; SAADAT, F.; GRAY, M.N.; DIXON, D.A.; ZHANG, Q.Y. Strength and volume change behaviour of a sand-bentonite mixture. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 26, n. 2, p. 292-305, 1989.

GRIM, R. M. **Clay mineralogy**. 2 ed. New York: McGraw-Hil Book Company, New York, 1968.596p.

GUO, Y.H., YANG, T.X., LIU, S.F., 2001. Hydrogeological characteristics of Beishan preselected area, Gansu province for China's high-level radioactive waste repository. **Uranium Geol.** 17, 184–189 (in Chinese).

GURJÃO, C. M. C. **Estimativa de propriedades geoambientais de camadas impermeabilizantes de solos tropicais**. 2005. 257p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

HAJELA, R.B; BHATNAGAR, J.M. Applications of rheological measurements to determine liquid limit of soils. **Soil Science**, vol. 114(2), Ago. 1972, pp.122- 130.

HAMADA, J.; CALÇAS, D.A.N.Q.P.; GIACHETI, H. L. (2004) – **Influência da compactação de um solo arenoso na infiltração e retenção de carga orgânica de chorume**. 23º Congresso Brasileiro de Eng. Sanitária e Ambiental.

HAN, D. Use potential of fly ash-residual soil mixture as a dyke material. **Env Geotec**, 721-726, 1996.

HARUN NS, RAHMAN AZ, RAHIM AS, LIHAN T, IDRIS RMW. Effects of leachate on geotechnical characteristics of sandy clay soil. **AIP Conf Proc** 1571:530–536, 2013.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HOLMES, N.; O'MALLEY, H.; CRIBBIN, P.; MULLEN, H.; KEANE, G. Performance of masonry blocks containing different proportions of incinerator bottom ash. **Sustainable Mater. Technol.**, 8, pp. 14-19. 2006.

ISMAEL, N.F. Laboratory and Field Leaching Tests on Coastal Salt-Bearing Soils. **J. Geotech. Eng. ASCE** 1993, *119*, 453–470.

IWAI, Cristiano Kenji. **Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos**. 2005. 205 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90805>>.

JIA, D; SUN, D; ZHANG, L.. Effects Of Saline Solution And Sand Rate On Strength Of GMZ Bentonite[J]. **Journal of Shanghai University**. Natural Science Edition, 2018, 24(6): 1002-1013.

KALTEZIOTIS, N.; SARSBY, R.W.; ZERVOGIANNIS, H. Compacted Clay For Landfill Liners. In: **XII International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering**, 1994, New Delhi. Proceedings... v.4, 6v, p. 1591-1594.

KARNLAND, O., OLSSON, S., NILSSON, U., SELLIN, P., Experimentally Determined Swelling Pressures And Geochemical Interaction Of Compacted Wyoming Bentonite With Highly Alkaline Solutions. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 32, p. 275-286, 2007.

KEREN, R.; SHAINBERG, I.; KLEIN, E. Settling And Flocculation Value Of Sodiummontmorillonite Particles In Aqueous Media. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 52:76-80, 1988.

KHERA, R. P. Calcium Bentonite, Cement Slag And Fly Ash As A Slurry Wall Material. In: **Geoenvironment 2000** – Characterization, Containment, Remediation And Performance In Environmental Geotechnics,. 1995

KHODARY, S. M.; NEGM, A. M.; TAWFIK, A. Geotechnical properties of the soils contaminated with oils, landfill leachate, and fertilizers. **Arabian Journal of Geosciences**. [S.l.]: Springer Verlag. , 1 jan. 2018

KIATTIKOMOL, K.; JATURAPITAKKUL, C.; SONGPIRIYAKIJ, S.; CHUTUBTIM, S. A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. **Cement and Concrete Composites**, vol. 23, no. 4-5, pp. 335–343, 2001.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: Origem, características e qualidade**. 1983. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2003

KNOP, A. **Estudo do comportamento de Liners atacado por ácido sulfúrico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KNUDSEN, S., K. **Numerical investigation of ash deposition instraw-fired boilers – Using CFD as the framework for slagging andfouling predictions**. 2001. Tese de doutor

KOCH, D. Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cutoff walls. **Applied Clay Science**, v.21, Issues 1-2, p.1-11, 2002.

KOZICKI, P.; HARTY, S. Design and construction of soil-bentonite liners and two case histories. In: **First International Congress on Environmental Geotechnics**, Jul 1994, Alberta, Canada. Proceedings..., 1 v., p 713-719.

KRAUSKOPF, K. B. & BIRD, D. K. **Introduction to geochemistry**. 3a ed: McGraw-Hill. 647 p, 1995.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil mechanics**, SI version. New York, John Wiley and Sons Inc. 553 p. 1979.

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.

LAVOIE, F.L. Geocomposto Bentonítico em Bases de Aterros de Resíduos: Uma Visão Otimizada dos Recursos Naturais, **Revista Fundações & Obras Geotécnicas**, Ano 6, n. 66, pp. 32-33, 2016.

LEANDRO, R.P. **Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, SP, 2005.

LEFEBVRE, O.; MOLETTA, R. Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: a literature review. **Water Research**, v. 40, p. 3671-3682, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.027>

LEITE, J.C.; ZUQUETTE, L. Prevenção da contaminação e poluição de aquíferos: a utilização de liners. **Boletim de Geociências**, São Paulo, V.14 (1), p. 167 – 178, 1995.

LEMONS, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006

LENGEN, A.; SIEBKEN, J. **Geomembrane in the United State: A brief discussion**. New York: De Groat, Den Hoedt & Termaat, 1996.

LERMAN, A. Geothnical Processes: Water and Sediment Environments. **John Wiley & Sons**, Inc., New York, 1979.

LI, Jiang-shan; XUE, Qiang; WANG, Ping; LIU, L. Influence of leachate pollution on mechanical properties of compacted clay: A case study on behaviors and mechanisms, **Engineering Geology**, Volume 167, 2013, Pages 128-133, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.013>.

LINS, C. M. M., (2008). **Avaliação da Zeólita Natural para Aplicação em Barreiras Reativas Permeáveis no Tratamento do Lixiviado do Aterro da Muribeca/PE**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, CTG, UFPE. 130 p.

LIU, J.F., NI, H.Y., CAO, X.L., MA, L.K., GUO, J.N., CHEN, X. Laboratory Investigation On Gas Permeability Of Compacted GMZ Bentonite Under A Coupled Hydraulicmechanical Effect. **Eng. Geol.** 276, 105761, 2020.

LOCAT. J; DEMERS. D. Viscosity, Yield Stress, Remolded Strength, And Liquidity Index Relationship For Sensitive Clays. **Canadian Geotechnical Journal**, vol 25, 1988, p. 799-806.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Interpretação de Análise de Solo – Conceitos e Aplicações**. São Paulo: ANDA, 2004, 50 p.

LOPES, L. S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

LOVELL, C. W.; KE, T. C.; HUANG, W. H.; LOVELL, J. E. Bottom ash as a highway material. **Transportation Research Record**, n. 1310, p. 106-116, 1991.

LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do Teor de Bentonita na Condutividade Hidráulica e a Resistência ao Cisalhamento de um Solo Arenoso Utilizado como Barreira Selante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução à Geologia de Engenharia**. Santa Maria, Editora da UFSM, 2a ed, 1997, 284p.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, v.120, n.8, p.1387- 1393,1994.

MAN, A; GRAHAM, J; GULCK, J.V. Effect of Pore Fluid Chemistry on Strain-Softening Behaviour of Reconstituted Plastic Clay. In: **5th ICEG Environmental Geotechnics**, 2006.

McNEAL, B. L. & COLEMAN, N. T. The Effect of solution of soil hydraulic conductivity. *Proc., Soil Sc. Soc. of Amer.*, 1966. 30(3), 308-12.

MENDOÇA, R. M. G. **Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MESRI, G.; OLSON, R.E. Mechanisms Controlling The Permeability Of Clays. **Clays And Clays Minerals**, v. 19, 1971.

MING, Zhang et al. Experimental Study on the Mechanical Property of Loess Mixed with Bentonite-HDTMA. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, p. 1-9, 2021.

MISHRA, A.K., OHTSUBO, M., Li, L., HIGASHI, T. Effect of salt concentrations on the permeability and compressibility of soil-bentonite mixtures. **J. Fac. Agr. Kyushu U.** 50 (2), 837–849, 2005.

MITCHELL JK, Soga K. **Fundamentals of soil behavior**, 3rd edn. Wiley, New York, 2005.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. 2ª edição. Berkeley: John Wiley & Sons, 1993. 437 p.

MITCHELL, J.K.; HOOPER, D.R.; CAMPANELLA, R.G. Permeability of compacted clay. **Journal Soil Mechanics And Foundations Div.**, ASCE, 91 (SM4), p. 41 – 65, 1965.

MORANDINI, T. L. C. **Condutividade hidráulica e compatibilidade em combinações de solo tropical e bentonita para uso em barreiras**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

NAEINI, S .A; JAHANFAR, M. A. **Effect of Salt Solution and Plasticity Index on undrain Shear Strength of Clays**. 2011. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1058403>

NANDA H.S; SHIVARAJU R; RAMAKRISHNEGOWDA, C. Impact Of Municipal Solid Waste Disposal On Geotechnicalproperties Of Soil. **Proceedings Of Indian Geotechnical Conference**, Pp 715–716, 2011.

NARDI, J.V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura**. Tese: Mestre. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1975.

NASCENTES, C. R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa: Viçosa - MG, 2006 153 p.

NAYAK S, SUNIL BM, SHRIHARI S. Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. **Engineering Geology**, 2007. 94(3-4):137–144.

OLPHEN, H. Van. **An introduction to clay colloid chemistry**. New York: Jonh Wiley & Sons, 318p, 1977.

OLSEN, H.W. Hydraulic flow through saturated clays. **Clays and Clays Minerals**. v.9, n.2, p.131-161, 1962.

OLSON RE, MESRI G. Mechanism controlling compress-ibility of clays. **Journal of Soil Mechanics** 96(6):1863–1878, 1970.

OZCOBAN, MS, TUFEKCI ,N, TUTUS, S, SAHIN, U, CELIK, SO. Leachate removal rate and the effect of leachate on the hydraulic conductivity of natural (undisturbed) clay. **JSIR** Vol.65(03) 65:264–269, 2006

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.

PIEADADE JÚNIOR, C. R. C. **Análise da potencialidade de alguns solos não lateríticos para utilização em barreiras impermeáveis.** 2003. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo, Oficina de textos, 2006. 247 p.

POTTER, H. A. B.; YONG, R. N. Waste disposal by landfill in Britain: problems, solutions and the way forward. In: **International Symposium On Geotechnics Related To The Environment**, Bolton, Reino Unido. Anais [...], 1993, p. 41-48.

PÓVOA, R. F. **Simulação do comportamento de um solo artificialmente estabilizado com o modelo Cam Clay Estruturado Modificado.** 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

PREVITI, L. S.; LAVOIE, F. L., 2018. **Estudo do Comportamento da Bentonita Utilizada em GCL's (Geosynthetic Clay Liners) para Aplicação em Base de Aterros de Resíduos,** COBRAMSEG 2018.

QASIM, Syed R.; CHIANG, Walter. **Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment.** Routledge, 2017.

RAMÍREZ, A. Q.; GONZÁLEZ, Y. V.; VALENCIA, L. A. L. Effect of solid wastes leachates on a tropical soil. **DYNA (Colombia)**, v. 84, n. 203, p. 283–290, 1 dez. 2017.

RANGANATH R. V., BHATTACHARJEE B., KRISHNAMOORTHY S. Influence of Size Fraction of Pondered Ash on Its Pozzolanic Activity. **Cement and Concrete Research**, Vol 28, N° 5. pp. 746–761. 1998.

REGINATTO, A. R. e FERRERO, J. C. Collapse Potential of soils and soilwater chemistry, **Proceeding VIII Int. Conf. on Soil Mech. And Found., Engineering**, Moscou, v. 2-2, p. 177-183, 1993.

RHODE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil** – Aspectos técnicos e ambientais. Vol.1 Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

ROCCA, A.C.C. et al. **Resíduos sólidos industriais**. 2.ed. São Paulo. CETESB, 234p. 1993

ROCHA, J. C.; MALIK, C.; POZZOBON, C.; MAIA, M. S.; MAGRI, L.; XAVIER, S. M. T. **Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais**, 1999.

ROWE, K.R.; QUIGLEY, R.M.; HOOKER, J.R. **Clayey barrier systems for waste disposal facilities**. 1995. E&FN Spon (Chapman and Hall). London, UK, 385p.

ROWE, R.K. Barrier Systems. In: **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook**. Ontario, Kluwer academic publishers, 2000, chapter 25, p. 739 – 788

RYAN, C.R.; DAY, S.R. Soil-Cement-Bentonite Slurry Walls. In: M. W. O'NEILL; F. C.

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da industrial de papel**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

SANTOS, Gemelle Oliveira; MEDEIROS, Priscila de Alencar. Estudo Preliminar Da Qualidade Das Águas Subterrâneas Na Área De Influência Do Aterro Sanitário De Caucaia. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, [S.l.], aug. 2011. ISSN 2176-0144. Disponível em: <<http://www.conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/405/309>>. Acesso em: 14 jan. 2023. doi:<https://doi.org/10.21439/conexoes.v5i3.405>.

SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª edição. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda, 1989. 408 p.

SEED, H. B. & CHAN, C. K. Structure and strength characteristics of compacted clays. **J. Soil Mechanics and Foundations Division.**, 1959. 85(5), p.87-128.

SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. Caracterização do chorume do aterro sanitário de Bauru. In: **Congresso Interamericano De Engenharia Sanitária E Ambiental**, 27., 2000, Porto Alegre. Porto Alegre: ABES, 2000. p. 1-9.

SHACKELFORD, C. D.; BENSON, C. H.; KATSUMI, T.; EDIL, T. D.; LIN, L. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with no-standard liquids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, n. 2-4, p. 133-161, 2000. [https:// doi.org/10.1016/s0266-1144\(99\)00024-2](https://doi.org/10.1016/s0266-1144(99)00024-2)

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,

SHAIKH, H., GAIKWAD, H., KADAM, A. et al. Hydrogeochemical characterization of groundwater from semiarid region of western India for drinking and agricultural purposes with special reference to water quality index and potential health risks assessment. **Appl Water Sci** 10, 204 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01287-z>

SHARIATMADARI N, YAZDANPANA M, SAEIDIJAM S. The effect of sodium chloride solution on swelling, compressibility and permeability of bentonite. **Journal of Engineering Geology** 2014; 8 (3): 2261-2276

SHARIATMADARI, N.; SALAMI, M.; and FARD, M.K. Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers. **International Journal of Civil Engineering**, 9(2), pp.103-110, 2011.

SHARMA, H, D.; REDDY, K. R. **Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies**. John Willy & sons Inc., 968p. Hoboken, 2004.

SHARMA, H.D.; LEWIS, S.P. Waste containment system, waste stabilization, and landfills, desing and evaluation. **Wisley Interscience Publication**, p.588, 1994.

SILOS, V.R. **Influência da Salinidade no Comportamento Mecânico de Solos Compactados**. Trabalho de Conclusão de Curso, IGeo, UFRJ, 2010.

SILVA A. R. V.; FERREIRA H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v.3 n.2, p. 26-35, 2008.

SILVA, Thiago F. da. **Estudo de mistura de solos para a impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017

SIMON, H.S.; JEFFERY, J.M. An X-Ray Study of Pulverised Fuel Ash. **Journal of Applied Chemistry**. London, 1960.

SISINNO, C.L.S. Resíduos Sólidos e Saúde Pública. In: **Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: Uma Visão Multidisciplinar** (C.S. Sisinno & R.M. Oliveira, orgs.), pp.41-57, Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2000.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários**. 2012. 101 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOUZA, A. L. *et al.* Time domain reflectometry for studying potassium leaching in unsaturated soil columns. **Ciência Rural**, v. 39(4), p. 1219-1222, jul. 2009.

SRIDHARAN and RAO, Venkatappa. Mechanisms controlling the volume change of saturated clays and the role of the concept of effective stress. **Geotechnique**. 1973 23: 3, 359-382

SRIDHARAN, A., e JAYADEVA, MS. Double layer theory and compressibility of clays. **Geotechnique**, 32(2), 133 – 144, 1982

SRIDHARAN, A.; RAO, S.M. and MURTHY, N.S. Compressibility behavior of homoionized bentonites. **Geotechnique**, 36(4), 551-564, 1986.

SUDARNO, U; WINTER, J; GALLERT, C., Effect of varying salinity, temperature, ammonia and nitrous acid concentrations on nitrification of saline wastewater in fixed-bed reactors, **Bioresource Technology**, Volume 102, Issue 10, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.078>.

TEIXEIRA, W., TOLEDO M. C. M., FAIRCHILD, T. R., TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. Oficina de Textos. São Paulo. 568 p, 2003.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2. ed. New York, John Willey & Sons, 1967

THOMÉ, A.; KNOP, A. Movimento De Contaminantes No Solo. In: **II Simpósio Nacional De Uso Da Água Na Agricultura**, Passo Fundo, 2006.

TOWNSEND. Deep Foundations. An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance. **Geotechnical Special Publication N° 116**. . New York: ASCE, 2002, p.713-727.

UBALDO, M.O. **Uso de cinzas de carvão da composição de uma cobertura de rejeitos de mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos**. Dissertação M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, DET/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2018.

VILAR, O.M. **Mecânica dos solos – apostila de resistência ao cisalhamento**. São Carlos: EESC/ USP), 2005.196 P.

VILAR, O.M. Geossintéticos em Aplicações Ambientais. **IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos**, 2003, Porto Alegre, p. 18.

WATABE, Y, YAMADA, K, SAITOH, K. Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite. **Geotechnique** 61(3):211–219, 2011.

XIANG, G.S., XU, Y.F., YU, F., FANG, Y., WANG, Y. Prediction of swelling characteristics of compacted GMZ bentonite in salt solution incorporating ion exchange reactions. **Clay Clay Miner.** 67 (2), 163–172, 2019.

XU, P.; ZHANG, Q.; QIAN, H.; QU, W. Efeito da concentração de cloreto de sódio na permeabilidade saturada de loess remoldado. **Minerais**. 2020. <https://doi.org/10.3390/min10020199>

XU, S. *et al.* Microstructure and Triaxial Shear Testing of Compacted Clay Presented in Landfill Leachate. Proceedings of GeoShanghai. **International Conference: Geoenvironment and Geohazard**. [S.l.]: Springer Singapore, 2018. p. 289–297.

YAMASAKI, M.T. **Influência da salinidade do fluido na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Unesp/Bauru, São Paulo, 141 p, 2012.

YE, W.M., ZHANG, F., CHEN, Y.G., CHEN, B., CUI, Y.J. Influences of salt solutions and salinization-desalinization processes on the volume change of compacted GMZ01 bentonite. **Eng. Geol.** 222, 140–145, 2017

YEO SS, SHACKELFORD CD, Evans. Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills. **J Geotech Geoenviron Eng.** 131:1189–1198, 2005.

YILMAZ, G.; YETIMOGLU, T. and ARASAN, S. Hydraulic conductivity of compacted clay liners permeated with inorganic salt solutions. **Waste management & research**, ISWA, 26(5),464-73, 2008.

YONG, R.N.; MOHAMED, A. M O.; WARKENTIN, B. P. **Principles of contaminant transport in soils**. Amsterdam: Elsevier, 1992. 327 p.

Yonli, H. F., François, B., Toguyeni, D. Y. K., & Pantet, A. Hydro-mechanical behavior of two clayey soils in presence of household waste leachates. **Global Journal of**

Environmental Science and Management, 2022. (2), 169 - 182.
doi:10.22034/GJESM.2022.02.02

YOU-Huang Xiang et al. An α/β hydrolase family member negatively regulates salt tolerance but promotes flowering through three distinct functions in rice, **Molecular Plant**, Volume 15, Issue 12, 2022, Pages 1908-1930, ISSN 1674-2052.

ZANON, T.V.B. **Avaliação da contaminação de um solo laterítico por lixiviado de aterro sanitário através de ensaios de laboratório e de retroanálise de campo**. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, 2014.